

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тульский государственный университет»**

*На правах рукописи*



**ЯНОВ Евгений Сергеевич**

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

*Специальность 2.2.11.*

*Информационно-измерительные и управляющие системы*

**Диссертация  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Научный консультант:  
д-р тех. наук, профессор  
Михаил Сергеевич Воротилин**

Тула - 2024

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ .....	20
1.1 Развитие научного направления.....	20
1.1.1 Проблемы сущности, содержания и задачи технологического развития производственных систем.....	21
1.1.2 Общие вопросы управления технологическими системами машиностроительных производств.....	25
1.1.3 Повышение эффективности управления технологических систем.....	30
1.1.4 Подходы к повышению эффективности кадрового потенциала машиностроительных производств.....	34
1.1.5 Системный подход и теория самоорганизации ИИС.....	38
1.1.6 Методы математического моделирования ИИС.....	38
1.1.7 Анализ и описание сложных ИИС.....	41
1.1.8 Математическое и информационное обеспечение организации и управления технологическими системами.....	43
1.1.9 Повышение эффективности управления технологическими процессами механообработки .....	45
1.1.10 Методы и средства вибродиагностики .....	52
1.1.11 Развитие ИИС .....	53
1.2 Обзор коммерческих ИИС .....	57
1.3 Известные ИИС в стадии разработки .....	65
1.4 Сравнение ИИС, представленных на отечественном рынке.....	67
1.5 Выводы.....	75
2 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА СБОРА ИНФОРМАЦИИ ИИС НА	

ОСНОВЕ ВИБРОСИГНАЛА.....	77
2.1 Причины возникновения вибраций в процессе работы оборудования.....	78
2.2 Датчики вибрации.....	80
2.2.1 Анализ датчиков вибрации.....	80
2.2.2 Разработка различных вариантов датчиков вибрации.....	82
2.3 Исходные данные временных рядов технологического процесса..	88
2.4 Выбор методов статистического анализа временных рядов.....	90
2.5 Исследование вибрационного сигнала и формирование исходных данных для ИИС.....	96
2.6 Способ выбора места установки датчика вибраций.....	99
2.6.1 Анализ вибрации при обработке изделий на токарном оборудовании.....	100
2.6.2 Анализ вибрации при обработке изделий на фрезерном оборудовании.....	104
2.6.3 Анализ вибрации при обработке изделий на раскатно- деформирующем оборудовании.....	111
2.7 Контроль мощности, потребляемой оборудованием во время работы.....	124
2.7.1 Анализ отклонений питающего напряжения.....	125
2.7.2 Анализ перекоса фаз питающего напряжения.....	126
2.7.3 Разработка датчика тока для контроля мощности, потребляемой оборудованием во время работы.....	129
2.8 Построение устройства сбора информации.....	131
2.9 Устройство для обновления кода микроконтроллера датчиков ...	133
2.10 Выводы.....	136
<b>3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА     ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА В ИИС.....</b>	<b>138</b>
3.1 Построение математической модели ИИС.....	141
3.1.1 Обобщенная математическая модель ИИС.....	141

3.1.2	Математическая модель ИИС косвенного контроля состояния технологических систем.....	152
3.2	Разработка архитектуры ИИС .....	155
3.3	Разработка алгоритмов работы ИИС .....	163
3.4	Выводы.....	169
4	РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА В ИИС .....	170
4.1	Обработка информационных сигналов ИИС .....	170
4.2	Анализ отчетов .....	177
4.2.1	Суточные отчеты.....	181
4.2.2	Еженедельные отчеты .....	185
4.2.3	Ежемесячные отчеты .....	186
4.2.4	Сводный отчет.....	187
4.2.5	Метод контроля технологической дисциплины .....	189
4.3	Разработка метода анализа информационного сигнала на основе искусственных нейронных сетей.....	190
4.4	Модель прогнозирующей модели работы системы предиктивной аналитики .....	199
4.5	Выводы.....	203
5	МЕТОД НАЗНАЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОЙ ИИС.....	205
5.1	Описание примера технологического процесса .....	206
5.2	Исследование технологического процесса обработки детали «Корпус», тип 1 .....	208
5.3	Исследование технологического процесса обработки детали «Корпус», тип 2 .....	210
5.4	Оценка зависимости уровня вибрации от режимов резания.....	214
5.5	Оценка динамических параметров технологической системы .....	216
5.5.1	Черновое внутреннее растачивание.....	218
5.5.2	Чистовое внутреннее растачивание .....	224

5.5.3 Точение внутренней канавки.....	228
5.5.4 Нарезание упорной резьбы .....	233
5.6 Априорная оценки параметров обобщенной стохастической модели отказов режущего инструмента.....	237
5.7 Выводы.....	239
<b>6 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ, МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ.....</b>	<b>240</b>
6.1 Изготовление диагностического модуля .....	240
6.1.1 Порядок сборки диагностического модуля.....	241
6.1.2 Установка программного обеспечения.....	242
6.2 Порядок взаимодействия с панелью оператора.....	243
6.3 Контроль технологической дисциплины.....	245
6.4 Ретроспектива использования ИИС.....	251
6.4.1 Разрушение режущей пластины .....	251
6.4.2 Изменение режимов резания .....	253
6.4.3 Биение заготовки.....	257
6.4.4 Ослабление крепления электродвигателя .....	258
6.4.5 Отключение СОЖ во время обработки .....	258
6.5 Перспективы и тенденции развития ИИС .....	259
6.6 Выводы.....	261
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>263</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>266</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>297</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>376</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В .....</b>	<b>403</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....</b>	<b>408</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....</b>	<b>412</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е .....</b>	<b>415</b>

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

АМ – автокорреляционная модель.

АПК – аппаратно-программный комплекс.

АПК ИИ – аппаратно-программный комплекс с искусственным интеллектом.

АСУП – автоматизированная система управления предприятием.

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом.

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика.

БООРВ – блок оценки отклонений уровня вибрации.

БПФ – быстрое преобразование Фурье.

БФВ – блок формирования возмущений.

ИИ – искусственный интеллект.

ИИС – информационно-измерительная система.

ИИУС – информационно-измерительная и управляющая система.

ИНС – искусственная нейронная сеть.

ИО – исполнительный орган.

ИС – информационная система.

ИУ – информационное управление.

ИУС – информационная управляющая система.

КИИ – критическая информационная инфраструктура.

ЛА – летательный аппарат.

ЛЦОИ – локальные центры сбора и обработки информации.

ММВТО – математические модели вибрации технологического оборудования.

МНК – метод наименьших квадратов.

МЭМС – микроэлектромеханические системы.

ПИП – первичные измерительные приборы.

ПЛК – программируемый логический контроллер.

ПМП – предприятия машиностроительного профиля.

- ПС – производственная система.
- ПТО – программно-техническое обеспечение.
- ПТЭ – процессы технической эксплуатации.
- РИВС – распределенные информационно-вычислительные системы.
- СИУ – системы интеллектуального управления.
- СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость.
- СОЗ – системы, основанные на знаниях.
- СПИЗ – система–приспособление–инструмент–заготовка.
- СС – скользящее среднее.
- ССА – сингулярный спектральный анализ.
- СТЭ – система технической эксплуатации.
- СУБД – система управления базами данных.
- СЧПУ – система числового программного управления.
- ТО – технологическое оборудование.
- ТОиР – техническое обслуживание и ремонт.
- ТП – технологический процесс.
- УП – управляющая программа.
- УСПД – устройства сбора и подготовки данных.
- УСТО – управление состоянием технических объектов.
- ЦОИ – главный центр сбора и обработки информации.
- ЧПУ (CNC) – числовое программное обеспечение.
- ЧС – чрезвычайная ситуация.
- APS (Advanced Planning & Scheduling) – усовершенствованное планирование.
- BI (Business Intelligence) – бизнес-аналитика.
- CAD (Computer Aided Design) – система автоматизированного проектирования.
- CAE (Computer Aided Engineering) – система инженерного анализа.
- CAM (Computer Aided Manufacturing) – автоматизированная система подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ.
- CASE (Computer Aided Software Engineering) – средства автоматизации разработки программ.

CPN (Coloured Petri Net) – цветные сети Петри.

CRM (Customer Relationship Management) – система управления взаимоотношениями с клиентами.

DEC (Deep Embedded Clustering) – кластеризация на основе глубокого погружения.

DPA (Discrete Processes Automation) – цифровая автоматизация процессов.

EAM (Enterprise Assets Management) – система управления активами предприятия.

ERP (Enterprise Resource Planning) – планирование ресурсов предприятия.

GRU (Gated Recurrent Units) – управляемый рекуррентный блок.

HTTP (HyperText Transfer Protocol) – протокол передачи гипертекста.

IIoT (Industrial Internet of Things) – промышленный интернет вещей.

ISO – независимая неправительственная организация по разработке международных стандартов.

LSTM (Long Short Term Memory) – сеть с долговременной и кратковременной памятью.

MDA (Machine Data Acquisition) – система по сбору данных.

MDC (Machine Data Collection) – система мониторинга промышленного оборудования.

MES (Manufacturing Execution System) – система управления производством.

OLAP (OnLine Analytical Processing) – интерактивная аналитическая обработка.

PDM/PLM (Product Data Management / Product Lifecycle Management) – система управления данными об изделиях / жизненном цикле продукта.

PLC (Programmable Logic Controller) – контроллер с программируемой логикой.

RAD (Rapid Application Development) – методология быстрой разработки приложений.

RRN (Recurrent Neural Network) – рекуррентная нейронная сеть.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – диспетчерское управление и сбор данных.

SCM (Supply Chain Management) – управление цепочками поставок.

## ВВЕДЕНИЕ

**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 Лириан 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 T.J. Allan, H. Fujiwara, M. Guida, C. Kime, K. Kinoshita, S. Mallela, G.M. Masson, N. Packard, A. Perelson, J. Russel, S. Tolda, A.J. Truelove, А. Авиженис, А.Е. Акиндеев, Д.В. Александров, Г.А. Александров, Ю.П. Анискин, Е.Ю. Барзилович, Р. Барлоу, А.И. Берг, И.А. Биргер, В.Н. Богатилов, Г.Б. Бурдо, В.Н. Бурков, С.Н. Васильев, В.А. Ведешенков, В.Г. Воробьев, Э. Вошни, А.Л. Гапоненко, И.Б. Герасимова, И.Н. Герчикова, 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. Согомоян, 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.) и 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 объем диссертации – 417 страниц.

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

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

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

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

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

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

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

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

В приложении представлены акт калибровки датчика, пример суточного отчета, пример расчета 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.

# 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

## 1.1 Развитие научного направления

В условиях современного рынка машиностроительные производства сталкиваются с необходимостью повышения качества и снижения себестоимости выпускаемой продукции. Конкурентная среда предъявляет требования к непрерывному совершенствованию выпускаемых изделий с точки зрения внедрения новых продуктовых, технологических и организационных решений. Применяемые для этого методики бережливого производства, теории ограничений, построения «умного производства» и другие в большей степени затрагивают рассмотрение и изменение имеющихся производственных технологических систем.

Согласно ГОСТ 27.004-85 [1] технологическая система – совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций.

Стоит отметить, что в настоящее время технологические системы (станочное оборудование) создаются все более сложными и становятся взаимосвязанными только благодаря наличию такого основного звена, как человек. Примерно 20-30 % отказов систем напрямую или косвенно связаны с неправильно принятыми решениями; 10-15 % всех отказов непосредственно связаны с ошибками человека [2], поэтому на производстве возникают проблемы, которые нарастают как снежный ком.

Так как под понятием «эффективность машиностроительного производства» в диссертационной работе понимается способность или возможность предприятия использовать по максимуму имеющиеся в распоряжении ресурсы, то далее в настоящем разделе рассмотрены не только работы, посвященные развитию ИИС, но и научные направления, связанные с управлением производством (производственными системами) в целом и повышением его эффективности.

### 1.1.1 Проблемы сущности, содержания и задачи технологического развития производственных систем

Проблемы сущности производственных систем (ПС) заключаются в том, что в соответствии с [3] существует три подхода в описании их содержания. Так, в соответствии с [4, 5, 6] производственная система в широком ее понимании – это совокупность всех взаимосогласованных и взаимоувязанных элементов (подсистем), отвечающих за процессы улучшения, производства (изготовления), организации (управления), функционирующие на основе нормативно-правовых документов и специализированных знаний в области бизнеса. В общем виде ПС можно представить в соответствии с рисунком 1.1 [3].

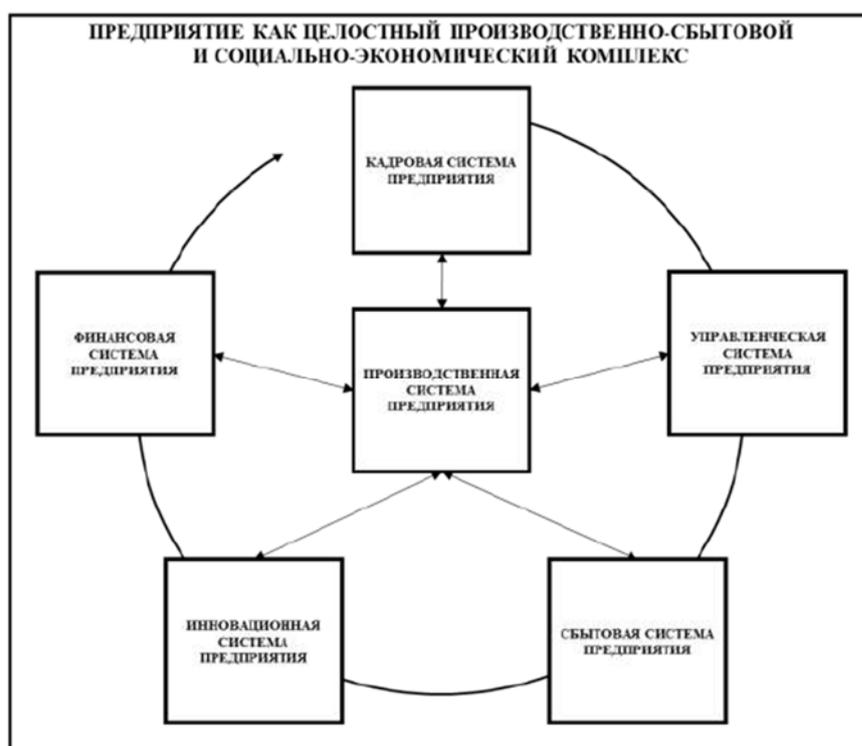


Рисунок 1.1 – Производственная система предприятия как целостная структура производственно-сбытового и социально-экономического комплекса [3]

В соответствии со вторым подходом производственная система трактуется как «система, включающая одного или более работников и производственное оборудование, работающих совместно для выполнения производственных функций в определенном рабочем пространстве, в рабочей среде, в условиях, определяемых

производственными заданиями» (ГОСТ Р ИСО 6385-2016) [7].

Третья позиция относится к философским сущностям и в этом случае «производственная система» определяется как «идеология хозяйствования» [8].

Как видно из представленного анализа, сама сущность производственной системы предприятия является сложной и многогранной, объединяющей в себе множество процессов, механизмов, средств и подсистем. Следовательно, ее развитие и отдельных ее частей также следует рассматривать комплексно, как рациональное использование всех имеющихся ресурсов.

А.Л. Гапоненко и А.П. Панкрухин [9] определяли развитие как движение вперед, формирование новых черт структурных характеристик объекта.

Однако следует отметить, что не всегда обладание предприятием каким-либо новым свойством может привести к развитию и его конкурентоспособности в сравнении с остальными.

Теорию конкурентоспособности в своих трудах изучали Р.А. Фатхутдинов [10], Н.З. Сафиуллин [11], Н.К. Моисеев [12] и другие.

Так, Р.А. Фатхутдинов [10] определяет конкурентоспособность как возможность удовлетворения определенного спроса потребителя с успешными финансовыми показателями, а Н.К. Моисеев [12] определяет конкурентоспособность предприятия как комплекс экономических характеристик предприятия, определяющих его позиции на отраслевом рынке.

Н.З. Сафиуллин [11] считает, что основой конкурентоспособности предприятия является конкурентоспособность производимого им товара. В свою очередь В.Е. Швец [13] полагает, что конкурентоспособность продукции определяется в первую очередь ее качеством.

В соответствии с основной идеей У. Шухарта [14] качество продукции напрямую зависит от изменчивости процесса, т. е. чем меньше изменяющихся факторов в ПС, тем выше качество изготавливаемой продукции. С целью обеспечения стабильности процесса и уменьшения вариаций У. Шухарт разработал циклическую модель принятия решений при управлении предприятием, которая разделяла

управление качеством на четыре стадии: планирование, реализация, проверка, корректирующие воздействия. Также для контроля качества продукции ученый разработал карты статистического контроля – «Контрольные карты Шухарта» [15], которые за счет максимального сокращения вариаций позволяли сосредоточить усилия на том, чтобы увеличить количество годных изделий.

С другой стороны, качество товара может определяться полезным эффектом продукции, который выражается в материальных и нематериальных факторах. Так, например, для выпуска товара с требуемыми качественными и количественными характеристиками необходимо также поддержание основного капитала предприятия на должном уровне.

Г.А. Александров [16], рассматривая вопросы, связанные с обновлением основного капитала (здания, технологическое оборудование и так далее) производственных предприятий и его влиянием на эффективность современной экономики Российской Федерации особое внимание уделял тому, что для достижения целей национальной безопасности в части увеличения в экономике доли производства высокотехнологичных товаров производственного назначения необходимо системно и планомерно проводить техническое перевооружение.

А.И. Мосалёв [17] в своих исследованиях проекты по техническому перевооружению определяет как процессные инновационные проекты, которые представляют собой уникально сформированный комплекс работ по организации и внедрению новых технологических решений в производственную деятельность, которые направлены на улучшение качества продукта или оказываемых услуг, повышение производительности труда и увеличение результативности производства в целом. Как отмечает сам автор, не все такие проекты могут привести к эффективности управления и развитию организации. Необходимы качественные и комплексные изменения во всех процессах предприятия.

Инновации в производстве изучают и многие зарубежные исследователи. Среди них видное место занимает ученый-экономист Г. Менш [18], который разработал классификацию нововведений, включающую следующие группы:

1. Базисные – инновации на крупных научных открытиях, которые могут быть двух видов:

- технологические – создают новые отрасли и рынки;
- нетехнологические – приводят к изменениям в социокультурной среде, методах управления, общественных институтах.

2. Улучшающие – сопутствующие базисным инновациям, действующие по принципу «эффекта мультипликатора», способствующие распространению базисных инноваций и приводящие к расширению новых отраслей и рынков.

3. Псевдоинновации – модификации улучшающего типа инноваций, которые позволяют достичь максимальной отдачи от вложенных в них ресурсов за короткий период времени. Способствуют расширению сферы применения инноваций.

Также Г. Менш [18] исследовал частоту научно-технических нововведений и доказал, что развитие инноваций начинается в фазе наиболее глубокой депрессии, что приводит к формированию новых отраслей экономики, обеспечивающих ускорение экономического роста.

В настоящий момент для развития ПС и повышения их эффективности и конкурентоспособности особое место в промышленных структурах занимают информационные и цифровые технологии.

Г.Ф. Пешков [19] выделял в качестве проблемных зон развития ПС планирование и стимулирование, являющиеся, по сути, проблемами экономического управления. Решение проблем ученый видел в развитии информационных систем, автоматизации процессов управления и планирования.

Дополнительно авторы [20, 21] также показали эффективность информационных технологий в повышении конкурентоспособности предприятий, которые включают в себя комплекс способов и инструментов поиска, накопления, переработки, хранения, передачи и защиты информации и знаний для реализации целей управления на базе программного обеспечения и средств вычислительной и телекоммуникационной техники.

С развитием таких технологий и внедрением во все сферы деятельности че-

ловека (управление, производство, научные исследования, потребительский сектор) ЭВМ, персональных компьютеров, оптоволоконных кабелей и глобальной информационно-коммуникационной сети для государственной безопасности возникает ряд угроз, главнейшей из которых является кибертерроризм и кибершпионаж [22, 23], что накладывает определенные ограничения на управляющие системы, особенно для наиболее ответственных операций в производстве.

Далее рассмотрим общие вопросы управления производственными системами, уделяя особое внимание информационным системам управления.

### **1.1.2 Общие вопросы управления технологическими системами машиностроительных производств**

Так как ИИС является инструментом управления производством, то стоит отметить, что отличительной особенностью систем управления машиностроительных производств в условиях постоянно ускоряющегося научно-технологического прогресса, темп роста которого в среднем увеличивается в два раза каждые пять лет, а также растущей конкуренции в данном секторе с резким ограничением внешних ресурсов ввиду санкционного давления является разработка и внедрение таких подходов и методов в управлении, которые будут отвечать требованиям внешней и внутренней среды, а также адекватно и эффективно реагировать на возникающие вызовы.

Существует много различных управленческих школ. Так, например, Г. Форд [24] разработал систему управления производством, основу которой составляли следующие принципы:

- сверхспециализация сотрудников и дробление технологического процесса на ряд операций, то есть рабочие места и оборудование располагались в строго отведенных местах и в определенной последовательности;
- применение поточной линии – конвейеров, что позволило перейти к массовому производству;
- охрана труда и его безопасность для создания оптимальных условий труда;

- высокая оплата труда;
- контроль за продолжительностью рабочего дня, в неделю рабочий должен работать 48 часов, но не более;
- управление рабочими и за пределами предприятия на базе системы стимулов с целью того, чтобы рабочие отказались от вредных привычек и неустроенного быта, которые мешали трудиться с полной отдачей [25].

Г. Форд также выступал против бюрократизации производства. На всех предприятиях отсутствовала административная структура, жесткие обязанности применительно к должностям, титулы и звания. В противовес Г. Форду Г. Минцберг [26] отмечал, что наибольший вклад в увеличение эффективности управления предприятием вносит бюрократия, для которой характерна стандартизация всех процессов организации. Такой вид бюрократии характеризуется высокой специализацией рутинных задач, формализацией процедур, большим количеством предписаний и правил, централизацией власти и четким разграничением функций подразделений компании, что в разы повышает результативность в случае выполнения большого объема простых однообразных операций с высокой точностью.

В настоящее время все большую популярность в развитии методологии управления приобретают следующие подходы: операционный, системный и ситуационный. Также в управлении выделяют ряд основных уровней (от низшего к высшему): контроль и учет, оперативный и стратегический.

Рассмотрим оперативный и стратегический уровни управления. Так, например, исследователи О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко, А.Л. Шестаков [27] рассматривали управление предприятием в условиях стабильности рынка и больших финансовых кризисов, когда ситуация нестабильна. Авторы отмечают, что уровень оперативного контроля играет существенную роль только в стабильных внешнеэкономических условиях. И наоборот, в ситуациях больших финансовых потрясений и кризиса на первую линию выступает стратегический уровень управления с целью сохранения гибкости реагирования на резко изменяющиеся условия. Так, например, на сегодняшний день в условиях финансово-экономической нестабильности, которая в настоящее время увеличивает темпы роста на фоне

санкций и внешнеполитической обстановки, наибольшую важность для производственных предприятий имеют управленческие механизмы, связанные с уменьшением затрат на энергопотребление, сырье и материалы.

Наибольший вклад в развитие теории стратегического управления внесли Г. Минцберг [26] и соавторы. В основе данной теории лежат постулаты стратегии, которая понимается как высшее проявление управленческой деятельности, состоящей из планов, принципов поведения, продуманных действий, позиции, перспектив («пять «П»). Еще одним видным ученым, продвигающим идеи стратегии в управлении предприятием был А.Д. Чандлер [28], который показал тесную взаимосвязь между стратегией и структурой, уделив особое внимание тому, что корпорация должна вначале определить свою стратегию и только затем – структуру.

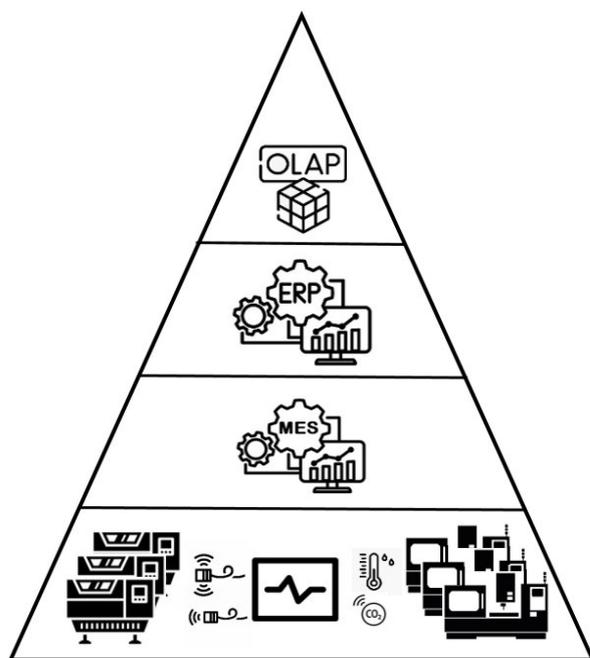
Одним из способов повышения эффективности управления на всех уровнях, а также повышения уровня стандартизации является, как было ранее указано, внедрение методов и средств моделирования и интеллектуализации производственных процессов, которые позволяют минимизировать издержки, повысить производительность без потерь качества продукции при условии динамично изменяющихся внешних и внутренних факторов.

В работах В.В. Кульбы совместно с В.В. Цыгановым [29, 30, 31] представлены исследования в области информационного менеджмента (управления). Было показано, что планирование и реализация информационного управления (ИУ) основаны на осознании и формулировке проблемы и генеральной цели, анализе существующей ситуации, определении целевой аудитории, исследовании ее характеристик, разработке концепции и дерева целей, выработке стратегии, программы, сценария, направления действий, методов и средств реализации ИУ, мониторинга, контроля и корректировки информационных воздействий.

Стоит отметить, что повышение эффективности эксплуатации ПС и эффективное управление машиностроительными производственными предприятиями – сложный процесс, требующий системного подхода и комплексных решений, при этом четко можно выделить следующие уровни ИУ: стратегический (стратегиче-

ского 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 управления различного уровня (рисунок 1.2) [32]: 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).



OLAP- или CRM-системы – для высшего руководства

ERP-системы – для руководителей финансовых подразделений, бухгалтерии и кадровых служб

MES-системы – для руководителей производственных, ремонтных и технологических служб

АСУТП – производственные цеха, участки, линии

Рисунок 1.2 – Иерархия систем управления предприятием

В.В. Кульба, В.Л. Шульц и другие [33, 34, 35] проводили исследования сценарного (ситуативного) подхода в стратегическом управлении в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС). Рассматривая системы оперативного управления в реальном масштабе времени при возникновении ЧС, авторы опирались на превентивное планирование в части предсказуемости возможных последствий и их устранения в

условиях жестко лимитированных ресурсов (временных, материальных, человеческих). Моделирование таких систем осуществляли методами целочисленного линейного программирования. Также было рассмотрено влияние методологии на действенность и результативность систем управления в условиях ЧС. В работах было показано, что наличие отработанной и широкой нормативной базы позволяет значительно повысить уровень адекватности и информационной достоверности разработанной многофакторной модели.

Д.В. Александров и К.С. Мышенков [36, 37, 38, 39] рассматривали для автоматизации процессов всех уровней управления структурно-функциональную методологию проектирования информационных управляющих систем (ИУС) с использованием CASE-технологий (Computer Aided Software Engineering) и соответствующего инструментария, в основе которой лежит декомпозиция системы на автоматизируемые функции, то есть на функциональные подсистемы, с дальнейшей детализацией на задачи. Критериями эффективности выбирались корректность и обоснованность принятых организационных решений в части планирования и обеспечения ресурсами всех процессов предприятия (бизнес-процессов и технологических), а также сокращение сроков реализации самих информационных систем (ИС). Предложенное Д.В. Александровым информационно-алгоритмическое обеспечение программного модуля мониторинга транспортировки газа по магистральному газопроводу позволяет на основе передаваемой информации с датчиков системы телемеханики не только выявлять нештатные ситуации с указанием места происшествия, но и на базе разработанных на аппарате CPN имитационных моделей процесса, сохраненных в репозитории, обеспечивать информационную поддержку принятия решений.

Р.И. Макаров и В.М. Макаров [40, 41], изучая системный подход в управлении с использованием интегрированных ИС, провели детальный анализ основных принципов, методов и технических средств, способных обеспечить надлежащий контроль и эффективное проектирование разрабатываемых информационных систем. В дополнение к исследованиям Д.В. Александра авторы показали, что для

оценки эффективности внедряемых ИС наиболее целесообразно использовать инструменты сбалансированной системы показателей (Balanced Scorecard, BSC). Кроме того, Р.И. Макаров и Е.Р. Хорошева провели сравнительную оценку технологий проектирования систем управления CASE и так называемой RAD (Rapid Application Development) – методологии быстрой разработки приложений. В своих исследованиях авторы показали, что применение RAD-технологий наиболее эффективны только при проектировании сравнительно небольших систем, разрабатываемых для вполне определенного предприятия. Для создания же типовых ИС, построения сложных расчетных программ, операционных систем или программ управления сложными инженерно-техническими объектами, а также для разработки систем в которых безопасность людей стоит на первом месте (транспортные системы, атомных электростанций и другие), RAD-методология абсолютно не применима, поскольку предполагается что первые версии системы не будут полностью работоспособны, что может привести к серьезным последствиям в виде масштабных нарушений функционирования предприятий.

Также Р.И. Макаров и Е.Р. Хорошева [42] провели оценку трех количественных методов обоснования выбора программно-технического обеспечения ИС: динамического функционального анализа на основе CPN, функционально-стоимостного анализа ABC, транзакционного анализа и конфигурационных карт. Указанные методы и средства положены в основу методологии расчета потребности средств программно-технического обеспечения (ПТО), интегрированных с ИС.

### **1.1.3 Повышение эффективности управления технологических систем**

Как было показано ранее, существуют различные подходы и методологии в проектировании управленческих систем различных уровней, оценка эффективности которых зависит от степени совершенства их организации и функциональной структуры. Однако даже при самом правильном проектировании, в котором были

учтены все ключевые параметры, система не может долгое время оставаться статичной, она требует постоянной модернизации ввиду беспрерывно изменяющихся условий и параметров внешней и внутренней среды.

Так, например, А.А. Ицкович, И.А. Файнбург, Г.Д. Файнбург [43] разработали комплексную методологию управления эффективностью процессов технической эксплуатации (ПТЭ) летательных аппаратов (ЛА), в основе которой лежит сочетание двух подходов:

- целевого, который позволяет разложить генеральную цель на ряд подцелей путем построения многоуровневой структуры целей;
- функционального, основанного на разделении и кооперировании труда.

Широкое применение во всех областях машиностроительного комплекса распределенных информационно-вычислительных систем (РИВС) в качестве управляющих приводит к увеличению рисков техногенных аварий, связанных как с ошибками в проектировании самих ИУС, так и возможными неполадками в обеспечивающих аппаратно-программных комплексах (АПК).

В результате в настоящий момент одной из ключевых задач повышения результативности проектируемых ИУС и ИИС является их устойчивость к сбоям и отказам, то есть возможность продолжения стабильного функционирования при возникновении допустимой совокупности неблагоприятных факторов, а также скорость выработки наиболее эффективного решения.

Одним из первых, кто ввел в своих трудах понятие «отказоустойчивость цифровых систем» был А. Авиженис [44]. В настоящее время разработан ряд технологий, повышающих эффективность управления, в части стабильности работы и скорости формирования управляющего решения.

Существует два подхода повышения уровня стабильности (безотказности) работы управляющих устройств:

- достижение свойства их резистентности к отказам;
- контроль правильности функционирования, то есть корректности выполнения заданных алгоритмов и вычислений.

Следует отметить, что отказоустойчивые структуры имеют гораздо большую

сложность технической реализации, чем системы с обнаружением неисправностей.

Так, например, для повышения уровня безотказности и снижения затрат на реализацию комбинационных схем Ю.Ф. Мухопад и другие [45, 46, 47, 48] использовали первый способ и разработали новый тип управляющего автомата по алгоритмам с предварительно преобразованной граф-схемой и мажоритарным резервированием по принципу «два из трех», в котором каждая из трех резервируемых схем разделена примерно пополам с переходами по единичному и нулевому значениям выбранного логического условия [49]. Таким образом, такое устройство характеризуется нечувствительностью к отказам внутренних элементов системы, при возникновении которых сохраняется правильность ее функционирования. Предлагаемый алгоритм позволил упростить и повысить стабильность функционирования сложных технических структур.

Е.В. Слабоков и Е.С. Согомоян [50] для повышения эффективности управления техническими системами рассматривали методы, с помощью которых обеспечивается контроль правильности функционирования, и использовали алгоритмы построения аппаратурных средств диагностирования на основе самопроверяемых вычислительных устройств. В таких устройствах или системе устройств на первое место выходит возможность обнаружения как в основной, так и в дополнительной аппаратуре (то есть в аппаратуре встроенного контроля) в процессе ее функционирования всех неисправностей определенного класса. Решение поставленной задачи исследователи видели в синтезе самопроверяемых схем встроенного контроля на основе структур дублирования одинаковых комплектов устройства [51].

Следует отметить, что при дублировании используются свойства кодов с повторением, то есть способность обнаруживать любые виды искажений в информационных потоках [52]. Структурная схема системы дублирования включает в себя блоки основной и контрольной логики, а также самопроверяемый компаратор [53]. Блок контрольной логики представляет собой либо реплику блока основной логики, либо устройство, синтезированное по иным принципам, но с теми же функциями. Компаратор – это, по сути, устройство сравнения значений на одноименных выходах блоков основной и контрольной логики.

В настоящий момент широкое развитие получили методы эволюционного моделирования и его направления (групповой учет, генетические алгоритмы), применяющиеся в различных задачах, таких как оптимизация программного обеспечения [54], генерация оптимальных управляющих решений [55], оценка надежности программного обеспечения [56], кластеризация программного обеспечения [57], выделение функциональности в виде программной и аппаратной компонент. Впервые понятие генетического алгоритма ввел Д. Холланд [58].

В.М. Курейчик [59, 60] на основе метода графов разрабатывал алгоритмы эволюционного проектирования электронных устройств, основа которых заключается в иерархическом конструировании численно-аналитических моделей. Исследователь предложил с целью максимизации эффективности символьного моделирования в общей структуре эволюционного проектирования включить метод решающих деревьев в иерархический метод декомпозиции в качестве подчиненного (рисунок 1.3). Такое решение позволило разбить схему на достаточно большие под-схемы, что привело к снижению временных затрат (в 10-15 раз) на формирование символьной модели для генерации наиболее эффективного решения.



Рисунок 1.3 – Подчиненная структура алгоритма декомпозиции

В соответствии с обзором [61] метод графов затруднителен в использовании для задач планирования и управления технических объектов в динамично изменяющейся внешней среде, информация о которой изменяется за короткий период вре-

мени. Для таких условий были предложены методы на основе клеточной декомпозиции, но их недостаток заключается в ограниченном количестве вариантов направления поиска оптимального решения, вызванных структурой сетки (только восемь вариантов соединения в двумерном случае). Для того чтобы обойти данное ограничение, S.J. Russel и P. Norvig [62] предложили расширенную версию алгоритма Дейкстры, который улучшен за счет использования меньшего количества клеток, так как в нем не планируется весь путь до цели, а также используются более эффективные расширения и сокращено количество расширенных узлов, что требует меньше времени на вычисления.

#### **1.1.4 Подходы к повышению эффективности кадрового потенциала машиностроительных производств**

Человек – неотъемлемое звено в технологической системе, он играет главную роль в организационной инновационной деятельности любого производства, при этом обладает своими личными интересами и корпоративными ожиданиями, которые необходимо удовлетворять в рыночных условиях. Одним из факторов, определяющих эффективность предприятия, является способность организации удовлетворять потребности своего персонала. Широкое применение современных технологий, автоматизированных поточных линий и новых форм организации производства повышает роль персонала в управлении производственными системами, поскольку усложняет технологические процессы и требует привлечения специалистов разного профиля и квалификации.

Таким образом, для эффективной системы управления производством необходимо обеспечить тесную взаимосвязь между тремя элементами: человек, орудие труда и предмет труда, что и представляет собой процесс организации труда.

Основы теории научной организации труда заложил в своих исследованиях Ф.У. Тейлор [63]. Его теория была направлена на рациональную эксплуатацию имеющегося на производстве человеческого капитала и на рационализацию труда кото-

рая включала в себя изучение и проектирование приемов и методов труда с использованием хронометражных наблюдений, улучшение организации рабочих мест, установление обоснованных режимов труда и отдыха и другие меры.

Френк и Лилман Гилберт [64] стали родоначальниками эргономики. Инженеры изучали основы оптимизации труда, основанные, в частности, на минимизации передвижений персонала на работе. Совместно супруги разработали методику для роста эффективности результатов производства («Система изучения движений»), в основе которой лежит подход по декомпозиции каждого движения работника на ряд микродвижений, называемых «терблиги». В дальнейшем Л. Гилберт [65] определила, что любую задачу можно разбить на 17 основных микродвижений, что позволило кардинально изменить подход к работе, значительно повысив ее эффективность как в промышленности, так и в домашнем хозяйстве.

По У. Шухарту [66] организация труда включала:

- выделение трех взаимосвязанных стадий в процессе контроля качества: разработка «спецификации» (технического задания) и установление допусков на параметры продукции; производство продукции, которая по своим параметрам удовлетворяет техническому заданию; контроль изготовленной продукции;
- ответственность за улучшение процессов предусматривалась на стадии составления планов, за выполнение которых несли ответственность и инженеры (конструкторы, технологи), и рабочие.

В соответствии с концепцией Э. Деминга [67] в организации труда решающим фактором, оказывающим наибольшее влияние на качество производимой продукции, является человек, его работа в команде, внутренняя мотивация, непрерывное обучение и стремление к постоянному самосовершенствованию.

Ввиду вышеизложенного можно выделить две основные задачи для построения рационального процесса организации труда [68]:

1. Установить и обеспечить устойчивые организационные взаимосвязи между всеми системами с их элементами на основе установленных правил и норм, контроля и оперативного регулирования.

2. Создать на основе принципов самоорганизации и самоуправления человеческой деятельностью необходимые организационно-технические, социально-экономические и психофизиологические условия для осуществления производственных процессов и их непрерывного улучшения.

Для решения поставленных задач необходимо наиболее эффективно использовать имеющийся на предприятии кадровый потенциал. В общем виде кадровый потенциал – это совокупность интеллектуального, профессионального, психофизического потенциалов, образа жизни, мобильности и мотивации сотрудников, которые могут быть использованы для достижения стратегических целей компании [69, 70].

Существует несколько научно-организационных подходов к решению проблем формирования кадрового потенциала, которые включают следующие аспекты:

- обоснование принципов развития кадрового потенциала. Это правила, основные положения и нормы, которым должны следовать руководители и специалисты в процессе развития кадрового потенциала [71];
- формирование организационно-экономического механизма развития кадрового потенциала. В.В. Травин [72] и В.А. Дятлов [73] рассматривали данный механизм в купе с оценкой результативности труда, обучением и ротацией персонала;
- реализация мероприятий в сфере управления кадрами. Они касаются всех уровней организации и обязательны к исполнению для достижения успеха в развитии кадрового потенциала и включают в себя: планирование, набор персонала, его отбор, создание системы обучения и повышения квалификации, создание системы мотивации труда;
- учет интересов предприятия и сотрудников. Качественное изменение и усовершенствование кадрового потенциала с учетом интересов предприятия и самих сотрудников позволяет добиться лучших результатов.

Указанные аспекты формируют кадровую политику предприятия. Так, по мнению В.В. Травины [72] и В.А. Дятлова [73], основной функцией кадрового управляющего является разработка и реализация кадровой политики, которой должны заниматься на всех уровнях управления организации. А.П. Егоршин [74,

75] в зависимости от уровня развития корпоративной этики внутри организации, а также степени ее открытости выделяет следующие виды кадровой политики: пассивную, реактивную, превентивную, активную, открытую и закрытую.

Одним из главных элементов кадровой политики в системе управления человеческим капиталом является формирование кадрового резерва, то есть концентрация интеллектуального и профессионального потенциала персонала. Существует три точки зрения по трактовке назначения данного инструмента в кадровой политике. Так, А.П. Егоршин [74] принижает назначение кадрового резерва, рассматривая его как один из методов подбора персонала.

В.В. Травин [72] и В.А. Дятлов [73] рассматривают кадровый резерв как средство для целенаправленной и непрерывной подготовки руководителей, составляющих ядро организации, с целью обеспечения надежной преемственности при замещении руководящих должностей структурных подразделений предприятия и сведения к минимуму риска назначения на должность работника, не соответствующего предъявляемым к нему квалификационным требованиям.

Ю.Г. Одегов [69] же рассматривает главную функцию кадрового резерва как быстрое накопление знаний и умений с целью своевременного и стабильного поддержания требуемого профессионального опыта и кадрового обеспечения организации подготовленными руководителями.

Не менее важно и психофизическое состояние персонала, которое является также одним из потенциалов. Однако, как отмечает Н.И. Шаталова [76], в настоящее время развивается новый вид патологии – информационные неврозы, возникшие при возрастающем потоке информации и дефиците времени для ее переработки, принятии ответственных решений, высоком уровне мотивации, субъективно переживаемой как чувство повышенной ответственности за выполняемую работу, за распоряжения, отдаваемые подчиненным.

Подводя итог сказанному, можно сделать следующий вывод: в условиях, когда личность в той или иной мере включена в систему общественного производства, психофизиологические элементы ее структуры обретают новое качество и превращаются в систему, обеспечивающую успешность трудового поведения.

### **1.1.5 Системный подход и теория самоорганизации ИИС**

Функционирование ИИС невозможно без системного подхода – метода исследования окружающего мира, при котором предметы и явления рассматриваются как части или элементы определенного целостного образования. Эти части, взаимодействуя друг с другом, формируют новые свойства конкретно взятого целостного образования (системы), отсутствующие у них по отдельности. Одним из направлений развития теории системного подхода является синергетика. Данный термин впервые ввел Г. Хакен [77].

В рамках данного направления развивается теория самоорганизации. Ее основная идея заключается в принципиальной возможности спонтанного возникновения порядка из беспорядка и хаоса в результате процесса самоорганизации. Это происходит при возникновении положительной обратной связи между системой (ИИС) и окружающей средой.

Главные условия самоорганизации: значительная удаленность системы от равновесия, открытый характер системы и взаимодействие между частями системы [77].

Также с теорией самоорганизации и эволюцией ЭВМ связана разработка фрактальной геометрии Б. Мандельброта [78] – геометрия самоподобных объектов (типа облака, кроны дерева, береговой линии). Ученый установил, что нерегулярные образования в природе (очертания берегов, горные цепи и т. д.) при изменении на незначительное деление шкалы не становятся более простыми, а сохраняют свой комплексный порядок.

### **1.1.6 Методы математического моделирования ИИС**

Наряду с теорией и экспериментом, математическое моделирование служит одним из основных средств познания и прогнозирования, проектирования и конструирования ИИС. Суть математического моделирования заключается в построении адекватных математических моделей изучаемых объектов безотносительно к конкретным областям приложений (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Схема вычислительного эксперимента

Основоположником отечественной школы математического моделирования является А.А. Самарский [79, 80, 81]. Кроме того, А.А. Самарский предложил триаду «модель – алгоритм – программа». Он подчеркивал, что начало новой эпохи развития и использования математических наук связано с бурным развитием и применением вычислительной техники. Ученый разработал различные способы построения и анализа математических моделей для разнообразных задач механики, физики, биологии, экономики, социологии на основе комбинации следующих методов и принципов: непосредственная формальная аппроксимация, интегро-интерполяционный метод, принцип полной консервативности, метод аналогий. И продемонстрировал на примерах возможность использования иерархического подхода к получению дискретных моделей и построение разностных схем с помощью вариационных принципов.

Петровский А.Б. изучал теорию принятия решений [82]. В своих трудах ученый разработал новые методы группового многокритериального выбора и анализа решений, предложил оригинальные подходы для представления и обработки разнородной и несогласованной информации. Кроме того, Петровский А.Б. [83, 84] активно развивал теорию мультимножеств, на основе которой предложил новые методы кластерного анализа, классификации и упорядочения многопризнаковых объектов по противоречивым данным, которые были применены для решения ряда практических задач.

А.П. Карпенко [85] исследовал методы и подходы эволюционного моделирования в гибридных системах, изучал метаоптимизацию и развивал направление глобальной оптимизации. В своих трудах ученый с использованием методов ландшафтного анализа предложил способ настройки алгоритмов оптимизации. Также исследователь провел систематизацию эволюционных операторов популяционных алгоритмов глобальной оптимизации [86]. Кроме того, А.П. Карпенко является одним из первых, кто предложил использовать средства эволюционного моделирования для решения прикладных задач планирования при выполнении работ в ИТ-проектах [87].

В.В. Курейчик и В.М. Курейчик [88, 89, 90] исследовали эволюционное развитие сложных систем и развивали методы и подходы распределенного искусственного интеллекта. Так, например, Курейчик В.В. и другие [91] предложили метод эволюционного моделирования, основанный на реализации целенаправленного процесса размножения и исчезновения, то есть размножению в модели соответствовало появление новых объектов, а гибели – их удаление из процесса в соответствии с определенным критерием естественного отбора (или селекции). На основе данного метода эволюционного моделирования с дополнением в виде гомеостатики и синергетики Курейчик В.В. предложил следующее решение оптимизационных задач: синергетика помогала создавать порядок из хаоса, а гомеостатика – добавлять обратные связи, которые помогали лицу, принимающему решения, воздействовать на процесс алгоритмизации для получения более качественных и перспективных решений.

Также методами эволюционного моделирования занимались и зарубежные исследователи. Так, пионером в данной области был А. Фрейзер [92], который занимался разработкой вычислительных моделей эволюционных систем и внес существенный вклад в компьютерное моделирование популяционной генетики, решая ряд прикладных задач, таких как прогнозирование результатов искусственного отбора.

N. Packard и A. Perelson [93] стали основоположниками нового направления в эволюционном моделировании – искусственные иммунные системы. Свои модели они строили на принципах функционирования человеческой иммунной системы для решения прикладных задач, таких как распознавание образов и оптимизация.

### 1.1.7 Анализ и описание сложных ИИС

Отличительным признаком любой ИИС является ее многофакторность и динамичность, то есть зависимость от условий внутренней и внешней среды.

Анализом и описанием сложных систем в рамках теории активных систем занимался В.Н. Бурков [94, 95, 96]. Отличительная черта данной теории заключается в учете человеческого фактора. В результате ученый предложил принцип открытого управления или принцип «честной игры», согласно которому при оптимальном режиме управления планы, устанавливаемые подсистемам, должны быть согласованы с их критерием эффективности. При таком механизме подсистемы заинтересованы сообщать достоверную информацию по своим критериям эффективности. Также ученый предложил метод агрегирования сетевых графиков и получил нижнюю оценку времени завершения проекта в условиях ресурсных ограничений.

Дополнительно к В.Н. Буркову анализом сложных систем занимался Б.Г. Ильясов [97, 98]. Ученый выделил триаду подходов [99], составляющих концепцию исследования сложных динамических систем. Предложенный подход позволил выявить системные закономерности в строении и функционировании сложной системы и провести ее первоначальную структуризацию.

Исследователь разработал когнитивную модель взаимодействия частных показателей, или системную иерархическую динамическую модель для различных технических систем, в основе которой лежат показатели нижнего уровня рассматриваемого компонента, а их взаимное влияние отражается в виде связей с весовыми коэффициентами, характеризующими степень их влияния. Таким образом, предложенная динамическая модель позволяет оценивать устойчивость движения показателей системы при действии внешних факторов.

Также Б.Г. Ильясов [100] занимался изучением экспертных систем, т. е. систем с поддержкой принятия решений на основе интеллектуальных информационных систем в задачах многокритериального выбора. Ученый использовал модульный принцип построения базы знаний для экспертной системы при возможности

агрегации множества критериев и разбиении множества всех возможных альтернатив на кластеры, а также осуществления поиска внутри кластера по локальным критериям.

Еще одним видным ученым, проводившим исследования в рамках школы моделирования и управления сложными системами, является Р.Т. Сиразетдинов [101]. Исследователь рассматривал математическое моделирование экономических систем и объектов. Разработал дискретную динамическую математическую модель процесса снабжения предприятия, включающего процесс закупки, складирования и передачи в производство сырья, материалов и комплектующих. Модель основана на структуре бухгалтерского учета, что позволяет легко идентифицировать параметры модели и интерпретировать результаты моделирования.

С.Н. Васильев и А.Д. Цвиркун [102] рассматривают особенности планирования и моделирования развития сложных систем и построения комплекса взаимосвязанных моделей на основе проектно-программного и агрегативно-декомпозиционного подходов.

В основу методологии агрегативно-декомпозиционного подхода положены: комплексное исследование различных аспектов процессов развития и функционирования систем от выбора целей, процедур принятия решений до технологических процессов в динамике их функционирования и развития; альтернативно-графовая формализация задач планирования развития; использование в процессе формализации взаимосвязанного комплекса моделей различного типа – оптимизационных, имитационных, оптимизационно-имитационных, расчетных, человеко-машинных и так далее; разработка и использование комплекса взаимосвязанных моделей, обеспечивающих в процессе взаимодействия (чаще всего итеративного) решение общей проблемы (композиционный подход); декомпозиция моделей на ряд взаимосвязанных подмоделей с обоснованием процедур сходимости их взаимосвязанного решения к исходному решению (декомпозиционный подход); использование в процессе формализации моделей различной степени агрегирования.

### 1.1.8 Математическое и информационное обеспечение организации и управления технологическими системами

За последнее десятилетие в технике наблюдается активное замещение традиционных технических средств автоматики цифровыми преобразователями, что придает системам управления характер информационно-управляющих систем, а встраивание в них процедур распознавания образов, аккумуляции экспериментального знания, планирования действий и других «интеллектуальных» функций позволяет назвать их системами интеллектуального управления (СИУ). Использование инструментов искусственного интеллекта (ИИ) расширяет потенциал проектирования и управления динамическими системами, при этом охватываются такие задачи, как:

- управление с неизвестными или уже несправедливыми с некоторого момента эксплуатации уравнениями динамики (как в задачах выбора эффективных каналов управления в объектах с реконфигурацией);
- задачи, в которых модели в форме уравнений динамики могут либо уступать по эффективности своего использования моделям ИИ (как в задачах планирования действий в среде), либо быть полезны в комбинации с моделями ИИ.

С.Н. Васильев [103] разработал метод гипотезирования, который заключается в том, что объединяет возможности дедуктивных инструментов с решением первопорядковых логических уравнений. Данный метод подобен процедурам абдукции и генерализации первопорядковых формул.

Кроме того, исследователь провел сравнительный анализ СИУ и их алгоритмов. Использование алгоритмов ИНС, в том числе генетического типа, повышает быстродействие, что важно в задачах управления в режиме онлайн, то есть когда идентификация или формирование закона управления осуществляются в темпе протекания процесса. Кроме того, такие ИНС обучаемы, но бессознательны. В ряде случаев, когда при решении задач управления зависимости так сложны, что для них невозможно использовать обычные методы аналитического представления, существенная роль принадлежит экспертным суждениям и знаниям человека. И в этом

случае в дополнение к количественным методам или вместо них применяют логический или логико-лингвистический подходы, в соответствии с которыми в качестве значений переменных допускаются не только числа, но и слова или предложения искусственного или естественного языка. Такие системы называют основанными на знаниях (СОЗ), то есть системами, в которых зашито знание некоторых общих закономерностей мира, сведений о текущем и целевом состоянии объекта управления и тому подобное. Но даже такие системы имеют недостаток в интеллектуальности, то есть уровень автоматического осуществления умозаключений в мощных логиках все так же оставляет желать лучшего. Дополнительно С.Н. Васильев [104] провел сравнительный анализ используемых языков при написании указанных алгоритмов на примере рассмотрения разработанной В.М. Глушковым [105] дедуктивной компоненты системы обработки математических текстов на основе метода резолюций и других алгоритмов, включая алгоритмы очевидности. С.Н. Васильев отмечает, что по смыслу алгоритмы очевидности ориентированы на проверку правильности математических текстов, написанных на языке TL, если доказательства достаточно подробны, в случае если информационной детализации недостаточно, то проводится поиск пробелов, требующих «расшифровки»; поиск доказательств сложных теорем выполняется в диалоговом режиме [105]. Язык TL [106, 107] близок к естественному математическому языку и удобен в человеко-машинных системах для поиска, вывода, формульных преобразований, построения примеров (моделей), проверки корректности разного рода конструкций (алгоритмов, определений и тому подобного). Формализация же используемых выше понятий очевидности и сложности доказательств производится с учетом особенностей реализации на ЭВМ [108].

Так, самая простая реализация алгоритма очевидности состоит в том, что в системе имеется явно выписанный список доказанных теорем. Выявление, истина или ложь, сводится к нахождению конкретной теоремы в списке. В силу технических ограничений на длину списка оказывается необходимым хранить доказательства многих теорем этого списка в потенции, с помощью специальных алгоритмов,

которые в случае необходимости могут проверить их на выводимость, что усложняет реализацию.

А.Л. Истомина [109] занимался исследованием математического и информационного обеспечения организации учебного процесса в вузах. В своих работах он предложил:

- концепцию оптимального планирования учебного процесса в вузе, обеспечивающую его экономическую эффективность;
- новые математические модели задач, формализующие процедуры принятия решений в задачах планирования учебного процесса в вузе. Например, модель и точный алгоритм нахождения оптимального плана приема студентов в вуз при случайных значениях спроса на образовательные программы.

Комплексная модель задачи оптимизации учебного процесса в вузе и алгоритм ее решения [110] были реализованы в двухуровневой системе принятия решений и позволяют найти вариант организации учебного процесса с наибольшей экономической эффективностью [111].

В исследованиях А.Л. Истомина [109] использовались методы системного анализа, математического программирования, исследования операций, теорий расписаний и иерархических многоуровневых систем.

### **1.1.9 Повышение эффективности управления технологическими процессами механообработки**

Одним из основоположников отечественного научного направления по повышению эффективности технической эксплуатации сложных систем является Е.Ю. Барзилович [112, 113]. Ученый разработал методы оптимальной эксплуатации технических систем и комплексов с упреждением отказов, аварий и катастроф, при внедрении которых в качестве положительного эффекта отмечалась психологическая устойчивость оператора в звене «человек – машина – среда», что позволяло снизить издержки любого производства [114]. Кроме того, для более эффек-

тивного использования эксплуатируемых дорогостоящих средств труда на производстве в условиях рыночной экономики Е.Ю. Барзилович предложил модели, позволяющие сформулировать оптимальную процедуру формирования инвестиций поддержки и развития ресурсосберегающих технологий.

А.Е. Акиндеев в соавторстве с В.Д. Константиновым, С.В. Краузом, Е.А. Румянцевым, Н.П. Сергеевым и И.М. Синдеевым [115] предложил модели, методы и алгоритмы, а также платформу разработки приложений для интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении процессом технического обслуживания, ремонта и модернизации промышленного оборудования на примере инженерно-авиационных служб, что позволило сократить затраты и повысить общую эффективность организации процессов ремонта и технического обслуживания.

В.Г. Воробьев и В.Д. Константинов рассматривали в своих трудах [116, 117] технические устройства как объекты оценки и обеспечения надежности и функциональной эффективности. Также учеными изучались характеристики надежности и эффективности невосстанавливаемых и восстанавливаемых устройств. В результате они предложили методики оптимального резервирования, прогнозирования и расчета упреждающих допусков.

Еще один видный ученый в области контроля, оценивания и управления состоянием авиационного оборудования летательных аппаратов, Е.А. Румянец, создал новую научную школу по данному направлению [118]. Под его руководством велась разработка перспективных стратегий технического обслуживания авиационной техники, структуры, математического обеспечения наземных, бортовых и наземно-бортовых систем контроля и обработки полетных данных [119].

Н.Н. Смирнов, Н.И. Владимиров, Ж.С. Черненко и другие [120] также изучали принципы, методы и средства управления техническим состоянием производственных узлов и объектов на примере авиационной техники. Ученые видели ключевую роль в решении задач по повышению эффективности управления состоянием летательных аппаратов, в разработке и совершенстве систем технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Эффективность системы ТОиР определяется степенью ее приспособленности к выполнению функций по управлению надежностью и

техническим состоянием ЛА в процессе технической эксплуатации. К числу основных задач таких систем Смирнов Н.Н. и другие относят: установление требований к программам ТОиР для конкретных видов техники; обеспечение выполнения обслуживания и ремонта изделий с требуемым качеством и при минимальных затратах времени, труда и материалов; обеспечение необходимых условий для выполнения ТОиР, в том числе создание и оснащение подразделений необходимыми комплектующими и материалами, подготовка необходимых трудовых ресурсов; оптимизация логистических связей.

В дополнении к вышеупомянутым исследователям И.А. Биргер [121, 122, 123] занимался изучением эффективности в области прочности и динамики двигателей летательных аппаратов авиационного и космического назначения. Подход И.А. Биргера к решению технических проблем заключался в разработке инженерных решений, определяющих работоспособность широкого класса конструкций.

Р. Барлоу и Ф. Прошан [124] рассматривали эффективность управления состоянием сложных технологических объектов с точки зрения их «старения» и снижения ресурса надежности. Исследователи рассмотрели большое количество вероятностных моделей на примере задач по оптимизации проверок и профилактике замен и задач оптимального резервирования, которые впоследствии имели большое практическое применение. Также Р. Барлоу и Ф. Прошан изучали взаимосвязь параметров восстановительного цикла и показателей качества функционирования системы с комплексным показателем экономической эффективности на всех этапах ее жизненного цикла.

В.И. Шаманов [125] изучал методы и способы повышения эффективности управления технической эксплуатацией для систем интервального регулирования движения поездов. В частности, исследователь рассматривал вопросы оптимизации технического обслуживания систем железнодорожной автоматики с учетом затрат на их эксплуатацию и ущерба от отказов в них на поездную работу. Основные выводы, полученные В.И. Шамановым: за счет изменения периодичности выполнения работ подтверждена возможность получения минимума суммарной интенсивности

защитных отказов; установлено, что использование оптимальной периодичности работ по техническому обслуживанию повышает безопасность движения поездов; показано, что учет временной избыточности позволяет ставить оптимизационные задачи для определения рациональной степени сложности используемых устройств автоматического контроля и диагностирования и степени сложности профилактических работ в зависимости от загруженности поездами участка железной дороги; определено, что для оптимизации технического обслуживания систем по критериям безотказности требуется задание величины коэффициента готовности и использование метода неопределенных множителей Лагранжа или метода уравнивания чувствительностей и в этом случае задача оптимизации технического обслуживания систем по технико-экономическим критериям может быть решена при использовании методов линейного и динамического программирования [126].

Г.Б. Бурдо [127] занимался исследованием эффективности технологических систем в машиностроении и приборостроении. Ученый провел классификацию видов процессов производственных систем машиностроения и определил критерии оценки их эффективности, ключевым из которых является качество изделия, определяющее конкурентоспособность продукции в определенном ценовом диапазоне. В своих трудах Г.Б. Бурдо [128] рассматривал процедуры принятия решений при выполнении производственных операций и их совершенствование для оптимального сокращения временных интервалов и материальных затрат при сохранении качества продукции. Так, например, интеграцию дополнительных процессов в производственные системы исследователь рассматривал с использованием системного подхода. Алгоритмы выработки решений реализовывались с применением аппарата ИИ. Также Г.Б. Бурдо разработал методы проектирования технологических процессов механической обработки и сопровождения процессов изготовления изделий, направленные на повышение эффективности человеко-машинных систем, за счет автоматизации процедур многовариантного синтеза решений и их отбора, разработки планов для технологических подразделений и принятия управленческих решений на основе диспетчеризации.

А.В. Ведешников [129] проводил исследования в области самодиагностирования компонентов цифровых систем с реконfigurацией. Он предложил следующие методы и способы, которые способствуют повышению эффективности управления состоянием технологического оборудования:

- выделение подсистем достаточного размера для параллельного диагностирования больших цифровых систем со структурой типа тороидальной решетки. В этом случае контроль и диагностирование компонентов системы осуществлялись в три этапа: параллельная проверка компонентов всех подсистем, выделенных первичной раскладкой, и линий связи, примыкающих к узлам каждой подсистемы справа и снизу [130];

- самодиагностирование компонентов (модулей и линий связи) цифровых систем с реконfigurацией, в основе которой лежит принцип расширяющихся областей. Реализация процедур самодиагностики начинается с исправного модуля и последовательно передается другим модулям, исправность которых была подтверждена предшествующими проверками [129];

- математические итеративно-адаптационные модели электрической дуги в контактно-дугогасительных системах электромагнитных контакторов, которые предоставляли возможность описывать процессы образования и жизненного цикла электрической дуги, проводить приближенные расчеты коммутационной способности систем контакторов, оценивать эффективность такой системы в целом и, при необходимости, вносить в ее конструктив изменения для улучшения показателей дугогашения [131].

В.В. Глухов [132] использовал метод математического программирования на базе COBYLA (от англ. Constraint Optimization by Linear Approximation – условная оптимизация с помощью линейной аппроксимации) для оптимизации набора инструментов для повышения эффективности бизнес-системы. По результатам исследования, предложенный метод позволил повысить эффективность реализации трансформационных проектов в различных компаниях (например, в части снижения себестоимости продукции) на 7-10 %.

Д.Б. Гнеденко [133] занимался разработкой основ теории надежности. Ученый уделял внимание решению задач теории резервирования с восстановлением, оптимальной профилактики, управлению качеством промышленной продукции в процессе производства. В начале 60-х годов Б.В. Гнеденко начал разрабатывать асимптотические методы анализа систем с восстановлением. Он рассмотрел дублированную систему и показал, что асимптотическое распределение времени безотказной работы таких систем является экспоненциальным и не зависит от распределения времени восстановления (если это время в среднем мало по сравнению с наработкой на отказ) [134].

В совместных трудах с В.В. Кашковским А.С. Горшков [135] изучал методы и способы повышения эффективности управления состоянием технологических объектов на примере предприятий текстильной и легкой промышленности.

Сам же В.В. Кашковский [136, 137] разработал новые критерии эффективности систем технической эксплуатации (СТЭ) и исследовал законы их функционирования по безопасности и экономической эффективности. Предложил статистическую модель управления состоянием технических объектов (УСТО), реализующую управление состоянием по ресурсу и позволяющую получать характеристики надежности парка однотипных объектов при классической плотности распределения наработки до отказа. Получил аналитическое выражение для вычисления средней (установившейся) интенсивности отказов при эксплуатации парка однотипных невосстанавливаемых изделий. Это выражение позволяет рассчитывать структурную надежность систем, элементы которых эксплуатируются по ресурсу.

К. Райншке и И.А. Ушаков [138] предложили методику оценки надежности экономической системы, в основу которой положили расчет эффективности финансово-хозяйственной деятельности. Кроме того, авторы с помощью графов оценивали надежность сложных восстанавливаемых систем.

Большое количество зарубежных ученых также проводили исследования в области повышения эффективности контроля и управления состоянием технологических объектов. Главный упор они делали на автоматизацию и оптимизацию всех процессов предприятия, а также развитие интеллектуальной системы диагностики

модулей сложных систем [139, 140, 141, 142, 143, 144, 145].

Основные идеи Соломенцева Ю.М. [146, 147, 148] в области автоматизации эксплуатации режущего инструмента заключаются в следующем:

- разработка математической модели процедуры выбора рационального режущего инструмента для точения на основе анализа 3D-модели и чертежа детали;
- создание автоматизированной системы выбора режущего инструмента для многофункционального технологического оборудования с ЧПУ;
- разработка методики интеграции автоматизированных систем выбора инструмента с CAD/CAM-системами. Она основана на использовании правил передачи данных между системами автоматизированного проектирования и подсистемами выбора инструмента;
- утверждение важности выработки целостной концепции производственной системы нового типа, охватывающей все основные аспекты: организацию, технологию, проектирование и изготовление. Только на базе подобной концепции можно корректно ставить и решать задачу комплексной автоматизации производственного процесса;
- применение систем адаптивного управления, которые позволяют в зависимости от складывающихся производственных условий корректировать технологический процесс в автоматическом режиме без участия рабочего.

В.Г. Митрофанов [149] занимался вопросами повышения эффективности управления технологическими процессами механообработки в рамках следующих исследований:

- разработка математической модели распространения концентрации продуктов термодеструкции смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Модель адаптировалась к реальным условиям реализации технологического процесса механообработки. Алгоритм модели позволял определить концентрацию продуктов термодеструкции СОЖ в различных точках рабочей зоны и ее изменение во времени;
- создание системы поддержки принятия решений для технологической подготовки производства. Система включала идентификацию изготавливаемых изделий, включая их материал и виды заготовок, библиотеку технологических решений

для автоматизированного построения технологических процессов, а также выбор технологического оснащения, режимов обработки и техническое нормирование.

Российский специалист в области автоматизации технологических процессов и производств В.Н. Богатиков занимался вопросами контроля технологических процессов с точки зрения обеспечения безопасности работы [150, 151, 152].

### **1.1.10 Методы и средства вибродиагностики**

Большой вклад в развитие вибродиагностики внесли В.В. Петрухин, С.В. Петрухин и А.П. Науменко.

В.В. Петрухин, С.В. Петрухин [153] занимались исследованиями в области теоретических основ механических колебаний. В своих трудах [153] рассматривали средства и методы измерения вибрации. По способу регистрации колебаний у вибрирующего элемента авторы выделяют следующие типы вибродатчиков: механические, оптические, электрические и электронные. Ученые также приводят сравнительный анализ, в соответствии с которым наиболее перспективными являются электрические и электронные средства, предоставляющие возможность дистанционного измерения и одновременной регистрации вибраций в нескольких точках.

Также В.В. Петрухин и С.В. Петрухин рассмотрели основные приемы и методы вибродиагностики, типичные случаи неисправностей машин и возможность определения неисправностей методами вибродиагностики. В результате ученые доказали, что наиболее информативным для контроля состояния узлов производственного оборудования и трубопроводов нагнетателей является вибродиагностика. Так было показано, что любой из дефектов, имеющийся в узле машинного оборудования, имеет свой «вибрационный портрет», то есть существует взаимосвязь между износом и корреляционно-спектральными характеристиками вибросигнала для конкретных машин и их узлов. Из этого следует, что при накоплении достаточных статистических данных возможно достаточно точно определять степень износа и/или дефекта узла производственного оборудования. Также авторы

отмечают, что применение компьютерного моделирования динамики и изнашивания узлов будет существенно упрощать и дополнять предложенные методы диагностирования, что позволит объединить изменение функциональных и динамических параметров машины с износом отдельных ее элементов и даст возможность прогнозировать развитие этих процессов при дальнейшей эксплуатации.

А.П. Науменко [154] исследовал методы диагностики и мониторинга технического состояния поршневых машин, включая поршневые компрессоры опасных производств и двигатели внутреннего сгорания. Ученый предложил способ вибродиагностики по спектральным инвариантам, то есть вибрацию измеряют в точках, близлежащих к диагностируемым узлам машины, при котором в качестве наиболее информативной составляющей гармоники выделяют частоты повторения полного цикла. При оценке их дисперсии формируют совокупности гармоник и определяют спектральные инварианты.

### **1.1.11 Развитие ИИС**

Большой вклад в развитие прикладной информатики через свои труды в области кибернетики и вычислительной лингвистики внес А.И. Берг [155, 156]. Ученый считал, что основным средством для обмена информацией в человеческом обществе является язык. Человеческой речью кодируется разнообразная информация, поэтому необходимо разрабатывать более гибкие и универсальные способы обмена информацией между людьми и машинами. А.И. Берг совместно с коллегами [157] проводили исследования в области поиска и принятия решений в логических задачах, что в итоге привело к созданию программного продукта на базе ИИ, позволяющего автоматически доказывать теоремы, но А.И. Берг считал, что компьютер никогда не заменит человека, и был противником полной автоматизации управленческих процессов.

В трудах Н.Н. Горбатенко [158] рассматриваются методы и устройства для измерения, контроля и прогнозирования наиболее информативных магнитных ха-

рактик и параметров изделий из ферромагнитных материалов в ходе технологического процесса их производства и приемо-сдаточных испытаний. Разработанные методы измерения, контроля и прогнозирования магнитных свойств основаны на использовании в процессе измерения различных типов моделей магнитных состояний испытуемых изделий. При проведении контроля однотипных изделий в условиях массового производства моделируются магнитные характеристики с помощью коэффициентов размагничивания.

Для прогнозирования изменений магнитных свойств изделий в ходе технологического процесса производства используется моделирование магнитных характеристик, основывающееся на методе главных компонент, позволяющее в условиях мультиколлениарности магнитных параметров существенно сократить размерность модели без существенного снижения ее точности.

Для измерения магнитных характеристик и параметров материала изделий предложен экспериментально-расчетный метод, основанный на объединении в общий метод измерения и математического моделирования магнитного поля изделия, причем результаты эксперимента используются и в качестве исходных данных для решения обратной задачи расчета магнитного поля, и в качестве критерия правильности расчета. Предложен и исследован новый метод измерения напряженности магнитного поля, основанный на компенсации измеряемого поля известным импульсным и использовании в качестве нуль-индикатора ферромодуляционного преобразователя, причем импульсное поле одновременно выполняет функции возбуждающего и компенсирующего полей.

Метод позволяет повысить точность и расширить диапазон измерения напряженности магнитного поля. Разработаны и исследованы намагничивающие системы нового типа с электромагнитной подачей, позволяющие автоматизировать процесс измерения и способные с высокой производительностью осуществлять транспортировку, ориентацию, установку с заданной погрешностью в измерительную позицию и перемагничивание испытуемых изделий. Предложены математическая модель и методика их оптимального проектирования, основанная на нахождении множества эффективных (Парето-оптимальных) решений путем зондирования

пространства управляемых параметров.

В.И. Лачин [159] предложил метод измерения сопротивления изоляции электроэнергетических объектов, основанный на наложении на контролируемую сеть измерительного напряжения чередующейся полярности, а также быстродействующий метод контроля параметров электроэнергетических объектов постоянного тока, основанный на наложении на контролируемую сеть измерительного напряжения чередующейся полярности.

А.Н. Ткачев [160] предложил математические модели, описывающие свойства ферромагнитных сред, эффективные численные методы расчета магнитных полей, методы синтеза схем замещения электротехнических устройств. Также исследователь разработал модели и методики, используемые при создании транспортных систем на магнитном подвесе, проектировании и оптимизации конструкций силовых трансформаторов и электрических машин. В основе указанных методов лежит анализ поля в нелинейных ферромагнитных средах с использованием новых геометрических шаблонов в виде блочных элементов, в качестве которых выступают многоугольники произвольной формы.

Е.Б. Фролов [161] предложил способ организации производственного процесса на предприятии при помощи метода вычисляемых приоритетов, суть которого заключается в следующем: для эффективного функционирования всей производственной системы, в зависимости от сложившейся ситуации в цехах, рассчитывается производственное расписание, основывающееся на приоритете того или иного задания, рассчитанного с учетом заданных условий. При изменении условий приоритеты выполнения заданий меняются и новое производственное расписание составляется уже с учетом новых, переосмысленных приоритетов выполнения операций. Производственное расписание периодически перерасчитывается для организации эффективного производства с учетом сложившейся ситуации и поставленных условий перед производством.

Метод вычисляемых приоритетов является гибкой вытягивающей логистической системой. Производство, расписание для которого рассчитывается по принципу

метода вычисляемых приоритетов, может подвергаться изменениям, поправкам, коррекциям в процессе выполнения работ и при этом не иметь потерь в эффективности.

Также Е.Б. Фролов разработал ряд рекомендаций для рационального использования исполнительных производственных систем, что позволяет снизить время изготовления заказов в среднем на 25-30 % и значительно уменьшить объем незавершенного производства.

В.Ю. Шокин [162, 163] является основоположником метода дифференциального приближения – теории инвариантных разностных схем. Этот метод послужил основой математической технологии конструирования разностных схем с заданными свойствами для задач механики сплошной среды. Также он разработал интервальные методы решения алгебраических и дифференциальных уравнений и создал комплексы соответствующих прикладных программ.

Россеев Н.И. [164] разработал многофункциональную ИИС для газотранспортного предприятия, которая является частью ИИС производства и обеспечивает достоверной информацией в реальном масштабе времени все производственные процессы. В основе предложенной ИИС лежит математическая модель, которая описывает энергетические процессы, происходящие в потоке газа, а также данная модель позволяет на основе измерительной информации, полученной с регуляторов давления газа, анализировать процессы преобразования энергии и моделировать режимы работы технологического оборудования и линейной части магистрального газопровода.

Зеленский В.А. [165] изучал мультиплексированные волоконно-оптические ИИС мониторинга сложных технических объектов. В своих трудах ученый предложил способы мультиплексирования бинарных оптических сигналов на основе многоуровневого аддитивного и мультипликативного кодирования, а также предложил, на основе имитационной модели на базе аппарата сетей Петри, методику определения взаимосвязи между структурой объекта, характером протекающих в нем процессов, количеством контролируемых параметров и числом мультиплексированных каналов передачи данных. Для реализации своих научных предложений В.А. Зеленский разработал простую конструкцию бинарного датчика, в которой

предусмотрена взаимозаменяемость основных элементов.

О.Н. Новоселов и другие изучали основы теории и проектирования средств сбора, представления и передачи измерительной информации. В его трудах [166] рассмотрены вопросы обработки информации, относящиеся к восстановлению непрерывных сообщений и повышению их достоверности на выходе из системы.

М. Краус и Э. Вошни [167] изучали характеристики измерительных каналов, предназначенных для измерения определенной величины и имеющих одинаковые метрологические характеристики, с точки зрения информационного и системного анализа. Основные их исследования посвящены установлению критериев качества ИИС и поиску возможностей их оптимизации. В качестве важнейших критериев ученые выделяют минимум среднеквадратичной погрешности и максимизацию потока информации.

Отдельно стоит рассмотреть вклад в развитие ИИС А.Н. Грибкова и его работы про особенности создания прототипа интеллектуальной информационно-управляющей системы технологическими режимами сложных промышленных объектов [168] и теоретические и практические аспекты построения информационно-управляющей системы, обеспечивающей оптимальное управление процессом распределения топливных пеллет от производителей к потребителям [169].

## 1.2 Обзор коммерческих ИИС

Рассмотрим некоторые решения, предназначенные для повышения эффективности эксплуатации технологических систем и создаваемые на их основе продукты – ИИС, а также применимость технологий контроля, обработки и анализа данных в процессе работы оборудования.

Безусловно, стоит отметить иностранные ИИС, которые известны на отечественном рынке: Asset Monitor, Великобритания; CIMCO MDC-Max, Дания; Cybermonitor, Япония; Fadector, Финляндия; easyOEE, Германия; UltiMonitor, США; FactoryWiz Monitoring, США; IQMS, США; Kiwiplan, США; MachineMetrics Inc,

США; Scytec, США; Multi-DNC, США; Predator MDC, США; FACTORYMINER, Австрия; SkyMars, Тайвань; Shoplogix, Канада; NCSIMUL MONITOR, Франция; Shop Floor Data Collection, Великобритания.

Отдельно можно выделить зарубежные продукты, успешно применяемые в качестве диагностики процесса резания и адаптивного управления режущим инструментом: Omative, Израиль (с 2018 г. принадлежит Siemens) [170]; Montronix, Германия [171]; Marposs, Италия [172]; Prometec, Германия (принадлежит Sandvic с 2018 г.) [173]; SKF Enlight Collect IMx-1, Швеция [174].

Omative создан израильской компанией с одноименным названием. Система адаптивного управления и контроля реагирует на изменения условий резания и автоматически изменяет подачу на предельно разрешенный для каждой операции уровень. В случае необходимости система останавливает станок из-за перегрузки или в случае фиксации поломки инструмента. Система отслеживает состояние режущего инструмента и информирует о необходимости смены инструмента, что позволяет избежать дорогостоящих поломок инструмента или необоснованных преждевременных замен. Экспертная система, воплощенная в программном обеспечении математическая модель, постоянно измеряет текущую величину нагрузки на шпинделе, рассчитывает образцовые величины значений подачи для каждого конкретного инструмента и материала заготовки и в режиме реального времени регулирует подачу. Уменьшение момента на шпинделе ведет к наращиванию подачи, в то время как увеличение нагрузки ведет к уменьшению подачи, что особенно важно для грубой и получистовой обработки, когда колебания нагрузки существенны.

Также постоянно отслеживается вибрация работающего станка в режиме реального времени и анализируются параметры вибрации с целью выдачи предупреждающих сообщений или остановки оборудования в случае появления вибраций выше приемлемых, не допуская, таким образом, возможный выход из строя станка, детали и инструмента. В процессе управления алгоритм Omative учитывает многочисленные факторы, влияющие на процесс резания: параметры резания, реальную нагрузку на инструмент, уровень износа инструмента, характеристики материала и

др. Большим количеством внедрений подтверждено, что использование рассматриваемого продукта существенно снижает время обработки, предотвращает поломки инструмента, нанесение ущерба деталям и станкам, а также минимизирует простои производства. Omative выпускается в различных конфигурациях (программные решения для новых систем ЧПУ или программно-аппаратные для более старых) и подключаются к любым станкам с ЧПУ.

Montronix – это немецкое решение в области мониторинга технологических процессов и контроля аварийных ситуаций. Позиционируется как система противоаварийной защиты станков и контроля технологического процесса. Включает в себя механические датчики и электронно-аналитические блоки со специализированным программным обеспечением. Система может быть индивидуально укомплектована датчиками мощности, крутящего момента либо датчиками вибрации, которые устанавливаются на исполнительные механизмы станка максимально возможно близко к зоне резания. Данные с датчиков передаются в программно-аппаратную часть для анализа и последующего формирования управленческого решения (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Общий вид системы Montronix

В ходе работы станка контролируются силовые и вибрационные параметры технологического процесса. В случае возникновения непредвиденных ситуаций

(столкновение, ошибка управляющей программы, нарушение технологического процесса и тому подобное) система выполняет оперативное аварийное отключение станка либо корректирует параметры работы станочного оборудования (в зависимости от предварительно произведенных настроек). Основное применение: противоаварийная защита станка, диагностика вращающихся узлов станка, мониторинг технологического процесса, адаптивный контроль режимов резания.

Среди многообразия вошедших в Marposs продуктов сама компания позиционирует в качестве передового решения для мониторинга режимов резания продукты, созданные немецкой компанией Artis (приобретена Marposs в 2008 г.). Также в числе предложений: защита оборудования, как и у Montronix, мониторинг состояния вращающихся узлов, мониторинг инструмента и процесса обработки. Состояние инструмента можно оценивать по сигналам цифровых или аналоговых датчиков. По мнению Artis, в большинстве случаев достаточно индивидуально установленных пределов для сигналов усилия на шпинделе или по оси подачи, чтобы надежно выявить износ инструмента. Многокритериальный контроль нескольких сигналов, например сигналов усилия и вибрации, возможен при использовании нескольких модулей системы и в основном используется для обнаружения самых незначительных отклонений в процессе обработки. Все пределы износа инструмента могут устанавливаться индивидуально пользователем для активизации предупреждающих или аварийных сигналов, когда сигнал от датчика достигнет предела, установленного для конкретного инструмента. Резкое усиление сигнала может означать столкновение или повреждение инструмента. В этом случае система контроля посылает сигнал в систему управления станком. При накапливаемом износе инструмента сигнал постоянно усиливается. Если он слабее, чем ожидалось, то это может означать, что инструмент отсутствует или заготовку обрабатывают по второму разу.

Разработчиком системы Prometes является немецкая компания, а большая часть клиентской базы приходится на мировую автомобильную промышленность. Как система контроля, она отслеживает выполнение процесса с заданными параметрами (остановит станок, если инструмент отсутствует, сломался или столкнулся

с заготовкой, выдаст предупреждения об износе инструмента и угрозе его поломки, если параметры рабочего процесса отклонятся от заданных). Контролируются сила (момент), порождаемый конструкцией шум (вибрации) и активная мощность. Эти данные берутся либо от ЧПУ станка, либо от устанавливаемых датчиков. По информации от Sandvic в будущем регулировка для компенсации износа и подстройки режимов обработки будет выполняться автоматически без участия оператора. В первую очередь это планируется реализовать при циклах глубокой расточки и расточки больших диаметров.

SKF Enlight Collect IMx-1 – это масштабируемая и простая в настройке сеть с ячеистой топологией для сбора данных и обнаружения общих проблем с технологическим оборудованием. Она состоит из автономного беспроводного датчика вибрации и температуры с питанием от встроенной батареи, шлюза связи и сетевого маршрутизатора, программного обеспечения для визуализации и анализа трендов изменения данных, а также приложения для мобильных устройств. Датчик представляет собой сборщик данных и передатчик, которые объединены в одно компактное устройство с питанием от батареи. SKF Enlight Collect IMx-1 может обнаруживать дисбаланс, перекос, превышение температуры, ослабление крепления, вибрации, вызванные электрическими дефектами и ранние стадии повреждений подшипников и зубчатых передач.

Россия, возможно, благодаря политике импортозамещения, интереса государства к тематике промышленного интернета вещей и инициативе Индустрия 4.0, в части количества разработок MDA-систем оказалась на втором месте после США, где исторически располагается наибольшее число разработчиков MDC/MDA-систем [175]. В связи с этим в последние годы иностранные разработчики систем мониторинга были вытеснены с российского рынка [176]. Представленные на рынке отечественные продукты имеют отличающиеся подходы к организации интерфейсов, ценообразованию и политике лицензирования.

Foreman [177] (права на Foreman приобретены ГК «Цифра») был первым отечественным решением для мониторинга станочного оборудования и дал пример для подражания (и копирования) другим отечественным разработчикам, став на

определенном этапе самой распространенной системой мониторинга станков с ЧПУ в России. Разработкой занималось Ленинградское отделение Центрального научно-исследовательского технологического института (ЛО ЦНИТИ). Компания вышла с первым в мире приложением для мониторинга станков при помощи наручных часов Apple Watch с дополнительной функциональностью, смартфонов и планшетов на iOS и Android. Предложила одно из первых доступных решений для энергомониторинга станков и масштабируемую платформу собственной разработки с единым и простым интерфейсом базового приложения мониторинга. Также особенностями продукта являются наличие собственной аппаратной части, большое количество авторитетных партнеров, поддержка СУБД, в том числе SQL Server, Oracle, PostgreSQL, экспорт отчетов во множество форматов, доступ к облачной версии системы мониторинга промышленного оборудования.

В настоящее время АИС «Диспетчер» [178] (рисунок 1.6) занимает лидирующие позиции на рынке среди проектов по мониторингу станочного парка. Стоит отметить что АИС «Диспетчер» в настоящее время является одним из самых перспективных, проработанных и востребованных продуктов.



Рисунок 1.6 – АИС «Диспетчер»

Система подключается к СЧПУ станка напрямую и поддерживает практически все распространенные системы ЧПУ. Модуль «Контроль инструмента» является опцией. Используя модули «Контроль инструмента» и «Вибромониторинг», можно не только идентифицировать инструмент и отслеживать его местоположение, учитывать реальное время работы инструмента, анализировать его использо-

вание с привязкой к режимам резания, но и предсказывать износ и поломки инструмента для быстрой замены и сокращения времени на обслуживание и ремонт.

Вибромониторинг также может использоваться отдельно от инструмента оборота, в этом случае он позволяет выявлять отклонения в работе основных узлов оборудования (шпинделя, ШВП, направляющих, электродвигателей, зубчатых и ременных передач). Продукт объединил в себе лучшие наработки и практики «Станкосервис» и «ЛЮ ЦНИТИ».

Winum CNC [179] позиционируется как платформа промышленного интернета, позволяющая не только собирать данные и обмениваться ими, но и использовать их путем применения любых создаваемых внутри платформы приложений (рисунок 1.7, а).



а



б

Рисунок 1.7 – Общий вид систем мониторинга:

а – панель управления Winnum CNC; б – панель управления Naviman

Особенности системы: современная мощная и гибкая платформа промышленного интернета; поддержка прямого подключения большого количества систем ЧПУ, включая Haas, Okuma OSP-PX, Mazak Mazatrol, Arumatic; поддержка большинства СУБД; использование облачных технологий хранения данных; доступность создания практически любых приложений внутри предоставляемого сервиса на языке Java делает его привлекательным для настройки в соответствии с решаемыми задачами и спецификой производства; наличие встроенного редактора приложений и 3D-сцен; гибкость программного обеспечения; хорошие организация и

набор инструментов практически для любых производств и отраслей промышленности; российская разработка.

Разработчиком системы Naviman [180] является инженерно-консалтинговая компания «Солвер» (рисунок 1.7, б). Ранее считался самым дорогим программным продуктом среди отечественных разработок, но комплект поставки включал приобретение полного пакета продукта вместе с планшетом, в то время как у других компаний составляющие (модули) приобретались за отдельную плату. Интересным решением является управление действиями эксплуатационного персонала на основе нормирования технологических процессов. В режиме реального времени изготовления деталей отображается текущее состояние изготовления партии деталей. Для достижения заданных временных показателей с нужным качеством функционал настроен на осуществление поддержки производственной деятельности путем предоставления персоналу необходимых наглядных инструкций, в том числе с применением быстрой оцифровки видеоряда лучших практик требуемых действий. Предложенное решение применяется для сокращения периода наладки оборудования (сокращения подготовительно-заключительного времени), позволяя выполнять эти процессы в заданные нормы времени и делая их повторяемыми.

Разработчиком CNC-VIZION [181] является российская компания «Интерактивные промышленные системы», учредители которой также принимают участие в деятельности известной фирмы «СФТ Групп». Первый пилотный проект был выполнен в 2016 г., как и у Winnum. Из особенностей стоит отметить предоставляемый удаленный сервис диагностики станков и разработанную систему интеллектуальных статусов оборудования, которые определяются независимо от оператора.

Также стоит упомянуть о таких продуктах как, DPA (Discrete Processes Automation) компании «Экстенсив-Автоматизация», «Оптимум» компании «Цифровые промышленные технологии» и Черный ящик компании «КАМ-СОФТ-ИНЖИНИРИНГ».

Рассмотренные решения в виде MDC/MDA-систем, систем вибродиагностики резания материалов и их распространение в промышленности следуют по пути приведенных трендов и вызовов. На рынке развитых промышленных стран

MDC/MDA-системы являются частью привычных для него MES-систем. На российском рынке MDC/MDA-системы позиционируются в качестве самостоятельных решений для производств. На современных западных предприятиях собранные с помощью MDC данные о текущем состоянии оборудования зачастую передаются в MES-системы, которая, в свою очередь, использует их для оперативного планирования и коррекции производства. MES-системы для большинства предприятий все еще являются новым западным веянием в России, достаточно дорогостоящим и требующим зрелости предприятий для такого рода внедрения.

### **1.3 Известные ИИС в стадии разработки**

В предыдущем разделе приведены данные о существующих решениях систем мониторинга и диагностики состояния оборудования и режущего инструмента. Компании-разработчики, как правило, не распространяют сведения о проводимых исследованиях и разработках в процессе их выполнения. Информация об этом становится доступной по завершении работ и получении готовых продуктов, а еще чаще – по результатам достигнутых договоренностей с заказчиками о применении технологий в реальном секторе производства. И тем не менее постараемся привести сведения об известных аналогах в стадии разработки. Анализ проведен в период 2022 – 2023 гг.

В стартап переросло исследование о вибродиагностике механизмов, выполненное в Южно-Уральском государственном университете. По результатам были спроектированы и изготовлены WAS-датчики, позволяющие получать сигналы вибраций с вращающегося вала. Весной 2019 г. проект WAS вошел в программу акселерации венчурного фонда Pulsar Venture Capital. В ее контуре разрабатывается пилотный проект для предприятия «Киров-Энергомаш». В планах стартапа отработка и анализ работы датчиков на производстве, доработка технологии и ее адаптация к возможному износу и долгой безотказной эксплуатации, а также масштабирование технологии для промышленного производства и реализация автоматической диагностики с выдачей отчетов о конкретных имеющих место дефектах и отклонениях в

работе узлов, что будет являться элементом прогнозной аналитики.

Неоднократно упоминаемая компания «Цифра» доработала существующий продукт «Диспетчер» с модулем вибромониторинга на основе импортных датчиков вибрации. В настоящее время ведется разработка «Zyfra Predictive Maintenance Tool Life» – системы прогноза срока службы режущего инструмента станков с использованием датчиков вибрации. У компании пока нет планов повторить опыт известных иностранных решений в части адаптивного управления обработкой. Исследование направлено на получение достоверных и точных данных о состоянии инструмента в реальном режиме времени. Накоплен опыт только на фрезерной обработке. Используя на начальном этапе два датчика радиальных вибраций и один осевой, инженеры пришли к выводу, что достаточно будет одного датчика. В НИОКР применяются датчики российского производителя «ГлобалТест», также созданы прототипы собственного производства датчиков (на импортной элементной базе). В компании считают, что анализ потребления тока приводами главного привода и подач дает общие сведения о нагрузке, анализ вибраций позволяет гораздо точнее судить о состоянии инструмента.

Корейская компания Hyundai Wia Corp (производитель металлорежущего оборудования) подала заявку на патент «Способ определения износа и поломки инструмента». В настоящее время это изобретение воплощается в продукты HW-TMC – Tool Monitoring&Control (мониторинг и контроль инструмента) и HW-MCS – Auto Adjusts Cutting Feed Parameter for Machining Type (автоматическая регулировка параметра подачи резания для типа обработки). Предложенные решения – это инновационные интегрированные системы мониторинга и управления инструментом, предназначены для мониторинга нагрузки на инструмент и его вибраций, а также управлением в режиме реального времени. Таким образом, разработка воплощается в реальный продукт, который компания встраивает в основную продукцию, делая ее более конкурентоспособной и привлекательной для определенных сегментов рынка.

Китайской компанией Shenzhen wuhu zhilian ind co ltd (фокусируется на созда-

нии программных продуктов с применением оборудования с открытым исходным кодом и промышленном интернете вещей) подана заявка на патент «Numerical control machine tool tool edge computing abrasion monitoring and controlling system and method» (система и способ контроля и управления износа кромки инструмента станка с числовым программным управлением). Изобретение раскрывает систему и способ контроля и управления износа кромки инструмента станка с числовым программным управлением. Система состоит из сенсорного модуля, модуля обработки сигналов, микропроцессора и системы управления станком. Сенсорный модуль включает датчик вибрации, датчик силы (момента) и датчик тока. Датчик вибрации и датчик момента устанавливаются на шпинделе станка с ЧПУ, датчик тока соединяется с токоведущим проводом двигателя шпинделя станка. Все сенсоры подключены к модулю обработки сигналов. Модуль обработки сигналов содержит усилитель сигнала, аналого-цифровой преобразователь и модуль очистки данных. Модуль очистки данных соединен с однокристальным микроконтроллером, который соединяется с системой управления станка. Основанный на комбинации мультисенсоров, процесс обработки инструмента контролируется и анализируется в режиме реального времени, формируется замкнутый контур управления с помощью системы управления станком, а также реализуется оперативный мониторинг и состояние жизненного цикла инструмента в режиме реального времени.

Как видно, развитие производства в Китае формирует запросы бизнеса на научные разработки и внедрение передовых технологий в области контроля поведения и износа инструмента во время обработки. Вероятно, что темпы роста экономики Китая и проводимая им политика в части быстрого применения передовых разработок в промышленности будут способствовать в скором времени созданию продуктов по запатентованным технологиям.

#### **1.4 Сравнение ИИС, представленных на отечественном рынке**

Далее представлено сравнение возможностей и характеристик рассмотренных ранее коммерческих ИИС с проведением анализа сильных и слабых сторон.

Анализ проведен в период 2022 – 2023 гг.

Метод измерения электрического тока и напряжения в цепях питания блоков приводов подач и главного привода лежит в основе построения большинства систем диагностики режущего инструмента и системы адаптивного управления режимами обработки.

Важно отметить, что этому способу присущи значительные ограничения, которые проявляются, в частности, при обработке инструментами малого диаметра, при чистовой обработке и в других наименее энергозатратных операциях съема материала режущим инструментом. В таких ситуациях мощность, требуемая для съема материала, практически не отличается от мощности холостого хода электродвигателей. Это значение мощности в случаях чистовой обработки также будет зависеть от скорости вращения электродвигателя, что в совокупности усложняет объективный анализ полученных данных. Таким образом, метод применим ограниченно для подавляющей части металлообрабатывающего оборудования.

Вибрационный же метод контроля позволяет с абсолютной точностью разделить частоты вибраций на холостом ходу и вибраций минимальных режимов резания.

В связи с этим проведем краткий анализ лучших мировых практик реализации подобных решений.

Представленные на рынке продукты имеют отличающиеся подходы к организации интерфейсов, ценообразованию и политике лицензирования.

АИС «Диспетчер» занимает лидирующие позиции на рынке среди проектов по мониторингу станочного парка. Ключевым фактором здесь явилось его приобретение компанией «Цифра» и проводимая ей политика. Система позволяет подключаться к станку напрямую. На данный момент поддерживает практически все распространенные системы ЧПУ. Модуль «Контроль инструмента» является опцией. Используя модули «Контроль инструмента» и «Вибромониторинг», можно не только идентифицировать инструмент и отслеживать его местоположение, учитывать реальное время работы инструмента, анализировать использование инструмента с привязкой к режимам резания, но и предсказывать износ и поломки инструмента для быстрой замены и со-

кращения времени на обслуживание и ремонт. Вибромониторинг также может использоваться отдельно от инструмента оборота, в этом случае он позволяет выявлять отклонения в работе основных узлов оборудования (шпинделя, ШВП, направляющих, электродвигателей, зубчатых и ременных передач).

Преимущества: продукт объединил в себе лучшие наработки и практики «Станкосервиса» и ЛО ЦНИТИ (права на Foreman приобретены «Цифрой»), Foreman был первым отечественным решением для мониторинга станочного оборудования и дал пример для подражания (и копирования) другим отечественным разработчикам: одно из первых доступных решений для энергомониторинга станков; масштабируемая платформа собственной разработки; единый и простой интерфейс базового приложения мониторинга; наличие собственной аппаратной части; большое количество авторитетных партнеров; надежная техподдержка; широкая поддержка СУБД в том числе SQL Server, Oracle, PostgreSQL; экспорт отчетов во множество форматов; доступ к облачной версии системы мониторинга промышленного оборудования; российская разработка.

Недостатки: по качеству исполнения и возможности используемого терминала ТВВ10 уступают планшетному компьютеру, при этом стоимость обоих устройств отличается незначительно; сравнительно высокая цена при прямом подключении к стойкам ЧПУ; терминалу-регистратору требуется внешнее электропитание; модульная структура требует дополнительных затрат на расширение функционала. За последние два года компания практически устранила имевшиеся в обоих продуктах недостатки.

Winnum CNC позиционируется как платформа промышленного интернета, позволяющая не только собирать данные и обмениваться ими, но и использовать их для любых приложений, создаваемых внутри платформы.

Преимущества системы: современная мощная и гибкая платформа промышленного интернета; поддержка прямого подключения большого количества систем ЧПУ, включая Haas, Okuma OSP-PX, Mazak Mazatrol, Arumatic; поддержка большинства СУБД; использование облачных технологий хранения данных; доступность создания практически любых приложений внутри предоставляемого сервиса

на языке Java, что делает его привлекательным для настройки, в соответствии с решаемыми задачами и спецификой производства; наличие встроенного редактора приложений и 3D-сцен; гибкость программного обеспечения; хорошие организация и набор инструментов практически для любых производств и отраслей промышленности; российская разработка.

Недостатки: отсутствие собственной аппаратной части; невозможность указать причины простоя оборудования с рабочего места оператора; ведется протоколирование только базовых параметров, остальные показатели предполагается получать путем создания необходимых приложений и дополнительных действий; в большей степени интернет-платформа.

DPA (Discrete Processes Automation). Функционал по оповещению посредством SMS и e-mail, конструктор отчетов, модуль персонала, загрузчик управляющих программ поставляются сейчас без дополнительной оплаты. За планшет необходимо отдельно доплатить, также, как и за подключение оборудования без ЧПУ. Компания «Экстенсив-Автоматизация» активно участвует в многочисленных промышленных форумах и предлагает бесплатное тестовое внедрение системы – установку временных лицензий посредством интернета.

Преимущества: приемлемая стоимость базового пакета; преобразование до функционала MES-системы; поддержка прямого подключения к большинству моделей ЧПУ Sinumerik, Fanuc, Heidenhain, Okuma, Mazak, Haas, «Балт-Систем»; интеграция с аппаратной частью; российская разработка.

Недостатки: меньшее по сравнению с другими системами мониторинга, количество поддерживаемых систем ЧПУ и контроллеров; мало реальных предприятий-пользователей; малое количество поддерживаемых форматов для экспорта отчетов.

«Навиман» ранее считался самыми дорогим программным продуктом среди отечественных разработок. Поставка включала приобретение полного пакета продукта вместе с планшетом, в то время как у других компаний составляющие (модули) приобретались за отдельную плату. Интересным решением является управление действиями эксплуатационного персонала на основе нормирования техноло-

гических процессов. В режиме реального времени изготовления деталей отображается текущее состояние изготовления партии деталей. Для достижения заданных временных показателей с нужным качеством функционал настроен на осуществление поддержки производственной деятельности путем предоставления персоналу необходимых наглядных инструкций, в том числе с применением быстрой оцифровки видеоряда лучших практик требуемых действий. Предложенные решения применяются для сокращения периода наладки оборудования (сокращения подготовительно-заключительного времени), позволяя выполнять эти процессы в заданные нормы времени и делая их повторяемыми.

Преимущества: удобный интерфейс; возможность прямого подключения к подавляющему большинству систем ЧПУ и к универсальному оборудованию, наличие дополнительных инструментов для повышения производительности персонала; возможность аренды продукта на любой срок с правом выкупа; отсутствие модульной структуры с необходимостью докупать программные модули; отечественная разработка.

Недостатки: применения в аппаратной части мини-компьютера с ОС Windows с обычным классом защиты в условиях цеха; отсутствие облачного хранения данных (реализовано в следующей версии системы – «Аммолит», позиционирующейся в виде отдельного продукта с функционалом интернет платформы).

CNC-VIZION предлагает три режима эксплуатации: Демо (временная эксплуатация для ознакомления с возможностями), промышленная эксплуатация, масштабирование.

Достоинства: предоставляется удаленный сервис диагностики станков; качественная техническая поддержка; разработана система интеллектуальных статусов оборудования, которые определяются независимо от оператора.

Недостатки: малое количество пользователей; отсутствие возможности облачного хранения и обработки данных; не стандартизировано подключение другого, кроме станков, оборудования.

Далее приведено краткое сравнение с аналогами, которое проводилось по пяти параметрам:

1. Возможность сбора статистических данных о работе оборудования.
2. Возможность контроля состояния инструмента.
3. Возможность оптимизации режимов резания.
4. Диагностические данные.
5. Независимость от системы ЧПУ.

Результаты сравнения приведены в таблице 1.1. Прямые аналоги, предоставляющие возможность контроля вибрации, обеспечивают два канала обработки информации, в то время как ИИС позволяет проводить сбор информации по трем каналам, при этом они не предназначены для контроля процесса резания.

Аналоги, обеспечивающие контроль состояния оборудования, не позволяют осуществлять косвенный контроль состояния режущего инструмента. Конкуренты, обеспечивающие косвенный контроль состояния режущего инструмента, не позволяют контролировать состояние оборудования и проводить оптимизацию режимов резания.

Таблица 1.1 – Сравнение с аналогами

Наименование аналога	Стадия	Параметр	Параметр	Параметр	Параметр	Параметр
		1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6	7
Разработанная ИИС	В стадии опытной эксплуатации	Да	Да	Да	Уровень вибрации	Автономный модуль
СМПО Foreman	Представлен на рынке	Да	Нет	Нет	-	Автономный модуль

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7
АИС «Диспетчер»	Представлен на рынке	Да	Нет	Нет	-	Автономный модуль
«Навиман»	Представлен на рынке	Да	Нет	Нет	-	Автономный модуль
Winum CNC	Представлен на рынке	Да	Нет	Нет	-	Автономный модуль
DPA (Discrete Processes Automation)	Представлен на рынке	Да	Нет	Нет	-	Автономный модуль
CIMCO MDC-Max	Представлен на рынке	Да	Нет	Нет	-	Автономный модуль
Machine Tool Diagnostics	В стадии разработки	Нет	Да	Нет	Компоненты силы резания $P_x$ , $P_y$ , $P_z$	Автономный модуль
Okuma Navi	Представлен на рынке	Нет	Да	Да	Уровень вибрации	Только интегрированная версия

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7
Nordmann	Представлен на рынке	Нет	Да	Нет	Сила резания, сигнал АЭ	Только интегрированная версия
Виброанализатор СД-23	Представлен на рынке	Нет	Нет	Нет	Уровень вибрации	Автономный модуль
ОНИКС	Представлен на рынке	Нет	Нет	Нет	Уровень вибрации	Автономный модуль

В заключении стоит отметить, что рынок ИИС переживает значительный рост, обусловленный растущим внедрением платформ IoT и потребностью в эффективных операционных показателях в отраслях производства. Этот рынок охватывает различные приложения/модули, включая проектирование и разработку продукции, профилактическое обслуживание и оптимизацию производственных процессов. Предприятия используют ИИС не только для повышения своей эффективности, например, для оптимизации технологических операций, но и для тестирования и валидации производительности оборудования.

Интеграция ИИС с искусственным интеллектом, машинным обучением и продвинутой аналитикой позволяет проводить более точные симуляции и прогнозы, но, несмотря на преимущества внедрения ИИС и цифровых двойников на их основе, предприятия сталкиваются с такими проблемами, как высокие затраты на внедрение и сопровождение внедренных систем, проблемы конфиденциальности данных.

## 1.5 Выводы

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

- аналоги, осуществляющие контроль состояния технологических систем в целом, не обеспечивают косвенный контроль состояния используемого инструмента. Решения же, осуществляющие косвенный контроль состояния инструмента, не обеспечивают контроль состояния технологической системы в целом;
- необходимо подключения ИИС к СЧПУ объектов КИИ, что требует повышения категории объекта КИИ и увеличения издержек предприятия;
- отсутствуют универсальные решения прогнозирования состояния технологической системы, в том числе с помощью применения методов искусственного интеллекта;
- недостаточно проработан инструментарий создания цифровых двойников технологических процессов;
- высока стоимость внедрения.

Исходя из выявленных недостатков существующих на данный момент решений, были сформулированы требования к разрабатываемой информационно-измерительной системе контроля технологических систем:

- отображение состояния технологической системы в процессе обработки оператору в режиме реального времени и выдача рекомендации;
- возможность подключения оборудования к ИИС без изменения категории объекта КИИ;
- построение цифровых двойников технологического процесса;
- возможность трансформации ИИС как в систему адаптивного управления, так и в платформу IoT;
- малозатратная и быстровыполнимая масштабируемость решения на однотипное станочное оборудование предприятия (или группы предприятий), не осна-

щенное 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.

## 2 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА СБОРА ИНФОРМАЦИИ ИИС НА ОСНОВЕ ВИБРОСИГНАЛА

В настоящее время высокая сложность и нестабильность производственных процессов машиностроительных предприятий приводит к необходимости принятия управленческих решений в условиях неопределенности, что существенно сказывается на эффективности всего производства в целом [182]. Снижение неопределенности при оперативно-производственном планировании машиностроительных процессов производства возможно за счет анализа данных о состоянии технологических систем, собираемых с помощью систем контроля работы оборудования, то есть ИИС [183, 184, 185, 186, 187, 188].

В состав всех ИИС безусловно входят различные датчики, необходимые для измерения и регистрации разнородных величин [189, 190], соответственно, роль датчиков является определяющей в любой измерительной системе.

Как известно, термин «датчик» охватывает широкий диапазон технологий и устройств. Во всех случаях при любых типах датчиков взаимодействие между датчиком и локальной физической окружающей средой приводит к генерации соответствующего сигнала, интерпретация которого путем обработки, синтеза данных и тому подобного в конечном итоге обеспечивает получение нужной информации [191].

Измерения электрических и неэлектрических величин базируются на использовании различных физических законов и явлений. Специалистам известны около 400 физических явлений, которые могут быть положены в основу создания средств измерений.

Так как основным источником информации для получения достоверных данных о работе оборудования являются датчики вибрации [192, 193, 194], то рассмотрим этот вопрос подробнее, начав с причин возникновения вибраций в процессе работы оборудования, затем с определения и их классификации датчиков вибрации.

## 2.1 Причины возникновения вибраций в процессе работы оборудования

Причины возникновения вибраций в технологической системе могут быть различны, например, вибрации, вызванные работой соседнего оборудования, передающиеся через грунт, стенные и потолочные перекрытия, или связанные с дисбалансом различных частей станка. Также присутствуют собственные колебания технологической системы при обработке. Рассмотрим указанные причины подробнее.

Колебания, вызванные работой соседнего оборудования. Это нежелательные возмущения, которые передаются через грунт, стенные и потолочные перекрытия. Устранение таких явлений заключается в усилении фундаментов, отрыва фундамента станка от общего фундамента цеха при помощи антивибрационных материалов (например, песка), установке амортизационных прокладок.

Дисбаланс различных частей токарного станка. Устраняется балансировкой или заменой изношенных вращающихся частей станка. Сбалансированность заготовки достигается установкой дополнительных грузов.

Технологические отклонения при изготовлении зубчатых передач оборудования. В этом случае возникают возмущающие систему механические силы, передающиеся на силовые элементы станка. В ременных передачах возникновению вибраций способствуют некачественные сшивки.

Прерывистый характер резания. Частое чередование режимов обработки приводит к толчкам и вибрациям. Если такая работа станка обуславливается технологическим режимом, то для устранения нежелательных явлений необходимо преднамеренное увеличение прочности детали.

Собственные колебания при обработке. Вполне сбалансированная обрабатывающая система может без видимых причин вызывать сильные вибрации, что связано с явлением резонанса. Собственная частота колебаний работающего станка совпадает с частотой колебаний окружающего оборудования, самого здания. Для устранения такого явления нужно изменить режим резания и, возможно, технологию.

Колебания оказывают влияние на точность обработки, увеличивают шерохо-

ватость обрабатываемой заготовки, уменьшают стойкость инструмента, а также создают шум, который утомляет рабочих.

Колебания делятся на 3 типа: вынужденные колебания, собственные колебания и автоколебания.

Вынужденные колебания имеют место при действиях на систему внешней периодической возбуждающей силы. Источниками внешней силы могут быть:

- резание, в том числе прерывистое;
- дисбаланс вращающихся частей (заготовки, режущего инструмента);
- колебания, передаваемые извне, например, от расположенных поблизости вибрирующих машин (пресс, молот) через фундаменты и перекрытия;
- дефекты передач и привода станка (например, сшивка ремней и так далее).

При этом резание влияет на уровень вибрации следующим образом:

1. При увеличении скорости резания интенсивность вибраций в первый момент возрастает. По достижении скорости резания 80-150 м/мин вибрация начинает затухать. Конкретное значение скорости резания, при которой вибрация уменьшает свои значения, зависит от совокупности параметров режущей системы.

2. Увеличение ширины среза усиливает амплитуду колебаний (вибраций).

3. Увеличение подачи инструмента или толщины среза вызывает некоторое уменьшение вибраций.

4. Применение резцов с небольшими углами, позволяющими производить большие подачи на высоких скоростях, приводит к увеличению амплитуды нежелательных колебаний.

Собственные колебания вызываются внешними причинами (резкое изменение нагрузки, толчки, удары и т. п.) и являются затухающими гармоническими. Они характеризуются частотой, периодом колебаний и амплитудой колебаний.

Автоколебания возникают в отсутствие внешнего периодического воздействия, причем источник энергии их возникновения является неотделимой частью технологической системы. Как правило, автоколебания вызываются отклонением припуска на обработку в начале обработки и на последующих операциях вследствие технологической наследственности.

Вибрация системы СПИЗ изменяется в широком диапазоне и несет обобщенную информацию о процессе резания, поэтому необходимо извлечь из сигналов вибрации ту информацию, которая отображает процессы изменения в технологической системе. При этом полученные сигналы вибрации характеризуют текущее состояние технологической системы и могут быть использованы для формирования вибропаспорта оборудования, рассмотренного в следующем разделе.

## **2.2 Датчики вибрации**

Если вибрацию рассматривать в общем, то это механические колебания технологической системы, которые можно характеризовать такими параметрами, как частота, амплитуда, колебательная скорость и колебательное ускорение.

### **2.2.1 Анализ датчиков вибрации**

Датчик вибрации представляет собой устройство, которое реагирует на вибрационные явления и регистрирует их. Предназначен для определения виброперемещения, виброскорости и виброускорения. Своевременное определение показателей позволяет выявить недостатки и неисправности в работе приборов, предотвратить поломки или в динамике контролировать изменения в системе. Такие датчики применяются в различных аппаратах, которые требуют учета вибрационных процессов, в диагностических системах, теплоэнергетике, электроэнергетике, транспорте [195].

Основной характеристикой датчика вибрации является чувствительность. Она может быть разной и варьируется в диапазоне от 0,5 мВ/г для миниатюрных моделей до 100 мВ/г для промышленных агрегатов и свыше 500 мВ/г для высокочувствительных.

К основным свойствам относятся [195]:

- высокий показатель ударной стойкости;
- высокий показатель собственной частоты;
- низкие показатели уровня собственного шума.

В зависимости от параметра, положенного в основу, вибродатчики классифицируют [195]:

- по принципу работы. Генераторные – осуществляют прямое преобразование механической энергии в электрическую. Параметрические – имеют внешние источники питания, позволяют изменять сопротивление, частоту и другие электрические параметры за счет механического воздействия;
- по способу получения информации. Контактные – непосредственно крепятся к объекту исследования. Бесконтактные – измерения параметров проводятся без предварительного крепежа, на определенном расстоянии;
- по механизму преобразователя сигнала. Оптические, пьезоэлектрические, трибоэлектрические, вихретоковые, радиоволновые.

Прежде чем приступить к изучению параметров вибрации, необходимо учитывать [195]:

- принцип измерения. Кинематический – измерения осуществляются в тот момент, когда исследуемый объект находится в состоянии покоя. Динамический – объект должен находиться в состоянии искусственного движения;
- способ измерения. Контактный или бесконтактный. Контактные датчики имеют достаточно простую конструкцию, просты в использовании, имеют точное положение на исследуемом объекте. Их можно устанавливать не на все приборы, что сужает область их применения. Такие датчики подвержены различного рода механическим повреждениям, перепадам температур, другим атмосферным явлениям, которые сказываются на работе, приводят к сбоям и отказам. Кабель может мешать вращающимся элементам объекта. При выборе необходимо учитывать массу, для того чтобы сведения были достоверными. На достоверность измерений также негативно может влиять слабый уровень импульсов, собственный шум и звуковые помехи. Таким образом, возникает необходимость периодической калибровки датчика. Бесконтактные устройства наиболее практичны в использовании в случае, когда прямой физический контакт с исследуемым объектом нецелесообразен или недопустим. Они менее подвержены механическим воздействиям, инерционным процессам, что влияет на ка-

чество показателей вибрации. Позволяют получить информацию на разных расстояниях, при любых атмосферных и температурных условиях, в состоянии движения или покоя, от химически агрессивных и взрывоопасных объектов, а также находящихся в труднодоступных местах. С их помощью предоставляется возможность исследования объектов любой массы, форм и размера.

К отличительным особенностям датчиков вибрации можно отнести [195]:

- принцип установки. Датчики вибрации могут быть установлены стационарно или временно;
- сферу использования. Высокие показатели надежности и прочности позволяют применять данные приборы в различных сферах, в том числе в условиях пожаро- и взрывоопасности;
- технические характеристики. Простая конструкция, понятный принцип работы, чувствительность, точность характеристик, возможность представления информации в цифровой форме.

Итак, учитывая проведенный анализ вышеизложенного материала, были разработаны датчики вибрации для ИИС оперативного косвенного контроля работы оборудования, которые рассмотрены далее.

Разработанный датчик контроля вибрации предназначен для сбора информации об уровне вибрации технологической системы в процессе работы.

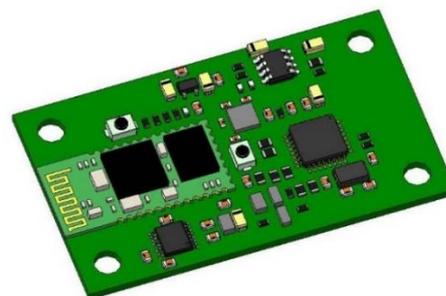
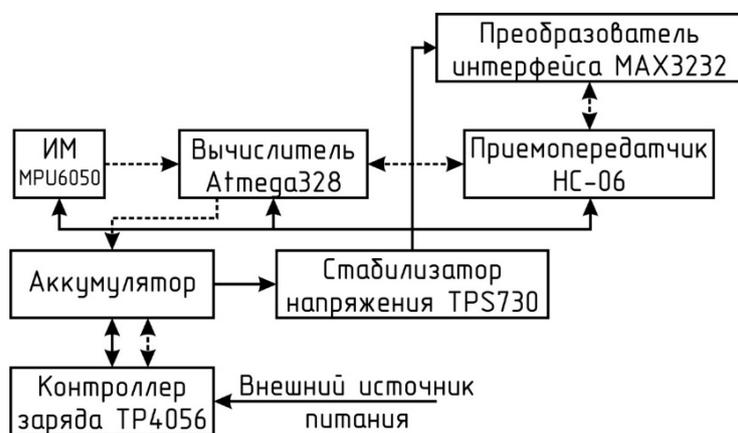
В ходе работ по разработке и внедрению ИИС было предложено несколько вариантов печатных плат датчиков контроля вибрации [196].

### **2.2.2 Разработка различных вариантов датчиков вибрации**

Разработаны два варианта датчиков вибрации: беспроводной и проводной, при этом во время работы было создано несколько их поколений, учитывающих опыт эксплуатации в реальных производственных условиях. Беспроводные датчики предназначены для размещения на обрабатываемых заготовках или подвижных частях технологической системы [197, 198]; проводные датчики размещаются на неподвижных частях технологической системы.

Состав вычислительного узла беспроводного датчика вибрации первого поколения в виде структурной схемы представлен на рисунке 2.1.

На рисунке 2.1, а пунктиром показаны линии информационного взаимодействия, сплошными линиями – распределение и преобразование энергии.



а

б

Рисунок 2.1 – Вариант беспроводного датчика вибрации первого поколения:

а – структурная схема; б – внешний вид печатной платы

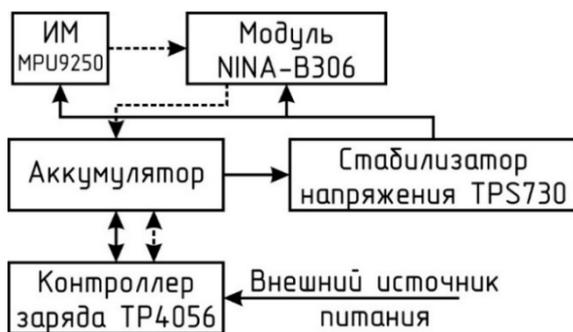
Состав вычислительного узла можно разделить на две основные части: первая – преобразование энергии осуществляется контроллером заряда, аккумулятором, стабилизатором напряжения; вторая – преобразование информации осуществляется измерительным модулем MPU6050, вычислителем, приемопередатчиком, преобразователем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

Датчик вибрации является автономным устройством с аккумуляторным питанием. Время автономного функционирования – не менее 8 часов. Для заряда аккумулятора используется контроллер заряда на базе микросхемы TP4056. Выходное напряжение аккумулятора в процессе работы изменяется от 4,2 до 3,1 В. Для обеспечения стабилизированного питания схемы используется микросхема линейного стабилизатора TPS730, позволяющего обеспечивать ток в нагрузке до 250 мА. Инерциальный измерительный модуль MPU6050 состоит из трехосных измерителей линейного ускорения (до 16 g) и трехосных измерителей угловой скорости (до 2000 °/с). Модуль имеет цифровой выход по интерфейсу I<sub>2</sub>C. Частота обновления

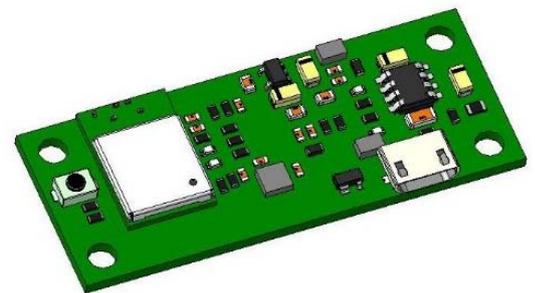
информации о действующем ускорении – 1 000 Гц. Универсальный контроллер Atmega328 имеет 8-битный процессор и позволяет выполнять большинство команд за один такт. Приемопередатчик интерфейса Bluetooth HC-06 предназначен для использования совместно с контроллерами, не имеющими собственного модуля Bluetooth, обеспечивает связь и взаимодействие по протоколу Bluetooth V2.0 + EDR 3 Мбит/с и поддерживает Bluetooth SPP со скоростью передачи 38400 бит/с.

Разработана электрическая принципиальная схема платы датчика вибрации. По данной схеме осуществлено проектирование печатной платы. Печатная плата имеет прямоугольную форму с размерами в плане 60×35 мм с четырьмя крепежными отверстиями диаметром 4,2 мм, расположенными по углам. Внешний вид печатной платы представлен на рисунке 2.1, б.

Состав вычислительного узла беспроводного датчика вибрации второго поколения представлен в виде структурной схемы на рисунке 2.2, а.



а



б

Рисунок 2.2 – Вариант беспроводного датчика вибрации второго поколения:

а – структурная схема; б – внешний вид печатной платы

Схема преобразования энергии изменений не претерпела и состоит из аккумулятора, контроллера заряда TP4056 и линейного стабилизатора с низким падением напряжения TPS730. В этом варианте используется инерциальный измерительный модуль MPU9250. Помимо датчиков угловой скорости и акселерометров, в нем дополнительно имеются магнитометрические датчики. С позиции построения вычислительного узла преимущество использования MPU9250 заключается в повышенной частоте обновления выходного сигнала о линейном ускорении до

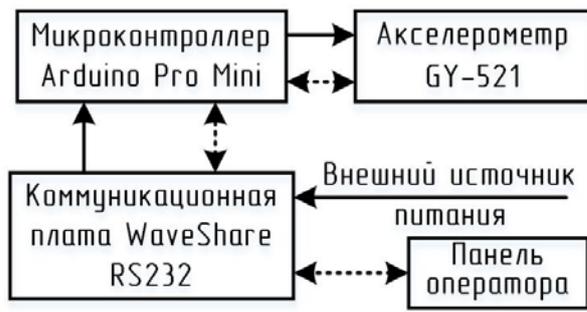
8 000 Гц и возможности информационного обмена по интерфейсу SPI, что существенно расширяет возможности по измерению параметров ускорения. В остальных технических характеристики акселерометров аналогичны акселерометрам модуля MPU6050.

Обработка информации и передача данных осуществляется при помощи специализированного модуля NINA-B306. Это модуль Bluetooth 5 с мощным Arm Cortex-M4 с FPU. NINA-B306 имеет внутреннюю антенну на печатной плате, встроенную в печатную плату модуля. Данный модуль построен на базе специализированной микросхемы фирмы Nordic Semiconductor.

Разработана электрическая принципиальная схема печатной платы. По данной схеме осуществлено проектирование печатной платы. Печатная плата имеет прямоугольную форму с размерами в плане 50×20 мм с четырьмя крепежными отверстиями диаметром 3,2 мм, расположенными по углам. Внешний вид печатной платы представлен на рисунке 2.2, б.

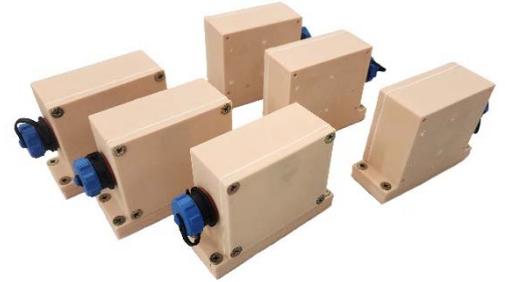
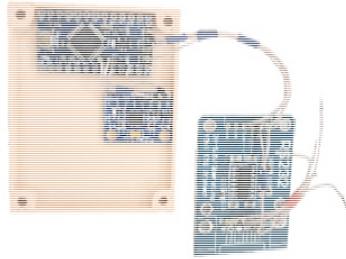
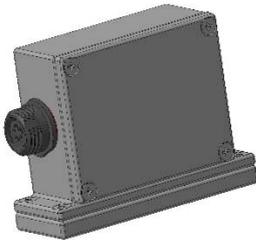
Третье поколение датчика вибрации устанавливается на неподвижные части станка и не имеет в своем составе контроллера заряда и аккумуляторной батареи, так как питание подводится с помощью проводов, а модуль беспроводной связи заменяется на интерфейсный модуль, обеспечивающий передачу данных по стандарту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

Для упрощения разработки датчика были использованы стандартные модули: плата акселерометра GY-521 на базе MPU6050, коммуникационная плата WaveShare RS232 и микроконтроллер Arduino Pro Mini (рисунок 2.3, а). Для подключения датчика вибрации третьего поколения использован герметичный разъем OL1312/P5. Спроектированный корпус датчика вибрации изготовлен на 3D-принтере (рисунок 2.3, б и рисунок 2.3, в). На рисунке 2.3, г представлен вариант размещения печатных плат в корпусе датчика. Несколько собранных датчиков представлены на рисунке 2.3, д, а эскиз датчика – на рисунке 2.3, е.



а

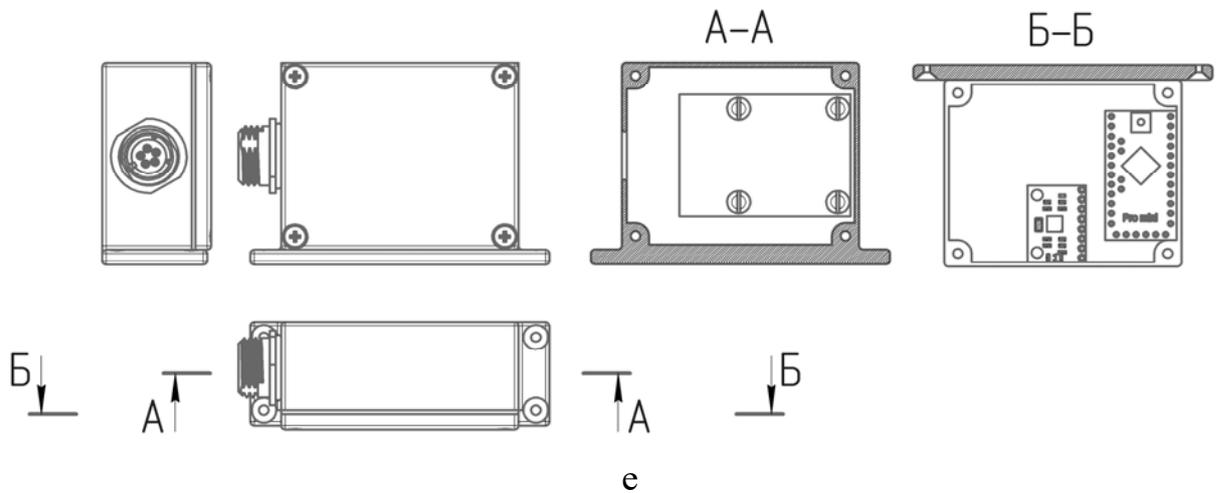
б



в

г

д



е

Рисунок 2.3 – Вариант проводного датчика вибрации:

а – структурная схема; б – элементы корпуса; б – 3D-модель датчика вибрации;  
 в – датчик в разобранном виде; г – датчик в сборе; д – эскиз датчика

На рисунке 2.4 представлена принципиальная электрическая схема – графическое изображение связей между элементами разработанного датчика вибрации.

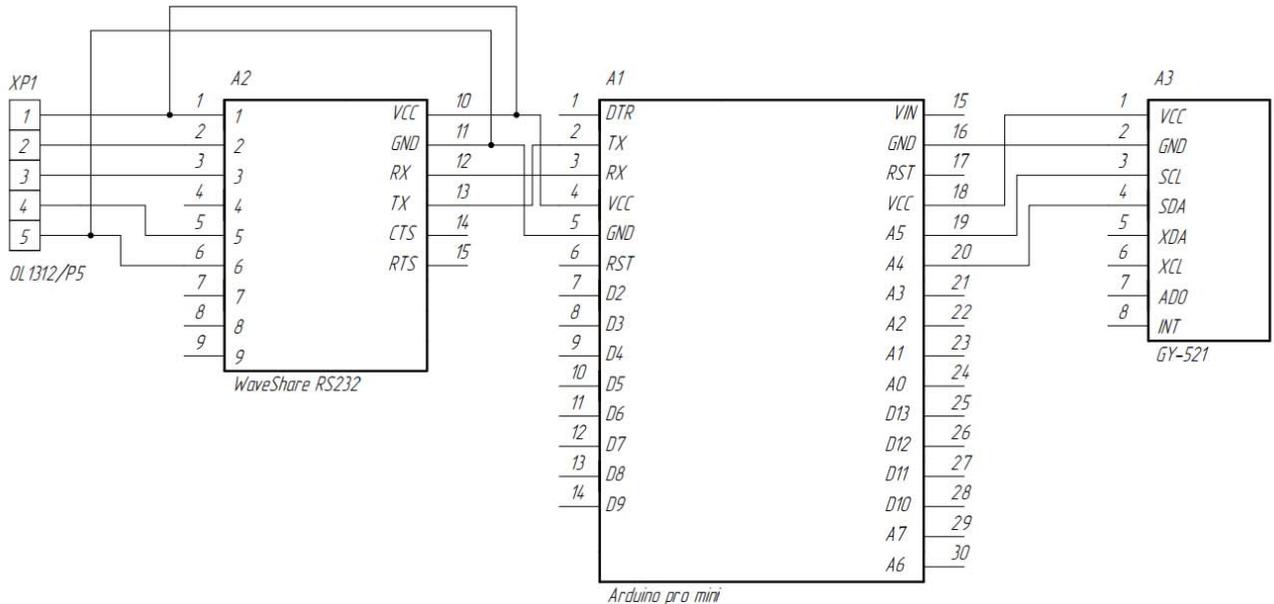


Рисунок 2.4 – Схема электрическая принципиальная

В ООО «Первый метрологический центр» (г. Москва) проведена калибровка датчика в соответствии с ГОСТ ISO 16063-21-2013 «Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 21. Вибрационная калибровка сравнением с эталонным преобразователем». Эталон построен на базе «Установка для поверки и калибровки виброизмерительных преобразователей 9155» (рисунок 2.5), которая позволяет осуществлять поверку датчиков вибрации во всем частотном диапазоне, указанном в Государственной поверочной схеме (от 0,1 до 20000 Гц).

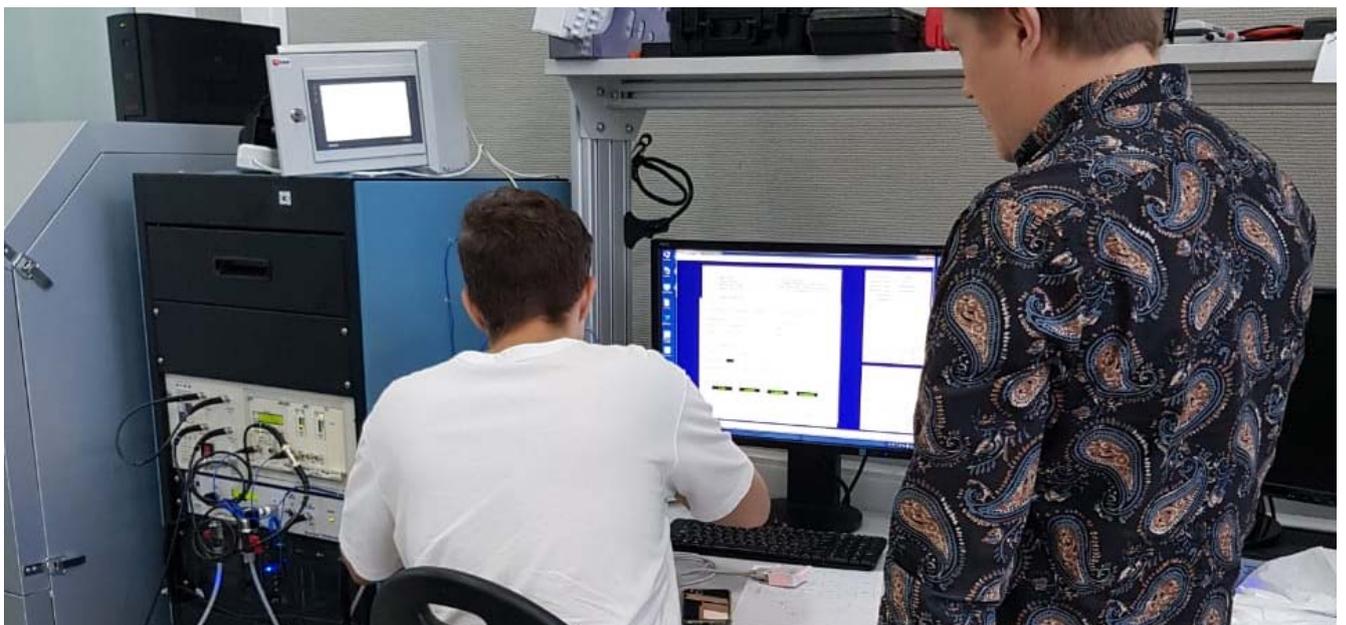


Рисунок 2.5 – Установка для калибровки и процесс калибровки датчика вибрации

Наибольшее отклонение от эталона зафиксировано на частоте 150 Гц. На частоте 200 Гц показания датчика вышли из диапазона измерения. Протокол калибровки и сертификат представлены в приложении А.

### 2.3 Исходные данные временных рядов технологического процесса

Временной ряд – это семейство случайных величин  $x(t)$ , принимающих значения из множества, называемого областью определения процесса, при этом параметр  $t$  принимает дискретные значения [199, 200].

Временной ряд называется стационарным в широком смысле, если его математическое ожидание не зависит от времени  $t$ , а корреляционная функция, являющаяся математическим ожиданием произведения отклонений значений ряда от среднего в различные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  зависит только от разности  $t_1 - t_2$ . Более общее определение предполагает независимость от времени центральных моментов ряда вплоть до некоторого конечного порядка.

Временные ряды технологического процесса, собираемые ИИС (таблица 2.1):

- уникальный номер записи;
- значение виброускорения акселерометра по оси X;
- значение виброускорения акселерометра по оси Y;
- значение виброускорения акселерометра по оси Z;
- дата;
- число секунд с начала дня.

Таблица 2.1 – Пример исходных данных трехосевого акселерометра

1	2	3	4	5	6
44341825	-406	-170	8260	2023-08-01	20378
44341826	-202	6	8520	2023-08-01	20378
44341827	-202	42	8538	2023-08-01	20379

## Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6
44341828	-392	-180	8268	2023-08-01	20379
44341829	-376	-182	8274	2023-08-01	20380
44341830	-196	32	8552	2023-08-01	20380
44341831	-214	28	8558	2023-08-01	20381
44341832	-396	-184	8266	2023-08-01	20381
44341833	-390	-180	8282	2023-08-01	20382
44341834	-222	24	8580	2023-08-01	20382
44341835	-216	32	8532	2023-08-01	20383
44341836	-398	-202	8268	2023-08-01	20383
44341837	-396	-190	8278	2023-08-01	20384
44341838	-210	16	8502	2023-08-01	20384
44341839	-196	70	8556	2023-08-01	20385
44341840	-376	-192	8234	2023-08-01	20385
44341841	-388	-174	8268	2023-08-01	20386
44341842	-204	16	8570	2023-08-01	20386

Значение виброускорения акселерометра по осям хранится в «сыром» виде и для отображения пользователю должно быть преобразовано по формуле:

$$a = r \cdot \frac{g \cdot d}{2^n},$$

где  $r$  – «сырые» данные акселерометра,  $g$  – ускорение свободного падения,  $9,81 \text{ м/с}^2$ ,  $d$  – диапазон измерений акселерометра,  $g$ ,  $n$  – разрядность АЦП акселерометра (обычно 16 бит).

Для трехосевого акселерометра для каждой секунды по каждой из осей записано минимальное и максимальное значение виброускорения на заданном временном интервале. При этом опрос акселерометра происходит 200 раз в секунду.

Запись данных датчика тока состоит из следующих полей (таблица 2.3):

- уникальный номер записи;
- среднеквадратичное значение тока, А;
- дата;
- число секунд с начала дня.

Таблица 2.3 – Пример исходных данных датчика тока

22961579	5,02	2023-08-01	20378
22961580	5,05	2023-08-01	20378
22961581	4,97	2023-08-01	20379
22961582	4,98	2023-08-01	20379
22961583	4,99	2023-08-01	20380
22961584	4,9	2023-08-01	20380
22961585	4,94	2023-08-01	20381
22961586	4,84	2023-08-01	20381
22961587	4,83	2023-08-01	20382
22961588	4,9	2023-08-01	20382
22961589	4,86	2023-08-01	20383
22961590	4,84	2023-08-01	20383
22961591	4,89	2023-08-01	20384
22961592	4,79	2023-08-01	20384
22961593	4,8	2023-08-01	20385
22961594	4,86	2023-08-01	20385

## 2.4 Выбор методов статистического анализа временных рядов

Основными статистическими методами исследования временных рядов являются [201]:

- метод выделения тренда (временного сглаживания);
- регрессионный;
- автокорреляционный;

- адаптивный (скользящих средних);
- метод гармонического анализа;
- метод сингулярного спектрального анализа;
- метод бутстрепа (численного размножения выборок);
- нейросетевой.

При исследовании временных рядов с помощью метода выделения тренда (временного сглаживания) принято выделять несколько составляющих [201]:

$$x(t) = x_{\text{тренд}}(t) + x_{\text{цикл}}(t) + \xi(t),$$

где  $x_{\text{тренд}}(t)$  – плавно меняющаяся компонента, определяемая долговременной тенденцией (трендом) изменения ряда признаков,  $x_{\text{цикл}}(t)$  – циклическая или сезонная компонента, которая отражает повторяемость процессов на определенных промежутках времени, а  $\xi(t)$  – случайная компонента, содержащая влияние прочих факторов, механизм которого (влияния) скрыт от наблюдателя. Первые две составляющих (тренд и цикл) в идеале должны быть описаны точно, так как это закономерные факторы, изучаемые в рамках детерминистских моделей.

Трендовая компонента временных рядов обычно точно не известна, а, как и ряд в целом, является случайной величиной, но ее изменение из некоторых априорных суждений часто может быть качественно описано аналитически. Для описания тренда используются так называемые кривые роста, которые позволяют моделировать процессы трех основных качественных типов: без предела роста, с пределом роста без точки перегиба, а также с пределом роста и точкой перегиба. В этом случае подбираются параметры той или иной функциональной зависимости для трендовой составляющей, после исключения которой остается стационарный ряд циклической или сезонной компоненты.

Ряды, которые после надлежащих подготовительных операций можно считать стационарными, далее изучаются методами регрессионного, корреляционного и гармонического анализов. Каждый из этих методов используется для создания некоторой прогнозной модели для изучаемых рядов [201].

Регрессионные модели применяются в основном тогда, когда объясняющая

переменная (величина  $X$ ) не является случайной, а автокорреляция между значениями другой (объясняемой величины  $Y$ ) мала. Регрессионная модель позволяет связать две величины  $Y$  и  $X$  функциональной зависимостью по имеющимся  $N$  парам значений  $(x_k, y_k)$  методом наименьших квадратов (МНК).

Для применения автокорреляционных моделей (АМ) желательно иметь временной ряд, автокорреляционная функция которого имеет небольшое число максимумов и достаточно быстро спадает с ростом шага автокорреляции. Если имеется цикличность данных, которая меняется со временем, то полностью исключить ее различными методами сглаживания, как правило, не удастся. В этом случае автокорреляционные модели применяются на этапе качественного анализа, точность которого должна быть улучшена с использованием других подходов [201].

Регрессионные и корреляционные модели и методы прогнозирования стационарных рядов нуждаются в адаптации при использовании их в нестационарном случае, поскольку в этом случае ошибка прогноза, получаемая этими методами, может не убывать с увеличением статистической базы.

В моделях регрессионного анализа средние величины (математическое ожидание, дисперсия, ковариация) постоянны. Уточнение этой модели в случае зависимости указанных величин от времени, то есть от текущего значения  $t$ , может быть сделано посредством аналитического моделирования такой зависимости, либо переходом к первым, вторым и так далее разностям в нестационарных временных рядах, выражающих зависимость средних величин от времени, либо тем же регрессионным анализом – но уже изучаемых величин на время. Окно усреднения становится при этом скользящим. Однако остается невыясненным, какой ширины должно быть это окно [201].

Те же проблемы возникают и при использовании АМ или их обобщений. При этом возникают дополнительные трудности с анализом коррелограмм: например, необходимо отличать эффекты назначенной периодичности, связанной с суточным, недельным или иным циклом, и внутренне обусловленной зависимости между членами ряда. Увеличение промежутка усреднения в этом случае не приво-

дит к успеху, поскольку зависимость, наблюдавшаяся в одной выборке, может исчезнуть в другой того же объема, но отнесенной к иному моменту времени. Усреднение коррелограммы по некоторому промежутку времени и переход к средней коррелограмме за период наблюдений увеличивает неточность прогноза на короткий промежуток времени, а на большом интервале такую задачу ставить вообще не очень осмысленно. Как и в случае с регрессионными моделями, наилучший период усреднения не известен.

Модель скользящего среднего (СС) состоит в том, что для определения свойств временного ряда с целью краткосрочного прогноза берется выборка последних данных за некоторый промежуток времени  $T$ . Модификацией модели СС является взвешенная схема СС, когда оценкой текущего уровня является взвешенное среднее всех предшествующих уровней, причем веса при наблюдениях убывают по мере удаления от последнего уровня, то есть, информационная ценность наблюдений признается тем большей, чем ближе находятся они к концу интервала наблюдений. Возможны также варианты, когда наибольшую ценность имеют наблюдения с определенным лагом [201].

В строгом математическом смысле гармонический анализ есть частный случай спектрального разложения функции, которое понимается как разложение в ряд по собственным функциям некоторого линейного оператора или в интеграл по системе функций, зависящей от непрерывно изменяющегося аргумента. Поэтому под гармоническим анализом часто понимается оценивание частот, амплитуд и фаз ряда гармонических компонент (ряда Фурье), на которые раскладывается анализируемая функция [202].

Гармонический анализ временных рядов имеет ценность только для стационарных в широком смысле процессов второго порядка, когда корреляционная функция зависит от разности моментов времени. Для нестационарных рядов большое число учитываемых членов ряда приводит к достаточно высокой погрешности в оценке статистических характеристик процесса в ближайшем будущем.

Одним из методов выделения так называемой главной части или главных компонентов временного ряда является метод сингулярного спектрального анализа

(ССА), разработанного в теории нелинейных динамических систем и представляющего оригинальный подход к исследованию автокорреляционной зависимости. В основе метода ССА лежат преобразование временного ряда в матрицу и ее сингулярное разложение, приводящее к разложению исходного ряда на аддитивные компоненты [203]. При использовании этого метода производится вычисление выборочной корреляционной матрицы, собственные числа  $\lambda_i$  которой являются выборочными дисперсиями соответствующих главных компонент. Эти компоненты определяются таким образом, чтобы первая из них давала максимально возможный вклад в суммарную дисперсию. Процент вклада  $i$ -й компоненты вычисляется по формуле

$$V_i = \frac{\lambda_i}{M} \cdot 100 \%,$$

где  $M$  – длина окна,  $\lambda_i$  –  $i$ -е собственное число.

Метод сингулярного спектрального анализа представляется наиболее устойчивым к временному тренду, поскольку его задачей является выделение соответствующих главных компонент ряда. Изменение с течением времени размерности пространства базисных векторов матрицы задержек представляется маловероятным событием: размерность является своеобразным индикатором данного процесса, обусловленного определенными физическими явлениями, и ее изменение будет свидетельствовать о том, что процесс изменился по своему качеству. Тем не менее вопрос о размерности самой матрицы и количественной зависимости от этой размерности числа базисных векторов остается в этом методе открытым.

Метод бутстреп, предложенный в 1977 году Б. Эфроном [204], является одним из методов случайной обработки данных стационарных процессов. Его сущность состоит в том, что по имеющимся  $N$  наблюдениям за случайной величиной, образующим по предположению выборку из генеральной совокупности, строится выборочная функция распределения, из которой извлекаются выборки с возвращением того же объема  $N$  с равными вероятностями извлечения каждого значения. По каждой выборке строится оценка интересующего параметра исходной случайной величины, а затем полученные оценки усредняются.

Бутстреп не имеет четкой схемы обобщения на нестационарные процессы.

Размножать некоторую выборку имеет смысл, если только она принадлежит генеральной совокупности, в противном случае такой метод не дает информации о будущей выборке. Размножение выборок предполагает неизменность функции распределения, в противном случае размноженные выборки, полученные с помощью выборочной функции распределения на каком-либо начальном отрезке, будут сильно отличаться от выборок, полученных на основе оригинальной функции распределения, меняющейся во времени, и это различие будет тем больше, чем сильнее меняется функция распределения ряда.

Нейросетевой метод анализа случайных процессов является одним из активно разрабатываемых в последнее время [204]. Он, как и большинство описанных выше методов, направлен на отыскание корреляционной связи между элементами временного ряда. Целью метода является отыскание «предвестника» наступления того или иного события и определение вероятности последнего. Главной задачей является «обучение» искусственной нейронной сети на достаточно большом количестве выборок некоторого объема, после чего принятие решения о наличии «предвестника» принимается сетью на основе эмпирической вероятности наступления похожих случаев в период «обучения». Нейросетевые методы используют математическую модель нейронных сетей, на основе которых функционирует мозг человека и других живых существ. Основу сети составляет нейрон-устройство, имеющее вход, преобразующее полученный сигнал и передающее его на выход, дальше по сети, нейронам, соединенным с ним. Настройкой сети к применению служит обучение – сеть обучается на основе известных примеров (значений ряда), получая поощрения за правильный ответ (к примеру, прогноз) или ответ в пределах точности и наказание за ответ неправильный. Таким образом, получающийся ответ носит вероятностный характер. Особенностью нейросети является то, что создатель не должен знать закономерностей ряда при обучении сети, она обучается сама, на примерах. В этом же заключается и слабое место – сеть может выдавать очень точные ответы без указания, как они получились, представляя собой «черный ящик». Нейросетевой подход зачастую бывает очень эффективным в случаях, когда другие методы несостоятельны, является толерантным к приемлемому количеству

ошибочных обучающих примеров, однако имеет и слабые стороны, такие как отнесенность выдаваемых ответов, высокая вычислительная стоимость обучения, отсутствие гарантий приемлемости результата применения метода [201].

Нейронные сети имеют ограниченную функцию применимости, их обучение довольно трудоемко, а с учетом нестационарности ряда может быть сложным вдвойне.

Ни одно из перечисленных основных направлений статистического анализа временных рядов не является универсальным: конкретный случайный процесс лучше всего моделируется методом одного из направлений. Нет утверждения о том, что некоторый метод при своем практическом применении дает наименьшую ошибку прогнозирования для любых временных рядов. Напротив, каждый из методов имеет определенные ограничения, препятствующие их эффективному применению к задачам прогнозирования [201]. Тем не менее для случая контроля протекания технологических процессов применение нейронных сетей выглядит наиболее перспективным вариантом.

## **2.5 Исследование вибрационного сигнала и формирование исходных данных для ИИС**

Любая ИИС внедряется в производство для получения информации о состоянии исследуемого объекта. Как ранее говорилось, информацией, собираемой датчиком вибрации, является уровень виброускорения технологической системы. Собранные с помощью МЭМС-акселерометра сигналы должны пройти ряд обработок для их преобразования в удобный для анализа вид:

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

Первоначальная обработка исходного сигнала состоит в удалении из него ускорения свободного падения  $g$ , постоянно влияющего на МЭМС акселерометры.

В простейшем случае датчик расположен неподвижно и одна из его осей (например, ось Z) расположена параллельно вектору ускорения свободного 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,  $a_x'$ ,  $a_y'$ ,  $a_z'$  – колебание технологической системы.

Смещение нуля акселерометра в зависимости от условий можно разложить на составляющие по следующей модели, рассмотренной в работе [205]:

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

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.

МЭМС-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 ( $\text{м/с}^2$ ) осуществляется следующим образом:

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

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, соответствующего работе оборудования. Для этого назначается пороговый уровень виброускорения  $a_{\text{порог}}$ , превышение которого соответствует эксплуатации технологического оборудования по назначению. Таким образом, 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.

Также вышеуказанная информация является источником для определения:

- коэффициента загрузки оборудования:

$$k_{\text{загр}} = \frac{|\{a \in \mathbf{A} \mid a \geq a_{\text{порог}}\}|}{|\mathbf{A}|}, \quad (2.1)$$

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 расчетного темпа работы оборудования или коэффициентом вариации темпа [206]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (t - \bar{t})^2}{n}}; \theta = \frac{\sum_1^n (t - \bar{t})}{n}; V = \frac{\sigma}{\bar{t}}, \quad (2.2)$$

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,  $\theta$  – среднее линейное отклонение темпа,  $V$  – коэффициент вариации темпа,  $\sigma$  – 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:

$$K_p = 1 - \frac{\sum_1^n O_i}{\sum_1^n \Pi_i},$$

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

## 2.6 Способ выбора места установки датчика вибраций

Для внедрения разрабатываемой ИИС предложено несколько типов оборудования: токарные, фрезерные и раскатно-деформирующие станки.

В работе были рассмотрены аспекты по выбору места установки датчиков вибрации. Вопросы размещения датчиков вибрации при токарной обработке рассматривались в работах А.В. Анцева и Ч. Данга [193]. Для корректной работы ИИС

на другом технологическом оборудовании, кроме токарных станков, были проведены дополнительные исследования: проведены работы, направленные на определение рациональных мест установки датчиков вибрации ИИС и изучение с их помощью вибродинамических характеристик фрезерных и раскатно-деформирующих станков для подтверждения возможности получения достоверных данных о состоянии технологических систем.

Виброобследование произведено в полном соответствии с действующей нормативной базой:

- ГОСТ 24346-80 «Вибрация. Термины и определения»;
- ГОСТ ИСО 5348-2002 «Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров»;
- ГОСТ ИСО 10816-3-99 «Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях».

### **2.6.1 Анализ вибрации при обработке изделий на токарном оборудовании**

Измерение вибрации проводились поверенными виброанализаторами «ОНИКС» и «АГАТ-М» производства ООО «ДИАМЕХ-2000». Объект исследования – специальный токарный полуавтомат с ЧПУ ТМ-39, с полым шпинделем, трехкулачковым передним патроном, задней цангой и спецнакладкой, предназначен для токарной обработки (включая нарезание резьбы) концов труб.

В соответствии с результатами, полученными в работе [193], была проверена гипотеза о достаточности установки датчика вибрации на подшипниковые опоры шпинделя. На рисунке 2.6 представлена схема точек измерения. На ней точками Б1 и Б2 обозначены точки измерения вибрации на подшипниках шпинделя.

Контроль уровня вибрации в процессе обработки осуществлялся путем поочередной установки датчика на магните в вертикальном (В), горизонтальном (Г) и осевом (О) направлениях в измерительных точках Б1 и Б2 в полном соответствии

с действующей нормативной базой (ГОСТ ИСО 10816-3-99). Оценка вибрационного состояния произведена согласно ГОСТ ИСО 10816-2004 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях».

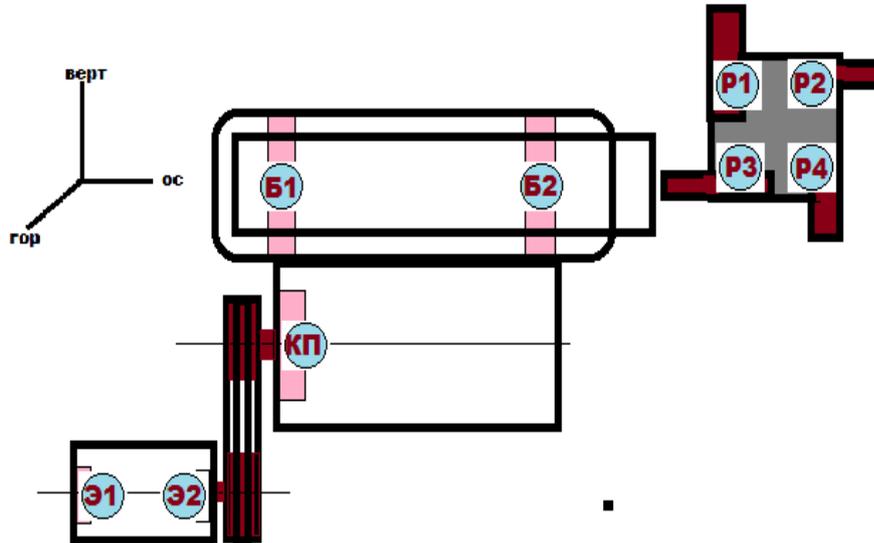


Рисунок 2.6 – Контрольные точки измерений вибрации на токарном станке модели ТМ-39: Э1, Э2 – подшипниковые узлы приводного двигателя; КП – входной вал коробки передач; Б1, Б2 – подшипники шпинделя; P1...P4 – державки режущего инструмента

Измеренный уровень виброскорости шпинделя в процессе обработки представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значения  $V_{скз}$ , мм/с в полосе от 2 до 5 000 Гц

Направл.	Точка	Б1	Б2
	В		0,8
Г		0,7	0,6
О		1,3	1,1

Пиковое значение виброускорения в полосе от 2 до 10 000 Гц приведено в таблице 2.5, а форма виброускорения – на рисунке 2.7.

Таблица 2.5 – Значение виброускорения,  $\text{м/с}^2$  в полосе от 2 до 10 000 Гц

Точка	Б1 – горизонтально	Б2 – горизонтально
Значение виброускорения, $\text{м/с}^2$	5,50	4,12

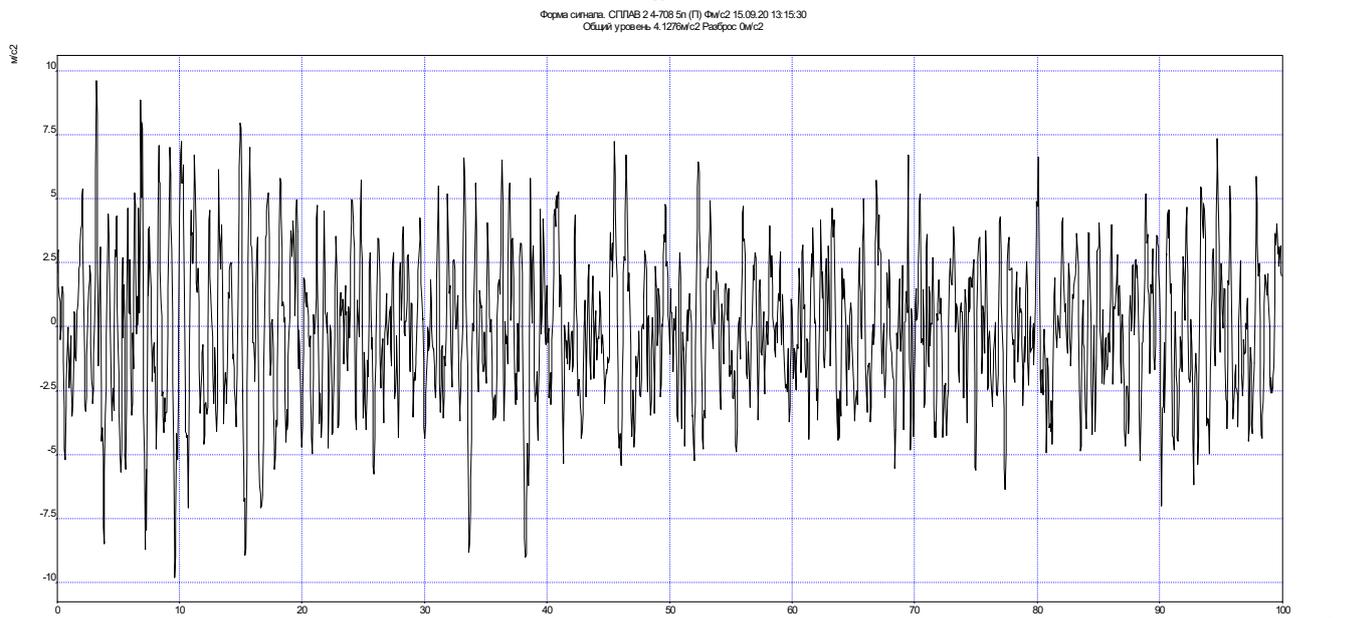
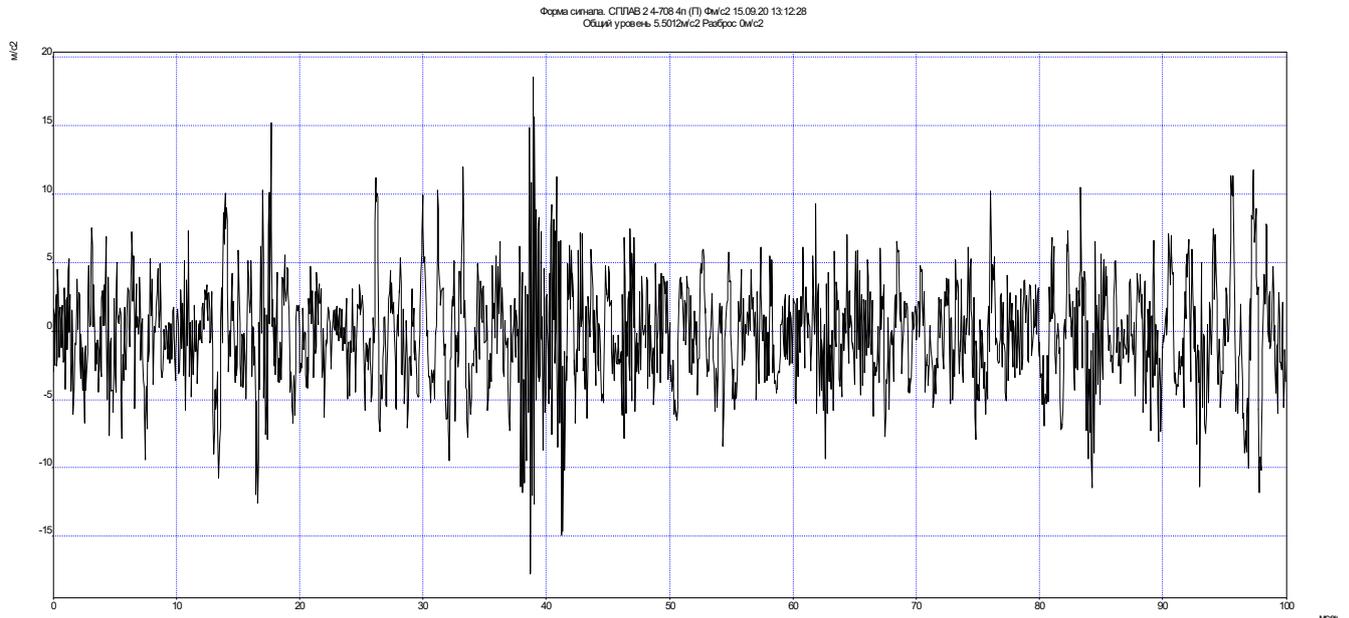
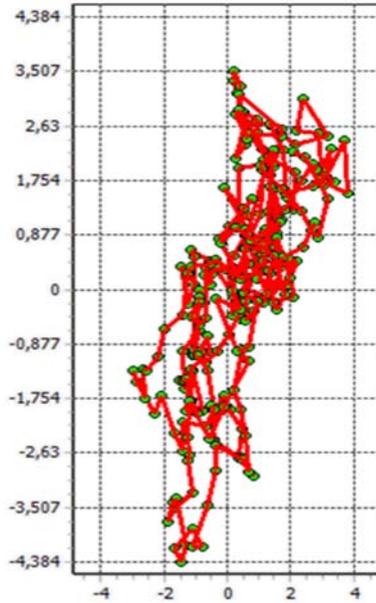


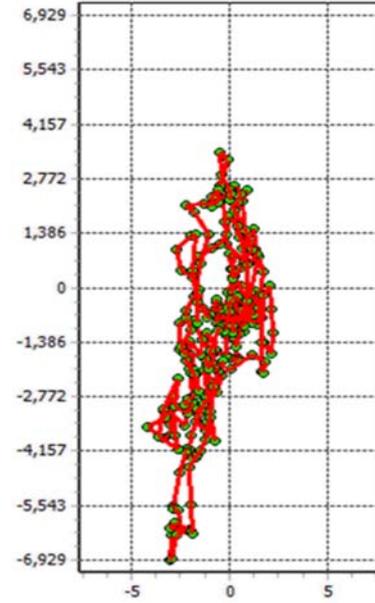
Рисунок 2.7 – Форма виброускорения в полосе от 2 до 10 000 Гц

Для оценки виброперемещения были построены орбиты движения центра бабки во время обработки. Измерения произведены двумя синхронными каналами с отметчиком фазы. Датчики на магнитном основании были установлены под углом

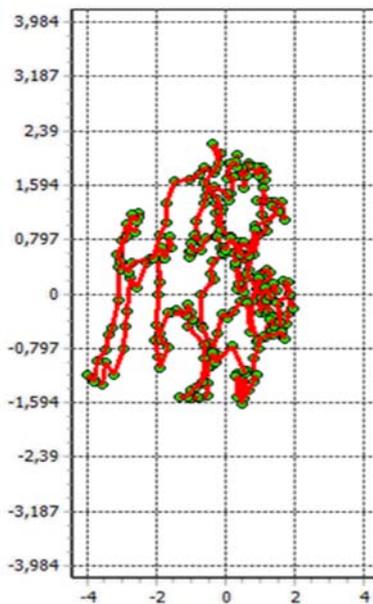
90 градусов в вертикальном и горизонтальном направлениях на корпусе подшипника Б2. Измеряемая величина – размах виброперемещения, мкм. Длина выборки составила 256 точек. Результаты измерений представлены на рисунке 2.8.



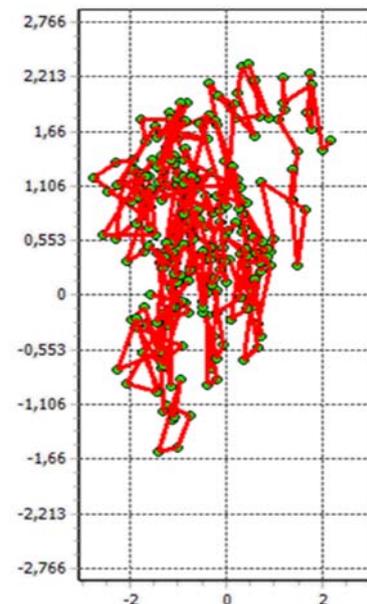
а



б



в



г

Рисунок 2.8 – Виброперемещение центра бабки в процессе обработки, мкм:  
 а – черновое растачивание; б – чистовое растачивание; в – точение канавки;  
 г – нарезание резьбы

Анализ результатов вибродиагностики, приведенных в таблицах 2.4 и 2.5 и на рисунках 2.7 и 2.8 позволяет сделать следующие выводы:

- подтверждено, что размещение датчика вибрации на подшипниковых опорах шпинделя позволяет контролировать состояние токарного станка по уровню вибрации в процессе резания;
- уровень вибрации на передней и задней опоре отличается незначительно и датчик вибрации может быть размещен на любой из них в зависимости от удобства его монтажа;
- по соотношению уровня сигнал/шум виброускорение является предпочтительным параметром, характеризующим состояние станка.

### **2.6.2 Анализ вибрации при обработке изделий на фрезерном оборудовании**

Вибрации при фрезеровании вызываются прежде всего прерывистостью самого процесса фрезерования. Наибольшие вибрации, как известно, в технологической системе «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) при фрезеровании претерпевает фреза, закрепленная в коническом отверстии шпинделя станка. В связи с этим ранее проводились опыты по установлению характера и интенсивности вибраций при фрезеровании фрезами различных диаметров, которые показали, что с уменьшением диаметра фрезы, то есть с уменьшением жесткости системы, интенсивность колебаний возрастает. Вибрации при фрезеровании одновременно с ухудшением чистоты обработанной поверхности ускоряют износ инструмента, снижают точность обработки и вызывают преждевременный износ оборудования.

Результаты определения рационального места установки датчика вибрации и оценки вибродинамических характеристик фрезерного оборудования представлены на примере фрезерного станка BRIDGEPORT модель Hardinge GX 600 (рисунок 2.9, а). Измерение вибрации проводилось анализатором вибрации «АГАТ-М», производства ООО «ДИАМЕХ-2000» (рисунок 2.9, б).

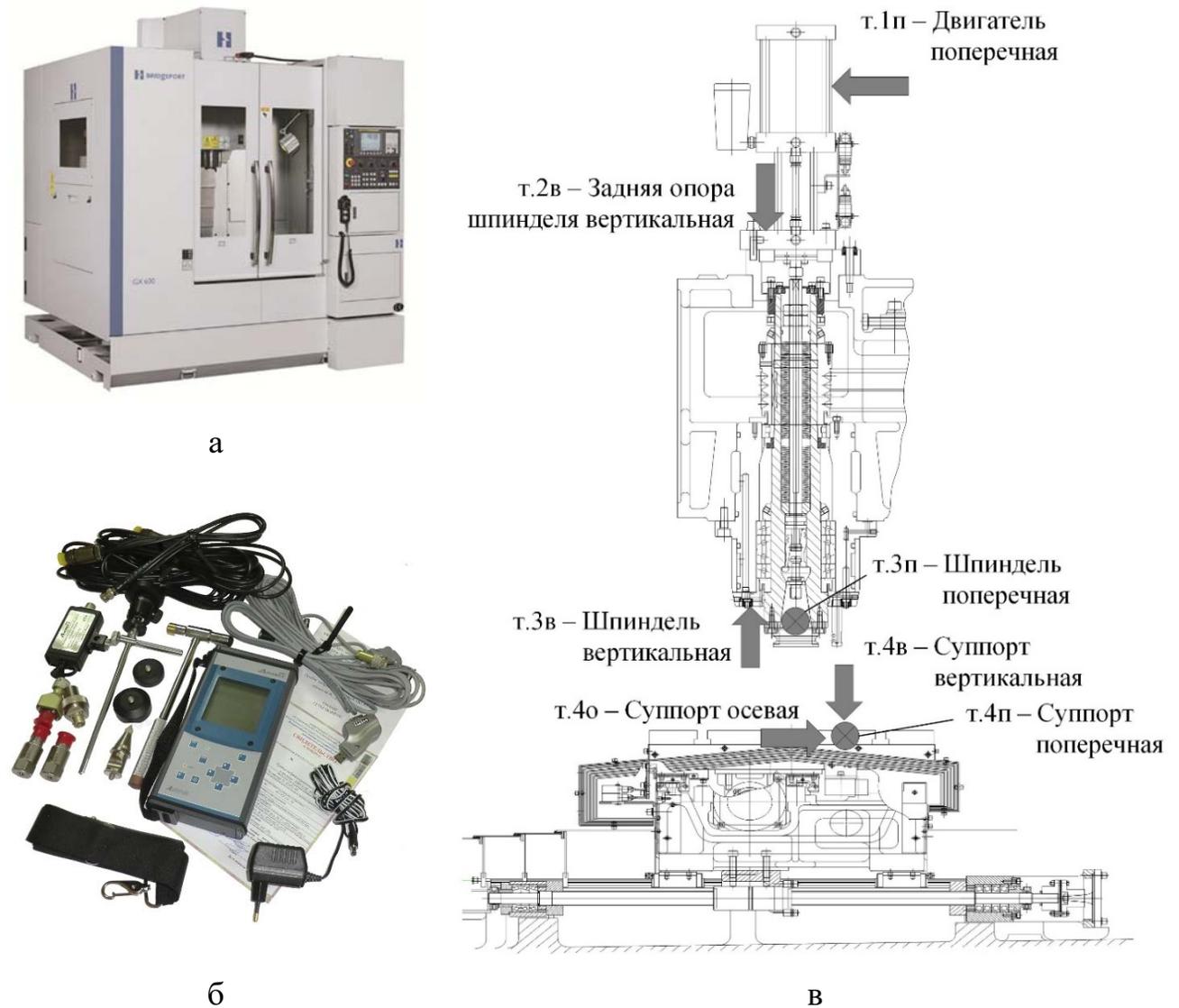


Рисунок 2.9 – Станок и оборудование для проведения исследования:  
 а – станок BRIDGEPORT модель Hardinge GX 600;  
 б – анализатор вибрации «АГАТ-М»;  
 в – схема размещения акселерометра АС-102

Использовался вариант вибродиагностики по нескольким уровням: диагностика по общему уровню параметров вибрации; спектральный анализ.

Акселерометр АС-102 (канал А) располагался в ключевых точках станка (рисунок 2.9, в) 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.

Собранную информацию о вибрации технических систем с целью хранения истории технического состояния технических систем и их отдельных элементов, а также получения этой информации за необходимый период, в ряде работ предлагается записывать 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.

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 2.6, а результаты измерения виброускорения в полосе от 10 до 10 000 Гц – в таблице 2.7

Таблица 2.6 – 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 достоверной оценки оптимальности места установки датчика вибрации диагностического модуля.

Таблица 2.7 – 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 <sup>2</sup>	
На холостом ходу	Вертикальная	---	1,8	1,1	0,1	10	20
	Воперечная	3,1	---	1,5	0,1		
	Осевое	---	---	---	0,1		
Под нагрузкой	Вертикальная	---	2,0	2,3	0,1		
	Поперечная	3,2	---	2,0	0,1		
	Осевая	---	---	---	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 2.7 видно, что максимальный уровень вибрации наблюдается в точке 1. В данной точке происходит наложение вибраций из разных источников (процесс резания, работа электродвигателя), 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 2. Уровни

вибрации в процессе обработки в точках 2 и 3 находятся на одном уровне, но размещение датчика вибрации в точке 2 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.

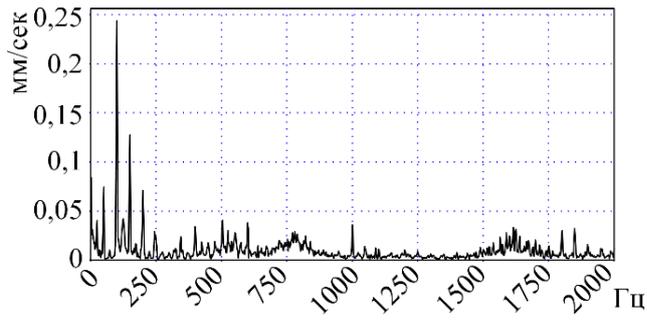
Для уточнения состояния узлов оборудования и процесса обработки использован спектральный анализ вибрационных параметров. Спектрограммы виброскорости используются при мониторинге развитых повреждений. Анализ спектрограмм виброускорения позволяет идентифицировать нестабильность работы оборудования на ранней стадии. При спектральном анализе, кроме частоты колебаний, учитывают значение амплитуды на данной частоте. Для анализа вибрационного спектра выделяют основные составляющие спектрального сигнала: обратная частота, субгармоники, резонансные частоты, негармонические колебания, зубцовые частоты, боковые полосы, вибрации электрического происхождения и шумовые составляющие, возникающие при заеданиях, механических контактах.

На рисунке 2.10 по рассматриваемому фрезерному станку представлены спектры виброскорости, а на рисунке 2.11 – виброускорения.

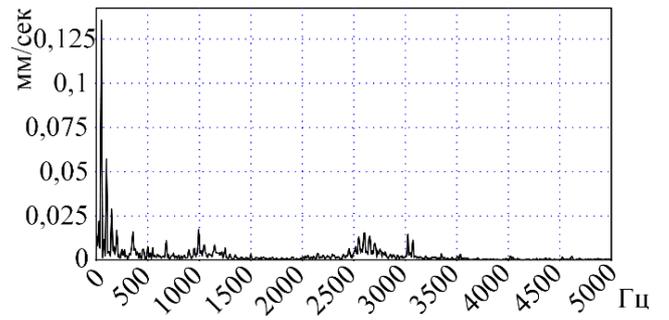
Общий уровень составляющих спектра виброскорости в полосе частот от 2 до 5 000 Гц не превышает принятую норму по параметру виброскорости 4,5 мм/сек. На всех спектрах прослеживается обратная частота вращения шпинделя 43,75 Гц, что соответствовало частоте вращения шпинделя 2 625 об/мин в процессе обработки во время проведения исследования.

По спектрам виброускорения, в полосе частот от 2 до 20 000 Гц не обнаружены ударные импульсы, превышающие общую принятую норму виброускорения 10 м/с<sup>2</sup>. Соответственно, никаких повреждений исследуемый станок не имеет.

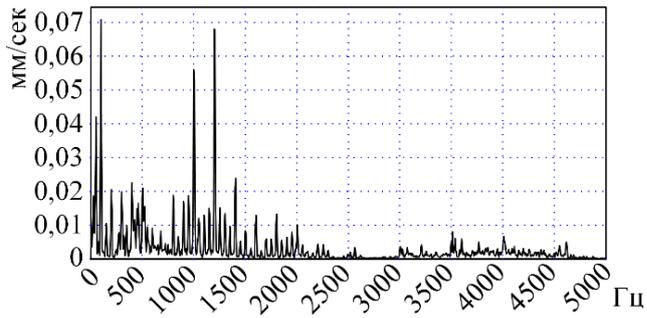
Видно, что диагностика по спектрам вибросигналов позволяет выявить большое количество дефектов оборудования. Во многих случаях данным методом можно диагностировать дефекты агрегатов с середины второго этапа развития, когда уровень энергии резонансных колебаний заметен в общей картине частотного распределения всей мощности вибросигнала.



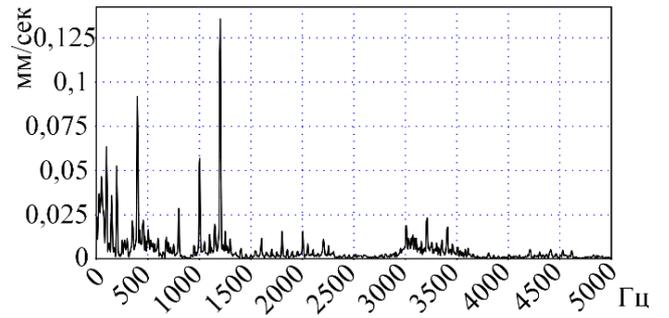
а



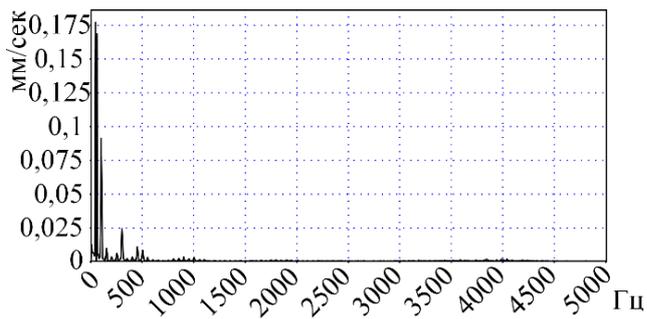
б



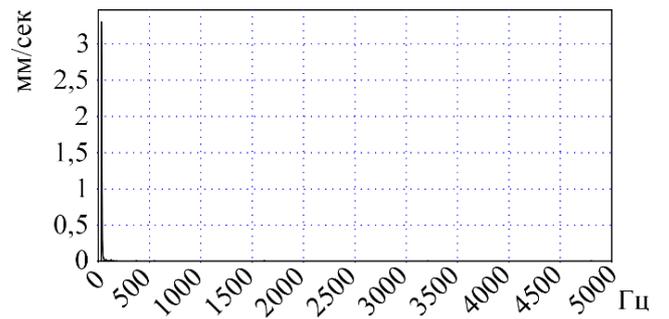
в



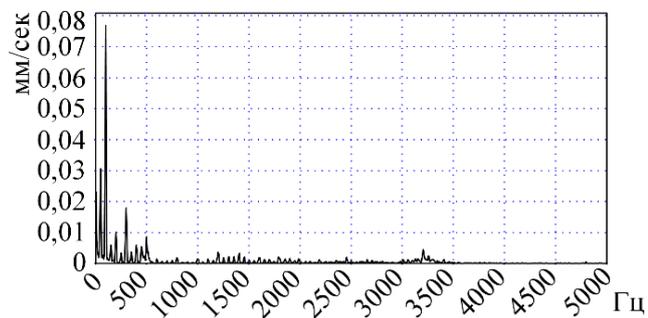
г



д



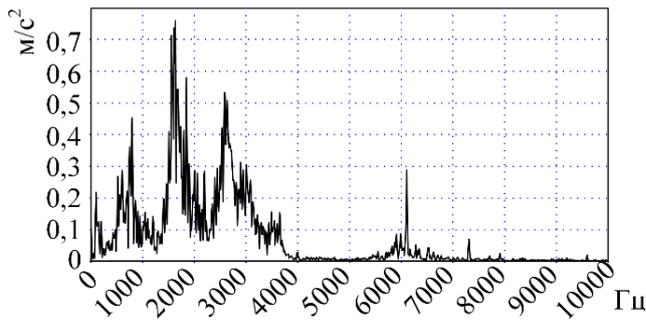
е



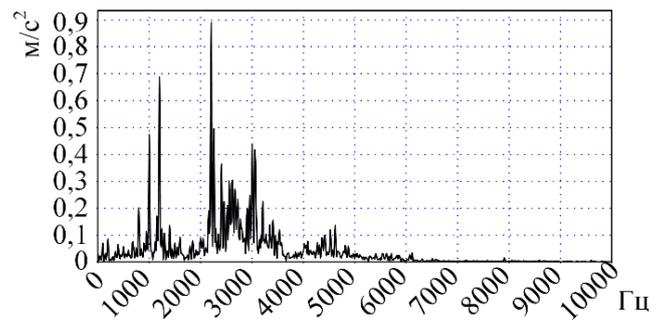
ж

Рисунок 2.10 – Спектр виброскорости в ключевых точках станка:

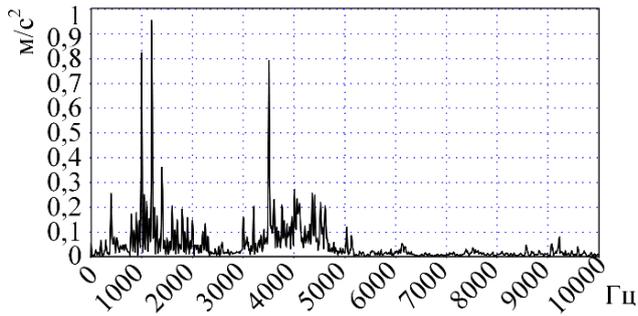
а – 1п; б – 2в; в – 3п; г – 3в; д – 4п; е – 4о; ж – 4в



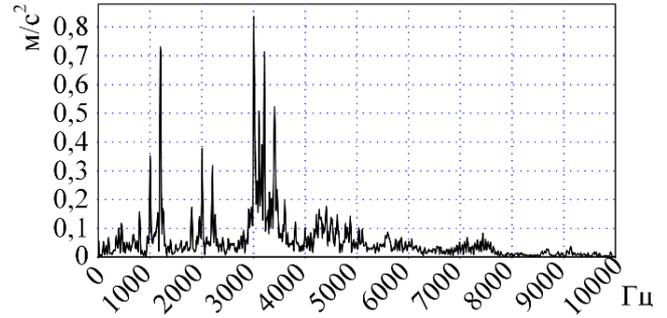
а



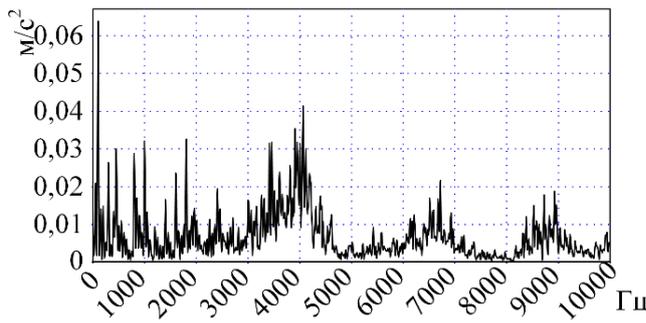
б



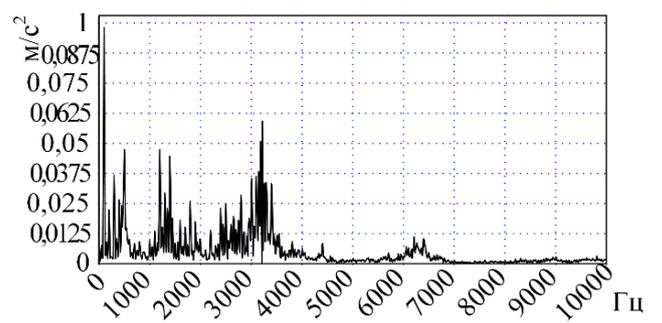
в



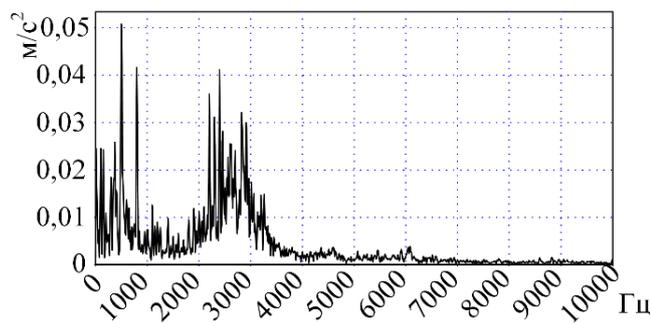
г



д



е



ж

Рисунок 2.11 – Спектр виброускорения в ключевых точках станка:

а – 1п; б – 2в; в – 3п; г – 3в; д – 4п; е – 4о; ж – 4в

Как ранее говорилось, в ИИС для контроля вибрации используются МЭМС-акселерометры, с помощью которых производится контроль вибрации 200 раз в секунду, соответственно, есть возможность контролировать сигнал до 100 Гц. Диапазон измерений, в котором работает датчик МЭМС, по умолчанию составляет  $\pm 4 \text{ g}$  ( $\pm 39,2 \text{ м/с}^2$ ). Максимально настраиваемый диапазон  $\pm 16 \text{ g}$  ( $\pm 156,8 \text{ м/с}^2$ ).

Анализ спектра виброускорения в ключевых точках станка подтвердил, что размещение датчика вибрации в точке 2 является более предпочтительным.

Заявленный частотный диапазон до 100 Гц позволяет вести контроль загрузки станов и в диагностических целях определять дисбалансы (диагностический признак – доминирующая оборотная частота) и механические ослабления суппорта (диагностический признак – гармоники, кратные оборотной частоте). Датчиками на основе МЭМС акселерометра не получится 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).

### **2.6.3 Анализ вибрации при обработке изделий на раскатно-деформирующем оборудовании**

Акселерометр АС-102 (канал А) располагался на подшипниковых узлах путем поочередной установки датчика на магните в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях в соответствии с действующей нормативной базой (ГОСТ ИСО 10816-3-99). Измерялись следующие параметры вибрации:

- спектры виброускорения от 10 до 10 000 Гц, 800 линий, 2 усреднения;
- спектры виброскорости от 2 до 1 000 Гц, 800 линий, 2 усреднения;
- пик-фактор временной, от 4 000 до 10 000 Гц, 100 м/сек, 2 усреднения;
- огибающая сигнала виброускорения, от 8 000 до 16 000 Гц, 100 м/сек, 2 усреднения;
- 1/3-октавный анализ, от 6,3 до 10000 Гц, 2 усреднения;

– спектры виброперемещения, от 2 до 200 Гц, 800 линий, 2 усреднения.

Измерение вибрации проводились анализатором вибрации «АГАТ-М» производства ООО «ДИАМЕХ-2000». Объект исследования – горизонтальные давольно-раскатные станы модели RL-60/75. Целью анализа является получение объективной информации об устойчивых диагностических признаках, отражающих фактическое техническое состояние давольно-раскатных станов, необходимых для контроля состояния технологической системы.

На рисунках 2.12-2.14 представлены схемы точек измерения вибрации на горизонтальном давольно-раскатном стане RL-60/75.

Цифрами обозначены точки измерения вибрации подшипниковых узлов. Согласно ГОСТ Р ИСО 10816-1-97 регламентируется проведение измерений вибрации корпусов подшипников в трех взаимно перпендикулярных направлениях, проходящих через ось вращения: вертикальном, горизонтальном и осевом.

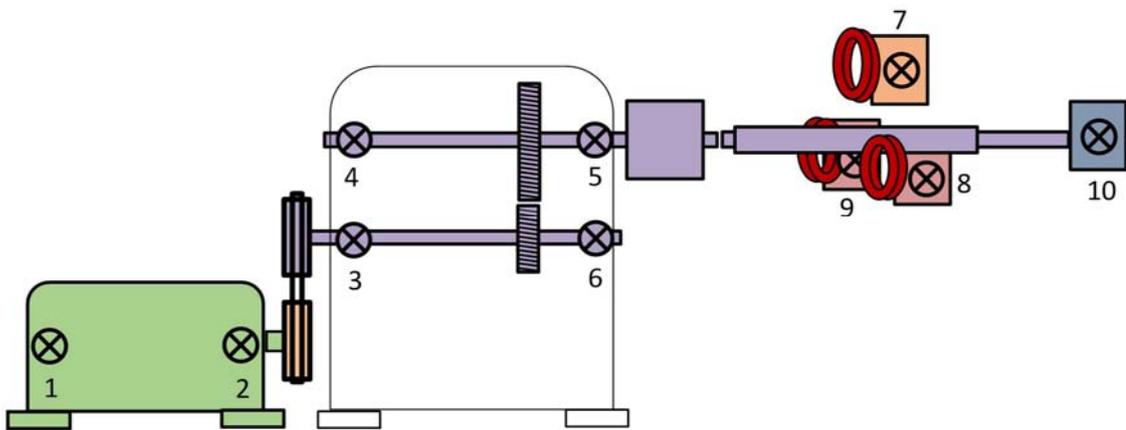


Рисунок 2.12 – Схема расположения точек замеров вибрации на горизонтальном давольно-раскатном стане RL-60/75

В качестве первого уровня анализа была проведена диагностика по общему уровню параметров вибрации. В данном методе критерии степени развития дефекта полностью ориентированы на нормативные уровни вибрации, соответствующие определенному механизму. Дефектным признается тот механизм, вибрации

которого превысили общую принятую норму. При значениях уровня вибрации, превышающих допустимые, необходимо принимать решение о возможности дальнейшей эксплуатации агрегата, узла, механизма.

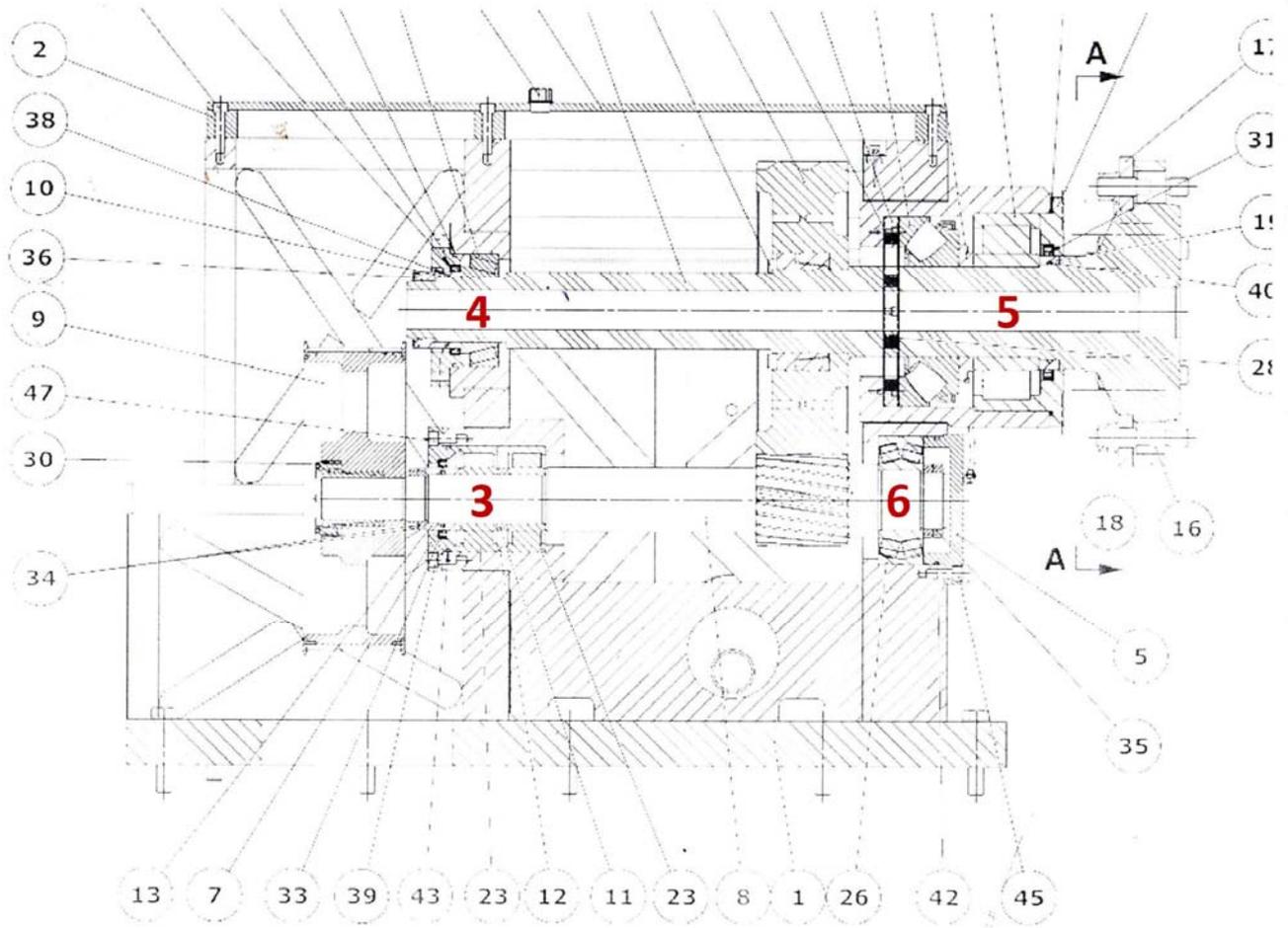


Рисунок 2.13 – Схема расположения точек замеров вибрации на коробке скоростей горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75

В ходе проведения эксперимента были исследованы два стана, обозначенные в таблицах 2.8–2.20 номерами 1 и 2 соответственно.

В таблицах 2.8–2.20 желтым цветом выделены точки замеров, в которых по каким-либо параметрам вибрации выявлены дефекты. Данная маркировка потребовалась для выявления устойчивых диагностических признаков.

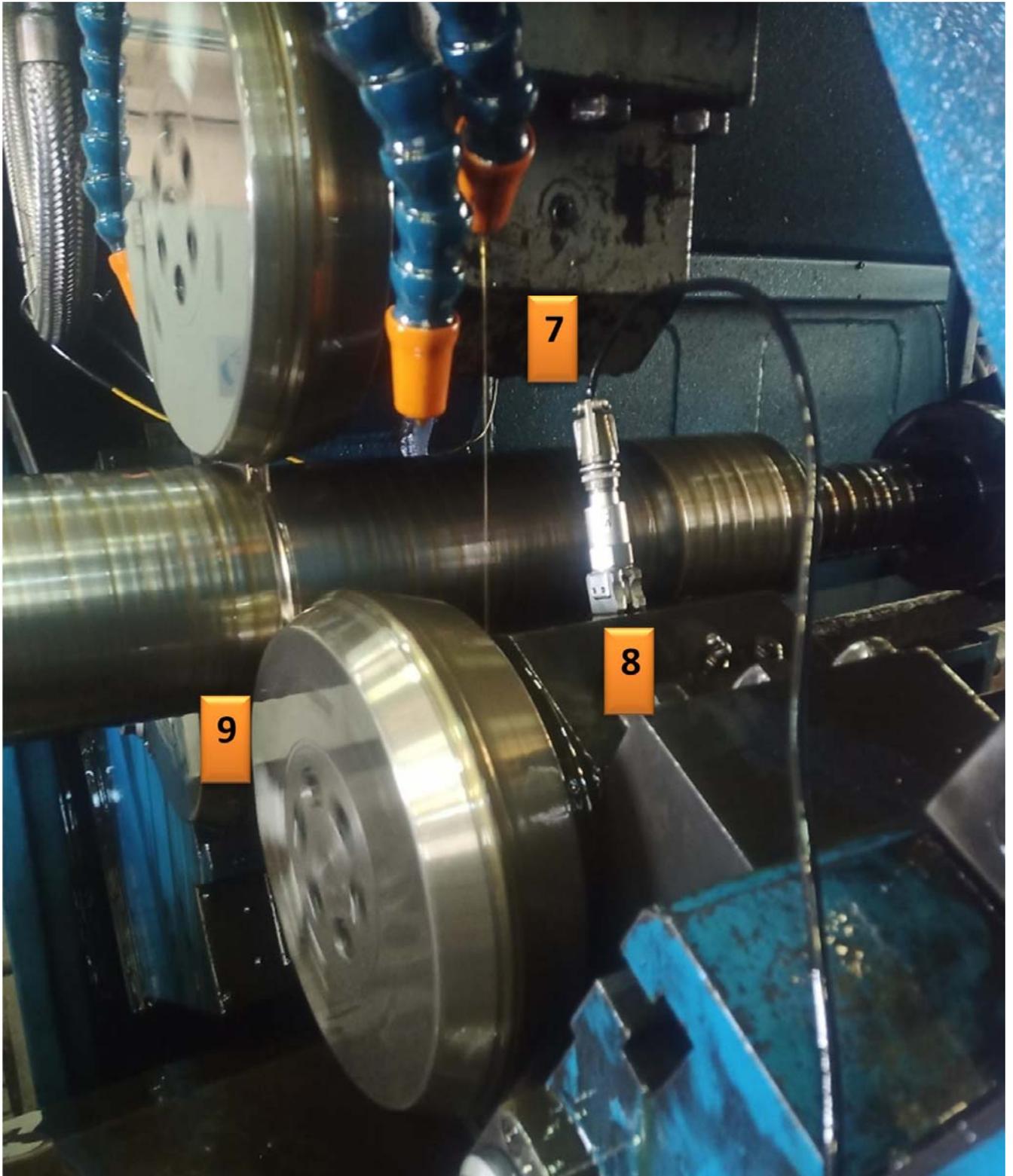


Рисунок 2.14 – Схема расположения точек замеров вибрации на корпусах валковой сборки горизонтального давильно-раскатного стана RL-60/75

Значения виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ), измеренные на подшипниковых узлах в полосе от 10 до 10 000 Гц представлены в таблицах 2.8 и 2.9.



На давяльно-раскатных станах, параметр «виброскорость» (мм/сек), измеряемый на подшипниковых узлах, не может использоваться в качестве устойчивого диагностического признака из-за низкого соотношения «сигнал/шум».

Значения пик-фактора, измеренные на подшипниковых узлах в полосе от 4 000 до 10 000 Гц, представлены в таблицах 2.12 и 2.13.

Таблица 2.12 – Пик-фактор вибрации 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации
вертикальное	4,1	3,3	3,4	4,1	4,3	3,6	3,4	3,2	3,6	3,4	<b>НЕ ОПРЕДЕЛЕНА</b>
поперечное	2,9	2,5	3,6	2,7	3,5	3,7	4,4	3,4	4,2	5,8	
осевое	3,1	3,3	3,5	3,4	3,6	3,8	3,7	3,4	4,1	9,0	

Таблица 2.13 – Пик-фактор вибрации 2-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации
вертикальное	3,2	3,4	3,2	3,6	4,2	3,7	3,6	3,2	3,6	3,3	<b>НЕ ОПРЕДЕЛЕНА</b>
поперечное	3,7	3,4	4,6	3,2	3,4	3,8	3,3	3,4	3,7	3,1	
осевое	4,0	4,9	3,2	3,1	3,6	3,7	3,5	4,9	3,7	4,4	

Анализ значений пик-фактора, показал, что данный параметр не может использоваться в качестве устойчивого диагностического признака.

Значения огибающей высокочастотного сигнала виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ), измеренные на подшипниковых узлах в полосе от 8 000 до 16 000 Гц, представлены в таблицах 2.14 и 2.16.

Таблица 2.14 – Огибающая высокочастотного сигнала виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ) 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 до замены подшипников валковой сборки

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы высокочастотной вибрации, $\text{м/с}^2$	
вертикальное	3,7	4,2	3,5	3,7	3,5	4,0	3,7	90,8	151,3	3,5	<b>50</b>	<b>90</b>
поперечное	2,6	3,2	3,4	3,4	3,5	3,8	3,6	124,8	177,5	4,0		
осевое	2,6	3,6	3,4	4,0	3,6	3,9	3,6	50,1	10,6	3,3		



Таблица 2.16 – Огибающая высокочастотного сигнала виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ) 2-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы высокочастотной вибрации, $\text{м/с}^2$	
вертикальное	2,9	2,8	4,2	5,4	11,7	7,0	4,2	3,7	4,1	4,1	30	50
поперечное	2,7	3,0	13,7	14,3	6,3	30,4	5,1	3,2	3,8	3,8		
осевое	2,5	2,9	3,7	3,6	4,2	43,1	3,6	4,2	3,7	3,9		

Анализ значений по параметру огибающей высокочастотного сигнала виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ) является лучшим диагностическим признаком дефектов подшипников, но не подходит для мониторинга протекания технологического процесса.

Значения 1/3-октавного анализа (Дб), измеренные на подшипниковых узлах (в полосе от 6,3 до 10 000 Гц) представлены в таблицах 2.17 и 2.18.

Таблица 2.17 – Значения 1/3-октавного анализа 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, Дб
вертикальное	136	143	111	113	111	112	118	119	122	105	<b>НЕ ОПРЕДЕЛЕНА</b>
поперечное	140	136	113	125	115	112	118	119	124	104	
осевое	137	143	111	114	116	108	117	118	118	35	

Таблица 2.18 – Значения 1/3-октавного анализа 2-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, Дб
вертикальное	136	132	109	114	110	115	109	106	112	107	<b>НЕ ОПРЕДЕЛЕНА</b>
поперечное	132	128	110	110	113	112	109	111	113	102	
осевое	130	127	113	112	109	114	114	112	113	98	

1/3-октавный анализ годится для выборки полосы с максимальной мощностью и дальнейшего ее анализа. Для мониторинга технологических процессов этот анализ не подходит.

Значения виброперемещения ( $\text{мкм}$ ), измеренные на подшипниковых узлах в полосе от 2 до 200 Гц, представлены в таблицах 2.19 и 2.20.

Таблица 2.19 – Виброперемещение 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, мкм	
вертикальное	4,0	6,2	3,1	3,4	14,3	3,8	21,4	20,5	14,9	4,9	15	20
поперечное	8,6	10,5	15,4	13,1	23,6	14,4	30,0	16,6	14,6	5,7		
осевое	6,1	5,0	4,2	6,7	3,8	3,6	10,3	7,9	10,0	11,3		

Таблица 2.20 – Виброперемещение 2-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, мкм	
вертикальное	6,2	6,1	1,6	2,9	3,3	2,3	2,6	2,7	1,9	6,4	15	20
поперечное	3,9	4,5	3,7	1,7	2,0	2,1	3,1	2,4	2,9	12,9		
осевое	9,0	10,8	2,2	2,4	1,9	2,5	2,9	3,5	2,9	3,9		

Анализ значений виброперемещения (мкм) показал, что данный параметр не может использоваться в качестве устойчивого диагностического признака.

С целью определения характерных точек и возможных мест крепления диагностических модулей были проанализированы характеристики датчика МЭМС. Выборка данных датчиком производится 200 раз в секунду, соответственно, есть возможность контролировать сигнал до 100 Гц. Диапазон измерений, в котором работает датчик вибрации на основе МЭМС, равен  $\pm 4$  г. Максимально настраиваемый диапазон равен  $\pm 16$  г. Рабочая температура – от  $-50$  до  $+60$  °С. Заявленный частотный диапазон до 100 Гц позволяет вести контроль загрузки станом и в диагностических целях определять дисбалансы (диагностический признак – доминирующая оборотная частота) и механические ослабления суппорта (диагностический признак – гармоники, кратные оборотной частоте).

Датчиками вибрации не получится в полной мере контролировать дефекты подшипников качения валковой сборки (необходимый диапазон – от 8 000 до 16 000 Гц), дефекты подшипников качения приводного двигателя (необходимый диапазон – от 20 до 400 Гц), дефекты электромагнитной системы электродвигателей (необходимый диапазон – от 800 до 3 000 Гц), дефекты зубозацеплений коробки скоростей (необходимый диапазон – от 15 до 1 500 Гц).

Исходя из возможностей датчика вибрации, характерными точками возможных мест крепления диагностических модулей являются подшипники шпинделя (информация о загрузке стана и наличии возможного дисбаланса) и корпуса валковых сборок (информация о загрузке стана и наличии механического ослабления либо подклинивания валка). Учитывая удобство монтажа, в качестве рационального места размещения датчика был выбран подшипник шпинделя (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Разработанный датчик вибрации, установленный на корпусе подшипника шпинделя горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75

Ввиду загруженности станом исследования вибрационных нагрузок для разных режимов (работа на холостом ходу и под нагрузкой) были проведены только на горизонтальном давяльно-раскатном стане RL-60/75 №1.

Работа на холостом ходу и под нагрузкой узлов горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 №1 зафиксирована в один день – 02.11.2022. По словам наладчика, на момент замера на нижних валках (по схеме т. 8 и 9) есть проблемы.

Значения виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ), измеренные на подшипниковых узлах в полосе от 10 до 10 000 Гц, представлены в таблицах 2.21 и 2.22.

Таблица 2.21 – Виброускорение 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе на холостом ходу

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, $\text{м/с}^2$	
вертикальное	7,2	14,0	0,4	0,6	0,5	0,4	0,8	1,3	0,9	---	20	40
поперечное	9,5	2,3	0,7	1,7	0,9	0,5	1,0	1,3	1,2	---		
осевое	2,3	4,8	0,6	0,6	0,6	0,8	0,9	1,0	1,2	---		

Таблица 2.22 – Виброускорение 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе под нагрузкой

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, $\text{м/с}^2$	
вертикальное	6,5	14,7	0,3	0,4	0,3	0,4	0,7	1,0	1,2	0,2	20	40
поперечное	9,6	6,8	0,6	2,1	0,7	0,4	0,9	1,2	1,6	0,2		
осевое	6,7	14,0	0,5	0,6	0,6	0,3	0,8	0,6	0,7	0,1		

Значения виброскорости ( $\text{мм/сек}$ ), измеренные на подшипниковых узлах в полосе от 2 до 1 000 Гц, представлены в таблицах 2.23 и 2.24.

Таблица 2.23 – Виброскорость 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе на холостом ходу

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, $\text{мм/сек}$	
вертикальное	0,3	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,5	0,6	0,6	---	Зона А – до 2,3 $\text{мм/сек}$ Зона В – до 4,5 $\text{мм/сек}$ Зона С – до 7,1 $\text{мм/сек}$ Зона D – свыше 7,1 $\text{мм/сек}$	
поперечное	0,5	0,5	0,2	0,4	0,3	0,2	0,5	0,7	0,6	---		
осевое	0,3	0,4	0,1	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,5	---		

Таблица 2.24 – Виброскорость 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе под нагрузкой

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, $\text{мм/сек}$	
вертикальное	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,5	0,8	0,1	Зона А – до 2,3 $\text{мм/сек}$ Зона В – до 4,5 $\text{мм/сек}$ Зона С – до 7,1 $\text{мм/сек}$ Зона D – свыше 7,1 $\text{мм/сек}$	
поперечное	0,5	0,6	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	1,2	0,2		
осевое	0,4	0,4	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,4	0,2		

Значения пик-фактора, измеренные на подшипниковых узлах в полосе от 4 000 до 10 000 Гц, представлены в таблицах 2.25 и 2.26.

Таблица 2.25 – Пик-фактор вибрации 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе на холостом ходу

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации
вертикальное	3,1	3,2	3,3	3,6	3,6	3,6	2,8	3,4	3,4	---	<b>НЕ ОПРЕДЕЛЕНА</b>
поперечное	2,7	3,6	3,3	2,8	2,9	4,1	2,9	3,1	3,6	---	
осевое	3,0	2,8	3,5	3,6	3,4	3,5	3,5	3,2	3,4	---	

Таблица 2.26 – Пик-фактор вибрации 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе под нагрузкой

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации
вертикальное	4,1	3,3	3,4	4,1	4,3	3,6	3,4	3,2	3,6	3,4	<b>НЕ ОПРЕДЕЛЕНА</b>
поперечное	2,9	2,5	3,6	2,7	3,5	3,7	4,4	3,4	4,2	5,8	
осевое	3,1	3,3	3,5	3,4	3,6	3,8	3,7	3,4	4,1	9,0	

Значения огибающей высокочастотного сигнала виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ), измеренные на подшипниковых узлах в полосе от 8 000 до 16 000 Гц, представлены в таблицах 2.27 и 2.28.

Таблица 2.27 – Огибающая высокочастотного сигнала виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ) 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе на холостом ходу

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы высокочастотной вибрации, $\text{м/с}^2$	
вертикальное	3,5	5,3	3,9	3,6	3,5	3,8	3,5	83,7	21,8	---	<b>50</b>	<b>90</b>
поперечное	2,7	4,1	3,7	3,4	3,8	3,5	3,5	92,1	51,4	---		
осевое	2,5	6,5	4,1	3,9	4,7	3,9	3,6	132,5	23,4	---		

Таблица 2.28 – Огибающая высокочастотного сигнала виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ) 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе под нагрузкой

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы высокочастотной вибрации, $\text{м/с}^2$	
вертикальное	3,7	4,2	3,5	3,7	3,5	4,0	3,7	90,8	151,3	3,5	<b>50</b>	<b>90</b>
поперечное	2,6	3,2	3,4	3,4	3,5	3,8	3,6	124,8	177,5	4,0		
осевое	2,6	3,6	3,4	4,0	3,6	3,9	3,6	50,1	10,6	3,3		

Значения 1/3-октавного анализа (Дб), измеренные на подшипниковых узлах в полосе от 6,3 до 10 000 Гц, представлены в таблицах 2.29 и 2.30.

Таблица 2.29 – Значения 1/3-октавного анализа 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе на холостом ходу

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, Дб
вертикальное	137	141	112	114	113	112	118	123	119	---	<b>НЕ ОПРЕДЕЛЕНА</b>
поперечное	140	127	115	122	117	115	117	121	122	---	
осевое	130	136	113	112	116	118	118	121	121	---	

Таблица 2.30 – Значения 1/3 октавного анализа 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе под нагрузкой

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, Дб
вертикальное	136	143	111	113	111	112	118	119	122	105	<b>НЕ ОПРЕДЕЛЕНА</b>
поперечное	140	136	113	125	115	112	118	119	124	104	
осевое	137	143	111	114	116	108	117	118	118	35	

Значения виброперемещения (мкм), измеренные на подшипниковых узлах в полосе от 2 до 200 Гц, представлены в таблицах 2.31 и 2.32.

Таблица 2.31 – Виброперемещение 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе на холостом ходу

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, мкм	
вертикальное	4,2	6,4	3,4	3,2	11,4	4,7	9,5	5,9	5,7	---	<b>15</b>	<b>20</b>
поперечное	7,1	10,6	6,3	13,7	11,6	9,9	10,6	4,8	5,9	---		
осевое	6,3	7,6	8,5	8,6	9,7	5,5	12,4	13,4	11,8	---		

Таблица 2.32 – Виброперемещение 1-го горизонтального давяльно-раскатного стана RL-60/75 при работе под нагрузкой

Точка замера / направление замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Нормы вибрации, мкм	
вертикальное	4,0	6,2	3,1	3,4	14,3	3,8	21,4	20,5	14,9	4,9	<b>15</b>	<b>20</b>
поперечное	8,6	10,5	15,4	13,1	23,6	14,4	30,0	16,6	14,6	5,7		
осевое	6,1	5,0	4,2	6,7	3,8	3,6	10,3	7,9	10,0	11,3		

Анализ данных таблиц 2.21–2.32 показал, что существенные отклонения при работе на холостом ходу и под нагрузкой обнаружены только при сильно развитых дефектах подшипников качения валковой сборки, зарегистрированных по значениям огибающей высокочастотного сигнала виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ), измеренные на подшипниковых узлах в полосе от 8 000 до 16 000 Гц, поэтому для устойчивого определения режима работы (работа на холостом ходу и под нагрузкой) предложено использовать второй косвенный диагностический признак – контроль мощности, потребляемой оборудованием.

## **2.7 Контроль мощности, потребляемой оборудованием во время работы**

Для повышения точности контроля технологических систем можно использовать дополнительные методы косвенного контроля. Одним из таких методов является контроль мощности, потребляемой технологическим оборудованием во время работы. В работе [207] рассмотрены вопросы разработки собственного устройства контроля мощности оборудования на базе трансформатора тока и места расположения разработанного датчика. Для упрощения системы мониторинга в работе [207] предложено разместить один датчик на фазе входного провода питания технологического оборудования и оценивать потребляемую мощность всего оборудования в целом. При этом принимались следующие допущения:

- питающее напряжение стабильно;
- перекос фаз отсутствует или незначителен и им можно пренебречь.

С целью верификации предложенного подхода был проведен анализ потребления электрической энергии на токарном станке с ЧПУ ТМ-39М и фрезерном станке BRIDGEPORT модель Hardinge GX 600 [208].

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 32144-2013. В качестве средства измерения использовался анализатор количества и показателей качества электрической энергии Circutor AR.5 (рисунок 2.17).



Рисунок 2.17 – Анализатор Circutor AR.5

### 2.7.1 Анализ отклонений питающего напряжения

Первым этапом верификации предложенного подхода была проверка стабильности питающего напряжения. Результаты измерений отклонений напряжения для токарного станка с ЧПУ ТМ-39М представлены в таблице 2.33, а результаты измерения для фрезерного станка BRIDGEPORT модель Hardinge GX 600 – в таблице 2.34.

Таблица 2.33 – Результаты измерений отклонений напряжения токарного станка с ЧПУ ТМ-39М

Измеряемая характеристика	Результаты измерений	Нормативное значение	T2, %
Номинальное напряжение фазы А			
$\delta U_{(-)}$ , %	<b>1,82</b>	-10,00	<b>0,00</b>
$\delta U_{(+)}$ , %	<b>3,64</b>	10,00	
Номинальное напряжение фазы В			
$\delta U_{(-)}$ , %	<b>2,27</b>	-10,00	<b>0,00</b>
$\delta U_{(+)}$ , %	<b>3,64</b>	10,00	
Номинальное напряжение фазы С			
$\delta U_{(-)}$ , %	<b>1,82</b>	-10,00	<b>0,00</b>
$\delta U_{(+)}$ , %	<b>3,18</b>	10,00	
Неопределенность измерений			
Измеряемая величина	Результат		Допустимое значение
$\delta U$ , % $U_{din}$	<b><math>\pm 0,1</math></b>		$\pm 0,1$

Таблица 2.34 – Результаты измерений отклонений напряжения фрезерного станка BRIDGEPORT модель Hardinge GX 600

Измеряемая характеристика	Результаты измерений	Нормативное значение	T2, %
Номинальное напряжение А			
$\delta U_{(-)}, \%$	<b>- 1,82</b>	-10,00	<b>0,00</b>
$\delta U_{(+)}, \%$	<b>0,91</b>	10,00	
Номинальное напряжение В			
$\delta U_{(-)}, \%$	<b>- 2,27</b>	-10,00	<b>0,00</b>
$\delta U_{(+)}, \%$	<b>0,91</b>	10,00	
Номинальное напряжение С			
$\delta U_{(-)}, \%$	<b>- 1,36</b>	-10,00	<b>0,00</b>
$\delta U_{(+)}, \%$	<b>1,36</b>	10,00	
Неопределенность измерений			
Измеряемая величина	Результат		Допустимое значение
$\delta U, \%U_{din}$	<b><math>\pm 0,1</math></b>		$\pm 0,1$

На основании проведенных измерений доказана стабильность питающего напряжения параметрам, установленным ГОСТ 32144 - 2013.

### 2.7.2 Анализ перекоса фаз питающего напряжения

На следующим этапе с целью анализа перекоса фаз проводился контроль напряжения, тока и активной мощности всех фаз на исследуемом оборудовании.

Перекос фаз – это смещение нуля относительно нейтрали трансформатора. Возникает главным образом при значительном увеличении сопротивления нейтрального провода и неодинаковой загруженности по фазам на участке линии после обрыва. Вследствие перекоса напряжение на наиболее загруженной фазе "проседает", а на остальных фазах – возрастает.

Результаты контроля напряжения, тока и активной мощности всех фаз на токарном станке с ЧПУ ТМ-39М представлены на рисунках 2.18–2.20, а на фрезерном станке BRIDGEPORT модель Hardinge GX 600 – на рисунках 2.21–2.23.

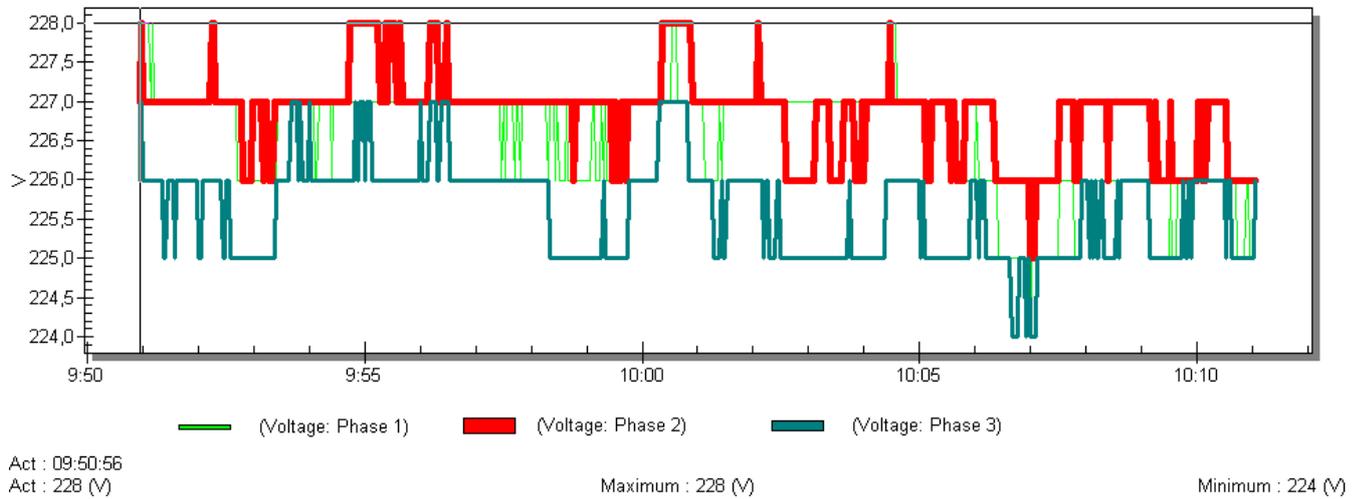


Рисунок 2.18 – График фазных напряжений ТМ-39М

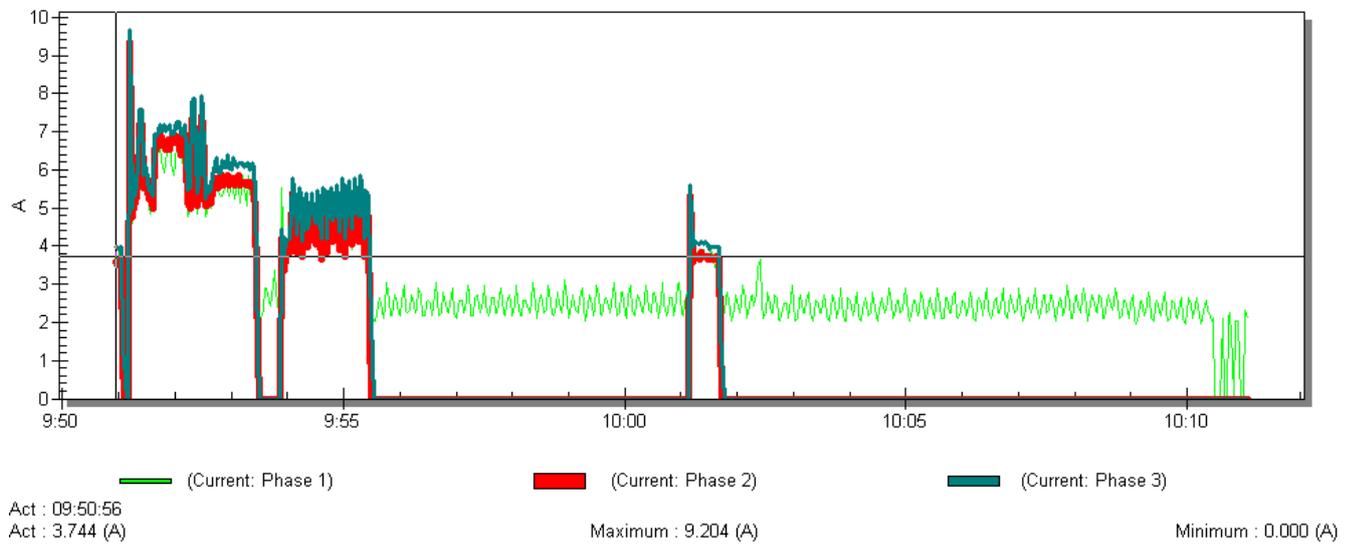


Рисунок 2.19 – График фазных токов ТМ-39М

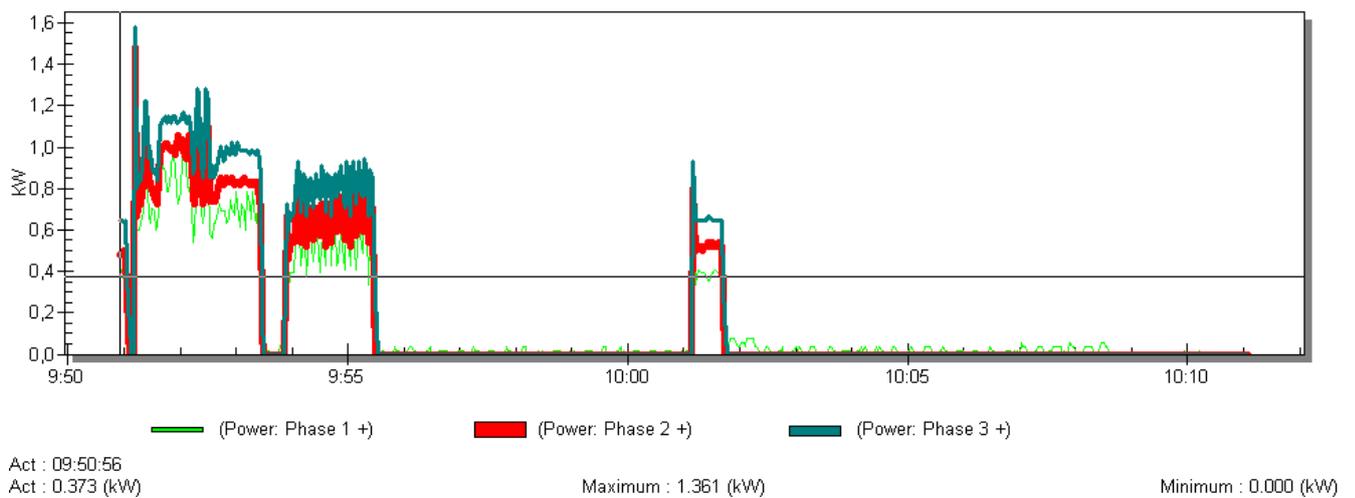


Рисунок 2.20 – График активной мощности по фазам ТМ-39М

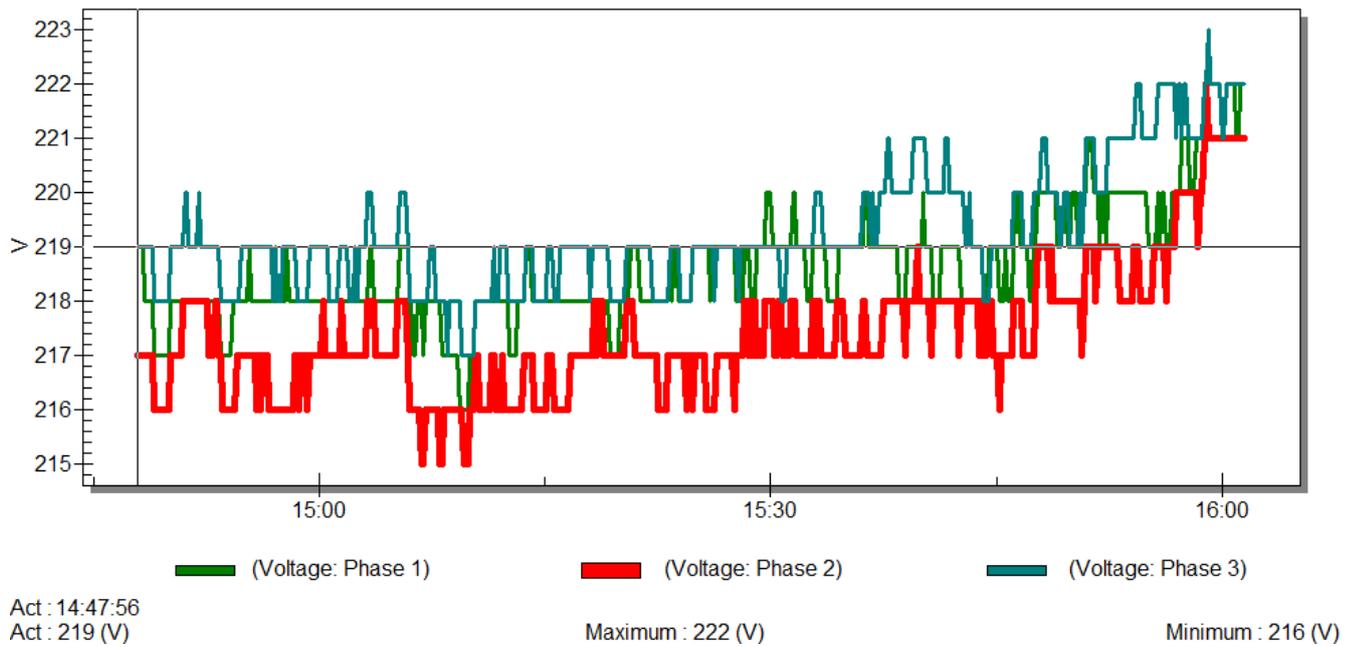


Рисунок 2.21 – График фазных напряжений фрезерного станка BRIDGEPORT модель Hardinge GX 600

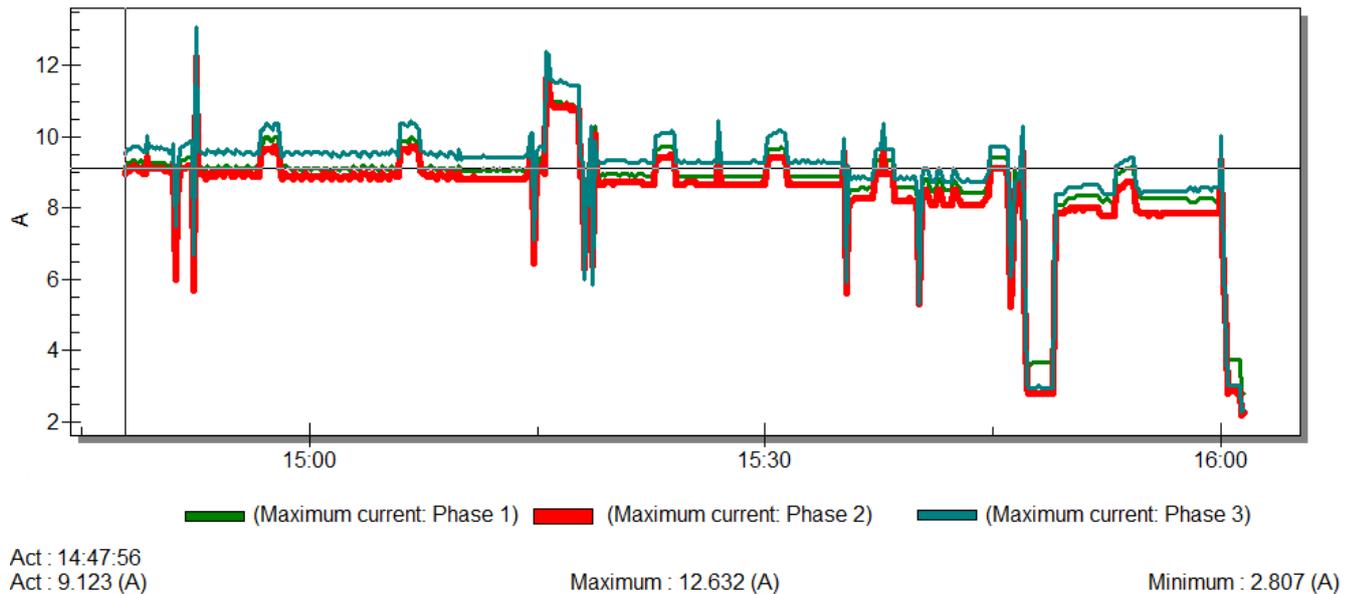


Рисунок 2.22 – График фазных токов фрезерного станка BRIDGEPORT модель Hardinge GX 600

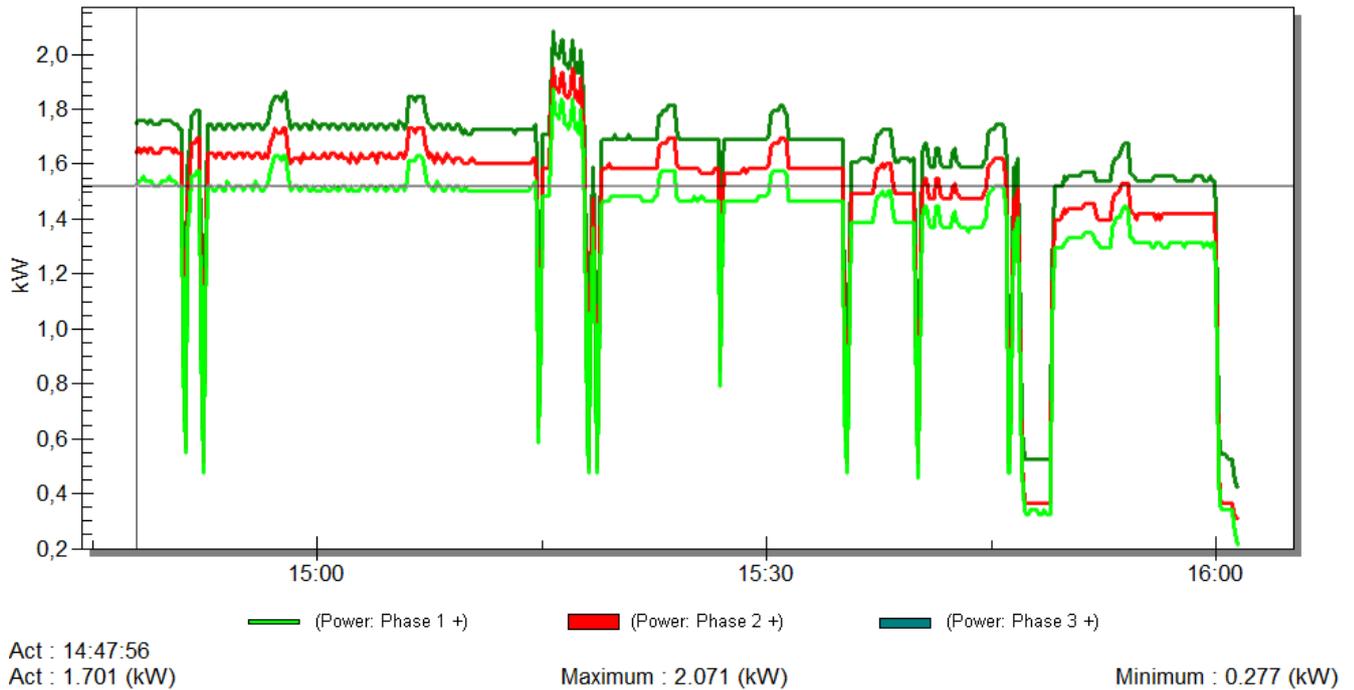


Рисунок 2.23 – График активной мощности по фазам фрезерного станка BRIDGEPORT модель Hardinge GX 600

На основе анализа представленных результатов можно сделать вывод, что фазы электрической сети, питающие технологическое оборудование, во всех режимах работы нагружены достаточно равномерно, перекос фаз отсутствует или незначителен и им можно пренебречь. При этом от фазы А дополнительно питается электрооборудование станка (рисунок 2.19), поэтому при размещении на ней датчика тока можно контролировать включение и выключение станка.

### 2.7.3 Разработка датчика тока для контроля мощности, потребляемой оборудованием во время работы

Разработанный датчик тока предназначен для сбора информации об уровне потребления электрической энергии в процессе обработки и состоит из следующих компонентов:

- трансформатор тока;
- микроконтроллер;
- коммуникационная плата.

Трансформатор тока предназначен для регистрации уровня потребляемого тока в процессе резания. Благодаря разъемному сердечнику его можно установить на питающий провод без необходимости установки датчика в разрыв цепи.

Для упрощения разработки датчика были использованы стандартные модули: трансформатор тока YHDC SCT-013-000 (рисунок 2.24, а), коммуникационная плата WaveShare RS232 и микроконтроллер Arduino Pro Mini. Состав вычислительного узла датчика тока в виде структурной схемы представлен на рисунке 2.24, б. Пунктиром показаны линии информационного взаимодействия, сплошными линиями – распределение и преобразование энергии.

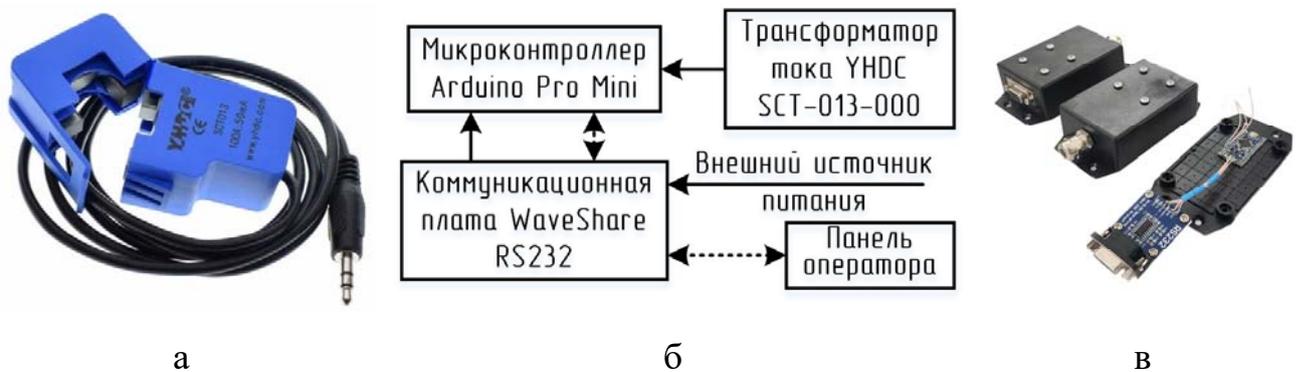


Рисунок 2.24 – Датчик тока:

а – трансформатор тока YHDC SCT-013-000;

б – структурная схема; в – датчик в собранном и разобранном виде

Состав вычислительного узла можно разделить на две основные части: первая – подача питания напряжением +5 В от внешнего источника на микроконтроллер осуществляется через коммуникационную плату; вторая – преобразование выходного сигнала трансформатора тока осуществляется микроконтроллером и с помощью коммуникационной платы передается на панель оператора.

Фотография датчика тока без подключенного трансформатора тока представлена на рисунке 2.24, в.

## 2.8 Построение устройства сбора информации

В работе предложен вариант объединения различных датчиков, используемых в ИИС, в единое устройство сбора информации - диагностический модуль контроля состояния технологической системы (рисунок 2.25). В диагностический модуль входят: панель оператора; датчик контроля вибрации; модуль контроля тока (датчик тока и трансформатор тока); датчик температуры и влажности; датчик углекислого газа.



Рисунок 2.25 – Структура диагностического модуля

Упомянутые ранее беспроводные датчики первых двух поколений использовались для отработки функционала разрабатываемой ИИС, но несмотря на их большую чувствительность за счет более близкого расположения к зоне обработки (что позволяет избежать затухания сигналов вибрации из-за прохождения через упругие элементы станка), данные датчики трудно обслуживать из-за дополнительных операций по их монтажу и зарядке, которые приходилось выполнять операторам станка. Поэтому для вышеуказанного диагностического модуля использован разработанный проводной датчик вибрации третьего поколения на основе МЭМС-акселерометра.

Частотный диапазон МЭМС-акселерометра до 200 Гц позволяет вести контроль состояния технологических систем и в диагностических, не позволяя в полной мере контролировать дефекты, но смогут зафиксировать нарушения в нормальном функционировании технологической системы и просигнализировать о необходимости детального обследования оборудования.

Микроконтроллер на базе ATmega328P предназначен для считывания показаний МЭМС-акселерометра и передачи на панель оператора для ее отображения в режиме реального времени и дальнейшей передачи для хранения и обработки на сервер. Универсальный контроллер Atmega328 – микроконтроллер семейства AVR, имеет 8-битный процессор и позволяет выполнять большинство команд за один такт, при этом имеет следующие характеристики:

- память: 32 kB Flash; 2 kB ОЗУ; 1 kB EEPROM;
- периферийные устройства: два 8-битных таймера/счетчика с модулем сравнения и делителями частоты; 16-битный таймер/счетчик с модулем сравнения и делителем частоты, а также с режимом записи; счетчик реального времени с отдельным генератором; шесть каналов ШИМ разрядностью 8 бит; 6-канальный АЦП со встроенным датчиком температуры разрядностью 10 бит; программируемый последовательный интерфейс USART; последовательный интерфейс SPI; интерфейс I2C; программируемый сторожевой таймер с отдельным внутренним генератором; внутренняя схема сравнения напряжений; блок обработки прерываний два канала внешних прерываний;
- специальные функции: сброс при включении питания и программное распознавание снижения напряжения питания; внутренний калибруемый генератор тактовых импульсов; обработка внутренних и внешних прерываний; 6 режимов сна;
- напряжение питания и тактовая частота процессора: 1,8-5,5 В при частоте до 4 МГц; 2,7-5,5 В при частоте до 10 МГц; 4,5-5,5 В при частоте до 20 МГц;
- корпус TQFP32 (32 вывода/контакта);
- габаритные размеры (Д×Ш×В): 9×9×1,2 мм.

После подачи питания на плату управления микроконтроллер выполняет следующие операции:

1. Производит первичную инициализацию МЭМС акселерометра и модуля беспроводной связи и переходит в режим ожидания команд.

2. Анализирует полученные от панели оператора команды и в зависимости от полученной команды выполняет одно из следующих действий:

- передает информацию о статусе диагностического модуля;
- начинает передачу информации об уровне вибрации;
- прекращает передачу об уровне вибрации.

## 2.9 Устройство для обновления кода микроконтроллера датчиков

Датчики ИИС разработаны на основе технологии промышленного интернета вещей (IIoT) с использованием современных микроконтроллеров, одним из представителей которых является ATmega328P, о чем говорилось ранее. Для удобства применения ATmega328P можно использовать готовую аппаратную платформу, например, Arduino (рисунок 2.26).

Микроконтроллер ATmega328P имеет 3 интерфейса для работы в составе информационной системы: UART, SPI и I2C. При этом для реализации систем промышленной автоматике требуется использование промышленных протоколов, таких как RS232 и RS485. Поддержку указанных протоколов можно добавить в микроконтроллер на основе ATmega328P с помощью специальных коммуникационных плат (рисунок 2.27).

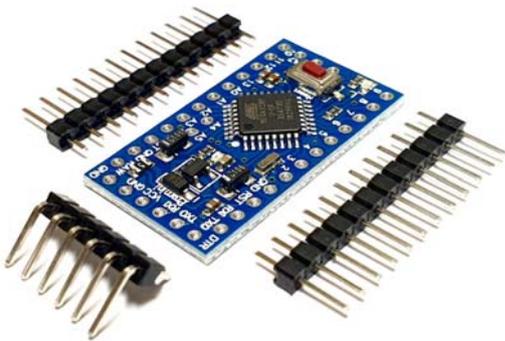


Рисунок 2.26 – Микроконтроллер Arduino pro mini на базе ATmega328P



Рисунок 2.27 – Коммуникационная плата RS232

Типовая схема подключения микроконтроллера на основе ATmega328P с помощью коммуникационных плат RS232 представлена на рисунке 2.28.

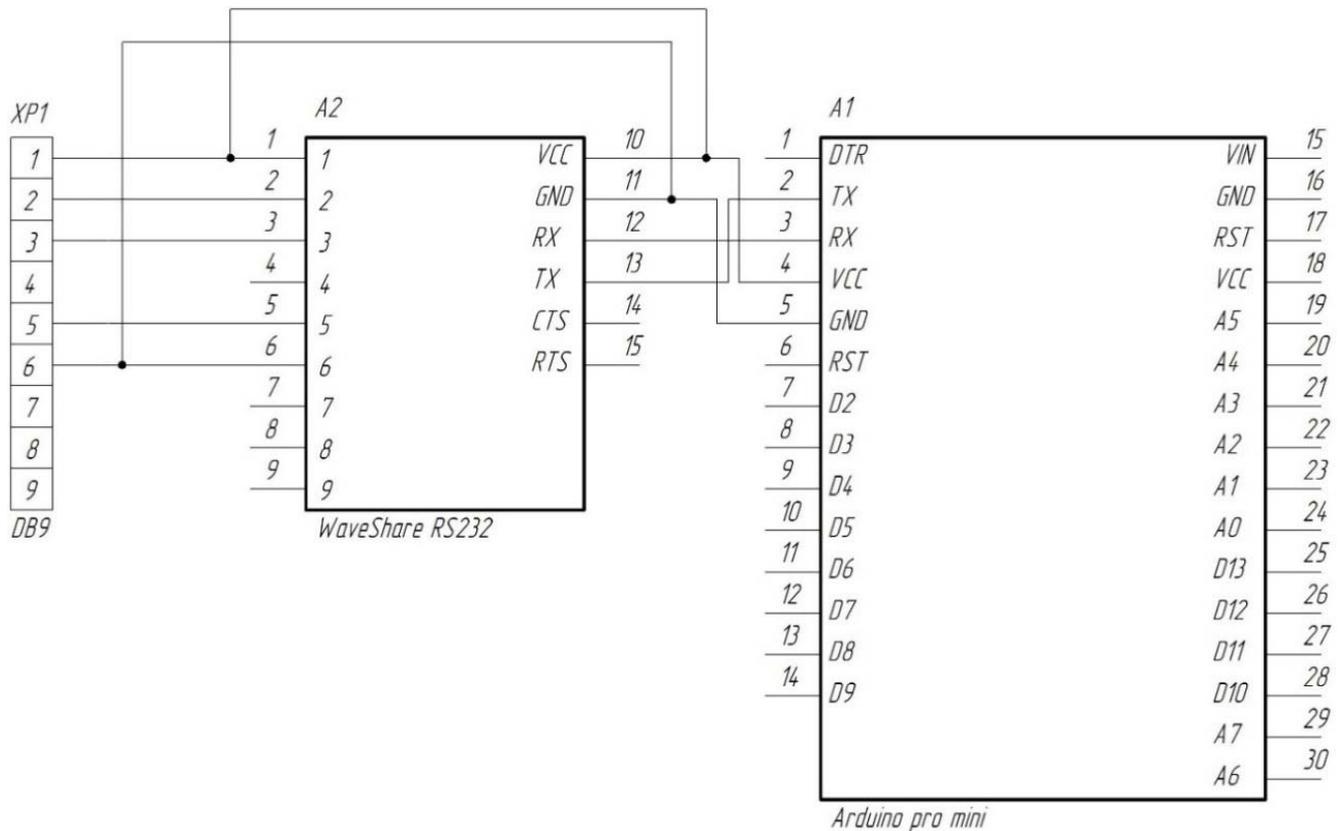


Рисунок 2.28 – Схема подключения микроконтроллера на основе ATmega328P с использованием коммуникационной платы RS232

В процессе эксплуатации ИИС может возникнуть необходимость обновления кода микроконтроллеров датчиков [209]. Код записывается в кристалл микроконтроллера при помощи специальных устройств, называемых программаторами. Для разных микроконтроллеров существуют различные программаторы – от специализированных до универсальных. Важным отличием Arduino от других микроконтроллеров является возможность обновить код через обычный USB-кабель. Это достигается при помощи специальной программы – загрузчика.

В случае использования Arduino pro mini для обновления кода используются специальные платы преобразования USB-TTL, соединяющие микроконтроллер с персональным компьютером, на котором установлена среда разработки Arduino IDE. Упрощенная схема подключения Arduino pro mini для обновления кода представлена на рисунке 2.29.

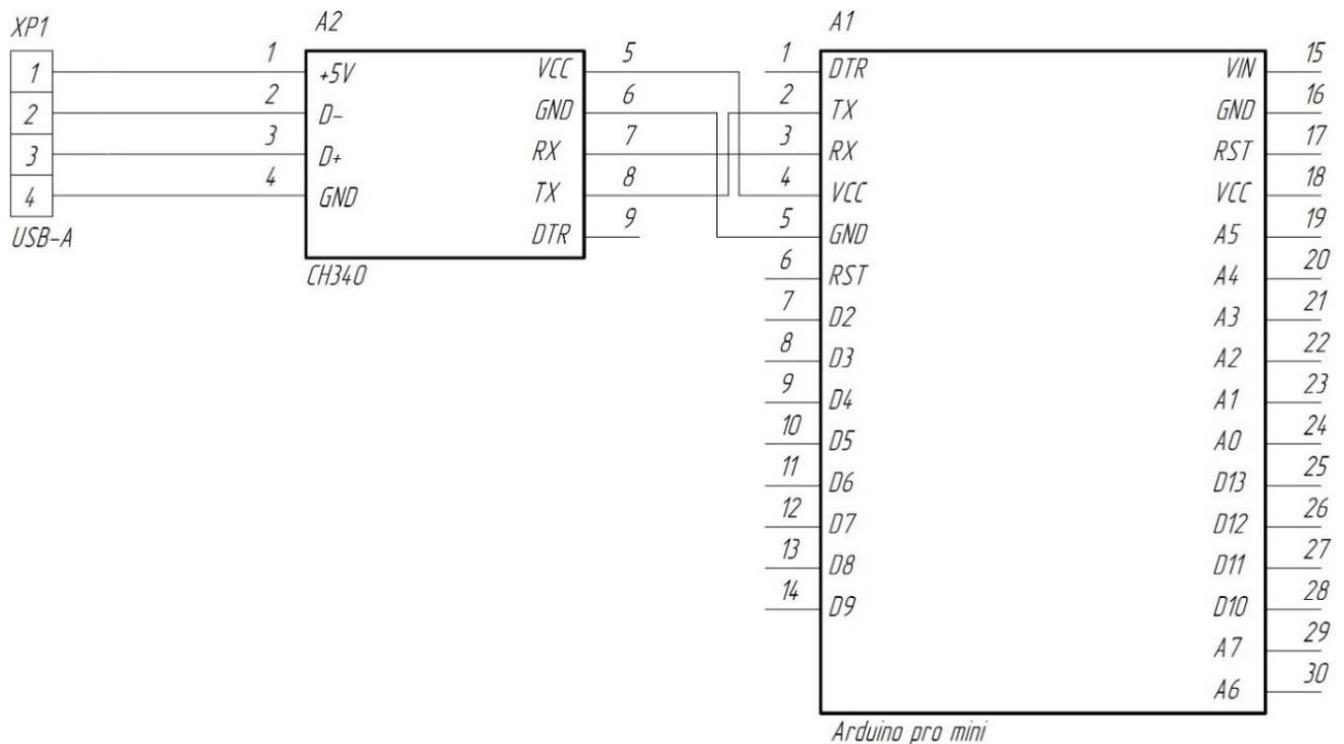


Рисунок 2.29 – Схема подключения Arduino pro mini для обновления кода с использованием преобразователя USB-TTL

При подключении платы Arduino к источнику питания управление получает загрузчик. Первые 2 с он проверяет, поступил ли новый код от пользователя. Когда подается новый код, загрузчик записывает его в память микроконтроллера. Затем эта программа запускается на выполнение. Если данные не поступили, то загрузчик запускает программу, уже находящуюся в памяти микроконтроллера.

В зависимости от типа используемой платы преобразования USB-TTL на ней может присутствовать или отсутствовать специальный контакт RST или DTR. Его роль – перезапускать микроконтроллер в начале процесса загрузки нового кода для передачи управления загрузчику.

В случае отсутствия указанных контактов на плате преобразователя контроллер в процессе загрузки придется перезапускать вручную, что снижает удобство процесса обновления кода.

В случае когда требуется обновить код датчиков, установленных на технологическом оборудовании и подключаемых с использованием коммуникационной платы RS232, процесс обновления кода усложняется. Использование коммуникационной

платы не позволяет передавать сигнал RST или DTR для перезапуска микроконтроллера в автоматическом режиме, поэтому актуальной становится задача разработки специального устройства для обновления кода микроконтроллеров датчиков.

Решить указанную задачу можно установкой нормально замкнутой кнопки в разрыв провода питания микроконтроллера, нажимаемой вручную в начале процесса загрузки кода. Однако этот процесс может быть автоматизирован путем замены кнопки нормально замкнутым ключом на двух транзисторах. Электрическая схема предложенного устройства для обновления кода микроконтроллеров датчиков ИИС представлена на рисунке 2.30.

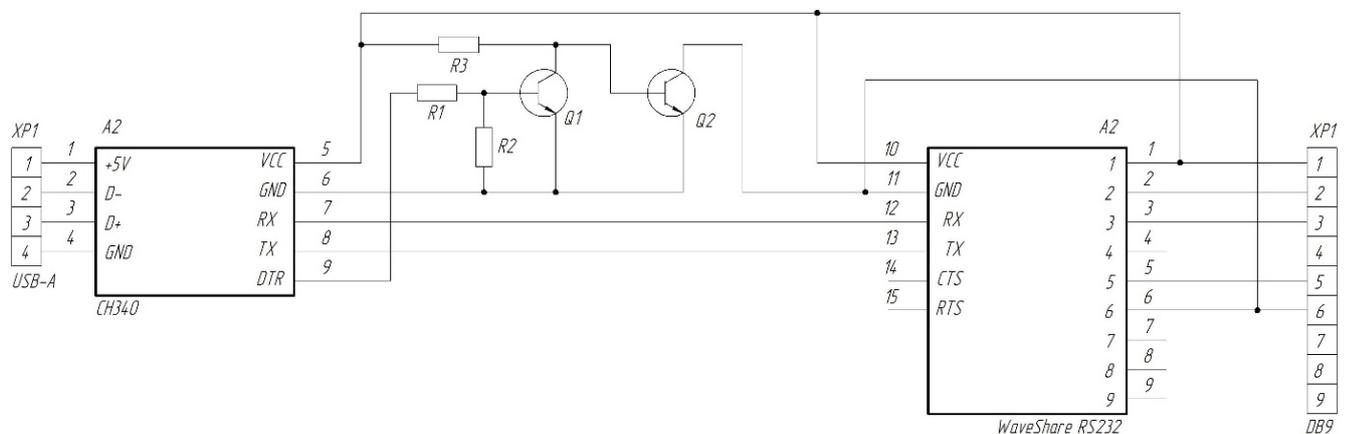


Рисунок 2.30 – Электрическая схема устройства для обновления кода микроконтроллеров датчиков

Применение предложенного устройства предоставило возможность проводить автоматизированное обновление кода микроконтроллеров датчиков ИИС без необходимости снятия их с технологического оборудования, что позволило добавлять новый функционал в датчики, производить их настройку и исправлять ошибки в программном обеспечении.

## 2.10 Выводы

Представленный в разделе анализ датчиков вибрации позволил систематизировать и структурировать информацию об известных в настоящее время способах

контроля вибрации, на основе которого предложен вариант датчика авторского исполнения.

Рассмотренные три поколения датчиков вибрации, используемые в ИИС на этапе ее развития, позволили прийти к оптимальной конструкции, которая была интегрирована в действующее производство.

Разработан способ установки средств косвенного контроля состояния технологических систем. Показано, что выбор места установки датчика различен для разных видов оборудования. На практическом примере представлены исследования для фрезерного и раскатно-деформирующего оборудования.

Для повышения точности контроля технологических систем рекомендовано использовать дополнительные методы косвенного контроля. Одним из таких методов является контроль мощности, потребляемой технологическим оборудованием во время работы. В разделе представлен вариант датчика тока.

В работе представлен вариант объединения различных датчиков, используемых в ИИС, в единый диагностический модуль контроля состояния технологической системы. В диагностический модуль входят: панель оператора; датчик контроля вибрации; модуль контроля тока; датчик температуры и влажности; датчик углекислого газа.

Для упрощения работы с датчиками ИИС разработано устройство для обновления кода, применение которого предоставило возможность проводить автоматизированное обновление кода микроконтроллеров датчиков ИИС без необходимости снятия их с технологического оборудования, что позволило добавлять новый функционал в датчики, производить их настройку и исправлять ошибки в программном обеспечении.

### **3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА В ИИС**

Внедрение ИИС в действующее производство связано с рядом особенностей, которые необходимо учитывать при разработке [210].

В соответствии с Федеральным законом «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 № 187-ФЗ [211] установлены нормы регулирования отношений в области обеспечения безопасности КИИ Российской Федерации в целях ее устойчивого функционирования при проведении в отношении нее компьютерных атак.

Для целей настоящего Федерального закона используются понятия, некоторые из которых, в рамках рассмотрения указанной проблематики, представлены ниже:

- КИИ – объекты критической информационной инфраструктуры, а также сети электросвязи, используемые для организации взаимодействия таких объектов;
- объекты КИИ – информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети, автоматизированные системы управления субъектов критической информационной инфраструктуры;
- значимый объект КИИ – объект критической информационной инфраструктуры (например, станок с ЧПУ), которому присвоена одна из категорий значимости и который включен в реестр значимых объектов критической информационной инфраструктуры;
- безопасность КИИ – состояние защищенности критической информационной инфраструктуры, обеспечивающее ее устойчивое функционирование при проведении в отношении нее компьютерных атак;
- автоматизированная система управления – комплекс программных и программно-аппаратных средств, предназначенных для контроля за технологическим и (или) производственным оборудованием (исполнительными устройствами) и

производимыми ими процессами, а также для управления такими оборудованием и процессами.

Категорирование объектов КИИ осуществляется в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 08.02.2018 № 127 "Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений" (далее – ПП РФ от 08.02.2018 № 127 [212]).

Категорирование осуществляется исходя из различных параметров. Рассмотрим некоторые из них, применяемые к машиностроительным производствам:

- экономическая значимость, выражающаяся в оценке возможного причинения прямого и косвенного ущерба субъектам КИИ и (или) бюджетам Российской Федерации;
- значимость объекта КИИ для обеспечения обороны страны, безопасности государства и правопорядка.

Устанавливаются три категории значимости объектов КИИ – первая, вторая и третья.

Категория значимости, к которой отнесен значимый объект КИИ, может быть изменена в порядке, предусмотренном для категорирования, в следующих случаях:

- по мотивированному решению федерального органа исполнительной власти, уполномоченного в области обеспечения безопасности КИИ Российской Федерации, принятому по результатам проверки, проведенной в рамках осуществления государственного контроля в области обеспечения безопасности значимых объектов КИИ;
- в случае изменения значимого объекта КИИ, в результате которого такой объект перестал соответствовать критериям значимости и показателям их значений, на основании которых ему была присвоена определенная категория значимости;
- в связи с ликвидацией, реорганизацией субъекта критической информационной инфраструктуры и (или) изменением его организационно-правовой формы, в результате которых были изменены либо утрачены признаки субъекта КИИ.

Соответственно, при производстве продукции двойного и специального назначения на предприятиях машиностроительных производств технологическое оборудование станочного парка является объектами КИИ – автоматизированными системами управления и другими значимыми системами, функционирование которых критически важно для жизнедеятельности государства, то же самое относится и к ИИС, интегрированных в производственные системы.

На рынке в настоящее время присутствуют различные отечественные ИИС, обеспечивающие контроль станочного парка [183]. Представленные продукты имеют отличающиеся подходы к организации интерфейсов, ценообразованию и политике лицензирования, но основным условием работы таких систем является необходимость подключения к СЧПУ технологического оборудования.

В соответствии с требованиями информационной безопасности подключение ИИС к СЧПУ объектов КИИ требует его категорирования и повышения его уровня значимости.

В соответствии с п. 14 (1) ПП РФ от 08.02.2018 № 127 при проведении категорирования объекта КИИ должны быть рассмотрены наихудшие сценарии, учитывающие проведение целенаправленных компьютерных атак на объекты КИИ, результатом которых являются прекращение или нарушение выполнения критических процессов и нанесение максимально возможного ущерба. В случае объединения парка технологического оборудования с ЧПУ через установку АПК или ППК ИИ в ЧПУ и подключения ИИС наихудший сценарий – это одновременный выход из строя всего оборудования.

Так как представленные решения используют для сбора информации АПК, подключаемый к СЧПУ, а повышение категории значимости КИИ приводит к значительному увеличению затрат на обеспечение безопасности, зачастую несопоставимых с эффектом от внедрения ИИС, то указанное выше заставляет предприятия отказываться от внедрения ИИС. Также применение указанных систем несет риск значительного увеличения затрат на восстановление работоспособности значимого объекта КИИ в случае возникновения инцидентов информационной безопасности.

Следовательно, актуальной становится задача разработки ИИС, контролирующей соблюдение технологической дисциплины в процессе работы технологических систем на основе методов и средств обеспечения оперативного контроля, сбора и обработки информации о технологических процессах, не требующих подключения к СЧПУ технологического оборудования, с отдельными серверами и инфраструктурой, не связанными напрямую с сетями предприятия.

### **3.1 Построение математической модели ИИС**

Разработанная ИИС представляет собой сложную ИИС, описание которой включает объект исследования (ОИ) с учётом влияющих на него управляющих воздействий, а также возмущений.

#### **3.1.1 Обобщенная математическая модель ИИС**

Наиболее продуктивный способ математического описания ИИС – 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) [213, 214]. Такое представление позволяет не только работать с набором значений выходных сигналов ОИ на какой-либо 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 рабочих устройств и других показателях, характеризующих функционирование системы в течение достаточно длительного времени.

Формально структура разработанной ИИС представлена на рисунке 3.1.

Элементами ИИС являются ОИ и измерительно-вычислительный комплекс (ИВК), который регистрирует фазовые координаты  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$  ОИ. Входные управляющие воздействия и возмущения описываются функциями времени  $u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)$ . Выходные сигналы ИИС описываются функциями  $y_1(t), y_2(t), \dots, y_l(t)$ .

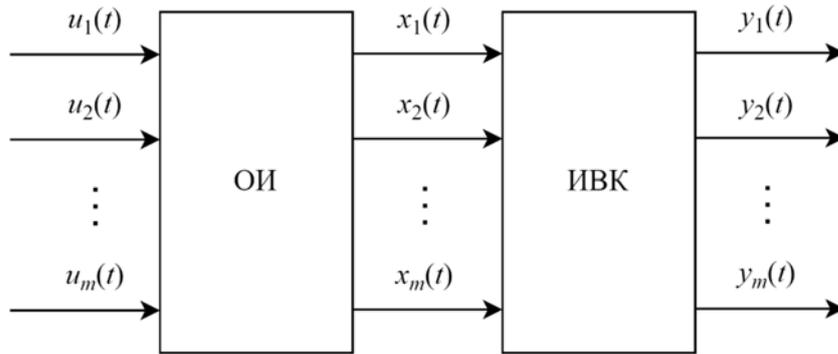


Рисунок 3.1 – Формальная структура ИИС

Для описания траектории ОИ в фазовом пространстве мы ограничимся линейным приближением. В этом приближении система уравнений, описывающих траекторию ОИ и приведённых к уравнениям первого порядка, примет вид

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 + \dots + b_{1m}u_m, \\
 \dot{x}_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + b_{21}u_1 + b_{22}u_2 + \dots + b_{2m}u_m, \\
 &\dots \\
 \dot{x}_n &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n + b_{n1}u_1 + b_{n2}u_2 + \dots + b_{nm}u_m,
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

где коэффициенты  $a_{ik}$  описывают взаимные связи между фазовыми координатами ОИ, а  $b_{ik}$  – связи между фазовыми координатами ОИ и управляющими воздействиями и возмущениями.

Матричная форма системы уравнений (3.1) имеет вид

$$\dot{X} = AX + BU, \tag{3.2}$$

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 необходимо составить уравнения связи фазовых координат ОИ и выходных сигналов ИИС. Оставаясь в рамках линейного приближения, запишем эти уравнения в виде

$$\begin{aligned} y_1 &= c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \dots + c_{1n}x_n, \\ y_2 &= c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + \dots + c_{2n}x_n, \\ &\vdots \\ y_l &= c_{l1}x_1 + c_{l2}x_2 + \dots + c_{ln}x_n, \end{aligned} \quad (3.3)$$

или в матричном виде

$$Y = CX, \quad (3.4)$$

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

Решение неоднородного векторно-матричного дифференциального уравнения (3.2) в общем случае можно получить, используя метод Лапласа [214]. При этом решение получается в виде

$$X(t) = e^{At} X(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} BU(\tau) d\tau, \quad (3.5)$$

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 (3.2) становится однородным, в этом случае оно описывает собственные свойства ОИ. Его общее решение:

$$X_h(t) = e^{At} X(t_0) = \Phi(t) X(t_0), \quad (3.6)$$

где  $X_h(t) = e^{At} X(t_0) = \Phi(t) X(t_0)$ , здесь  $\Phi(t)$  – фундаментальная матрица ОИ. В явной форме уравнение (3.6) записывается в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} x_1^{(h)}(t, t_0) \\ \vdots \\ x_n^{(h)}(t, t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{11}(t) & \cdots & \varphi_{1n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{n1}(t) & \cdots & \varphi_{nn}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t_0) \\ \vdots \\ x_n(t_0) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

или

$$x_i^{(h)}(t, t_0) = \sum_{k=1}^n \varphi_{ik}(t) x_k(t_0), \quad i = 1, \dots, n. \quad (3.8)$$

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

Применим метод фазового пространства к одному из аспектов функционирования разработанной ИИС. Одной из важных задач является контроль режима работы станков при изготовлении деталей при помощи режущего инструмента, например резца. По характеру возникающих при этом вибраций можно судить о качестве заготовки, состоянии режущей кромки резца, а также об оптимальности режима работы станка, поэтому выберем в качестве предмета исследования колебательные степени свободы заготовки. Система линейных уравнений для колебательной системы имеет вид:

$$\ddot{x}_i + \sum_{k=1}^n \beta_{ik} \dot{x}_k + \sum_{k=1}^n \omega_{ik}^2 x_k = \sum_{j=1}^l b_{ij} u_j(t), \quad i = 1, \dots, n. \quad (3.9)$$

Здесь в качестве координат  $x_i(t)$  выбраны смещения от положения равновесия, коэффициенты  $\beta_{ik}$  и  $\omega_{ik}$  характеризуют соответственно диссипативные процессы и собственные частоты системы, коэффициенты  $b_{ij}$ , описывающие влияние внешних воздействий и возмущений на колебания системы. Поскольку рассматриваемый объект имеет сложную структуру – коэффициенты определяются экспериментально для заготовок разных типов и различных режимов работы. Один из возможных способов нахождения этих коэффициентов представлен ниже.

Для приведения системы (3.9) к системе первого порядка вида (3.1) в качестве дополнительных координат введём скорости колебаний по степеням свободы. При этом для формального удобства работы с получающимися уравнениями, а также с целью сделать более удобной процедуру построения компьютерной модели пере-  
 нумеруем  $n$  координат  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$  в  $x_{n+1}(t), x_{n+2}(t), \dots, x_{2n}(t)$ , а старые обозначения используем для скоростей. Тогда система (3.9) преобразуется к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = -\sum_{k=1}^n \beta_{1k} x_k - \sum_{k=n+1}^{2n} \omega_{1k}^2 x_k + \sum_{j=1}^l b_{1j} u_j(t), \\ \dots \\ \dot{x}_n = -\sum_{k=1}^n \beta_{nk} x_k - \sum_{k=n+1}^{2n} \omega_{nk}^2 x_k + \sum_{j=1}^l b_{nj} u_j(t), \\ \dot{x}_{n+1} = x_1, \\ \dots \\ \dot{x}_{2n} = x_n. \end{array} \right. \quad (3.10)$$

Для окончательного преобразования к виду (3.1) переобозначим коэффициенты этой системы в  $a_{ik}$ , при этом сохранив нумерацию от 1 до  $2n$ . В развёрнутом матричном виде (см. (3.2)) получившаяся система имеет следующую форму:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \\ \dot{x}_{n+1} \\ \vdots \\ \dot{x}_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} & a_{1,n+1} & \dots & a_{1,2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} & a_{n,n+1} & \dots & a_{n,2n} \\ 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \\ x_{n+1} \\ \vdots \\ x_{2n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nl} \\ 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_l \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

В качестве наиболее простого и наглядного примера рассмотрим ситуацию, в которой контролируются три колебательных степени свободы. Такой пример соответствует ситуации, при которой выходными сигналами ОИ являются данные с трёхкомпонентного акселерометра. В рамках построенной математической модели работы ИИС ускорения по трём компонентам могут быть найдены дифференцированием полученных в результате решения системы скоростей по трём направлениям. Система (3.11) сводится в данном случае к системе из 6 уравнений для шести

фазовых координат ( $x_4, x_5, x_6$  – непосредственно отклонения от положения равновесия в трёх направлениях,  $x_1 = \dot{x}_4$ ,  $x_2 = \dot{x}_5$ ,  $x_3 = \dot{x}_6$  – компоненты скорости по этим направлениям):

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 + a_{16}x_6 + \sum_{j=1}^l b_{1j}u_j(t), \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 + a_{26}x_6 + \sum_{j=1}^l b_{2j}u_j(t), \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4 + a_{35}x_5 + a_{36}x_6 + \sum_{j=1}^l b_{3j}u_j(t), \\ \dot{x}_4 = x_1, \\ \dot{x}_5 = x_2, \\ \dot{x}_6 = x_3, \end{array} \right. \quad (3.12)$$

или в развёрнутом матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1l} \\ b_{21} & \cdots & b_{2l} \\ b_{31} & \cdots & b_{3l} \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_l \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Далее рассмотрим функции, описывающие управляющие воздействия и возмущения. В рамках рассматриваемого примера управляющие воздействия будут возникать из-за взаимодействия резца с заготовкой. С точки зрения исследования колебательных режимов это будет приводить к возникновению вибрационных нагрузок переменной амплитуды, которые и будет необходимо описать с помощью функций  $u_i$ . Подход к выбору вида таких функций должен, с одной стороны, давать достаточно простые выражения для них, чтобы можно было в простейших случаях получить решение аналитически, и в других случаях по крайней мере оценить адекватность полученных численными методами результатов. С другой стороны, вид функций  $u_i$  должен адекватно отражать изменение нагрузки при взаимодействии резца с заготовкой.

Способ, позволяющий удовлетворить обоим условиям, заключается в том, чтобы создать набор функций  $u_i$  достаточно простого вида, комбинируя которые, можно описывать и более сложные воздействия. В качестве "критерия простоты" можно взять число параметров, входящих в функцию  $u_i$ .

В качестве наиболее "простой" функции, описывающей "включение" воздействия, использована ступенчатая функция Хэвисайда, имеющая лишь один параметр – время "включения"  $t_1$ :

$$\theta(t - t_1) = \begin{cases} 0, & t < t_1, \\ 1, & t > t_1. \end{cases} \quad (3.14)$$

Соответственно, функцией, "выключающей" воздействие, будет:

$$1 - \theta(t - t_1) = \begin{cases} 1, & t < t_1, \\ 0, & t > t_1. \end{cases} \quad (3.15)$$

Эта функция также имеет лишь один параметр  $t_2$ . Произведение функций (3.14) и (3.15) позволит получить нормированную на 1 функцию, описывающую воздействие, включившееся в момент  $t_1$  и выключившееся в момент  $t_2$ :

$$u(t) = \theta(t - t_1)(1 - \theta(t - t_2)), \quad t_1 < t_2. \quad (3.16)$$

Функция (3.16) имеет два параметра  $(t_1, t_2)$ , она равна нулю, если  $t < t_1$  или  $t > t_2$ , и равна 1, если  $t_1 < t < t_2$ . Используя (3.16), можно задать функцию, описывающую вибрационное воздействие, включившееся в момент  $t_1$  и выключившееся в момент  $t_2$ :

$$u(t) = \theta(t - t_1)(1 - \theta(t - t_2)) \sin \omega t, \quad t_1 < t_2. \quad (3.17)$$

В формуле (3.17)  $\omega$  – частота (циклическая) вибрации, здесь и далее предполагается, что  $T = \frac{2\pi}{\omega} \ll t_2 - t_1$ . График функции (3.17) представлен на рисунке 3.2. Она имеет также два параметра ( $\omega$  не включается в их число, поскольку не связано с моделируемым изменением амплитуды нагрузки).

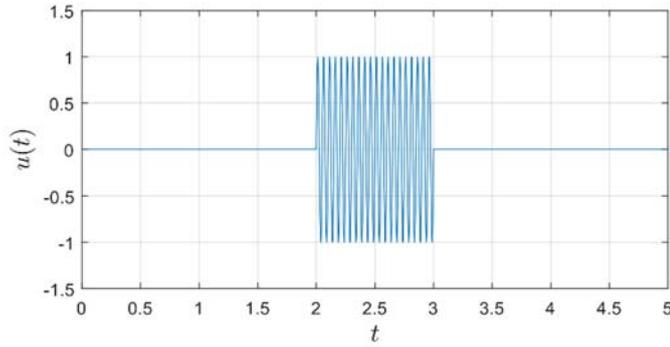


Рисунок 3.2 – График функции (3.17) при  $t_1 = 2$  с,  $t_2 = 3$  с

Если необходимо учесть постепенность включения воздействия, выражающуюся в постепенном нарастании амплитуды вибрации, можно задать это нарастание линейным образом:

$$u(t) = \theta(t - t_1)(1 - \theta(t - t_2)) \cdot \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \cdot \sin \omega t, \quad t_1 < t_2. \quad (3.18)$$

Функция (3.18) нормирована на 1, т. е. задаёт изменение амплитуды от 0 до 1, за время от  $t_1$  до  $t_2$ , а необходимое значение в момент  $t_2$  определится соответствующим коэффициентом  $b_{ik}$ . Она имеет два параметра ( $t_1, t_2$ ), её график показан на рисунке 3.3.

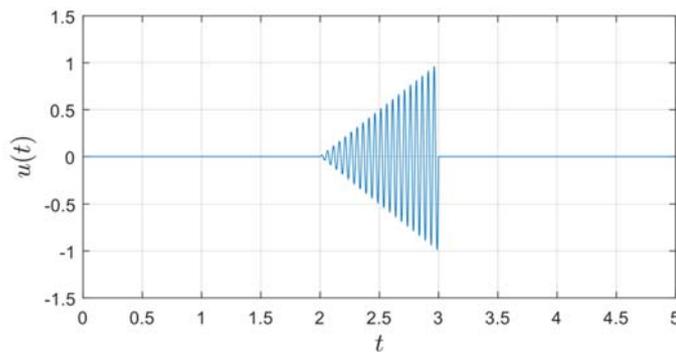


Рисунок 3.3 – График функции (3.18) при  $t_1 = 2$  с,  $t_2 = 3$  с

Парной к (3.18) будет функция, описывающая постепенный линейный спад амплитуды вибрации в промежутке от  $t_1$  до  $t_2$  с 1 до 0:

$$u(t) = \theta(t - t_1)(1 - \theta(t - t_2)) \cdot \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} \cdot \sin \omega t, \quad t_1 < t_2. \quad (3.19)$$

График функции (3.19) показан на рисунке 3.4.

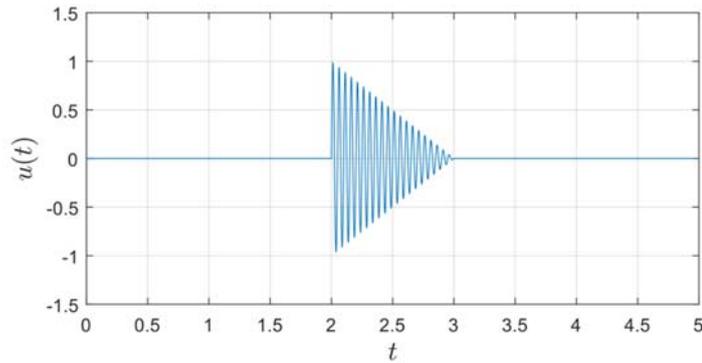


Рисунок 3.4 – График функции (3.19) при  $t_1 = 2$  с,  $t_2 = 3$  с

Если линейное нарастание и убывание сигнала не соответствует с достаточной точностью действительному изменению амплитуды, можно задать нелинейность с помощью различных функций. Пример таких функций дают формулы (3.20) и (3.21), эти функции имеют три параметра:  $t_1, t_2, \alpha$ , коэффициент  $\alpha$  задаёт скорость нарастания или убывания амплитуды.

$$u(t) = \theta(t - t_1)(1 - \theta(t - t_2))(1 - e^{-\alpha(t-t_1)}) \sin \omega t, \quad t_1 < t_2; \quad (3.20)$$

$$u(t) = \theta(t - t_1)(1 - \theta(t - t_2))(1 - e^{\alpha(t-t_2)}) \sin \omega t, \quad t_1 < t_2. \quad (3.21)$$

Графики функций (3.20) и (3.21) показаны на рисунках 3.5–3.6.

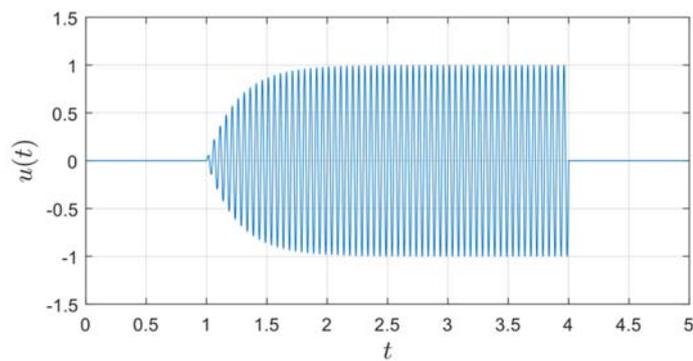


Рисунок 3.5 – График функции (3.20) при  $t_1 = 1$  с,  $t_2 = 4$  с,  $\alpha = 4$  с<sup>-1</sup>

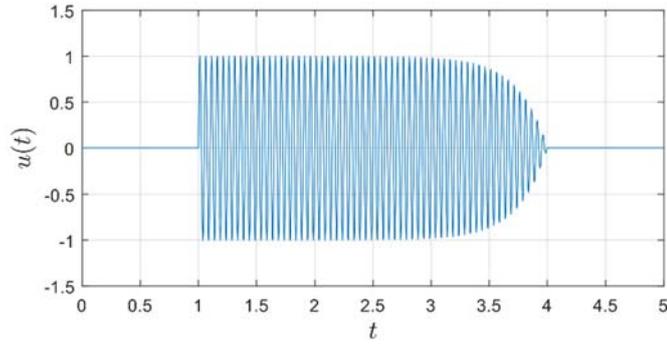


Рисунок 3.6 – График функции (3.21) при  $t_1 = 1$  с,  $t_2 = 4$  с,  $\alpha = 4$  с $^{-1}$

При необходимости могут быть сформулированы и другие функции для описания управляющих воздействий.

В случае если известен спектральный состав управляющего воздействия, функции  $u_i$  удобно задавать в виде ряда Фурье:

$$u(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin\left(\frac{2k\pi t}{T} + \theta_k\right) \quad (3.22)$$

или интеграла Фурье:

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (3.23)$$

В качестве примера применения представленного метода рассмотрим простейшую модельную ситуацию нулевого приближения, в котором пренебрежём взаимным влиянием колебаний в разных степенях свободы. В этом случае матрица  $A$  из уравнения (3.13) принимает вид

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & a_{36} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.24)$$

то есть уравнения системы (3.12) можно рассматривать попарно, при этом (3.12) распадается на три системы:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{14}x_4 + \sum_{j=1}^l b_{1j}u_j(t), \\ \dot{x}_4 = x_1, \end{cases} \quad (3.25)$$

и аналогичные для  $x_2, x_5$  и  $x_3, x_6$ .

Ниже представлен результат решения системы для  $x_1, x_4$  (компонента ускорения) при следующих значениях параметров и виде управляющих воздействий. Коэффициенты  $a_{11} = 8$ ,  $a_{14} = 32$ . Функции, описывающие управляющие воздействия:

$$u_1(t) = \theta(t - 20)(1 - \theta(t - 30))(1 - e^{-\alpha_1(t-20)})(1 - e^{\alpha_2(t-30)}) \sin \omega t,$$

множители в этой функции типа (3.20), (3.21), значения коэффициентов в показателях экспонент  $\alpha_1 = 6$ ,  $\alpha_2 = 8$ , коэффициент  $b_{11} = 0,1$ ;

$$u_2(t) = \theta(t - 30)(1 - \theta(t - 40))(1 - e^{-\alpha_1(t-30)}) \sin \omega t$$

множитель в этой функции типа (3.20), значение коэффициента в показателе экспонент  $\alpha_1 = 6$ , коэффициент  $b_{12} = 0,05$ ;

$$u_3(t) = \theta(t - 50)(1 - \theta(t - 52))(1 - e^{-\alpha_1(t-50)})(1 - e^{\alpha_2(t-52)}) \sin \omega t,$$

множители в этой функции типа (3.20), (3.21), значения коэффициентов в показателях экспонент  $\alpha_1 = 10$ ,  $\alpha_2 = 10$ , коэффициент  $b_{13} = 0,05$ ;

$$u_4(t) = \theta(t - 57)(1 - \theta(t - 65))(1 - e^{-\alpha_1(t-57)})(1 - e^{\alpha_2(t-65)}) \sin \omega t,$$

множители в этой функции типа (3.20), (3.21), значения коэффициентов в показателях экспонент  $\alpha_1 = 6$ ,  $\alpha_2 = 10$ , коэффициент  $b_{14} = 0,05$ . В качестве модели помехи выбираем случайную функцию, распределённую по нормальному закону. Начальные условия для уравнений системы взяты нулевые.

На рисунке 3.7 показан график изменения ускорения в одном из направлений, полученный по результатам численного решения системы (3.25).

Переход к абсолютным единицам должен осуществляться по результатам в серии экспериментов.

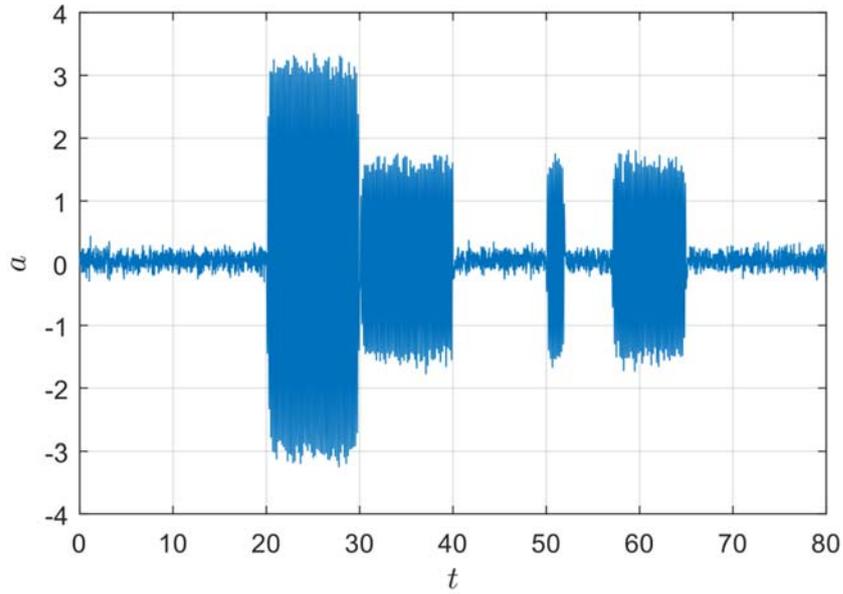


Рисунок 3.7 – Зависимость ускорения от времени, полученная путём решения системы (3.25)

### 3.1.2 Математическая модель ИИС косвенного контроля состояния технологических систем

От обобщенной математической модели перейдем к рассмотрению частной математической модели предложенной ИИС косвенного контроля состояния технологической системы (рисунок 3.8) [215].

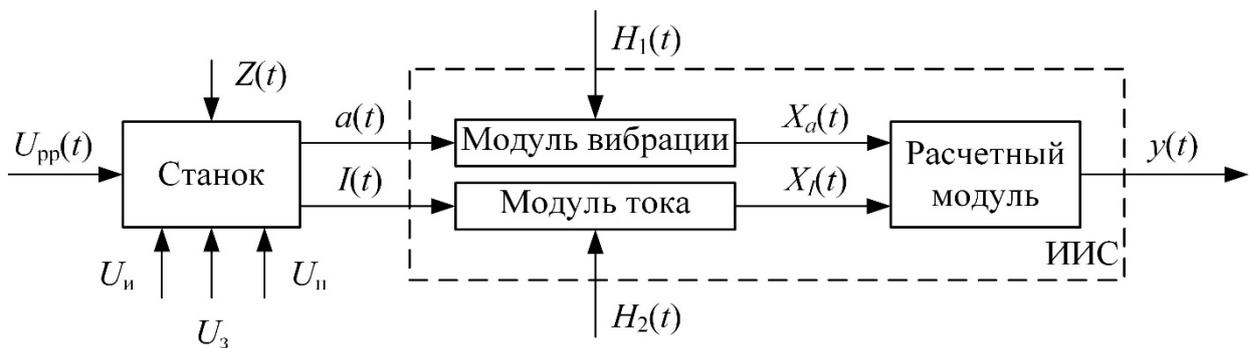


Рисунок 3.8 – Структурная схема ИИС косвенного контроля состояния технологической системы

Технологическая система (станок) с помощью инструмента (или инструментов в случае многоинструментальной наладки), характеризующегося вектором параметров  $U_{\text{и}}$ , совершает обработку заготовки, характеризующуюся вектором параметров  $U_{\text{з}}$  и закрепленной в одном или нескольких приспособлениях, характеризующимися вектором параметров  $U_{\text{п}}$ , по заранее определенной управляющей программе (или рабочим в случае отсутствия у станка СЧПУ), которую можно описать в виде векторной функции времени режимов резания  $U_{\text{рр}}(t)$ . При этом на станок действуют различные возмущающие факторы  $Z(t)$ : разброс параметров инструментов и заготовок, стохастический характер процесса резания, износ узлов станка, приспособлений и инструментов, влияние рядом стоящего оборудования и так далее.

Рассмотрим примеры векторов  $U_{\text{п}}$ ,  $U_{\text{и}}$  и  $U_{\text{з}}$  для случая токарной обработки. Вектор в этом случае  $U_{\text{п}}$  можно представить в виде  $U_{\text{п}} = (\Delta, j)$ , где  $\Delta$  – точность станка, которую можно оценить величиной отклонения прямолинейности движения, мкм;  $j$  – жесткость станка, Н/мкм.

Вектор  $U_{\text{и}}$  для токарного резца можно представить в виде  $U_{\text{и}} = (\gamma, \alpha, \phi, r_{\text{в}})$ , где  $\gamma$  – передний угол резца,  $\alpha$  – задний угол резца,  $\phi$  – угол в плане,  $r_{\text{в}}$  – радиус при вершине резца.

Вектор  $U_{\text{з}}$  для токарной обработки можно представить как  $U_{\text{з}} = (d_{\text{н}}, d_{\text{вн}}, l, HB)$ , где  $d_{\text{н}}$  и  $d_{\text{вн}}$  – наружный и внутренний диаметры заготовки соответственно,  $l$  – длина заготовки,  $HB$  – твердость заготовки.

К компонентам вектора  $U_{\text{рр}}(t)$  при токарной обработке относятся скорость резания  $v(t)$ , подача  $S(t)$  и глубина резания  $h(t)$ .

В процессе обработки происходит появление вибрации в зоне обработки  $a(t)$ , распространяющейся по упругим элементам станка. Также процесс обработки определяет уровень потребления оборудованием электрического тока  $I(t)$ . Уро-

вень вибрации  $a(t) = f_1(U_{pp}(t), U_n, U_3, U_n, Z(t))$  и уровень потребления оборудованием электрического тока  $I(t) = f_2(U_{pp}(t), U_n, U_3, U_n, Z(t))$  меняются в зависимости от протекания технологического процесса и служат косвенными метриками процесса обработки. Их значение может быть получено с помощью разработанных измерительных приборов: модуля вибрации и модуля тока, входящих в состав информационно-измерительной системы косвенного контроля состояния технологического оборудования.

Модуль вибрации, построенный на основе трехосевого акселерометра, измеряет виброускорение в зоне резания, преобразуя его в сигнал виброускорения  $X_a(t)$  с учетом ускорения свободного падения  $g$ , смещения нуля акселерометра  $\Delta a_{см}$ , диапазона измерения акселерометра  $a_{max}$  и разрядности его АЦП  $d$  и вектора внешних и внутренних помех измерения  $H_1(t)$ :

$$X_a(t) = \frac{(a_a(t) - g - \Delta a_{см}) \cdot a_{max} \cdot g}{2^{d-1}} + H_1(t), \quad (3.26)$$

где  $a_a(t)$  – «сырые» значения уровня вибрации  $a(t)$ , измеренного акселерометром.

Модуль тока, построенный на основе трансформатора тока, измеряет уровень потребляемого оборудованием тока, преобразуя его в сигнал тока  $X_I(t)$  с учетом коэффициента трансформации трансформатора тока  $k$ , тока вторичной обмотки трансформатора  $I_2(t)$ , зависящего от величины нагрузочного резистора  $R$  и величины постоянного напряжения  $U_{см.}(t)$ , добавляемого к напряжению  $U_{изм.}(t)$ , измеренному на АЦП модуля тока, и вектора внешних и внутренних помех измерения  $H_2(t)$ :

$$X_I(t) = k \cdot \frac{U_{изм.}(t) - U_{см.}(t)}{R}. \quad (3.27)$$

Полученный сигнал тока  $X_I(t)$  дополнительно может быть использован для оценки мощности, потребляемой оборудованием за период  $T$ :

$$P = \frac{1}{T} \int U(t) \cdot X_I(t) dt. \quad (3.28)$$

На основе полученных сигналов  $X_a(t)$  и  $X_l(t)$  расчетный модуль ИИС формирует выходной сигнал  $y(t) = f(X_a(t), X_l(t))$ , который описывает работу технологического оборудования (оборудование выключено, оборудование простаивает или оборудование выполняет технологическую операцию) и может быть использован для предиктивного анализа состояния оборудования путем выделения из полученного сигнала постоянной составляющей, характеризующей параметры технологического процесса, высокочастотной составляющей, характеризующей состояние быстро изнашиваемой оснастки (инструмента), и низкочастотной составляющей, характеризующей изменение состояния оборудования.

### 3.2 Разработка архитектуры ИИС

Рассмотрим типовую архитектуру построения ИИС, предлагаемую к внедрению на машиностроительных предприятиях (рисунок 3.9, а).

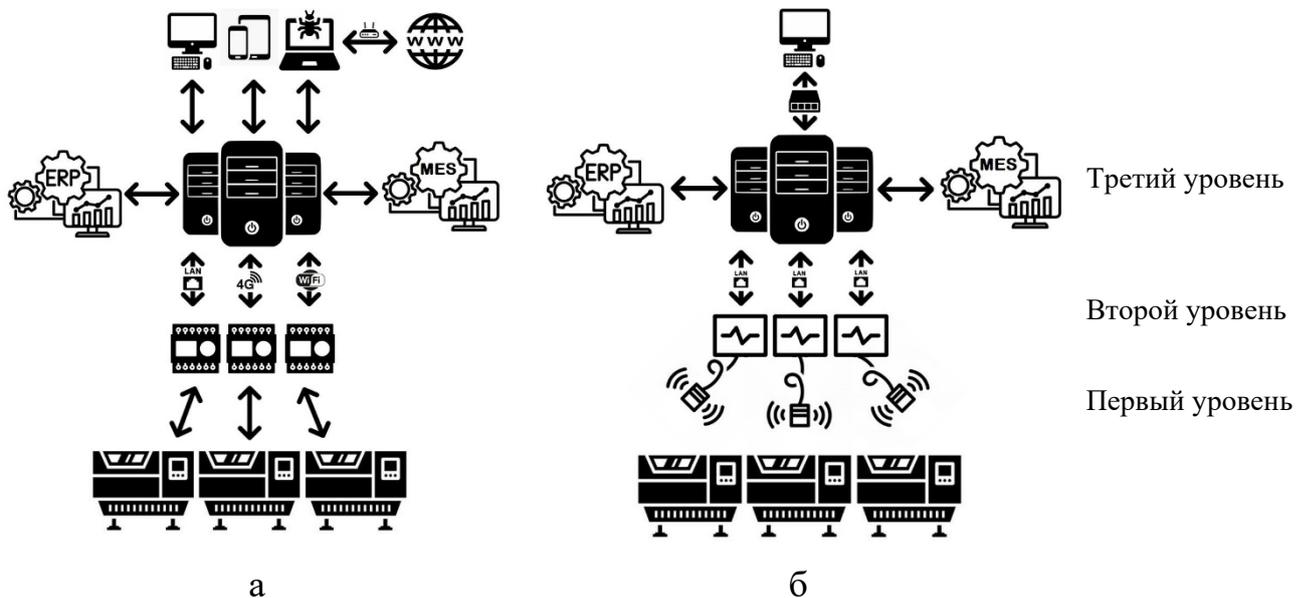


Рисунок 3.9 – Архитектура ИИС:

а – типовой пример ИИС; б – разработанная ИИС

В общем случае почти любая ИИС состоит из сервера, на котором установлено необходимое программное обеспечение, хранятся и обрабатываются данные. Сервер имеет непосредственную связь с персональными устройствами для передачи на них аналитической, статистической или иной запрашиваемой информации.

Это могут быть как персональные компьютеры на рабочих местах, так и мобильные устройства.

При этом каналы передачи информации могут быть как проводные, так и беспроводные, с использованием или без использования сотовых сетей, иметь или не иметь протоколы шифрования данных.

С другой стороны, сервер предоставляет информацию для MES и/или ERP-систем предприятия.

Информация (исходные данные) на сервер поступает с контроллеров АПК, интегрированных или связанных с СЧПУ технологического оборудования. АПК собирают информацию как с СЧПУ, так и с дополнительно установленных датчиков, если это необходимо.

Безусловно, такие системы имеют ряд преимуществ и распространены на предприятиях, но уязвимы к инцидентам информационной безопасности, так заражение любого устройства в цепочке из множества устройств может привести к выходу из строя всего станочного парка предприятия, о чем говорилось выше.

Здесь под инцидентом понимается факт нарушения и (или) прекращения функционирования объекта КИИ, в том числе произошедший в результате компьютерной атаки.

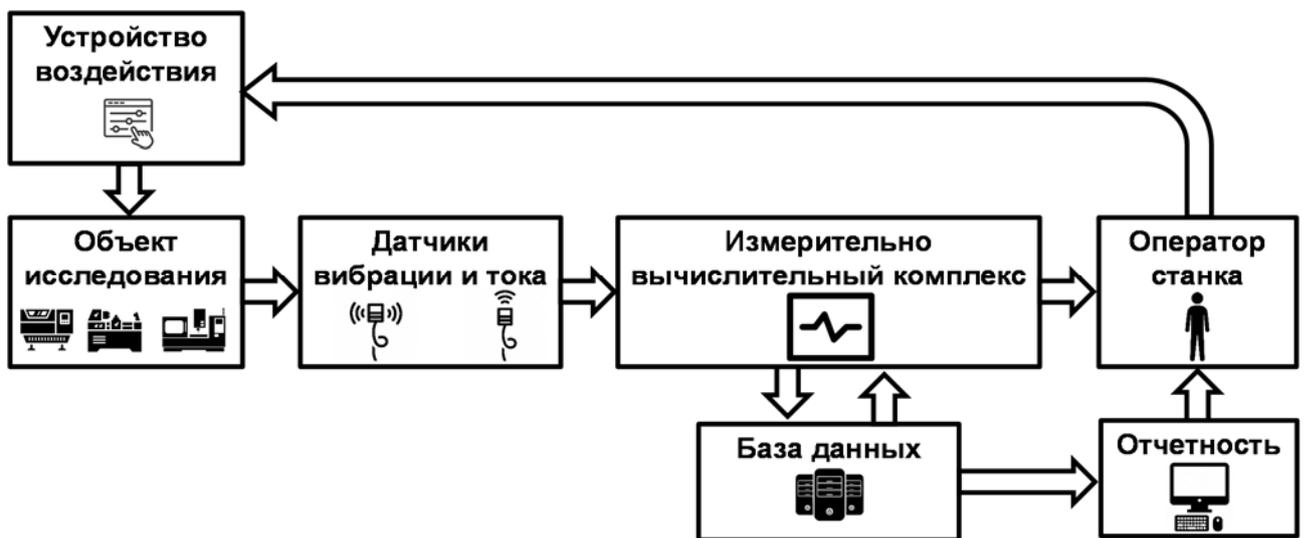
Задача обеспечения мер защиты от внешних воздействий и компьютерных атак при внедрении ИСС на предприятиях машиностроительных производств может быть решена за счет применения ИИС, построенных на основе косвенного контроля состояния технологического оборудования. В настоящей работе – по уровню вибрации в процессе механической обработки (рисунок 3.9, б).

Для этого разработан диагностический модуль контроля состояния технологических систем ИИС мониторинга работы оборудования, рассмотренные ранее.

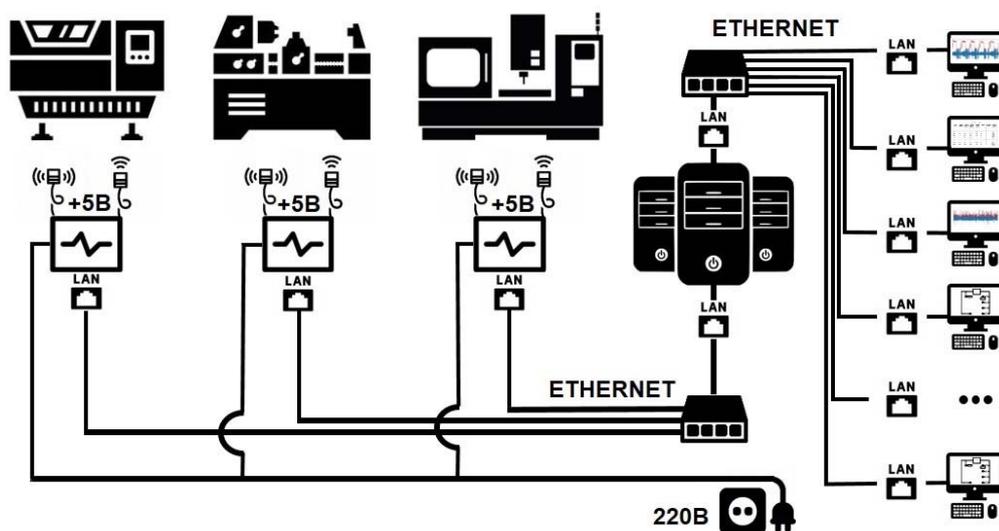
Косвенный контроль по уровню вибрации позволяет исключить необходимость подключения ИИС к СЧПУ, в результате чего категория значимости объекта КИИ не повышается. Таким образом, исключается риск компьютерной атаки одновременно на весь парк СЧПУ объединенных ИИС, а также причинения ущерба

СЧПУ посредством воздействия через ИИС или распространения вредоносного программного обеспечения по сети, объединяющей ЧПУ.

Разработанное решение представляет собой радиальную ИИС с централизованным управлением, состоящую из совокупности функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств (рисунок 3.10), необходимых для получения информации, дальнейшего ее преобразования, обработки и представления пользователю в требуемом виде или автоматического осуществления логических функций измерения, контроля, диагностирования, идентификации.



а)



б)

Рисунок 3.10 – ИИС:

а – принципиальная схема; б – схема подключения

ИИС с централизованным управлением имеют многофункциональную многоуровневую структуру:

- первый уровень, включающий различные датчики (датчик контроля вибрации; модуль контроля тока; датчик температуры и влажности; датчик углекислого газа);
- второй уровень, включающий устройство сбора и передачи данных, технические средства приема-передачи данных, каналы связи (панель оператора);
- третий уровень, включающий сервер сбора и сервер баз данных, устройство синхронизации системного времени, автоматизированные рабочие места, каналобразующую аппаратуру, средства связи и приема-передачи данных.

В состав интегрируемых в технологическую систему диагностических модулей входят:

- панель оператора (рисунок 3.11, а);
- датчик вибрации (рисунок 2.3, г);
- модуль контроля тока (опция) (рисунок 2.24, в);
- датчик температуры и влажности (опция) (рисунок 3.11, б);
- датчик углекислого газа (опция) (рисунок 3.11, в).

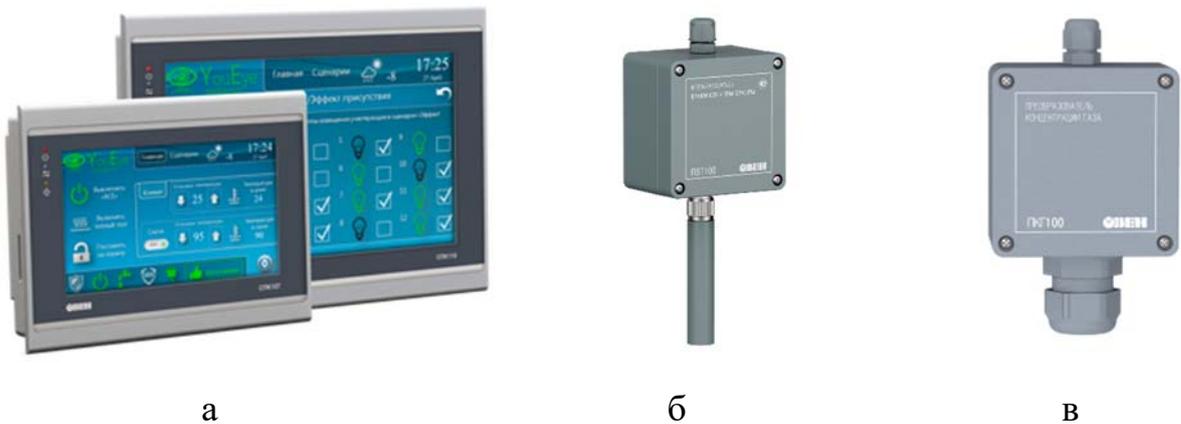


Рисунок 3.11 – Состав диагностического модуля:

- а – СПК107 программируемый контроллер со встроенным сенсорным экраном;
- б – ПВТ100 промышленный датчик влажности и температуры воздуха;
- г – ПКГ100-CO2 промышленный датчик концентрации углекислого газа в воздухе

На сервере ИИС установлено следующее программное обеспечение:

- система управления базами данных PostgreSQL;
- программа сбора данных диагностических модулей SPKServer;
- программа взаимодействия с оператором TCPServer;
- программа генерации отчетов SPK-Python;
- веб-сервер IIS (Internet Information Services);
- веб-сервер http.server для просмотра отчетов;
- сторожевой таймер ServerApp.

Общий вид ИИС представлен на рисунке 3.12 [216]. Схема развертывания представлена на рисунке 3.13.

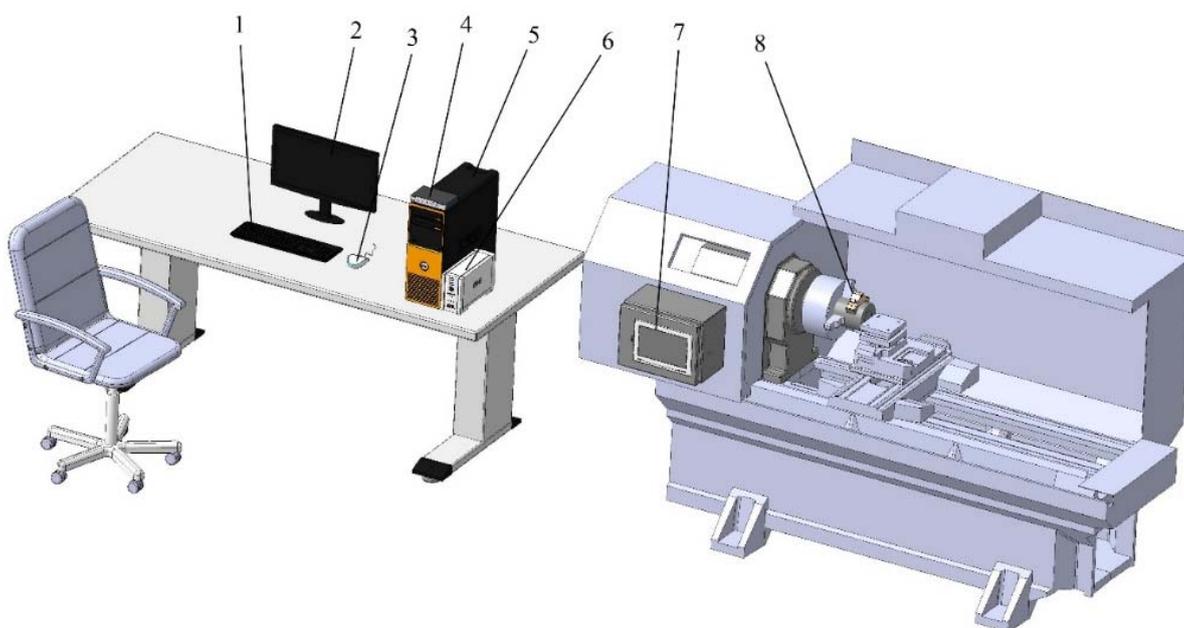


Рисунок 3.12 – Внешний вид ИИС с одним диагностическим модулем:

- 1 – клавиатура; 2 – монитор; 3 – компьютерная мышь; 4 – сетевой коммутатор;  
 5 – сервер; 6 – источник бесперебойного питания; 7 – панель оператора;  
 8 – датчик вибрации

Протоколы сетевого уровня, используемые компонентами ИИС, представлены в таблице 3.1.

Данные косвенного контроля работы технологического оборудования собираются диагностическим модулем для визуализации и передачи на сервер ИИС.

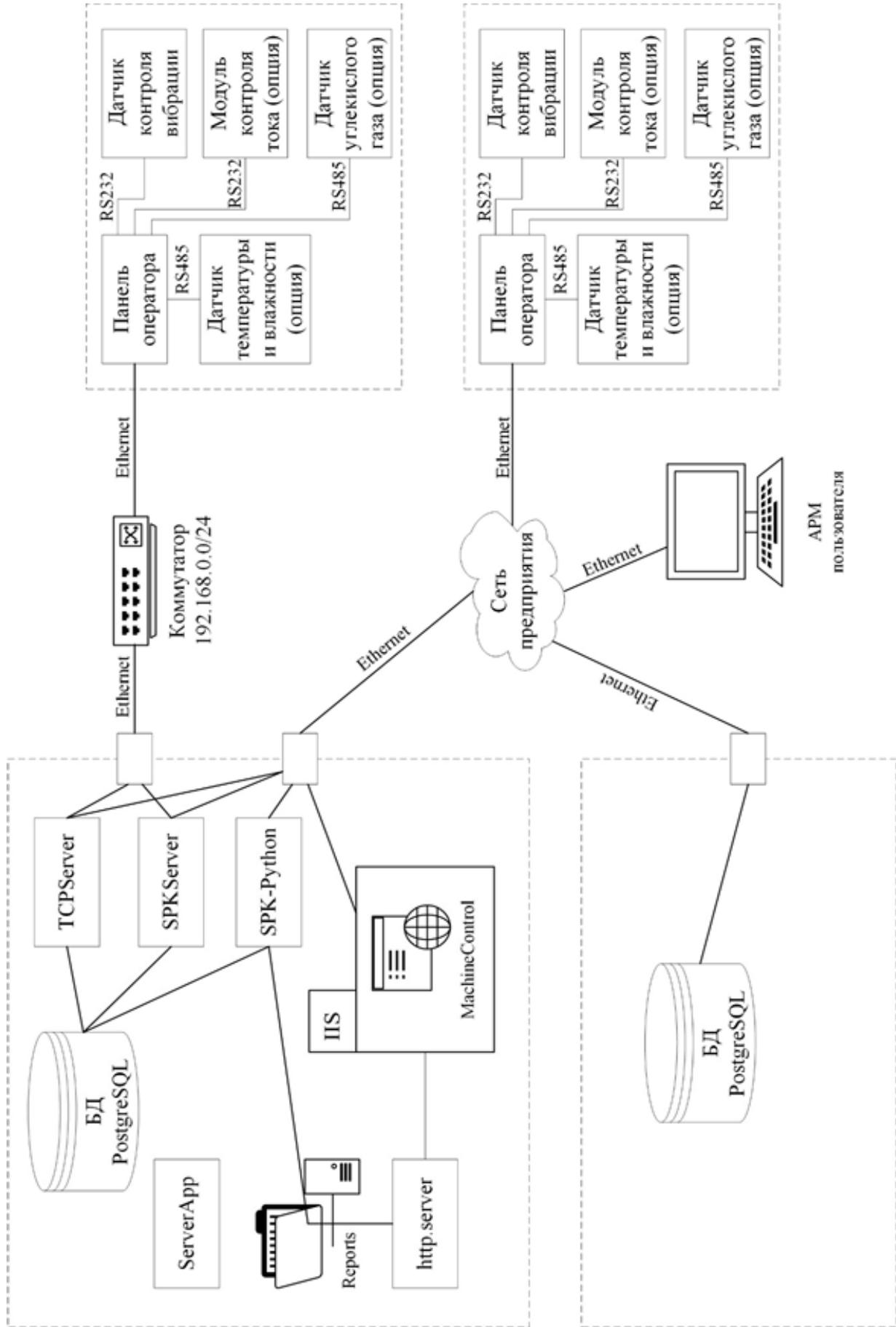


Рисунок 3.13 – Схема развертывания ИИС

Таблица 3.1 – Протоколы сетевого уровня, используемые компонентами ИИС

Компонент	Физический уровень	Прикладной уровень
Панель оператора	Ethernet	Разработанные текстовые протоколы через TCP и UDP
Модуль контроля вибрации	RS-232	Разработанный текстовый протокол
Модуль контроля тока	RS-232	Разработанный текстовый протокол
Датчик температуры и влажности	RS-485	Modbus RTU
Датчик углекислого газа	RS-485	Modbus RTU
СУБД PostgreSQL	Ethernet	Протокол PostgreSQL v3.0
SPKServer	Ethernet	Разработанный текстовый протокол через UDP, протокол PostgreSQL v3.0
TCPServer	Ethernet	Разработанный текстовый протокол через TCP, протокол PostgreSQL v3.0
SPK-Python	Ethernet	Протокол PostgreSQL v3.0
Веб-сервер IIS	Ethernet	HTTPS
Веб-сервер http.server	Ethernet	HTTP
ServerApp	–	–

Один сервер может обслуживать диагностические модули целого цеха или всего предприятия. Датчики подключены к панели оператора проводным соединением.

Панель оператора представляет собой интерфейс для управления диагностическим модулем, просмотра собранных данных в режиме реального времени, отображения прогнозируемого ресурса режущего инструмента и рекомендуемых режимов резания [217]. Сенсорный экран резистивного типа предназначен для ввода и отображения информации.

На лицевой стороне панели оператора расположены:

- цветной TFT дисплей с сенсорной панелью;
- индикатор «ПИТАНИЕ», сигнализирующий о наличии напряжения питания панели;
- индикатор «COM», сигнализирующий о наличии обмена данными по портам COM1 и COM2;
- индикатор «Работа», сигнализирует о том, что запущен проект CODESYS. Мигание индикатора с интервалом 1 раз в секунду говорит о возникновении исключения (Exception), которое привело к остановке выполнения программы.

Панель оператора может использоваться без подключения модуля сбора информации, в этом случае можно лишь просматривать ранее записанные данные и получать рекомендуемые режимы резания на основе предыдущей эксплуатации модуля сбора информации либо информации, собираемой на других станках цеха при производстве аналогичной продукции. Кроме этого, для просмотра и анализа собранной информации можно использовать имеющиеся персональные компьютеры при условии включения их в одну локальную сеть с ИИС.

Панель оператора позволяет организовать сбор данных о фактической наработке режущего инструмента, что повышает точность прогнозирования расхода режущего инструмента, оптимизации инструментальных затраты и, соответственно, способствует снижению затрат на режущий инструмент.

Для передачи данных от модуля контроля вибрации и модуля контроля тока

используется разработанный текстовый протокол через интерфейс RS-232, а данные с датчиков температуры и влажности и датчиков углекислого газа передаются по протоколу 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 ИИС 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.

### **3.3 Разработка алгоритмов работы ИИС**

Укрупненный алгоритм функционирования ИИС представлен на рисунке 3.14.

Данные (блок 2) косвенного контроля работы технологического оборудования собираются диагностическим модулем (вибрации, 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.

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 ис-

пользованием транспортного протокола TCP по сети Ethernet. На сервере данные принимаются написанным на языке C# программным модулем TCPServer и сохраняются и читаются из СУБД PostgreSQL по протоколу PostgreSQL версии 3.0 через соединения по TCP/IP с использованием TCP-порта 5432.

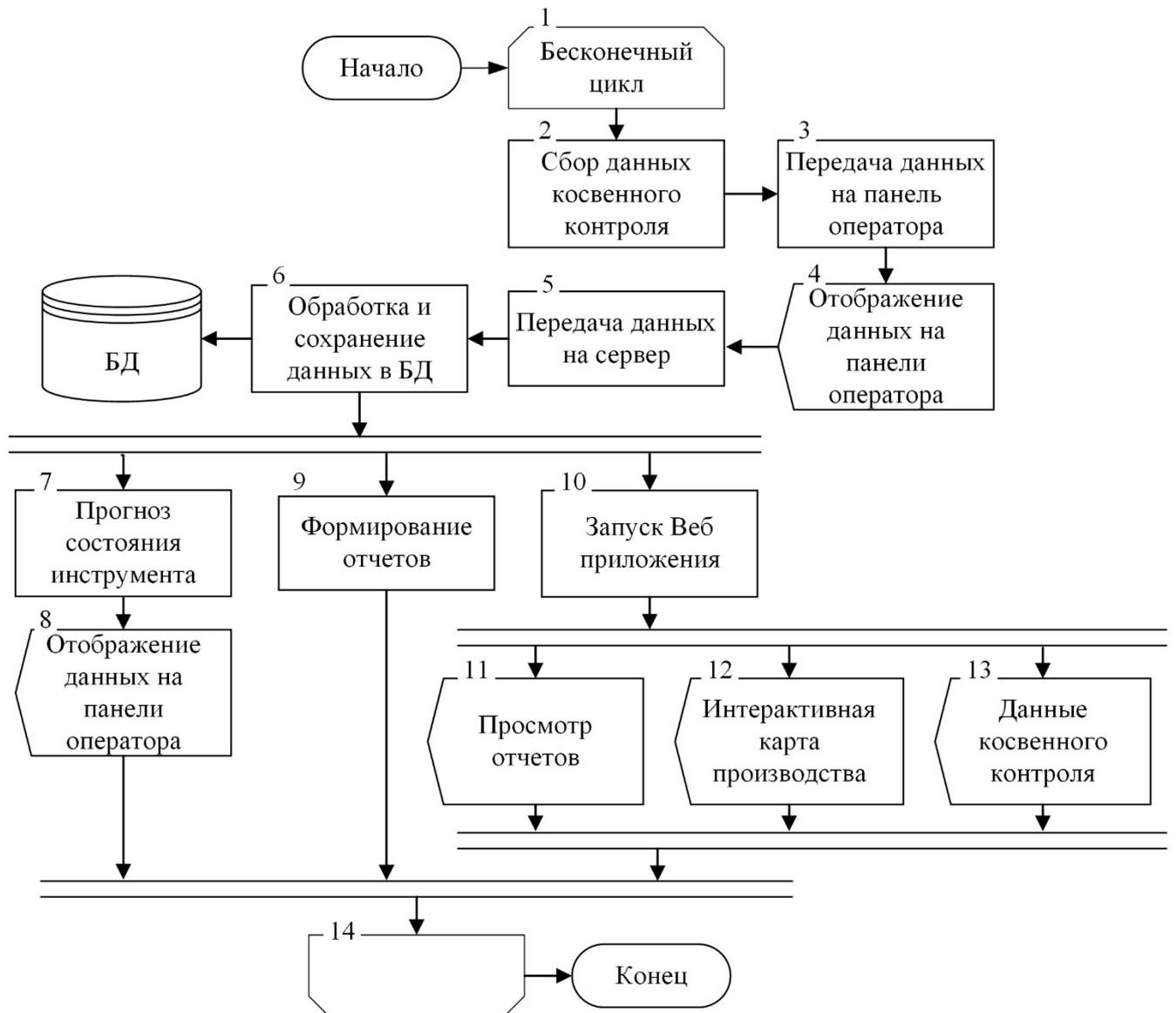


Рисунок 3.14 – Укрупненный алгоритм ИИС

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 веб-сервера ИИС (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.

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. Данные из СУБД PostgreSQL читаются по протоколу PostgreSQL версии 3.0 через соединения по TCP/IP с использованием TCP-порта 5432.

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 его работоспособности. Применение такого решения позволило существенно повысить наработку ИИС путем обеспечения ее самовосстановления (таблица 3.2) [218].

Алгоритм автоматизированного поиска зависшей части ИИС представлен на рисунке 3.15 и работает следующим образом. После запуска сторожевого таймера последний входит в бесконечный цикл в блоке 1. Внутри бесконечного цикла первым делом в блоке 2 проверяется свободное место на диске с базой данных, так как при отсутствии свободного места запись данных в базу данных будет невозможна. Для определения свободного места на диске в операционной системе Windows можно воспользоваться системной функцией GetDiskFreeSpaceEx.

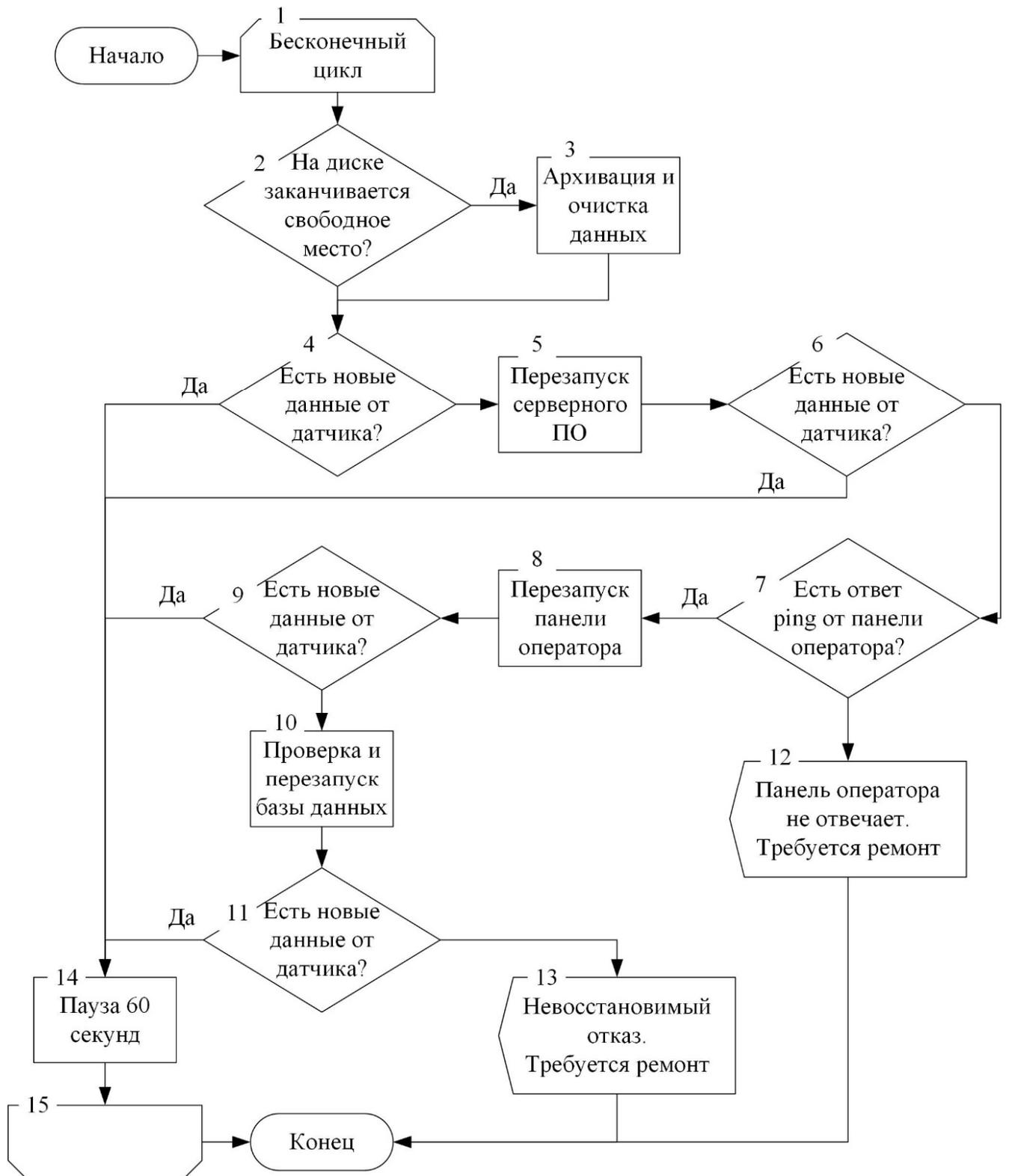


Рисунок 3.15 – Алгоритм автоматизированного поиска и восстановления зависшей части ИИС

Таблица 3.2– Возможные неисправности и методы их устранения

Вероятная причина	Метод устранения
Датчик диагностического модуля вышел из строя	Ремонт или замена датчика диагностического модуля
Поврежден или отключен провод датчика	Проверить и при необходимости восстановить целостность провода датчика. Проверить и при необходимости восстановить подключение провода
Не работает панель оператора	Проверить питание панели оператора. Проверить работоспособность блока питания панели оператора. Перезапустить панель оператора
Поврежден сетевой провод панели оператора	Проверить и восстановить сетевой провод панели оператора
Сбой серверного программного обеспечения	Перезапустить серверное программное обеспечение
Сбой базы данных	Перезапустить систему управления базой данных
Закончилось место на жестком диске сервера	Провести архивирование устаревших данных. Очистить место на жестком диске

Если на диске заканчивается свободное место, то выводится соответствующее сообщение и в блоке 3 начинается процесс архивации и очистки данных. В зависимости от настроек сторожевого таймера сообщения могут выводиться на экран, записываться в журнал событий операционной системы или направляться администратору системы по электронной почте. В случае когда объем свободного места на диске выше заранее определенного критического уровня, никаких дополнительных действий не требуется и сразу происходит переход к блоку 4.

В блоке 4 проверяется наличие новых данных от датчика с момента последней проверки. Если за отчетный период времени от датчика были получены новые дан-

ные, то это значит, что ИИС находится в работоспособном состоянии и никаких дополнительных действий не требуется. Происходит переход к блоку 14, который обеспечивает задержку работы сторожевого таймера на 60 секунд, после чего процесс проверки работоспособности АПК повторяется (от блока 15 возвращаемся к блоку 1).

Если в блоке 4 проверка показывает, что новых данных от датчика нет, то сторожевой таймер пытается восстановить работоспособность АПК. Одной из самых частых причин отказа является зависание серверной части программного обеспечения ИИС, поэтому в блоке 5 предпринимается попытка его перезапуска. После перезапуска серверной части в блоке 6 снова проводится проверка наличия новых данных от датчика. В случае отсутствия данных предпринимается попытка перезапуска панели оператора.

Для перезапуска панели оператора сначала в блоке 7 проверяется ее доступность по сети с помощью системной команды `ping`. Если панель оператора не отвечает, то имеет место невосстановимый сбой и требуется ремонт ИИС. В этом случае в блоке 12 выводится соответствующее сообщение, и попытка восстановления работоспособности ИИС завершается.

Если панель оператора отвечает на запросы, то в блоке 8 предпринимается попытка ее перезапуска с помощью отправки ей команды на перезагрузку. После перезапуска панели оператора в блоке 9 снова проводится проверка наличия новых данных от датчика. В случае отсутствия данных в блоке 10 предпринимается проверка состояния базы данных ИИС с помощью утилит `pg_isready` и `pg_amcheck` и в случае наличия проблем с базой данных ее автоматическое восстановление. После попытки восстановления базы данных в блоке 11 снова проводится проверка наличия новых данных от датчика. Если попытка восстановления базы данных не помогла восстановить работоспособность ИИС, то имеет место невосстановимый сбой и требуется ремонт ИИС. В этом случае в блоке 13 выводится соответствующее сообщение, и попытка восстановления работоспособности завершается.

Применение предложенного сторожевого таймера позволит существенно повысить наработку разработанного аппаратно-программного комплекса путем обеспечения его самовосстановления.

### 3.4 Выводы

В разделе представлен анализ Федерального закона «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 № 187-ФЗ, на основе которого установлены нормы регулирования отношений в области обеспечения безопасности КИИ, в целях ее устойчивого функционирования при проведении в отношении нее компьютерных атак, с учетом которого разработана архитектура ИИС.

Разработана математическая модель, позволяющая по траекториям в фазовом пространстве и их постепенному изменению судить о накапливающихся изменениях в работе, износе рабочих устройств и других показателях, характеризующих функционирование системы в течение времени.

Разработана архитектура ИИС, реализующая предложенные методы косвенного контроля, сохраняющая высокий уровень собственной работоспособности за счет возможностей самодиагностики и самовосстановления.

Разработан алгоритм функционирования ИИС на основе косвенного контроля состояния технологической системы.

Разработан алгоритм автоматизированного поиска и восстановления зависшей части ИИС.

## 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА В ИИС

### 4.1 Обработка информационных сигналов ИИС

ИИС предназначена для контроля состояния технологической системы в процессе обработки и мониторинга состояния оборудования. ИИС схематично представлена на рисунке 4.1 [183].

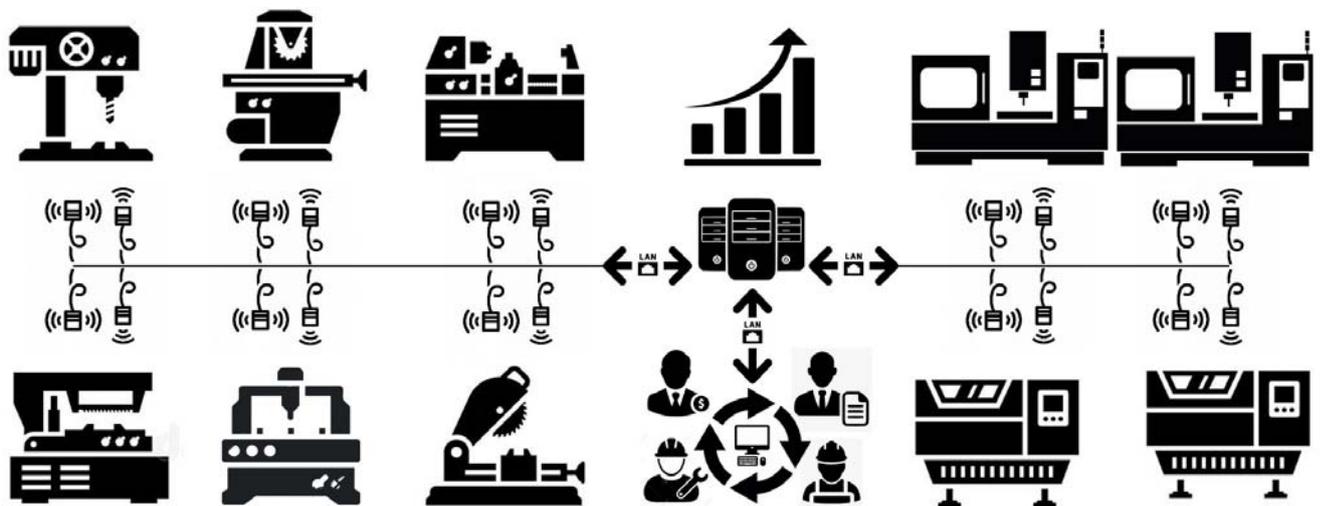


Рисунок 4.1 – Схема ИИС

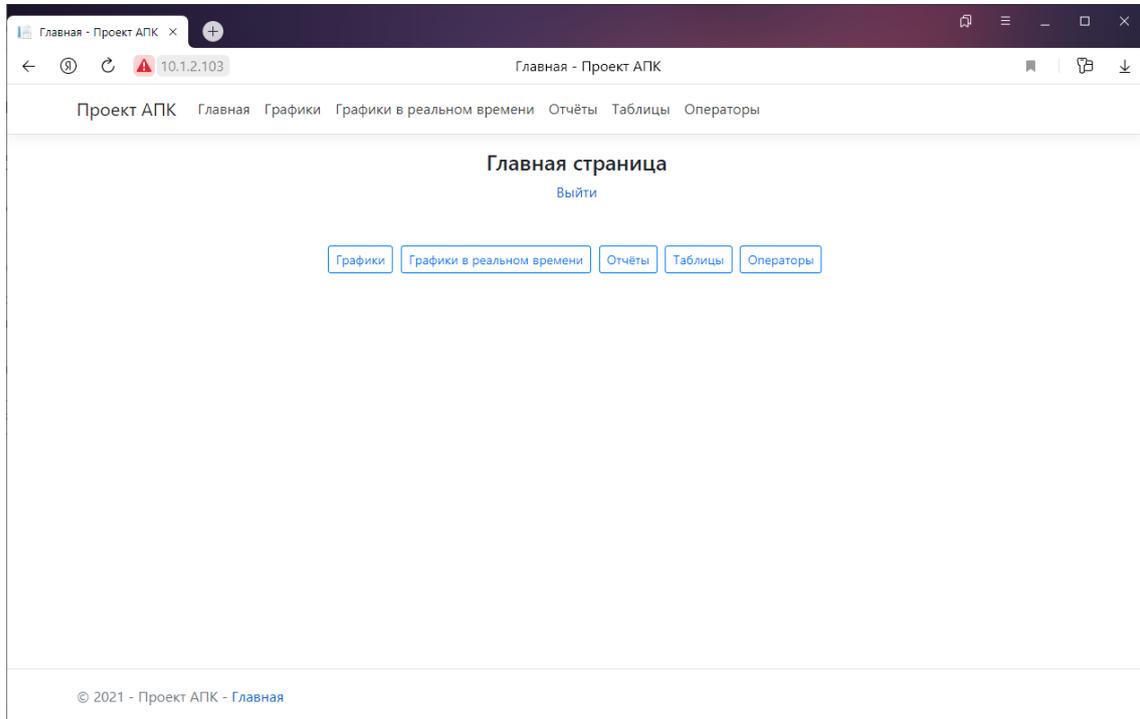
Исходя из изложенного в разделах 2 и 3, разработанная ИИС предоставляет возможность пользователю получить информацию о работе интересующего его технологического оборудования, формируя различные отчеты.

Для работы с информацией, полученной и обработанной ИИС, разработано веб-приложение (рисунок 4.2, а). Для входа в приложение необходимо ввести логин и пароль, который выдается администратором ИИС при интеграции (рисунок 4.2, б).

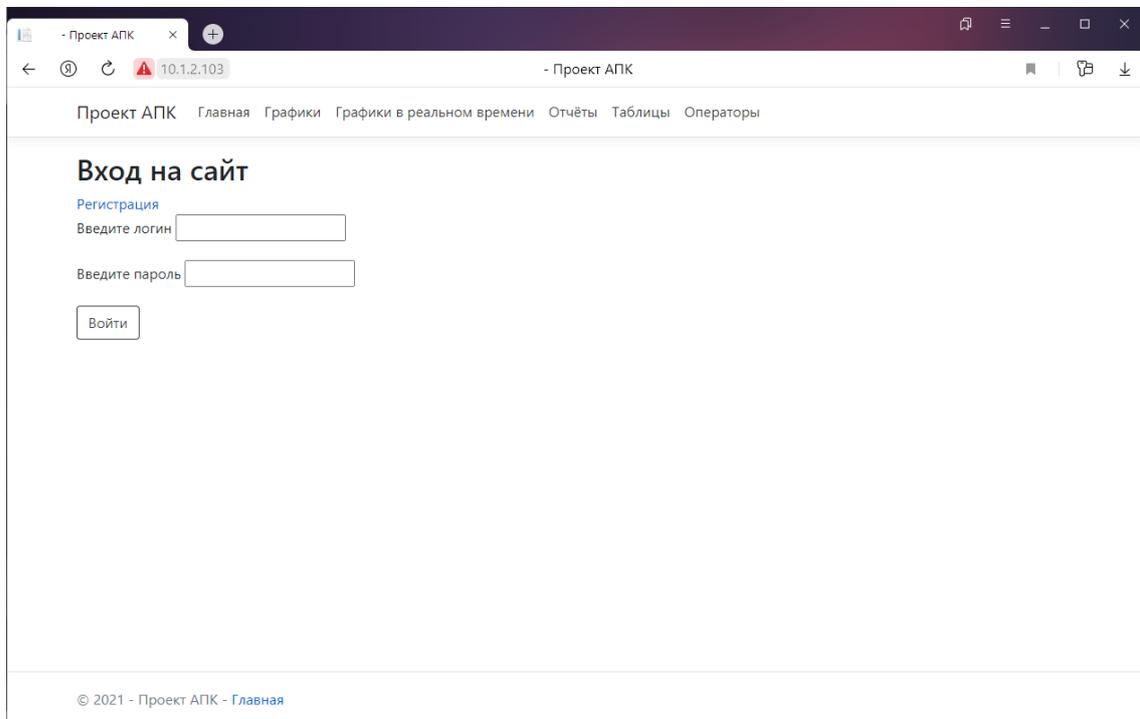
В веб-приложении для работы с серверными данными на главной странице присутствуют следующие вкладки:

- Графики;
- График в реальном времени;
- Отчеты;

- Таблицы;
- Операторы;
- Карта производства.



а



б

Рисунок 4.2 – веб-приложение:

а – главная страница; б – страница аутентификации пользователя

При переходе на вкладку «Графики» (рисунок 4.3) можно выбрать интересующий диагностический модуль по его порядковому номеру с помощью выпадающего списка «Выбрать СПК» и период времени для просмотра сохраненной информации.

При нажатии на иконку «Вывести данные» будет построен график за указанный период. Указанный функционал разработан для оперативного доступа к информации о состоянии технологической системы и, в частности, используется при испытании режущего инструмента, т. к. анализ графика позволяет косвенно определить качество инструмента и корректность его эксплуатации.

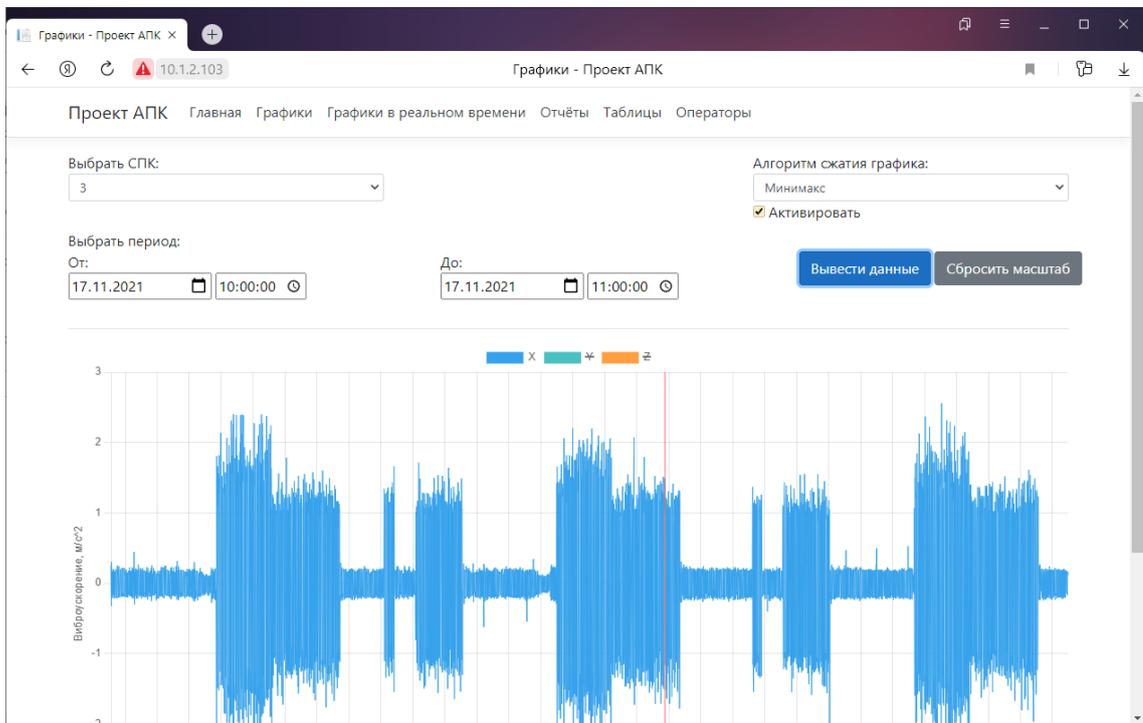


Рисунок 4.3 – График по выбранному временному отрезку

На вкладке «Графики в реальном времени» (рисунок 4.4) отображается уровень вибрации технологической системы выбранного по порядковому номеру в выпадающем списке «Выбрать СПК» диагностического модуля в виде графика.

Данная опция носит диагностический характер и служит для удаленной оценки работоспособности диагностического модуля и работы оборудования. Так наличие вибрации позволяет оценить, работает сейчас станок или нет. Если станок работает, но график вибрации имеет линейный характер, то это может быть сигналом о выходе диагностического модуля из строя или обрыва проводов подключения.

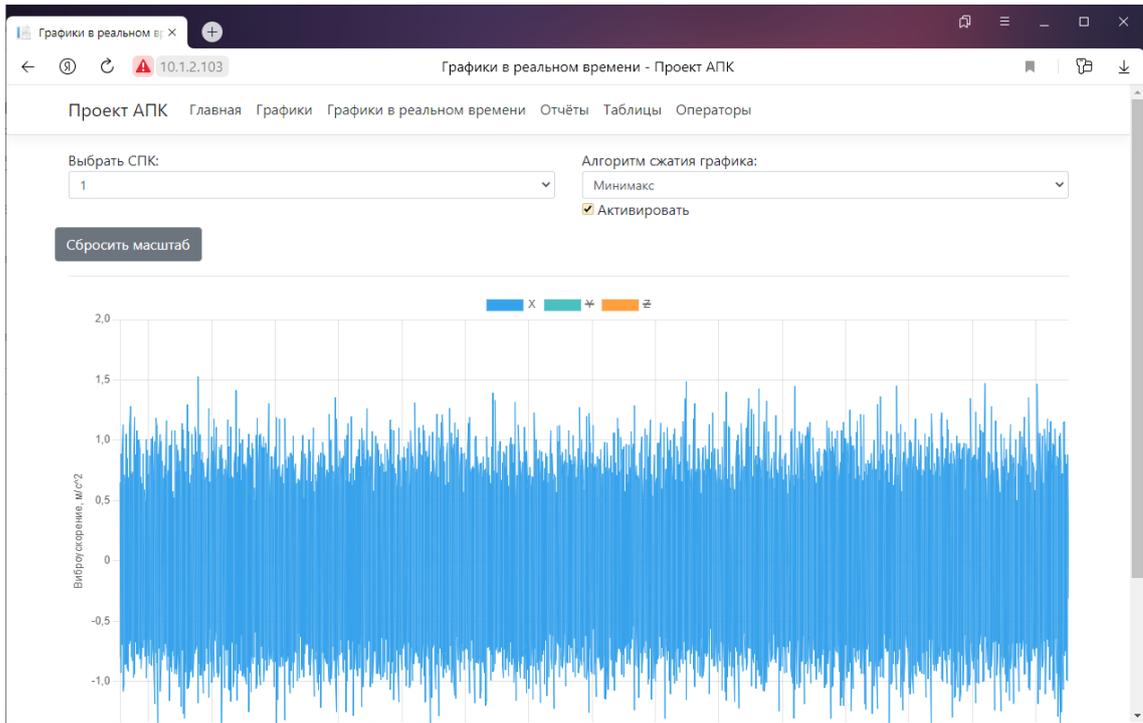


Рисунок 4.4 – График вибрации в реальном времени

Вкладка «Отчеты» дает возможность сформировать новый отчет о работе технологической системы, а также просмотреть ранее сохраненные отчеты (рисунок 4.5).

Для построения отчета необходимо выбрать номер диагностического модуля в поле «Выбрать СПК», затем ввести диапазон дат и времени. При нажатии кнопки «Новый отчет» происходит формирование отчета о работе оборудования. Указанный раздел используется для ручного формирования отчетов о работе оборудования за любой интересующий интервал времени, например, для контроля работы конкретного оператора без ожидания построения суточных отчетов.

В отчете указано количество секунд работы из общего числа секунд в интересующем интервале времени, а также процент работы оборудования, то есть коэффициент его эффективной работы. Ниже на вкладке представлена служебная информация о дате формирования отчета и периоде отчета.

Нажав кнопку «Сохранить», можно сохранить отчет для просмотра в любое время во вкладке «Отчеты». Нажатие на кнопку «Назад» приведет к переходу в раздел «Отчеты» без сохранения отчета.

Дополнительно реализована возможность формирования отчетов из вкладки

«Карта производства», о чем будет написано позднее.

Проект АПК Главная Графики Графики в реальном времени Отчёты Таблицы Операторы Карта производства

### Новый отчёт

Всего секунд

Секунд работы

Процент работы

Количество деталей

Количество инструментов

Дата формирования

Период отчёта

[Назад](#)

Рисунок 4.5 – Формирование нового отчета

При нажатии иконки «Операторы» (рисунок 4.6) можно добавить операторов системы или посмотреть, когда была произведена аутентификация, каким оператором, на каком станке. То есть указанный функционал обеспечивает учет операторов и время их авторизации на станке.

Проект АПК Главная Графики Графики в реальном времени Отчёты Таблицы Операторы Карта производства

ID оператора	ФИО	Пароль	Последняя авторизация
--------------	-----	--------	-----------------------

Рисунок 4.6 – Добавление оператора

Добавить нового оператора в систему можно с помощью кнопки «Добавить оператора».

При нажатии иконки «Карта производства» открывается интерактивная карта

выбранного цеха (рисунок 4.7 и рисунок 4.8).

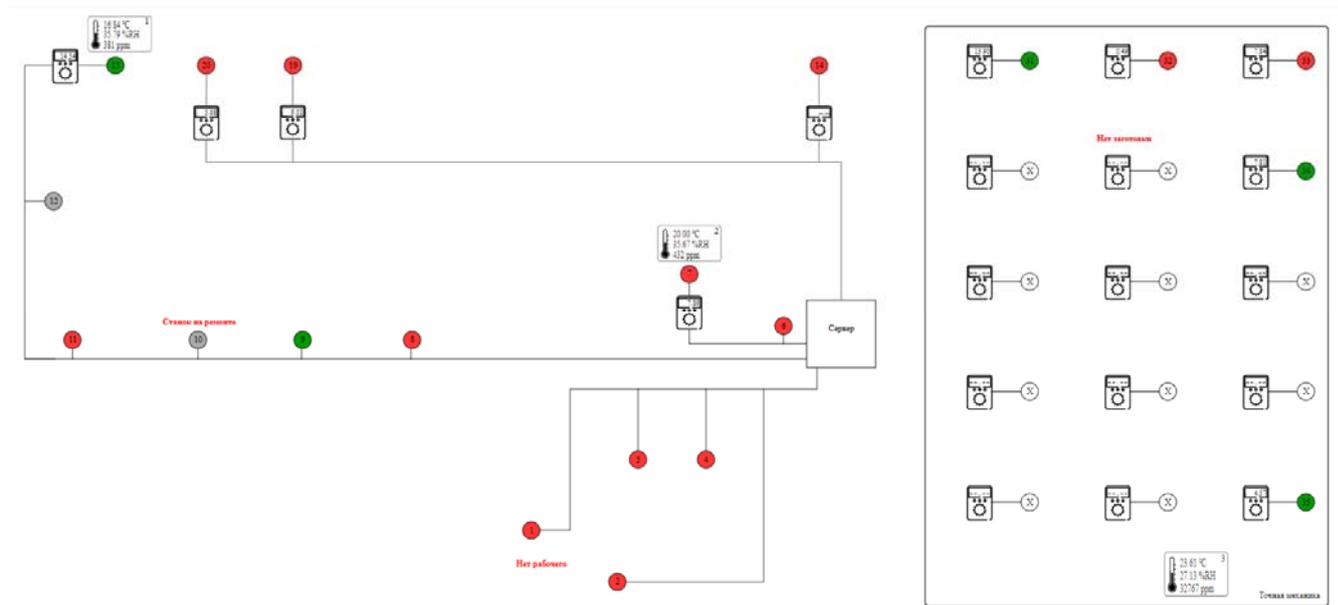


Рисунок 4.7 – Схематическая карта цеха механической обработки

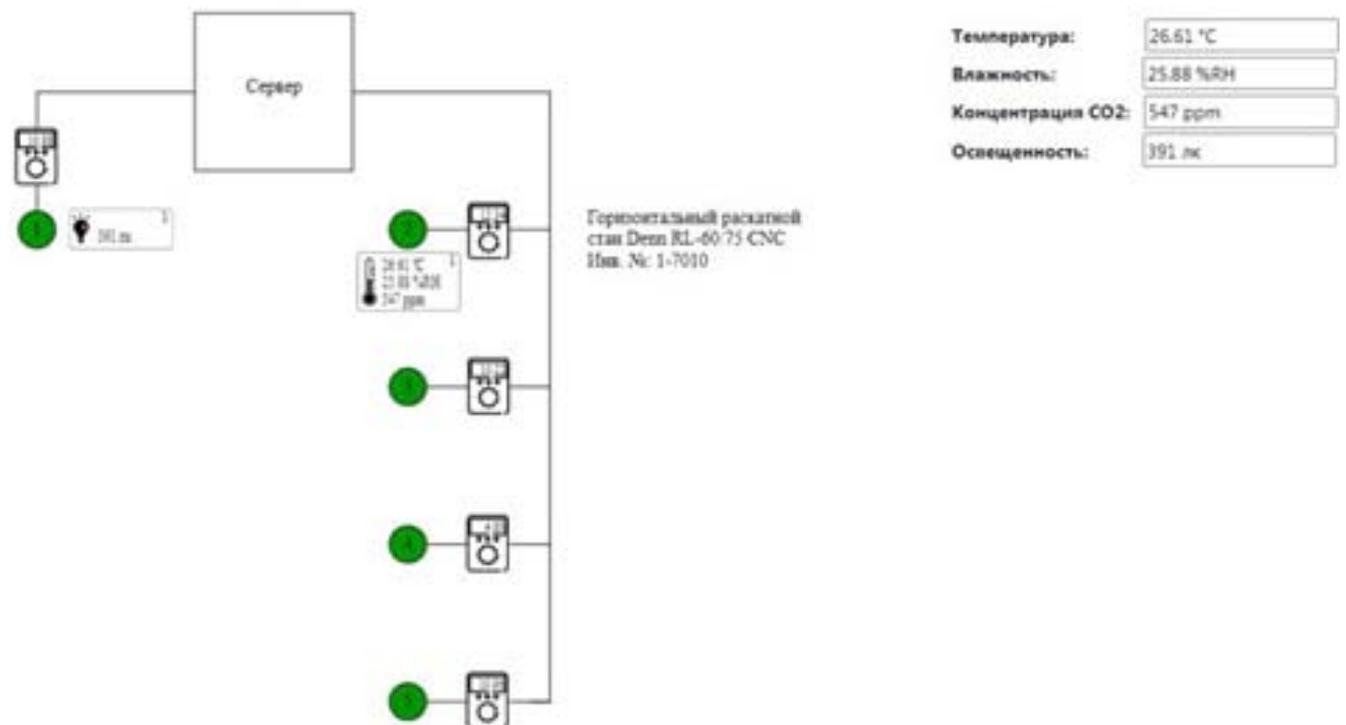


Рисунок 4.8 – Схематическая карта цеха

Интерактивная карта производства показывает размещение оборудования на площадках относительно серверного оборудования. С целью удовлетворения требованиям информационной безопасности вышеуказанные примеры планировок

представлены в схематичном виде, при этом весь функционал сохранён.

Здесь и далее представлены отчеты, сделанные в разное время на разных версиях разработанного для ИИС программного продукта.

Основной функционал интерактивной карты производства заключается в том, что отображается в реальном времени статус оборудования, т. е. факт его работы или простоя в данный момент, а также некоторая дополнительная информация (рисунок 4.9):

- порядковый номер диагностического модуля;
- наименование оборудования;
- потребляемую электроэнергию в режиме реального времени (при наличии);
- показания дополнительных датчиков диагностического модуля (при наличии).

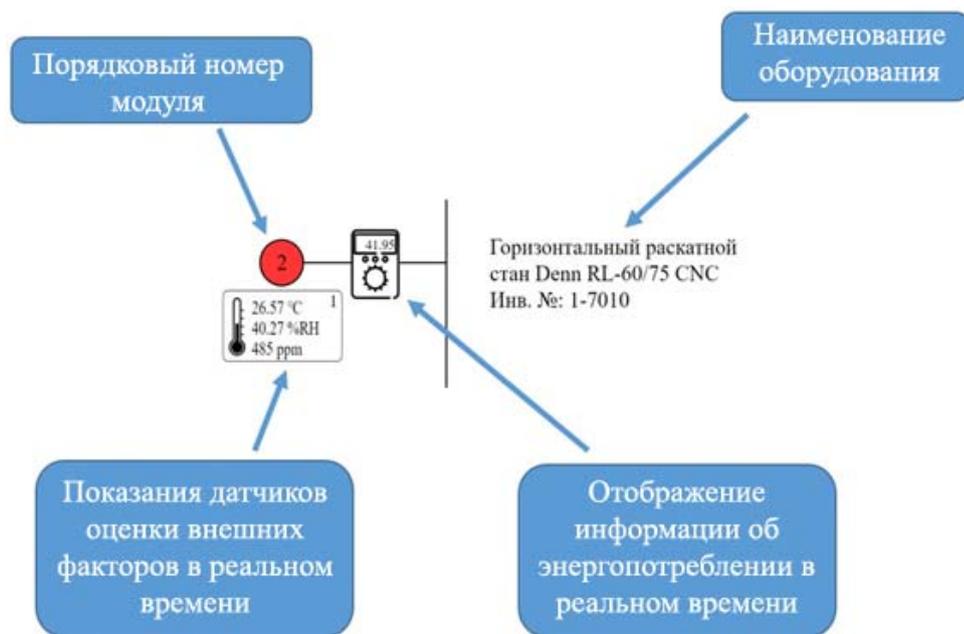


Рисунок 4.9 – Информация об оборудовании на интерактивной карте производства

Интерактивная карта производства позволяет взаимодействовать с ней для просмотра статистических данных о работе оборудования за любой прошедший период или состояния технологической системы в режиме реального времени.

Для этого необходимо навести курсор мыши на круг с номером, условно отображающий станок, и нажать на него с помощью левой кнопки. В открывшемся

календаре выбирается интересующая дата, но не ранее чем за сутки до даты просмотра. После выбора даты происходит формирование отчета, который открывается в новой вкладке браузера, что позволяет просмотреть отчет о работе выбранного оборудования за выбранный день в формате PDF. Отчет можно сохранить на компьютер пользователя или распечатать на принтере.

Для возврата на интерактивную карту производства необходимо или закрыть отчет, или переключиться между вкладками браузера.

Дополнительные датчики диагностического модуля позволяют отображать на интерактивной карте производства следующие данные:

- температуру окружающей среды;
- влажность;
- концентрацию углекислого газа (CO<sub>2</sub>);
- освещенность.

## 4.2 Анализ отчетов

Далее подробнее рассмотрены состав и принципы формирования отчетов о работе оборудования через вкладку «Карта производства», которые можно разделить на 3 вида:

- суточные;
- недельные;
- месячные.

Общий алгоритм построения отчетов представлен на рисунке 4.10.

Для построения отчета необходимо выбрать технологическое оборудование, для которого будет построен отчет (блок 1), и интересующую дату отчета (блок 2). При необходимости построения отчетов для целого цеха и для нескольких дат алгоритм построения отчета может работать в двух вложенных циклах: по выбранным единицам технологического оборудования и по выбранным датам.

В блоке 3 из базы данных разработанной ИИС запрашивается информация о

параметрах диагностического модуля, для которого строится отчет. Запрашиваемые параметры диагностического модуля включают:

- ось трехосевого МЭМС-акселерометра, по которой будет проходить анализ;
- пороговый уровень вибрации, превышение которого считается работой оборудования;
- пороговый уровень энергопотребления, превышение которого считается работой оборудования;
- уровень питающего напряжения технологического оборудования;
- число питающих фаз технологического оборудования;
- калибровочный коэффициент трансформатора тока;
- границы области построения графика вибрации для отчета;
- границы области построения графика энергопотребления для отчета.

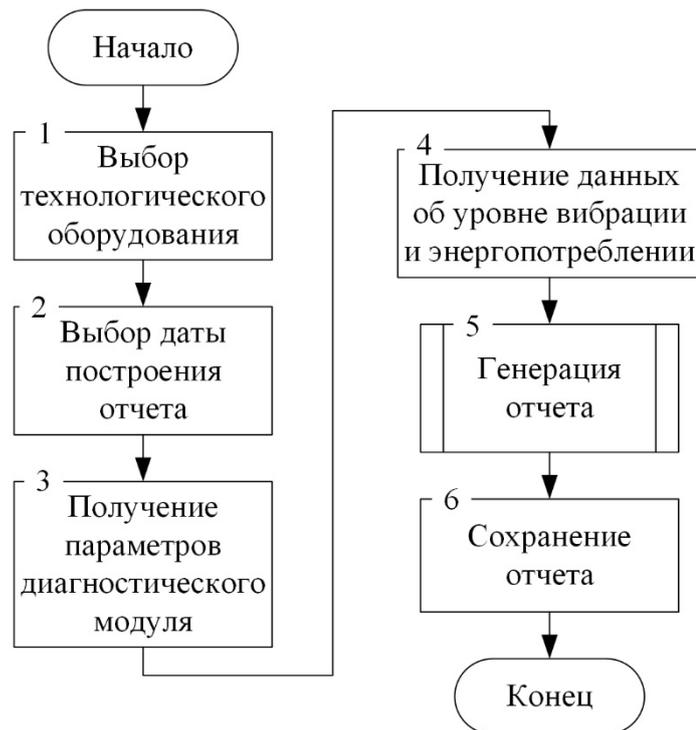


Рисунок 4.10 – Общий алгоритм построения отчетов разработанной ИИС

Затем из базы данных запрашивается информация о вибрации и уровне тока технологического оборудования, собранная диагностическим модулем за отчетный период (блок 4).

В блоке 5 происходит генерация отчета. В зависимости от выбора пользователя разработанной ИИС генерируется суточный, недельный или месячный отчет, алгоритмы генерации которых будут рассмотрены далее.

Полученный отчет сохраняется на жесткий диск сервера ИИС в блоке 6 для дальнейшего использования и просмотра с помощью разработанного веб-приложения в формате PDF.

На рисунке 4.11, а представлен алгоритм построения суточного отчета.

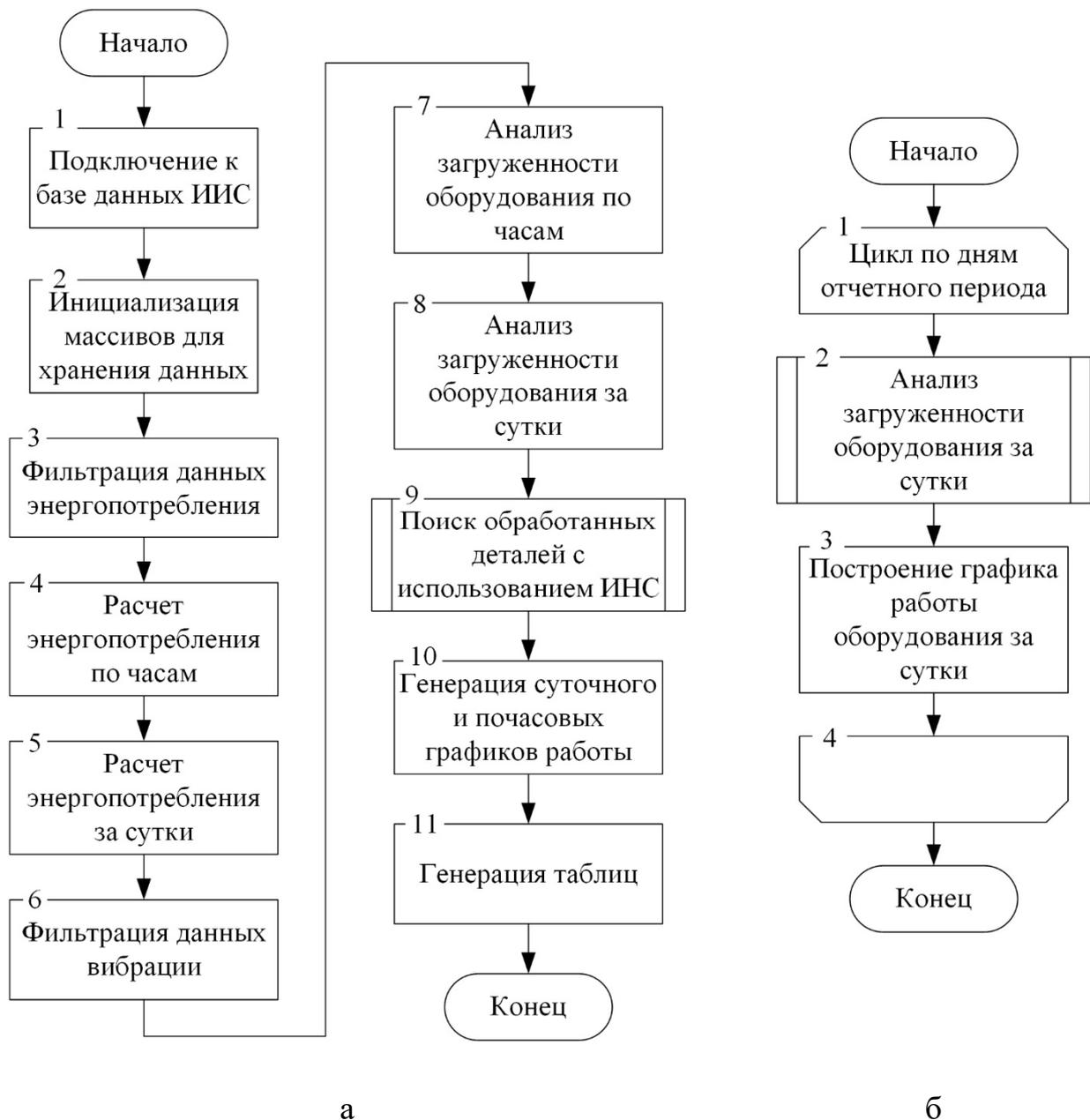


Рисунок 4.11 – Алгоритм построения отчетов разработанной ИИС:

а – суточный отчет; б – недельный или месячный отчет

В блоке 1 происходит подключение к базе данных разработанной ИИС для получения данных о вибрации и уровне тока, собранных с помощью диагностического модуля. Для хранения собранных данных в блоке 2 происходит инициализация соответствующих массивов отрицательными значениями для поиска пропущенных данных, а затем в указанные массивы заносятся данные из базы данных.

Перед использованием данных необходимо провести их фильтрацию. Для этого в блоке 3 для уровня тока выполняются следующие действия:

- убираются выбросы в собранных данных;
- происходит поиск пропущенных данных. Если размер блока пропущенных данных меньше 10 секунд, то пропущенные данные заполняются на основе предыдущих значений;
- определяется минимальный уровень тока за отчетный период, который считается уровнем шума. Уровень шума вычитается из собранных данных. Отфильтрованные значения умножаются на калибровочный коэффициент трансформатора тока, уровень питающего напряжения и число питающих фаз технологического оборудования для получения информации об уровне энергопотребления технологического оборудования.

В блоке 4 в цикле для каждого часа отчетного периода происходит суммирование уровня энергопотребления технологического оборудования. Полученные значения складываются в блоке 5 для оценки уровня энергопотребления за весь отчетный период.

Затем в блоке 6 происходит фильтрация данных об уровне вибрации технологического оборудования за отчетный период:

- убираются выбросы в собранных данных;
- происходит поиск пропущенных данных. Если размер блока пропущенных данных меньше 10 секунд, то пропущенные данные заполняются на основе предыдущих значений;
- для компенсации температурного дрейфа МЭМС-акселерометра оценивается размах уровня вибрации.

Полученные данные о вибрации и уровне энергопотребления технологического оборудования объединяются и используются для анализа загруженности технологического оборудования по часам (блок 7) с учетом пороговых значений уровня вибрации и уровня энергопотребления, превышение которых считается работой технологического оборудования. Суммирование уровней загруженности технологического оборудования по часам в блоке 8 дает уровень загрузки оборудования за сутки.

В блоке 9 полученные данные о вибрации и уровне энергопотребления технологического оборудования передаются разработанной ИНС для анализа и классификации обработанных деталей.

На основе собранных данных в блоке 10 происходит генерация графиков для отчета, а в блоке 11 – таблиц для отчета. Пример суточного отчета представлен в Приложении Б.

На рисунке 4.11, б представлен алгоритм построения недельного или месячного отчета. В блоке 1 начинается цикл по дням отчетного периода. Для каждого дня в блоке 2 производится анализ загруженности оборудования за сутки, использующий блоки 1–8 из алгоритма построения суточного отчета.

В блоке 3 происходит построения графиков работы оборудования за сутки. В случае недельного отчета строятся два типа графиков: отчет о работе станка и график загрузки оборудования. При построении месячных отчетов график загрузки оборудования не строится.

Цикл по дням отчетного периода завершается в блоке 4, когда будут сформированы графики по всем дням отчетного периода.

#### **4.2.1 Суточные отчеты**

Суточный отчет позволяет определить время работы оборудования, эффективность его использования, оценить расход режущего инструмента и номенклатуру изготовленных деталей.

Сформированные суточные отчеты с разбивкой по каждому часу работы хранятся на сервере ИИС. Отчеты за предыдущий день автоматически формируются в интервале с 00:01 до 03:00 ночи.

Так, на рисунке 4.12 представлен фрагмент работы программы, при котором пользователь запрашивает отчет о работе оборудования, под условным обозначением «1», за 16 июня 2023 г.

При этом пользователь может просмотреть отчет за любой день с момента подключения оборудования к ИИС, т. к. формирование отчетов происходит в автоматическом режиме каждые 24 часа. Перед формированием отчета, кроме даты, необходимо указать вид: ежедневный, еженедельный, ежемесячный.

Проект АПК Главная Графики Графики в реальном времени Отчёты Таблицы Операторы Карта производства

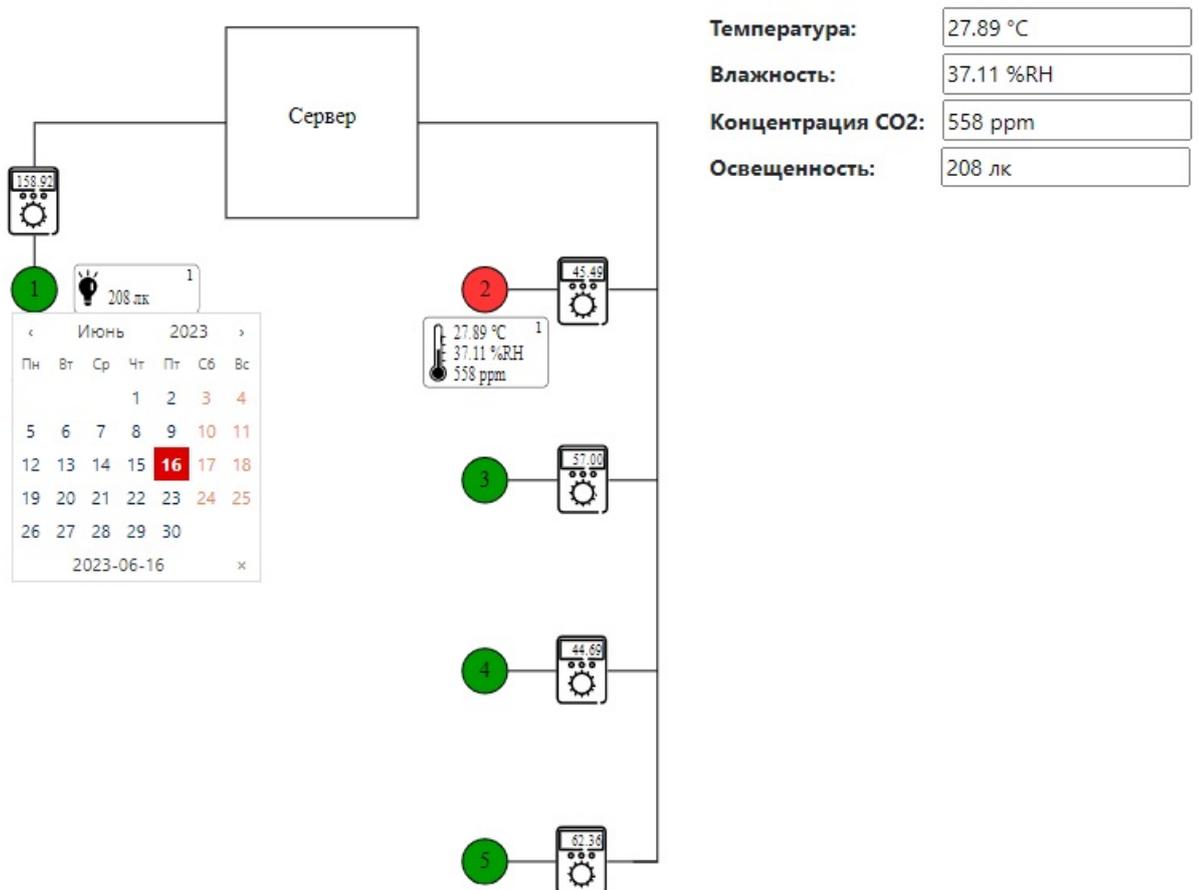


Рисунок 4.12 – Фрагмент веб-интерфейса, открытого на вкладке «Карта производства»

Сформированный отчет открывается в соседней вкладке веб-браузера, с которого осуществляется работа с веб-приложением, имеет формат PDF, и может быть сохранен на компьютере пользователя. Для повышения эффективности и оперативности принятия корректных управленческих решений анализ отчетов автоматизирован с использованием технологий машинного обучения и ИНС.

Отчет в общем случае включает в себя 4 основных блока данных на 27 листах. Общая информация (рисунок 4.13) на 2 листах: указывается дата и номер станка, для которого построен отчет, наименование оборудования и его инвентарный номер. Далее представлена таблица из двадцати пяти строк, из них первая показывает общий фонд времени в сутках и фактическое количество времени работы станка за сутки, коэффициент загрузки оборудования, потребленную оборудованием мощность, общее количество изготовленных за сутки деталей, количество смен инструмента. На оставшихся 24 строках располагается та же информация, что указана ранее, но с часовой разбивкой с 00:00 до 01:00, с 01:00 до 02:00 и т.д. до окончания суток.

#### Отчёт 2023-06-16 - СПК1

Секунд всего	Секунд работы	Процент работы в сутки, %	Процент работы в рабочее время, %	Потребленная мощность, кВт*ч	Деталей	Инструментов	Период формирования
86400	62162	71.95	76.74	2046.78	52	0	0:00:00 - 23:59:59
3600	2238	62.17	62.17	103.54	4	0	0:00:00 - 1:00:00
3600	2501	69.47	69.47	109.87	2	0	1:00:00 - 2:00:00
3600	2054	57.06	57.06	97.13	3	0	2:00:00 - 3:00:00

Рисунок 4.13 – Фрагмент отчета о работе оборудования

Первая схема каждого отчета (рисунок 4.14) отображает вибрацию и энергопотребление оборудования за сутки с 00:00:00 до 23:59:59 и позволяет оценить картину работу оборудования в целом, например, ритмичность работы, количество перерывов, пики вибрации или пиковые мощности и т. д.

Так из рисунка 4.14 видно, что оборудование, рассмотренное в качестве примера, простаивало с 7:00 до 8:00 и далее с 20:00 до окончания суток. Стоит отметить, что в 20:00 оно было обесточено, т.к. уровень его энергопотребления снизился до нуля.

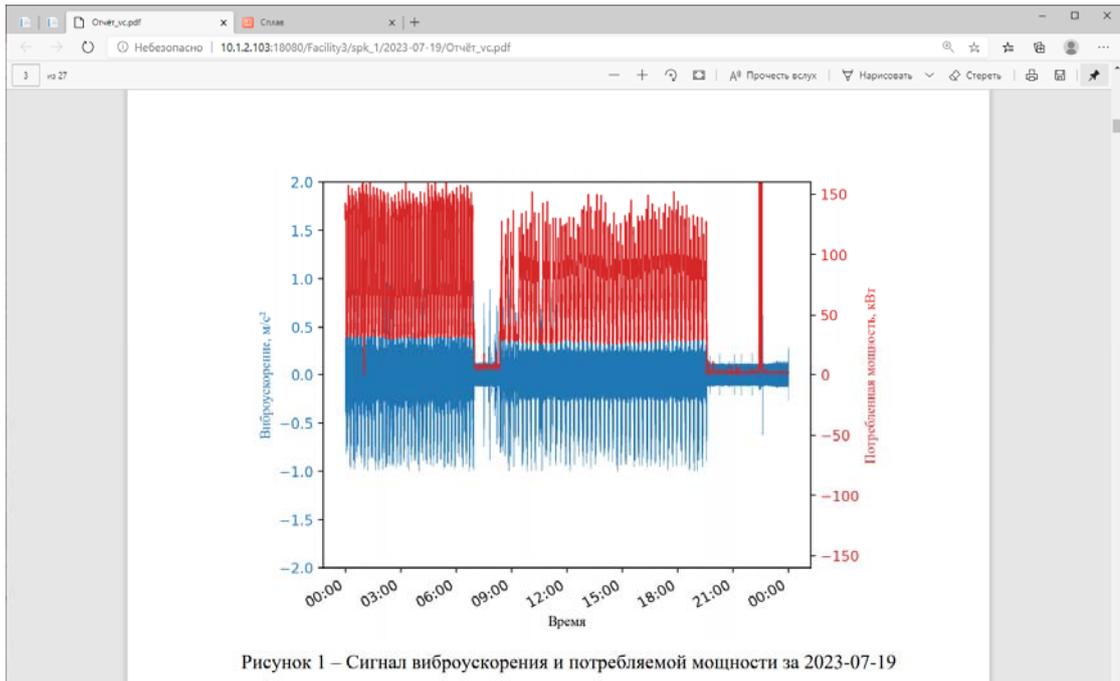


Рисунок 4.14 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности за сутки

Далее в каждом отчете представлена подробная информация о протекании технологического процесса и уровне энергопотребления за каждый час или полчаса (в зависимости от типа оборудования). Данная информация позволяет оценить количество, номенклатуру деталей и соблюдение технологической дисциплины (рисунок 4.15).

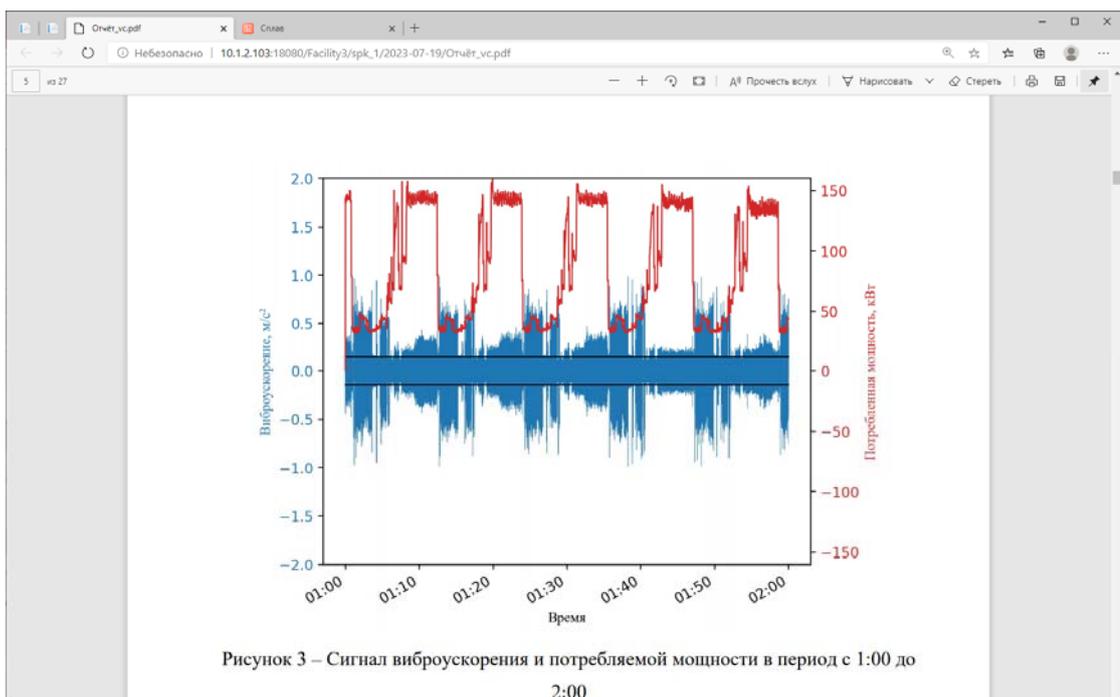


Рисунок 4.15 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности за час

#### 4.2.2 Ежедневные отчеты

Еженедельный отчет содержит схематичное отображение информации о ритмичности и загрузке оборудования с указанием наименования оборудования, даты отчета и номера диагностического модуля (рисунок 4.16 и рисунок 4.17).

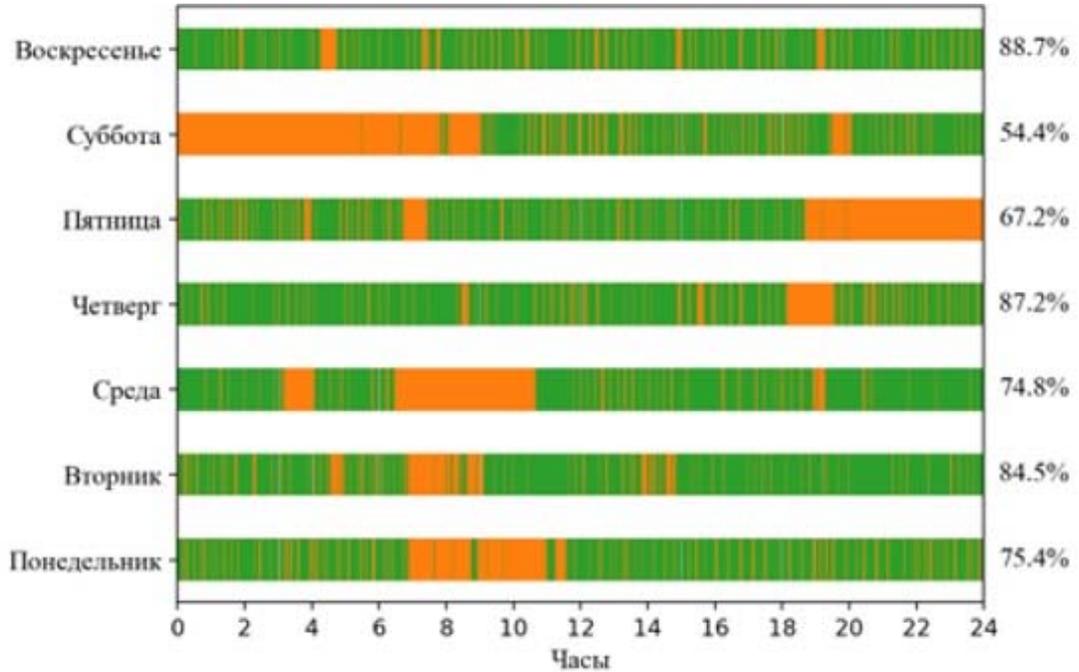


Рисунок 4.16 – Вид еженедельного отчета о работе станка

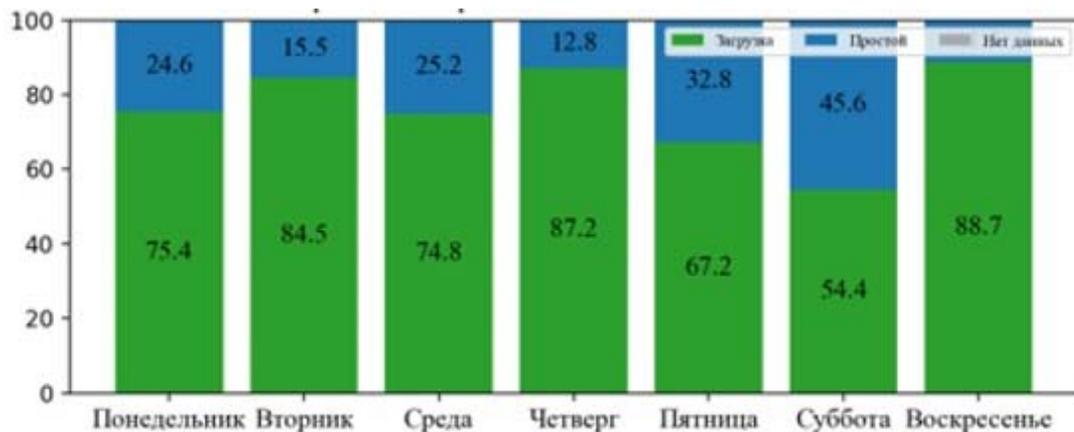


Рисунок 4.17 – График загрузки оборудования за неделю

Анализ недельных отчетов позволяет отслеживать протекающие процессы системно. Так весьма наглядно можно оценить периодичность простоев и работы оборудования.

Если ИИС потеряно более 10 % сигнала в сутки, то формируется сообщение – НДД (нет достоверных данных), такой случай описан далее и в представленном примере связан с проведением ремонтных работ на линии энергоснабжения цеха.

### 4.2.3 Ежемесячные отчеты

Ежемесячный отчет содержит схематичное отображение информации о ритмичности и загрузке оборудования, с указанием наименования оборудования и суточного процента загрузки за календарный месяц (рисунок 4.18).



Рисунок 4.18– Статистические данные о работе оборудования за месяц

#### 4.2.4 Сводный отчет

Сводные статистические данные о работе подключенного к ИИС оборудования формируются в отчет в формате Excel (рисунок 4.19), который содержит:

- данные о загрузке с отображением суточной загрузки оборудования с привязкой к дате и оборудованию;
- энергопотребление, то есть отображение суточного энергопотребления оборудования с привязкой к дате и оборудованию;
- среднее за период, то есть информацию о средней загрузке за весь период наблюдения;
- информацию о наименованиях подключенного оборудования, инвентарных номерах и местах расположения.

Сводный отчет относится к отчетности верхнего уровня (для генерального директора и его профильных замов) и позволяет оценить эффективность использования технологических систем за продолжительный период наблюдения или с даты подключения оборудования к ИИС:

- данные о загрузке. Отображение суточной загрузки оборудования с привязкой к дате.
- энергопотребление. Отображение суточного энергопотребления с привязкой к дате.
- среднее за период. Информация о средней загрузке за весь период наблюдения.
- наименование. Информация о наименовании подключенного оборудования, инвентарных номерах и местах расположение.



Рисунки 4.19 – Общий вид сводного отчета (Статистическая отчетность)

#### 4.2.5 Метод контроля технологической дисциплины

При выполнении производственного плана стадии обработки повторяются при каждом выполнении сменно-суточного задания. Поэтому контроль технологической дисциплины целесообразно осуществлять по циклу развития DMAIC (define, measure, analyze, improve, control – определение, измерение, анализ, совершенствование, контроль) (рисунок 4.20) [219, 220].

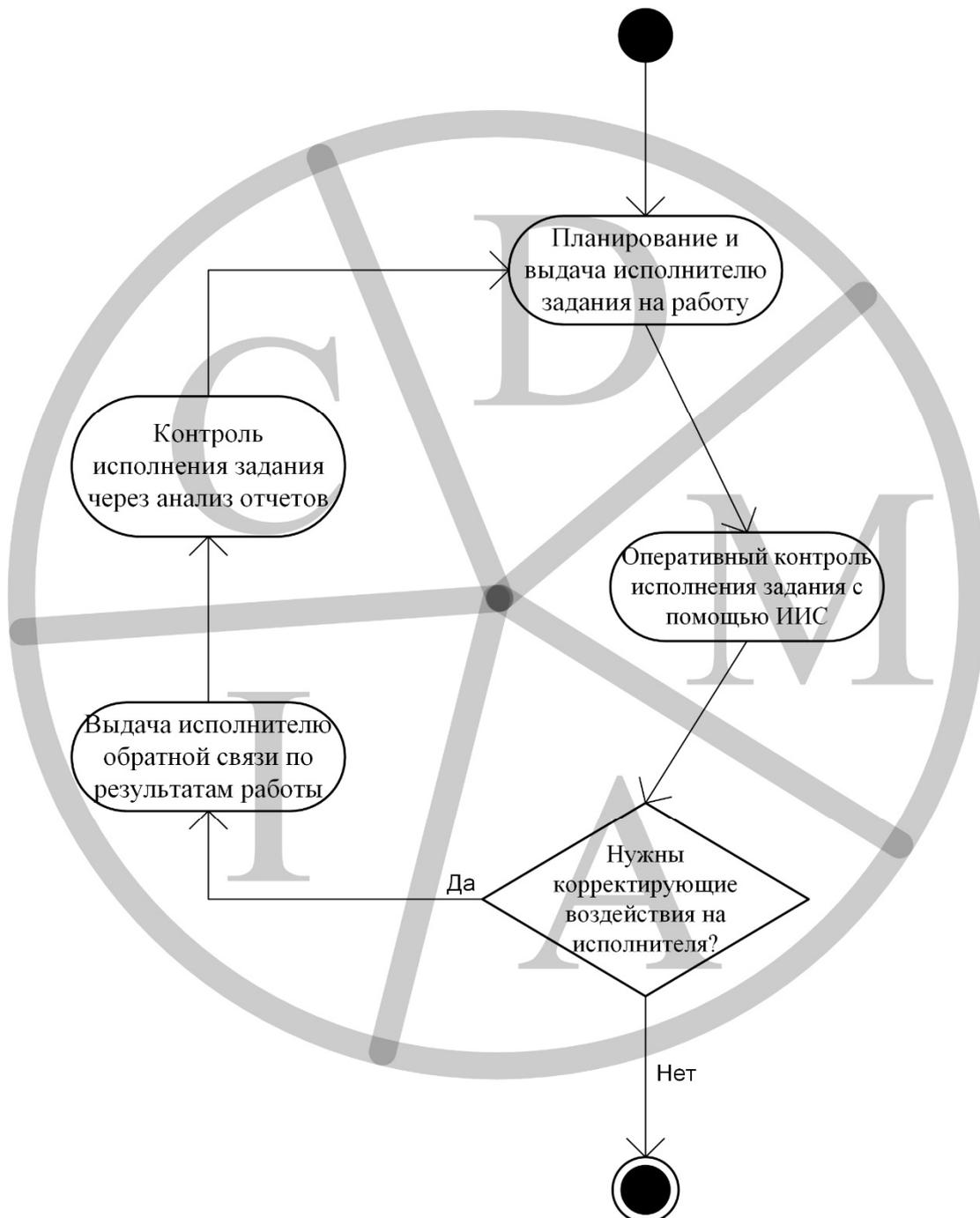


Рисунок 4.20 – Метод контроля технологической дисциплины

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

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

#### **4.3 Разработка метода анализа информационного сигнала на основе искусственных нейронных сетей**

Для повышения эффективности и оперативности принятия корректных управленческих решений предлагается автоматизировать анализ отчетов с использованием технологий машинного обучения и искусственного интеллекта [221].

Для обработки временных рядов уровня вибрации и потребляемого тока, которые являются исходными данными для построения отчетов, использована рекуррентная нейронная сеть (RNN). Рекуррентные нейронные сети (англ. recurrent neural network) – вид нейронных сетей, где связи между элементами образуют направленную последовательность. Благодаря этому появляется возможность обрабатывать серии событий во времени или последовательные пространственные цепочки. В отличие от многослойных перцептронов, рекуррентные сети могут использовать свою внутреннюю память для обработки последовательностей произвольной длины. Поэтому сети RNN применимы в таких задачах, где что-то целостное разбивается на части.

Было предложено много различных архитектурных решений для рекуррентных сетей от простых до сложных. В работе принято решение использовать сеть с долговременной и кратковременной памятью (LSTM) и управляемый рекуррентный блок (GRU).

Сеть с долговременной и кратковременной памятью (англ. Long short term memory) представляет собой систему глубинного обучения, при реализации которой удалось обойти проблему исчезновения или зашкаливания градиентов в процессе обучения методом обратного распространения ошибки. Для модернизации сети LSTM используются рекуррентные вентили, которые называются вентили (gates) «забывания». Ошибки распространяются назад по времени через потенциально неограниченное количество виртуальных слоев. Таким образом, происходит обучение в LSTM, при этом сохраняется память о тысячах и даже миллионах временных интервалов в прошлом, при этом топологии сетей типа LSTM могут развиваться в соответствии со спецификой процесса. Сеть LSTM позволила учесть даже большие задержки между значимыми событиями, тем самым высокочастотные и низкочастотные компоненты могут смешиваться.

Из временного ряда сигнала вибрации по каждой из осей выбираются максимальные и минимальные значения. Максимальные значения и отдельно минимальные значения подвергаются медианной фильтрации с шириной окна фильтра в 101 секунду с целью удаления выбросов. Затем для каждого временного интервала вычисляется размах путем вычитания минимального значения из максимального, что позволяет компенсировать температурный дрейф показаний МЭМС-акселерометра. Далее вычисляется евклидова норма значений трех осей. Пример данных после такой обработки приведен на рисунке 4.21.

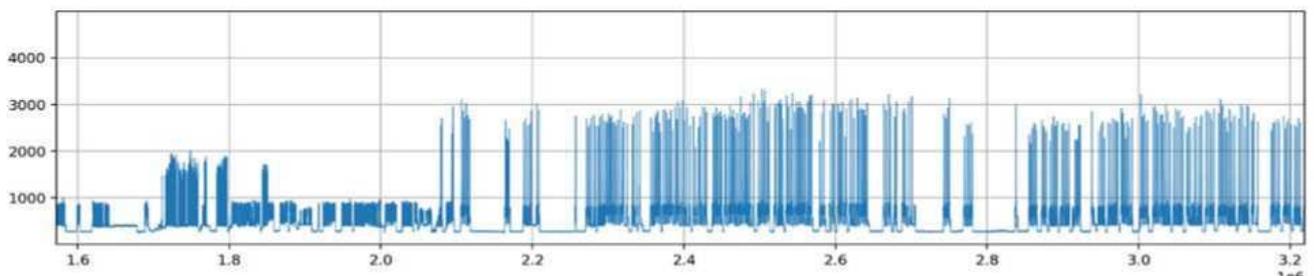


Рисунок 4.21 – Фрагмент исходных данных после предварительной обработки

Далее к данным применяется оконное дискретно-временное преобразование Фурье. В соответствии с общим спектром данных ширина окна преобразования выбрана 2 048 секунд, смещение окон составляет 512 секунд.

При преобразовании применяется весовая функция Хэмминга. Спектр собираемых данных ограничен, в связи с чем берутся лишь 256 отсчетов спектра. Далее амплитудные спектры представляются в логарифмической шкале. В результате исходный сигнал на основе имеющихся данных имеет 18 808 131 отсчетов, а его спектральное представление для обучения – 36 731x256 отсчетов.

Для автоматической классификации обработанных деталей использована сверточная нейронная сеть (CNN). Сверточная нейронная сеть – специальная архитектура искусственных нейронных сетей, нацеленная на эффективное распознавание образов, входит в состав технологий глубокого обучения (англ. deep learning).

Стоит отметить, что идея сверточных нейронных сетей заключается в чередовании сверточных слоев (англ. convolution layers) и субдискретизирующих слоев (англ. subsampling layers или англ. pooling layers, слоев подвыборки). Структура сети – однонаправленная (без обратных связей), принципиально многослойная. Для обучения используются стандартные методы, чаще всего метод обратного распространения ошибки.

В обычном перцептроне, который представляет собой полносвязную нейронную сеть, каждый нейрон связан со всеми нейронами предыдущего слоя, причем каждая связь имеет свой персональный весовой коэффициент. В сверточной нейронной сети в операции свертки используется лишь ограниченная матрица весов небольшого размера, которую «двигают» по всему обрабатываемому слою (в самом начале – непосредственно по входному изображению), формируя после каждого сдвига сигнал активации для нейрона следующего слоя с аналогичной позицией. Таким образом, для различных нейронов выходного слоя используются одна и та же матрица весов, которую также называют ядром свертки. Ее интерпретируют как графическое кодирование какого-либо признака, например, наличие наклонной линии под определенным углом. Тогда следующий слой, получившийся в резуль-

тате операции свертки такой матрицей весов, показывает наличие данного признака в обрабатываемом слое и ее координаты, формируя так называемую карту признаков (англ. feature map). Естественно, в сверточной нейронной сети набор весов не один, а целая гамма, кодирующая элементы изображения (например, линии и дуги под разными углами). При этом такие ядра свертки не закладываются исследователем заранее, а формируются самостоятельно путем обучения сети классическим методом обратного распространения ошибки. Проход каждым набором весов формирует свой собственный экземпляр карты признаков, делая нейронную сеть многоканальной (много независимых карт признаков на одном слое). Также следует отметить, что при переборе слоя матрицей весов ее передвигают обычно не на полный шаг (размер этой матрицы), а на небольшое расстояние. Так, например, при размерности матрицы весов  $5 \times 5$  ее сдвигают на один или два нейрона (пикселя) вместо пяти, чтобы не «перешагнуть» искомый признак.

Операция субдискретизации (англ. subsampling, англ. pooling, также переводимая как «операция подвыборки», или операция объединения), выполняет уменьшение размерности сформированных карт признаков. В данной архитектуре сети считается, что информация о факте наличия искомого признака важнее точного знания его координат, поэтому из нескольких соседних нейронов карты признаков выбирается максимальный и принимается за один нейрон уплотненной карты признаков меньшей размерности. За счет данной операции, помимо ускорения дальнейших вычислений, сеть становится более инвариантной к масштабу входного изображения.

Для построения нейронных сетей использована библиотека TensorFlow – открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google для решения задач построения и тренировки нейронной сети с целью автоматического нахождения и классификации образов, достигая качества человеческого восприятия. Основной API для работы с библиотекой реализован для Python, также существуют реализации для C++. TensorFlow является системой машинного обучения Google Brain второго поколения. В то время как эталонная реализация работает на единичных устройствах, TensorFlow может работать на многих параллельных процессорах, как CPU, так и GPU, опираясь на архитектуру CUDA

для поддержки вычислений общего назначения на графических процессорах.

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

Обучение с учителем (supervised learning) – наиболее распространенный способ обучения. Каждый прецедент представляет собой пару «объект, ответ». Требуется найти функциональную зависимость ответов от описаний объектов и построить алгоритм, принимающий на входе описание объекта и выдающий на выходе ответ. Функционал качества обычно определяется как средняя ошибка ответов, выданных алгоритмом, по всем объектам выборки.

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) [222]. Метод занимает одно из ведущих мест по точности среди методов кластеризации и основан на последовательных этапах погружения исходных данных в пространство меньшей размерности при помощи глубокого автокодировщика и кластеризации путем минимизации расстояния Кульбака-Лейблера между распределением данных и вспомогательным распределением относительно центров кластеров. Структура применяемой нейронной сети приведена на рисунке 4.22. Размеры слоев сети автокодировщика  $d - 500-500-2000-10$ .

Кластерным (групповым) называется разновидность случайного сэмплинга, который используется, если в исходной совокупности можно выделить некоторые группы.

Из кластеров производится простая случайная выборка. При этом должны выполняться следующие условия:

- вероятность извлечения объекта одинакова для всех кластеров;
- кластеры являются взаимоисключающими (каждый объект может принадлежать только одному кластеру);

– кластеры являются исчерпывающими, т. е. должны покрывать весь набор исходных данных (все объекты должны быть распределены в кластеры).

Одноэтапный или простой кластерный сэмплинг формирует кластеры и извлекает из них случайным образом требуемое количество объектов (фиксированное, или пропорциональное размеру кластера).

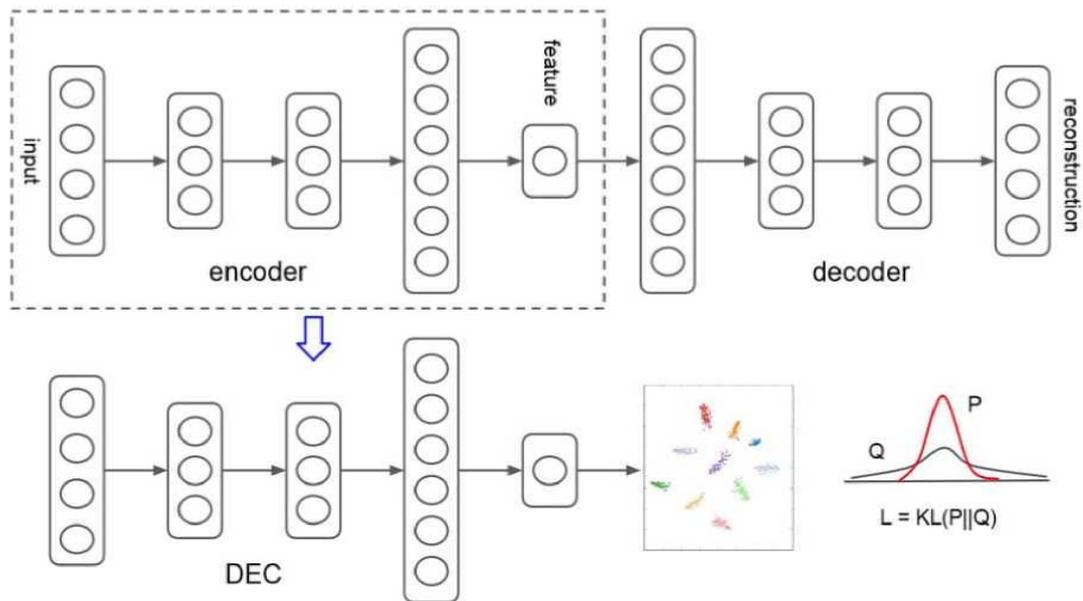


Рисунок 4.22 – Структура нейронной сети

Метод последовательного сэмплинга заключается в том, что объекты в выборке содержатся в той же последовательности (прямой или обратной), что и в исходной совокупности. Для этого задается число объектов, подлежащих отбору, и положение объекта, с которого следует начать отбор.

Последовательный сэмплинг применяется в случаях, когда последовательность объектов имеет значение для решаемой задачи анализа, поскольку сохраняет ее в выборке. Например, при анализе временных рядов, когда в выборку нужно отобрать заданное количество последовательных элементов ряда.

Преимуществом метода является простота реализации, а недостатком – отсутствие репрезентативности выборки.

Применяемый алгоритм кластеризации дает степень принадлежности фрагмента данных к кластеру, рассматривая каждый фрагмент отдельно от остальных.

Для уточнения кластеризации с использованием информации о взаимном расположении фрагментов использованы принципы распознавания образов в массивах взаимосвязанных данных [223].

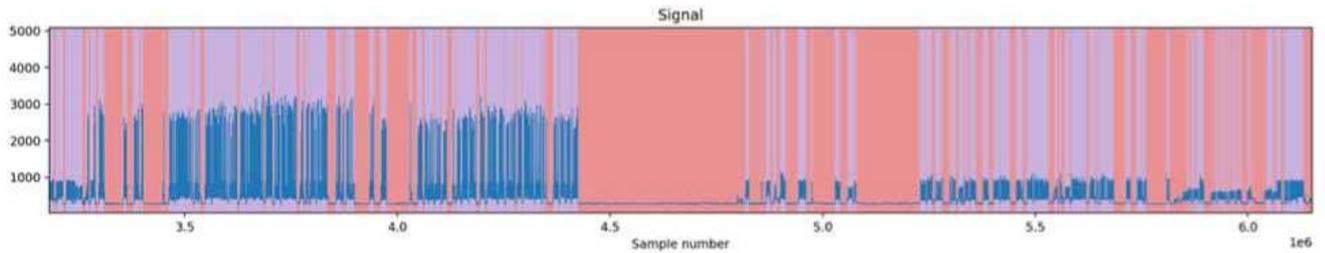


Рисунок 4.23 – Результаты кластеризации данных на фрагменты, соответствующие простоя и работе оборудования

В результате кластеризации на два класса, соответствующих простоя оборудования и его работе, к простоям были отнесены 14 168 фрагментов сигнала, а к работе оборудования – 22 563 фрагментов.

Результат кластеризации для фрагмента данных показан на рисунке 4.23.

Визуализация кластеризации на плоскости при помощи метода Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) [224] приведена на рисунке 4.24.

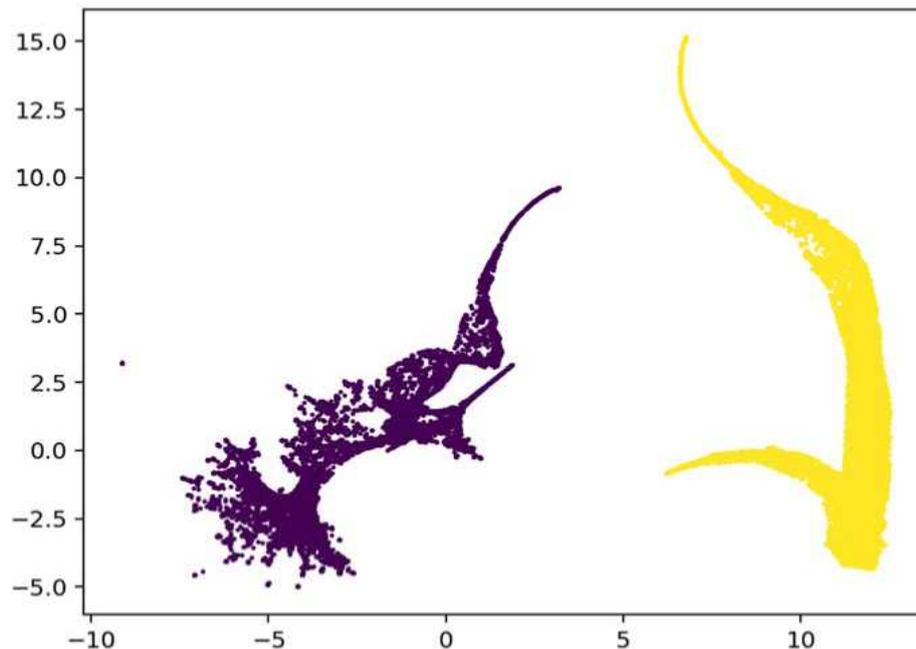


Рисунок 4.24 – Визуализация кластеризации данных методом UMAP

Полученные классы работы оборудования перебираются с применением вероятностной модели положения отдельных элементов с коэффициентом вероятности принадлежности 90 % для объединения классов малых длин, которые не могут быть сигналами полной обработки детали.

Предложенная нейронная сеть показала хороший результат для единичной сегментации данных на тестовой последовательности длиной в один процесс. Разделение на два класса позволяет отделить элементы обработки изделия от простоя.

На следующем этапе использована нейросетевая классификация этапов обработки внутри класса с использованием информации о количестве этапов обработки изделия (технологическом процессе). С использованием возможных этапов обработки составляется 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. Пример финального этапа анализа временного ряда представлен на рисунке 4.25.

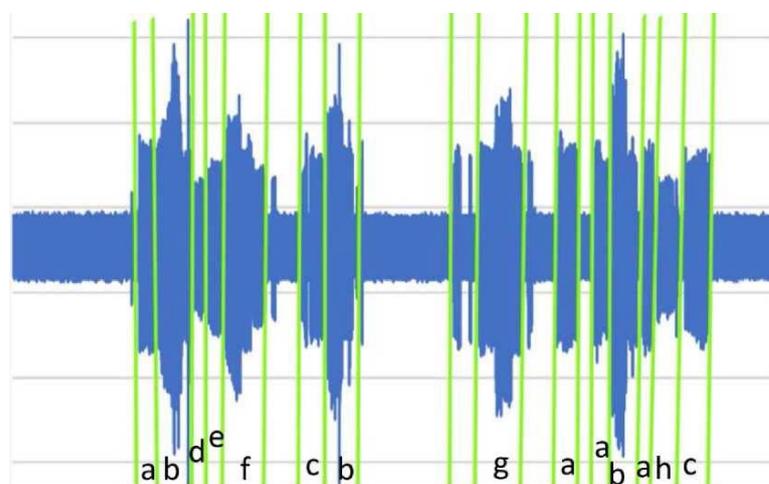


Рисунок 4.25 – Пример финального этапа анализа временного ряда с использованием нейронной сети

Далее на рисунке 4.26 представлены фрагменты отчета, который сгенерирован с использованием обученной искусственной нейронной сети. В отчет добавлен раздел с информацией о номенклатуре изготовленных деталей и времени их изго-

товления (рисунок 4.26, а). На графиках появился контур обводки сигнала, указывающий, что нейросеть посчитала исследуемую деталь соответствующей технологическому процессу изготовления и внесла в раздел «Обработанные детали» (рисунок 4.26, б).

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

Полученные ИИС данные описывают различные аспекты состояния технологических систем и протекания технологического процесса, что является цифровым двойником технологического процесса [225].

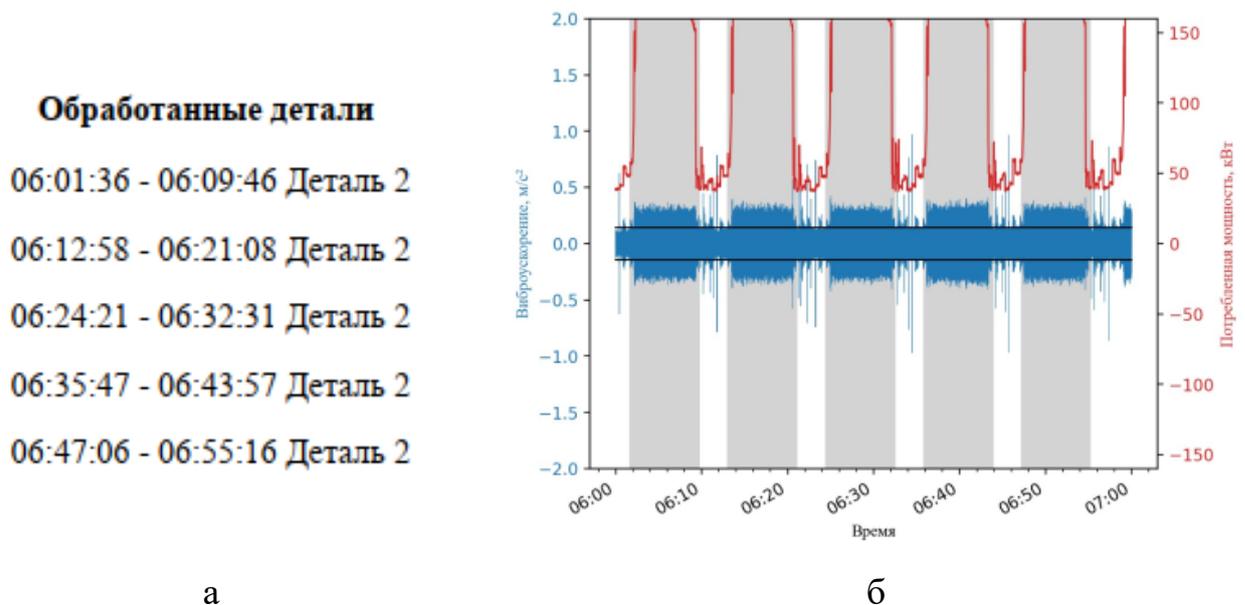


Рисунок 4.26 – Фрагмент отчета о работе оборудования:

а – информация о загрузке;

б – информация о номенклатуре изготовленных деталей

Предложенный метод и разработанная ИИС позволяет в режиме реального времени обеспечить оперативный автоматизированный контроль состояния технологических систем, а применение ИНС позволило повысить скорость анализа отчетов о работе технологических систем на 91,4 %

#### 4.4 Модель прогнозирующей модели работы системы предиктивной аналитики

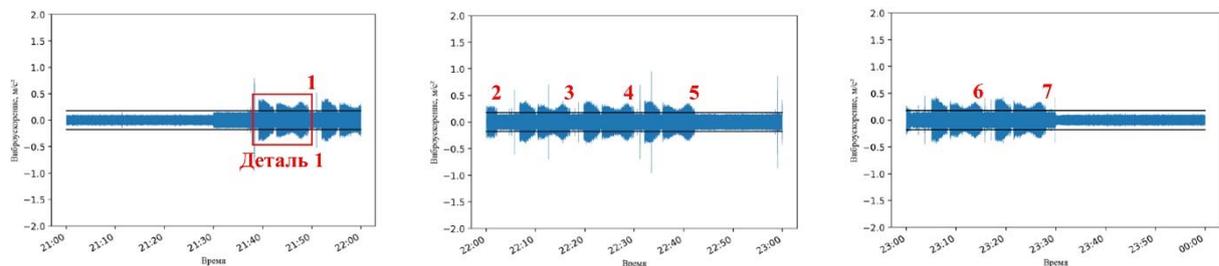
С помощью разработанной ИИС обеспечивается сбор сложноорганизованных данных о протекании технологических процессов машиностроительных производств. Полученные данные описывают различные аспекты состояния технологического оборудования и протекания технологического процесса и используются для создания цифрового двойника технологического процесса. С использованием цифрового двойника технологического процесса производится сбор статистических данных о протекании технологических процессов, соблюдения технологической дисциплины.

На рисунке 4.27, а представлен фрагмент сменно-суточного задания, в котором указано, что рабочий в период с 21:30 до 00:30 должен изготовить 7 деталей номер 1 с затратой 14 минут на каждую. Анализ записанных сигналов вибрации за соответствующий промежуток времени, приведенных на рисунке 4.27, б, показал, что сменно-суточное задание было выполнено полностью.

Случай с обнаружением несоблюдения технологической дисциплины представлен на рисунке 4.28.

Исполнитель задания	Класс операции	Плановое время на од.	Плановое начало	Плановое окончание	Факт начало	Факт окончание	Факт клас-ов	Результат		Примеч.
								срочно	планово	
Мухомедов			16:00	17:30	16:00	17:30				
отсутствует зрёт			17:30	21:30	17:30	21:30				
<b>Деталь 1</b>	7	14	21:30	00:30	21:30	00:30	7			

а



б

Рисунок 4.27 – Пример контроля соблюдения технологической дисциплины:

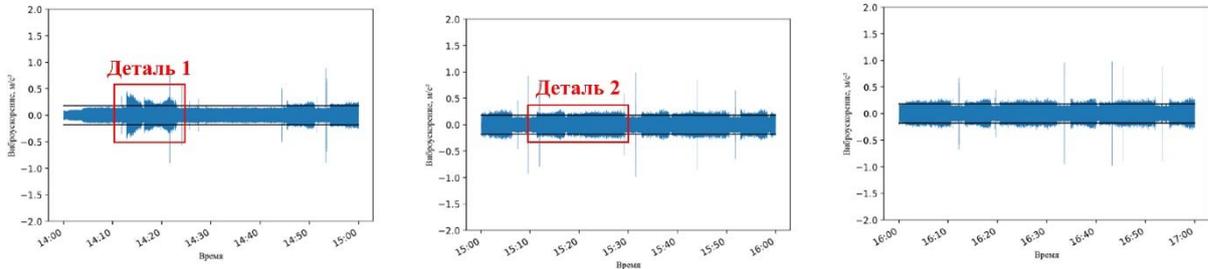
а – фрагмент сменно-суточного задания;

б – сигнал вибрации оборудования за указанный период

2 смена

Наименование изделия	Кол-во плановое	Плановое время на ед.	Плановое начало	Плановое окончание	Факт начало	Факт окончание	Факт кол-во	Разница		Причины
								время	штук	
Деталь 2	16	22	14-00	20-30	14-00	20-30	15			Замедл. работы

а



б

Рисунок 4.28 – Пример несоблюдения технологической дисциплины:

а – фрагмент сменно-суточного задания;

б – сигнал вибрации оборудования за указанный период

На рисунке 4.28, а представлен фрагмент сменно-суточного задания, в котором указано, что рабочий в период с 14:00 до 20:30 должен изготовить 16 деталей номер 2 с затратой 22 минут на каждую. Анализ записанных сигналов вибрации за соответствующий промежуток времени, приведенных на рисунке 4.28, б, показал, что перед выполнением сменно-суточного задания была обработана одна единица детали 1.

Как видно из приведенных примеров, на основе интеллектуального анализа с использованием искусственных нейронных сетей возможна классификация выполняемых технологических процессов, по результатам которой возможен анализ состояния технологического оборудования. На рисунке 4.29 приведены записи сигнала вибрации, на которых видно изменение амплитуды вибрационного сигнала по мере изнашивания инструмента с последующим его выходом из строя, из-за чего фактическое количество обработанных деталей оказалось меньше запланированного (см. рисунок 4.28, а).

Таким образом, 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 4.30).

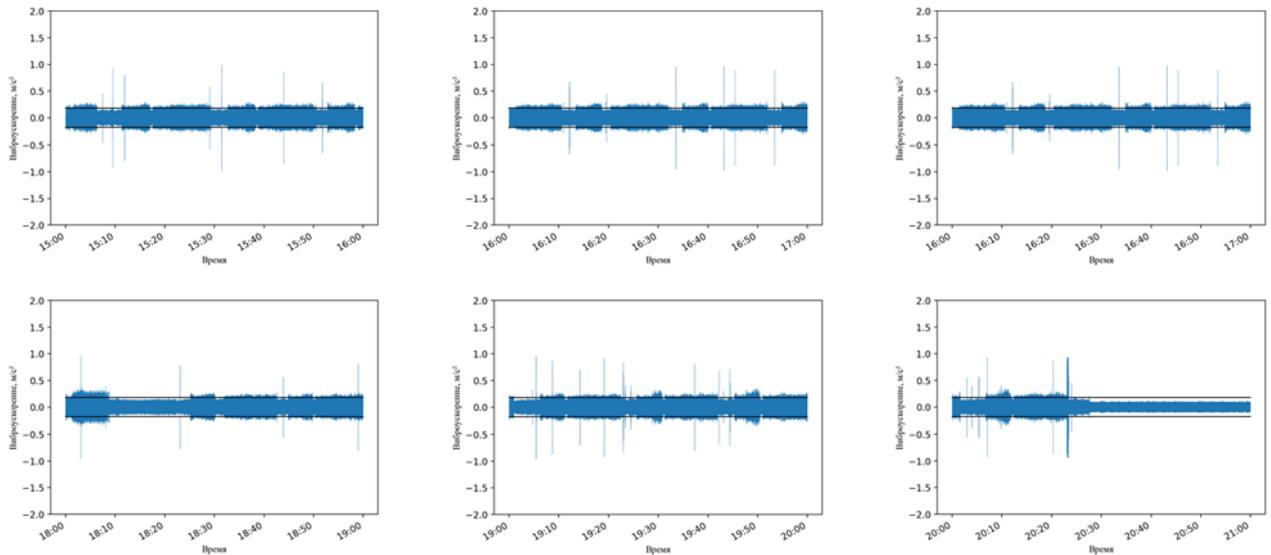


Рисунок 4.29 – Пример изменения сигнала вибрации по мере изнашивания инструмента

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

$$u_t = \frac{Y_{st}}{Y_{s0}}, \text{ где } Y_{st} = \frac{\sum_{i=1}^k Y_{it}}{k} \text{ – средняя по каждой обработанной детали } t \text{ для всех } k$$

$$\text{инструментов, } Y_{s0} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{t=1}^p Y_{it}}{kp} \text{ – общая средняя по всем инструментам (} k \text{) и об-}$$

работанным деталям ( $p$ ),  $Y_{it}$  – значение временного ряда для обработанной детали  $t$  и для текущего инструмента  $i$ .

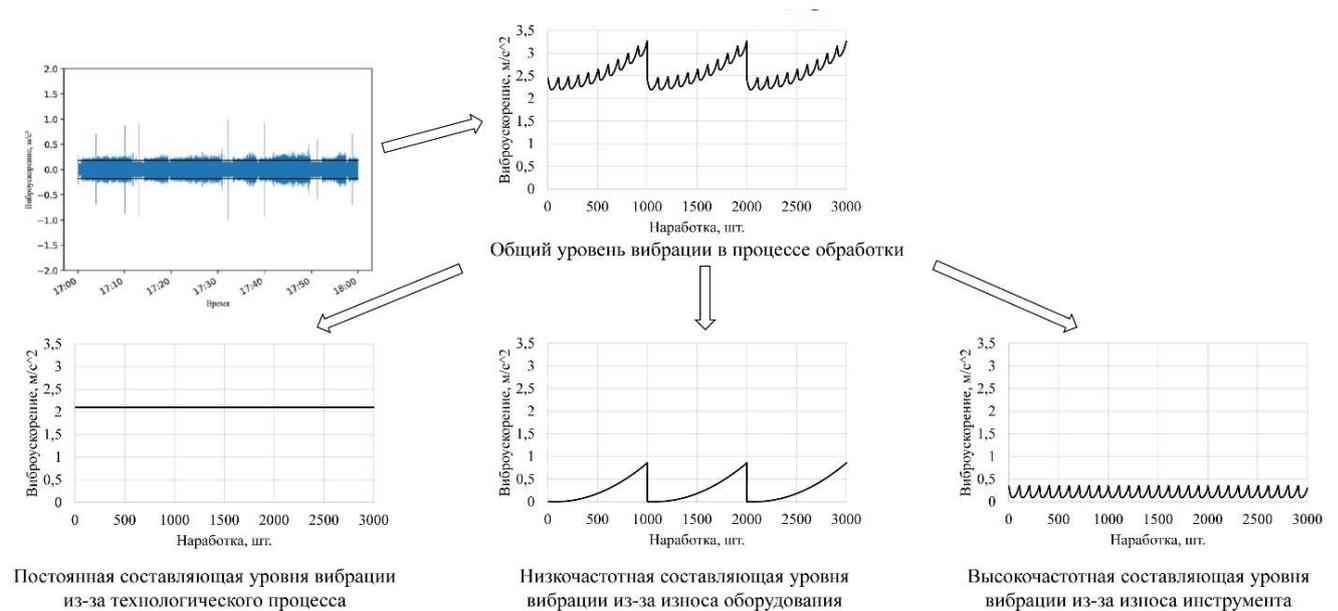


Рисунок 4.30 – Прогнозирующая модель системы предиктивной аналитики

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  $y_i - T(t)$  для каждого инструмента, а постоянная составляющая считается как остаток:  $R(t) = y_i - S(t) - T(t)$ .

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.

#### 4.5 Выводы

Разработаны методы построения и анализа отчетов о работе технологических систем на основе методов и средств обеспечения оперативного контроля, сбора и обработки информации о технологических процессах по уровню вибрации в процессе обработки, что позволило оперативно осуществлять контроль за технологическими системами и своевременно принимать рациональные управленческие решения.

Представлены примеры построения отчетов различного уровня: суточные, недельные, месячные.

В разработанной ИИС реализована возможность классификации выполняемых технологических процессов и анализа состояния технологических систем.

Разработана модель предиктивной аналитики состояния технологической системы, позволяющая выделить из собираемых разработанной ИИС данных постоянную составляющую, характеризующую параметры технологического процесса,

высокочастотную составляющую, характеризующую состояние быстро изнашиваемой оснастки (инструмента), и низкочастотную составляющую, характеризующую изменение состояния оборудования.

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.

## 5 МЕТОД НАЗНАЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОЙ ИИС

Назначение режимов обработки влияет на эффективность работы технологических систем путем:

- повышения качества обработки – достижения более точной обработки с меньшей шероховатостью детали и минимальным количеством дефектов;
- увеличения производительности – выполнения операций быстрее без ущерба для качества, что приводит к экономии времени и ресурсов;
- увеличения срока службы инструментам – увеличения периода стойкости инструмента, что в конечном итоге снижает затраты на его обслуживание и замену.
- экономии материалов – сокращения потерь за счет уменьшения брака;
- повышения безопасности операторов и окружающих – снижения риска образования опасной стружки, поломки инструмента или повреждения оборудования.

В настоящее время известно много работ, посвященных назначению рациональных режимов обработки. В диссертационной работе [226] была 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:

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

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  $\delta_a$ , наработка режущего инструмента до разрушения  $r$  и вариабельность наработки режущего инструмента до разрушения  $\beta$ . 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 [194, 227, 228, 229], рассмотренную в предыдущих разделах.

Для оценки износа режущего инструмента предлагается использовать методику определения стадии износа инструмента с применением вибропаспорта системы СПИЗ на основе модели Кэптейна, предложенной в работе [230].

В качестве примера рассмотрена деталь «Корпус», представляющая собой тонкостенную трубу. Типовой технологический процесс изготовления указанной детали состоит из 7 операций, в том числе черновая и чистовая расточки, точение канавки и нарезание резьбы [231].

### 5.1 Описание примера технологического процесса

В ходе проведения исследования были изучены токарные операции технологического процесса изготовления деталей «Корпус», тип 1 и «Корпус», тип 2. Исследуемые операции перечислены в таблице 5.1. Указанные операции выполняются для обоих концов обрабатываемых заготовок.

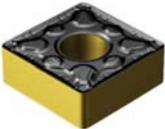
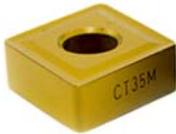
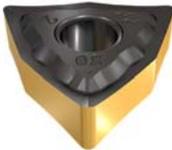
Операции 1–3 из таблицы 5.1 выполняются на универсальных токарных станках, операция 4 – на токарных станках с ЧПУ модели ТМ-39М.

Перечень используемого на указанных операциях режущего инструмента приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.1 – Перечень исследованных операций

№ операции	Содержание операции
1	Черновое наружное точение
2	Черновое внутреннее растачивание
3	Чистовое наружное точение
4	Токарная операция с ЧПУ, включающая: подрезку торца, черновое внутреннее растачивание, чистовое внутреннее растачивание, точение внутренней канавки, нарезание упорной резьбы

Таблица 5.2 – Используемый режущий инструмент

Наименование резца	Наименование пластины	Внешний вид пластины
SANDVIK PSDNN 2020 K12	SNMG 120404 TF	
DCKNL 2020K 12	CNMG 120408-49 CT35M	
A32S-DWLNR08PP	WNMG 080404-PP	
SCAR GHIR 32-6	HFPL 5006 IC20	
MMTIR 3732 AS16-C	3IRBUT168/026VTX	

Контроль вибрации осуществлялся с помощью разработанной и рассмотренной в диссертационной работе ИИС.

## 5.2 Исследование технологического процесса обработки детали «Корпус», тип 1

Общие результаты исследований технологического процесса обработки детали «Корпус», тип 1 на нормативных режимах резания приведены в таблице 5.3.

Фотографии задней поверхности сменных твердосплавных пластин в конце обработки партии деталей в количестве 60 шт. приведены на рисунке 5.1.

Таблица 5.3 – Общие результаты исследований обработки детали «Корпус» тип 1

Наименование резца	Наименование пластины	Режимы обработки	Величина износа	Уровень вибрации
SANDVIK PSDNN 2020 K12	SNMG 120404 TF	Частота вращения 250 мин <sup>-1</sup> , подача 0,15 мм/об, глубина резания 0,6 мм	0 мм / 0,08 мм	Ось X: 9,29 g / 10,74 g Ось Y: 0,69 g / 1,91 g Ось Z: 12,9 g / 14,58 g
DCKNL 2020K 12	CNMG 120408-49 CT35M	Частота вращения 250 мин <sup>-1</sup> , подача 0,15 мм/об, глубина резания 1,25 мм	0 мм / 0,07 мм	Ось X: 6,02 g / 6,51 g Ось Y: 1,04 g / 1,35 g Ось Z: 5,05 g / 7,87 g
SANDVIK PSDNN 2020 K12	SNMG 120404 TF	Частота вращения 630 мин <sup>-1</sup> , подача 0,15 мм/об, глубина резания 0,35 мм	0 мм / 0,07 мм	Ось X: 13,11 g / 15,46 g Ось Y: 0,87 g / 1,16 g Ось Z: 12,40 g / 15,12 g

Продолжение таблицы 6.3

Наименование резца	Наименование пластины	Режимы обработки	Величина износа	Уровень вибрации
SANDVIK PSDNN 2020 K12	SNMG 120404 TF	Частота вращения 200 мин <sup>-1</sup> , подача 20 м/мин, глубина резания 0,56 мм	0 мм / 0,14 мм	Ось X: 4,90 g / 5,17 g Ось Y: 0,68 g / 0,80 g Ось Z: 8,97 g / 8,61 g
A32S- DWLNR08PP	WNMG 080404-PP	Частота вращения 200 мин <sup>-1</sup> , подача 20 м/мин, гл- бина резания 0,15 мм	0 мм / 0,06 мм	Ось X: 5,54 g / 5,93 g Ось Y: 0,65 g / 0,86 g Ось Z: 9,23 g / 9,48 g
ISCAR GHIR 32-6	HFPL 5006 IC20	Частота вращения 150 мин <sup>-1</sup> , подача 7 м/мин	0 мм / 0,07 мм	Ось X: 1,85 g / 2,17 g Ось Y: 0,30 g / 0,35 g Ось Z: 1,04 g / 1,41 g
MMTIR 3732 AS16-C	3IRBUT168/ 026VTX	Частота вращения 150 мин <sup>-1</sup> , подача 200 м/мин, глубина резания 0,1 мм	0 мм / 0,04 мм	Ось X: 2,41 g / 2,79 g Ось Y: 0,32 g / 0,43 g Ось Z: 2,35 g / 2,48 g

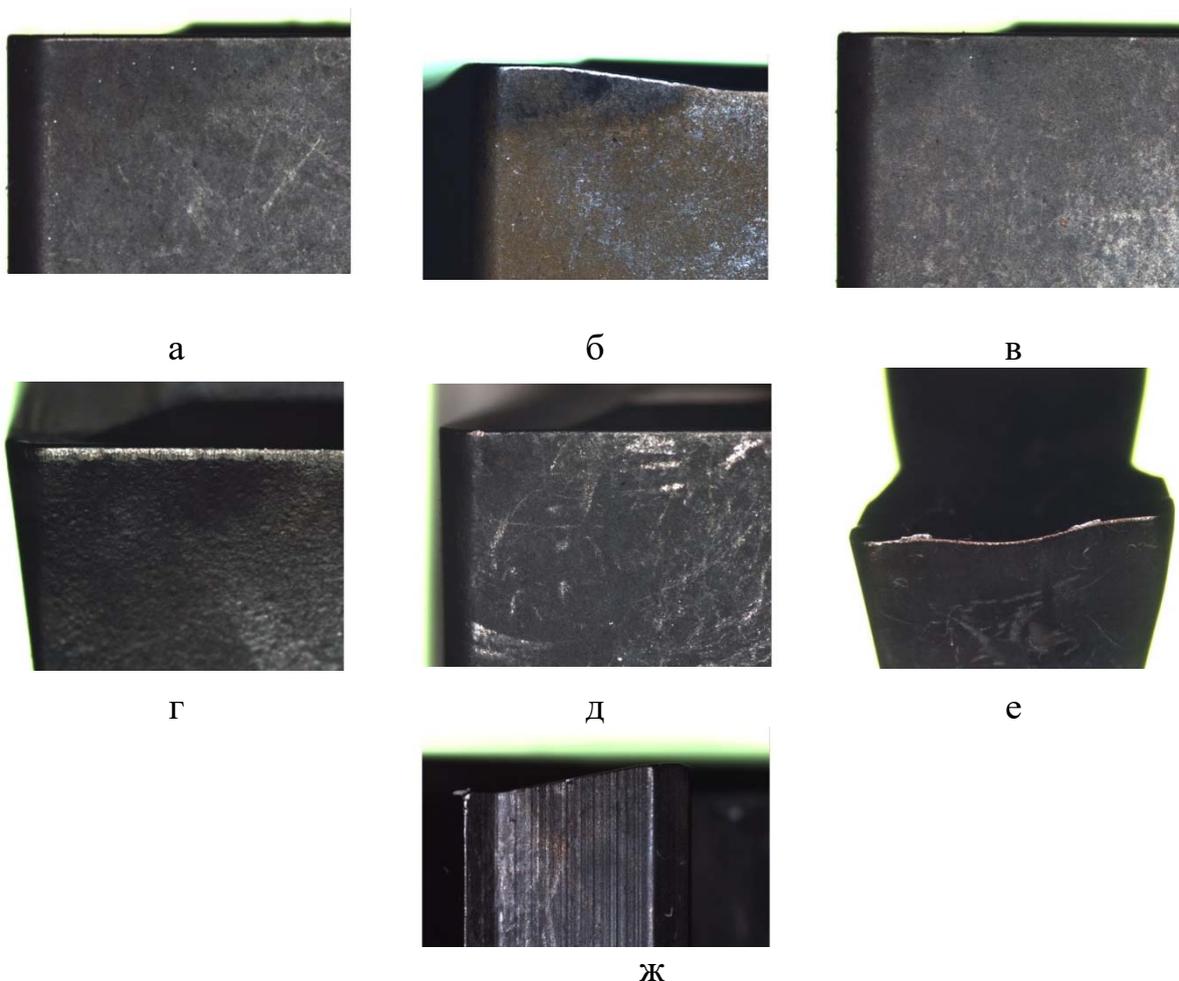


Рисунок 5.1 – Фотографии пластин:

- а – твердосплавная пластина для черного наружного точения;
- б – твердосплавная пластина для черного внутреннего растачивания;
- в – твердосплавная пластина для чистового наружного точения;
- г – твердосплавная пластина для черного внутреннего растачивания на станке с ЧПУ;
- д – твердосплавная пластина для чистового внутреннего растачивания на станке с ЧПУ;
- е – твердосплавная пластина для точения канавки на станке с ЧПУ;
- ж – твердосплавная пластина для нарезания резьбы на станке с ЧПУ

### 5.3 Исследование технологического процесса обработки детали «Корпус», тип 2

Общие результаты исследований технологического процесса обработки детали «Корпус», тип 2 приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Общие результаты исследований обработки детали «Корпус», тип 2

Наименование резца	Наименование пластины	Режимы обработки	Величина из- носа	Уровень вибрации
SANDVIK PSDNN 2020 K12	SNMG 120404 TF	Частота враще- ния 250 мин <sup>-1</sup> , подача 0,15 мм/об, глу- бина резания 0,6 мм	0,08 мм / 0,11 мм	Ось X: 7,17 g / 7,76 g Ось Y: 1,87 g / 3,82 g Ось Z: 7,86 g / 8,53 g
DCKNL 2020K 12	CNMG 120408- 49 CT35M	Частота враще- ния 250 мин <sup>-1</sup> , подача 0,15 мм/об, глу- бина резания 1,25 мм	0,07 мм / 0,10 мм	Ось X: 5,43 g / 6,17 g Ось Y: 1,81 g / 2,05 g Ось Z: 7,01 g / 7,44 g
SANDVIK PSDNN 2020 K12	SNMG 120404 TF	Частота враще- ния 630 мин <sup>-1</sup> , подача 0,15 мм/об, глу- бина резания 0,35 мм	0,07 мм / 0,12 мм	Ось X: 7,26 g / 7,30 g Ось Y: 0,19 g / 0,56 g Ось Z: 13,52 g / 14,66 g
SANDVIK PSDNN 2020 K12	SNMG 120404 TF	Частота враще- ния 200 мин <sup>-1</sup> , подача 20 м/мин, глу- бина резания 0,56 мм	0,14 мм / 0,18 мм	Ось X: 4,70 g / 4,88 g Ось Y: 0,91 g / 0,98 g Ось Z: 8,41 g / 8,66 g

Продолжение таблицы 5.4

Наименование резца	Наименование пластины	Режимы обработки	Величина из- носа	Уровень вибрации
A32S- DWLNR08PP	WNMG 080404-PP	Частота враще- ния 200 мин <sup>-1</sup> , подача 20 м/мин, глу- бина резания 0,15 мм	0,06 мм / 0,13 мм	Ось X: 5,35 g / 5,67 g Ось Y: 0,68 g / 0,93 g Ось Z: 9,67 g / 10,16 g
ISCAR GHIR 32-6	HFPL 5006 IC20	Частота враще- ния 150 мин <sup>-1</sup> , подача 7 м/мин	0,07 мм / 0,11 мм	Ось X: 1,80 g / 1,84 g Ось Y: 0,34 g / 0,39 g Ось Z: 1,21 g / 1,23 g
MMTIR 3732 AS16-C	3IRBUT168/ 026VTX	Частота враще- ния 150 мин <sup>-1</sup> , подача 200 м/мин, глу- бина резания 0,1 мм	0,04 мм / 0,09 мм	Ось X: 2,66 g / 2,74 g Ось Y: 0,39 g / 0,44 g Ось Z: 2,64 g / 2,75 g

Фотографии задней поверхности сменных твердосплавных пластин в конце обработки партии деталей в количестве 60 шт. приведены на рисунке 5.2.



а



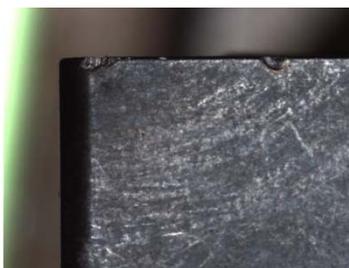
б



в



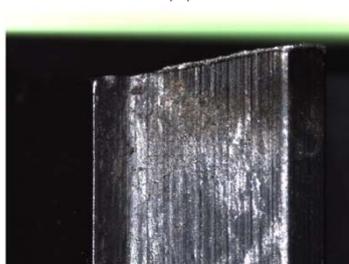
г



д



е



ж

Рисунок 5.2 – Фотографии пластин:

- а – твердосплавная пластина для чернового наружного точения;
- б – твердосплавная пластина для чернового внутреннего растачивания;
- в – твердосплавная пластина для чистового наружного точения;
- г – твердосплавная пластина для чернового внутреннего растачивания на станке с ЧПУ;
- д – твердосплавная пластина для чистового внутреннего растачивания на станке с ЧПУ;
- е – твердосплавная пластина для точения канавки на станке с ЧПУ;
- ж – твердосплавная пластина для нарезания резьбы на станке с ЧПУ

#### 5.4 Оценка зависимости уровня вибрации от режимов резания

С целью определения начального уровня вибрации при обработке деталей «Корпус» на разных режимах резания для формирования вибропаспорта системы СПИЗ, было обработано 60 заготовок детали «Корпус», тип 1, 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 5.3.

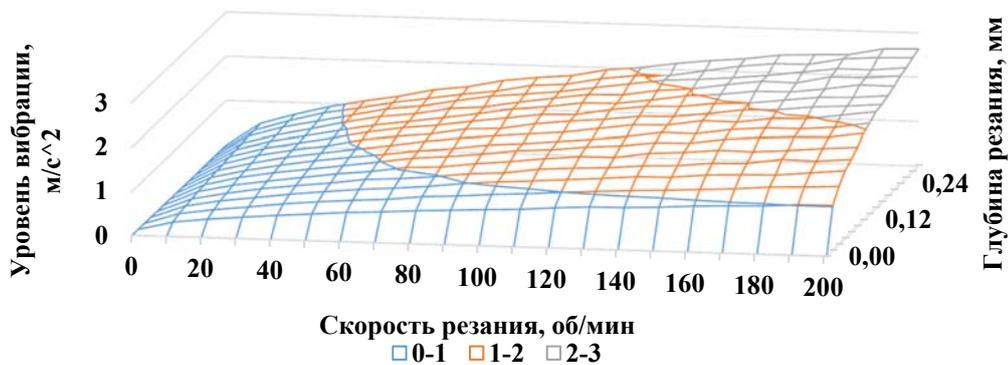


Рисунок 5.3 – Зависимость уровня вибрации от скорости резания и глубины резания для операции «Резьба»

Примеры полученных зависимостей для других токарных операций с ЧПУ представлены на рисунках 5.4–5.6.

С помощью полученных зависимостей на основе методики определения стадии износа инструмента [230] и разработанной ИИС были собраны необходимые статистические данные, а с применением методики оптимизации технологического процесса на основе алгоритма назначения оптимальных режимов резания с учетом вариабельности периода стойкости лезвийного инструмента [226] были разработаны рекомендации по оптимизации режимов резания технологического процесса обработки детали «Корпус».

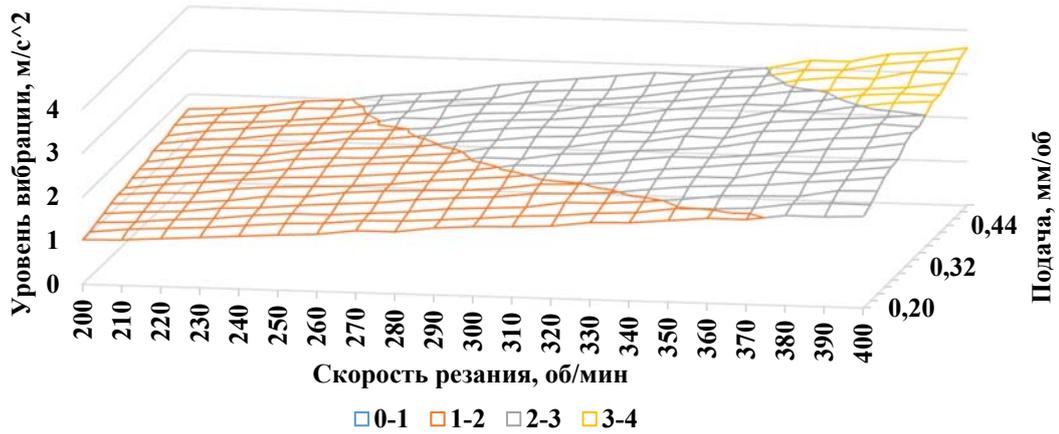


Рисунок 5.4 – Зависимость уровня вибрации от скорости резания и подачи для операции «Черновая расточка»

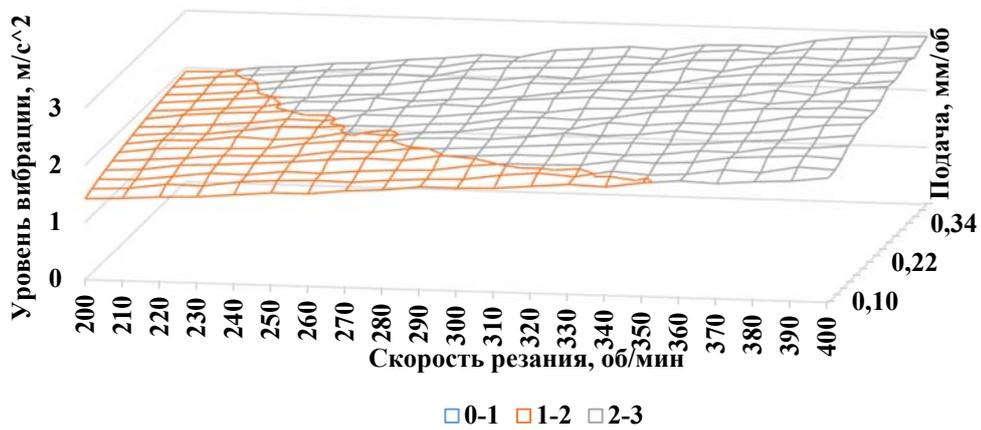


Рисунок 5.5 – Зависимость уровня вибрации от скорости резания и подачи для операции «Чистовая расточка»

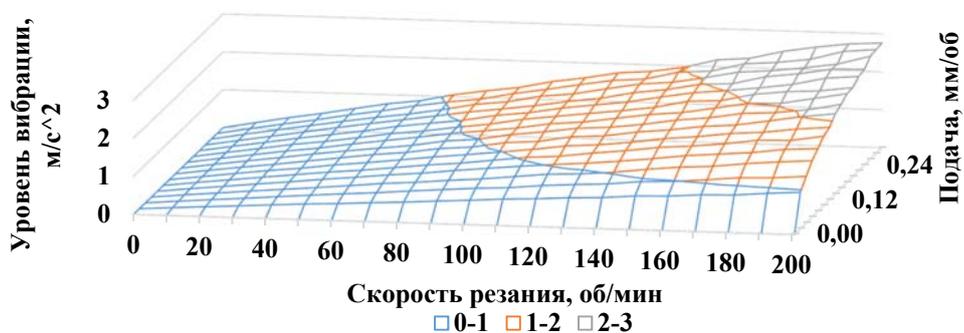


Рисунок 5.6 – Зависимость уровня вибрации от скорости резания и подачи для операции «Канавка»

## 5.5 Оценка динамических параметров технологической системы

Для априорного прогнозирования начального уровня вибрации в процессе обработки на основе вибропаспорта системы СПИЗ без проведения стойкостных испытаний необходимо провести оценку динамических параметров технологической системы (масса динамической системы  $m$ , относительный коэффициент демпфирования  $\xi$ , собственная частота  $\omega_0$ , коэффициент упругости  $k$  и др.).

Для оценки динамических параметров системы СПИЗ проводится модальный тест с последующей обработкой результатов по методу «кривой резонанса» [232]. Схема установки для проведения модального теста приведена на рисунке 5.7.

При проведении модального теста на инструменте закрепляется акселерометр, после чего по нему наносится удар ударным молотком. В ударный молоток встроен динамометр, таким образом ударный молоток фиксирует силу удара в ньютонах (Н). В результате удара резец совершает затухающие колебания, которые фиксируются акселерометром. Сила удара и вызванные им колебания в виде виброускорения передаются на компьютер. Для последующего анализа сигнал виброускорения должен быть переведен в виброперемещение. Для этого полученный сигнал дважды интегрируют.



Рисунок 5.7 – Схема установки для проведения модального теста

Для полученного сигнала виброперемещения применяют быстрое преобразование Фурье (БПФ), чтобы перейти в амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) сигнала (рисунок 5.8). С помощью АЧХ сигнала определяется амплитуда резонансного пика, собственная частота системы  $\omega_0$  и логарифмический декремент колебаний.

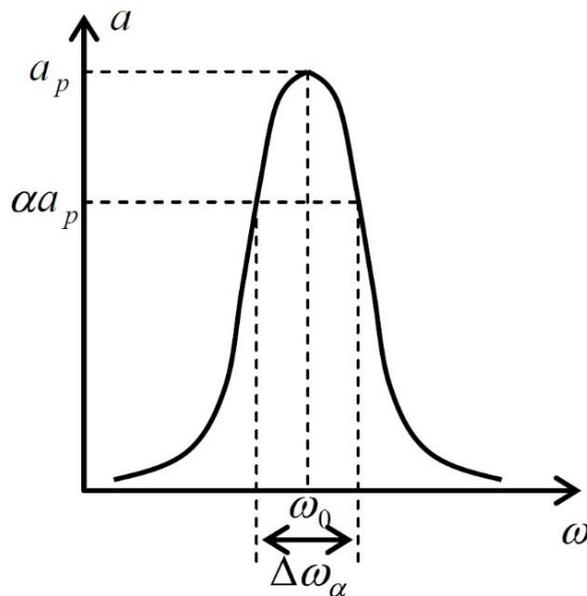


Рисунок 5.8 – Резонансный пик АЧХ сигнала вибрации

Для системы с линейно вязким трением, к которой можно отнести систему СПИЗ, на уровне резонансного пика  $\alpha = 0,5$  логарифмический декремент колебаний:

$$\delta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta\omega_{0,5}}{\omega_0}. \quad (5.1)$$

По виброграмме свободных затухающих колебаний (рисунок 5.9) определяется период колебаний  $T$ .

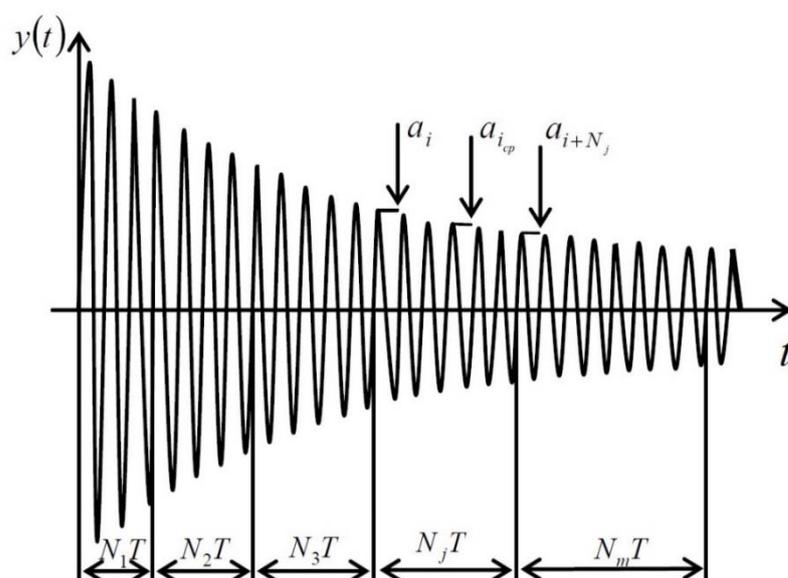


Рисунок 5.9 – Виброграмма свободных затухающих колебаний

На основе полученных данных определяется приведенное демпфирование:

$$n = \frac{\delta}{T} \quad (5.2)$$

и относительный коэффициент демпфирования:

$$\xi = \frac{n}{\omega_0}. \quad (5.3)$$

Исходя из силы удара  $F$  и максимального смещения резца в исследуемом направлении  $x$  определяется коэффициент упругости  $k$ :

$$k = \frac{F}{x}. \quad (5.4)$$

Приведенная масса системы оценивается с помощью уравнения:

$$m = \frac{k}{\omega_0^2}. \quad (5.5)$$

### 5.5.1 Черновое внутреннее растачивание

Для чернового внутреннего растачивания записанный сигнал виброускорения в горизонтальной плоскости представлен на рисунке 5.10.

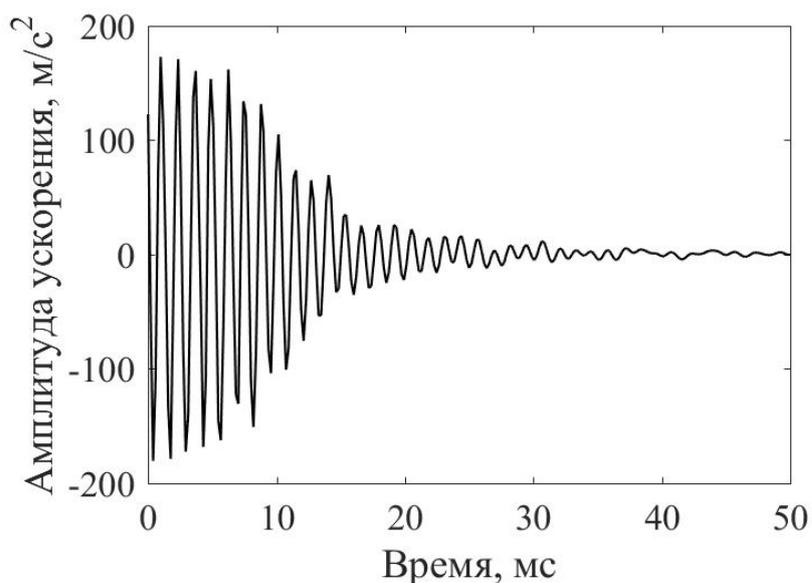


Рисунок 5.10 – Виброускорение в горизонтальной плоскости для чернового резца

Записанный сигнал силы удара представлен на рисунке 5.11.

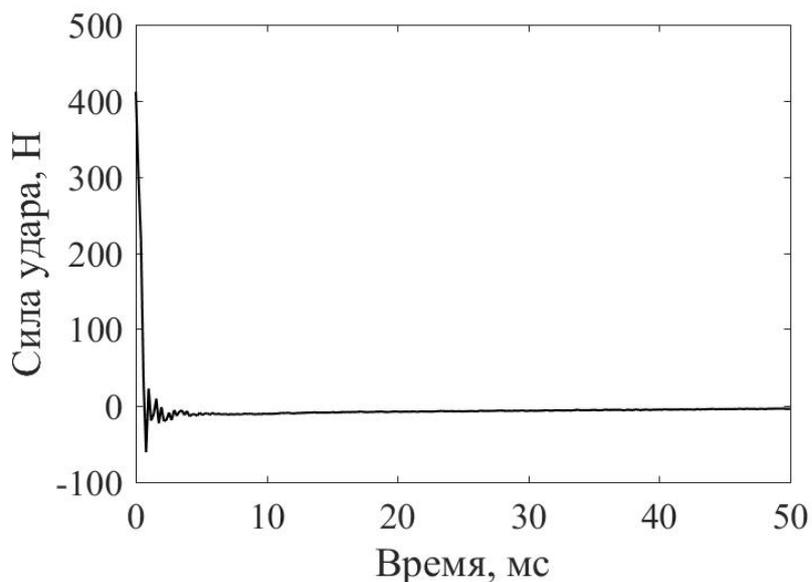


Рисунок 5.11 – Сила удара в горизонтальной плоскости для чернового резца

Путем последовательного интегрирования были получены виброскорость (рисунок 5.12) и виброперемещение (рисунок 5.13) резца вследствие удара.

АЧХ виброперемещения представлена на рисунке 5.14.

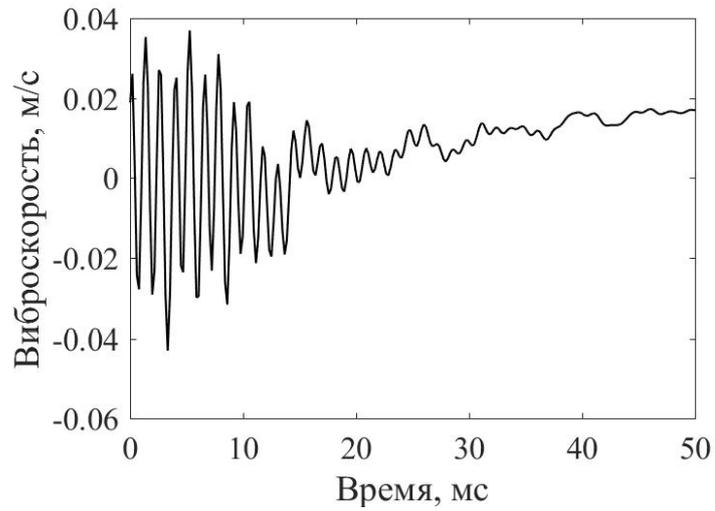


Рисунок 5.12 – Виброскорость в горизонтальной плоскости для чернового резца

Результаты оценки динамических параметров чернового резца в горизонтальной плоскости представлены в таблице 5.5.

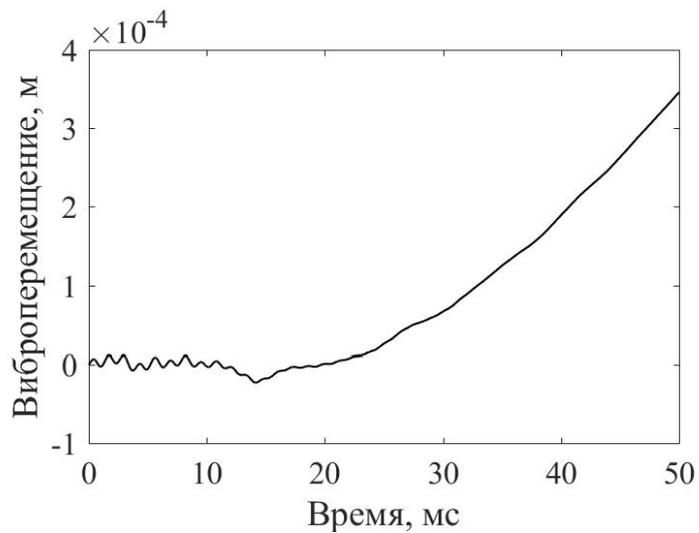


Рисунок 5.13 – Виброперемещение в горизонтальной плоскости для чернового резца

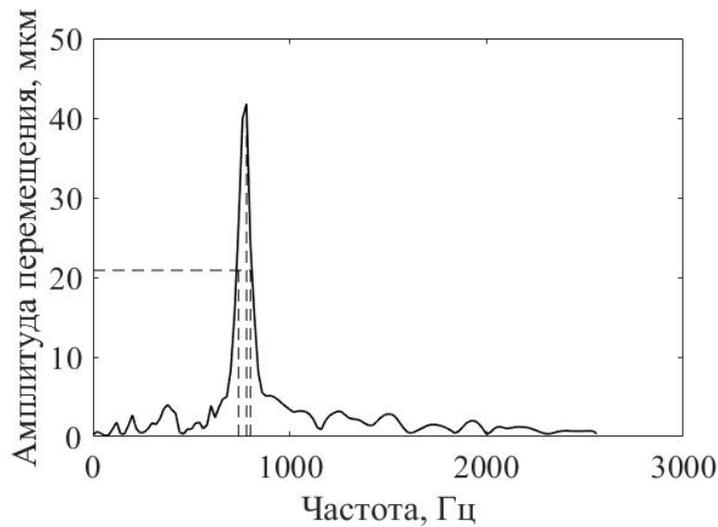


Рисунок 5.14 – АЧХ сигнала вибрации в горизонтальной плоскости для чернового резца

Таблица 5.5 – Динамические параметры чернового резца в горизонтальной плоскости

Параметр	Значение
Амплитуда резонансного пика	41,788660 мкм
Собственная частота системы	780,000000 Гц
Логарифмический декремент колебаний	0,139523
Сила удара	411,699524 Н
Максимальное смещение	0,000007 м
Коэффициент упругости	56432286,991108 Н/м
Период колебания	1,367188 мс
Приведенная масса системы	92,755238 кг
Приведенное демпфирование	102,051129
Относительный коэффициент демпфирования	0,130835

Результаты модального теста в вертикальной плоскости для чернового резца представлены на рисунках 5.15-5.19 и в таблице 5.6.

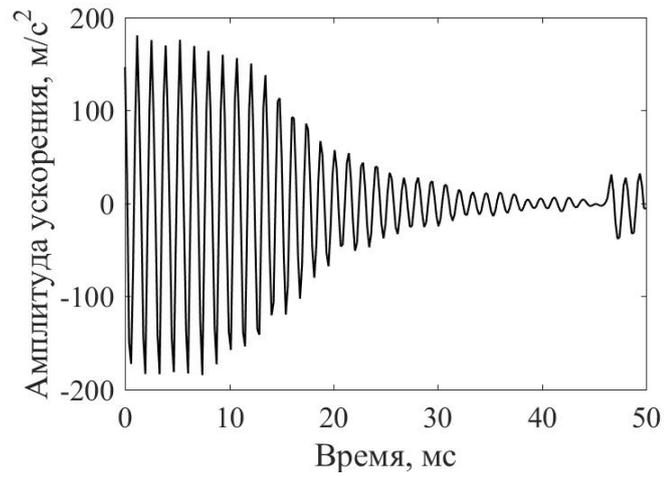


Рисунок 5.15 – Виброускорение в вертикальной плоскости для чернового резца

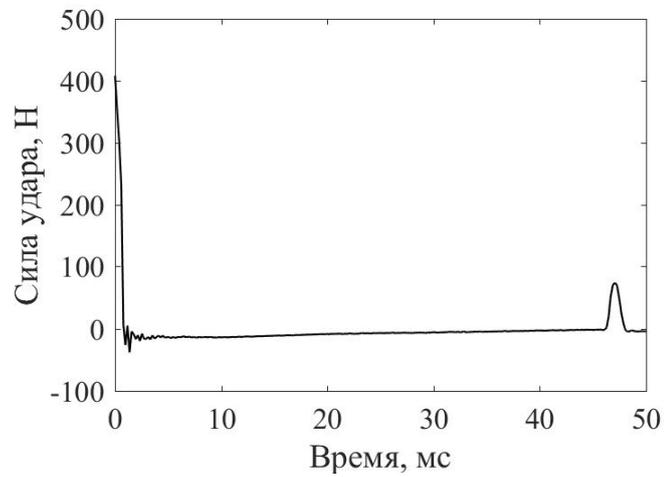


Рисунок 5.16 – Сила удара в вертикальной плоскости для чернового резца

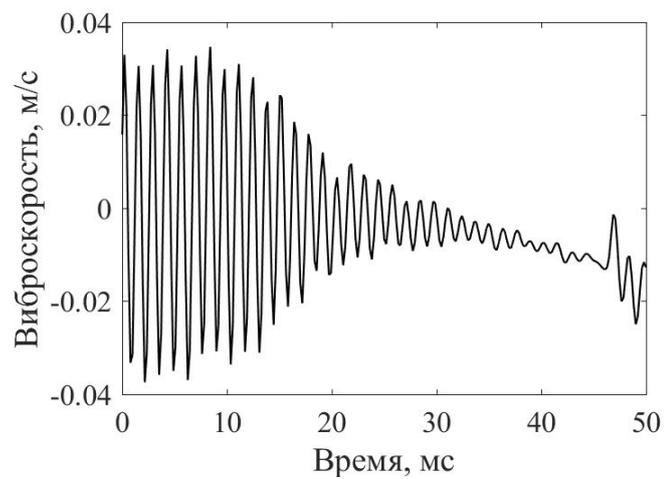


Рисунок 5.17 – Виброскорость в вертикальной плоскости для чернового резца

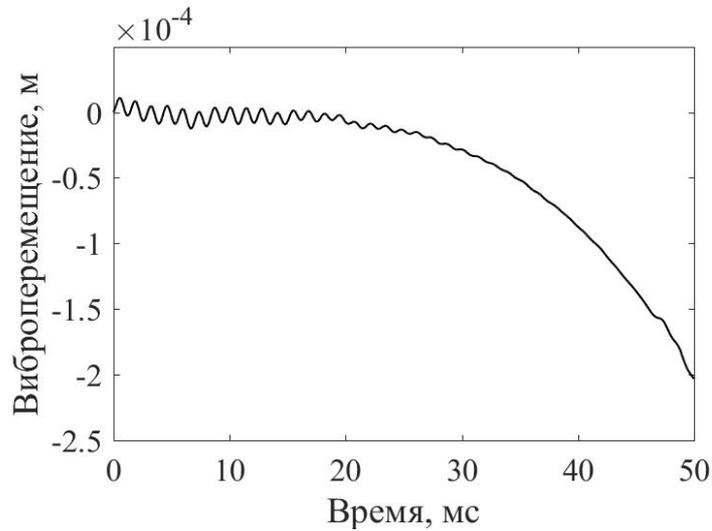


Рисунок 5.18 – Виброперемещение в вертикальной плоскости для чернового резца

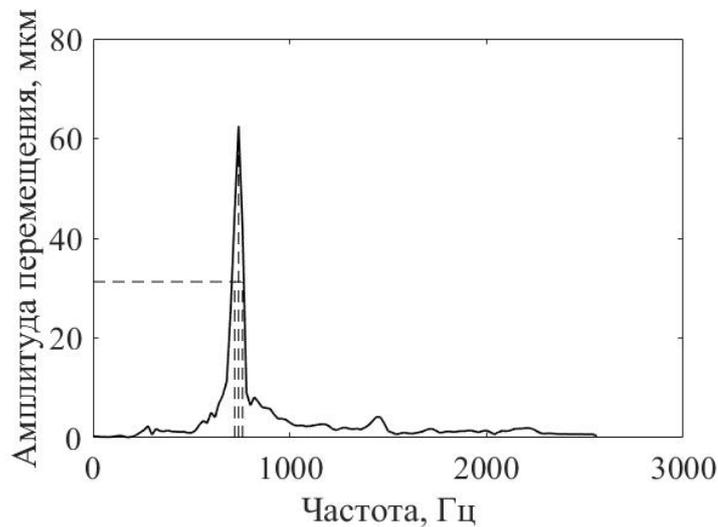


Рисунок 5.19 – АЧХ сигнала вибрации в вертикальной плоскости для чернового резца

Таблица 5.6 – Динамические параметры чернового резца в вертикальной плоскости

Параметр	Значение
Амплитуда резонансного пика	62,516233 мкм
Собственная частота системы	740,000000 Гц
Логарифмический декремент колебаний	0,098043
Сила удара	407,722717 Н
Максимальное смещение	0,000011 м
Коэффициент упругости	36408396,800831 Н/м
Период колебания	1,171875 мс
Приведенная масса системы	66,487211 кг
Приведенное демпфирование	83,663538
Относительный коэффициент демпфирования	0,113059

### 5.5.2 Чистовое внутреннее растачивание

Результаты модального теста в горизонтальной плоскости для чистового резца представлены на рисунках 5.20–5.24 и в таблице 5.7.

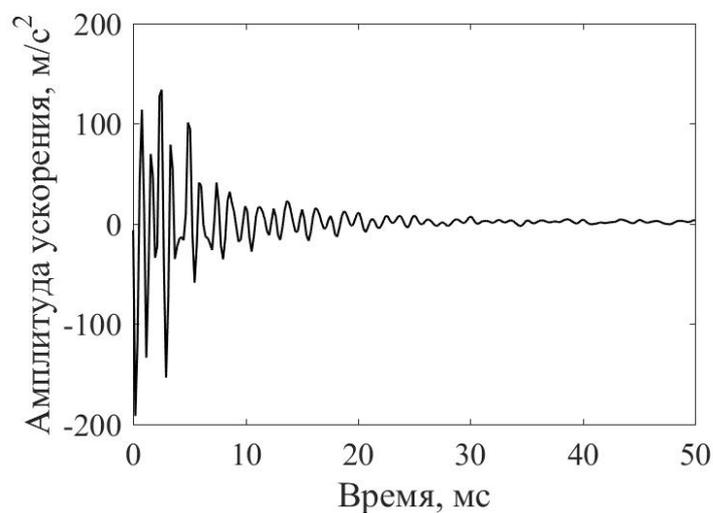


Рисунок 5.20 – Виброускорение в горизонтальной плоскости для чистового резца

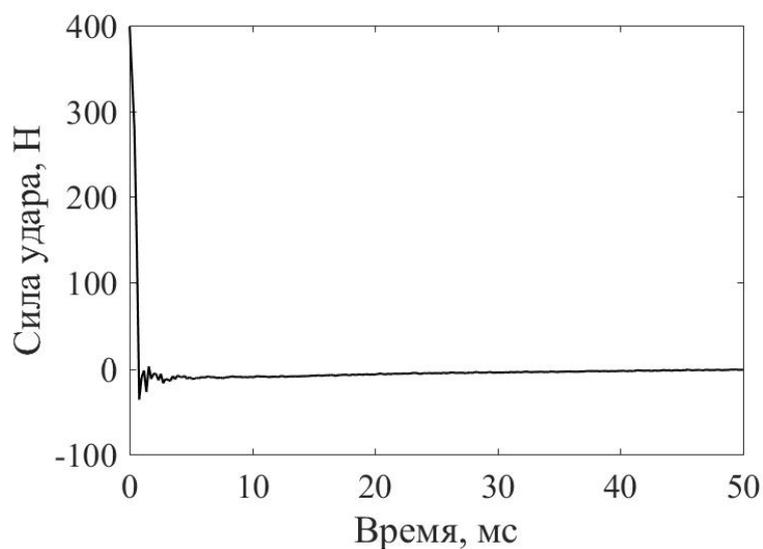


Рисунок 5.21 – Сила удара в горизонтальной плоскости для чистового резца

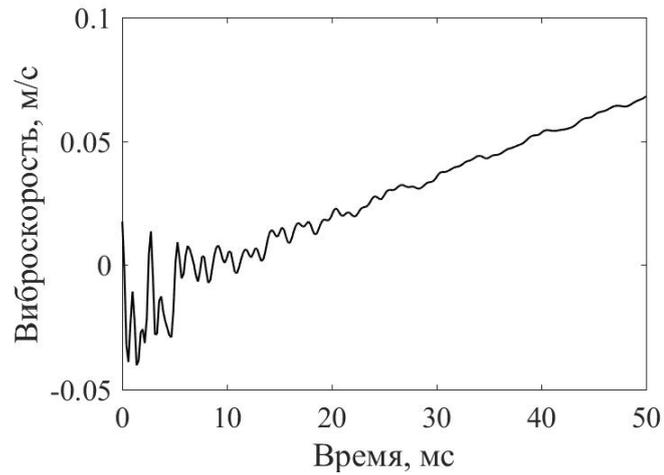


Рисунок 5.22 – Виброскорость в горизонтальной плоскости для чистового резца

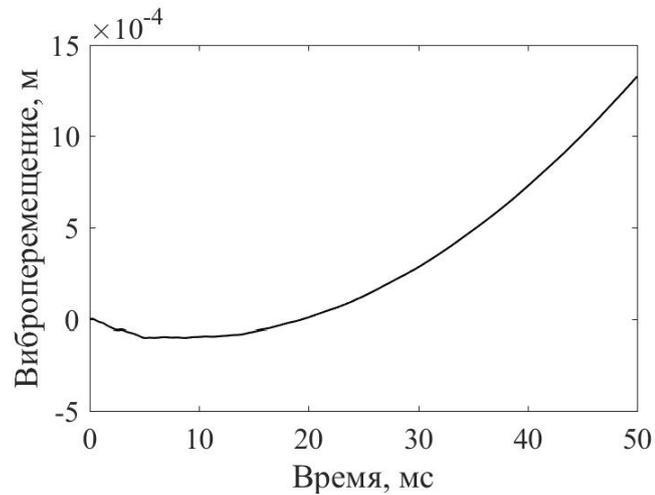


Рисунок 5.23 – Виброперемещение в горизонтальной плоскости для чистового резца

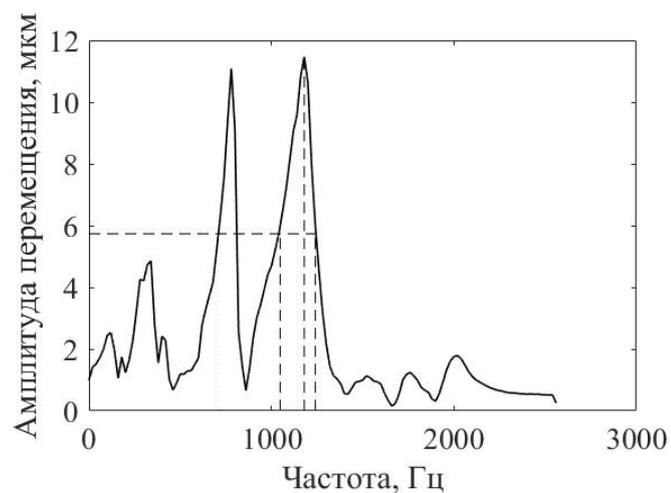


Рисунок 5.24 – АЧХ сигнала вибрации в горизонтальной плоскости для чистового резца

Результаты модального теста в вертикальной плоскости для чистового резца представлены на рисунках 5.25–5.29 и в таблице 5.8.

Таблица 5.7 – Динамические параметры чистового резца в горизонтальной плоскости

Параметр	Значение
Амплитуда резонансного пика	11,469475 мкм
Собственная частота системы	1180,000000 Гц
Логарифмический декремент колебаний	0,799301
Сила удара	398,855682 Н
Максимальное смещение	0,000002 м
Коэффициент упругости	259628864,684380 Н/м
Период колебания	2,734375 мс
Приведенная масса системы	186,461408 кг
Приведенное демпфирование	292,315946
Относительный коэффициент демпфирования	0,247725

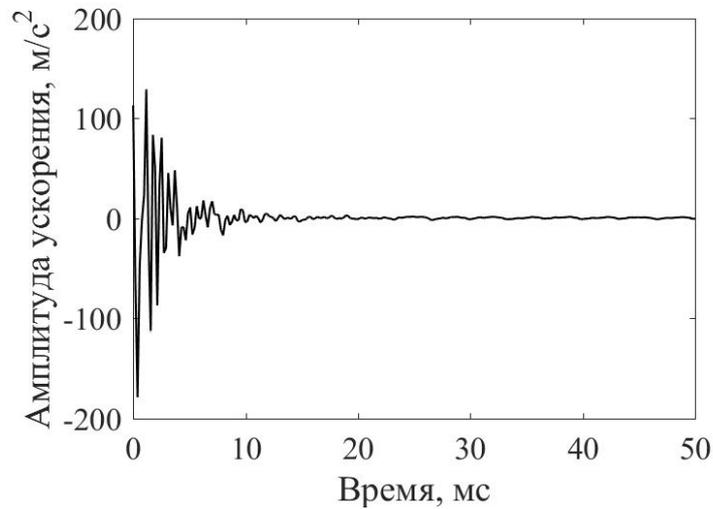


Рисунок 5.25 – Виброускорение в вертикальной плоскости для чистового резца

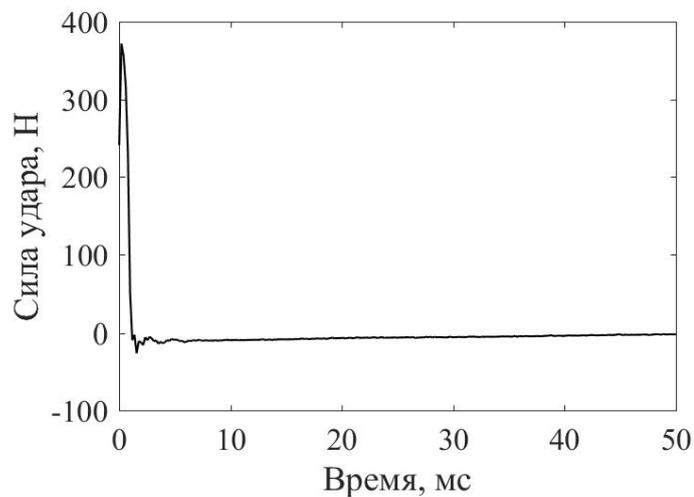


Рисунок 5.26 – Сила удара в вертикальной плоскости для чистового резца

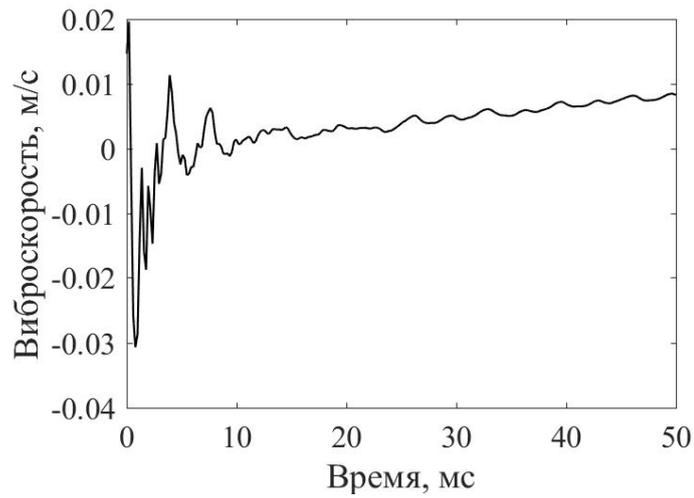


Рисунок 5.27 – Виброскорость в вертикальной плоскости для чистового резца

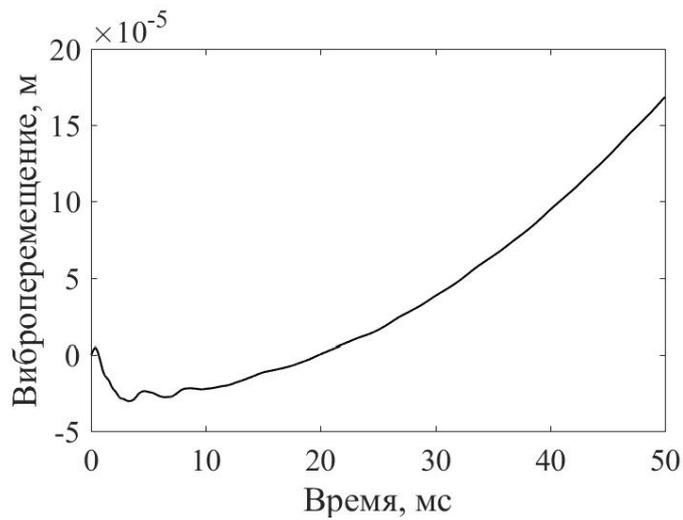


Рисунок 5.28 – Виброперемещение в вертикальной плоскости для чистового резца

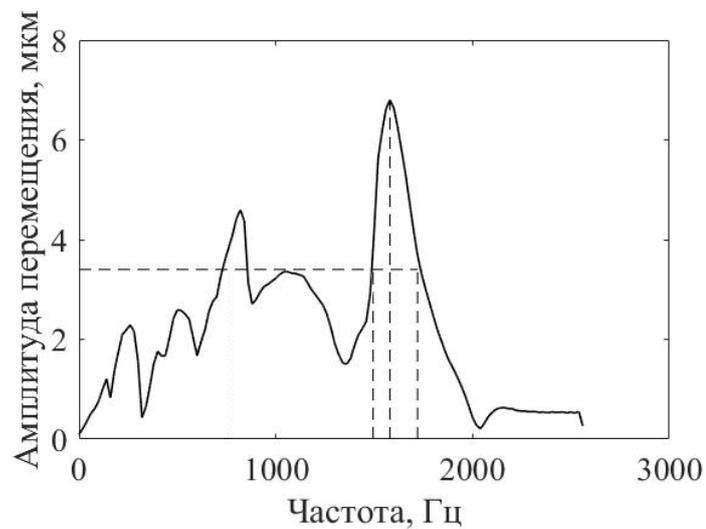


Рисунок 5.29 – АЧХ сигнала вибрации в вертикальной плоскости для чистового резца

Таблица 5.8 – Динамические параметры чистового резца в вертикальной плоскости

Параметр	Значение
Амплитуда резонансного пика	6,798016 мкм
Собственная частота системы	1580,000000 Гц
Логарифмический декремент колебаний	1,125015
Сила удара	371,710144 Н
Максимальное смещение	0,000005 м
Коэффициент упругости	76045543,893877 Н/м
Период колебания	4,296875 мс
Приведенная масса системы	30,462083 кг
Приведенное демпфирование	261,821625
Относительный коэффициент демпфирования	0,165710

### 5.5.3 Точение внутренней канавки

Результаты модального теста в горизонтальной плоскости для канавочного резца представлены на рисунках 5.30–5.34 и в таблице 5.9.

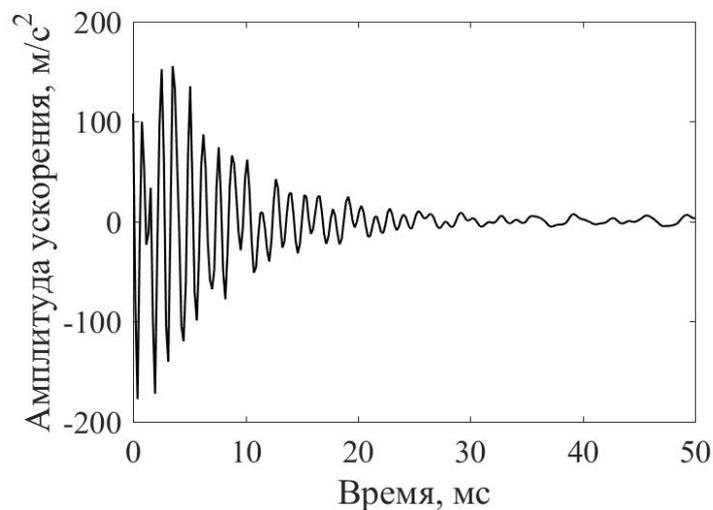


Рисунок 5.30 – Виброускорение в горизонтальной плоскости для канавочного резца

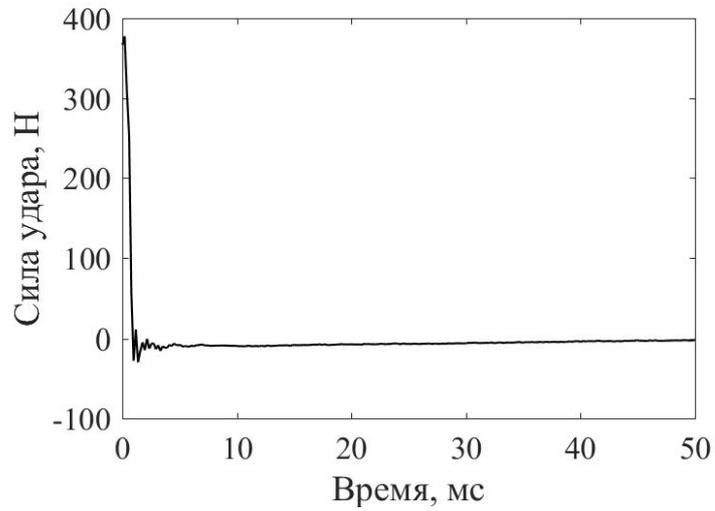


Рисунок 5.31 – Сила удара в горизонтальной плоскости для канавочного резца

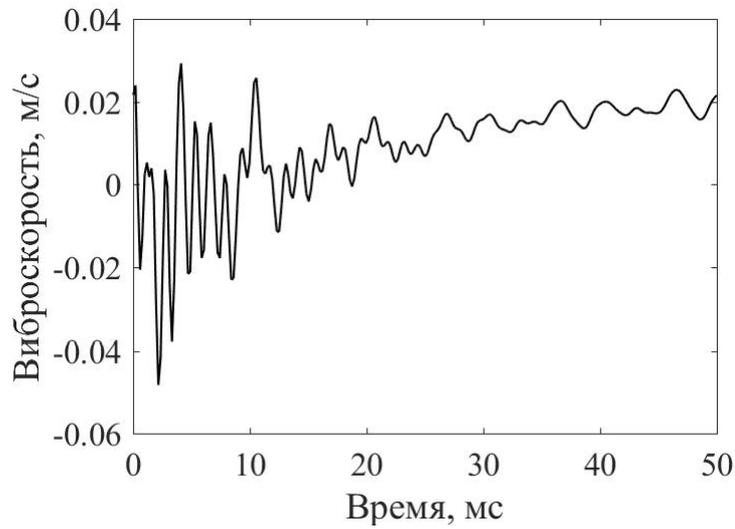


Рисунок 5.32 – Виброскорость в горизонтальной плоскости для канавочного резца

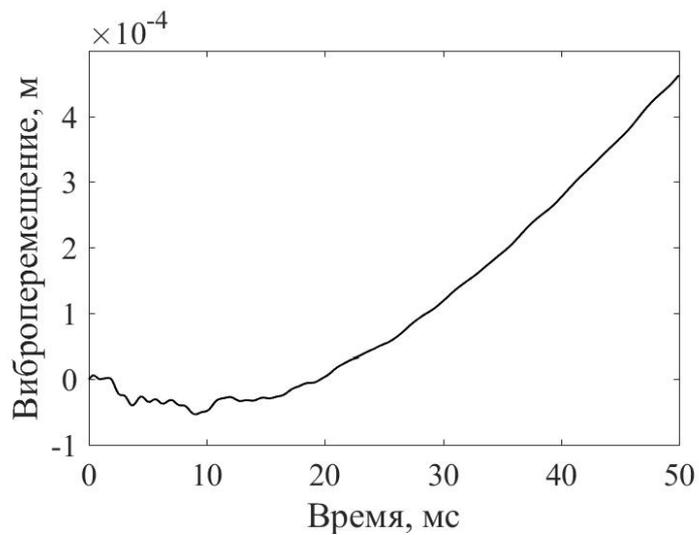


Рисунок 5.33 – Виброперемещение в горизонтальной плоскости для канавочного резца

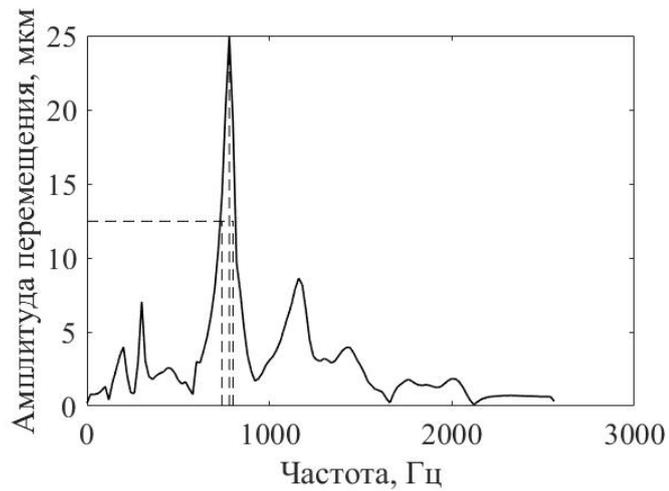


Рисунок 5.34 – Амплитудно-частотная характеристика сигнала вибрации в горизонтальной плоскости для канавочного резца

Таблица 5.9 – Динамические параметры канавочного резца в горизонтальной плоскости

Параметр	Значение
Амплитуда резонансного пика	24,933559 мкм
Собственная частота системы	780,000000 Гц
Логарифмический декремент колебаний	0,139523
Сила удара	377,310883 Н
Максимальное смещение	0,000007 м
Коэффициент упругости	56848289,151432 Н/м
Период колебания	1,367188 мс
Приведенная масса системы	93,439003 кг
Приведенное демпфирование	102,051129
Относительный коэффициент демпфирования	0,130835

Результаты модального теста в вертикальной плоскости для канавочного резца представлены на рисунках 5.35–5.39 и в таблице 5.10.

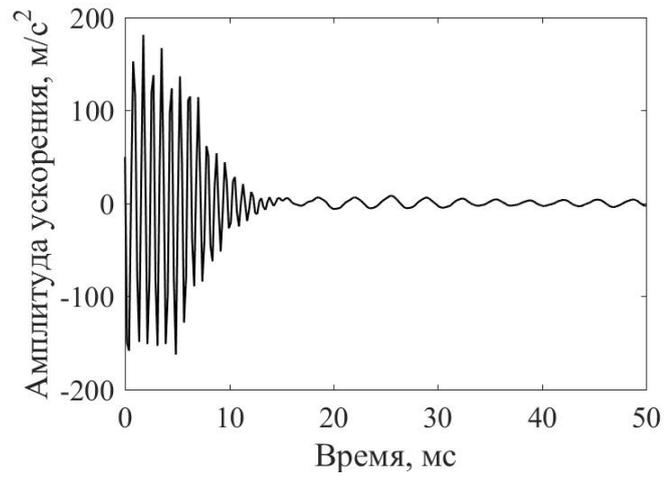


Рисунок 5.35 – Виброускорение в вертикальной плоскости для канавочного резца

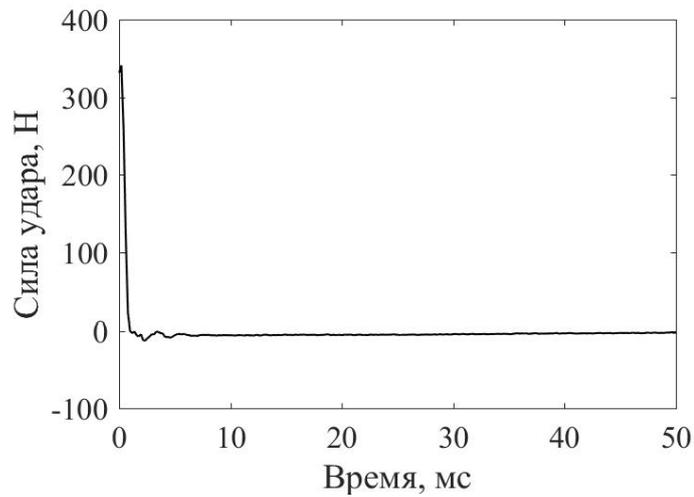


Рисунок 5.36 – Сила удара в вертикальной плоскости для канавочного резца

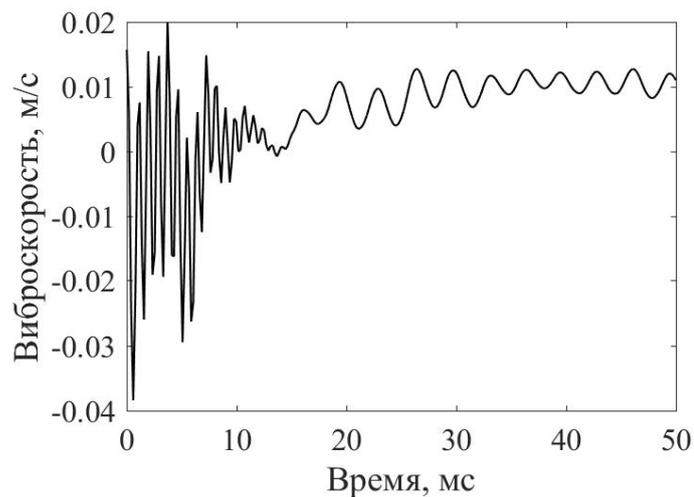


Рисунок 5.37 – Виброскорость в вертикальной плоскости для канавочного резца

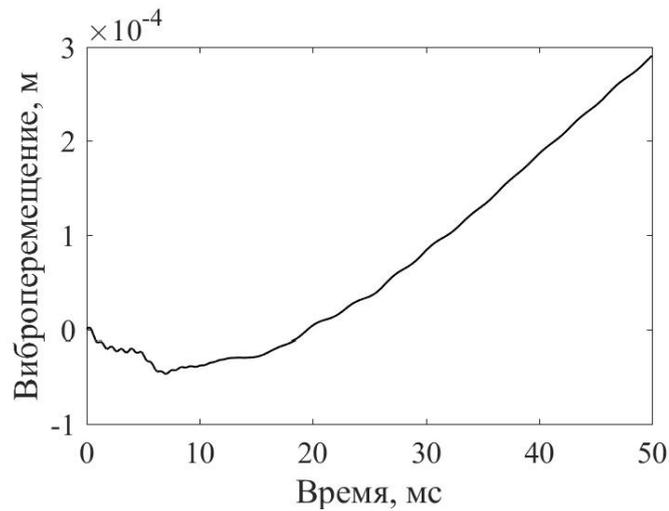


Рисунок 5.38 – Виброперемещение в вертикальной плоскости для канавочного резца

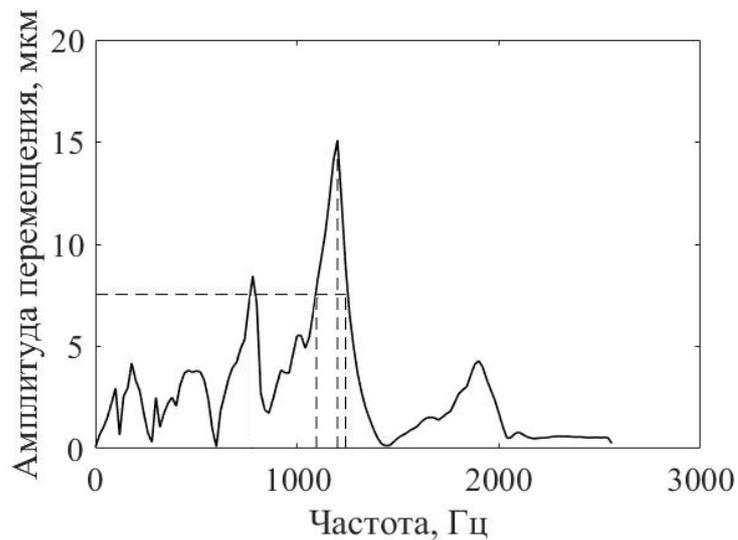


Рисунок 5.39 – Амплитудно-частотная характеристика сигнала вибрации в вертикальной плоскости для канавочного резца

Таблица 5.10 – Динамические параметры канавочного резца в вертикальной плоскости

Параметр	Значение
Амплитуда резонансного пика	26,118942 мкм
Собственная частота системы	1140,000000 Гц
Логарифмический декремент колебаний	0,159105
Сила удара	340,933838 Н
Максимальное смещение	0,000002 м
Коэффициент упругости	161791939,946089 Н/м
Период колебания	0,976563 мс
Приведенная масса системы	124,493644 кг
Приведенное демпфирование	162,923732
Относительный коэффициент демпфирования	0,142916

### 5.5.4 Нарезание упорной резьбы

Результаты модального теста в горизонтальной плоскости для резьбового резца представлены на рисунках 5.40–5.44 и в таблице 5.11.

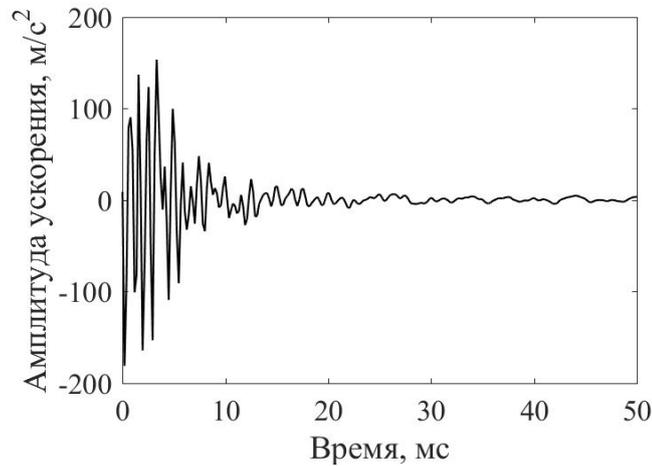


Рисунок 5.40 – Виброускорение в горизонтальной плоскости для резьбового резца

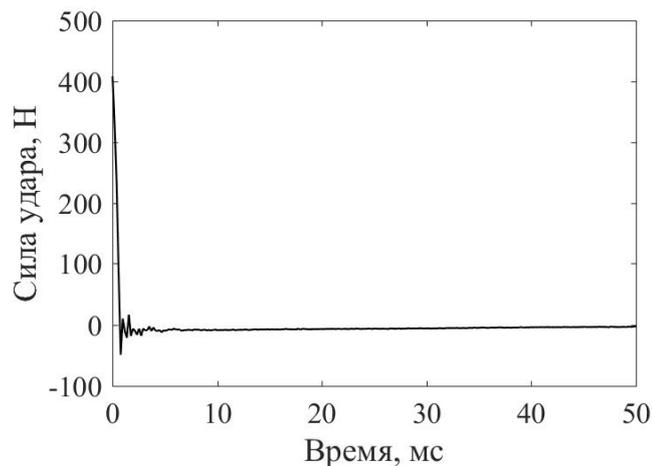


Рисунок 5.41 – Сила удара в горизонтальной плоскости для резьбового резца

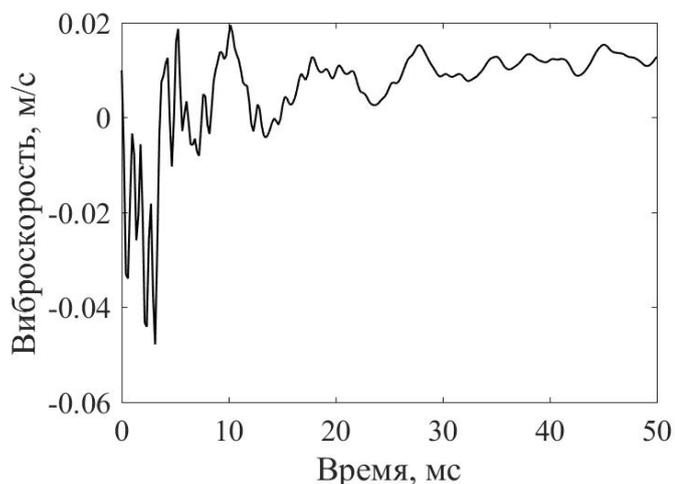


Рисунок 5.42 – Виброскорость в горизонтальной плоскости для резьбового резца

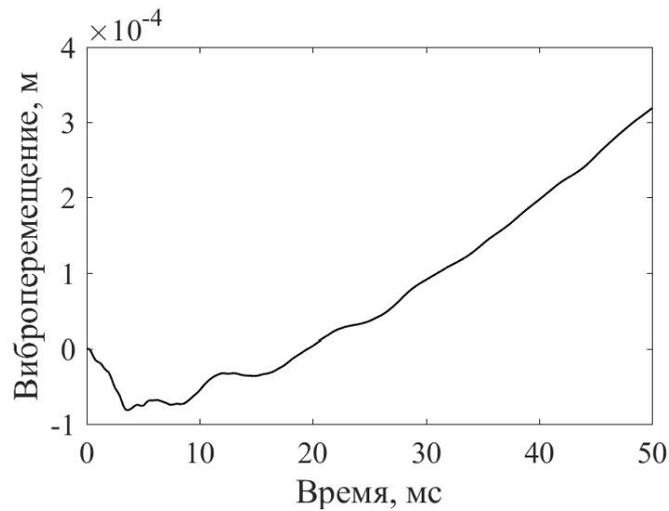


Рисунок 5.43 – Виброперемещение в горизонтальной плоскости для резбового резца

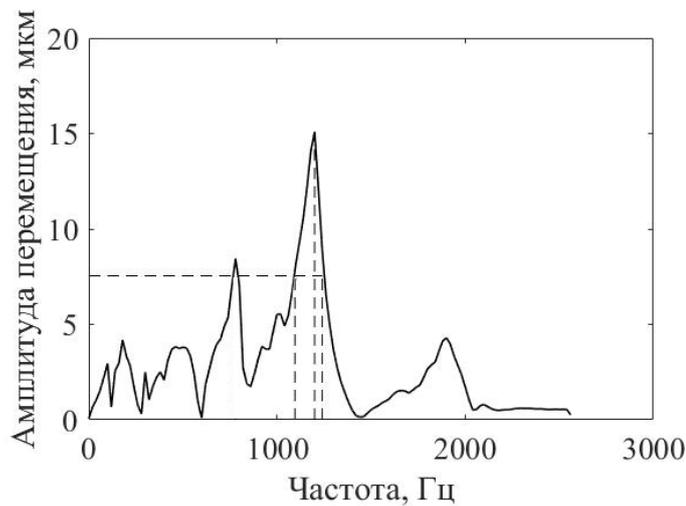


Рисунок 5.44 – АЧХ сигнала вибрации в горизонтальной плоскости для резбового резца

Таблица 5.11 – Динамические параметры резбового резца в горизонтальной плоскости

Параметр	Значение
Амплитуда резонансного пика	15,093122 мкм
Собственная частота системы	1200,000000 Гц
Логарифмический декремент колебаний	0,695290
Сила удара	408,137940 Н
Максимальное смещение	0,000001 м
Коэффициент упругости	1369506901,249971 Н/м
Период колебания	4,296875 мс
Приведенная масса системы	951,046459 кг
Приведенное демпфирование	161,812889
Относительный коэффициент демпфирования	0,134844

Результаты модального теста в вертикальной плоскости для резьбового резца представлены на рисунках 5.45–5.49 и в таблице 5.12.

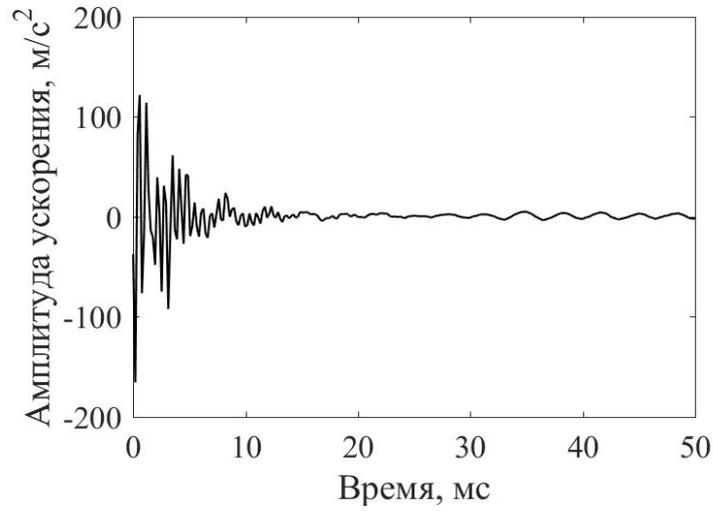


Рисунок 5.45 – Виброускорение в вертикальной плоскости для резьбового резца

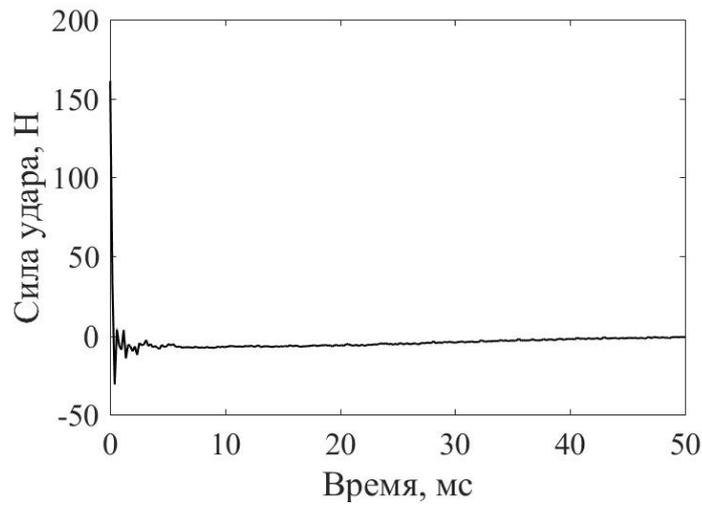


Рисунок 5.46 – Сила удара в вертикальной плоскости для резьбового резца

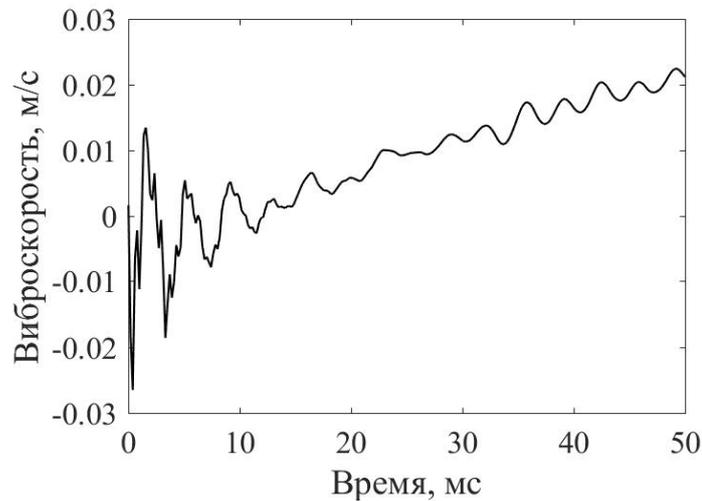


Рисунок 5.47 – Виброскорость в вертикальной плоскости для резьбового резца

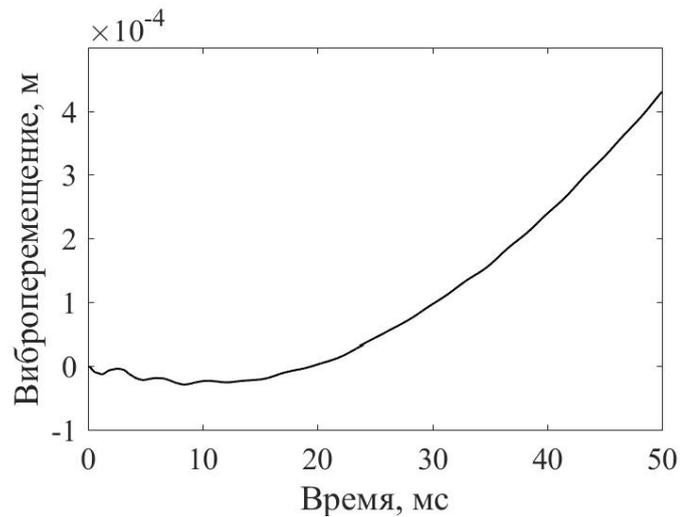


Рисунок 5.48 – Виброперемещение в вертикальной плоскости для резбового резца

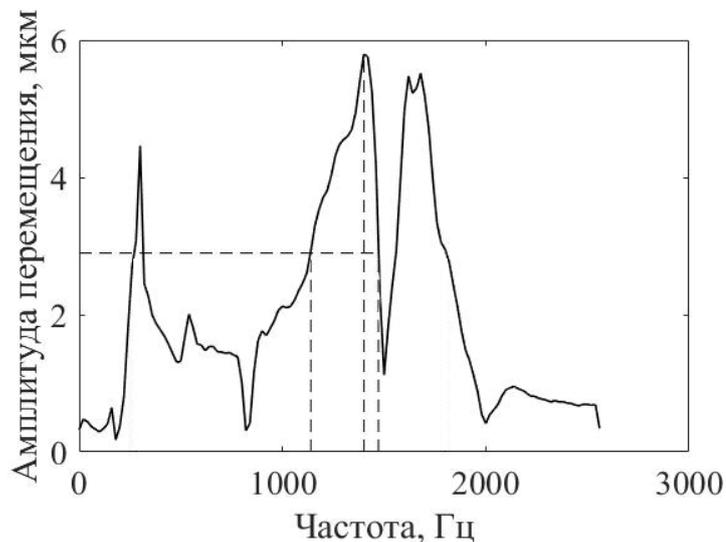


Рисунок 5.49 – Амплитудно-частотная характеристика сигнала вибрации в вертикальной плоскости для резбового резца

Таблица 5.12 – Динамические параметры резбового резца в вертикальной плоскости

Параметр	Значение
Амплитуда резонансного пика	5,795709 мкм
Собственная частота системы	1400,000000 Гц
Логарифмический декремент колебаний	1,969268
Сила удара	161,027802 Н
Максимальное смещение	0,000001 м
Коэффициент упругости	161027802 Н/м
Период колебания	2,539063 мс
Приведенная масса системы	82,1570418 кг
Приведенное демпфирование	775,588581
Относительный коэффициент демпфирования	0,553992

## 5.6 Априорная оценки параметров обобщенной стохастической модели отказов режущего инструмента

Для применения методики назначения оптимальных режимов резания с учетом вариабельности периода стойкости режущего инструмента на основе обобщенной 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. 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 [233].

В качестве архитектуры ИНС использован многослойный персептрон. Так как зависимость 5 выходных параметров (параметров обобщенной стохастической модели отказов режущего инструмента) от 15 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. Количество нейронов в скрытых слоях было определено по правилу геометрической пирамиды (*geometric pyramid rule*).

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 (рисунок 5.50).

Разработанный метод априорного назначения параметров стохастической модели отказов режущего инструмента на основе ИНС включает в себя:

1. Сбор и обработку статистических данных о наработке и износе режущего инструмента с использованием разработанной ИИС.
2. Обучение предложенной ИНС для априорного назначения параметров сто-

хастической 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.

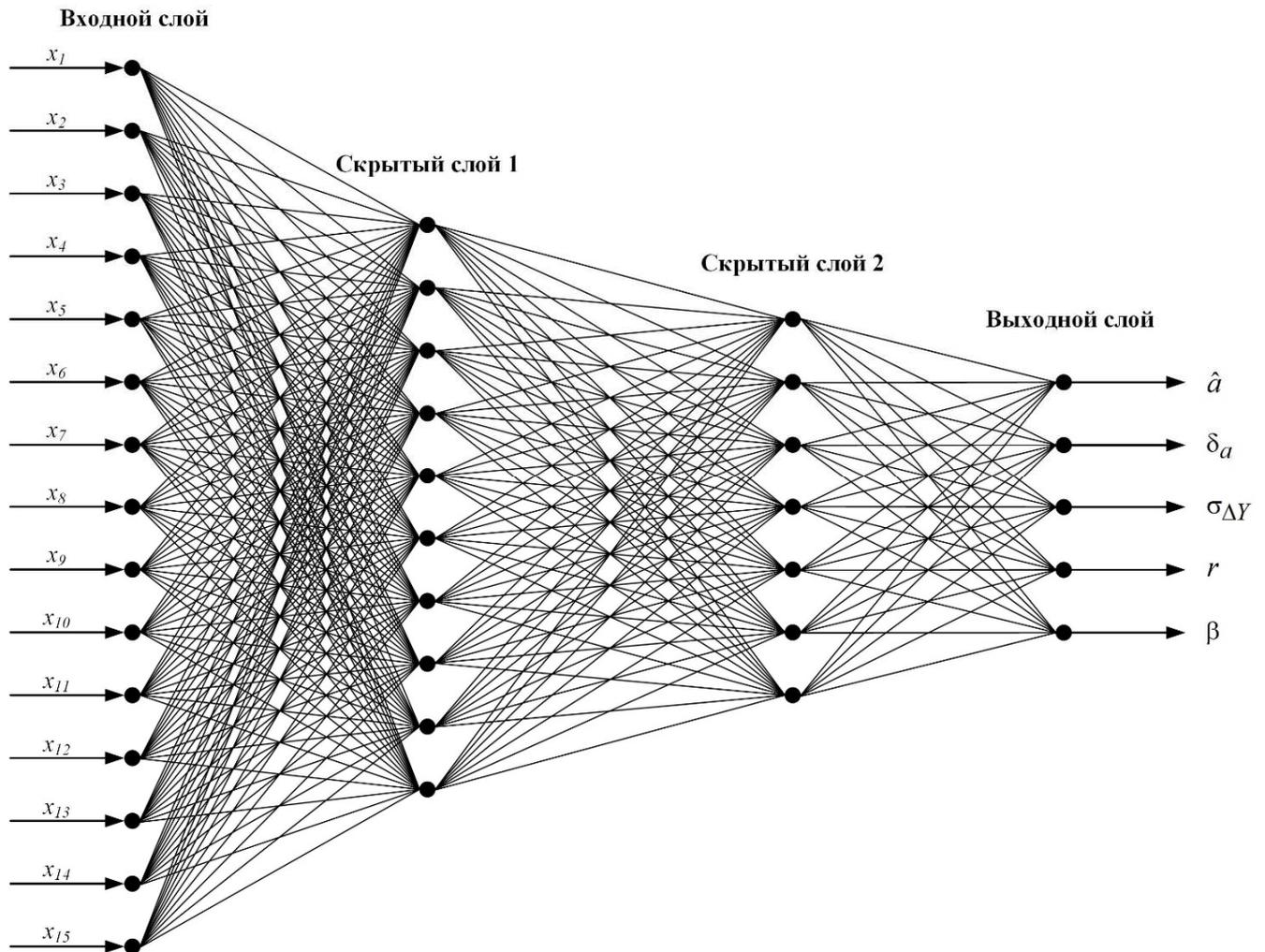


Рисунок 5.50 – Архитектура ИНС априорного назначения параметров стохастической модели отказов режущего инструмента

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 комбинаций новых инструментальных и конструкционных материалов, для которых отсутствуют стойкостные зависимости, полученные в ходе стойкостных экспериментов.

## 5.7 Выводы

Разработанную ИИС предложено использовать с целью сбора необходимых статистических данных для применения методики назначения оптимальных режимов резания с учетом вариабельности периода стойкости лезвийного инструмента, разработанной на основе обобщенной стохастической модели отказов режущего инструмента и стойкостной зависимости на ее основе. Для оценки износа режущего инструмента использована методика определения стадии износа инструмента с использованием вибропаспорта системы СПИЗ на основе модели Кэптейна.

Для примера был рассмотрен технологический процесс изготовления деталей «Корпус», тип 1 и «Корпус», тип 2, представляющих собой тонкостенную трубу, и сформирован вибропаспорт системы СПИЗ. Показана методика оценки динамических параметров технологической системы для априорного прогнозирования начального уровня вибрации в процессе обработки на основе вибропаспорта системы СПИЗ без проведения стойкостных испытаний.

Для применения методики назначения оптимальных режимов резания с учетом вариабельности периода стойкости режущего инструмента на основе обобщенной 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 с использованием ИНС 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 равно 10 и 7.

## 6 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ, МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ

### 6.1 Изготовление диагностического модуля

На рисунке 6.1 представлен диагностический модуль и пример его монтажа на технологическом оборудовании для мониторинга технологической дисциплины.

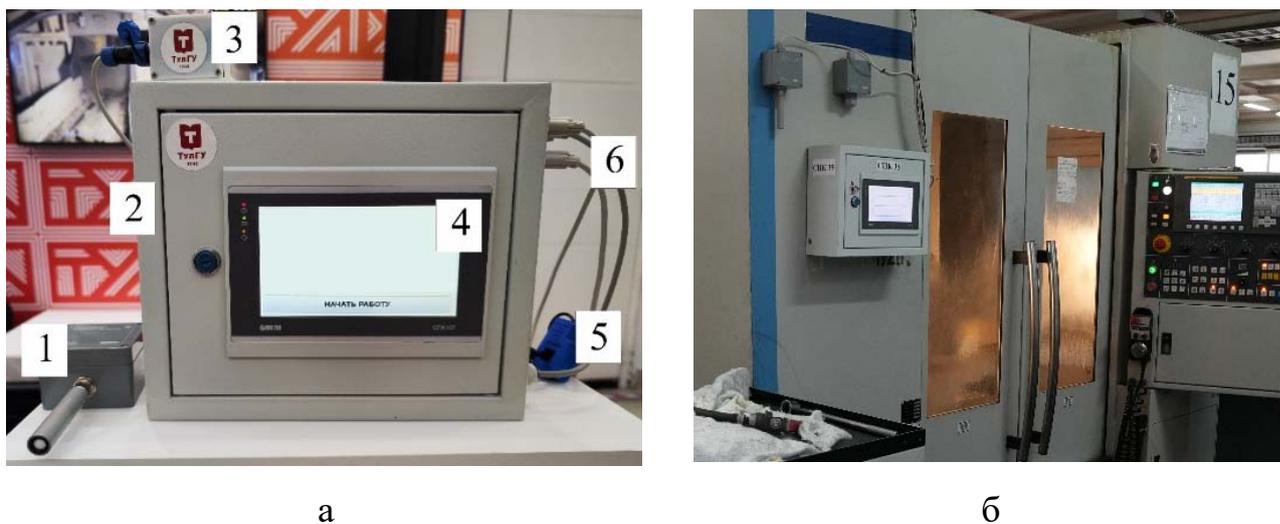


Рисунок 6.1 – Диагностический модуль ИИС:

а – выставочный образец:

1 – датчик температуры и влажности;

2 – защитный корпус панели оператора ЩРН-12;

3 – датчик вибрации; 4 – панель оператора;

5 – трансформатор тока УНDC SCT-013-000;

6 – разъемы для подключения и кабеля DB-9F-OL1310/S5 и DB-9F-DB-9F;

б – установленный на производстве на фрезерном станке с ЧПУ

ИИС принята АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева» на баланс и введена в опытную эксплуатацию с подключенными к ней 36 единицами оборудования. В 2024 г. и 2025 г. запланировано подключение еще 236 единиц оборудования.

Исходя из возможностей разработанной ИИС, она используется для решения следующих задач:

- мониторинг работы технологических систем;
- контроль соблюдения технологической дисциплины на производстве;
- оптимизация режимов резания технологического процесса обработки детали;
- проведение сравнительных испытаний при внедрении нового режущего инструмента в производство с учетом уровня вибрации.

### **6.1.1 Порядок сборки диагностического модуля**

1. С трансформатора тока YHDC SCT-013-000 и адаптера питания 24В, удаляются штекеры, зачищается изоляция провода на 10 мм и покрывается припоем ПОС-61 и флюсом ЛТИ-120.

2. Разделяется провод МГТФ 0,35 мм<sup>2</sup> на 10 частей длиной 30 см. Концы проводов зачищаются от изоляции на 5 мм и 3 мм соответственно.

3. На вилку разъёма DB-9M (DS1033-09M) зачищенной частью длиной 3 мм припаиваются провода МГТФ 0,35 мм<sup>2</sup> на пины 1,2,3,5,6 (припой ПОС-61 и флюс ЛТИ-120). Для защиты оголённых частей провода использована термоусаживаемая трубка диаметром 2 мм длиной 10 мм.

4. Из металлического корпуса ЩРН-12 удаляются все металлические направляющие, изготавливаются отверстия для крепления разъемов и контроллера СПК 107, снимается задняя стенка корпуса.

5. Подготовленные вилки разъёма DB-9M устанавливаются в отверстия корпуса ЩРН-12 при помощи стоек М3 и гаек М3.

6. Осуществляется монтаж контроллера СПК107 в корпус ЩРН-12.

8. В порт USB А контроллера подключается вилка USB. Соединяются провода разъемов вилки разъёма DB-9M. В клеммы соединителя питания подключаются провода адаптера.

9. Устанавливается и закрепляется задняя крышка корпуса.

10. Подключается датчик вибрации к розетке разъёма OL1310/S5, датчик тока к розетке разъёма DB-9M.

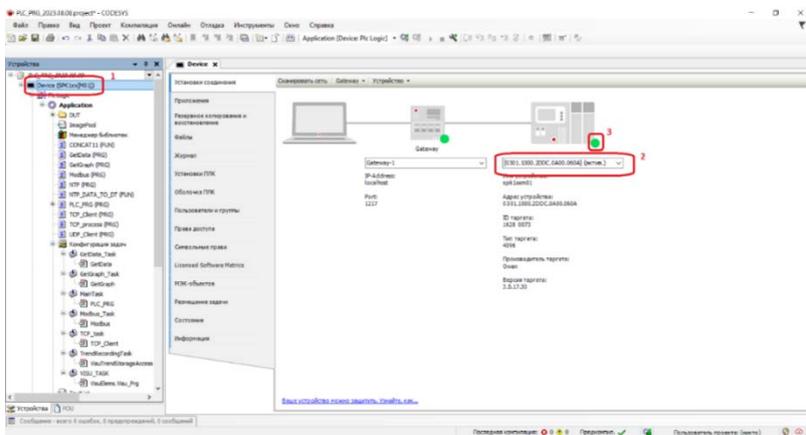
11. Адаптер блока питания может быть включен в сеть питания.

## 6.1.2 Установка программного обеспечения

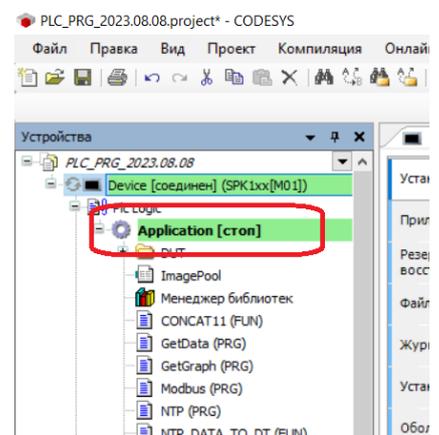
Программное обеспечение диагностического модуля определяет функциональные возможности и способ взаимодействия с другими компонентами системы.

Установка программного обеспечения на диагностический модуль производится в несколько этапов.

1. Диагностический модуль подключается к ноутбуку проводом USB – USB B.
2. Для загрузки ПО использовано приложение CodeSys V3.5SP17 (Рисунок 6.2, а)
3. В разделе «Devices» выбирается в поле с именем устройства, должна загореться зеленая лампочка.



а



б

Рисунок 6.2 – Установка программного обеспечения

4. Выбирается пункт меню «Онлайн – Логин», в появившемся окне необходимо согласиться на подключение, создание и загрузку приложения. В дереве проекта отображается, что приложение остановлено (стоп) (Рисунок 6.2, б).

5. Выбирается пункт меню «Отладка – Старт» и подтверждается запуск приложения.

6. Проверяется изменение сигнала вибрации и уровня тока, если все в порядке, то создается загрузочное приложение, выбирается команда «Онлайн – Создать» загрузочное приложение.

7. После создания загрузочного приложения необходимо отключение от диагностического модуля, выбирается команда «Онлайн – Отключение».

8. Далее необходимо перезагрузить диагностический модуль. На сенсорном экране панели оператора отобразится стартовое окно.

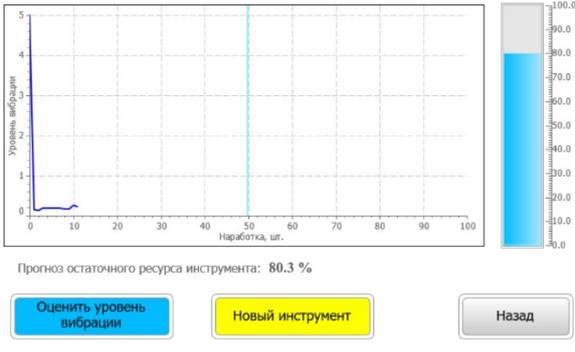
## 6.2 Порядок взаимодействия с панелью оператора

Порядок взаимодействия с панелью оператора представлен в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Порядок взаимодействия с панелью оператора

	<p><b>Стартовое окно</b></p> <p>Отображается информация об уровне вибрации по трем осям, потреблении тока и данные дополнительных датчиков (при наличии). Является рабочим окном по умолчанию.</p> <p>Позволяет начать взаимодействие оператора с ИИС.</p> <p>При нажатии в любой части стартового окна происходит переход к окну идентификации.</p>
	<p><b>Окно идентификации</b></p> <p>Позволяет идентифицировать пользователя оборудования и предоставляет возможность взаимодействия с ИИС.</p> <p>С окна идентификации возможен переход в окно оценки состояния инструмента нажатием на кнопку «ПРОГНОЗ ИЗНОСА» и окно указания причин простоя оборудования нажатием на кнопку «ПРОСТОЙ»</p>

## Продолжение таблицы 6.1

 <p>Уровень вибрации</p> <p>Наработка, шт.</p> <p>Прогноз остаточного ресурса инструмента: 80.3 %</p> <p>Оценить уровень вибрации</p> <p>Новый инструмент</p> <p>Назад</p>	<p><b>Окно прогноза износа</b></p> <p>Позволяет по уровню вибрации косвенно оценить износ текущего инструмента</p>
 <p>НЕТ ЗАГОТОВКИ</p> <p>НЕТ ИНСТРУМЕНТА</p> <p>НЕТ СМЕННО-СУТОЧНОГО ЗАДАНИЯ</p> <p>НЕИСПРАВНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ</p> <p>НЕИСПРАВНОСТЬ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ</p> <p>НЕТ РАБОЧЕГО</p> <p>ПЕРЕНАЛАДКА ОБОРУДОВАНИЯ</p> <p>ДРУГОЕ</p> <p>НАЗАД</p>	<p><b>Окно причин простоя</b></p> <p>Позволяет пользователю выбрать одну из заранее определенных причин простоя оборудования:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- нет заготовок;</li> <li>- нет инструмента;</li> <li>- нет сменно-суточного задания;</li> <li>- неисправность оборудования;</li> <li>- неисправность управляющей программы;</li> <li>- нет рабочего;</li> <li>- переналадка;</li> <li>- другое.</li> </ul> <p>Для выбора причины простоя необходимо нажать на соответствующую кнопку на экране. Для возврата на стартовое окно необходимо нажать кнопку «НАЗАД»</p>

## Продолжение таблицы 6.1

<p style="text-align: center;"><b>Оборудование простаивает</b></p> <div style="text-align: center;">    </div> <div style="text-align: center; border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <b>ЗАВЕРШИТЬ ПРОСТОЙ</b> </div>	<p><b>Окно простоя</b></p> <p>После указания причины простоя панель оператора переходит в режим ожидания с отображением сообщения «Оборудование простаивает», а на интерактивной карте производства отобразится причина простоя (рисунок 6.3).</p> <p>После устранения причины необходимо нажать кнопку «ЗАВЕРШИТЬ ПРОСТОЙ». При этом информация о простое с интерактивной карты пропадает</p>
---	--

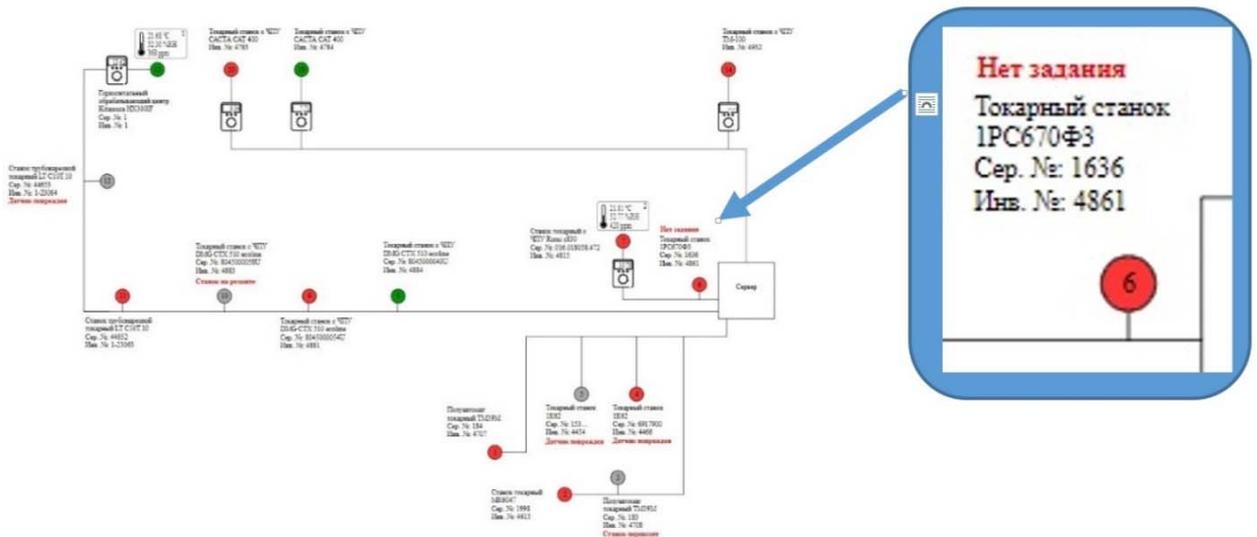


Рисунок 6.3 – Отображение причин простоя оборудования на интерактивной карте производства

### 6.3 Контроль технологической дисциплины

Стоит пояснить, что ранее была сделана сноска о возможности идентификации номенклатуры обработанных заготовок. Это становится возможно при систем-

ном анализе работы оборудования, которое каждый день делает одни и те же операции на одних и тех же деталях.

Технологические процессы изготовления машиностроительной продукции, проектируемые при наличии неопределенности характеристик обрабатываемых заготовок и инструмента, содержат недоработки и упущения, приводящие к увеличению издержек производства, а следовательно, к увеличению цены и снижению эффективности производственных процессов вследствие:

- снижения коэффициента использования металлорежущих станков и нарушения ритмичности производственного процесса изготовления продукции из-за увеличения вспомогательного времени;
- снижения эффективности использования ресурса режущего инструмента из-за назначения неоптимального порядка его восстановления;
- увеличения основного времени, необходимого на изготовление деталей машин из-за назначения неоптимальных режимов резания;
- повышения вероятности возникновения брака, связанного с отказом режущего инструмента во время обработки, из-за совместного влияния вариабельности параметров режущего инструмента и обрабатываемых заготовок;
- повышения себестоимости продукции из-за включения в нее затрат на брак, связанный с отказом режущего инструмента во время обработки.

Кроме рассмотренных выше факторов стоит рассмотреть такое понятие, как технологическая дисциплина.

В предыдущем разделе были затронуты некоторые аспекты, связанные с технологической дисциплиной (в рамках разработки модели предиктивной аналитики), но далее рассмотрим этот вопрос подробнее.

Технологическую дисциплину стоит рассматривать как обязательное соблюдение технологических регламентов и технологического режима.

Соблюдение технологической дисциплины является важным условием, позволяющим выпускать высококачественную продукцию с минимальным браком и снизить ее себестоимость.

Нарушение технологической дисциплины является причиной низкого качества продукции, брака, ухудшения использования сырья, остановок и поломок оборудования, что, в свою очередь, ведет к снижению выпуска готовой продукции. Нарушения технологической дисциплины происходят по следующим причинам:

- недостаточная подготовка сотрудников;
- невнимательное исполнение сотрудниками своих должностных обязанностей;
- самостоятельное изменение сотрудниками технологических процессов, указанных в технологических и операционных картах.

Как бороться с первой причиной – вполне понятно, так как существуют различные варианты повышения квалификации сотрудников любого предприятия, то причины, обозначенные в пунктах 2 и 3 носят бессистемный характер и могут относиться к сотрудникам любого уровня компетенций.

Безусловно, производственный мастер обязан в процессе выполнения своих служебных обязанностей постоянно контролировать последовательность и правильность выполнения технологических операций, следить за состоянием оборудования, следить за чистотой и культурой производства на рабочих местах, особое внимание уделять рабочим местам, где работают ученики, новые рабочие (операторы), но в условиях текущей загруженности и даже перегруженности предприятий для обеспечения нужд СВО это не всегда представляется возможным.

Для решения проблемы контроля технологических процессов и исключения из цепочки принятия решения человеческого фактора в действующее производство внедрена ИИС, позволяющая контролировать технологическую дисциплину [234].

В ходе проведенных исследований были выявлены случаи нарушения технологической дисциплины при изготовлении различных деталей на технологическом оборудовании с использованием разработанной ИИС.

На рисунке 6.4 представлена регистрация факта работы оборудования на холстом ходу для имитации работы.

После получения операторами обратной связи о выявленных фактах нарушения технологической дисциплины наблюдалась иная картина рабочего дня.

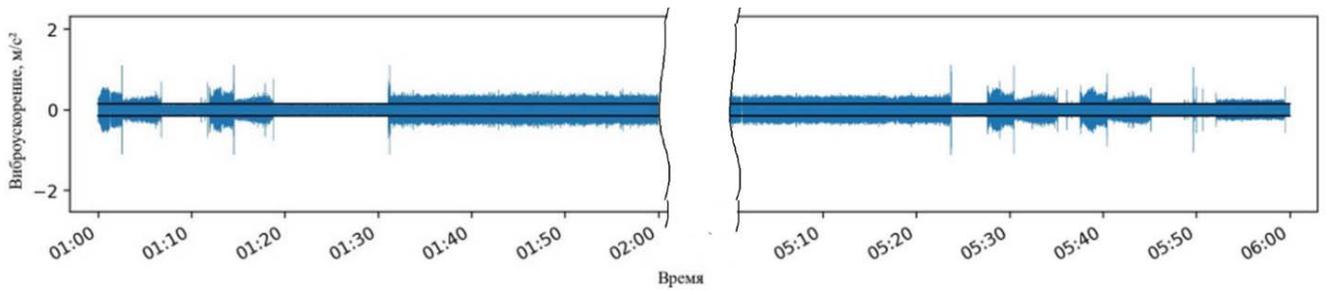


Рисунок 6.4 – Картина работы станка с 01:00 до 06:00

На рисунке 6.5 представлен вариант использования программы, имитирующей работу станка по управляющей программе. Также видно, что график начинается с хорошо визуализированных образов деталей, характерных для этого оборудования, однако далее ИИС регистрирует лишь повторяющиеся холостые ходы суппорта и вращение револьверной головки.

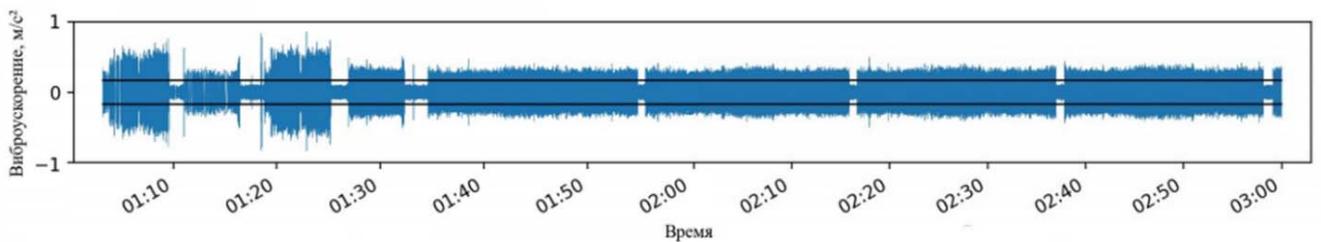


Рисунок 6.5 – Картина работы станка с 01:00 до 03:00

В заключение вопроса о нарушениях хотелось бы рассмотреть аспект самовольного изменения рабочими режимов резания или фактов отклонения от технологического процесса.

Так, на рисунке 6.6, 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 6.6, б представлено прерывание технологического процесса (процесса обработки детали) и переделки (повтора) некоторых переходов.

Далее рассмотрим ритмичность производства. Как видно из анализа рисунка работы станка в первую смену (рисунок 6.7, а) и третью смену (рисунок 6.7, б), 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).

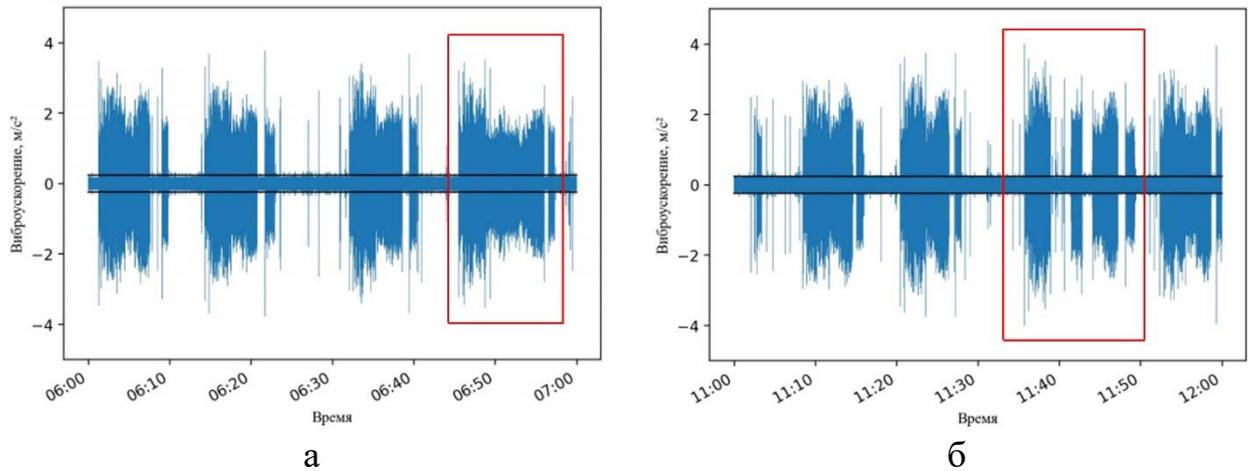


Рисунок 6.6 – Картина работы станка

а – при изменении режимов резания; б – при прерывании процесса резания

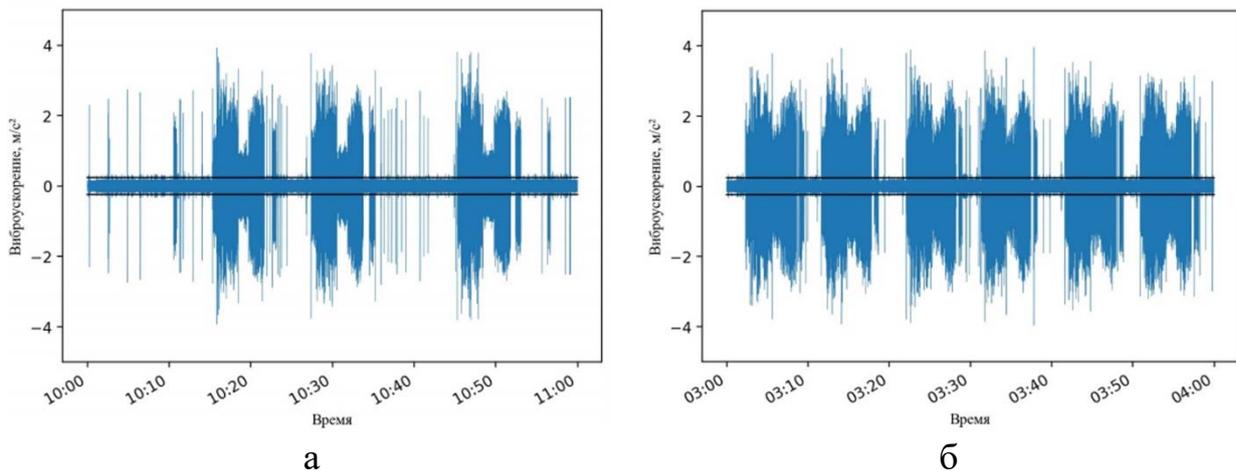


Рисунок 6.7 – Картина работы станка в разные смены:

а – первая (дневная) смена; б – третья (ночная) смена

Видно, что 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 (2.1) увеличился с 0,395 до 0,789, а коэффициент ритмичности (2.2) увеличился с 0,5 до 1. Анализ такой информации позволяет оценить фактическую производительность каждого оператора, что позволяет более точно планировать производство.

Также интересен случай обнаружения несоблюдения сменно-суточного задания, представленный на рисунке 6.8.

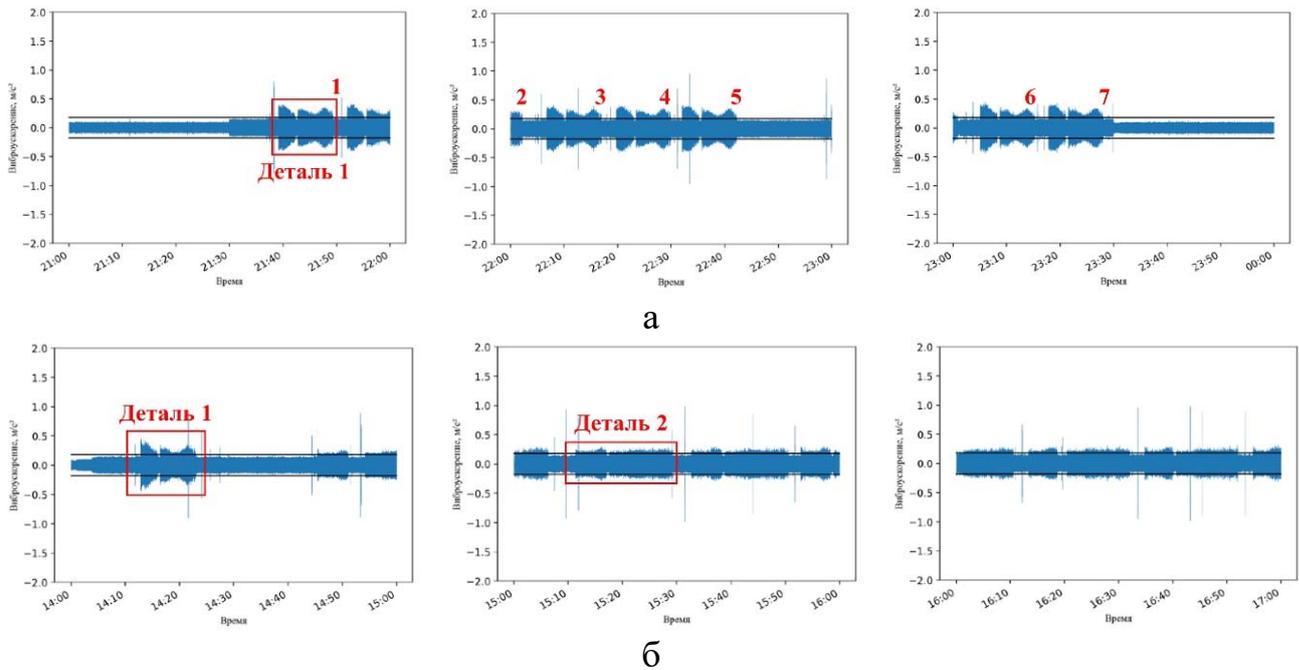


Рисунок 6.8 – Пример несоблюдения технологической дисциплины:

а – обработка детали 1; б – обработка детали 2

На рисунке 6.8, 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 6.8, 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 22 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 трудовой дисциплины и этот инцидент должен быть рассмотрен мастером участка.

Применение предложенного способа косвенного контроля состояния технологического оборудования позволяет контролировать соблюдение 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.

Предложенный вариант использования ИИС позволяет повысить эффективность технологических процессов обработки резанием за счет своевременного системного выявления отклонений технологической дисциплины.

## **6.4 Ретроспектива использования ИИС**

В ходе опытной эксплуатации ИИС были выявлены интересные случаи изменения вибрационного состояния технологических систем при изготовлении различных деталей, которые рассмотрены далее

- разрушение режущей пластины;
- изменение режимов резания оператором;
- биение заготовки;
- повышенная вибрация привода главного движения;
- отключение СОЖ во время обработки.

### **6.4.1 Разрушение режущей пластины**

Во время выполнения операции черного наружного точения произошло разрушение режущей кромки сменной пластины, при этом пластину вырвало из державки. Вибрационный сигнал, соответствующий нормальному протеканию процесса точения на указанной операции, представлен на рисунке 6.9.

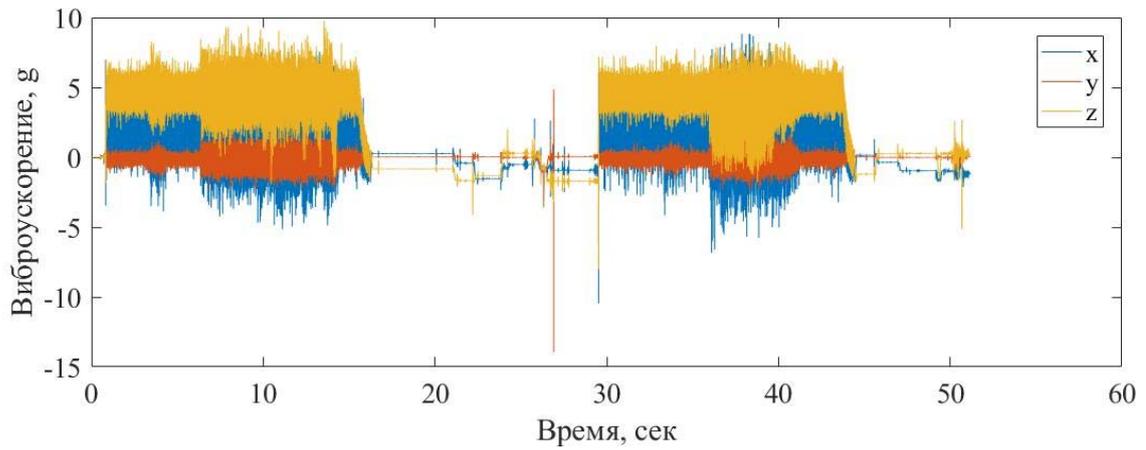


Рисунок 6.9 – Вибрационный сигнал при нормальном протекании процесса наружного чернового точения

Вибрационный сигнал, записанный в процессе разрушения режущей кромки, представлен на рисунке 6.10. Фотографии передней и задней поверхности сколотой пластины представлены на рисунке 6.11.

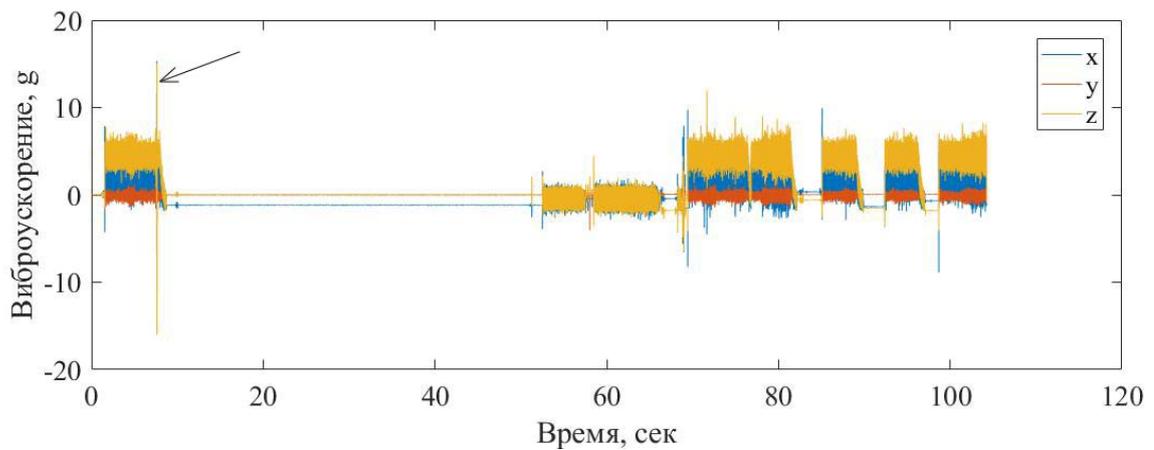


Рисунок 6.10 – Вибрационный сигнал при разрушении режущей кромки



а

б

Рисунок 6.11 – Фотография сколотой пластины:

а – передняя поверхность; б – задняя поверхность

Момент разрушения режущей кромки сменной пластины виден в районе 7-й секунды обработки на графике вибрационного сигнала, представленного на рисунке 6.10. В этот момент виден резкий всплеск вибрации по оси Z, что позволяет диагностировать подобную внештатную ситуацию и останавливать процесс обработки (при условии возможности управления станком с ЧПУ) для предотвращения аварии.

#### 6.4.2 Изменение режимов резания

В процессе обработки операторы могут менять режимы резания. На рисунке 6.12 представлен вибрационный сигнал, записанный во время работы оператора первой смены, а на рисунке 6.13 – во время работы оператора второй смены при выполнении одной и той же операции наружного точения на одной и той же единице технологического оборудования.

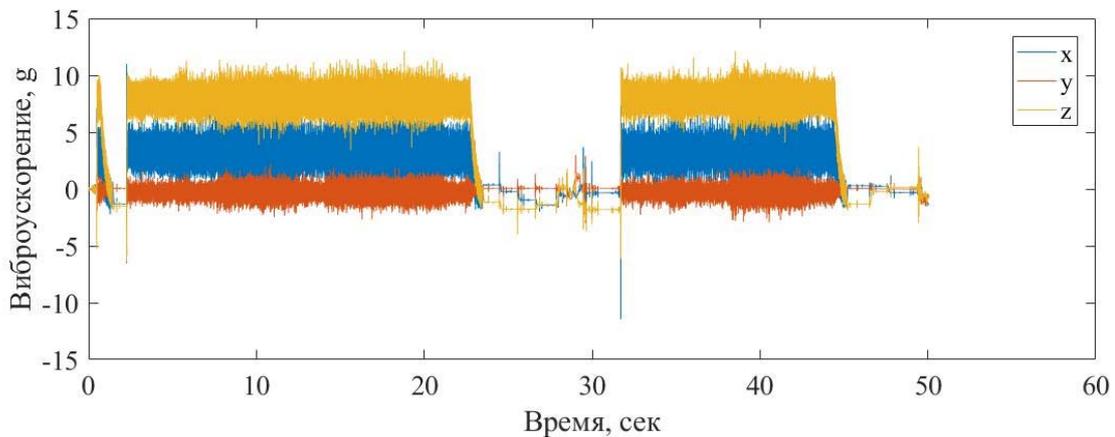


Рисунок 6.12 – Вибрационный сигнал работы оператора первой смены

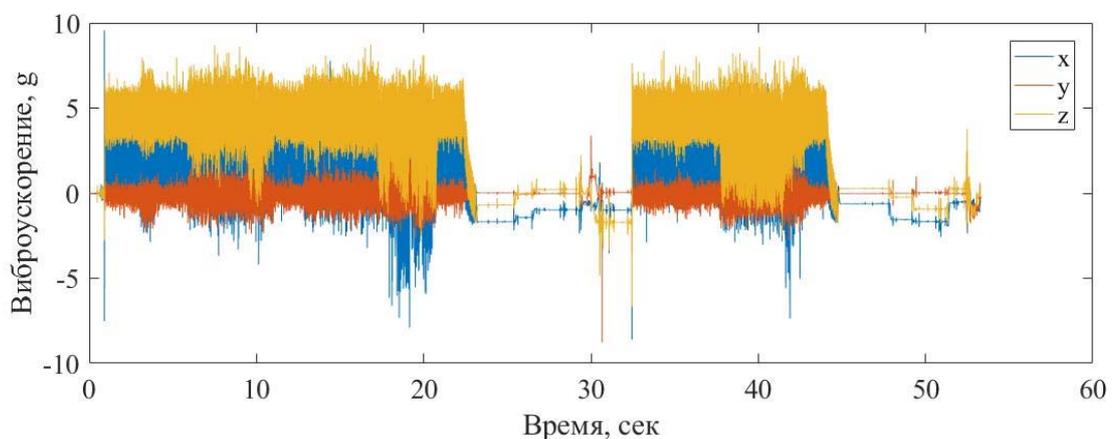
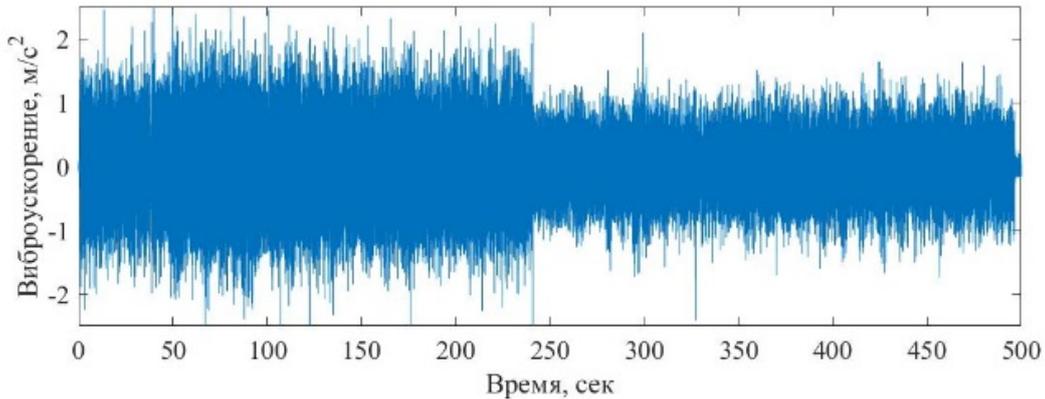


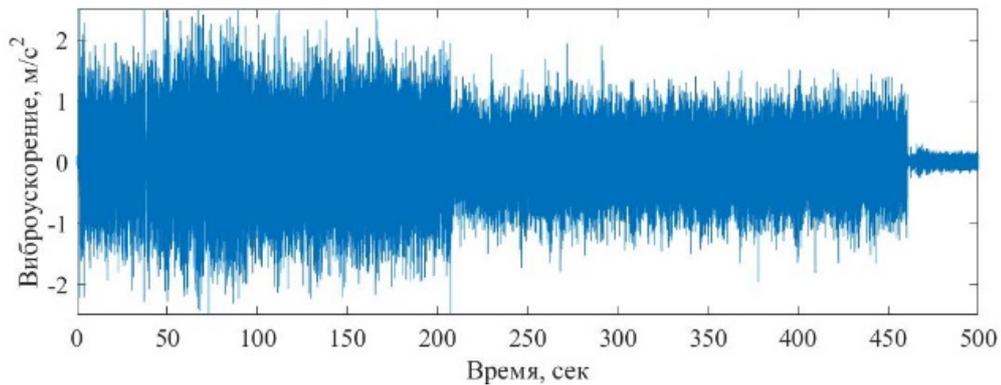
Рисунок 6.13 – Вибрационный сигнал работы оператора второй смены

Режимы резания оператора второй смены характеризуются большей скоростью резания, что приводит к увеличению вибрации в зоне резания.

Далее представлено сравнение сигналов виброускорения, записанных в процессе обработки на нормальных (рисунок 6.14, а) и ускоренных режимах резания (рисунок 6.14, б).



а



б

Рисунок 6.14 – Сигнал виброускорения при обработке:

а – на нормативных режимах резания; б – на ускоренных режимах резания

Анализ приведенных сигналов виброускорения, показывает, что сокращение времени обработки на 32 с произошло за счет изменения режимов резания на операции чистового растачивания.

Превышение нормативного времени резания обусловлено следующими факторами: необходимость подналадки и повторения части обработки после смены режущей грани пластины (рисунки 6.15–6.19); пауза в процессе резания для контроля размеров обработанной детали после смены режущей грани пластины (рисунок 6.20).

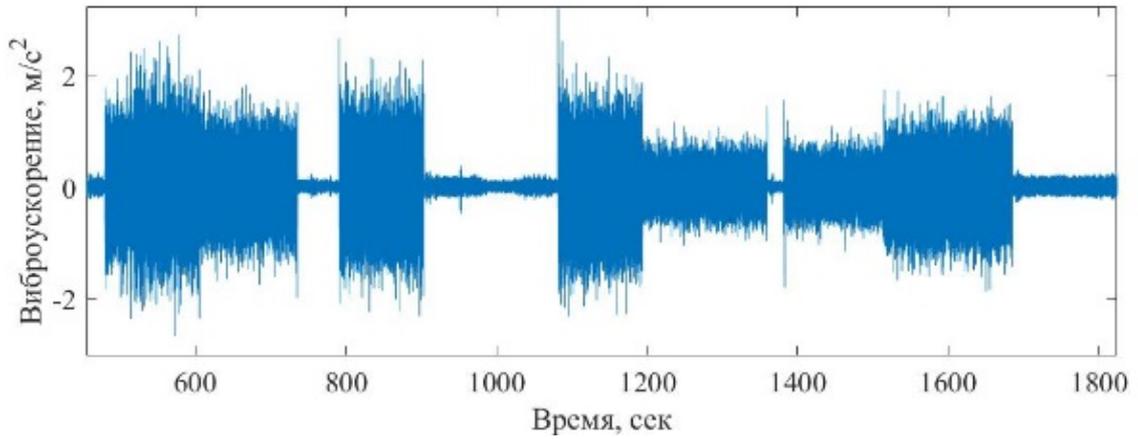


Рисунок 6.15 – Сигнал виброускорения в случае подналадки и повторения чистового растачивания и точения канавки после смены режущей грани пластины

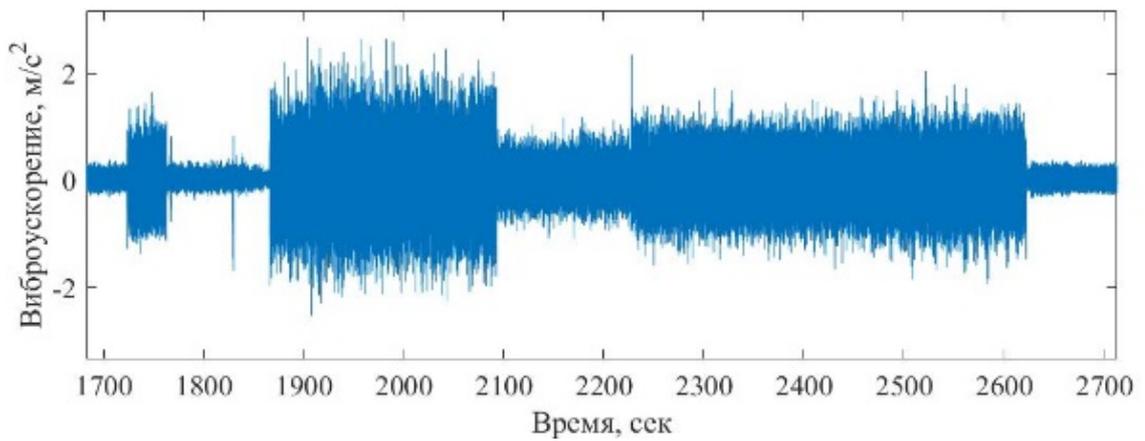


Рисунок 6.16 – Сигнал виброускорения в случае повторного нарезания резьбы

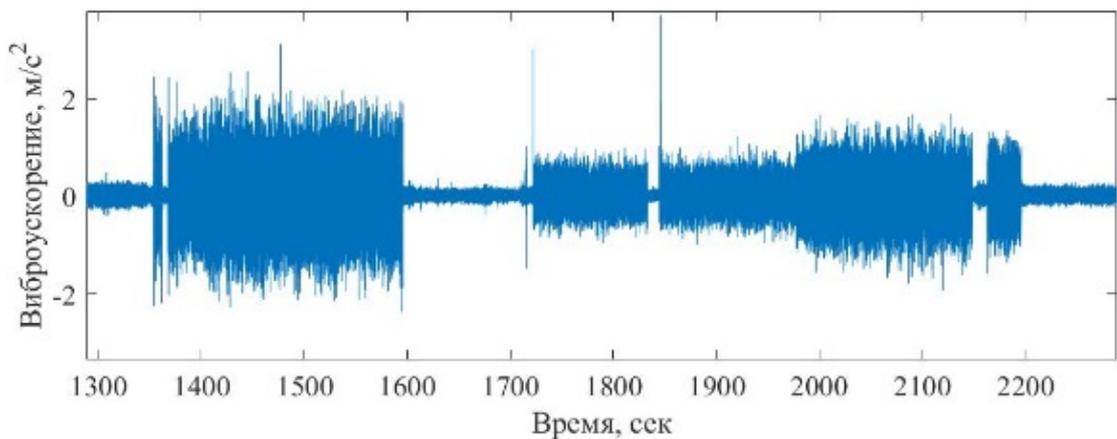


Рисунок 6.17 – Сигнал виброускорения в случае повторения точения канавки

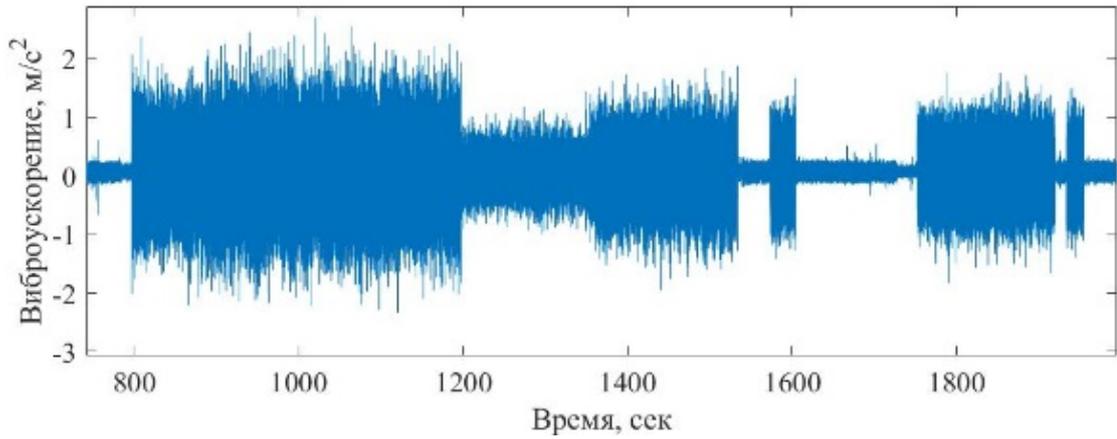


Рисунок 6.18 – Сигнал виброускорения в случае повторения нарезания резьбы

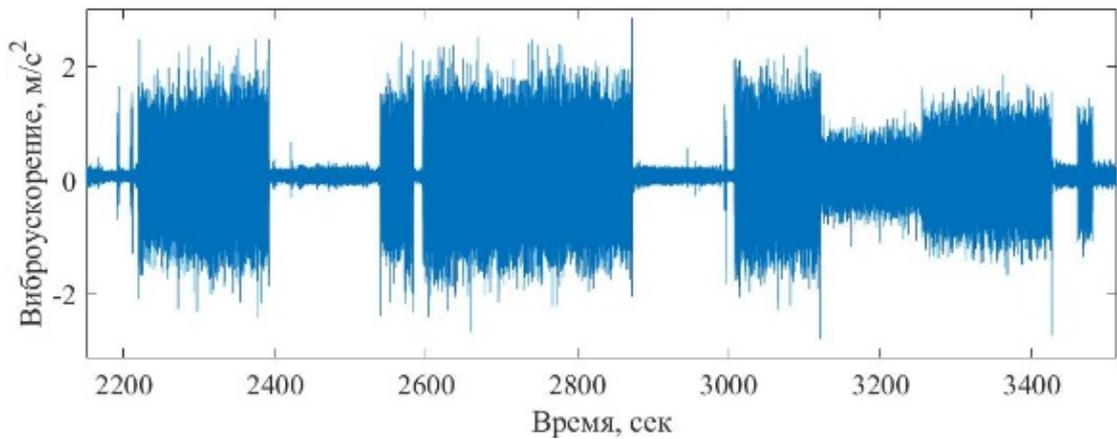


Рисунок 6.19 – Сигнал виброускорения в случае повторения растачивания

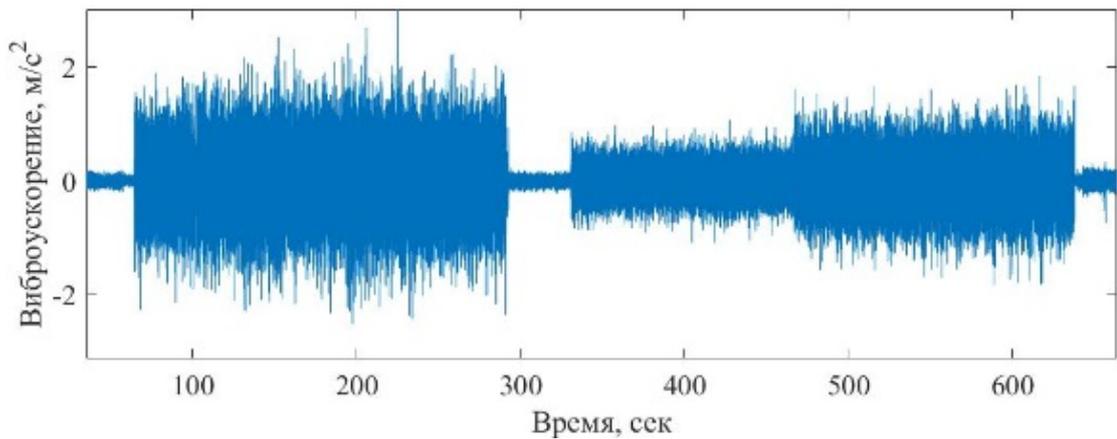


Рисунок 6.20 – Сигнал виброускорения в случае паузы в процессе резания для контроля размеров обработанной детали после смены режущей грани пластины

### 6.4.3 Биение заготовки

Качество заготовок также оказывает влияние на уровень вибрации в процессе обработки. На рисунке 6.21 представлен сигнал вибрации при обработке нормальной заготовки, а на рисунке 6.22 – при обработке заготовки с большим радиальным биением.

Повышенное радиальное биение заготовки приводит к увеличению размаха колебаний, что может быть замечено модулем сбора информации. Из 23 обработанных деталей экспериментальной партии две детали имели заметное биение – размах колебаний при обработке этих деталей был выше в два раза, чем у остальных деталей экспериментальной партии.

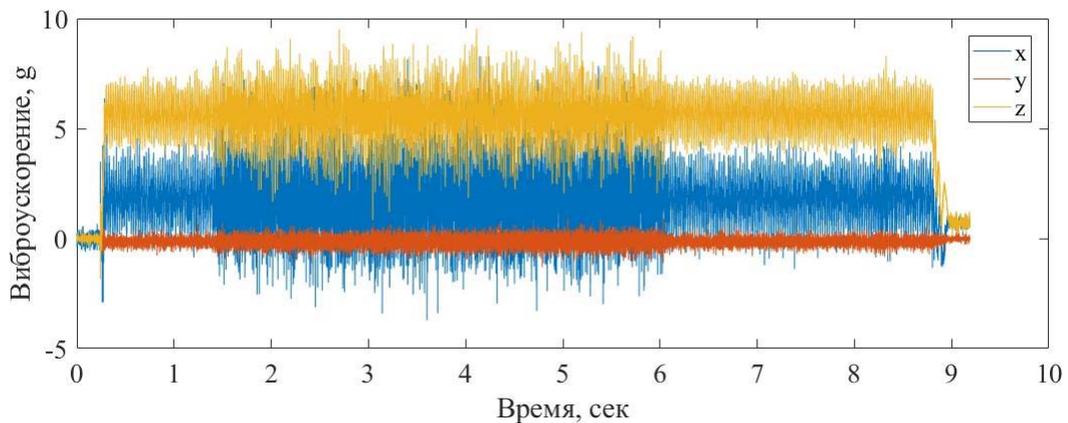


Рисунок 6.21 – Сигнал вибрации при обработке нормальной заготовки

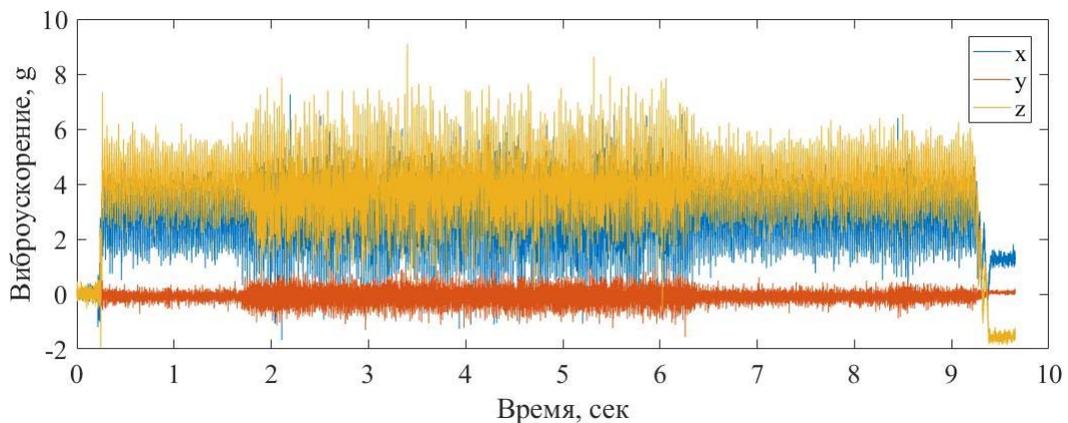


Рисунок 6.22 – Сигнал вибрации при обработке заготовки с большим радиальным биением

#### 6.4.4 Ослабление крепления электродвигателя

В процессе записи вибрационного сигнала при выполнении обработки на токарном станке с ЧПУ ТМ-39М были зафиксированы большие размахи колебаний на высокой частоте вращения шпинделя (рисунок 6.23).

Вибрационный сигнал, приведенный на рисунке 6.23, показал наличие дисбаланса в приводе главного движения. Последующая вибродиагностика станочного оборудования показала ослабление крепления электродвигателя привода главного движения.

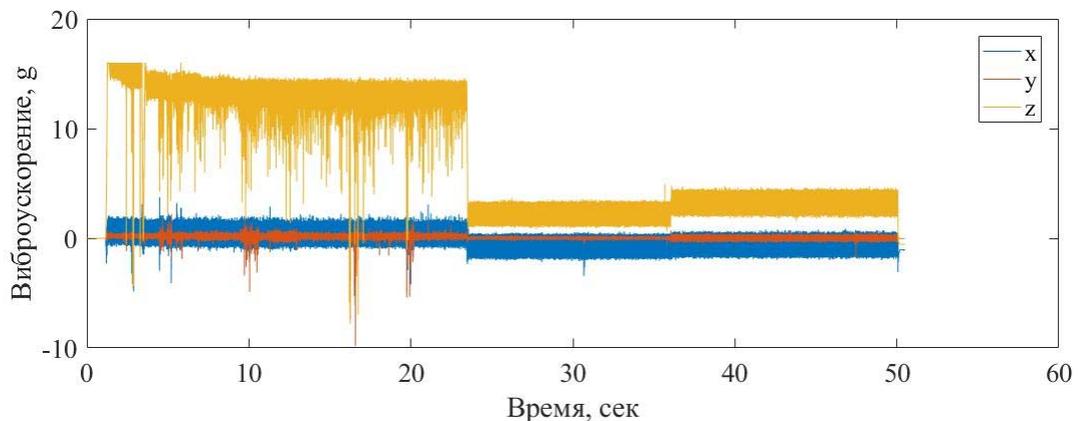


Рисунок 6.23 – Вибрационный сигнал токарного станка с ЧПУ ТМ-39М

Хотя возможностей ИИС недостаточно для точного диагностирования дефектов привода главного движения, с его помощью возможно оценить общее состояние процесса резания и при необходимости провести более детальную диагностику.

#### 6.4.5 Отключение СОЖ во время обработки

Во время обработки одной из деталей на токарном станке с ЧПУ ТМ-39М произошло отключение подачи СОЖ в зону резания из-за засора в трубке подачи СОЖ. На рисунке 6.24 представлен вибрационный сигнал в процесс обработки с использованием СОЖ, а на рисунке 6.25 – без использования СОЖ.

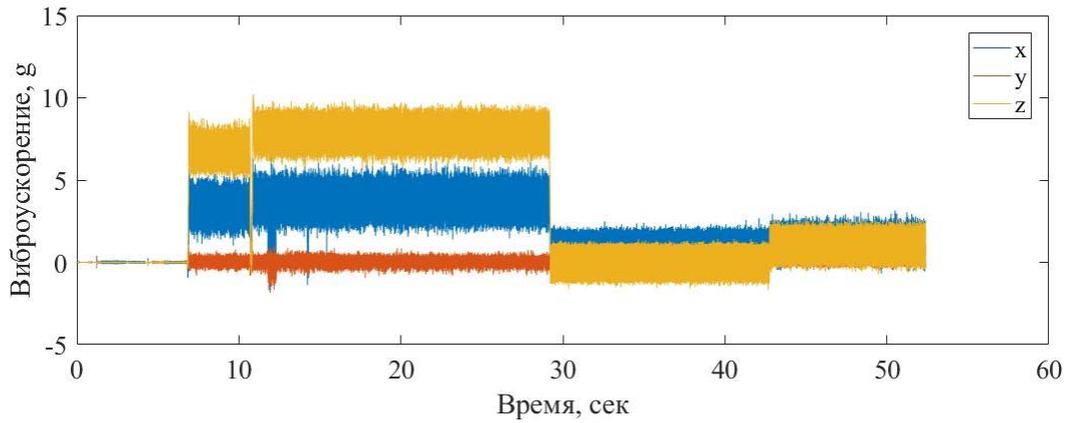


Рисунок 6.24 – Вибрационный сигнал в процессе обработки с использованием СОЖ

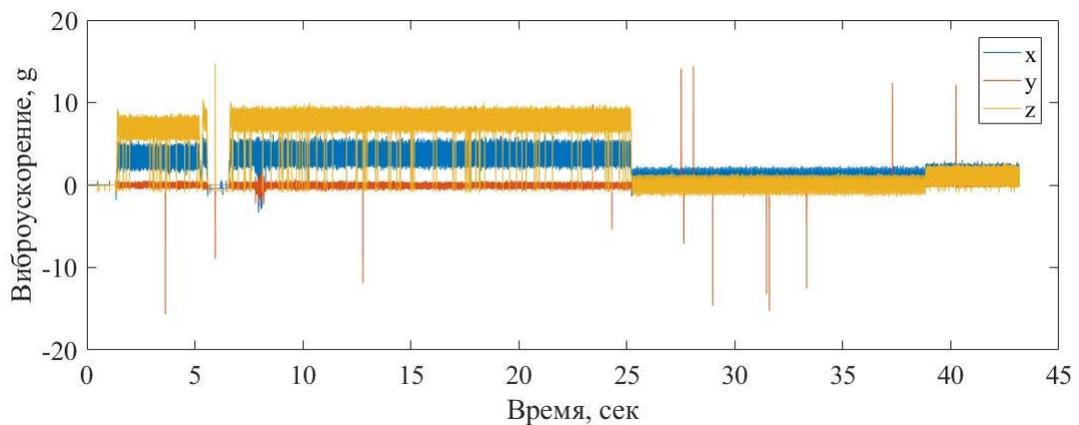


Рисунок 6.25 – Вибрационный сигнал в процессе обработки без использования СОЖ

В процессе обработки без использования СОЖ появились импульсные пульсации вибрации, отсутствующие при обработке с использованием СОЖ и свидетельствующие о проблемах обработки, что может быть диагностировано модулем сбора информации, и оператору станка может быть выдано предупреждение.

## 6.5 Перспективы и тенденции развития ИИС

В завершение работы стоит отметить, что оборудование и задачи, которые оно выполняет, становятся сложнее и разнообразнее, что требует развития и способов контроля его работы, поэтому можно выделить следующие перспективы и тенденции развития ИИС оперативного косвенного контроля технологических систем машиностроительных производств в России, с учетом рассмотренных работ [235,

236, 237, 238, 239]:

1. Объединение средств управления, мониторинга и диагностики в единую ИИС. Для этого требуется принципиально новые скорости процессов диагностики с повышением её достоверности.

2. Масштабирование систем мониторинга. Кратное увеличение объектов контроля и числа физических процессов. Расширение частотного диапазона и числа точек контроля вибрации машин.

3. Использование превентивных методов диагностики. Индивидуальные алгоритмы и точки контроля вибрации для обнаружения дефектов на этапе зарождения для критически важных узлов оборудования.

4. Использование предиктивной аналитики. Применение алгоритмов обработки статистических данных на основе ИИС для формирования трендов состояния оборудования и выдача обоснованных управленческих решений.

5. Применение систем цифровых меток, которые обеспечивают хранение технической документации, информации о техническом состоянии объекта, о результатах предыдущего анализа технического состояния.

6. Использование систем дистанционного отслеживания функциональных параметров объектов. Например, системы, позволяющие в реальном времени отслеживать основные рабочие параметры оборудования.

7. Создание простых и недорогих ИИС, удовлетворяющих требованиям нормативно-правовых документов и конкурентоспособных на мировом рынке.

8. Создание цифровых двойников технологических процессов и технологического оборудования.

При этом нельзя не отметить некоторые сложности, возникающие при внедрении в производство, которые стоит учитывать при развитии направления ИИС:

1. Человеческий фактор и низкая мотивация сотрудников предприятий, как следствие – выведение из строя и порча элементов ИИС.

2. Масштабирование ИИС приводит к увеличению перечня и объемов технической информации, а поиск нужных сведений может занять много времени.

3. Проверка достоверности полученных от ИИС данных и их верификация.

4. Отсутствие единого стандарта протоколов и единства типов оборудования, то есть отсутствие централизованной системы управления, и как следствие, данные собираются из разных систем и устройств.

5. Сложности с интеграцией в системы планирования производства.

## 6.6 Выводы

В ходе опытной эксплуатации ИИС на предприятии выполняла следующие задачи: контроль работы технологического оборудования; контроль соблюдения технологической дисциплины на производстве; оптимизация режимов резания технологического процесса обработки детали; проведение сравнительных испытаний при внедрении нового режущего инструмента в производство с учетом уровня вибрации. При этом были выявлены интересные случаи изменения вибрационного состояния технологических систем при изготовлении различных деталей.

Таким образом, в разделе рассмотрены различные случаи нарушения технологической дисциплины, связанные с изменением режимов резания, работой оборудования на холостом ходу или попытками имитации работы оборудования.

Также рассмотрены различные варианты изменения вибрационного сигнала, контролируемого ИИС, связанного с разрушением режущего инструмента, биением заготовок, отключением СОЖ во время резания или ослаблением крепления некоторых элементов станка.

Исходя из вышеизложенного, метод повышения эффективности можно свести к следующим укрупненным шагам:

- внедрение ИИС;
- обучение персонала работе с ИИС;
- контроль, и как следствие, повышение технологической дисциплины;
- выбор/подбор корректного инструмента и оптимизация режимов резания.

Применение предложенного метода повышает эффективность машиностроительных предприятий за счет рационального использования оборудования, инстру-

мента, производственных и человеческих ресурсов, благодаря контролю 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;
- возможности своевременно принимать управленческие решения, основанные на фактических достоверных данных.

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, что составило в ценах 2023 г. 52 250 687,33 руб. (100 % из них далее) в год за счет: снижения затрат на простои в отчетный период (10,5 %); снижения потерь от сокращения продолжительности переналадок оборудования (0,2 %); снижения потерь от сокращения количества переналадок оборудования (9,6 %); снижения 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 продукции на оборудовании (5,6 %) (Приложение Д).

## 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 ИНС 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 ИНС 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.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 ГОСТ 27.004-85. Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения: государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 31.01.1985 № 234: – Дата введения: 1986-07-01. – М.: Издво стандартов, 1986. – 13 с.

2 Шубинский, И.Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа / И.Б. Шубинский. – М.: ООО «Журнал Надежность», 2012. – 296 с.

3 Павлов, Е.О. Производственные системы: теоретические аспекты функционального анализа и перспективы инновационного развития / Е.О. Павлов, В.А. Монахов // Российское предпринимательство. – 2018. – Т. 19, № 10. – С. 3029-3040.

4 Егоров, В.Н. Экономические проблемы надежности производственных систем / В.Н. Егоров. – М.: Наука, 1990. – 80 с.

5 Зеркин, Д.Г. Концепция управления производственной системой в современных условиях / Д.Г. Зеркин // Вестник университета (государственный университет управления). – 2015. – № 10. – С. 28-31.

6 Дручевская, И.А. Внедрение системы бережливого производства на российских предприятиях / И.А. Дручевская // Электронный научный журнал «European Student Scientific Journal»: электр. версия. 2014. – № 3.; URL: <https://sjes.esrae.ru/ru/article/view?id=282> (дата обращения: 14.08.2024). – Режим доступа: свободный.

7 ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 октября 2016 г. № 1445-ст: взамен ГОСТ Р ИСО 6385-2007: дата введения 2017-12-01 / подготовлен Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский

центр контроля и диагностики технических систем» (АО «НИЦ КД»). – Москва: Стандартиформ, 2016. – IV, 15 с.

8 Давыдова, Н.С. Бережливое производство: монография / Н.С. Давыдова. – Ижевск: Изд-во Института экономики и управления ФГБОУ ВПО «УдГУ», 2012. – 138 с. – URL: <http://elibrary.udsu.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/9803/2012513.pdf?sequence=1> (дата обращения: 14.08.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

9 Гапоненко, А.Л. Стратегическое управление [анализ среды управления, конкретные преимущества, партнерство и распределение функций, планирование и контроль]: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Менеджмент организации» / А. Л. Гапоненко, А. П. Панкрухин. – 5-е изд., стер. – М.: Омега-Л, 2011. – 463 с.

10 Фатхутдинов, Р.А. Конкурентоспособность: экономика, стратегия, управление / Р.А. Фатхутдинов. – М.: Инфра-М, 2000. – 312 с.

11 Сафиуллин, Н.З. Управление конкурентоспособностью предприятий: монография / Н.З. Сафиуллин, Л.Н. Сафиуллин. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2008. – 189 с.

12 Моисеева, Н.К. Современное предприятие: конкурентоспособность, маркетинг, обновление / Н.К. Моисеева, Ю.П. Анискин. – М.: Внешторгиздат, 1993. – Т.1. – 222 с., – Т.2. – 304 с.

13 Швец, В.Е. Менеджмент качества в системе современного менеджмента / В.Е. Швец // Стандарты и качество. – 1997. – № 6. – С. 48-50.

14 Концепция производственного контроля Шухарта // Образовательный портал «Справочник». Дата написания статьи: 19.02.2023. – URL: [https://spravochnick.ru/upravlenie\\_kachestvom/koncepciya\\_proizvodstvennogo\\_kontrol\\_ua\\_shuharta](https://spravochnick.ru/upravlenie_kachestvom/koncepciya_proizvodstvennogo_kontrol_ua_shuharta) (дата обращения: 15.07.2024).

15 Эволюция принципов всеобщего качества (TQM) // AntonPiskun.pro. – URL: <https://www.antonpiskun.pro/evolyucziya-princzipov-vseobshhego-kachestva-tqm> (дата обращения: 15.07.2024).

16 Александров, Г.А. Инновационное обновление основного капитала предприятий как одно из условий безопасности России / Г.А. Александров, Д.В. Розов // *Вопр. истории естеств. и техники.* – 2013. – № 3. – С. 2-12.

17 Мосалёв, А.И. Процессные инновационные проекты в развитии организации / А.И. Мосалёв // *Современная экономика: проблемы, тенденции, перспективы.* – 2011. – № 4. – С. 73-79.

18 Менш, Г. Базисные инновации и инновации совершенствования / Г. Менш // *Журнал экономики предприятия.* – 1972. – № 42. – С. 291-297.

19 Пешков, Г.Ф. Управление производством (формы, методы, технические средства) / Г.Ф. Пешков, Н.П. Мешкозой, И.А. Баев. – Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 1974. – 205 с.

20 Гапоненко, А.Л. Актуальные тенденции развития современного менеджмента в условиях глобализации / А.Л. Гапоненко, М.В. Савельева // *SSRN.* – М.: 2015. – 95 с. URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2624571> (дата обращения: 15.07.2024).

21 Гапоненко, А.Л. Предпосылки успеха организаций и территорий в экономике знаний / А.Л., Гапоненко М.В. Савельева // *Проблемы теории и практики управления.* – 2017 – № 1. – С. 52-58.

22 Глазьев, С.Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития / С.Ю. Глазьев. – М.: ВладДар, 1993. – 310 с.

23 Глазьев, С.Ю. Экономика будущего. Есть ли у России шанс? / С.Ю. Глазьев. – М.: Книжный мир, 2017. – 640 с.

24 Вклад Г. Форда в развитие менеджмента // Образовательный портал «Справочник». Дата написания статьи: 30.09.2020. – URL: [https://spravochnick.ru/menedzhment/vklad\\_g\\_forda\\_v\\_razvitie\\_menedzhmenta](https://spravochnick.ru/menedzhment/vklad_g_forda_v_razvitie_menedzhmenta) (дата обращения: 15.07.2024).

25 Савинов, А.В. Принципы и особенности управления Генри Форда / А.В. Савинов. – Текст: электронный // *Материалы XIV Междунар. студ. науч. конф. Студенческий научный форум – 2022, (г. Сочи, 2-7 ноября 2022 г.)* – URL: <https://scienceforum.ru/2022/article/2018029925>. (дата обращения: 15.07.2024).

26 Школы стратегии / Г. Минцберг [и др.] ; пер. с англ. под ред. Ю.Н. Каптуревского. – СПб: Изд. «Питер», 2000. – 336 с.

27 Стратегическое и оперативное управление промышленными предприятиями: учебное пособие / О.В. Логиновский [и др.]; под ред. О.В. Логиновского. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – 325 с.

28 Chandler, A.D., Jr. Strategy and Structure: Chapters in the History of the Industrial Enterprise / A.D. Chandler, Jr., John L. Enos, Tomas Roberto Fillol. – Cambridge, MA: MIT Press, 1962. – 297 p.

29 Цыганов, В.В. Интеллектуальное предприятие: механизмы овладения капиталом и властью (теория и практика управления эволюцией организации) / В.В. Цыганов, В.А. Бородин, Г.Б. Шишкин. – М.: Университетская книга, 2004. – 768 с.

30 Кульба, В.В. Теоретические основы информационного управления / В.В. Кульба, С.А. Косяченко, В.В. Цыганов // Информационные войны. – №2(6). – 2008. – С. 16-25.

31 Планирование и реализация информационного управления / В.В. Кульба, Д.А. Кононов, С.А. Косяченко, В.В. Цыганов [и др.] // Информационные войны. – 2010. – №3 (15). – С. 59–69.

32 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.

33 Методы планирования и управления техногенной безопасностью на основе сценарного подхода / В.Л. Шульц, В.В. Кульба, И.В. Чернов [и др.]. // Национальная безопасность/Nota Bene. – 2013.– №2 (25). – С. 198-216.

34 Организационное управление: учебное пособие для вузов / Н.И. Архипова, В.В. Кульба В.В., С.А. Косяченко [и др.]. – М.: РГГУ, 2007. – 733 с.

35 Информационное обеспечение систем организационного управления (теоретические основы): в 3 ч. Ч.1. Методологические основы организационного управления / Е.А. Микрин, В.В. Кульба, С.А. Косяченко и др. – М.: Физматлит, 2011. – 464 с.

36 Александров, Д.В. Распределенные информационные системы. CASE-технологии реинжиниринга : учеб. пособие / Д. В. Александров, А. В. Костров. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2001. – 136 с.

37 Александров, Д.В. Онтологический подход к созданию системы управления бизнес-процессами предприятия, основанной на знаниях / Д. В. Александров, Н. Н. Жебрун // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13. – № 1 А. – С. 26-32.

38 Александров, Д.В. Методология моделирования распределенных систем управления бизнес-процессами макропредприятий: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Александров Дмитрий Владимирович; Владимир. гос. ун-т. – Владимир, 2009. – 320 с.

39 Мышенков, К.С. Методика обоснования выбора CASE-средств для анализа и проектирования систем управления предприятиями / К.С. Мышенков // Инновации. – 2013. – № 10. – С. 112-122.

40 Макаров, В.М. Диверсификация управления производством на промышленных предприятиях в условиях динамичного спроса (теория, методы, алгоритмы) : специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством: экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами (промышленность)» : диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук / Макаров Василий Михайлович; Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. – Санкт-Петербург, 2002 – 370 с.

41 Макаров, В.М. Инновационная сущность диверсификации планирования производства с учётом динамичного спроса / В.М. Макаров // Инновации. – 2002. – №9/10(56/57). – С. 118-124.

42 Макаров, Р.И. Методология проектирования информационных систем: учеб. пособие / Р. И. Макаров, Е. Р. Хорошева. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 334 с. URL: <http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/1284> (дата обращения: 15.07.2024). – Дата публикации: 2008.

43 Ицкович, А.А. Эффективность процессов технической эксплуатации летательных аппаратов: учебно-методическое пособие по изучению дисциплины и выполнению контрольной работы / А.А. Ицкович, И.А. Файнбург, Г.Д. Файнбург. – М. : ИД Академии Жуковского, 2018. – 40 с.

44 Авиженис, А. Отказоустойчивость – свойство, обеспечивающее постоянную работоспособность цифровых систем / А. Авиженис // Труды института инженеров по электронике и радиоэлектронике. – 1978. – Т. 66. – № 10. – С. 5-25.

45 Мухопад Ю.Ф. Теория управляющих автоматов сложных технических систем реального времени / Ю.Ф. Мухопад. – Новосибирск: Наука, 2015. – 175 с.

46 Мухопад, Ю.Ф. Теория дискретных устройств: учеб. пособие / Ю. Ф. Мухопад. – Иркутск : ИрГУПС, 2010. – 172 с. URL: <https://f.eruditor.link/file/488770> (дата обращения 15.07.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

47 Мухопад, Ю.Ф. Микроэлектронные системы управления : учебно-методическое пособие / Ю. Ф. Мухопад. – Текст: электронный // Международный журнал экспериментального образования. – 2009. – № 4. – С. 19. URL: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=67> (дата обращения: 15.07.2024).

48 Мухопад, Ю.Ф., Структура управляющих автоматов Технических систем железнодорожной автоматики / Ю.Ф. Мухопад, Д.Ц. Пунсык-Намжилов. - Текст: электронный // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т.4. – №1. – С. 88-105. URL: <https://ebsvkr.ru/ru/nauka/article/81884/view> (дата обращения: 15.07.2024).

49 Мухопад, Ю.Ф. Мажоритарное резервирование управляющих автоматов нового типа / Ю.Ф. Мухопад, А.Ю. Мухопад, Д.Ц. Пунсык-Намжилов. – DOI: 10.26731/2658-3704.2019.4(5).39-48. – Текст: электронный // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами: электрон. науч. журн. – 2019. – №4(5). – С. 39-48. – URL: <http://ismmirgups.ru/toma/45-2019> (дата обращения: 20.07.2024).

50 Слабаков, Е.В., Самопроверяемые вычислительные устройства и системы (обзор) / Е.В. Слабаков, Е.С. Согомонян // Автоматика и телемеханика. – 1981. – №11. – С. 147–167.

51 Fujiwara, E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications / Eiji Fujiwara. – DOI:10.1002/0471792748. – [s.l.]: John Wiley & Sons, 2006. – 720 p. Электрон. копия печ.изд. – URL: <https://www.wiley.com/en-us/9780471756187> (дата обращения: 20.07.2024). – Доступна на сайте: Wiley Online Library. – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

52 Кодирование информации (двоичные коды): справочник / Н.Т. Березюк, А.Г. Андрущенко, С.С. Мощицкий [и др.]; под ред. Н.Т. Березюка. – Харьков: Изд-во при Харьковском государственном университете издательского объединения «Вища школа», 1978. – 252 с.

53 Nikolos, D. Self-testing embedded two-rail checkers / D. Nikolos. – DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008281822966> // J. of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1998. – Vol. 12, No. 1–2. – P. 69–79. – URL: [https://www.academia.edu/60432791/Self\\_Testing\\_Embedded\\_Two\\_Rail\\_Checkers?uc-sb-sw=3273658](https://www.academia.edu/60432791/Self_Testing_Embedded_Two_Rail_Checkers?uc-sb-sw=3273658) (дата обращения: 20.07.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

54 Huang, S.-J. Optimization of analogy weights by genetic algorithm for software effort estimation / S.-J. Huang, N.-H. Chiu. – DOI:10.1016/j.infsof.2005.12.020 // Information and Software Technology. – 2006. – Vol. 48, No. 11. – P. 1034–1045. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/223233028\\_Optimization\\_of\\_analogy\\_weights\\_by\\_genetic\\_algorithm\\_for\\_software\\_effort\\_estimation](https://www.researchgate.net/publication/223233028_Optimization_of_analogy_weights_by_genetic_algorithm_for_software_effort_estimation) (дата обращения: 20.07.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

55 Bouchachia, A. An Immune Genetic Algorithm for Software Test Data Generation / A. Bouchachia. – DOI: 10.1109/HIS.2007.37 // 7th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS 2007), Kaiserlautern, 17-19 September 2007. – Kaiserlautern, Germany: IEEE, 2007. – P. 84–89. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4344032/authors#authors> (дата обращения: 20.07.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

56 Aljahdali, S.H. Software reliability prediction using multi-objective genetic algorithm / S.H. Aljahdali, M.E. El-Telbany. – DOI:10.1109/AICCSA.2009.5069339 // The 7th IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, Rabat, 10-13 May 2009. – Rabat, Morocco: IEEE, 2009. – P. 293–300. – URL:

[https://www.researchgate.net/publication/221429524\\_Software\\_Reliability\\_Prediction\\_Using\\_Multi-Objective\\_Genetic\\_Algorithm](https://www.researchgate.net/publication/221429524_Software_Reliability_Prediction_Using_Multi-Objective_Genetic_Algorithm) (дата обращения: 20.07.2024).

57 Karaboga, D. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm / D. Karaboga, B. Basturk. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x> // J. of Global Optimization. – 2007. – Vol. 39, – P. 459 – 471. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/225392029\\_A\\_powerful\\_and\\_efficient\\_algorithm\\_for\\_numerical\\_function\\_optimization\\_Artificial\\_bee\\_colony\\_ABC\\_algorithm](https://www.researchgate.net/publication/225392029_A_powerful_and_efficient_algorithm_for_numerical_function_optimization_Artificial_bee_colony_ABC_algorithm) (дата обращения: 20.07.2024).

58 Holland, John H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence / John H. Holland. – DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/1090.001.0001>. – Cambridge: 1<sup>st</sup> MIT Press ed, 1992. – 211 p. Электрон. копия печ. изд. – URL: [http://repo.darmajaya.ac.id/3794/1/Adaptation%20in%20Natural%20and%20Artificial%20Systems\\_%20An%20Introductory%20Analysis%20with%20Applications%20to%20Biology%2C%20Control%2C%20and%20Artificial%20Intelligence%20%28A%20Bradford%20Book%29%20%28%20PDFDrive%20%29.pdf](http://repo.darmajaya.ac.id/3794/1/Adaptation%20in%20Natural%20and%20Artificial%20Systems_%20An%20Introductory%20Analysis%20with%20Applications%20to%20Biology%2C%20Control%2C%20and%20Artificial%20Intelligence%20%28A%20Bradford%20Book%29%20%28%20PDFDrive%20%29.pdf) (дата обращения: 20.07.2024).

59 Курейчик, В.М. Эволюционное проектирование на основе численно-аналитических моделей / В. М. Курейчик, А. И. Гулевич, Л. А. Зинченко // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 2002. – № 1. – С. 8-13.

60 Курейчик, В.М. Повышение эффективности эволюционного проектирования электронных устройств на основе иерархического конструирования численно-аналитических моделей / В.М. Курейчик, А.И. Гулевич, Л.А. Зинченко – Текст: электронный // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2002. – №3. – С. 82-88. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-evolyutsionnogo-proektirovaniya-elektronnyh-ustroystv-na-osnove-ierarhicheskogo-konstruirovaniya> (дата обращения: 18.08.2024).

61 Liu, W. Path Planning Methods in an Environment with Obstacles (A Review) / W. Liu – DOI:[10.24108/mathm.0118.0000098](https://doi.org/10.24108/mathm.0118.0000098) // Mathematics and Mathematical Modeling. – 2018. – No. 01. – pp. 15–58. – URL: <https://www.researchgate.net/publica->

tion/326894949\_Path\_Planning\_Methods\_in\_an\_Environment\_with\_Obstacles\_A\_Review (дата обращения: 18.08.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

62 Russell, S.J., Artificial intelligence: A modern approach. / S.J. Russell, P. Norvig. – 4rd ed. – New Jersey: Upper Saddle River, Pearson Education, 2010. – 1136 p. URL: <https://dl.ebooksworld.ir/books/Artificial.Intelligence.A.Modern.Approach.4th.Edition.Peter.Norvig.%20Stuart.Russell.Pearson.9780134610993.EBooksWorld.ir.pdf> (дата обращения: 18.08.2024).

63 Тейлор, Ф.У. Принципы научного менеджмента: монография / Ф.У. Тейлор. – М.: Контроллинг, 1991. – 104 с.

64 Gilbreth, F.B. Fatigue Study. The Elimination of Humanity's Greatest Unnecessary Waste: A First Step in Motion Study / F. B. Gilbreth, L.M. Gilbreth. – N. Y.: The Macmillan Company: Forgotten Books, 1919. – 137 p. – Электрон. копия печ. изд. – URL: <https://www.gutenberg.org/cache/epub/67908/pg67908-images.html> (дата обращения: 18.08.2024).

65 Как мать 12 детей придумала для нас кухню мечты и стала родоначальницей эргономики // Офиц. канал сайта [www.eva.ru](http://www.eva.ru). Дата написания статьи: 15.05.2024. – URL: <https://eva.ru/istorii-i-mneniya/kak-mat-12-detej-pridumala-dlyanas-kukhnyu-mechty-i-stala-rodonachal-nicej-ehrgonomiki> (дата обращения: 15.07.2024).

66 Концепция производственного контроля Шухарта // Образовательный портал «Справочник». – Дата написания статьи: 19.02.2023. – URL [https://spravochnick.ru/upravlenie\\_kachestvom/konceptsiya\\_proizvodstvennogo\\_kontrol\\_ua\\_shuharta/](https://spravochnick.ru/upravlenie_kachestvom/konceptsiya_proizvodstvennogo_kontrol_ua_shuharta/) (дата обращения: 25.07.2024).

67 Как управлять качеством: 14 советов Эдвардса Деминга // журнал Контур, офиц. сайт: <https://kontur.ru>. – Дата написания статьи 21.02.2021 – URL: <https://kontur.ru/articles/264> (дата обращения 15.07.2024).

68 Бухалков, М.И. Система взаимодействия организации труда и производства на предприятии // Организатор производства. – 2007. – №2 (33). – С.3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-vzaimodeystviya-organizatsii-truda-i->

производства-na-predpriyatii (дата обращения: 05.07.2024).

69 Одегов, Ю.Г. Оценка эффективности работы с персоналом: методологический подход: уч.-практ. пособие / Ю.Г. Одегов, К.Х. Абдурахманов, Л.Р. Котова. – М.: Издательство «Альфа-Пресс», 2011. – 752 с.

70 Одегов, Ю.Г. Управление персоналом: оценка эффективности: учебное пособие / Ю. Г. Одегов, Л.В. Карташова. – М.: Экзамен, 2004. – 256 с.

71 Гармидер, Л.Д. Принципы развития кадрового потенциала предприятия / Л. Д. Гармидер. – Текст : непосредственный // Экономическая наука и практика : материалы I Междунар. науч. конф., г. Чита, февраль 2012 г. – Чита: Издательство Молодой ученый, 2012. – С. 133-136. – URL: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/14/1745/> (дата обращения: 05.07.2024).

72 Травин, В.В. Управление человеческими ресурсами. Модуль IV: учебно-практическое пособие – (Модульная программа «Руководитель XXI века») / В.В. Травин, М.И. Магура, М.Б. Курбатова. Текст: электронный. – Москва : Дело РАН-ХиГС, 2015. – 157 с. – ISBN 978-5-7749-1100-4. – URL: <https://www.ibooks.ru/bookshelf/366432/reading> (дата обращения: 18.08.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

73 Травин, В.В. Менеджмент персонала предприятия / В.В. Травин, В.А. Дятлов. – 5-е изд. – М.: Дело, 2000. – 271 с.

74 Егоршин, А.П. Управление персоналом : учеб. для вузов. / А.П. Егоршин. – 4-е изд., испр. – Нижний Новгород : НИМБ, 2003. – 720 с.

75 Егоршин, А.П. Основы управления персоналом : учебное пособие / А. П. Егоршин. – 4-е изд., перераб. и доп. – DOI: 10.12737/1685. – Текст: электронный. – Москва : ИНФРА-М, 2024. – 352 с. – URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2113856> (дата обращения: 18.08.2024). – Режим доступа: по подписке.

76 Шаталова, Н.И. Система трудового потенциала работника / Н.И. Шаталова // Социологические исследования. – 1999. – № 3. – С. 51-54.

77 Хакен, Г. Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам: пер. с англ. – 3-е изд., испр. и знач. доп. – М.: URSS: Ленанд, 2014. – 317 с. – ISBN 5-03-001913-8. – (Синергетика: от прошлого к будущему;

№ 19) (Springer Series in Synergetics; vol. 40).

78 Mandelbrot, Benoit B. The fractal geometry of Nature / Benoit B. Mandelbrot. – 2nd prt. Edition. – San Francisco : W. H. Freeman, 1982. – 468 p. – URL: <https://archive.org/details/fractalgeometryo00beno> (дата обращения: 18.08.2024). Режим доступа: для зарег. пользователей.

79 Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. / А.А. Самарский, А.П. Михайлов – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.

80 Самарский, А.А. Вести широкую пропаганду идей и методов вычислительного эксперимента / А.А. Самарский // Вестник АН СССР. – 1981. – №3. – С. 61-65.

81 Samarskii, A.A. Moderne angewandte Mathematik und numerisches Experiment / A.A. Samarskii // Wiss. Z.d.Techn. Hochsch. Karl-Markx-Stadt. – 1985. – №27. – Н. 2. – Рр. 176-186.

82 Петровский А.Б. Теория принятия решений: учебник для студ. Высш. Учеб. Заведений / А.Б. Петровский. – М: Издательский центр «Академия», 2009. – 400 с.

83 Петровский, А.Б. Основные понятия теории мультимножеств: монография / А.Б. Петровский. – Москва: Изд-во URSS, 2002. – 80 с.

84 Петровский, А.Б. Пространства множеств и мультимножеств: монография / А.Б. Петровский. – Москва: Едиториал УРСС, 2003. – 248 с. – Серия «Труды Института системного анализа РАН».

85 Карпенко, А.П. Современные алгоритмы оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой / А.П. Карпенко. – Москва: Московский государственный технический университет (МГТУ) имени Н.Э. Баумана – 2017. – 447 с.

86 Карпенко, А.П. Эволюционные операторы популяционных алгоритмов глобальной оптимизации. Опыт систематизации / А.П. Карпенко. – DOI:10.25729/2413-0133-2018-2-02 // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2018. – № 2(10). – С. 22-30. – URL: <https://www.imt-journal.ru/archive/public/article?id=19> (дата обращения: 18.08.2024).

87 Карпенко, А.П. Методы повышения эффективности популяционных алгоритмов глобальной оптимизации / А. П. Карпенко // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы V межрегиональной научно-практической конференции, Севастополь, 24–28 сентября 2019 года / Севастопольский гос. ун-т; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН. – Севастополь: Севастопольский гос. ун-т, 2019. – С. 87-88.

88 Курейчик, В.М. Генетические алгоритмы и их применение / В.М. Курейчик. – 2-е изд. перераб. и доп. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 242 с.

89 Курейчик, В.М. Эволюционные вычисления: Генетическое и эволюционное программирование / В.М. Курейчик, С.И. Родзин // Новости искусственного интеллекта. – 2003. – №5. – С. 13-19.

90 Курейчик, В.М. Исследование динамических операторов в эволюционном моделировании / В.М. Курейчик, Л.А. Зинченко, И.В. Хабарова // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2001. – №3(7). – С. 65-70.

91 Емельянов, В.В. Теория и практика эволюционного моделирования / В.В. Емельянов, В.М. Курейчик, В.В. Курейчик. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 430 с.

92 Fraser, A.S. Simulation of genetic systems by automatic digital computers I. Introduction / A.S. Fraser. – DOI : 10.1071/BI9570484 // Australian Journal of Biological Sciences. – 1957. – № 10(4). – Pp. 484-491. – URL: <https://www.publish.csiro.au/bi/BI9570484> (дата обращения: 18.08.2024).

93 Farmer, J.D. The Immune System. Adaptation and Machine Learning / J.D. Farmer, N.H. Packard, A.S. Perelson // Physica 22D. – 1986. – Vol. 2. – No. 1-3. – Pp. 187-204. – URL: <https://oms-inet.files.svdcn.com/staging/files/immunesystem.pdf> (дата обращения: 18.08.2024).

94 Бурков, В.Н. Сетевые модели и задачи управления / В.Н. Бурков, Б.Д. Ланда, С.Е. Ловецкий. – Москва: Советское радио, 1967. – 144 с.

95 Бурков, В.Н. Новый подход к принятию решений по совершенствованию хозяйственного механизма / В.Н. Бурков, А.М. Черкашин, А.В. Щепкин // Деловые

игры и имитационное моделирование: тезисы докладов. 16-й семинар ИФАК/ИС-АГА. – М.: Институт проблем управления, 1985. – 123 с.

96 Баркалов, С.А. Умное управление проектами / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, Я.Д. Гельруд [и др.]; под ред. Д.А. Новикова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – 194 с.

97 Бадамшин, Р.А., Проблемы управления сложными динамическими объектами в критических ситуациях на основе знаний / Р.А. Бадамшин, Б.Г. Ильясов, Л.Р. Черняховская. – М.: Машиностроение, 2003. – 240 с.

98 Качество жизни: анализ влияния факторов, связанных со здоровьем, на основе системных и математических моделей / Б.Г. Ильясов, В.В. Мартынов, И.Б. Герасимова [и др.]. – DOI: 10.15838/esc/2017.3.51.10 // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2017. – Т. 10. – № 3. – С. 192-208. – URL: <http://esc.vscs.ac.ru/article/2282?info=annotation> (дата обращения: 18.08.2024).

99 Ильясов, Б.Г. Имитационная модель регулирования расходов и доходов населения в системе макроэкономического кругооборота / Б.Г. Ильясов, Е.А. Макарова, Р.Р. Валитов // Программные продукты и системы. – 2011. – № 1. – С. 123-126.

100 Система интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении макроэкономическим воспроизводственным процессом на основе имитационного моделирования / Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Р.Р. Валитов // Вестник УГАТУ. – 2012. – № 3. – С. 217-229.

101 Сиразетдинов, Р.Т. Математическое моделирование процесса снабжения производственного предприятия на основе регистров бухгалтерского учета / Р.Т. Сиразетдинов, Д.С. Марков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – №4-3. С. 628-633. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-protsesssa-snabzheniya-proizvodstvennogo-predpriyatiya-na-osnove-registrov-buhgalterskogo-ucheta> (дата обращения: 25.07.2024).

102 Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019): материалы Двенадцатой Междунар. Конфер., Москва, 1–3 октября 2019 г., / под общ.

ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна ; Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук. – М.: ИПУ РАН, 2019. – 1294 с. – URL: [http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/MLSD\\_2019.pdf](http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/MLSD_2019.pdf) (дата обращения: 25.07.2024).

103 Васильев, С.Н. Метод синтеза условий выводимости хорновских и некоторых других формул / С.Н. Васильев // Сибирский математический журнал. – 1997. – Т. 38. – № 5. – С. 1034-1046.

104 Васильев, С.Н. Формализация знаний и управление на основе позитивно образованных языков / С.Н. Васильев // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2008. – №1. – С. 3-17. – URL: <https://www.mathnet.ru/links/c6c085815f66b33362bbb353d2a7d3fb/itvs485.pdf> (дата обращения: 25.07.2024).

105 Капитонова, Ю.В. О некоторых идеях формирования математического аппарата кибернетики в работах В.М. Глушкова / Ю.В. Капитонова, А.А. Летичевский // Кибернетика. – 1982. – № 6. – С. 1-5.

106 К построению практического формального языка для записи математических теорий / В.М. Глушков, Ю.В. Капитонова, А.А. Летичевский [и др.] // Кибернетика. – 1972 – №5. – С. 19-28.

107 Глушков, В.М. Кибернетика. Вопросы, теория и практики / В.М. Глушков; отв. Ред. В.С. Михалевич; Академия наук СССР. – Москва: Наука, 1986. – 488 с. – URL: <https://crystalbook.ru/wp-content/uploads/2021/05/%D0%93%D0%BB%D1%83%D1%88%D0%BA%D0%BE%D0%B2-%D0%92.%D0%9C.-%D0%9A%D0%B8%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0.-%D0%92%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%8B-%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%B8-%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8-1986.pdf> (дата обращения: 25.07.2024).

108 Глушков, В.М., Автоматизация поиска доказательств теорем математических теорий и интеллектуальные машины / В.М. Глушков, Ю.В. Капитонова // Кибернетика. – 1972. – № 5. – С. 2-6.

109 Истомин, А.Л. Исследование операций в управлении вузом: монография / А.Л. Истомин. – М.: СИНТЕГ, 2008. – 272 с.

110 Истомин, А.Л. Методы, модели и алгоритмы автоматизированного составления учебного плана образовательной программы в вузе / А.Л. Истомин, О.А. Засухина // Информатизация образования и науки. – 2011. – № 3(11). – С. 67-82.

111 Истомин, А.Л. Календарное планирование учебного процесса в вузе / А.Л. Истомин // Открытое образование. – 2007. – № 4. – С.28-32.

112 Некоторые оптимальные алгоритмы управления в системах различной природы / Е.Ю. Барзилович, В.Е. Емельянов, В.В. Смирнов [и др.] // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2000. – №32. – С. 5-16.

113 Барзилович, Е.Ю., Сравнительная оценка оптимальных методов управления монотонно возрастающим случайным процессом с независимыми приращениями / Е.Ю. Барзилович, С.К. Захаренко // О надежности сложных технических систем. – М.: Сов. радио, 1966.

114 Барзилович, Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е.Ю. Барзилович. – М.: Высшая школа, 1982 – 232 с.

115 Инженерно-авиационная служба и эксплуатация авиационного оборудования / А.Е. Акиндеев, В.Д. Константинов, С.В. Крауз [и др.]; под. ред. Е.А. Румянцева. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1970. – 513 с.

116 Воробьев, В.Г. Надежность и эффективность авиационного оборудования: учебник для вузов / В.Г. Воробьев, В.Д. Константинов. – М.: Транспорт, 1995. – 248 с.

117 Воробьев, В.Г. Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования / В.Г. Воробьев, В.Д. Константинов. – М.: МГТУ ГА, 2010. – 448 с. – URL: <https://f.eruditor.link/file/650027/> (дата обращения: 25.07.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

118 Румянцев, Е.А. Авиационное оборудование / Е.А. Румянцев. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1980 – 298 с.

119 Румянцев, Е.А. Инженерно-авиационное обеспечение боевых действий частей авиации вооруженных сил и эксплуатация авиационного оборудования / Е.А. Румянцев, В.П. Осовский, В.А. Протопопов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1989. – 398 с.

120 Техническая эксплуатация летательных аппаратов: учеб. для вузов / Н.Н. Смирнов, Н.И. Владимиров, Ж.С. Черненко [и др.]; под ред. Н.Н. Смирнова. – М.: Транспорт, 1990. – 423 с.

121 Ножницкий, Ю.А. Инженер-механик, учёный, учитель. К 100-летию со дня рождения И.А. Биргера / Ю.А. Ножницкий, А.И. Белоусов. – DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-7-15. – Текст: электронный // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17. – № 3. – С. 7-15. – URL: <https://journals.ssau.ru/vestnik/article/view/6324/6206> (дата обращения: 25.07.2024).

122 Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

123 Биргер, И.А. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей / И.А. Биргер, Б.Ф. Балашов, Р.А. Дульнев [и др.]; Под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Балашова. – М.: Машиностроение, 1981. – 222 с.

124 Барлоу, Р. Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан; пер. с англ. И. А. Ушакова. – М: Советское радио, 1969 – 488 с.

125 Шаманов, В.И. Теория и методы управления технической эксплуатацией систем интервального регулирования движения поездов: 05.22.08 – Эксплуатация железнодорожного транспорта (включая системы сигнализации, централизации и блокировки): автореф. на соискание ученой степени доктора технических наук / Шаманов Виктор Иннокентьевич; ИрИИТ. – Иркутск, 1998. – 48 с.

126 Шаманов, В.И. Методы оптимизации технического обслуживания систем автоматики // Автоматика на транспорте. – 2016. – №4. – Т. 2. – С. 481-496. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-optimizatsii-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-sistem-avtomatiki> (дата обращения: 19.07.2024).

127 Бурдо, Г.Б. Основы построения автоматизированных систем проектирования технологических процессов и сопровождения производства изделий в геофизическом приборостроении: 05.13.12 – системы автоматизации проектирования: автореф. на соискание ученой степени доктора технических наук / Бурдо Георгий Борисович; Тверской гос. тех. ун-т. – Тверь, 2011 – 32 с.

128 Бурдо, Г.Б. Основные принципы создания систем автоматизации проектирования и управления в машиностроительных производственных системах / Г.Б. Бурдо, Н.А. Семенов. – DOI: 10.15827/0236-235X.125.134-140 // Программные продукты и системы. – 2019. – №1. – Т.32 – С. 134-140. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-printsipy-sozdaniya-sistem-avtomatizatsii-proektirovaniya-i-upravleniya-v-mashinostroitelnyh-proizvodstvennyh-sistemah> (дата обращения: 18.07.2024).

129 Ведешенков, В.А. Самодиагностирование цифровых систем с реконфигурацией / В.А. Ведешенков // Надежность и техническая диагностика. – 2003. – №4. – С. 39-51. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/samodiagnostirovanie-tsifrovyyh-sistem-s-rekonfiguratsiey> (дата обращения: 18.07.2024).

130 Ведешенков, В.А. Способ выделения подсистем достаточного размера для параллельного диагностирования больших цифровых систем с регулярной структурой / В. А. Ведешенков // Техническая диагностика. – 2006. – №5. – 74-79. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-vydeleniya-podsystem-dostatochnogo-razmera-dlya-parallelnogo-diagnostirovaniya-bolshih-tsifrovyyh-sistem-s-regulyarnoy> (дата обращения: 18.07.2024).

131 Верстунин, А.Ю. Математическая итеративно-адаптационная модель электрической дуги в контактно-дугогасительных системах электромагнитных контакторов / А.Ю. Верстунин, Н.А. Ведешенков. – DOI: 10.24160/1993-6982-2024-2-27-38. – Текст: электронный // Вестник МЭИ. – 2024. – № 2. – С. 27-38. – URL: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/1079> (дата обращения: 18.07.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

132 Глухов, В.В. Методика оптимизации набора инструментов для повышения эффективности бизнес-системы / В.В. Глухов, А.В. Колобов, Е.М. Игумнов – DOI: 10.18721/JE.13507 // Научно-технические ведомости СПбГПУ: экономические науки. – 2020. – № 5. – Т. 13. – С. 95-105. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-optimizatsii-nabora-instrumentov-dlya-povysheniya-effektivnosti-biznes-sistemy> (дата обращения: 18.07.2024).

133 Гнеденко, Д.Б. Оценка надежности сложных восстанавливаемых систем /Д.Б. Гнеденко, А.Д. Соловьев // Изв. АН СССР. Техн. киберн. – 1975. – № 3. – С. 121-128.

134 Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – Москва: Наука, 1965. – 526 с. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116242> (дата обращения: 19.07.2024). – (Физико-математическая библиотека инженера). – Режим доступа: по подписке.

135 Горшков, А.С. Разработка научных и методологических принципов повышения эффективности использования энергетических ресурсов на предприятиях текстильной и легкой промышленности и снижения энергоемкости выпускаемой продукции : 05.02.22 – Организация производства (текстильная и легкая промышленность) : автореф. дис. На соискание ученой степени доктора технических наук / Горшков Александр Сергеевич; Санкт-Петербургский гос. ун-т промышленных технологий и дизайна». – Санкт-Петербург, 2019. – 32 с.

136 Кашковский, В.В. Системный подход к определению состояния технических изделий по характеристикам надёжности / В.В. Кашковский, И.И. Тихий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – №4 (52). – 143-150. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyu-podhod-k-opredeleniyu-sostoyaniya-tehnicheskikh-izdeliy-po-harakteristikam-nadyozhnosti> (дата обращения: 18.07.2024).

137 Кашковский В.В. Методологические основы управления состоянием систем технической эксплуатации промышленных и транспортных объектов: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность): автореф. дис. На соискание ученой степени доктора технических наук / Кашковский Виктор Владимирович; Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2013. – 47 с.

138 Райншке, К. Оценка надёжности систем с использованием графов / К. Райншке, И.А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.

139 Allan, F. J. Diagnosis of systems using internal testing // Master's Thesis, Department of Systems Desi, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada. – 1974.

140 Allan, F.J. An Approach to the Diagnosability Analysis of a System / F.J. Allan, T. Kameda, S. Toida. – DOI: <https://doi.org/10.1109/T-C.1975.224125> // IEEE Transactions on Computers. – 1975. – № 10, Vol. C-24. – P. 1040-1042. – URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1109/T-C.1975.224125> (дата обращения: 18.07.2024).

141 Fujiwara, H. Connections assignments for probabilistically diagnosable systems / H. Fujiwara, K. Kinoshita. – DOI: 10.1109/TC.1978.1675087 // IEEE Transactions on Computers. – 1978. № 3, Vol. C-27. – P. 280-283. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1675087> (дата обращения: 18.07.2024). – Режим доступа: по подписке.

142 Fujiwara, H. Some existence theorems for probabilistically diagnosable systems / H. Fujiwara, K. Kinoshita // IEEE Transactions on Computers. – 1978. – № 4, Vol. C-27. – P. 379–384.

143 Kime, C.R. An Abstract Model for Digital System Fault Diagnosis / C.R. Kime. – DOI: 10.1109/TC.1979.1675243 // IEEE Transactions on Computers. – 1979. – № 10, Vol. C-28. – P. 754-767. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1675243/> (дата обращения: 18.07.2024). – Режим доступа: по подписке.

144 Mallela, S. Diagnosis without repair for hybrid fault situations / S. Mallela, G.M. Masson. – DOI: 10.1109/TC.1980.1675605 // IEEE Transactions on Computers. – 1980. – № 6, Vol. C-29. – P. 461-470. – URL: <https://www.computer.org/csdl/journal/tc/1980/06/01675605/13rRUIJuxoo> (дата обращения: 18.07.2024). – Режим доступа: по подписке.

145 Mallela, S. Diagnosable systems for intermittent faults / S. Mallela, G.M. Masson. – DOI: 10.1109/TC.1978.1675147 // IEEE Transactions on Computers. – 1978. – №6, Vol. C-27. – P. 560-566. – URL: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.ieee-art-000001675147> (дата обращения: 18.07.2024). – Режим доступа: по подписке.

146 Соломенцев, Ю.М. Конструкторско-технологическая информатика и автоматизация производства / Ю.М. Соломенцев. – М: Станкин, 1992. – 127с.

147 Смоленцев, Ю.М. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Прохоров А.Ф. [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

148 Адаптивное управление технологическими процессами : (На металлорежущих станках) / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов [и др.] ; Редкол.: Ю.М. Соломенцев (пред.) [и др.] – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.

149 Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, В.В. Павлов, Л.В. Рыбаков. – М.: Наука, 2003. – 292 с.

150 Фам, К.Б. Нечеткая модель диагностики технологических процессов / К.Б. Фам, П.М. Мурашев, В.Н. Богатиков // Проблемы искусственного интеллекта. – 2023. – № 3 (30). – С. 76-86.

151 Система управления технологической безопасностью на основе предсказывающих импульсных риск-моделей / Г.Н. Санаева, А.Е. Пророков, Д.П. Вент, Г.П. Виноградов, В.Н. Богатиков // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 3. – С. 77-85.

152 Тоичкин, Н.А. Метод расчета индекса безопасности для оценки состояния технологического процесса / Н.А. Тоичкин, В.Н. Богатиков // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 3. – С. 133-137.

153 Петрухин, В.В., Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: учебное пособие / В.В. Петрухин, С.В. Петрухин. – Москва: Инфра-Инженерия, 2010. – 176 с.

154 Науменко, А.П. Научно-методические основы вибродиагностического мониторинга поршневых машин в реальном времени : специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий: автореф. дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / Науменко Александр Петрович; Ом. гос. техн. ун-т. – Омск, 2012. – 40 с. – URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005014960?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 18.07.2024).

155 Памяти А.И. Берга, Крайзера Л. П. Кибернетика – предшественница информатики // Прикладная информатика. – 2008. – №5. – С. 131-140. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kibernetika-predshestvennitsa-informatiki> (дата обращения: 15.07.2024).

156 Берг, А.И. Кибернетика – наука об оптимальном управлении / А.И. Берг; под ред. В.И. Шамшур. – М.: Энергия, 1964. – 64 с. – Серия: Массовая радиобиблиотека. – URL: <https://www.klex.ru/16sn> (дата обращения: 15.07.2024).

157 Искусственный интеллект // Словарь маркетолога. – Дата публикации статьи 14.04.2023. – URL: <https://www.calltouch.ru/blog/glossary/iskusstvennyj-intellekt/> (дата обращения: 15.07.2024).

158 Горбатенко, Н.И. Методы и устройства измерения, контроля и прогнозирования магнитных свойств изделий из ферромагнитных материалов : 05.11.01 – Приборы и методы измерения (электрические и магнитные измерения): автореф. дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / Н. И. Горбатенко, Новочеркасский гос. техн. ун-т. – Новочеркасск. – 2001. – 39 с.

159 Лачин, В.И. Быстродействующий метод контроля параметров электроэнергетических объектов постоянного тока / В.И. Лачин, К.Ю. Соломенцев, К. Уи Нгуен // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2013. – №4 (173). – С. 11-15. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bystrodeystvuyuschiy-metod-kontrolya-parametrov-elektroenergeticheskikh-obektov-postoyannogo-toka> (дата обращения: 06.07.2024).

160 Ткачев, А.Н. Моделирование магнитного поля в нелинейных ферромагнитных средах с использованием блочных элементов и их схем замещения / А.Н. Пашковский, Д.Н. Черноиван, Р.В. Дмитриенко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2020. – № 2-3, Т. 63. – С. 44-54.

161 Фролов, Е.Б. Организация производственного процесса на предприятии при помощи метода вычисляемых приоритетов / Е.Б. Фролов, Ю.А. Тихонова, А.А. Корниенко // Вестник МГТУ «Станкин». – 2012. – № 1(19). – С. 73-76.

162 Шокин, Ю.И. Метод дифференциального приближения: Применение к газовой динамике / Ю.И. Шокин. – Новосибирск: Наука; АН СССР. Сибирское отделение. Институт теоретической и прикладной механики, 1979. – 222 с.

163 Калмыков, С.А. Методы интервального анализа / С.А. Калмыков, Ю.И. Шокин, З.Х. Юлдашев. – Новосибирск: Наука, 1986. – 222 с. – URL: <https://f.eruditor.link/file/2511619/> (дата обращения: 06.07.2024). – Режим доступа: для зарегистр. пользователей.

164 Россеев, Н.И. Многофункциональные информационно-измерительные

системы контроля технического состояния, оценки надежности и остаточного ресурса технологических объектов и сооружений газотранспортного предприятия : 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы : дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / Россеев Николай Иванович; Самарский гос. ун-т. – Самара, 2001. – 437 с.

165 Зеленский, В.А. Развитие теории и разработка мультиплексированных волоконно-оптических информационно-измерительных систем мониторинга сложных технических объектов : 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы : дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / Зеленский Владимир Анатольевич; Моск. гос. ун-т приборостроения и информатики – Москва, 2010. – 306 с.

166 Новоселов, О.Н. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем / О.Н. Новоселов, А.Ф. Фомин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1991. – 336 с.

167 Краус, М. Измерительные информационные системы / М. Краус, Э. Вошни. – М: «Мир», 1975. – 312 с.

168 Интеллектуальная информационно-управляющая система сложными промышленными энергоемкими объектами / И.В. Тюрин, А.Н. Грибков, Д.Ю. Муромцев, В.Н. Шамкин // Системы управления и информационные технологии. – 2020. – № 3 (81). – С. 63-66.

169 Залукаева, Н.Ю. Информационно-управляющая система распределения топливных пеллет от производителя до потребителя / Н.Ю. Залукаева, А.Н. Грибков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28. – № 1. – С. 24-34. – DOI 10.17277/vestnik.2022.01.pp.024-034.

170 Системы адаптивного регулирования OМATIVE АСМ для металлообрабатывающих станков с ЧПУ. Техническая спецификация [Электронный ресурс] // URL: [https://intechology.ru/img/file/11-03-2015/08-09-2015/omative\\_acm\\_i\\_ais\\_dispatcher\\_tehnicheskaya\\_speciaifkaciya.pdf](https://intechology.ru/img/file/11-03-2015/08-09-2015/omative_acm_i_ais_dispatcher_tehnicheskaya_speciaifkaciya.pdf) (дата обращения: 10.08.23).

171 MONTRONIX – активная система защиты вашего станка от аварий и перегрузок [Электронный ресурс] // Промцифра – URL: <https://promzyfra.ru/articles/>

montronix-aktivnaya-sistema-zashchity-vashego-stanka-ot-avariy-i-peregruzok/ (дата обращения: 10.08.23).

172 MARPOSS adaptive control for monitoring systems [Электронный ресурс] // Precision equipment for measurement, inspection and test Marposs. URL: <https://www.marposs.com/eng/product/adaptive-control-for-monitoring-systems> (дата обращения: 10.08.23).

173 PROMETEC GmbH – Система Монитора Процесса PROMOS [Электронный ресурс] // Каталог продуктов Siemens IA\_DT. – URL: <http://www.aqad.ru/index.php?tree=1000000&tree2=9990284&tree3=10007955&tree4=7500380&tree5=7500306&tree6=7500290> (дата обращения: 10.08.23).

174 Системы мониторинга состояния оборудования [Электронный ресурс] // SKF. – URL: <https://www.skf.com/kz/products/condition-monitoring-systems> (дата обращения: 10.08.23).

175 Системы мониторинга станков с ЧПУ в России. Обзор технологий и рынка / Ю. Куркова, А. Васильев, А. Ловыгин, В. Степанов // САПР и графика. – 2016. – № 12. – С. 24-31. – URL: [https://www.planetacam.ru/articles/market/sistemy\\_monitoringa\\_stankov\\_s\\_chpu\\_v\\_rossii\\_obzor\\_tekhnologiy\\_i\\_rynka\\_za\\_2016\\_g/](https://www.planetacam.ru/articles/market/sistemy_monitoringa_stankov_s_chpu_v_rossii_obzor_tekhnologiy_i_rynka_za_2016_g/) (дата обращения: 10.08.23)

176 Нестерова, А. MES-системы на российском рынке промышленности: от истоков к будущему / А. Нестерова, Т. Самойлова // ИСУП. – 2010. – № 2(26). – С. 51-53. – URL: [https://isup.ru/upload/pdf-zhurnala/2018%20i%20dalee/2010/2/51\\_53\\_RTSoft\\_print.pdf](https://isup.ru/upload/pdf-zhurnala/2018%20i%20dalee/2010/2/51_53_RTSoft_print.pdf) (дата обращения: 10.08.23).

177 Ловыгин, А. СМПО Foreman - промышленный Интернет для российских предприятий / А. Ловыгин // САПР и графика. – 2017. – № 2(244). – С. 37-42.

178 Диспетчер - Система мониторинга промышленного оборудования и промышленных машин [Электронный ресурс] // Цифра – технологии цифровизации для повышения эффективности промышленности. – URL: <https://www.zyfra.com/product/dispatcher/> (дата обращения: 10.08.23).

179 WINNUM Станки - мониторинг, контроль и анализ работы станков с ЧПУ и без. Цифровой двойник производства [Электронный ресурс] // Компания

WINNUM – глобальный поставщик решений для Промышленного Интернета Вещей. – URL: <https://winnum.io/solution/ncmachines/> (дата обращения: 10.08.23).

180 Naviman - Навигационная система управления производством [Электронный ресурс] // СОЛВЕР Инженерный консалтинг. – URL: <https://www.solver.ru/products/proizvodstvennaya-navigatsiya/> (дата обращения: 10.08.23).

181 CNC-Vision - мониторинг станков и оборудования (контроль и диспетчеризация) [Электронный ресурс] // CNC-Vision. – URL: <http://cnc-vision.ru/> (дата обращения: 10.08.23).

182 Анцев, А.В. Информационная поддержка назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента / А.В. Анцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15. – № 5. – С. 128-136.

183 Анцев, А.В. 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.

184 Файзрахманов, Р.А. Информационная система мониторинга станочного парка предприятия / Р.А. Файзрахманов, А.Б. Федоров, Н.Ф. Шаякбаров // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2015. – № 9, Т. 13. – С. 9-18.

185 Экспертная система оценки состояния элементов транспортно-технологического оборудования в процессе перегрузочных операций / В.Г. Баранов, В.А. Кольцов, В.Р. Милов [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т. 11. – № 7. – С. 67-71.

186 Martinov, G.M. Diagnostics of cutting tools and prediction of their life in numerically controlled systems / G.M. Martinov, A.S. Grigor'ev // Russian Engineering Research. – 2013. – Vol. 33. – P. 433-437.

187 Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин [и др.]; под ред. С.Н. Григорьева. – М.: Машиностроение, 2011. – 600 с.

188 Интеллектуальные системы диагностики состояния оборудования и из-

носа инструмента / Ю.Г. Кабалдин, И.Л. Лаптев, Д.А. Шатагин [и др.] // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – № 2. – С. 47-50.

189 Тимофеев, В.Ю. Модель устройства диагностики металлорежущего инструмента по сигналу термо-ЭДС / В.Ю. Тимофеев, А.А. Зайцев, А.В. Крутов // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2009. – Т. 5. – № 5. – С. 42-45.

190 Сальников, В.С. Практическое применение диагностических возможностей современных многоцелевых станков / В.С. Сальников, В.В. Жмурин, А.В. Анцев // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2018. – №10. – С. 257-264.

191 Датчики нового поколения для вооружений и военной техники / А. Блинов, С. Гамкрелидзе, М. Критенко [и др.] // *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес*. – 2003. – №2. – С. 50-53.

192 Zhou Y. A multisensor fusion method for tool condition monitoring in milling / Y. Zhou, W. Xue // *Sensors (Switzerland)*. – 2018. – № 11, Vol. 18. – P. 3866. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3866> (дата обращения: 10.08.23).

193 Экспериментальная установка контроля вибрации при обработке на станках с ЧПУ / А.В. Анцев, Ч.Х. Данг, Е.С. Янов, М.В. Полев // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2019. – Т. 15. – № 2. – С. 151-158.

194 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.

195 Датчик вибрации принцип работы, датчики вибрации электродвигателей, пьезоэлектрические датчики [Электронный ресурс] // *oSensorax.ru*. – Режим доступа: <https://osensorax.ru/dvizhenie/datchik-vibratsii>. (дата обращения: 14.01.2024).

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

197 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.

198 Управляющая программа модуля сбора информации аппаратно-программного комплекса оптимизации точения тонкостенных заготовок [Текст]: свидетельство 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.

199 Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. / А.И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

200 Кремер, Н.Ш. Эконометрика / Н.Ш. Кремер, Б.А. Путко. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. – 311 с.

201 Газизов, Д.И. Обзор методов статистического анализа временных рядов и проблемы, возникающие при анализе нестационарных временных рядов / Д.И. Газизов // Научный журнал. – 2016. – № 3 (4). – С. 9-14.

202 Залманзон, Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л.А. Залманзон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.

203 Golyandina, N. Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques / N. Golyandina, V. Nekrutkin, A. Zhigljavsky. – London, 2001. – 305 p.

204 Эфрон, Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. / Б. Эфрон. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 263 с.

205 Крылов, А.А. Уменьшение смещения нуля МЭМС-датчиков при температурном гистерезисе / А.А. Крылов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2021. – № 2. – С. 48-56. – DOI: 10.38013/2542-0542-2021-2-48-56.

206 Андреев, И.Д. Ритмичность труда и производства / И.Д. Андреев. – Воронеж: Центр.-Чернозем. кн. изд., 1971. – 96 с.

207 Анцев, А.В. Мониторинг процесса резания на основе контроля потребляемого тока / А.В. Анцев, А.А. Арсеньева, С.В. Сальников // Прогрессивные технологии и процессы: сборник научных статей 9-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (23-24 сентября 2022 года), Юго-Зап. гос.

ун-т. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. – С. 37-43.

208 Данные о потребляемой оборудовани ем мощности 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.

209 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.

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

211 Российская Федерация. Законы. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации: Фед. Закон № 187-ФЗ: принят Государственной Думой 12 июля 2017 г.: Одобрен Советом Федерации 19 июля 2017 год.: послед.редакция // КонсультантПлюс : сайт. — URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_220885/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/) (дата обращения: 21.06.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

212 Российская Федерация. Постановление Правительства РФ. Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений : Постановление Правительства РФ № 127 от 08.02.2018 : с изм. и доп., вступ. в силу с 21.03.2023 // КонсультантПлюс: сайт. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_290595/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_290595/) (дата обращения: 21.06.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

213 Цапенко, М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование / М.П. Цапенко. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.

214 Иванов, Ю.П. Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов / Ю.П. Иванов, А.Н. Синяков, И.В. Филатов. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 207 с.

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

216 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.

217 Управляющая программа панели оператора на базе Raspberry Pi аппаратно-программного комплекса оптимизации течения 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.

218 Анцев, А.В. 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.

219 Адлер, Ю.П. «Шесть сигм»: еще одна дорога, ведущая к храму / Ю.П. Адлер, В.Л. Шпер // Методы менеджмента качества. – 2000. – №10. – С. 15–23.

220 Тито, К. Качество в XXI веке. Роль качества в обеспечении конкурентоспособности и устойчивого развития / К. Тито, К. Есио, В. Грегари. – М.: Стандарты и качество, 2005. – 280 с.

221 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.

222 Xie, J. Unsupervised deep embedding for clustering analysis / J. Xie, R. Girshick, A. Farhadi // International conference on machine learning. – 2016. – P. 478-487. – URL: <https://www.semanticscholar.org/reader/f44ff4fc0ed0142cb18472a5ba421bb538aa837e> (дата обращения: 21.06.2024).

223 Kopylov, A.V. Pattern recognition in interrelated treelike data arrays / A.V. Kopylov, S.D. Dvoenko, V.V. Mottl // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2003. – Vol. 13. – № 1. – Pp. 95-97.

224 McInnes, L. UMAP: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction / L. McInnes, J. Healy, J. Melville. – DOI: 10.21105/joss.00861. – Текст: Электронный // Journal of Open Source Software. – 2018. – № 3 (29). – P. 861. – URL: <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.00861> (дата обращения: 21.06.2024).

225 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.

226 Анцев, А.В. Повышение эффективности эксплуатации лезвийного инструмента при неопределенности условий обработки: специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Анцев Александр Витальевич; Тульский гос. ун-т. – Тула, 2020. – 370 с.

227 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.

228 Анцев, А.В. 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.

229 Анцев, А.В. 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.

230 Данг, Х.Ч. Повышение эффективности концевое и торцевого фрезерования на основе контроля износа фрез по уровню вибрации: специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Данг Хыу Чонг; Тульский гос. ун-т. – Тула, 2021. – 140 с.

231 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.

232 Зотеев, В.Е. Параметрическая идентификация диссипативных механических систем на основе разностных уравнений / под ред. В.П. Радченко. – М.: Машиностроение, 2009. – 344 с.

233 Анцев, А.В. 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 государственный технический университет. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. – С. 150-155. – URL: <https://ntb.donstu.ru/content/2022436>. – (дата обращения: 15.07.2024).

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

235 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.

236 Барков, А.В. Новое поколение систем мониторинга и диагностики роторного оборудования / А.В. Барков, Д.Л. Жуковский, Д.В. Грищенко // Журнал Химическая техника. – 2016. – № 4. – С. 17.

237 Барков, А.В. Особенности развития систем мониторинга и диагностики вращающегося оборудования [Электронный ресурс] // Энергетика и промышленность России. – URL: <https://www.eprussia.ru/epr/49/3217.htm> (дата обращения: 10.08.23).

238 Редников, С.Н. Тенденции развития подходов к диагностированию металлургического оборудования в рамках концепции индустрии 4.0 / С.Н. Редников // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 3. – С. 80-85.

239 Фролов, Е.Б. Цифровой двойник производственной системы на основе программного обеспечения категории MES / Е.Б. Фролов, А.С. Климов, Зин Мин Хтун // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – №12 (73). – С. 66-73.

## Приложение А

### Протокол калибровки

Номер эксперимента	Частота, Гц	Амплитуда, g	Фактическая амплитуда стенда, g	Амплитуда датчика (положительная), g	Амплитуда датчика (отрицательная), g	Частота сигнала с датчика, Гц (FFT)
Ось X						
1	10	0,1	0,100	0,106	-0,108	10,000
2	10	1	0,990	0,987	-1,046	10,000
3	10	2	1,495	1,470	-1,599	10,000
4	20	0,1	0,100	0,106	-0,108	20,200
5	20	1	0,999	1,007	-1,016	20,200
6	20	2	2,000	2,020	-2,063	20,200
7	20	3	3,011	2,964	-3,125	20,200
8	20	4	4,000	2,964	-4,224	20,000
9	40	0,1	0,100	0,106	-0,109	40,000
10	40	1	1,001	1,005	-1,021	40,000
11	40	2	2,003	2,092	-2,106	40,000
12	40	3	3,003	2,964	-3,175	40,000
13	40	4	4,000	2,964	-4,264	40,000
14	80	0,1	0,100	0,106	-0,103	80,200
15	80	1	1,002	0,959	-0,964	80,000
16	80	2	2,004	1,881	-1,897	80,000
17	80	3	3,010	2,814	-2,834	80,200
18	80	4	4,012	2,964	-3,790	80,200
19	100	0,1	0,100	0,101	-0,101	99,800
20	100	1	1,003	0,943	-0,945	99,800
21	100	2	2,009	1,881	-1,889	99,800
22	100	3	3,013	2,810	-2,825	99,800
23	100	4	4,016	2,965	-3,778	99,600
24	150	0,1	0,100	0,101	-0,104	49,800
25	150	1	1,002	0,943	-0,947	49,600
26	150	2	2,006	1,894	-1,909	49,600

27	150	3	3,010	2,854	-2,907	49,800
28	150	4	4,010	2,964	-3,872	49,600
29	200	0,1	0,100	0,096	-0,098	0,400
30	200	1	1,000	0,920	-0,922	0,400
31	200	2	1,997	1,852	-1,865	0,400
32	200	3	2,998	2,855	-2,916	0,400
33	200	4	3,995	2,965	-3,912	0,400
Ось Y						
1	10	0,1	0,100	0,107	-0,107	10,000
2	10	1	1,004	0,988	-1,040	10,000
3	10	2	1,508	1,454	-1,573	10,000
4	20	0,1	0,100	0,108	-0,109	20,000
5	20	1	0,999	1,009	-1,014	20,000
6	20	2	1,998	1,992	-2,033	20,200
7	20	3	3,004	2,974	-3,072	20,200
8	20	4	4,029	2,990	-4,148	20,200
9	40	0,1	0,100	0,110	-0,110	40,000
10	40	1	0,996	1,002	-1,004	40,000
11	40	2	1,995	2,001	-2,010	39,800
12	40	3	2,988	2,990	-3,025	40,000
13	40	4	3,996	2,990	-4,065	40,000
14	80	0,1	0,100	0,104	-0,105	80,200
15	80	1	1,003	0,988	-0,991	80,200
16	80	2	2,010	1,975	-1,981	80,000
17	80	3	3,016	2,959	-2,973	80,000
18	80	4	4,014	2,990	-3,965	80,200
19	100	0,1	0,100	0,103	-0,105	99,800
20	100	1	1,004	0,977	-0,974	99,800
21	100	2	2,009	1,950	-1,955	100,000
22	100	3	3,011	2,919	-2,929	100,000
23	100	4	4,013	2,990	-3,912	99,800
24	150	0,1	0,100	0,101	-0,102	49,600
25	150	1	1,003	0,932	-0,930	49,600
26	150	2	2,005	1,856	-1,861	49,600
27	150	3	3,005	2,779	-2,787	49,600
28	150	4	4,001	2,990	-3,719	49,600
29	200	0,1	0,100	0,097	-0,095	0,400

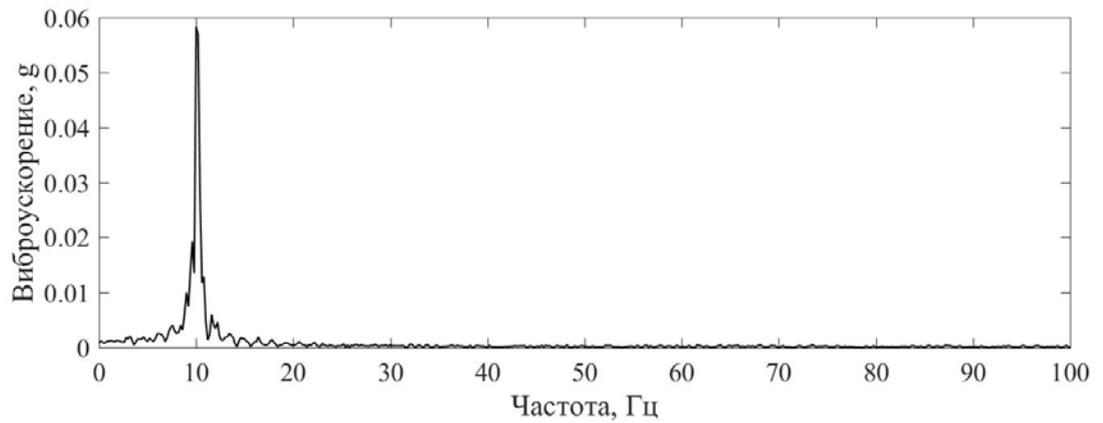
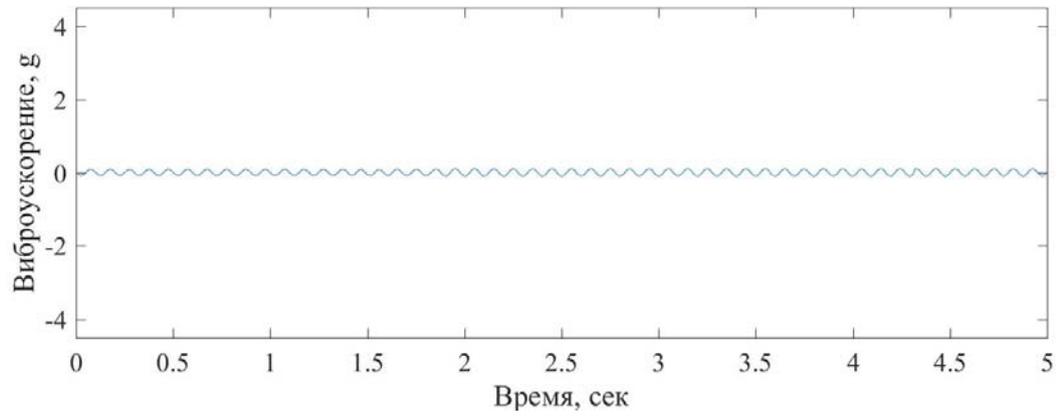
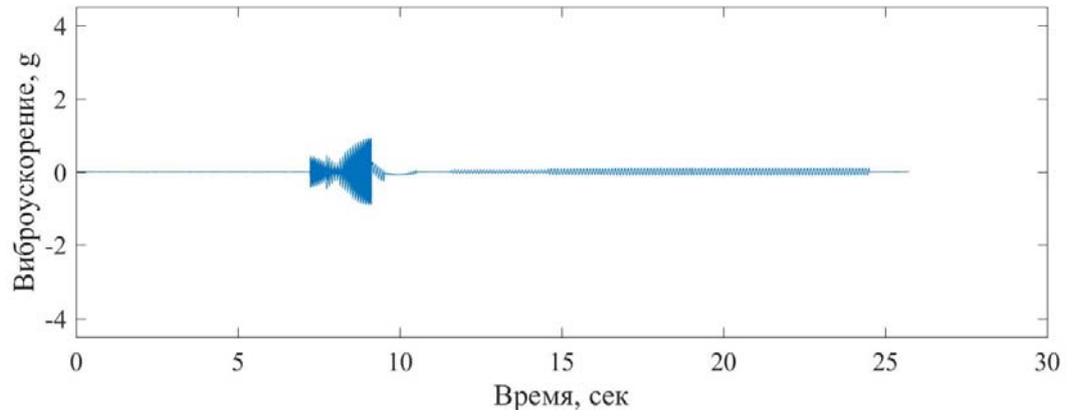
30	200	1	1,000	0,870	-0,871	0,400
31	200	2	1,999	1,730	-1,731	0,400
32	200	3	2,998	2,595	-2,595	0,400
33	200	4	3,991	2,990	-3,460	0,400
Ось Z						
1	10	0,1	0,100	0,110	-0,115	10,000
2	10	1	1,000	1,007	-1,054	10,200
3	10	2	1,510	1,481	-1,607	10,000
4	20	0,1	0,100	0,115	-0,114	20,200
5	20	1	1,000	1,029	-1,043	20,200
6	20	2	1,999	2,038	-2,074	20,200
7	20	3	3,004	3,034	-3,135	20,200
8	20	4	4,031	3,094	-4,232	20,200
9	40	0,1	0,100	0,112	-0,114	39,800
10	40	1	0,995	1,018	-1,025	40,000
11	40	2	1,996	2,032	-2,057	40,000
12	40	3	2,982	3,044	-3,074	40,200
13	40	4	4,018	3,093	-4,149	40,000
14	80	0,1	0,100	0,112	-0,109	80,200
15	80	1	1,004	1,028	-1,024	80,200
16	80	2	2,011	2,046	-2,040	80,000
17	80	3	3,018	3,064	-3,071	80,200
18	80	4	4,019	3,093	-4,090	80,200
19	100	0,1	0,100	0,112	-0,110	99,800
20	100	1	1,005	1,019	-1,019	99,800
21	100	2	2,012	2,027	-2,039	99,800
22	100	3	3,014	3,028	-3,039	100,000
23	100	4	4,009	3,093	-4,042	99,600
24	150	0,1	0,100	0,109	-0,108	49,800
25	150	1	1,003	1,007	-0,997	49,600
26	150	2	2,008	1,992	-1,988	49,800
27	150	3	3,002	2,985	-2,962	49,800
28	150	4	4,003	3,094	-3,936	49,800
29	200	0,1	0,100	0,110	-0,106	0,400
30	200	1	0,999	0,979	-0,981	0,400
31	200	2	1,999	1,955	-1,956	0,400
32	200	3	2,996	2,912	-2,896	0,400

33	200	4	3,975	3,093	-3,818	0,400
----	-----	---	-------	-------	--------	-------

## Данные в направлении X

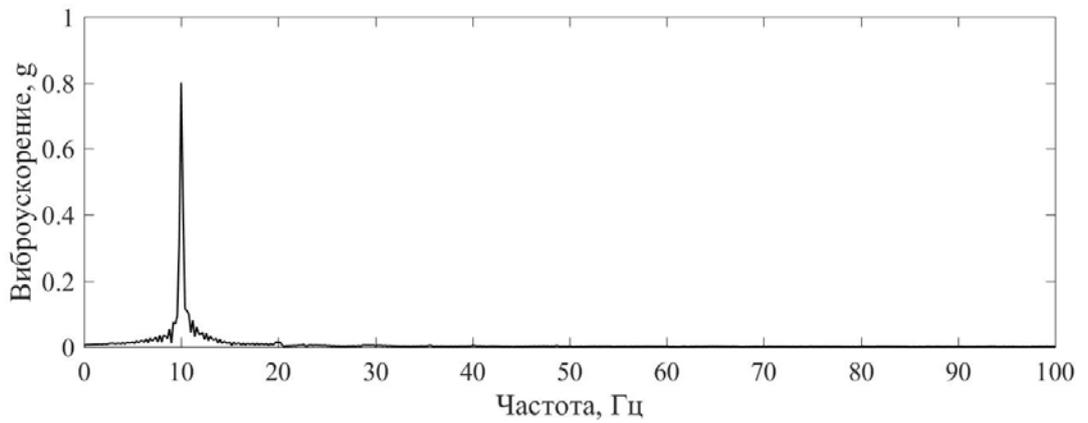
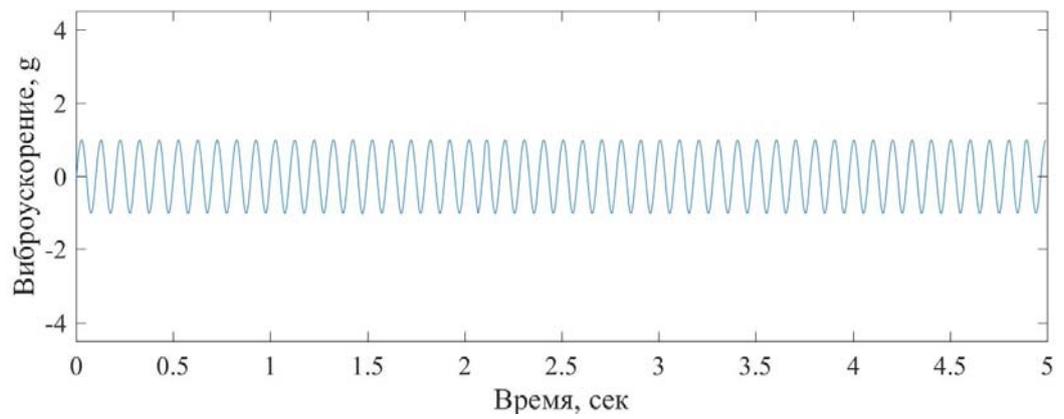
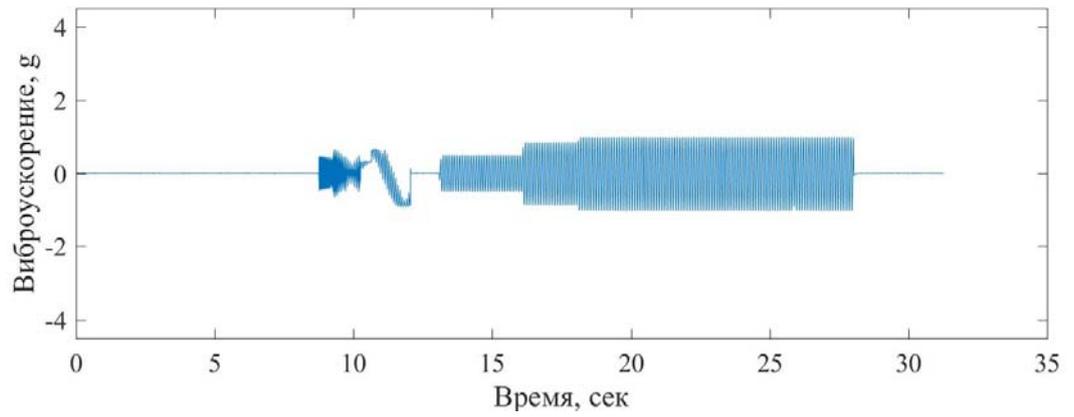
№ эксперимента / сигнал вибрации

1

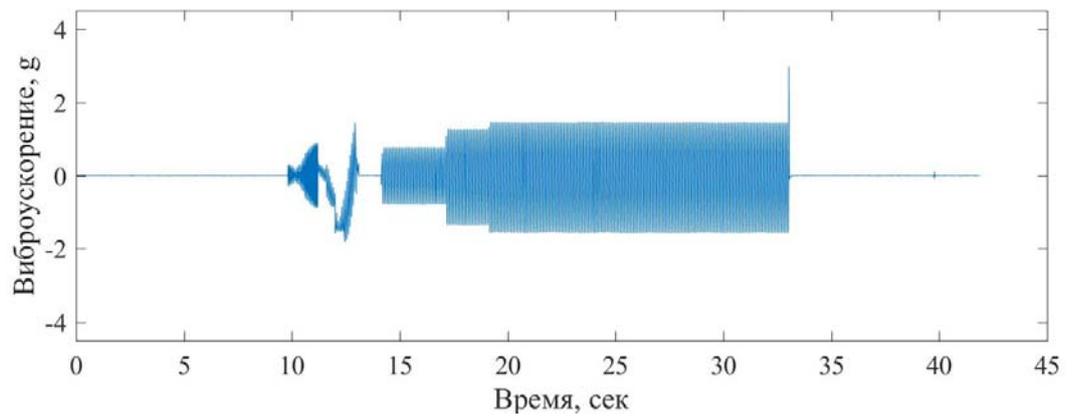


## № эксперимента / сигнал вибрации

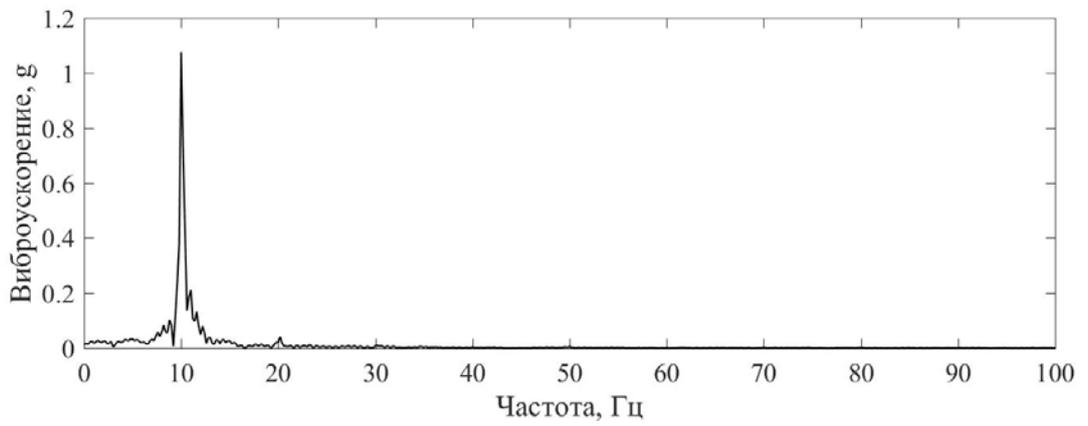
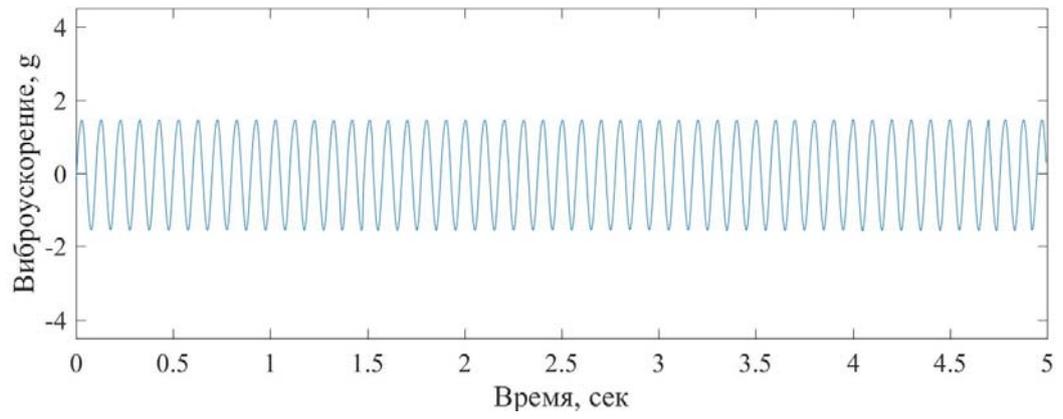
2



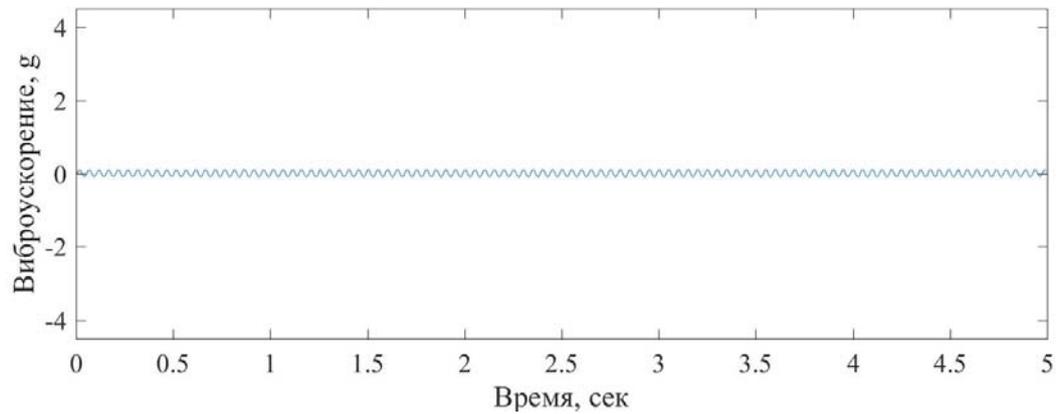
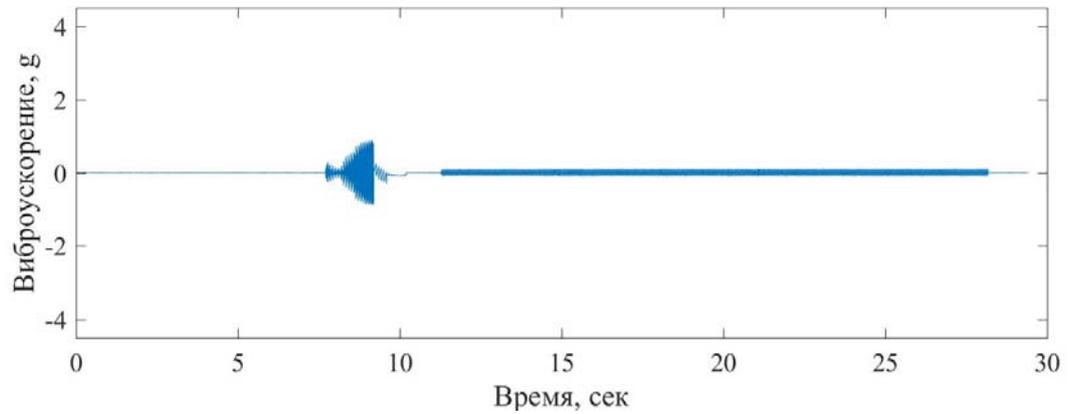
3



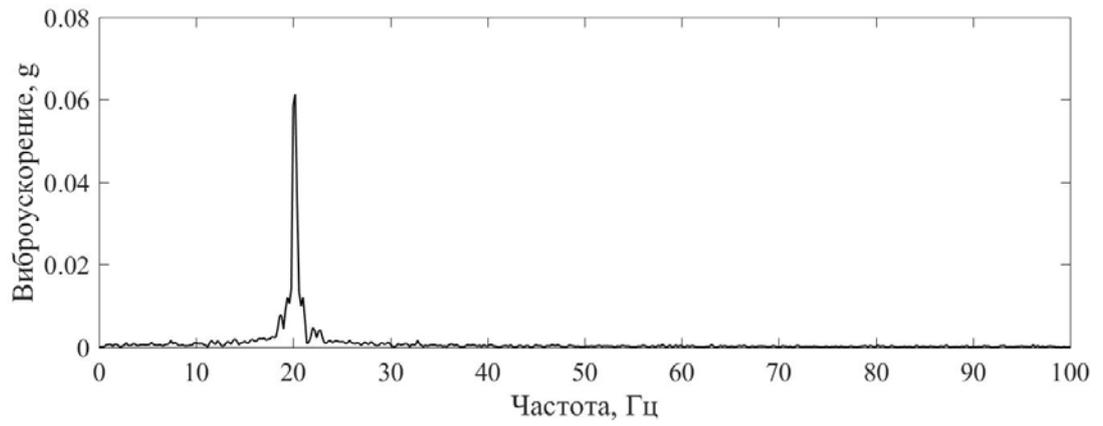
## № эксперимента / сигнал вибрации



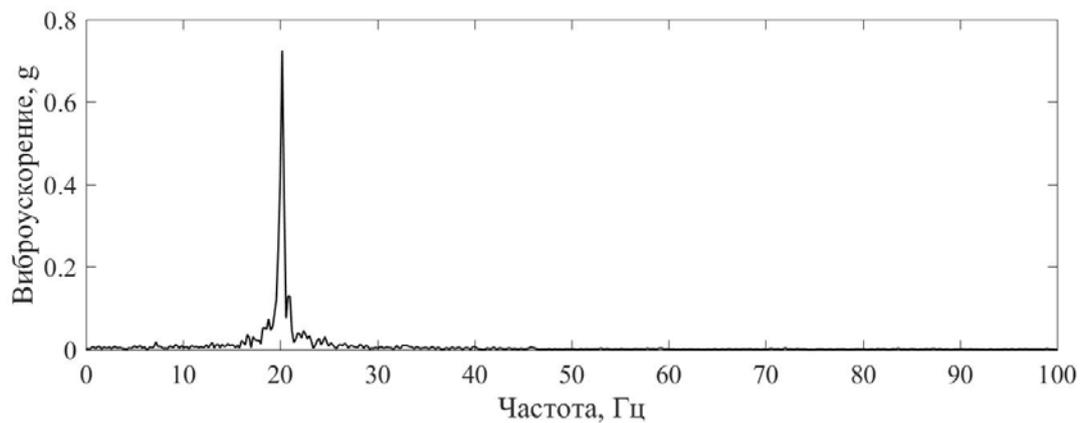
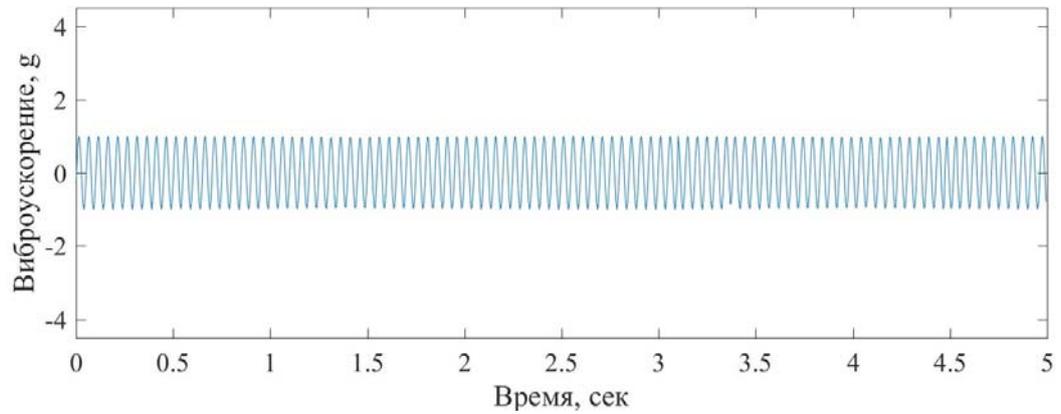
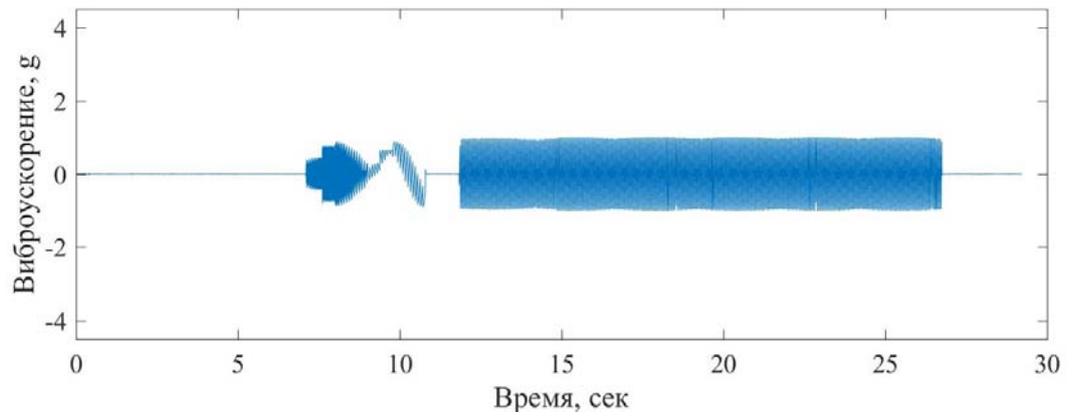
4



## № эксперимента / сигнал вибрации

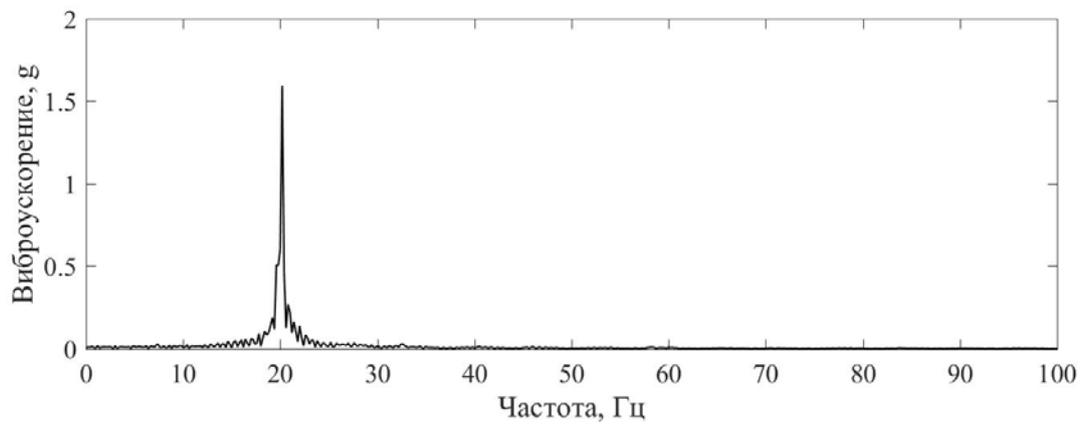
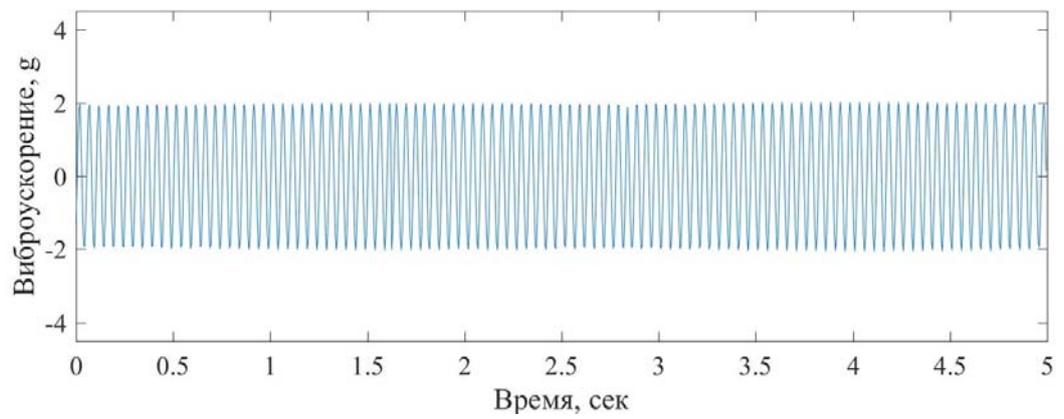
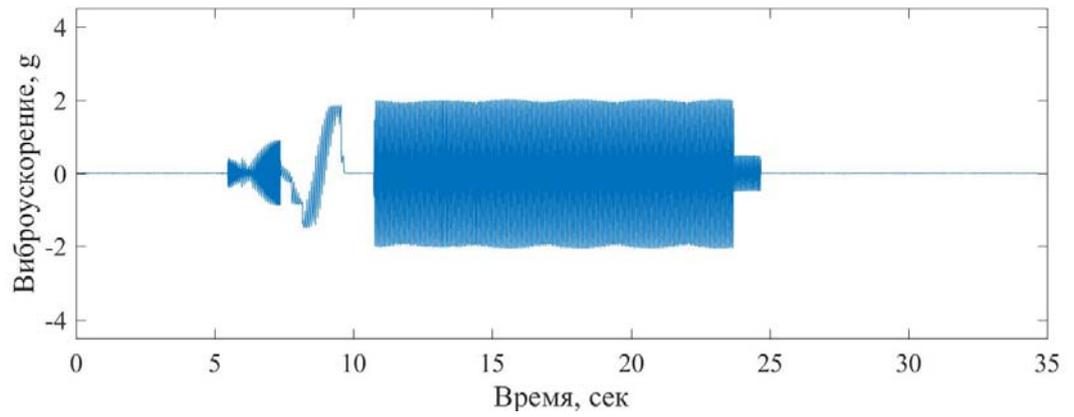


5

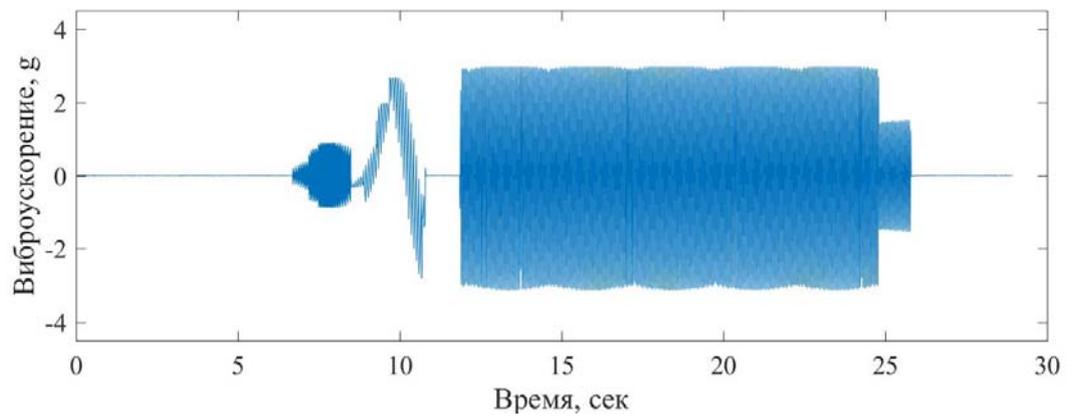


## № эксперимента / сигнал вибрации

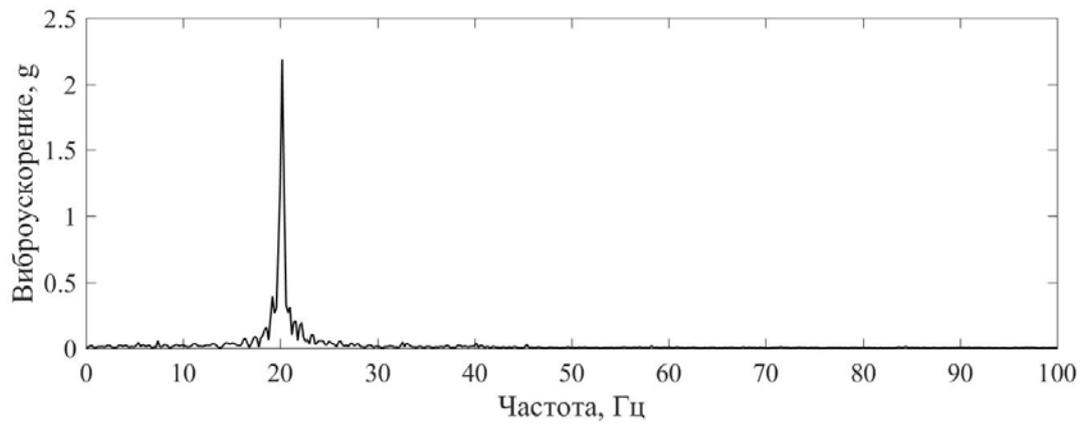
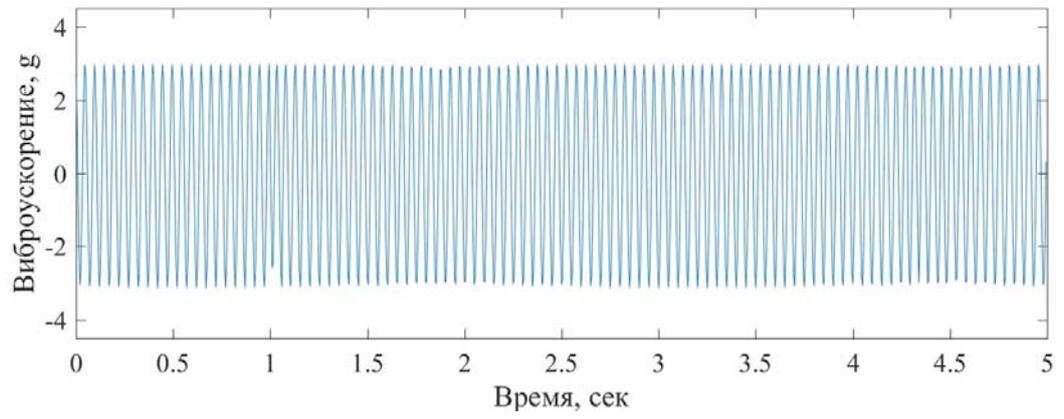
6



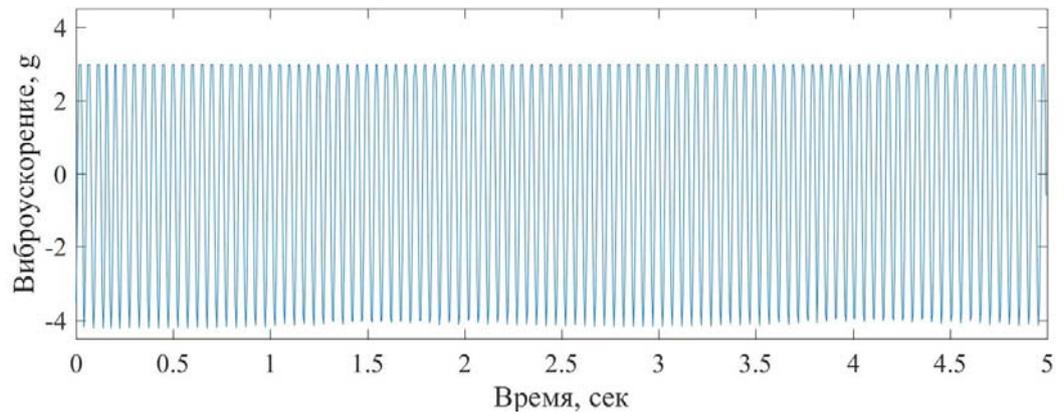
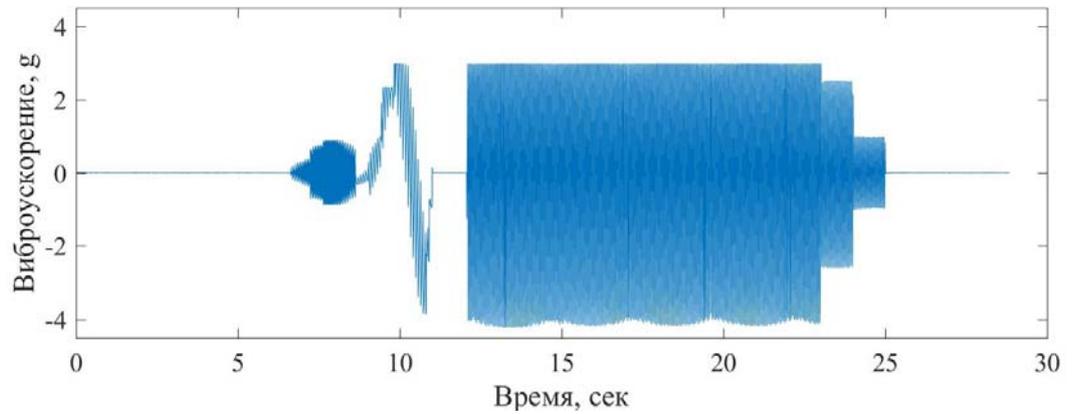
7



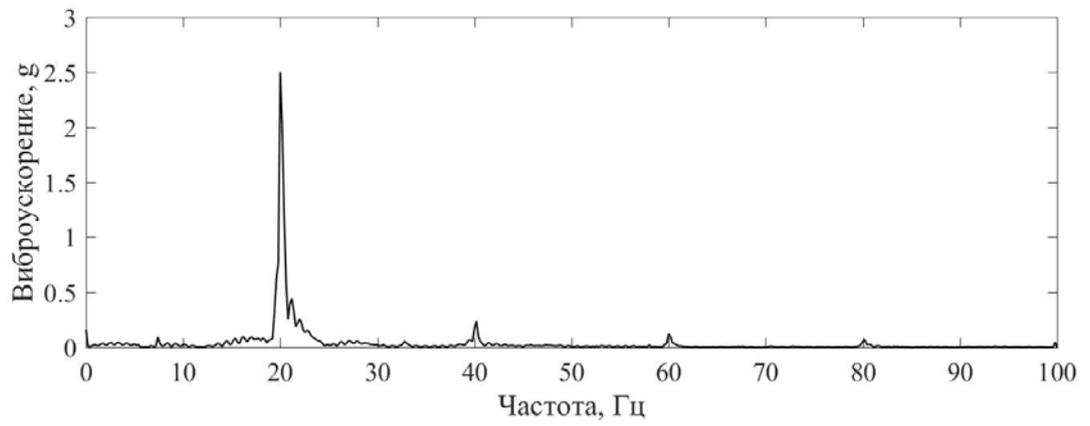
№ эксперимента / сигнал вибрации



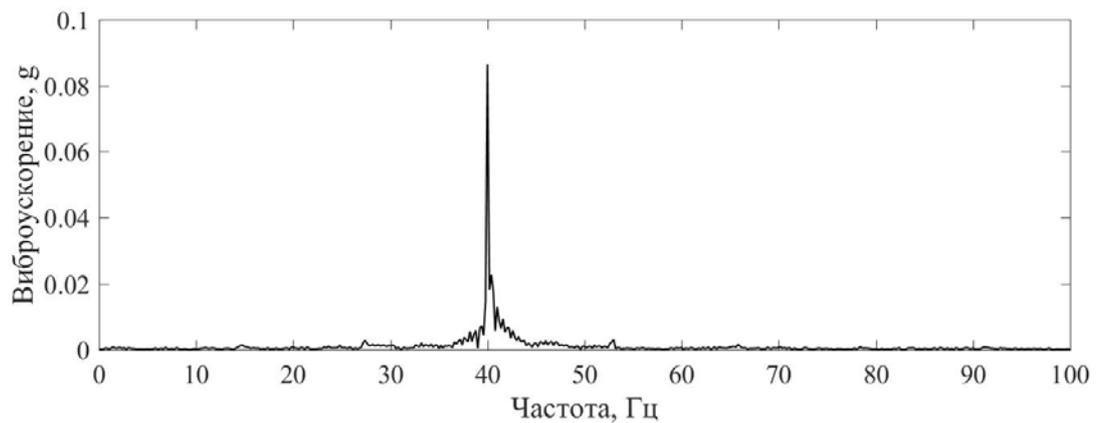
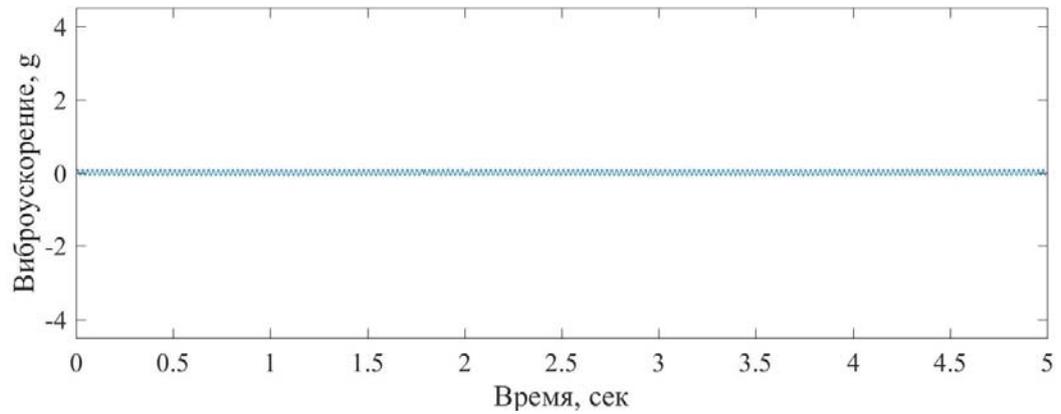
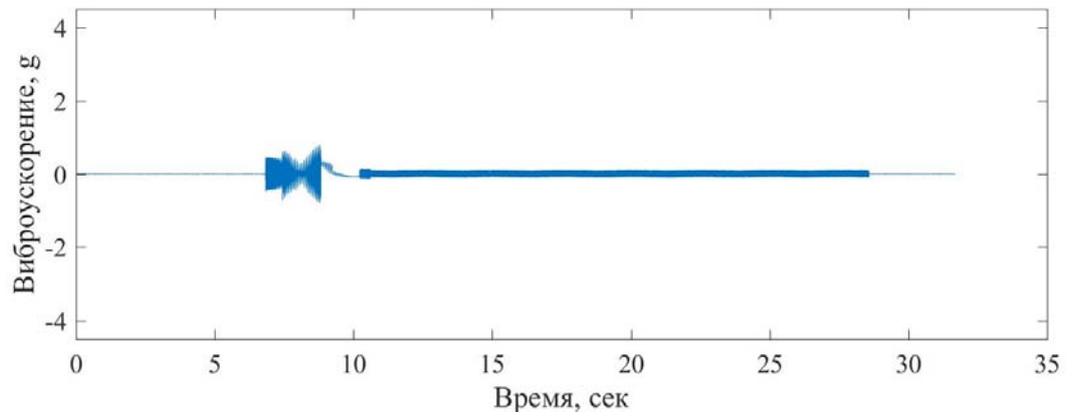
8



## № эксперимента / сигнал вибрации

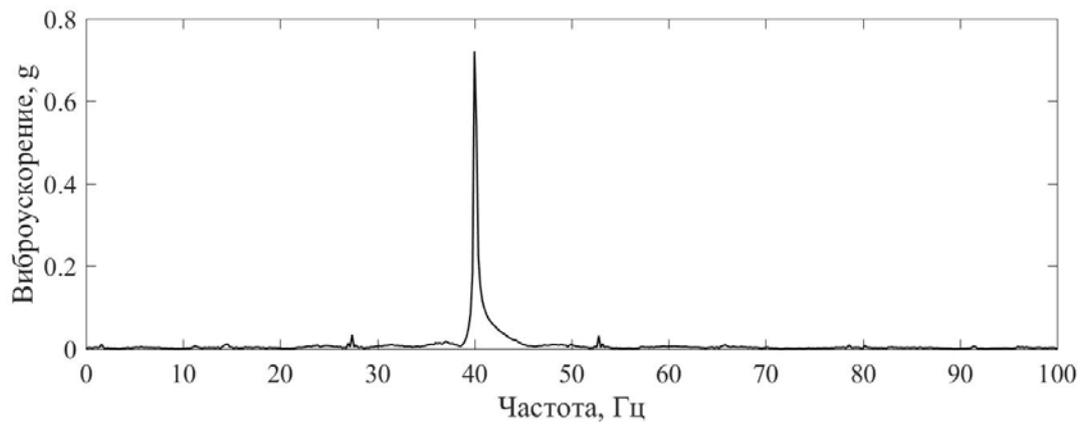
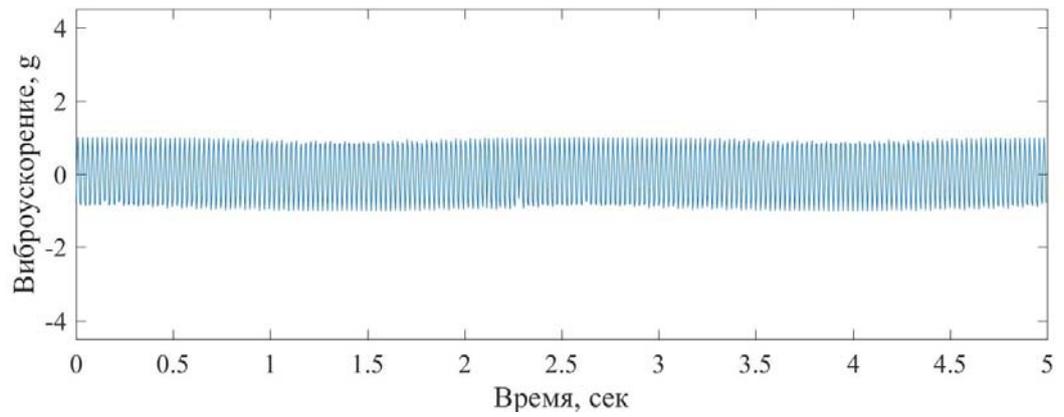
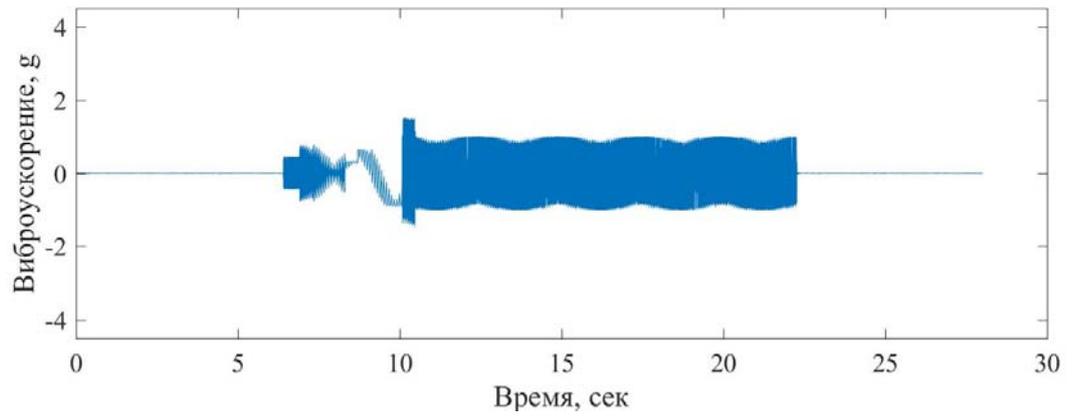


9

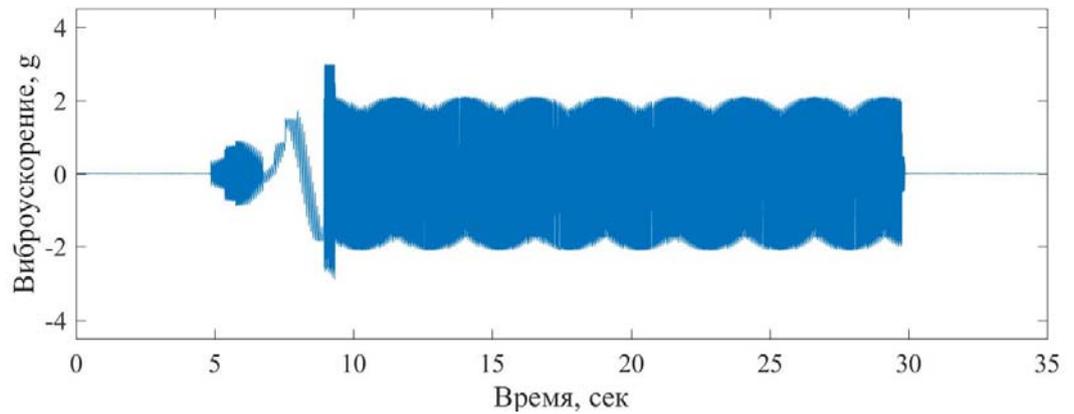


## № эксперимента / сигнал вибрации

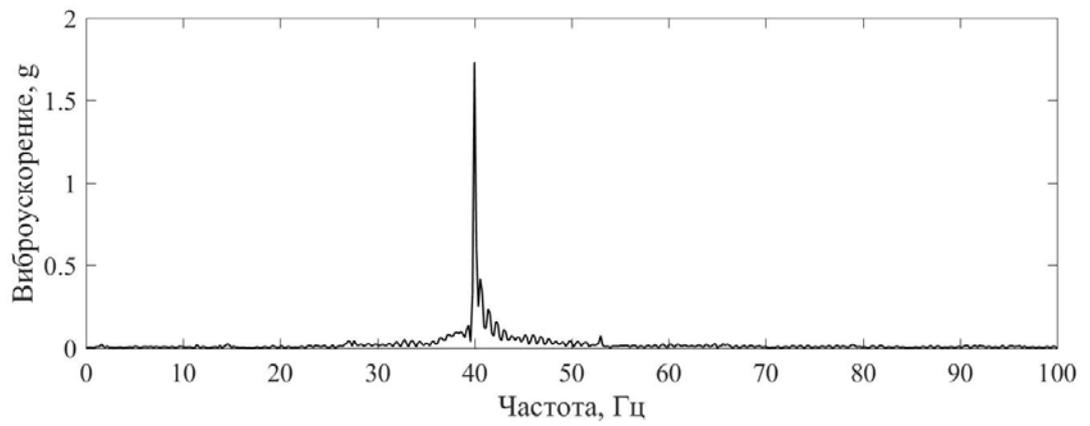
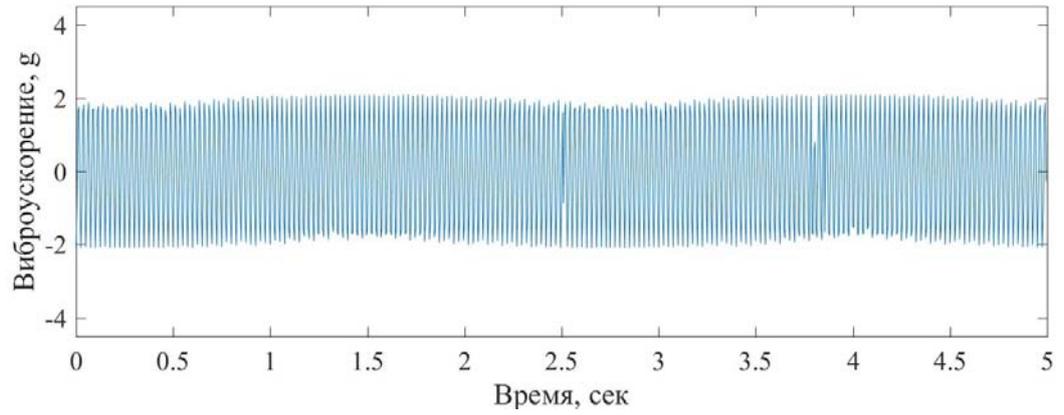
10



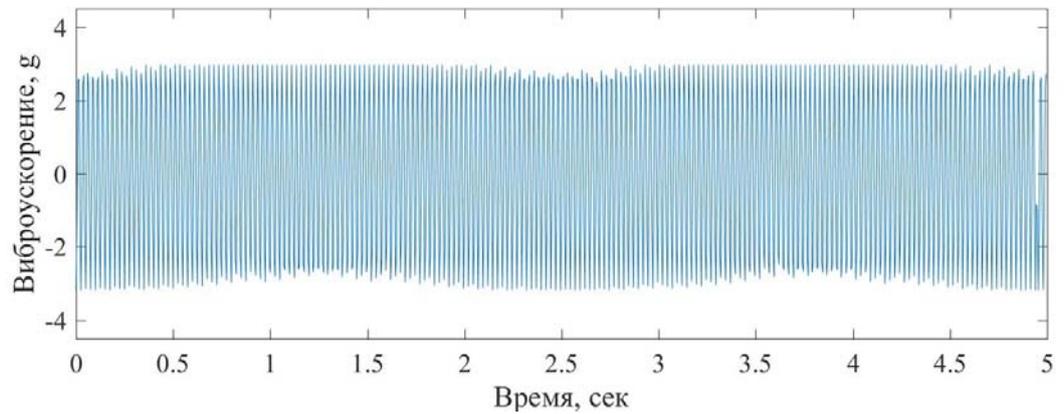
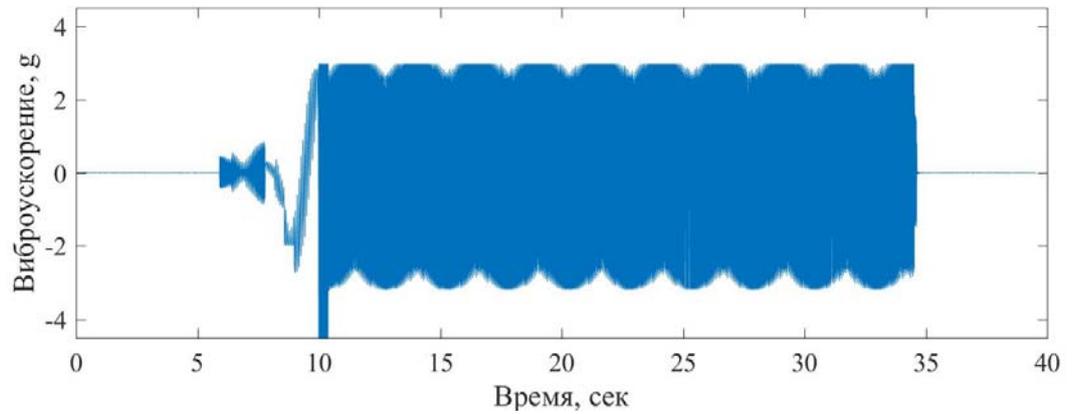
11



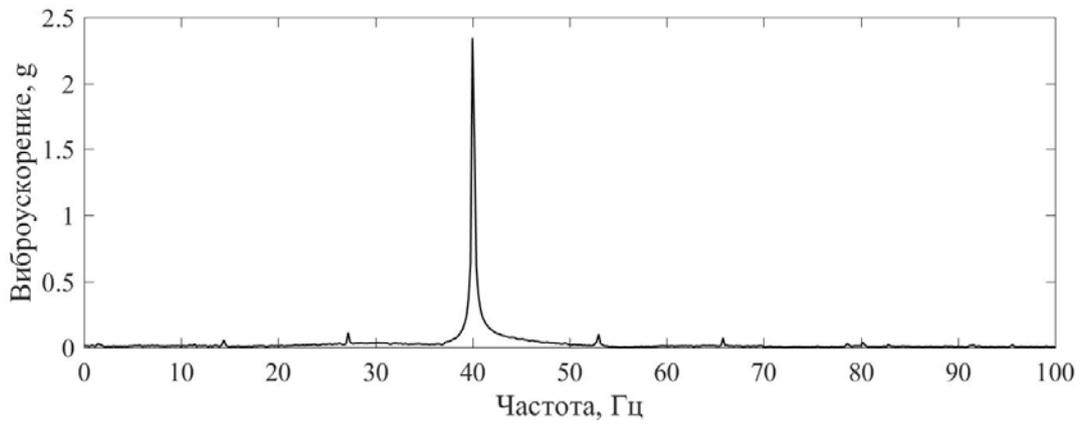
№ эксперимента / сигнал вибрации



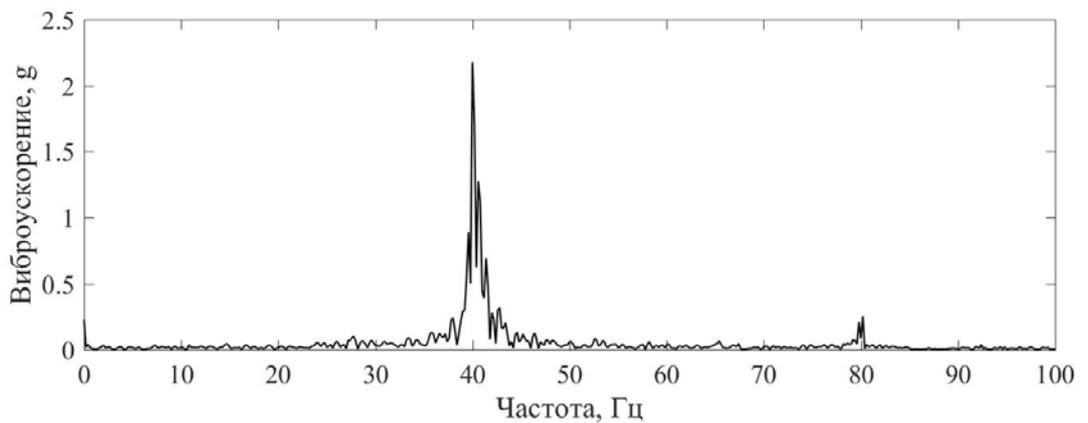
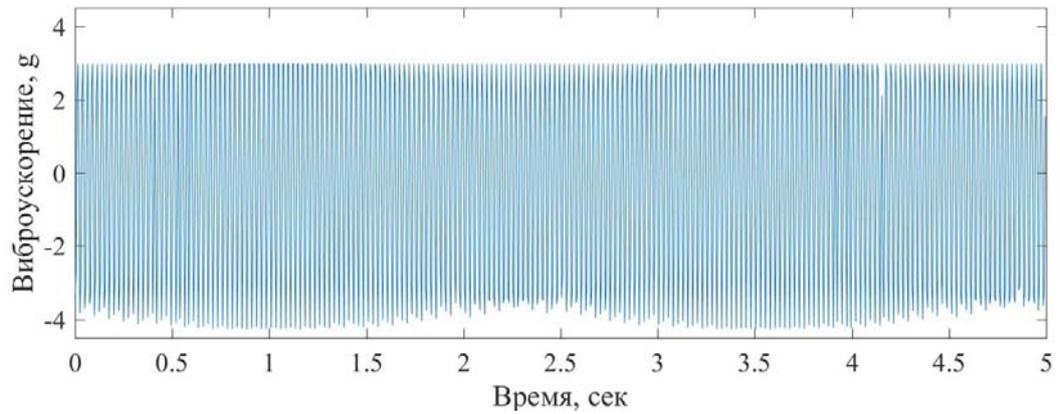
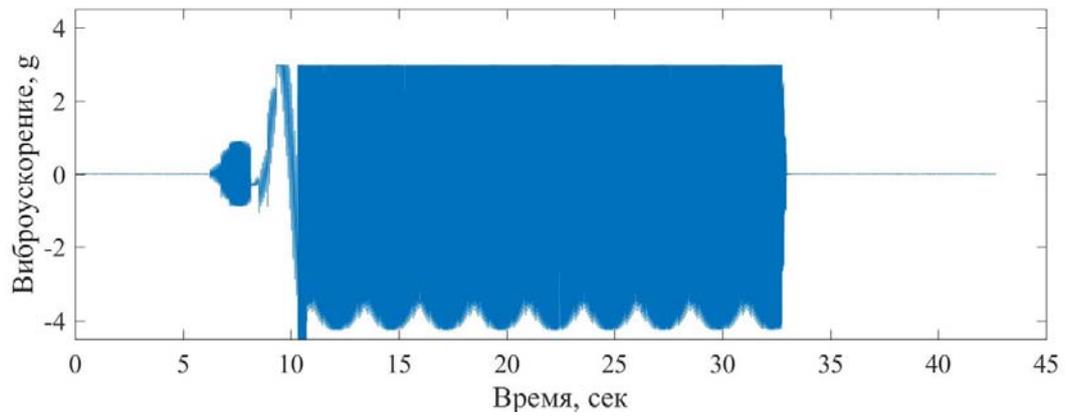
12



№ эксперимента / сигнал вибрации

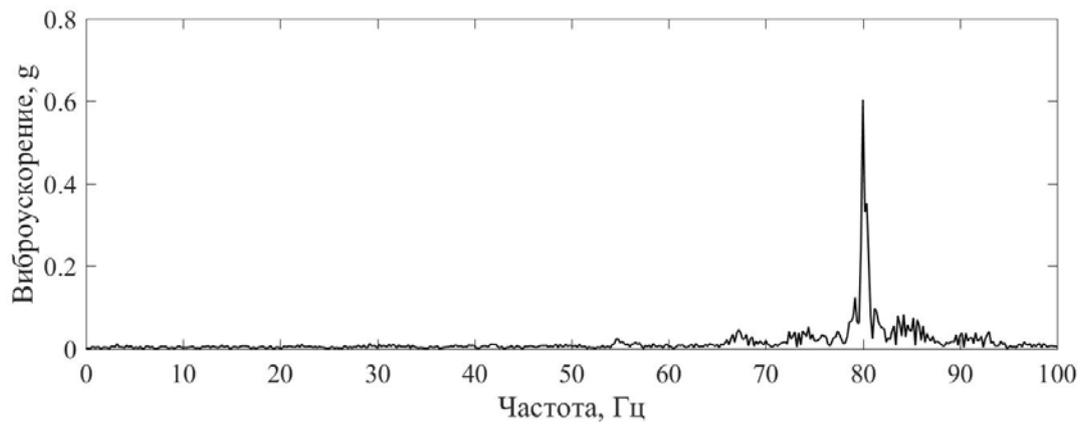
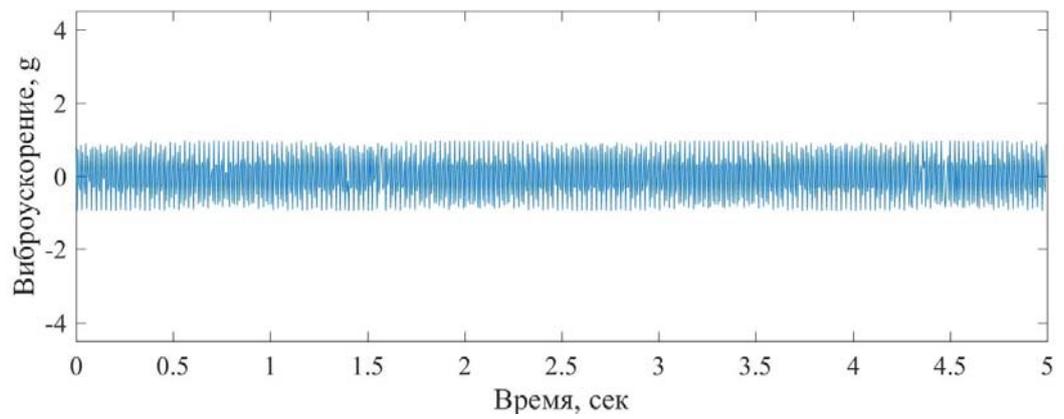
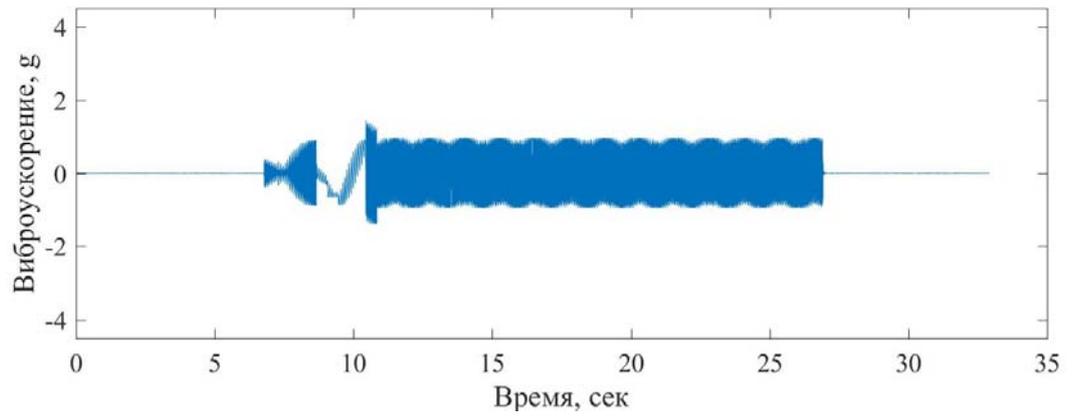


13

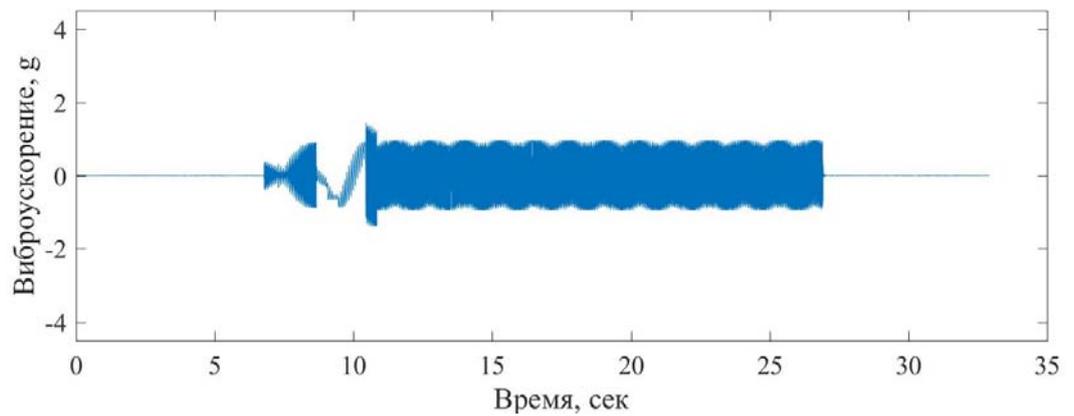


## № эксперимента / сигнал вибрации

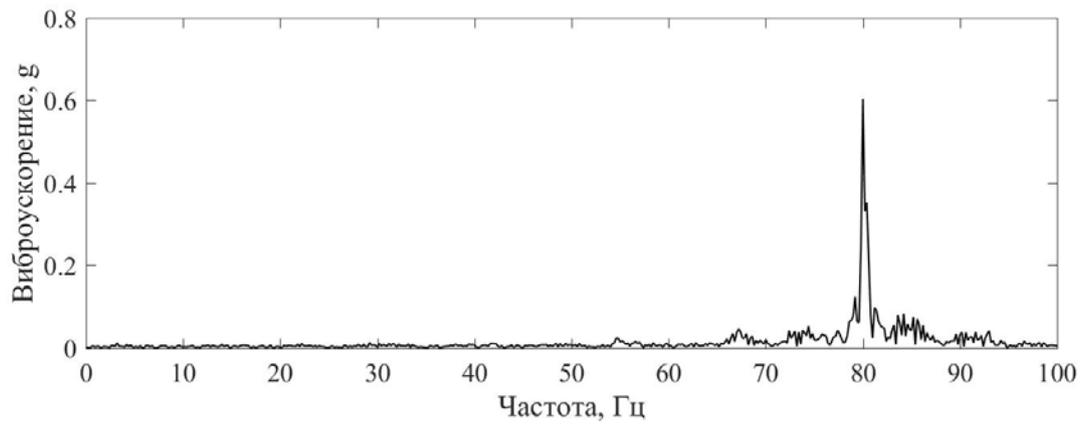
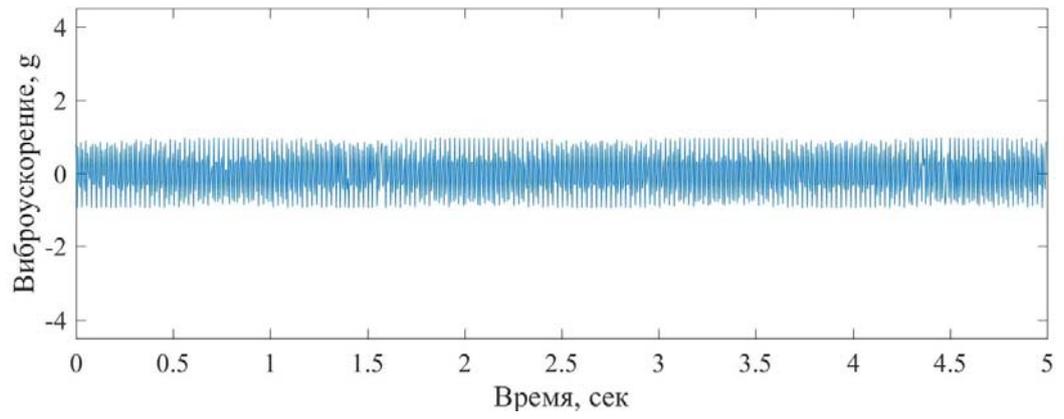
14



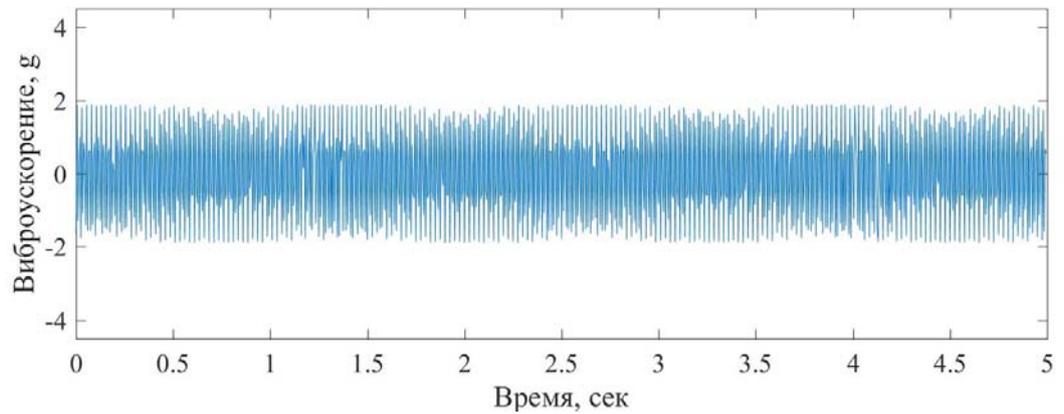
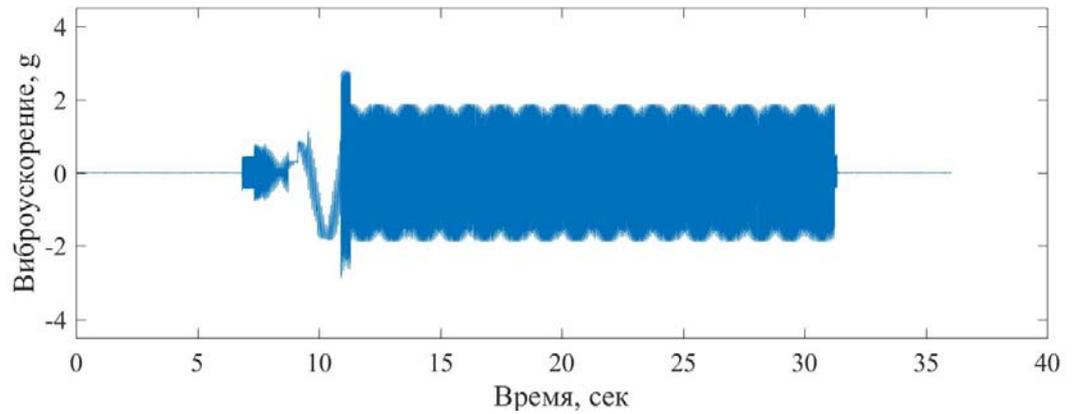
15



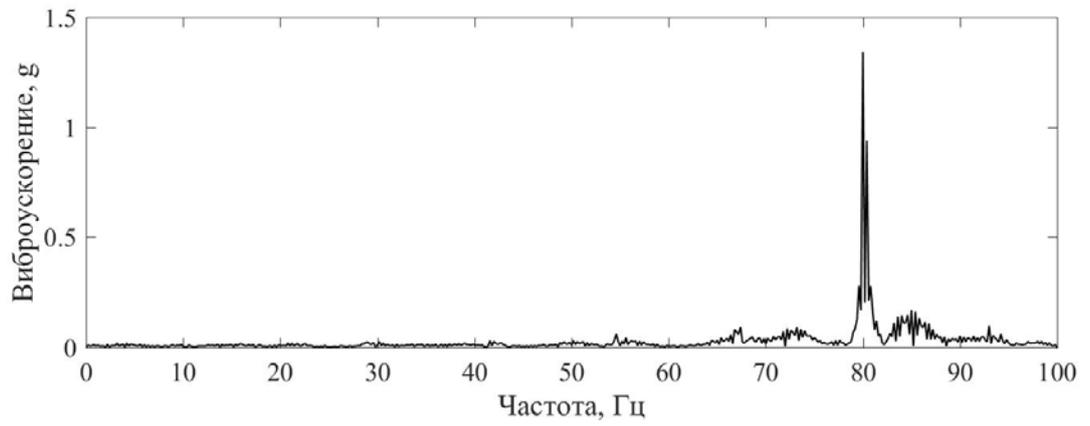
## № эксперимента / сигнал вибрации



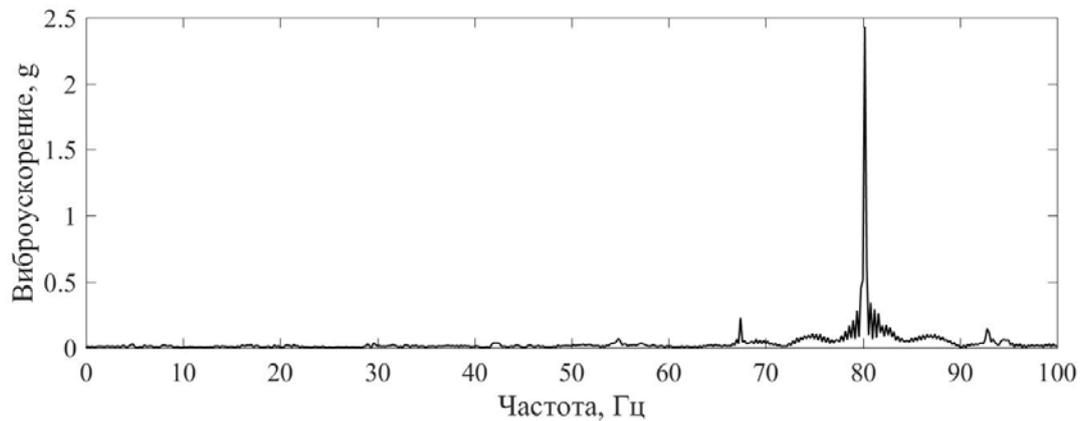
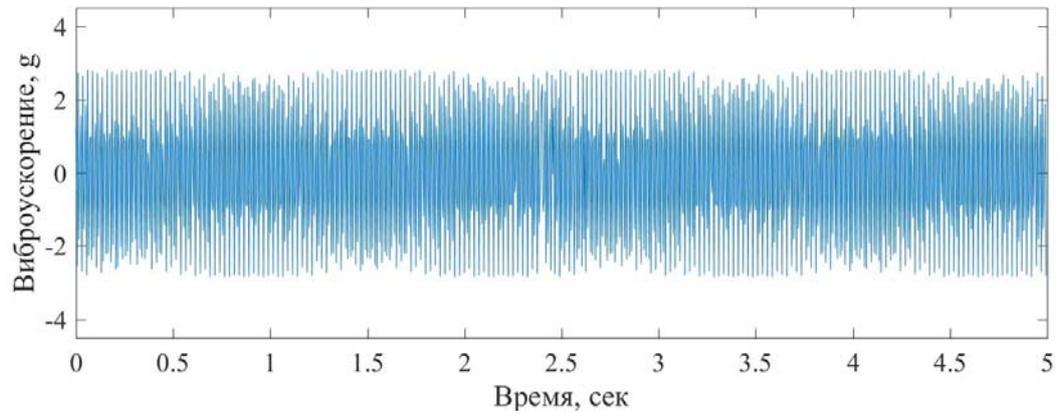
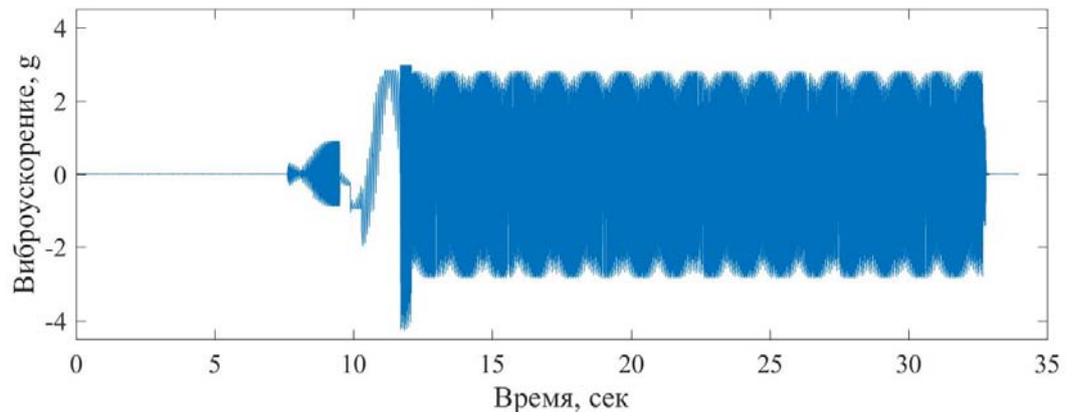
16



## № эксперимента / сигнал вибрации

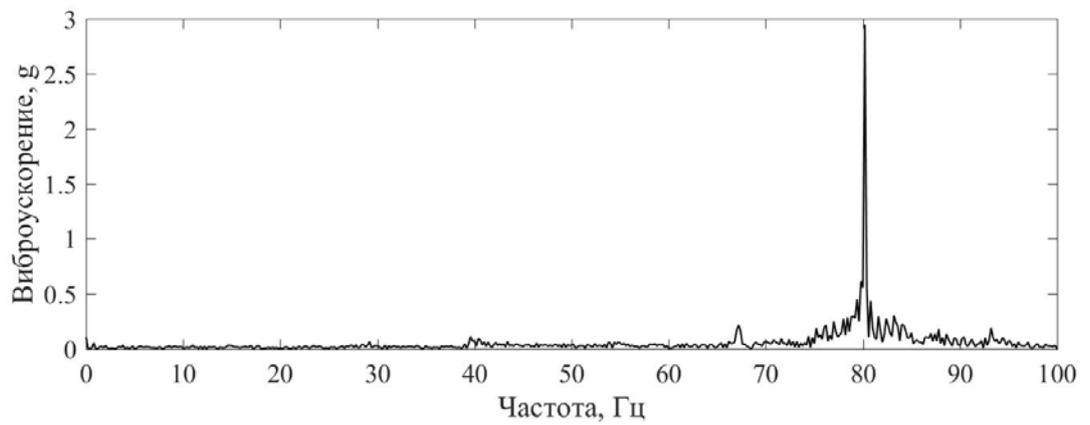
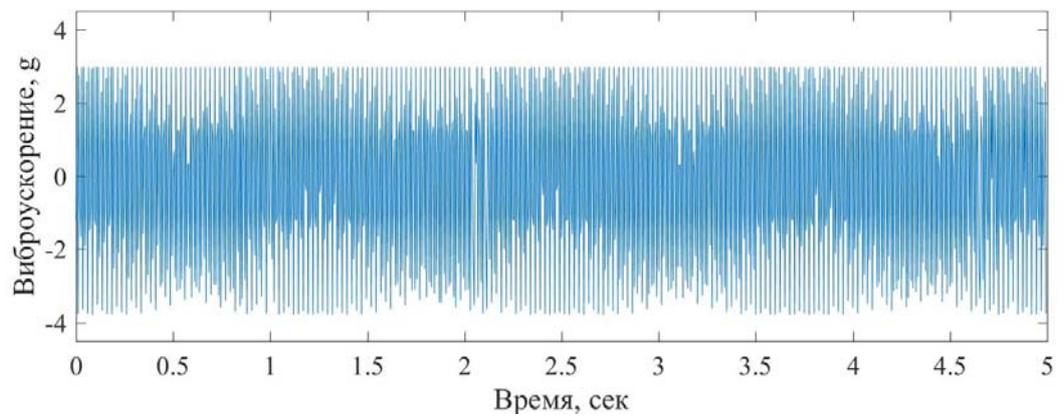
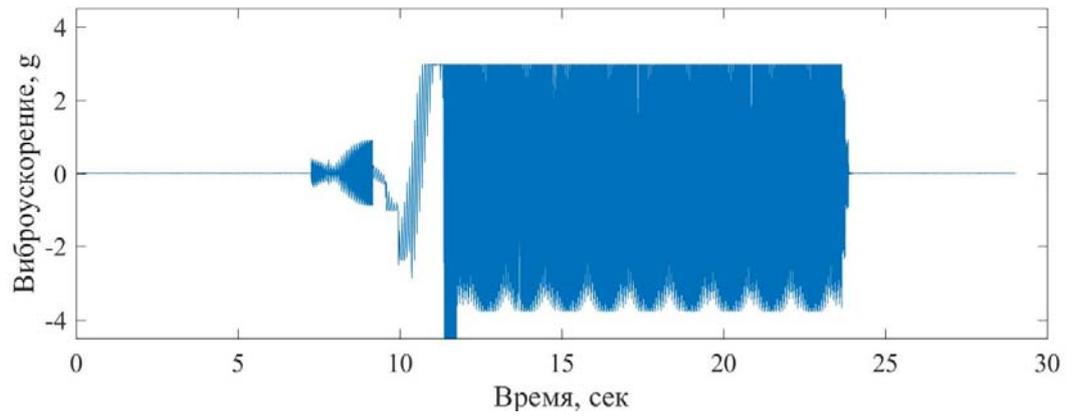


17

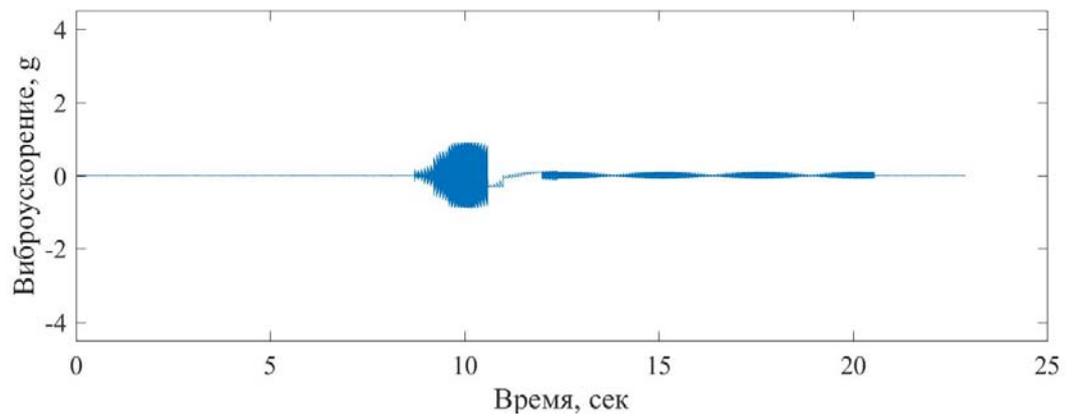


## № эксперимента / сигнал вибрации

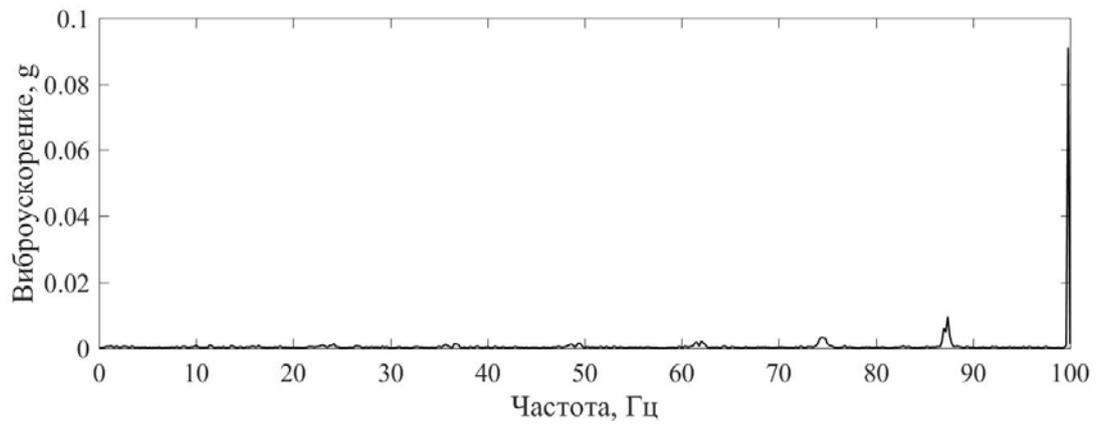
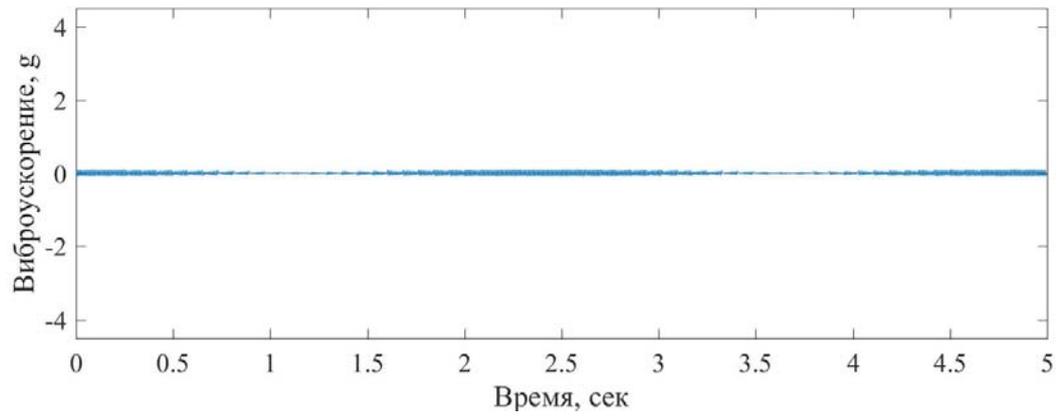
18



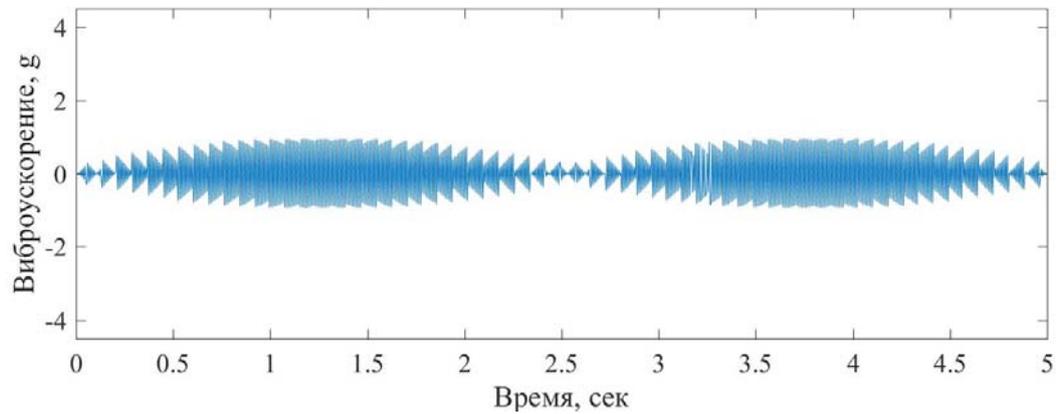
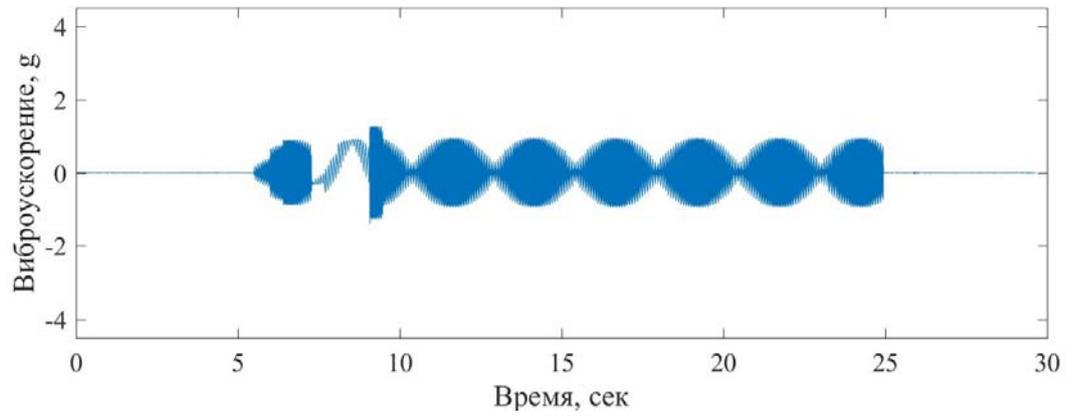
19



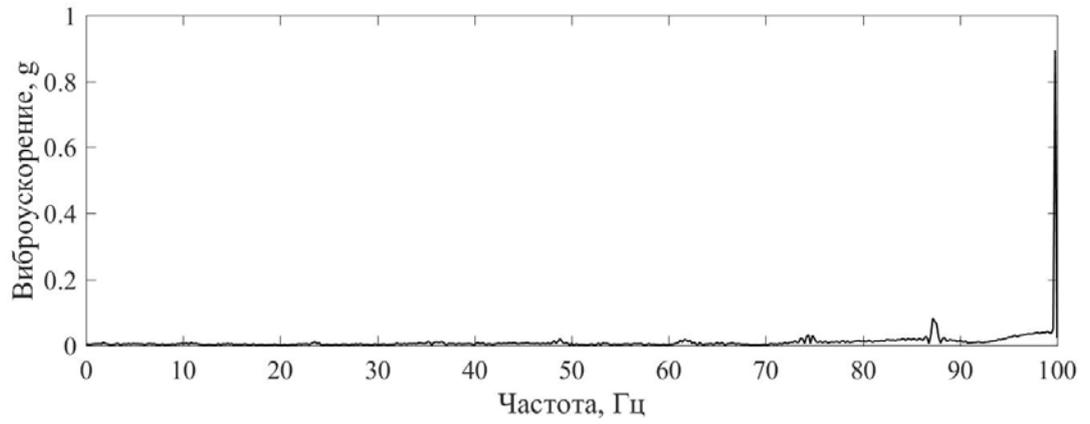
№ эксперимента / сигнал вибрации



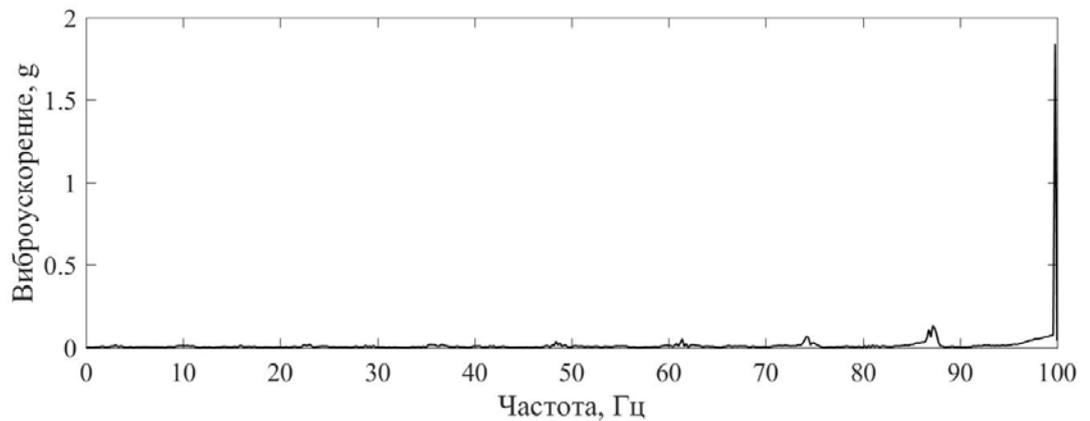
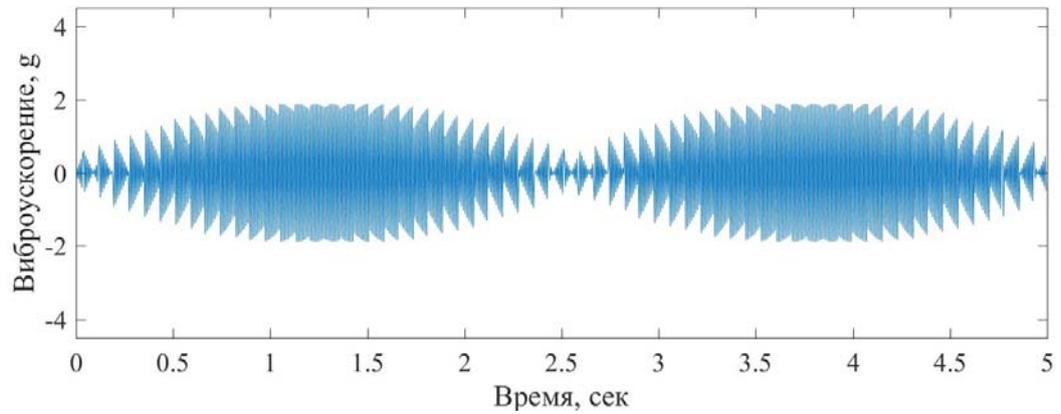
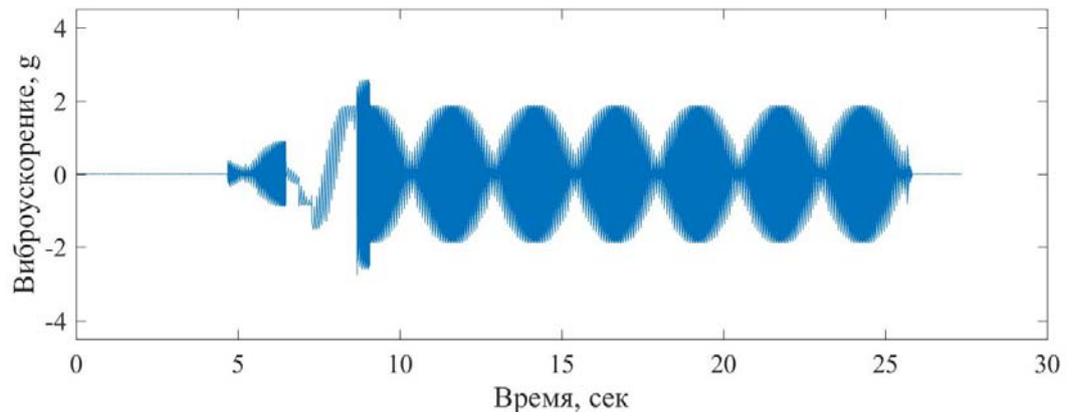
20



№ эксперимента / сигнал вибрации

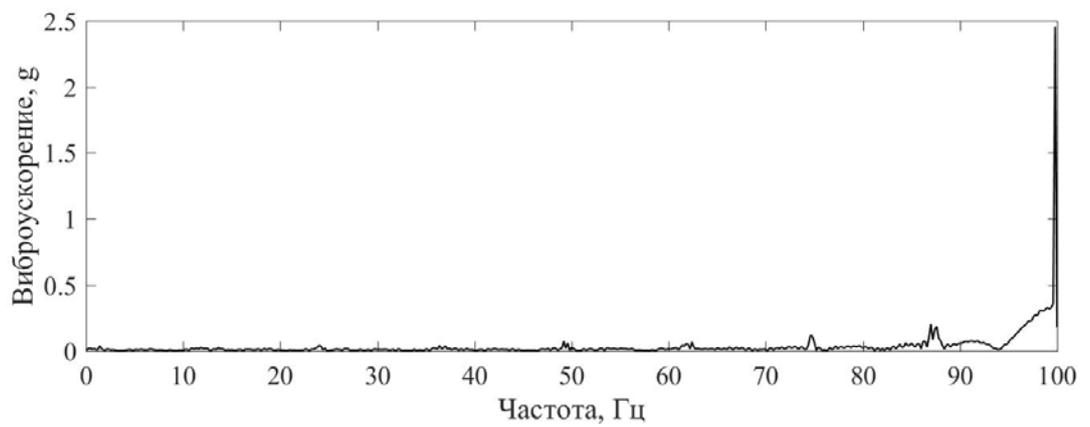
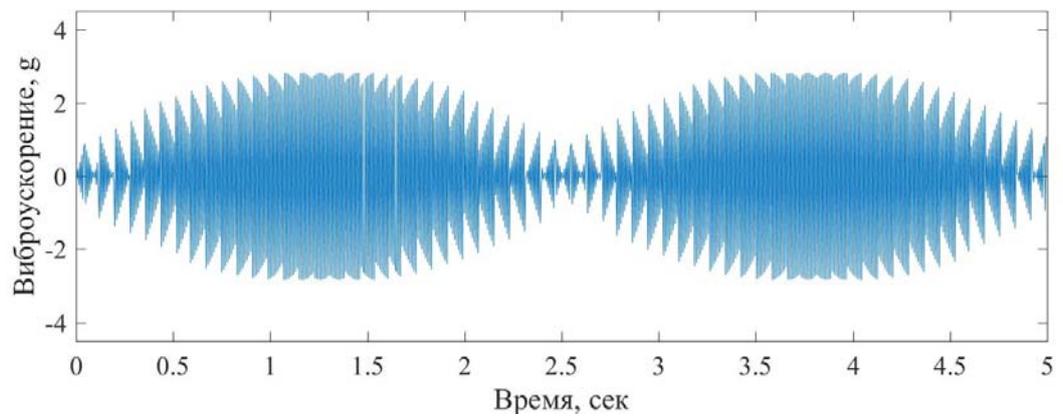
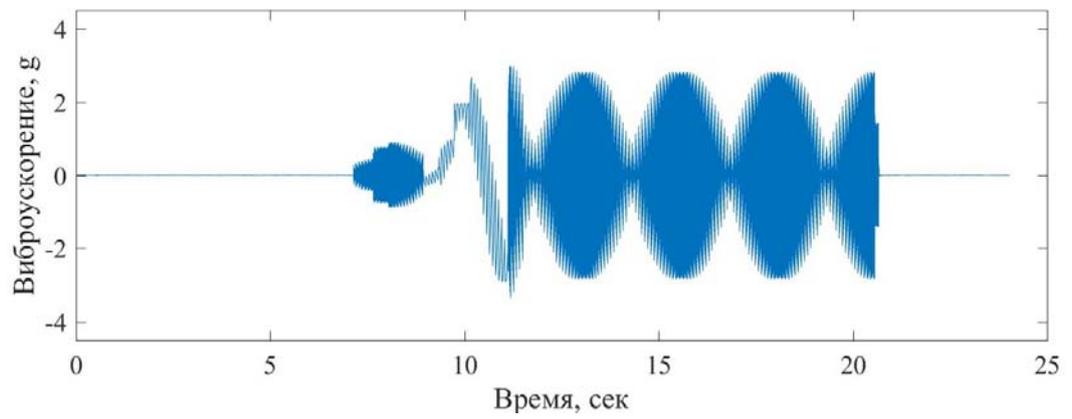


21

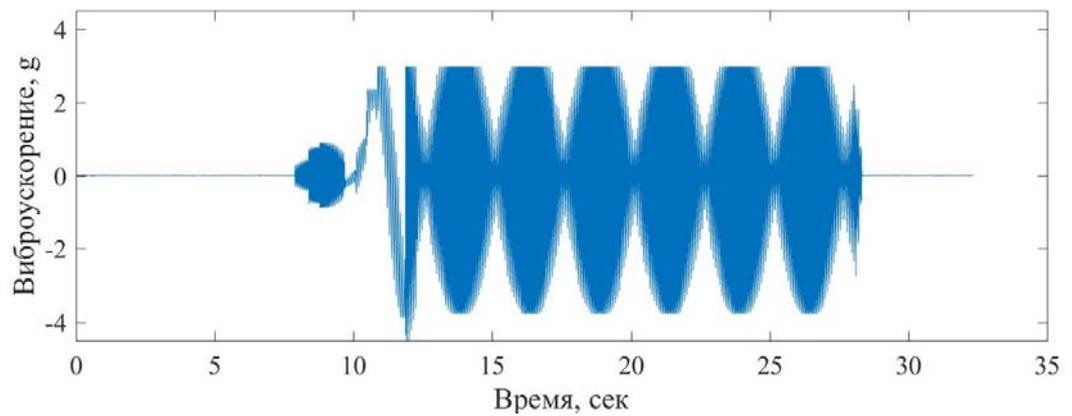


## № эксперимента / сигнал вибрации

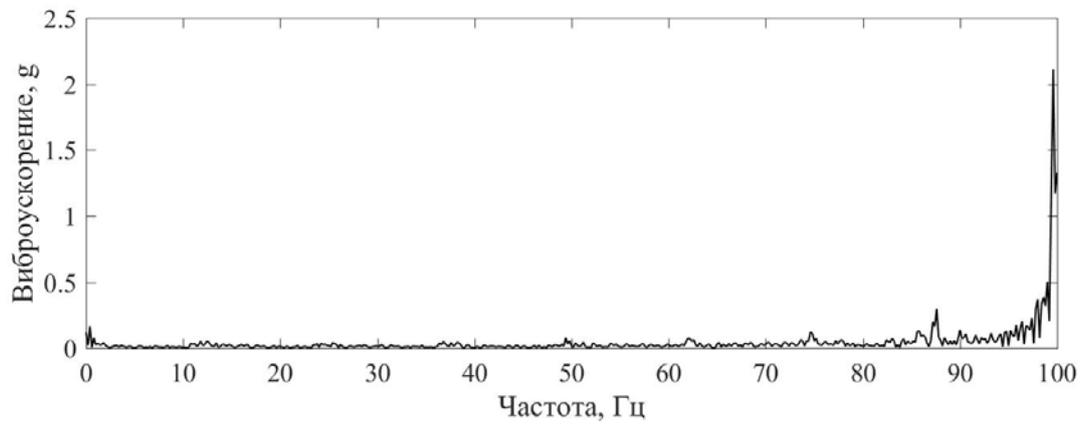
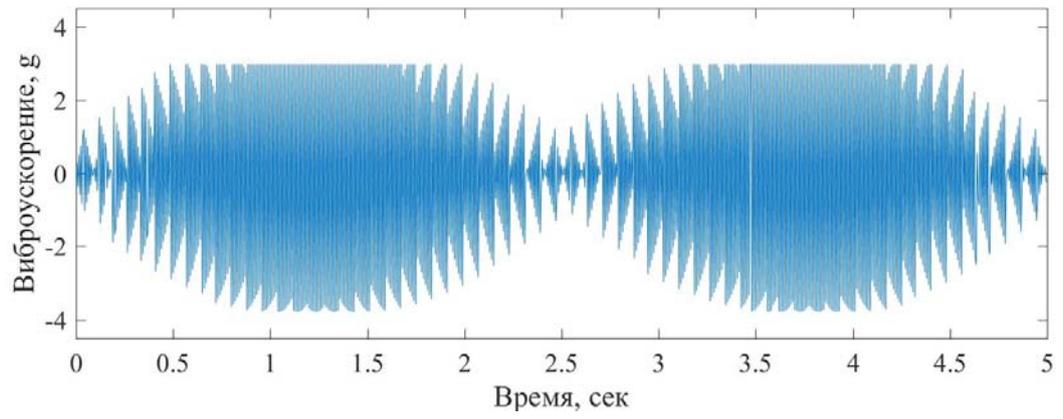
22



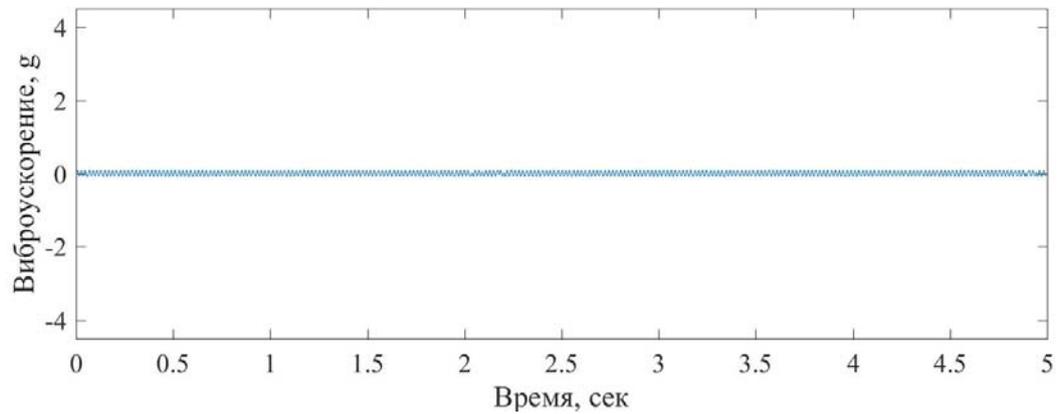
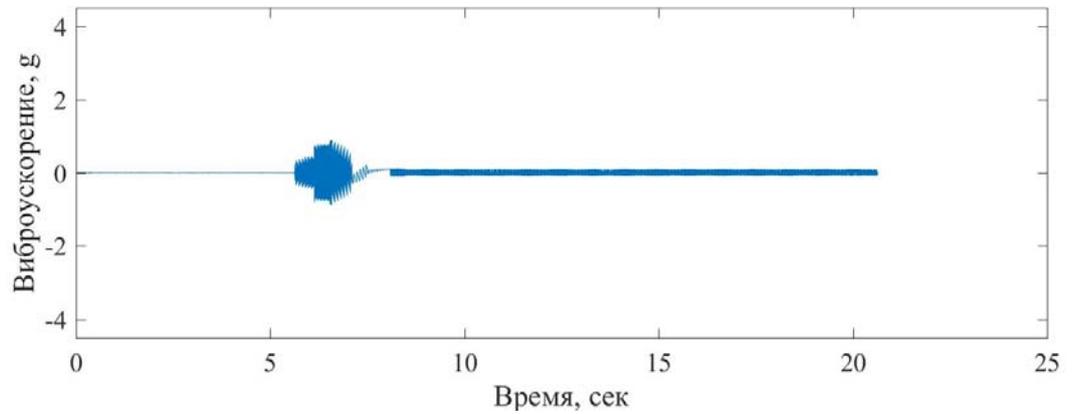
23



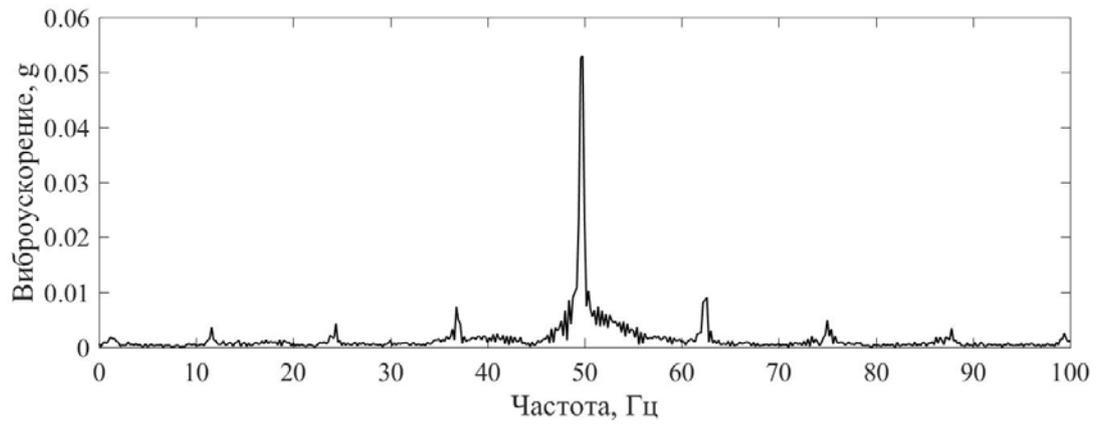
## № эксперимента / сигнал вибрации



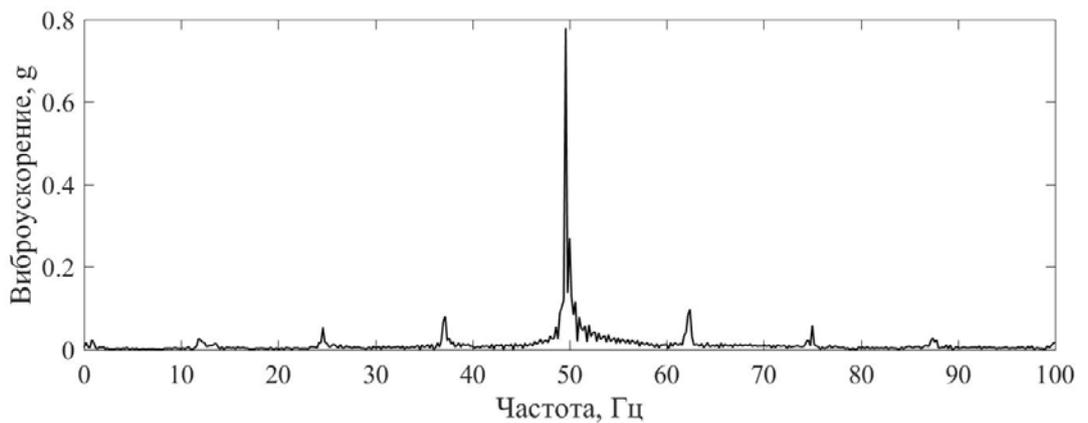
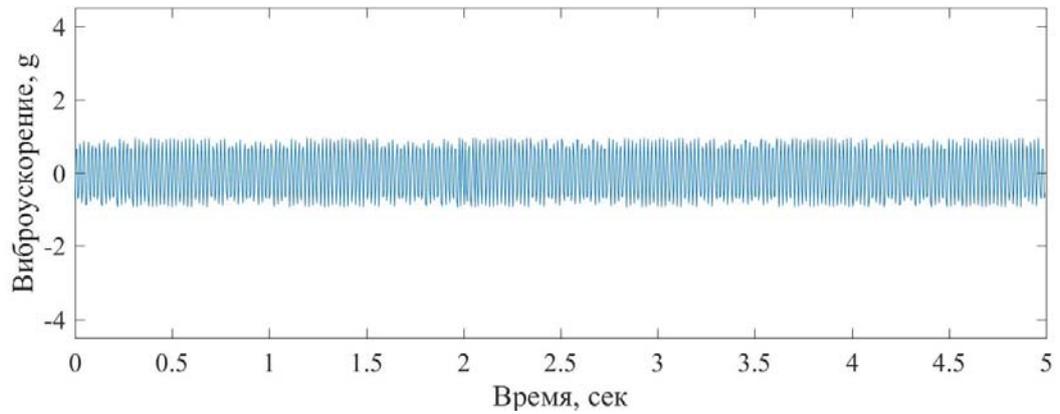
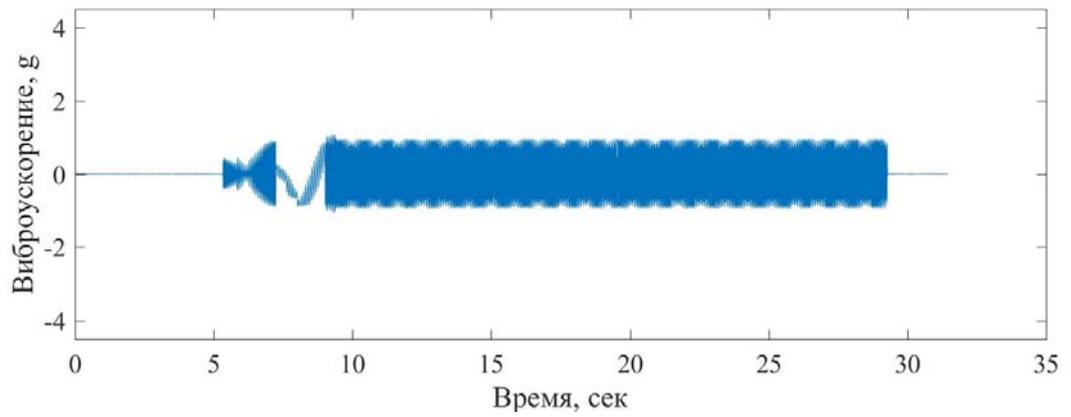
24



№ эксперимента / сигнал вибрации

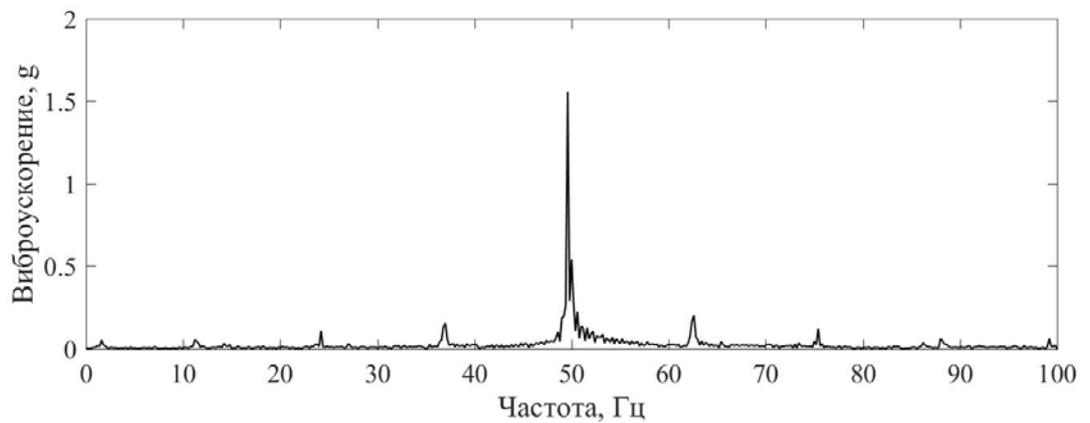
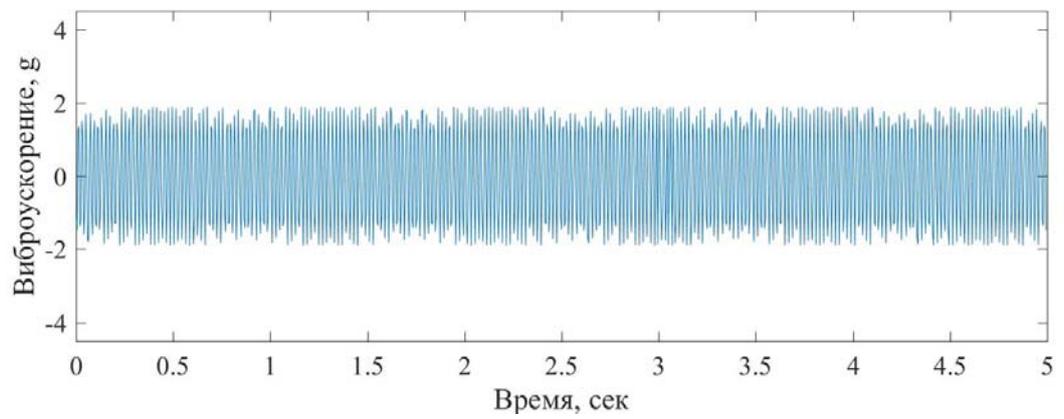
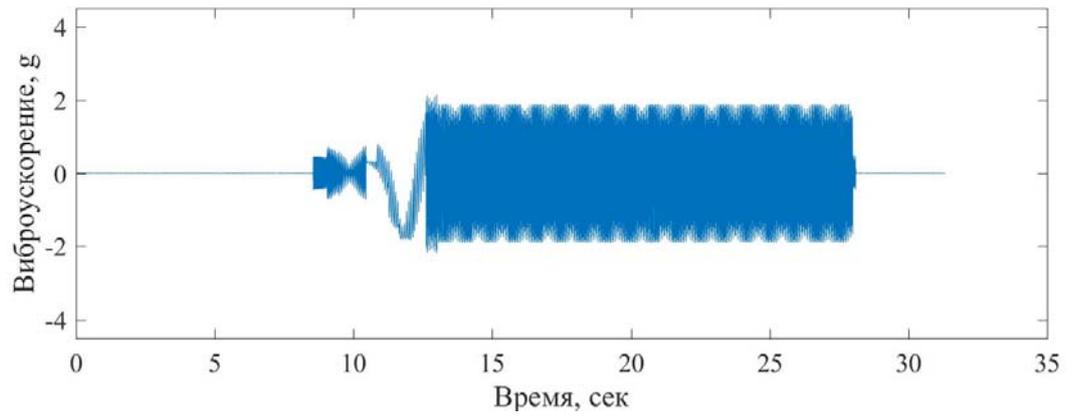


25

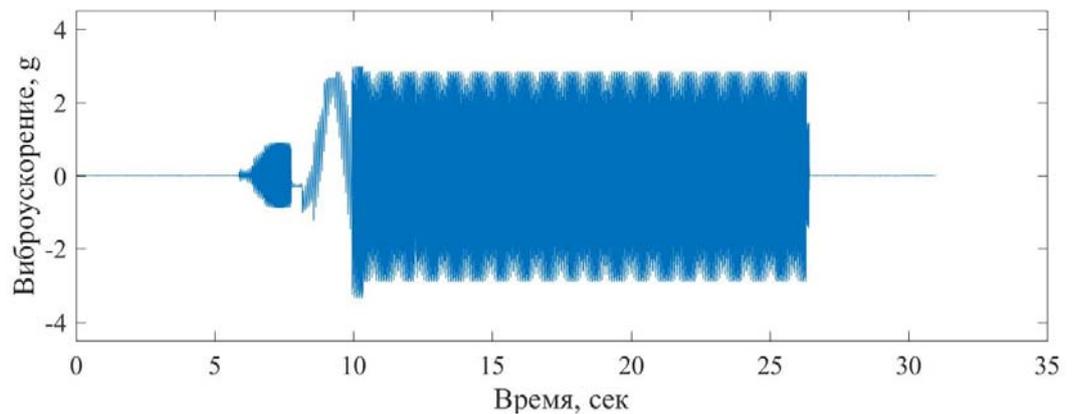


## № эксперимента / сигнал вибрации

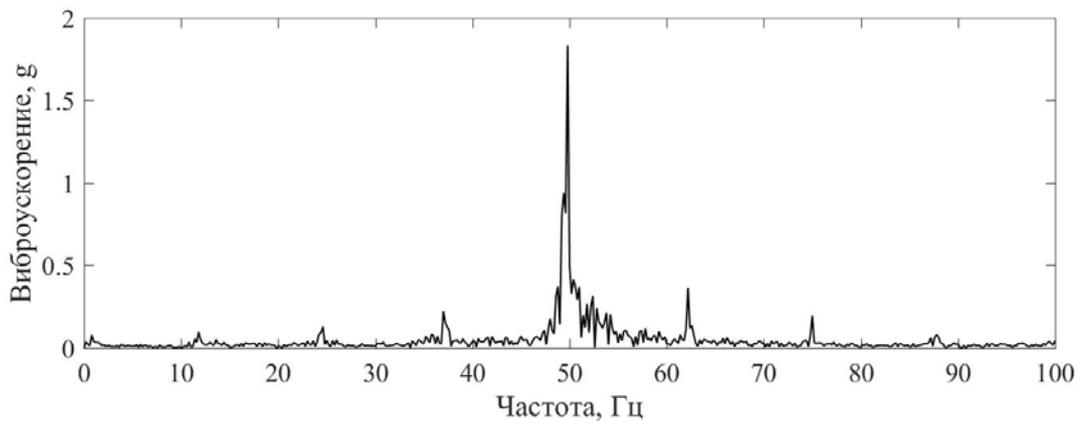
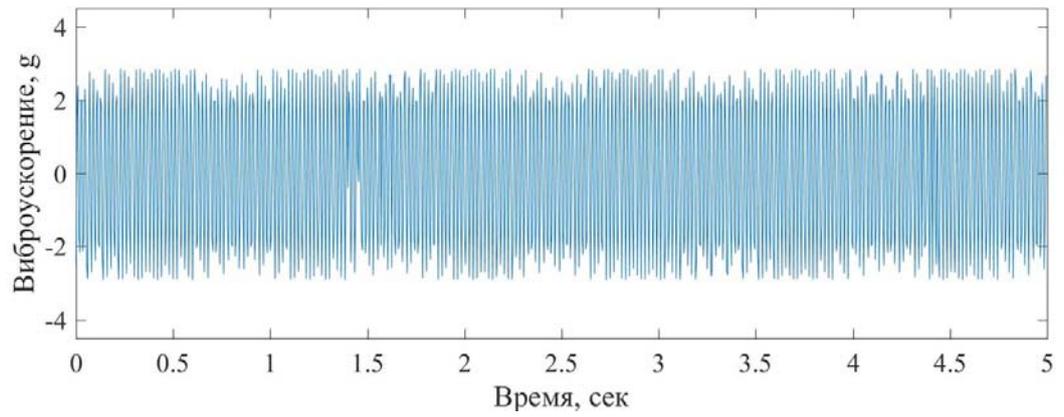
26



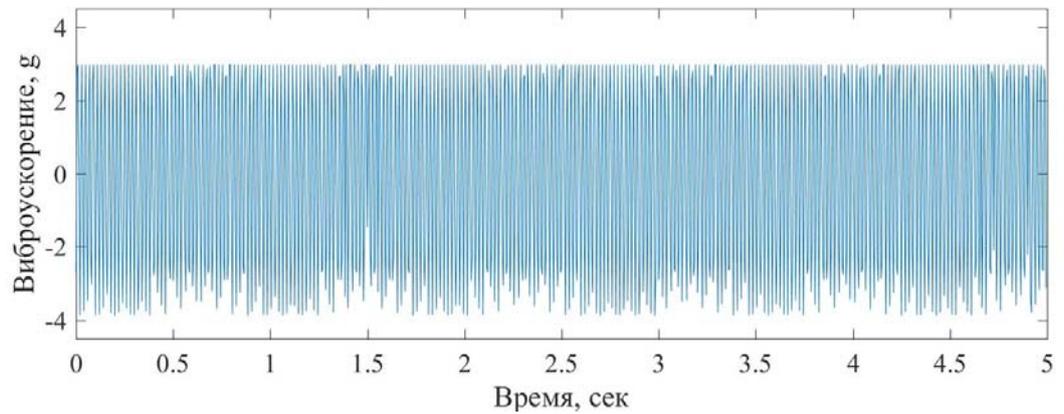
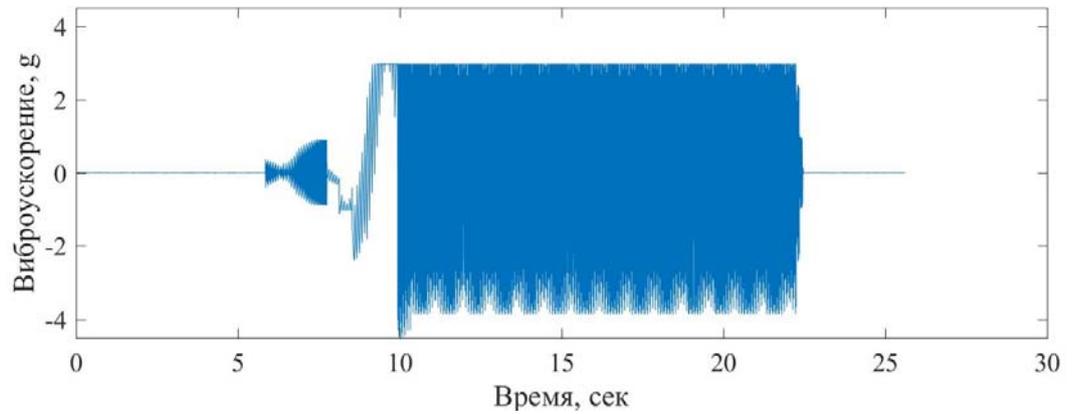
27



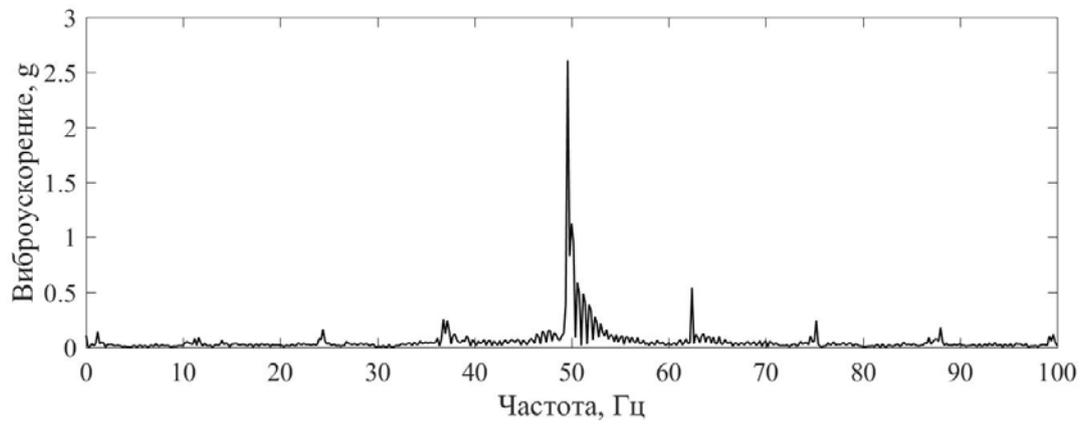
№ эксперимента / сигнал вибрации



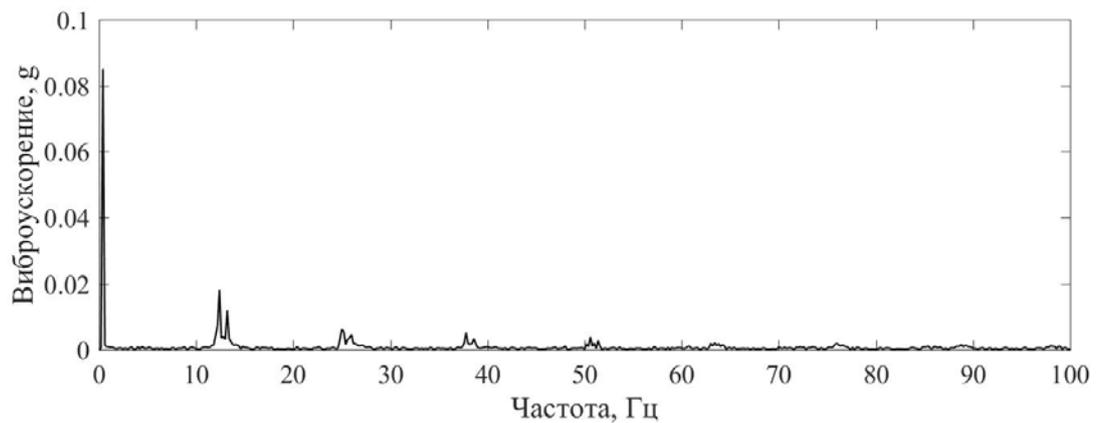
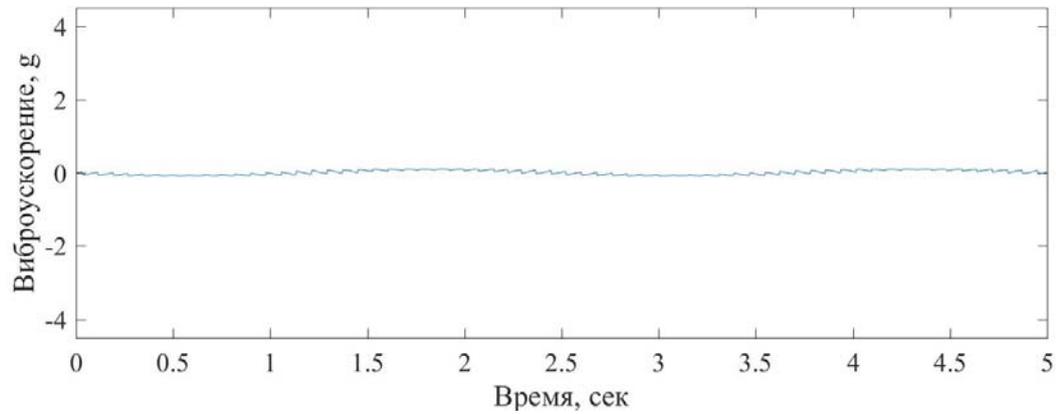
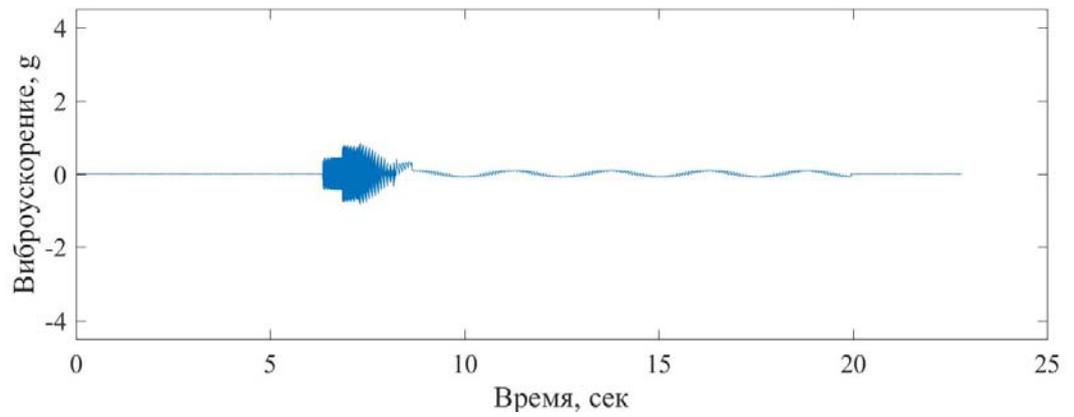
28



№ эксперимента / сигнал вибрации

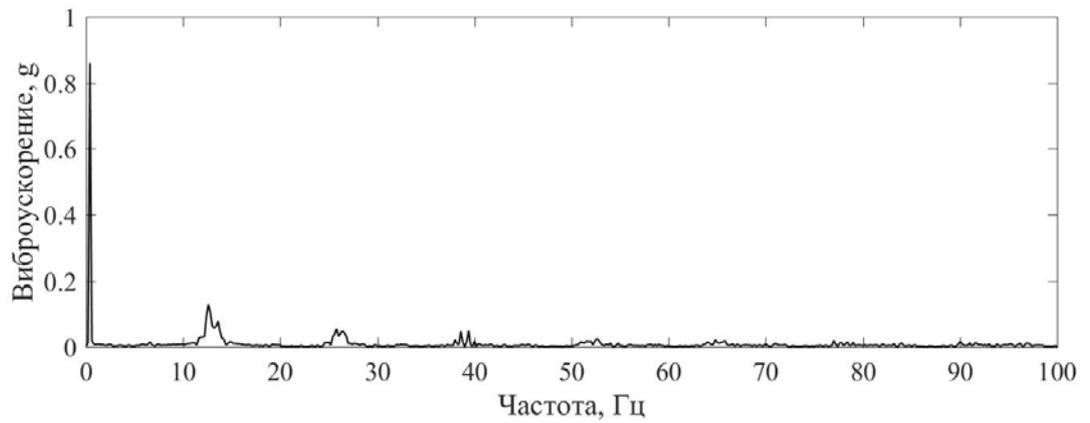
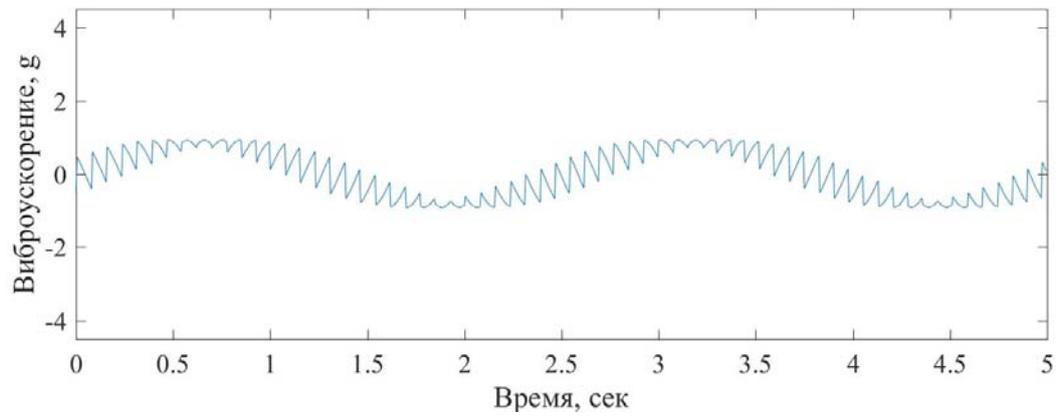
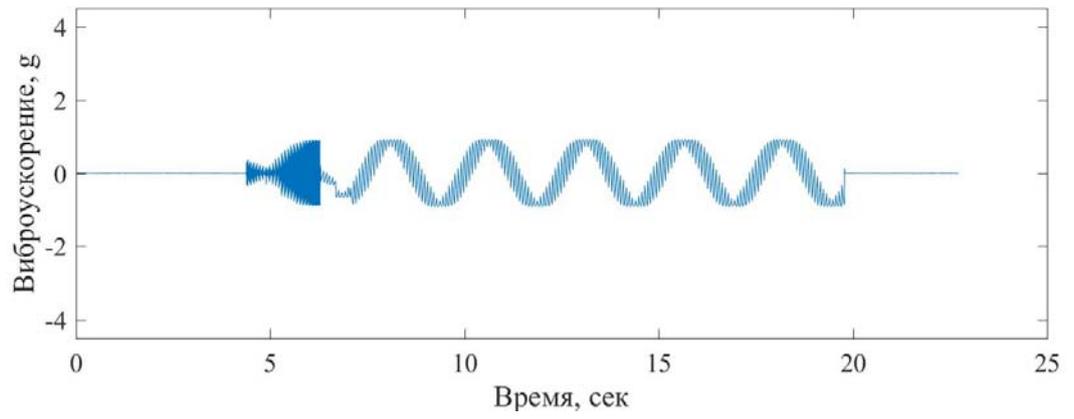


29

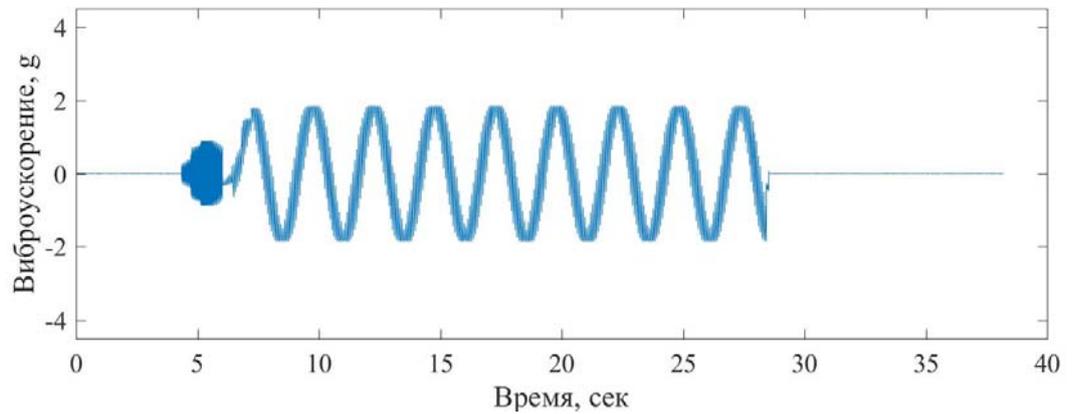


## № эксперимента / сигнал вибрации

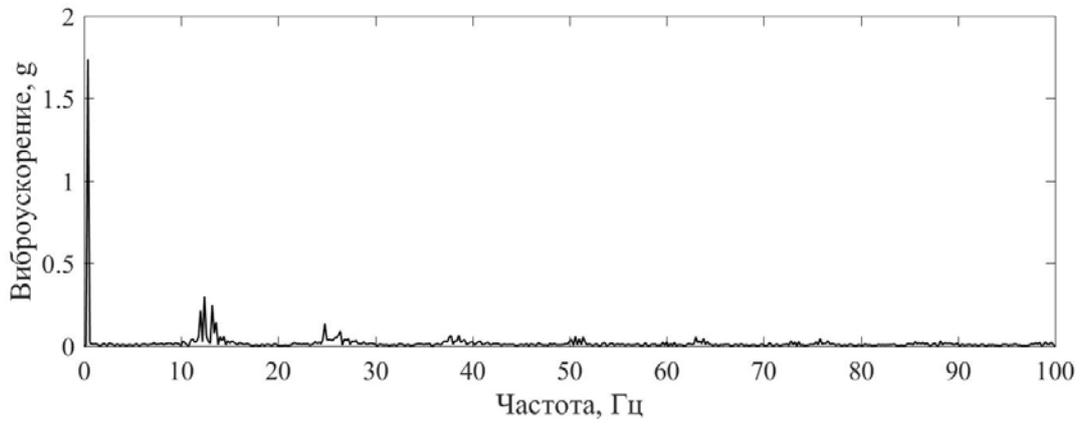
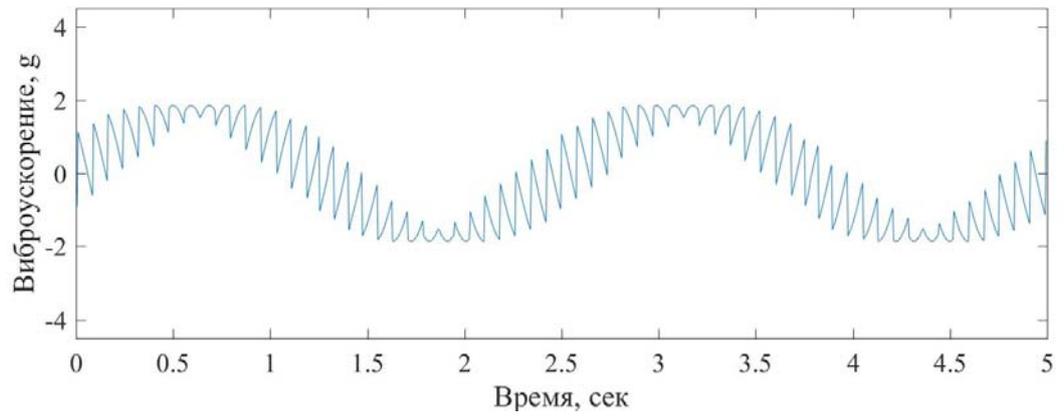
30



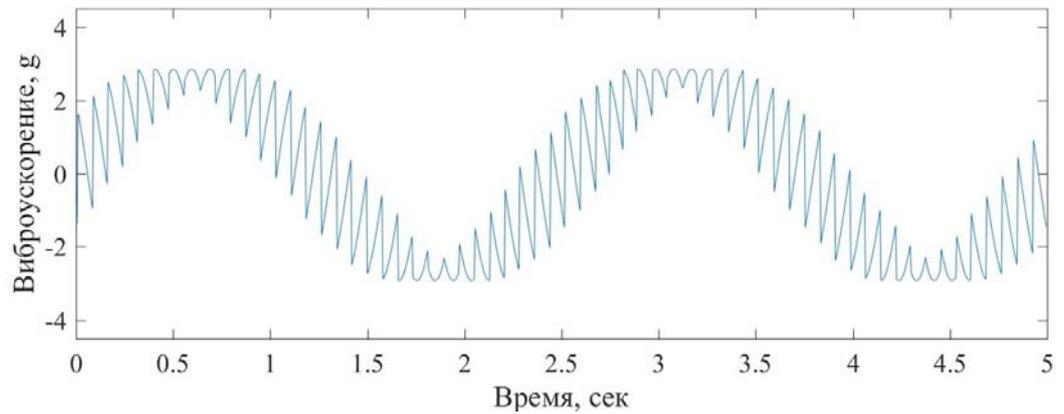
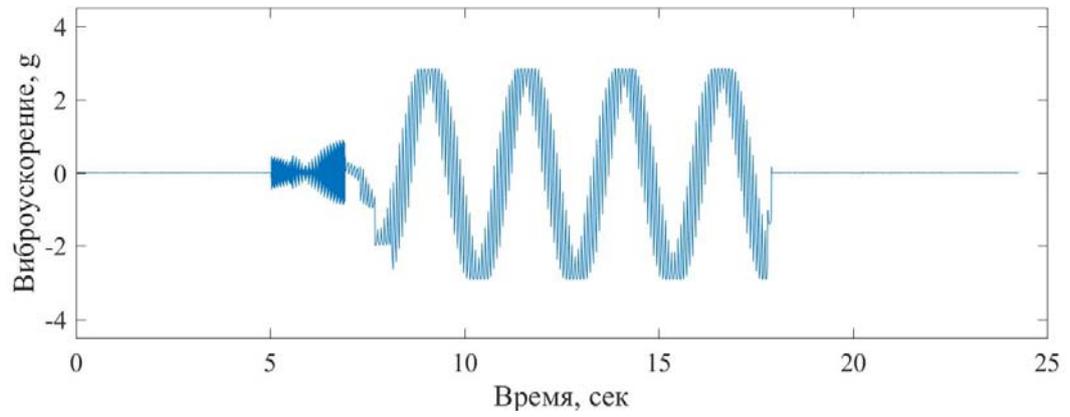
31



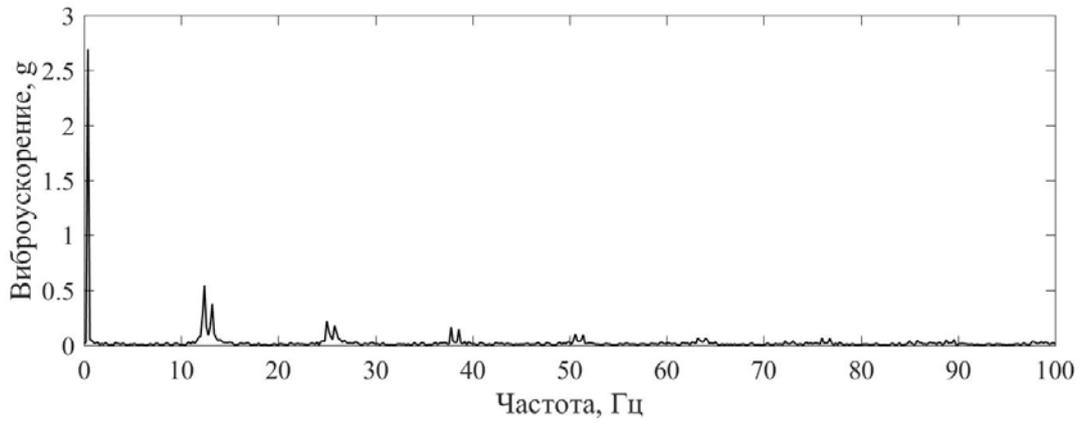
## № эксперимента / сигнал вибрации



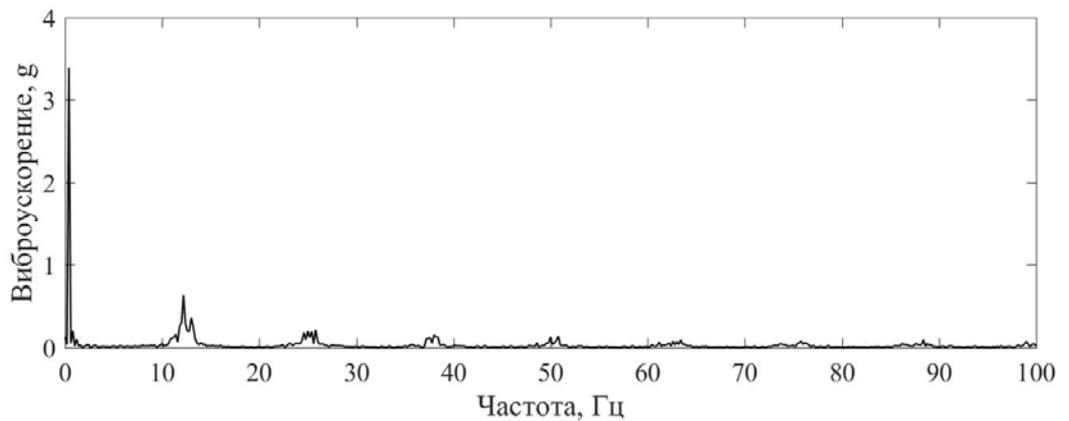
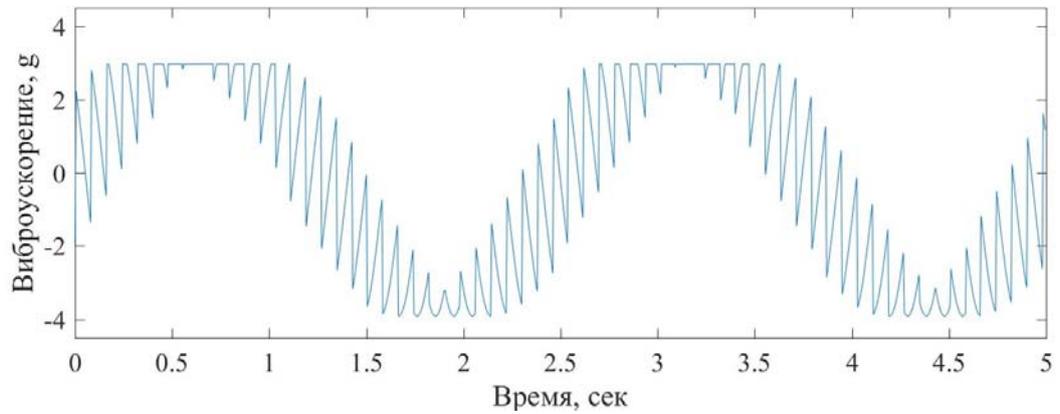
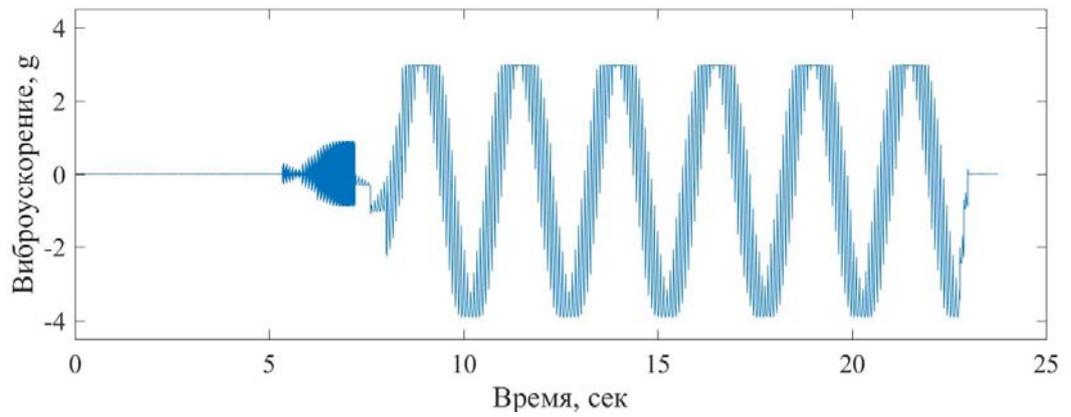
32



## № эксперимента / сигнал вибрации



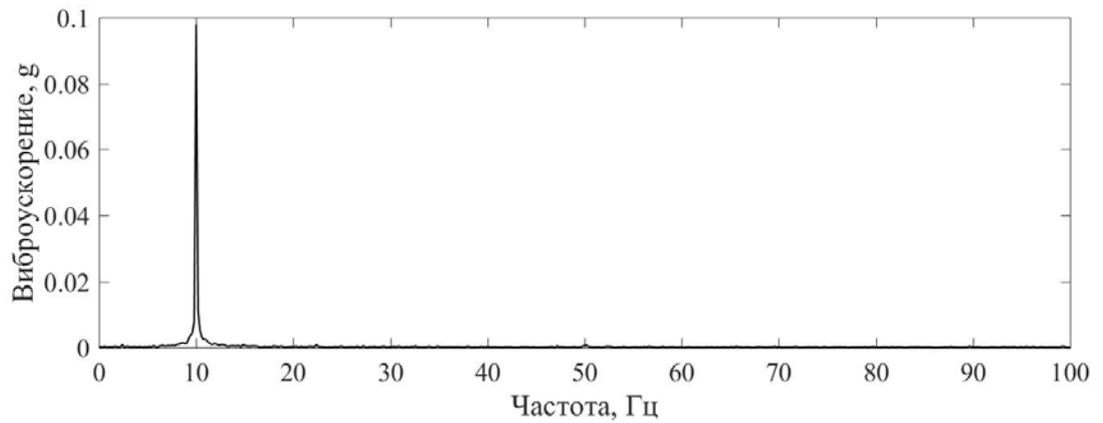
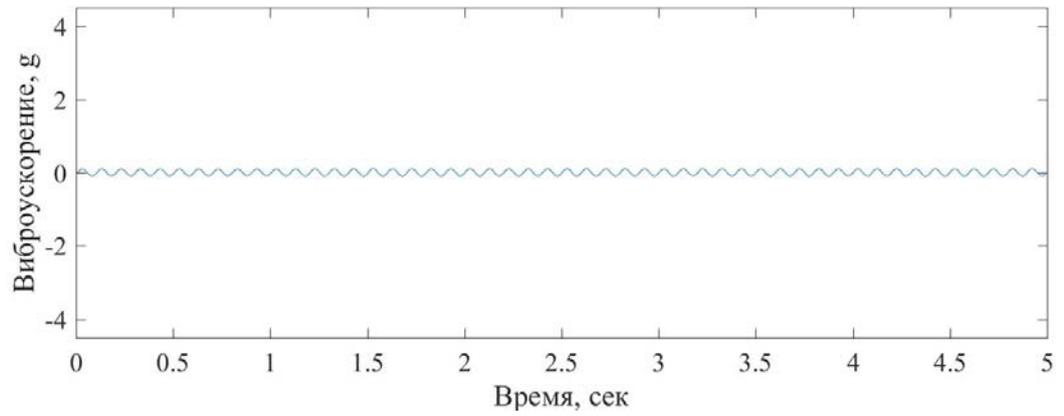
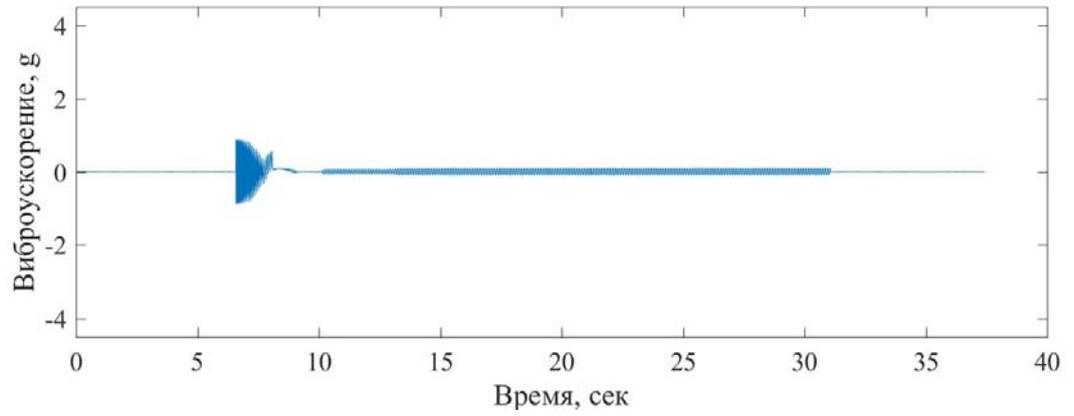
33



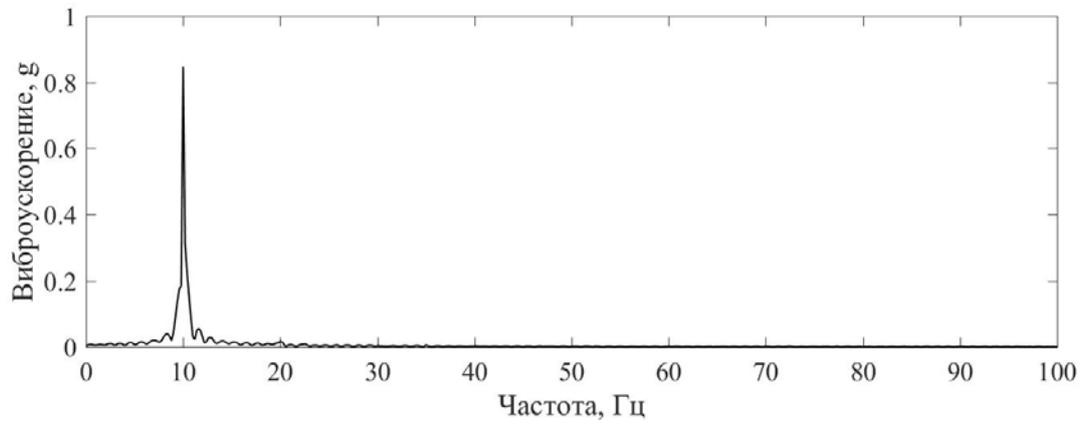
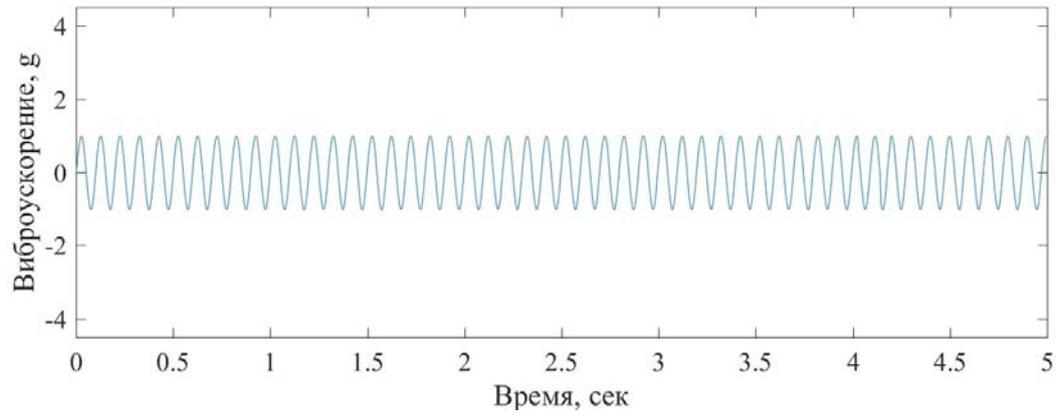
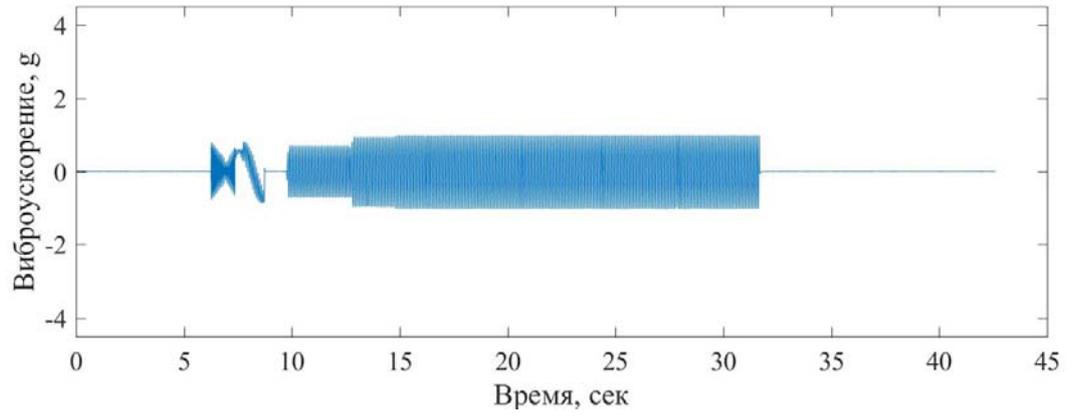
## Данные в направлении Y

№ эксперимента / сигнал вибрации

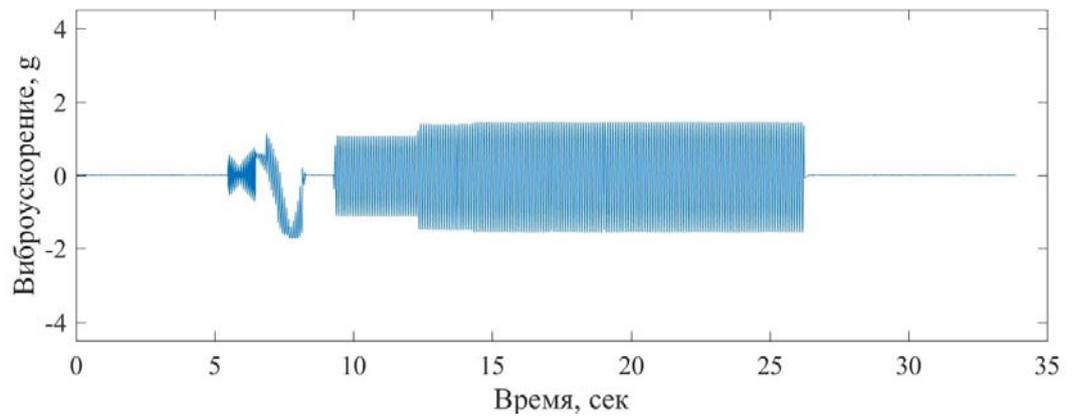
1

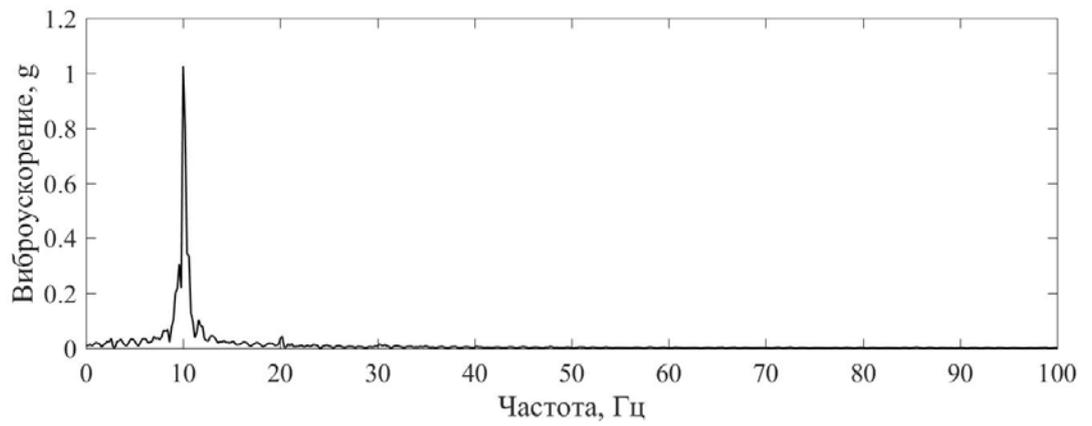
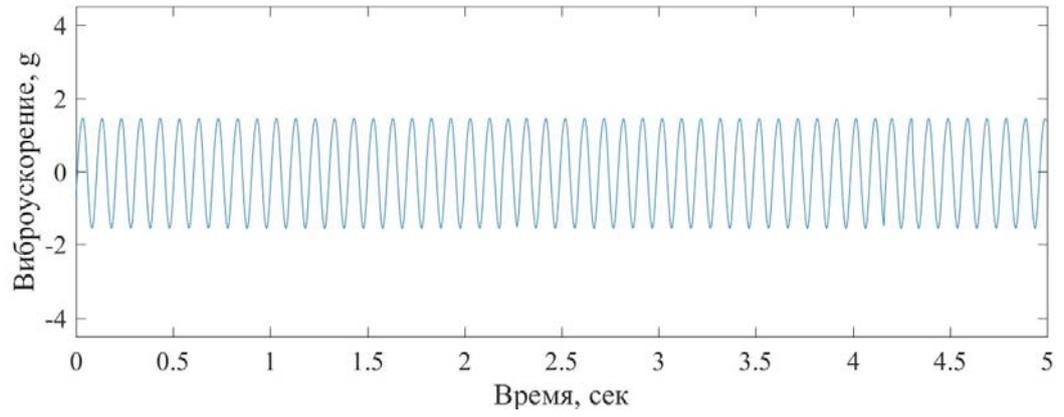


2

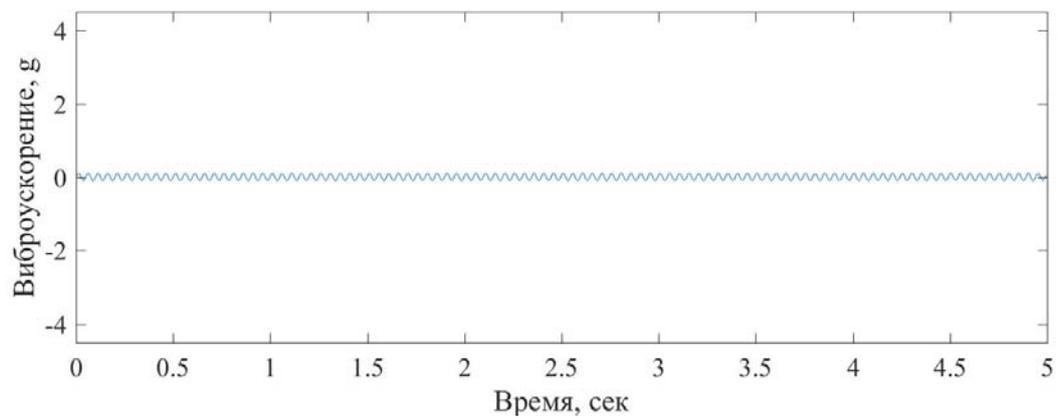
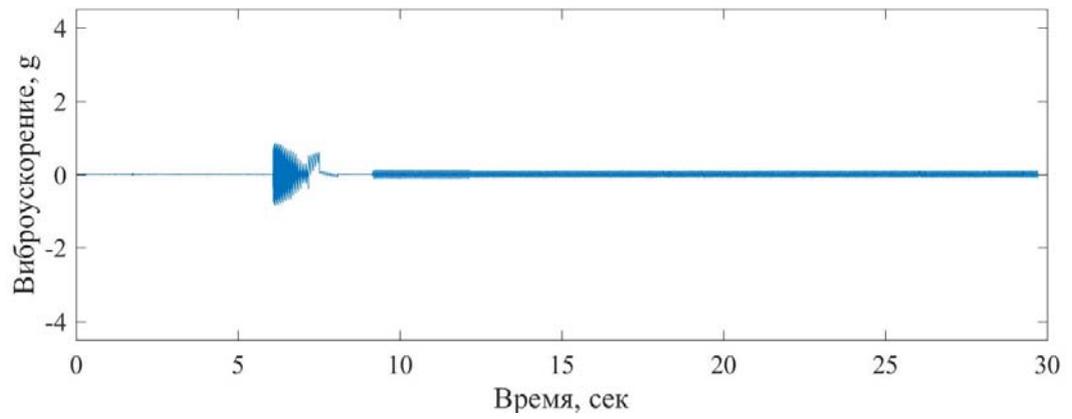


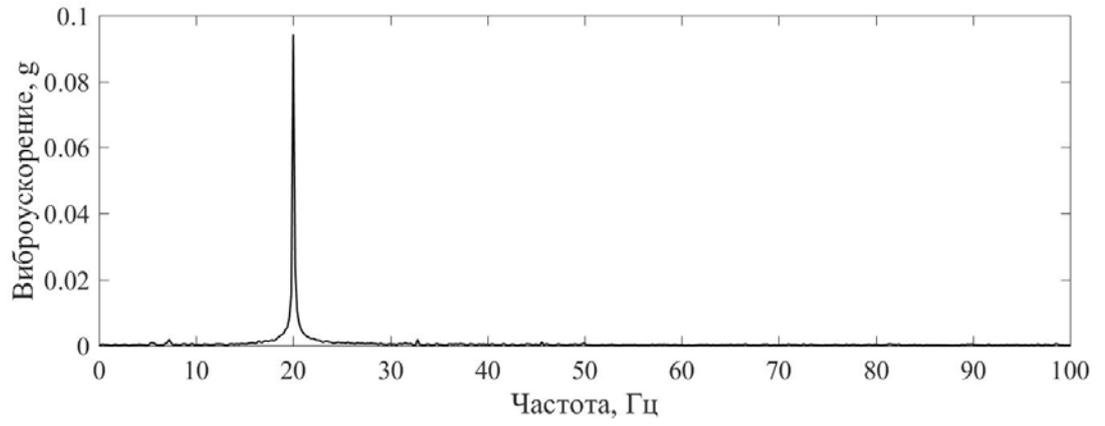
3



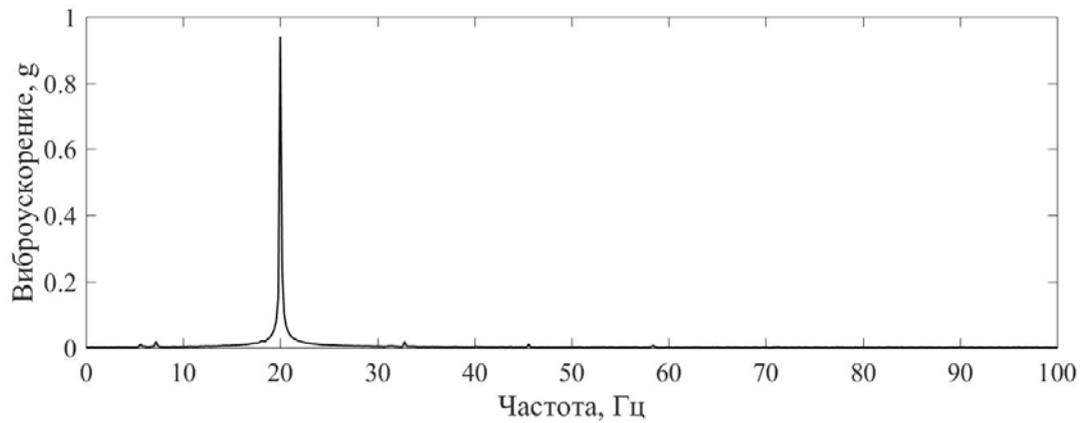
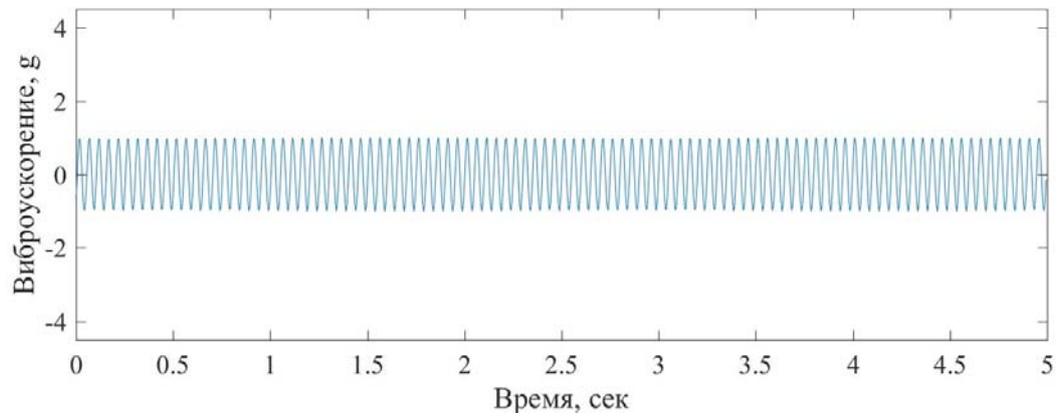
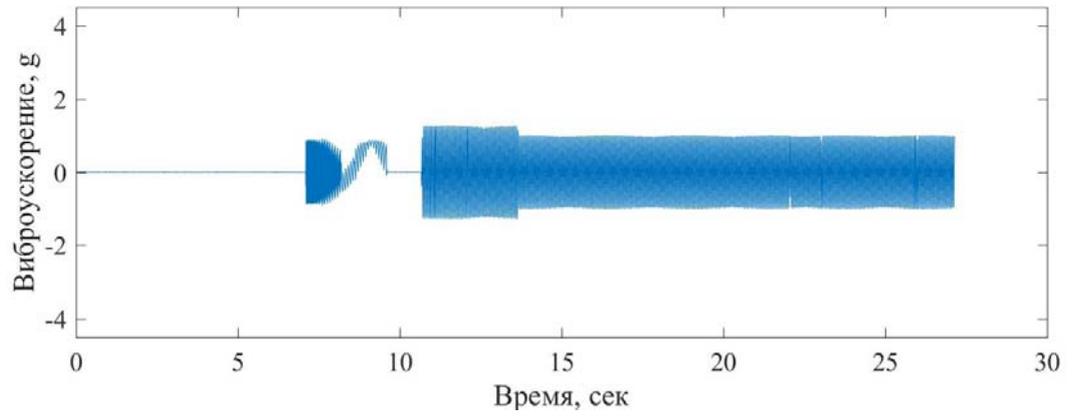


4

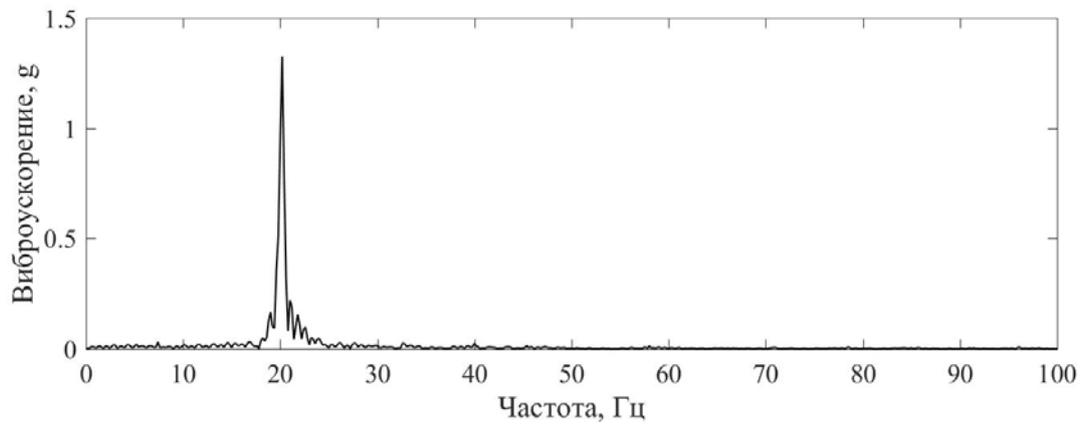
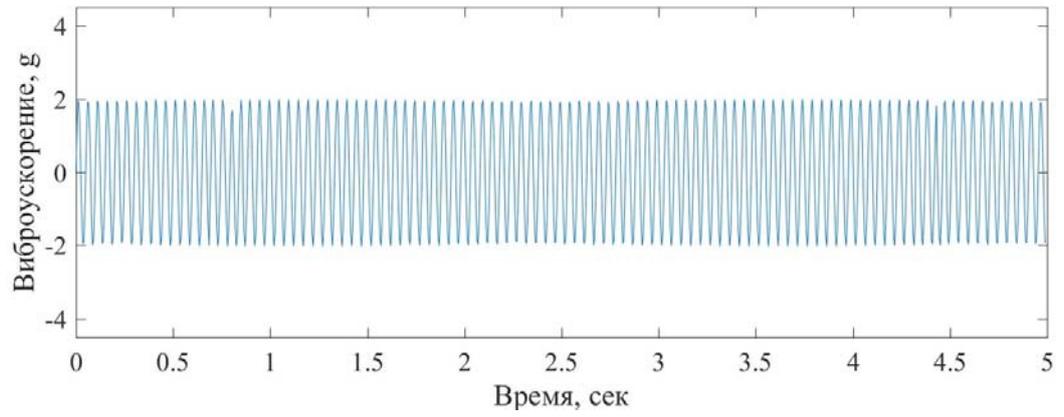
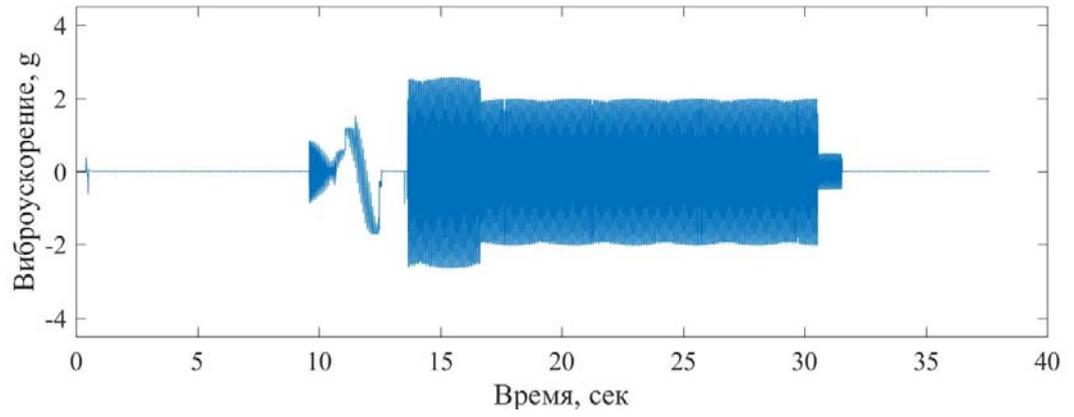




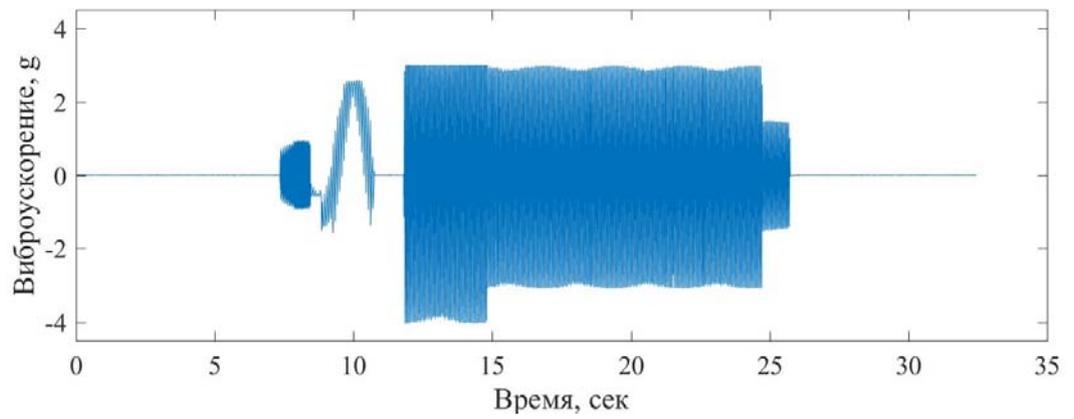
5

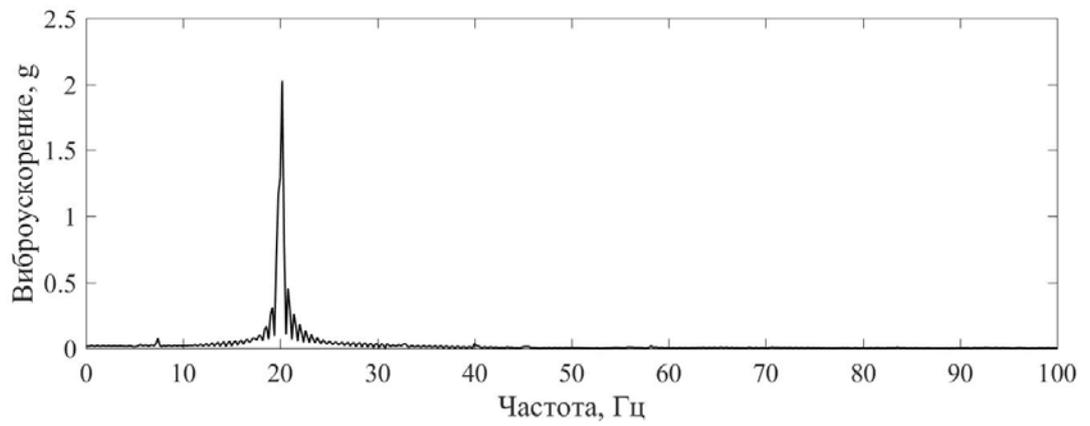
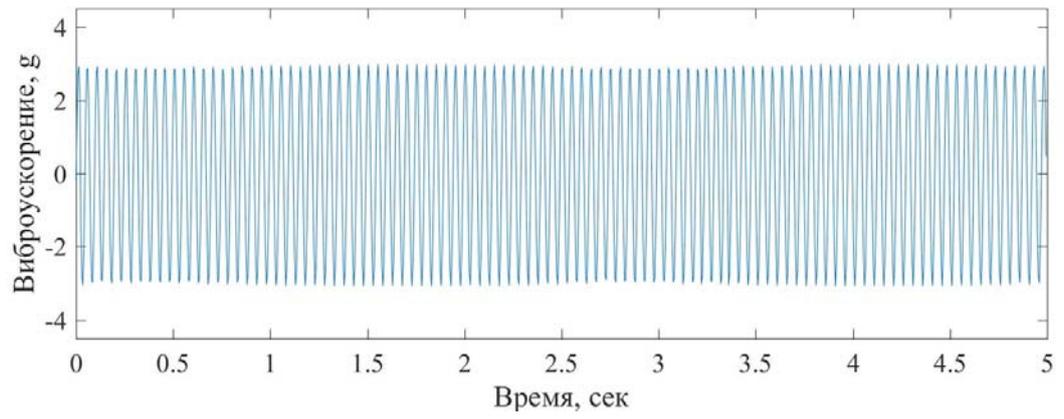


6

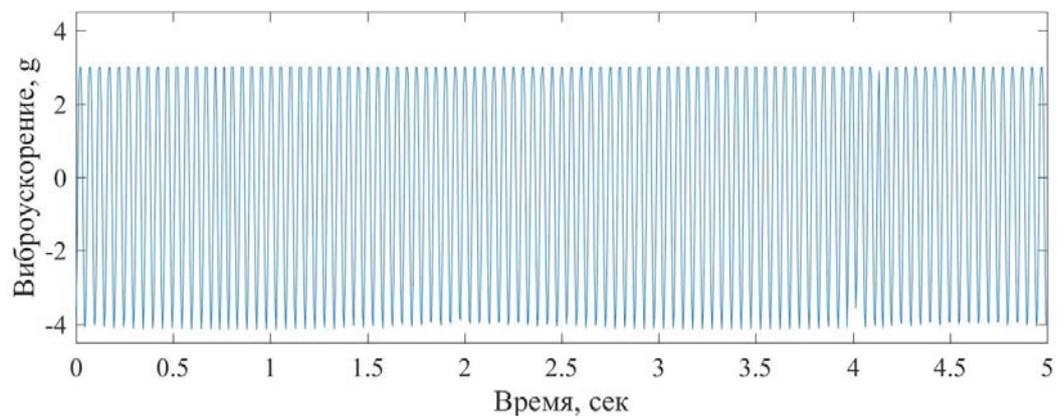
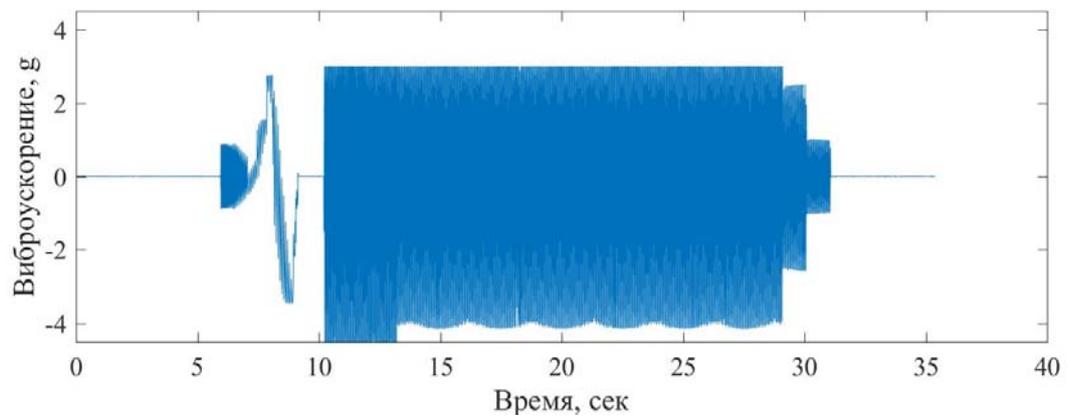


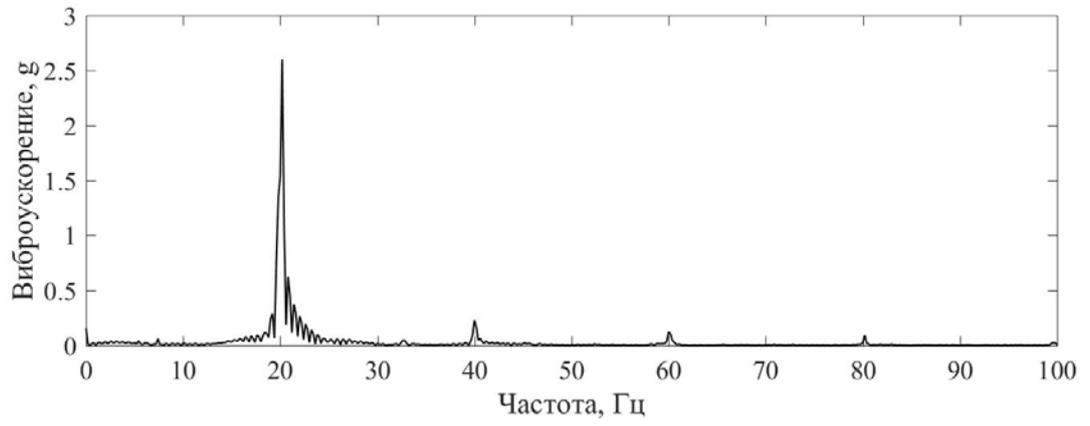
7



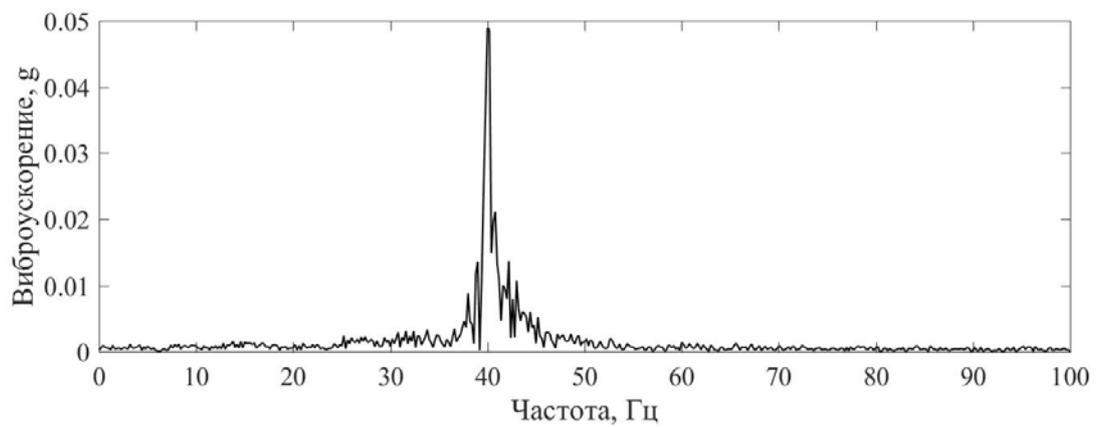
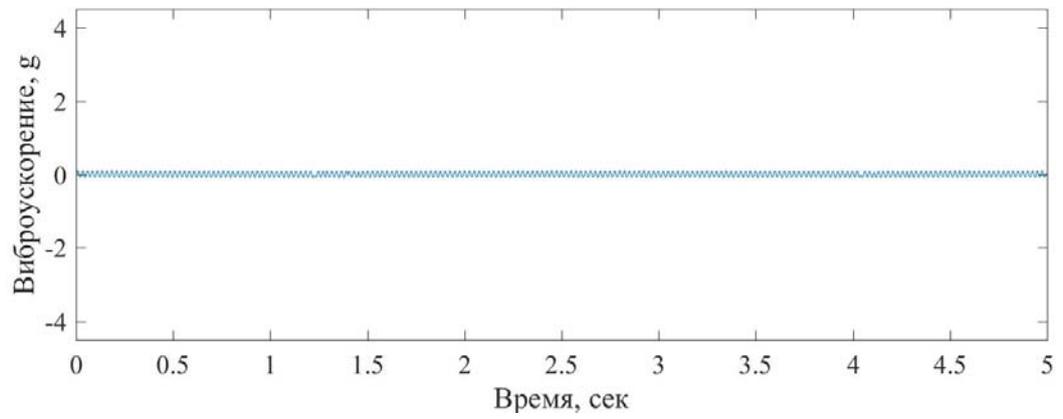
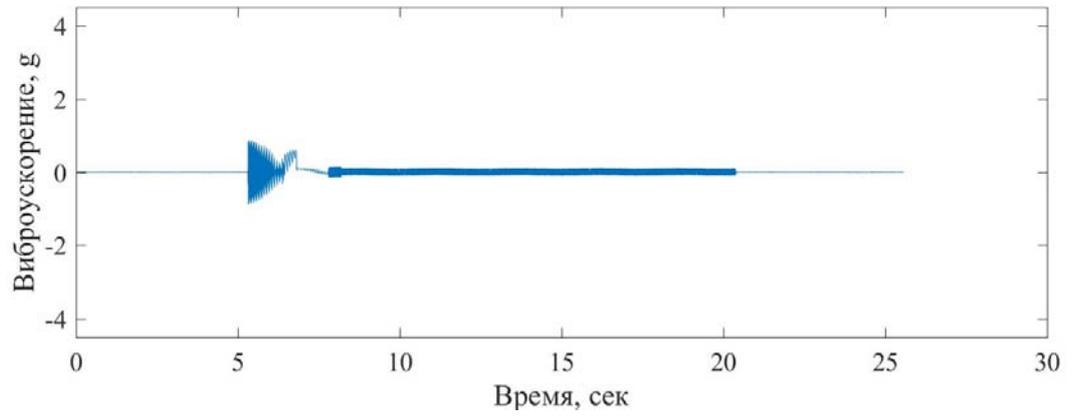


8

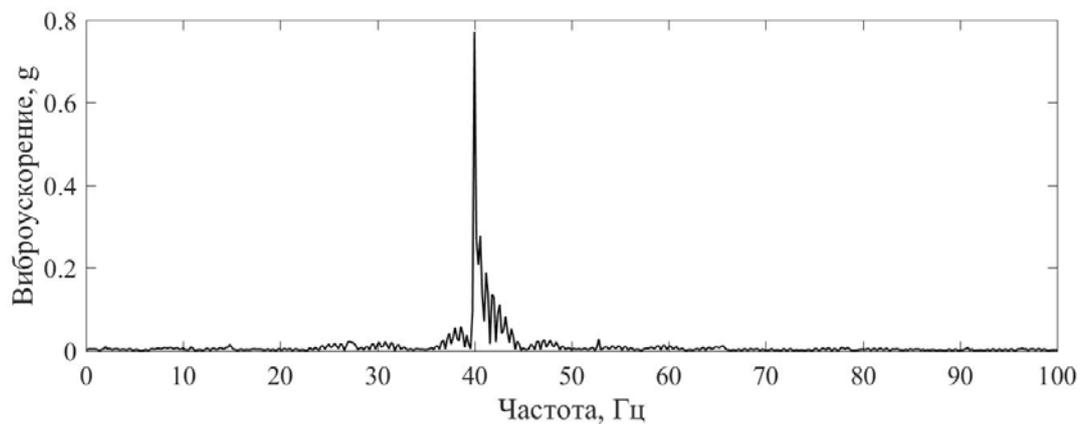
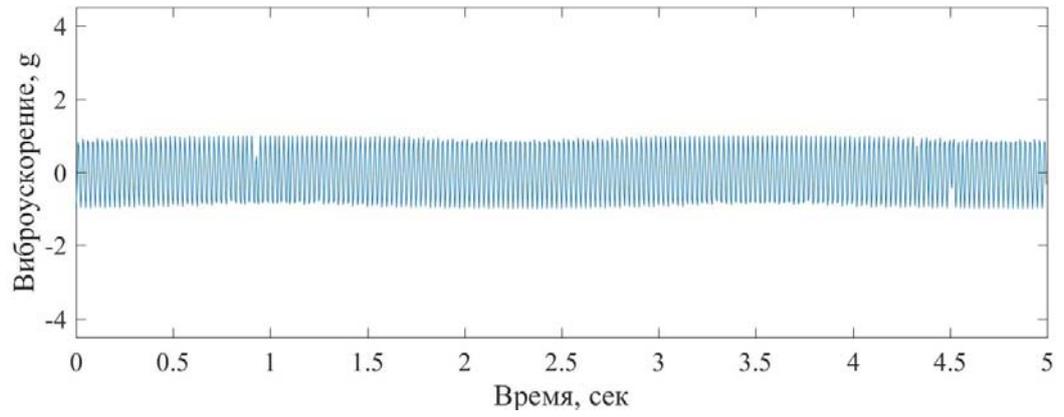
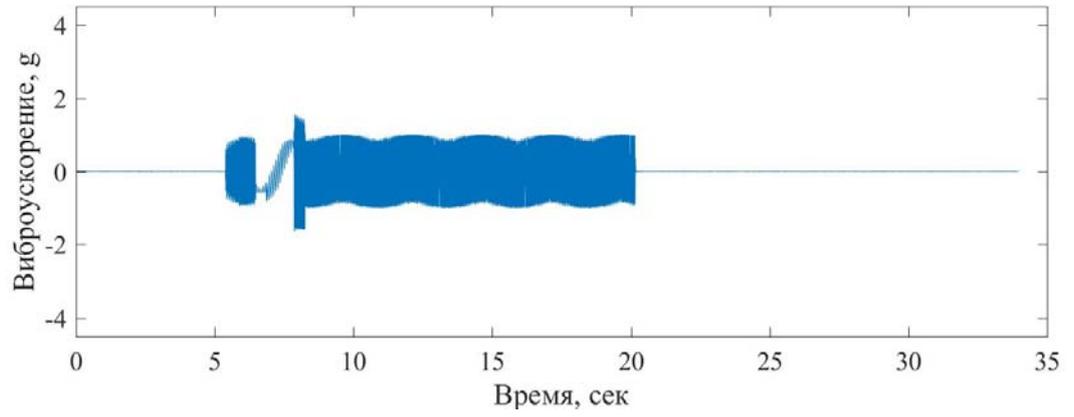




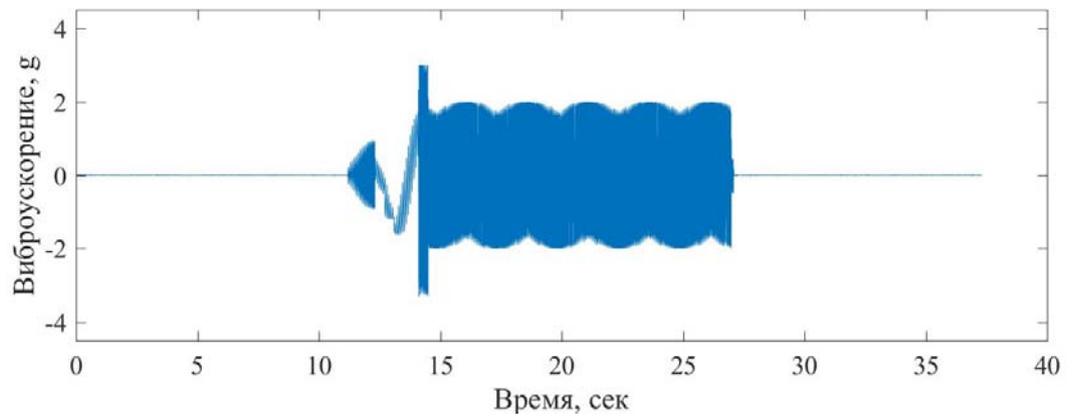
9

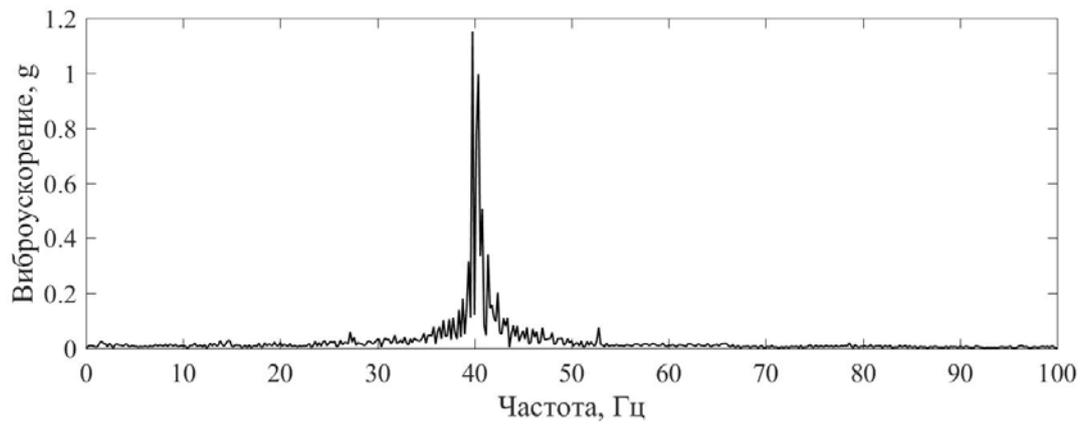
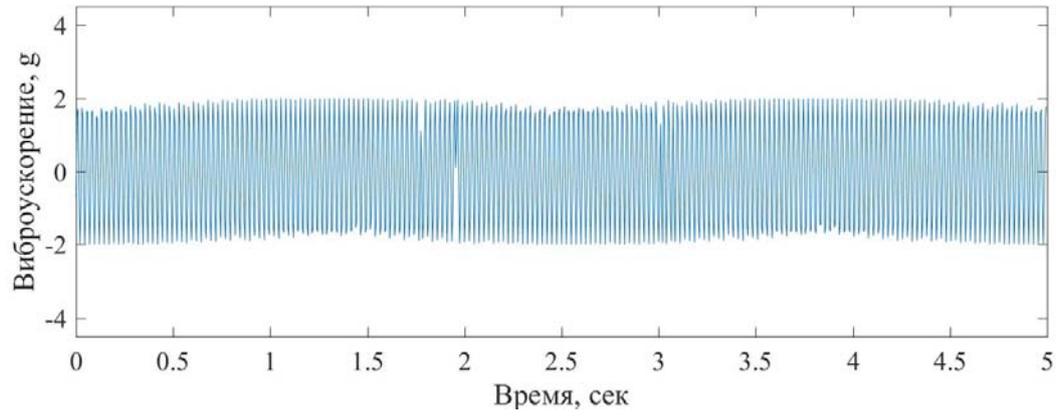


10

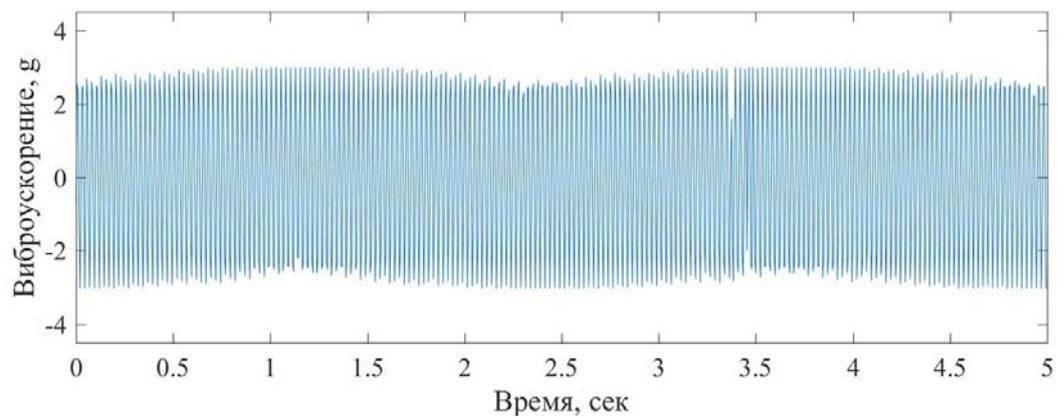
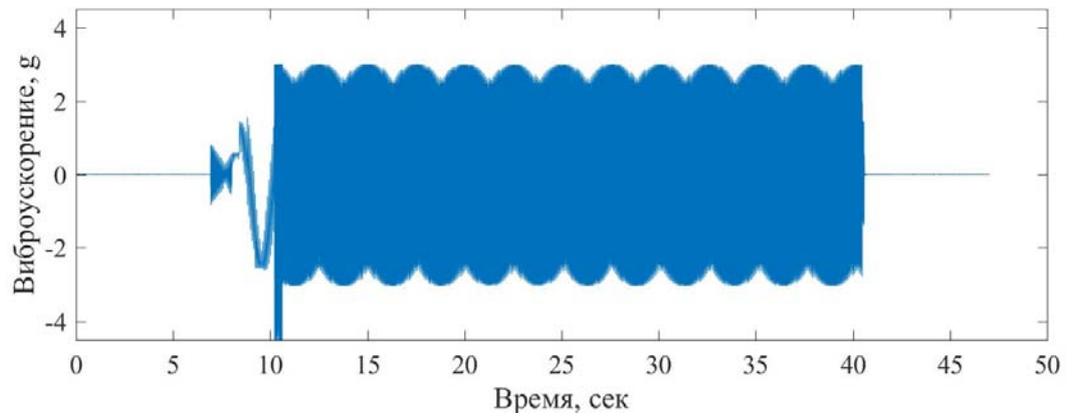


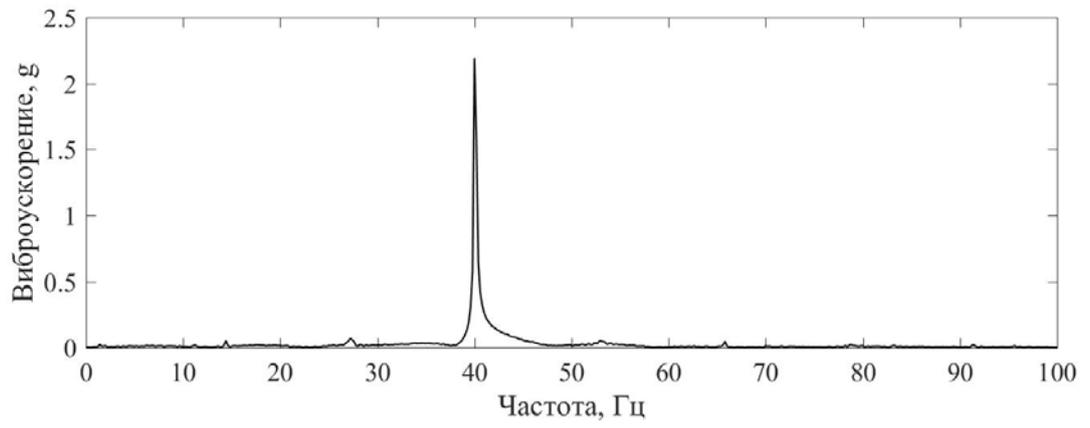
11



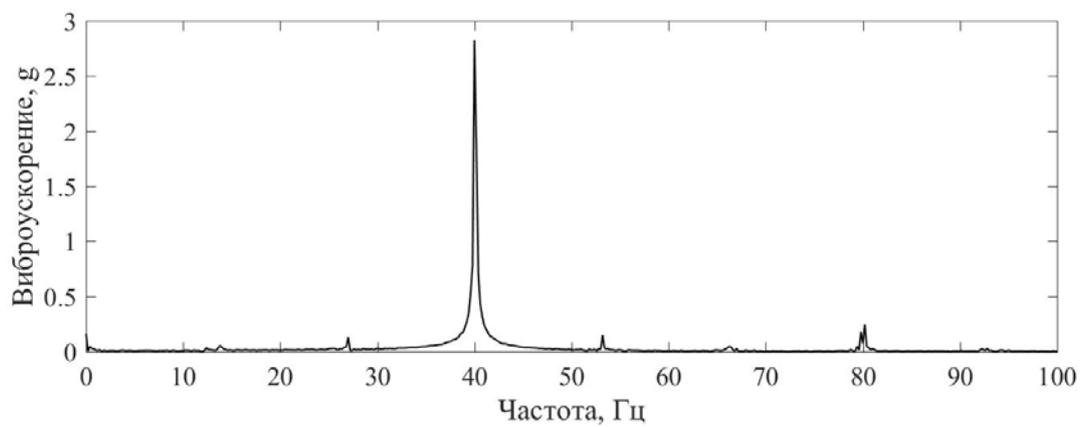
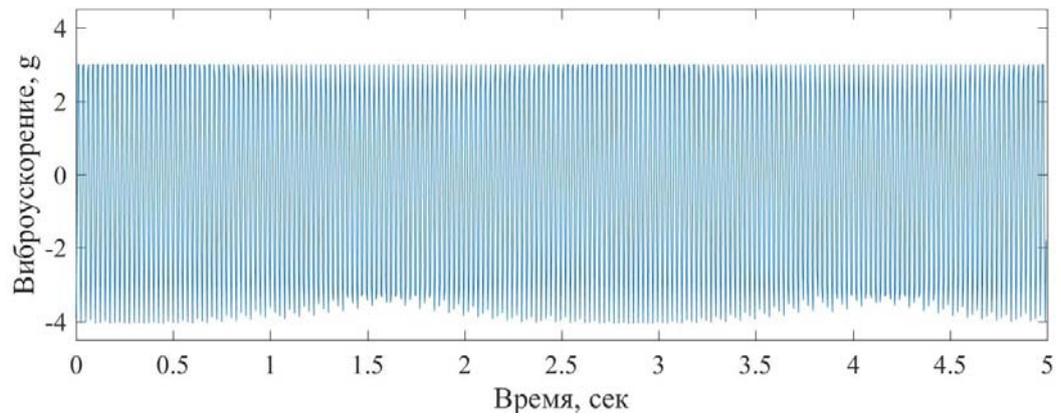
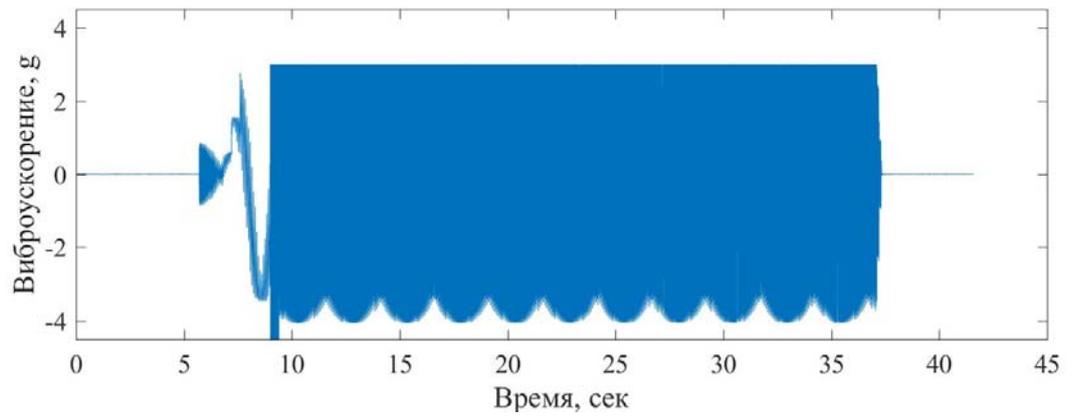


12

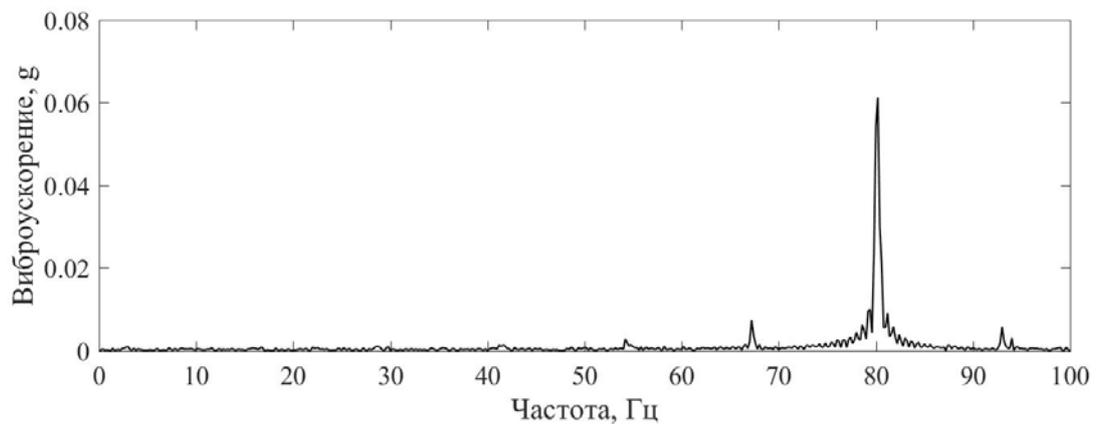
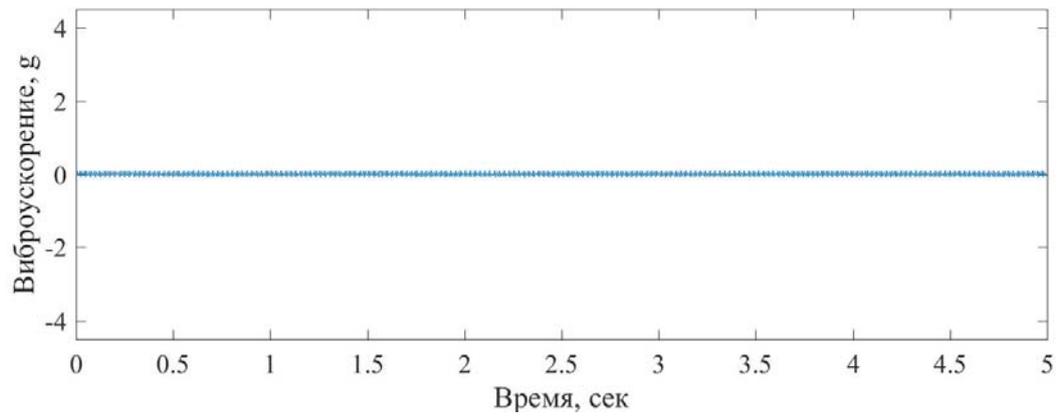
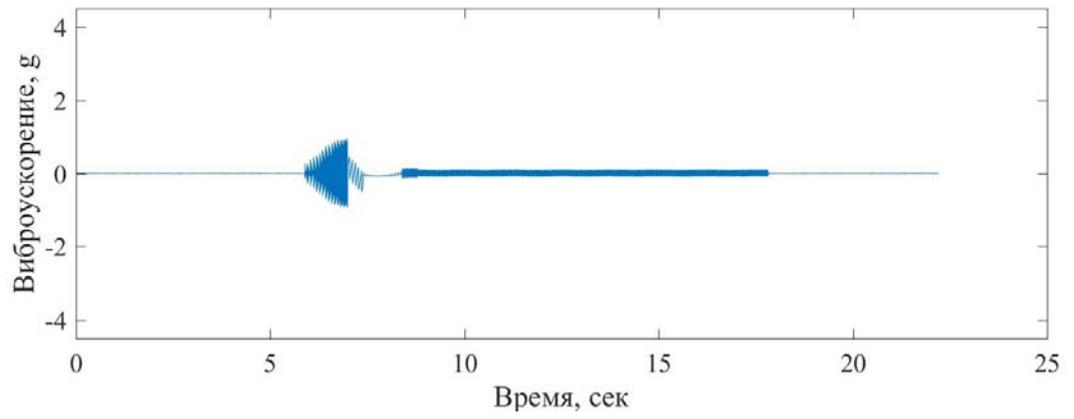




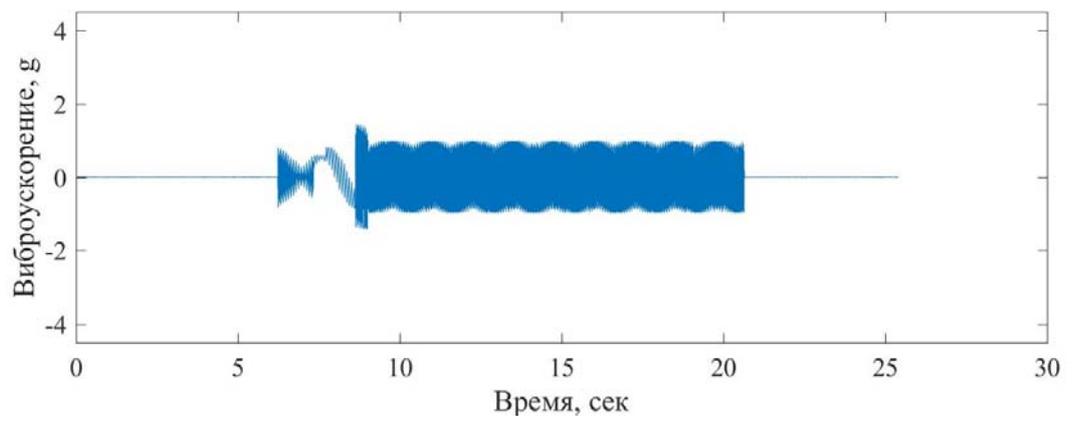
13

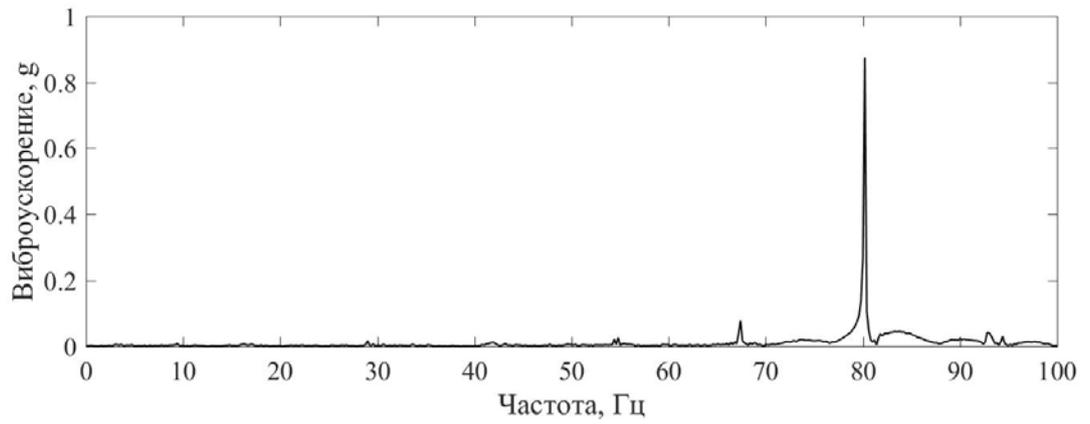
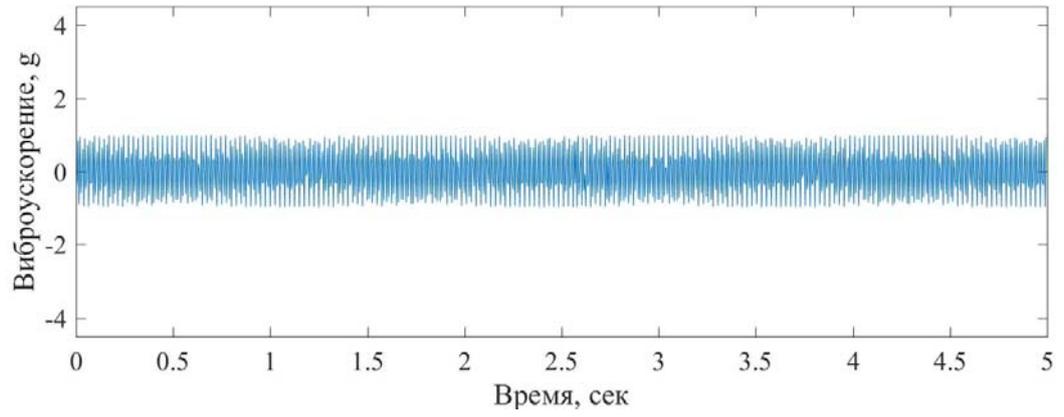


14

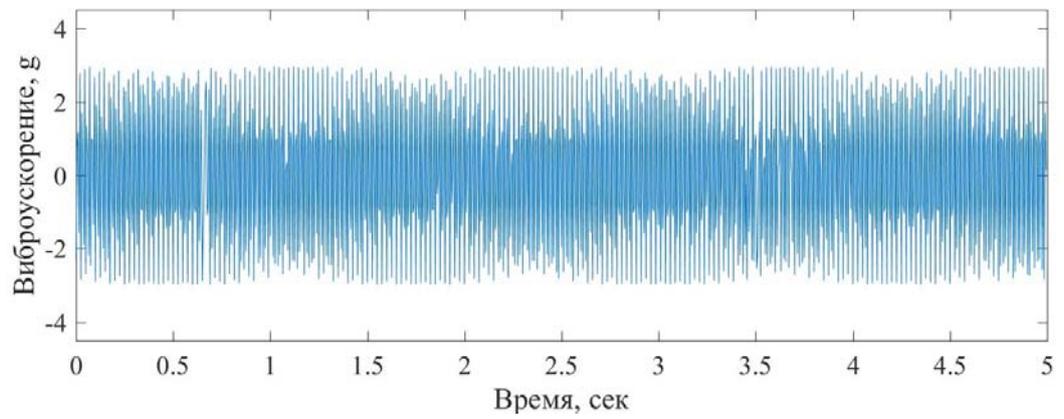
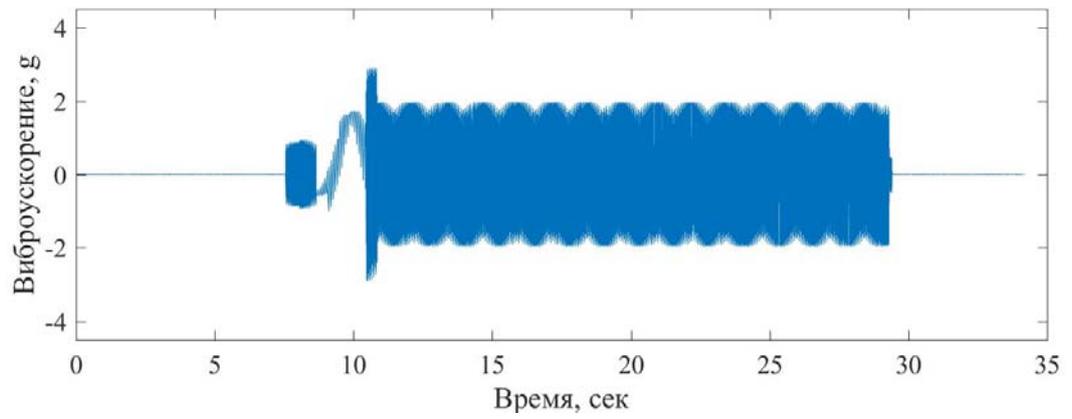


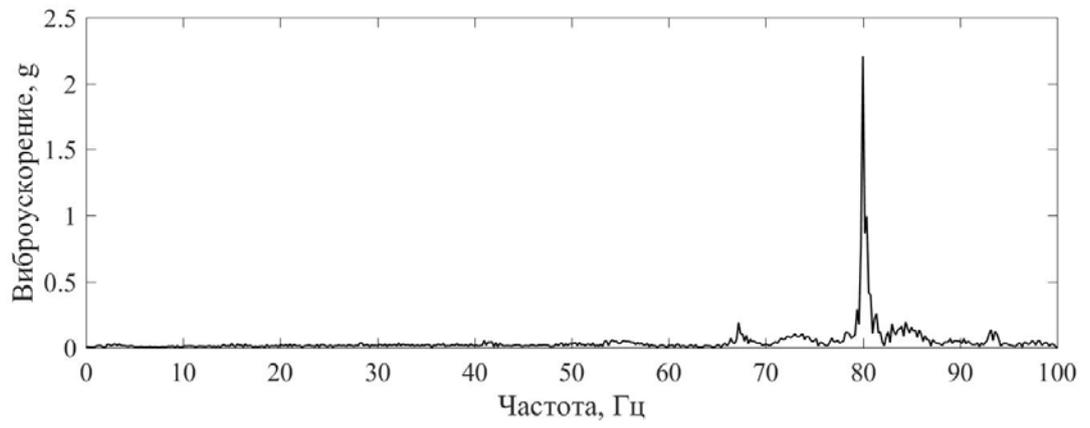
15



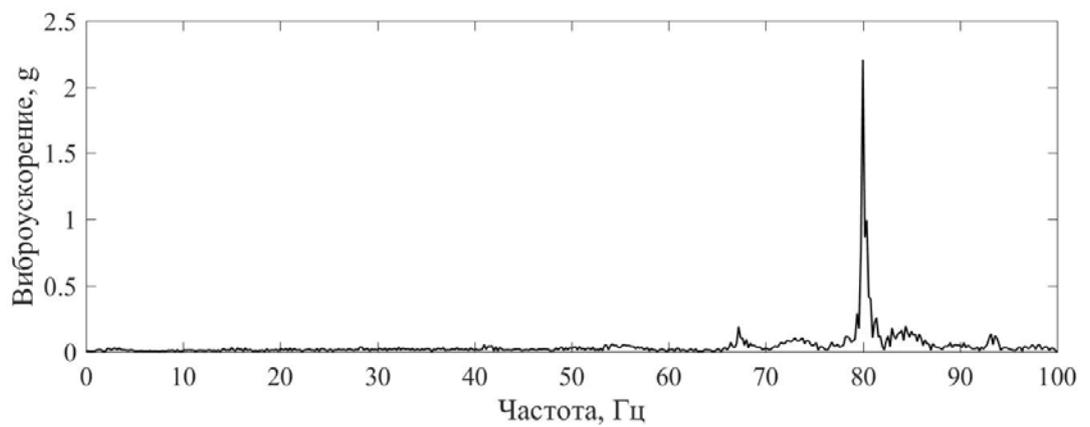
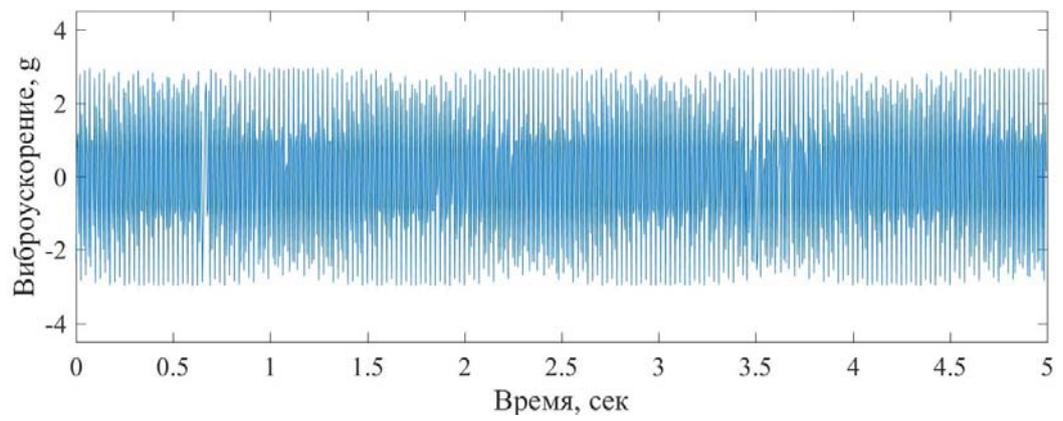
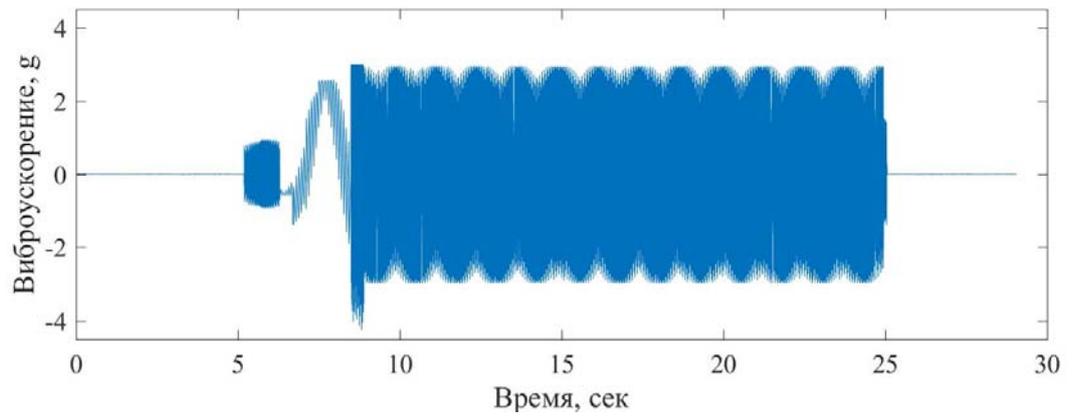


16

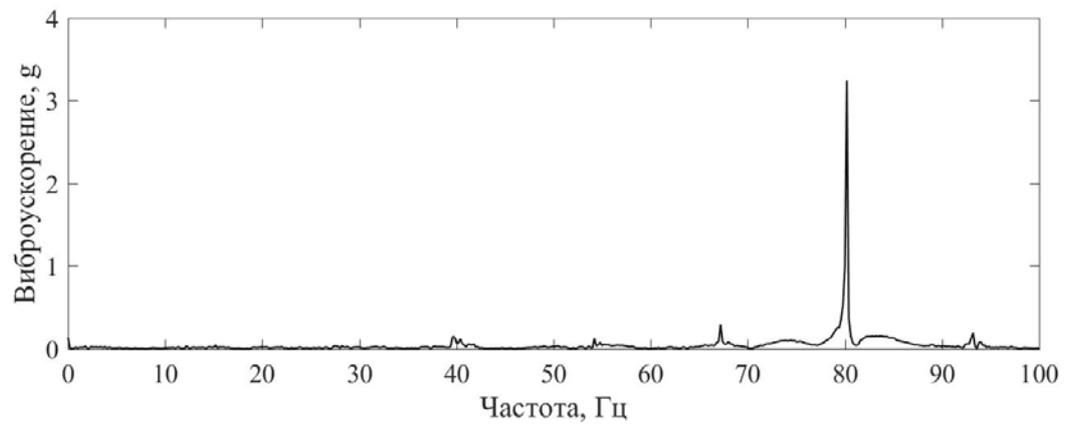
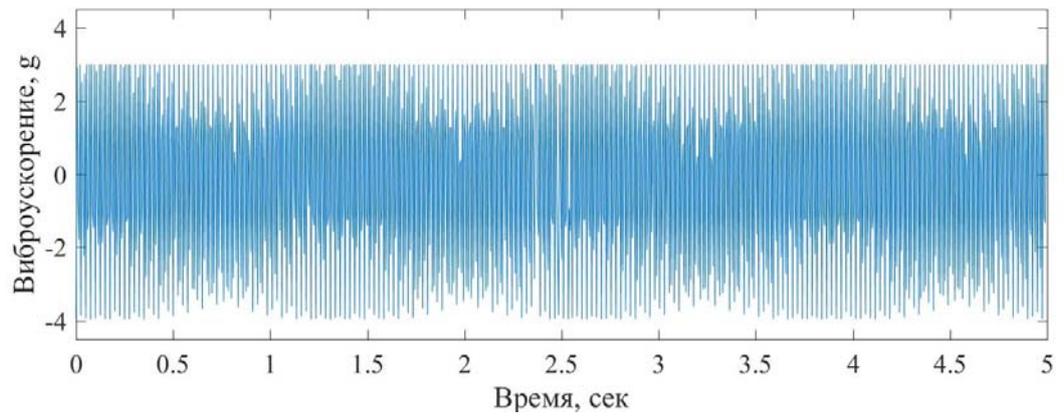
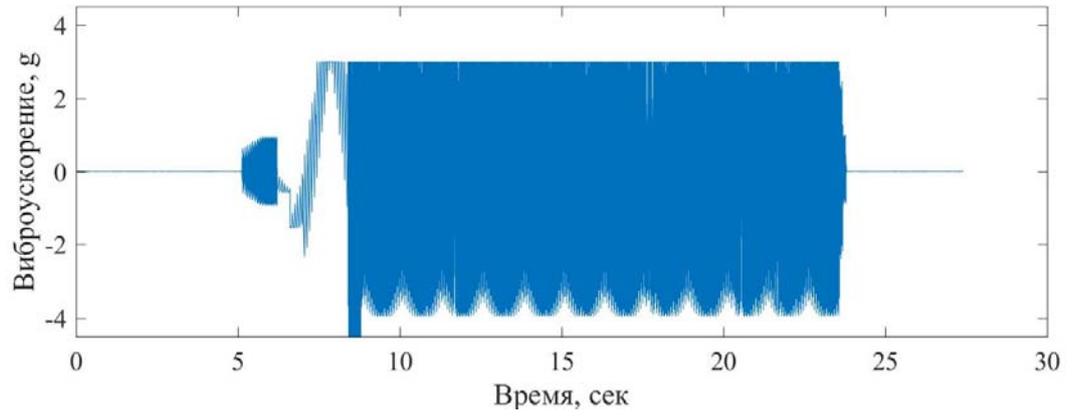




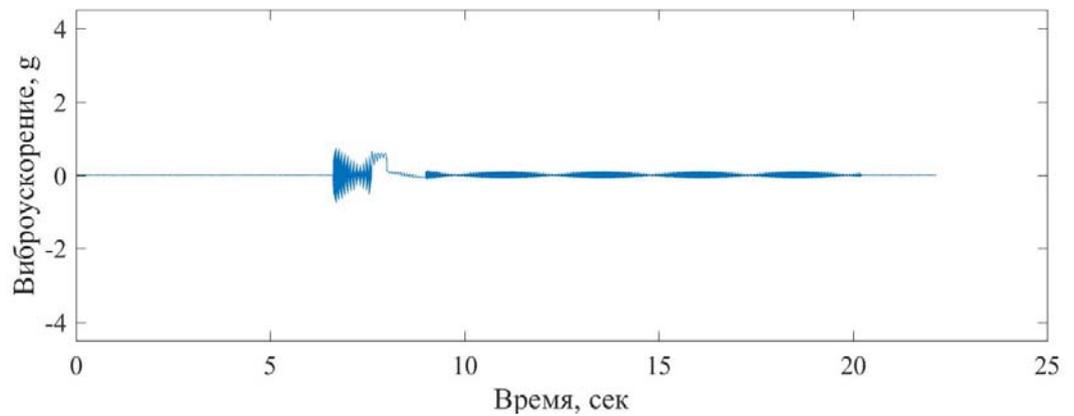
17

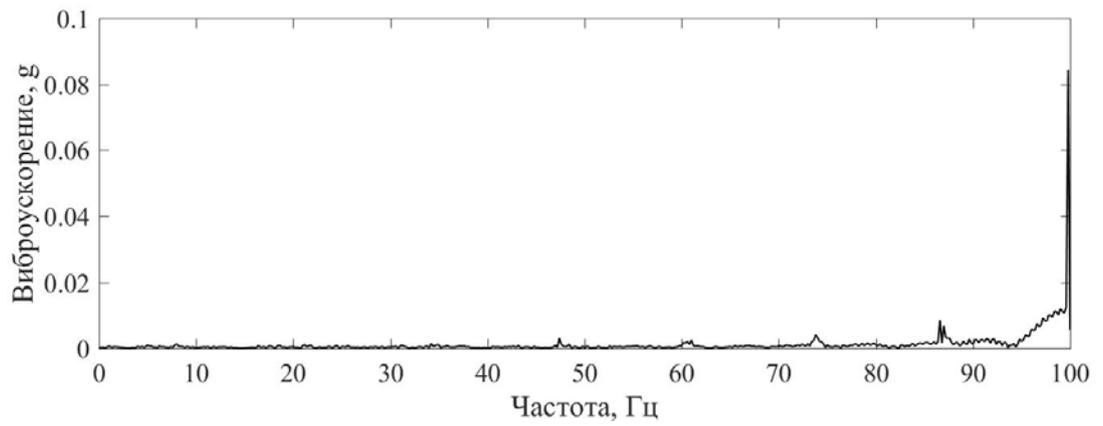
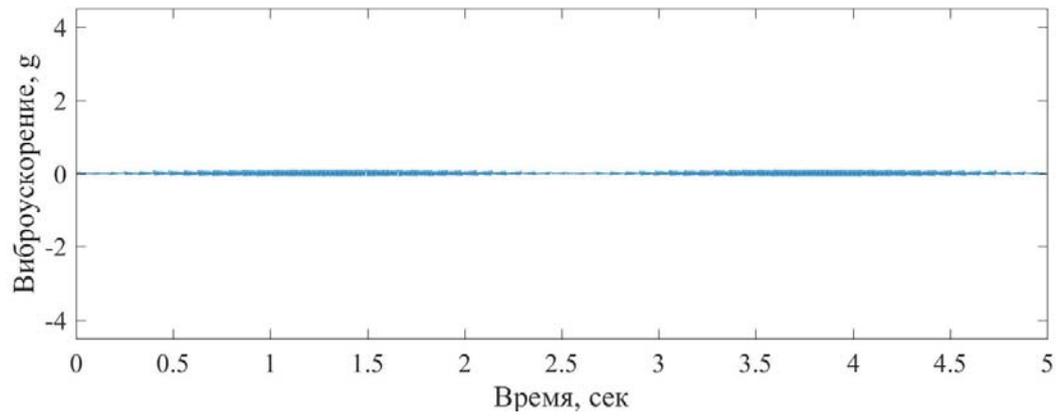


18

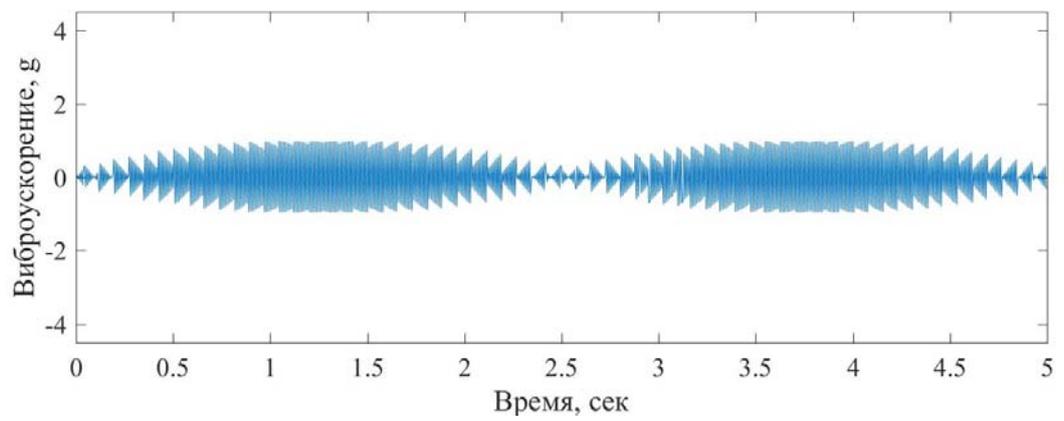
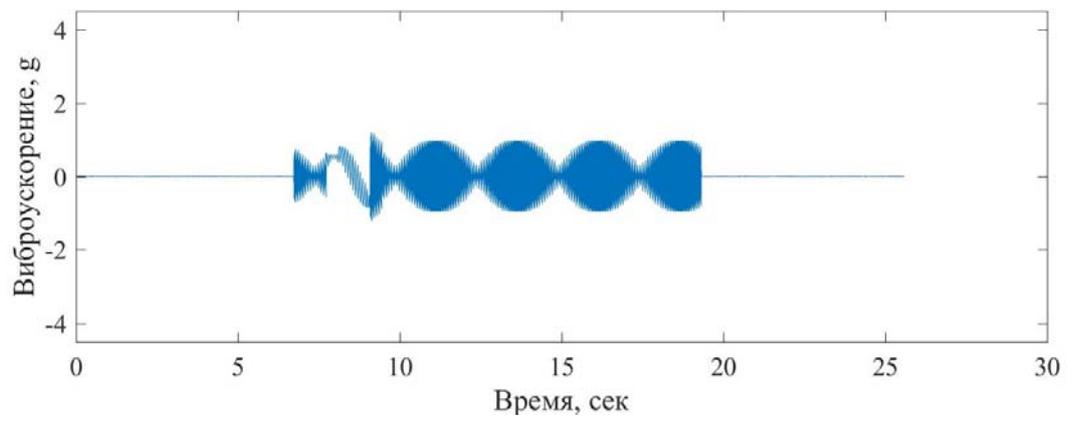


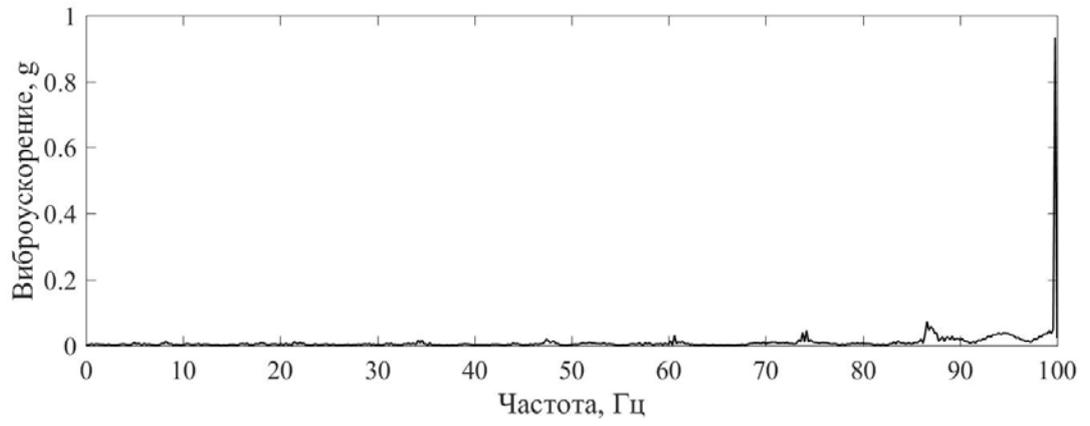
19



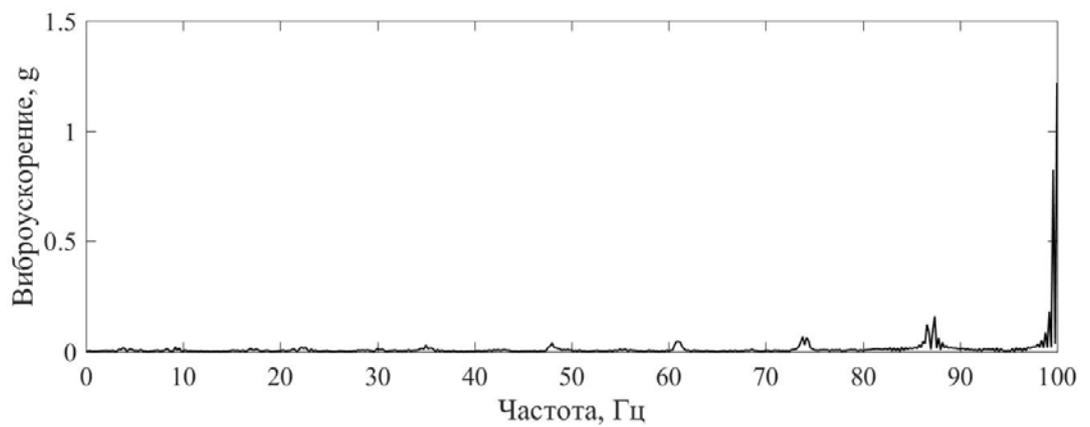
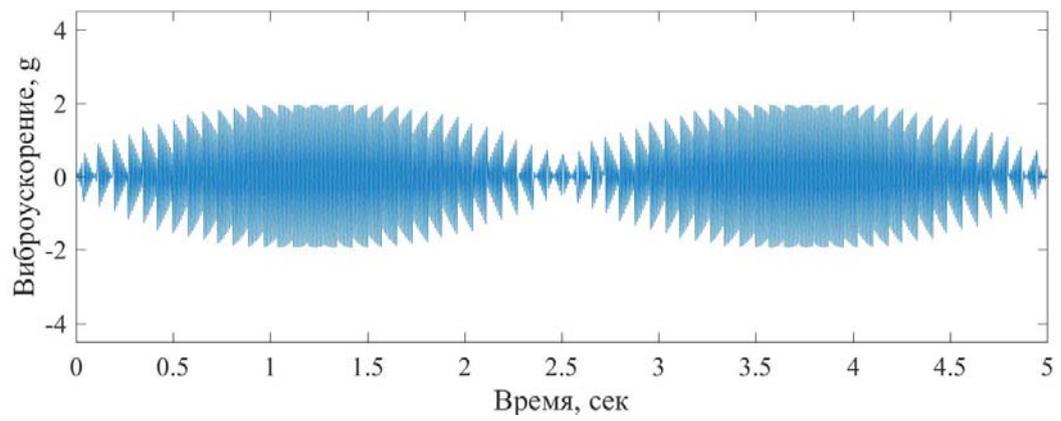
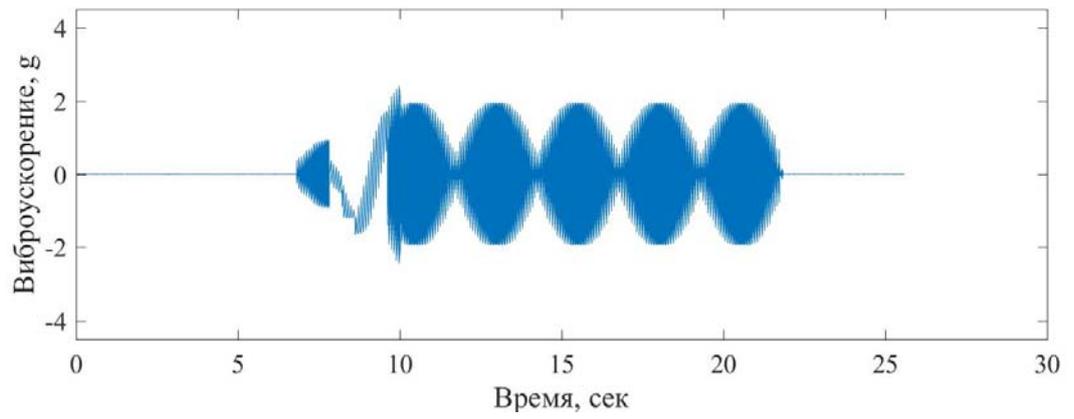


20

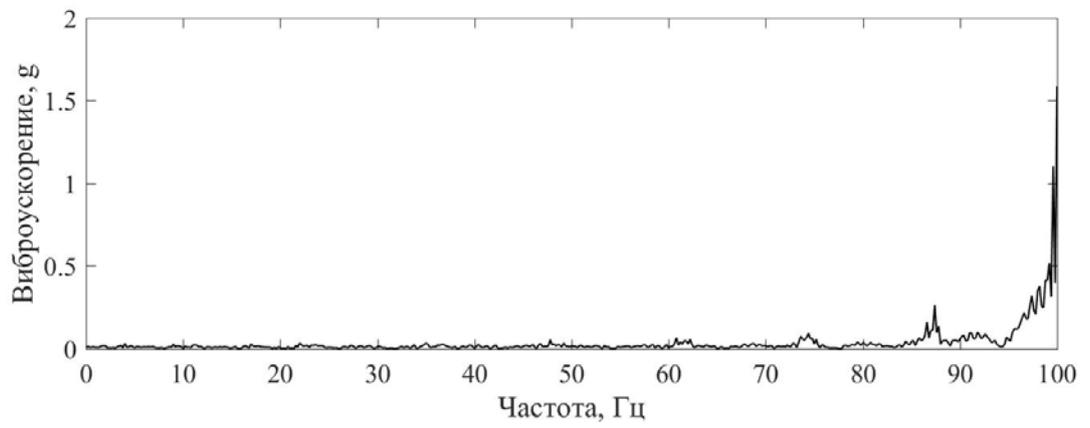
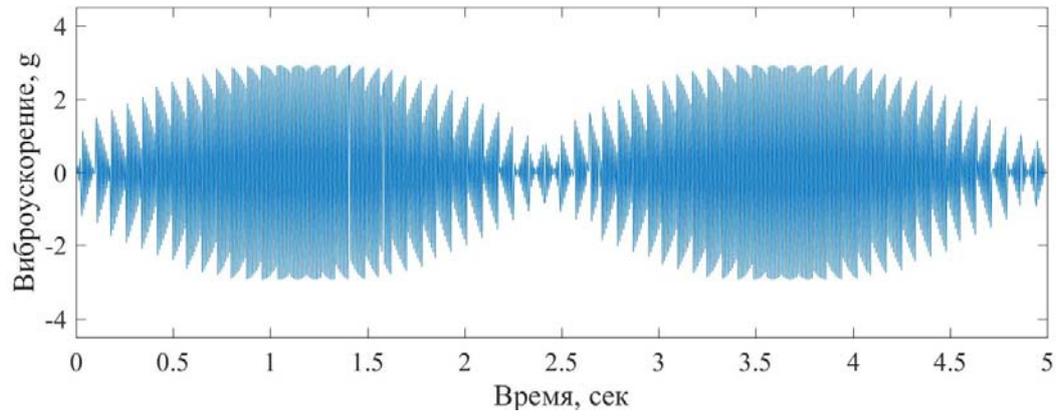
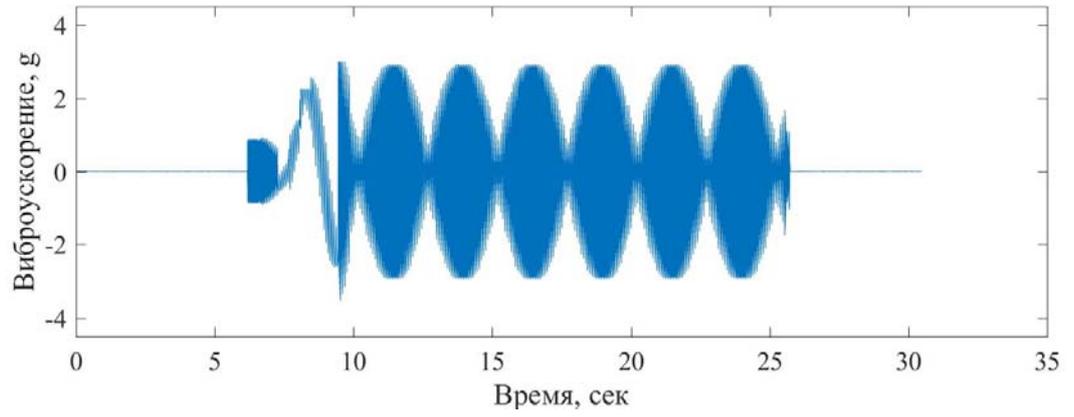




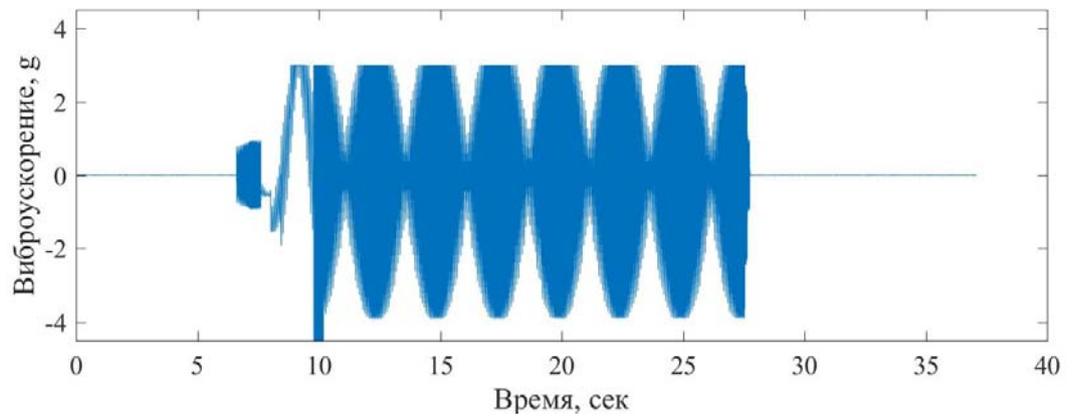
21

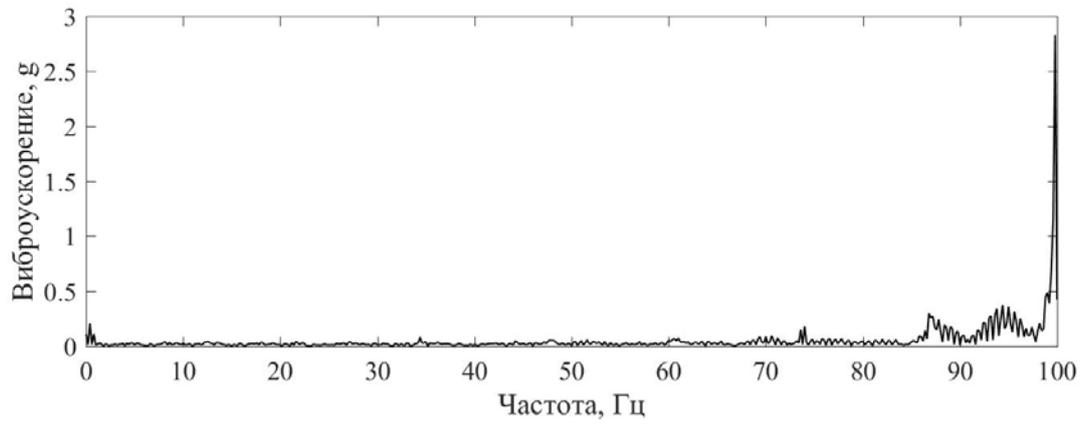
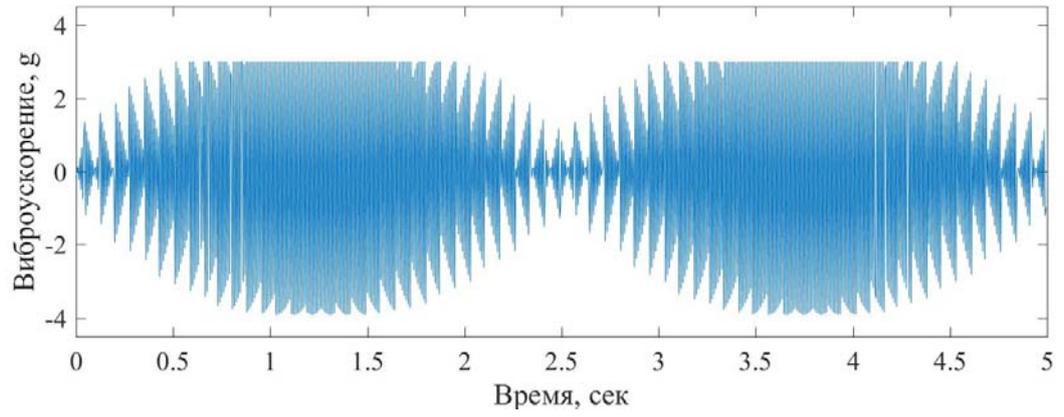


22

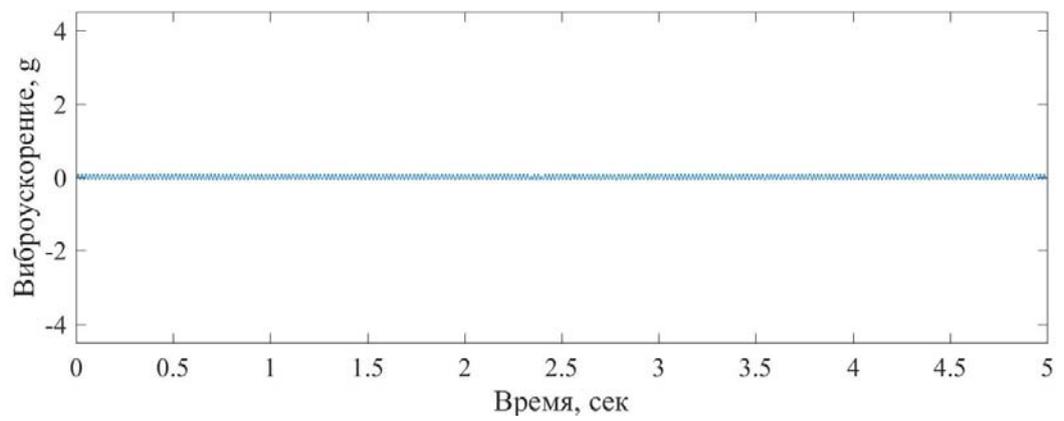
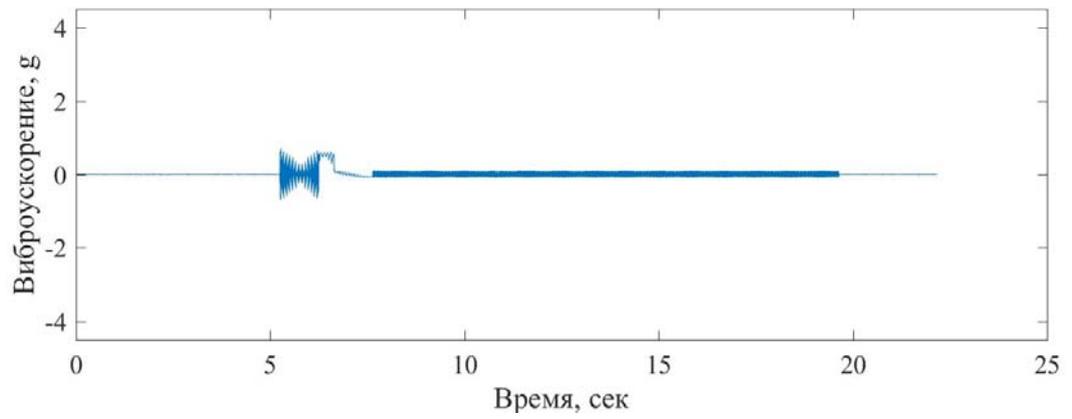


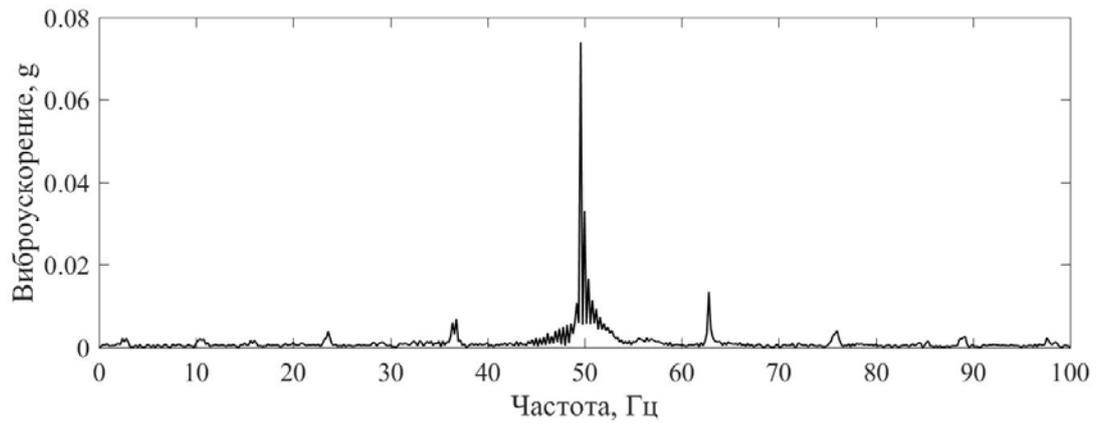
23



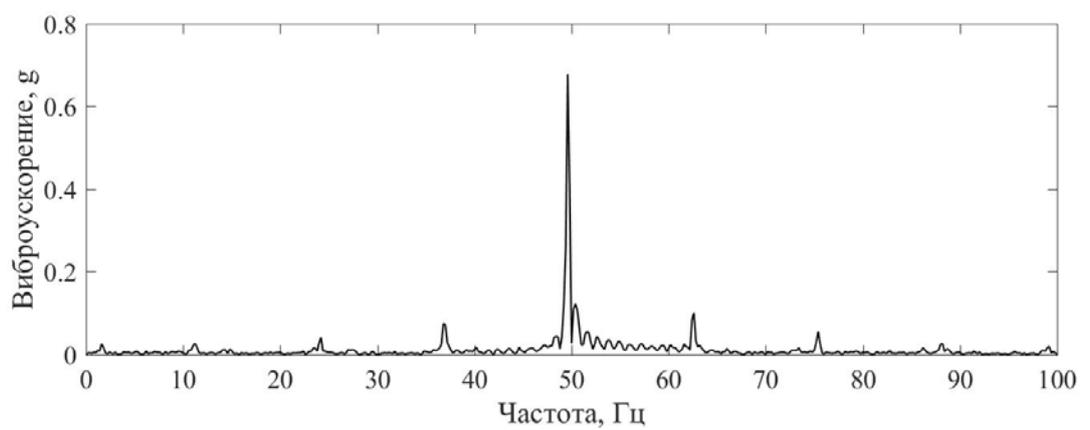
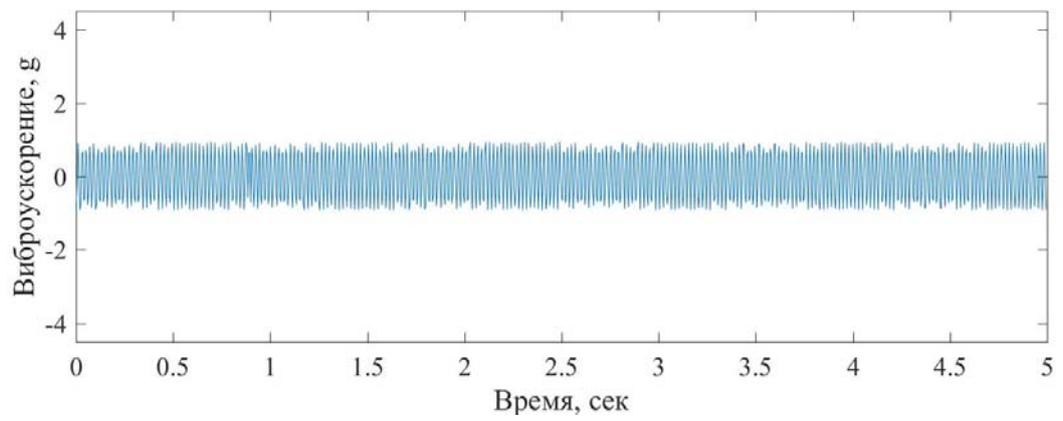
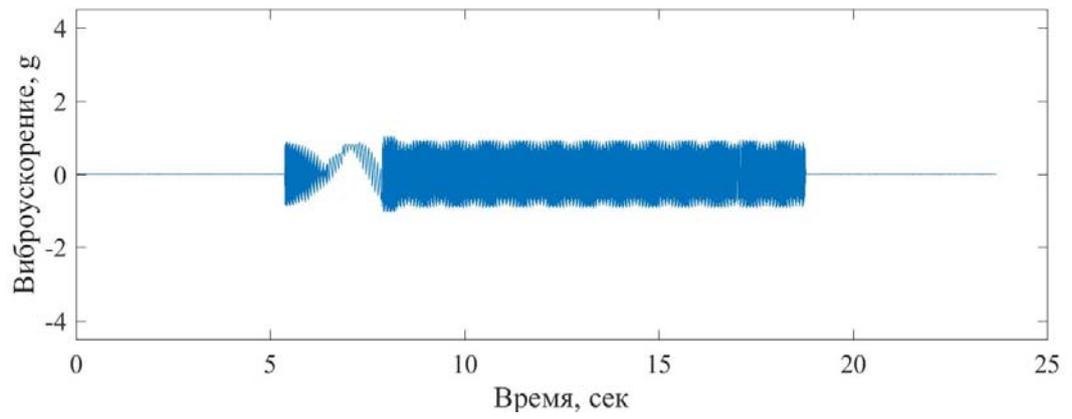


24

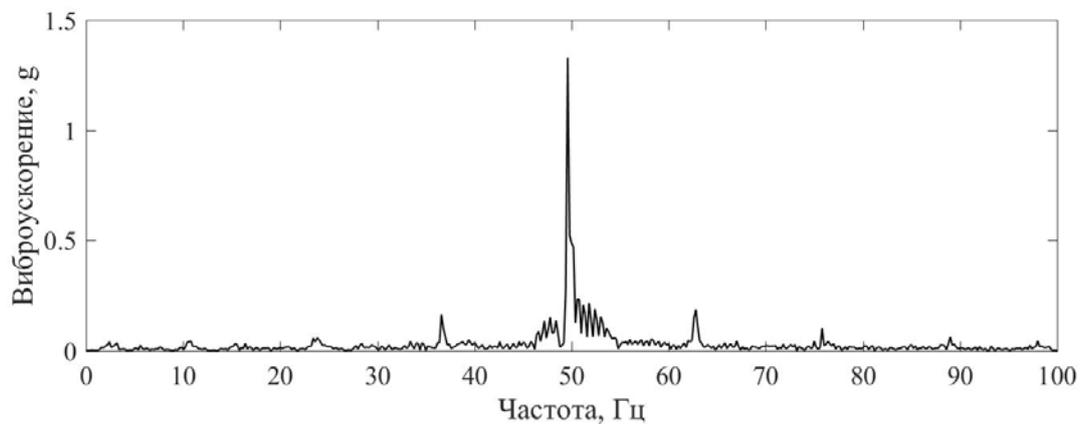
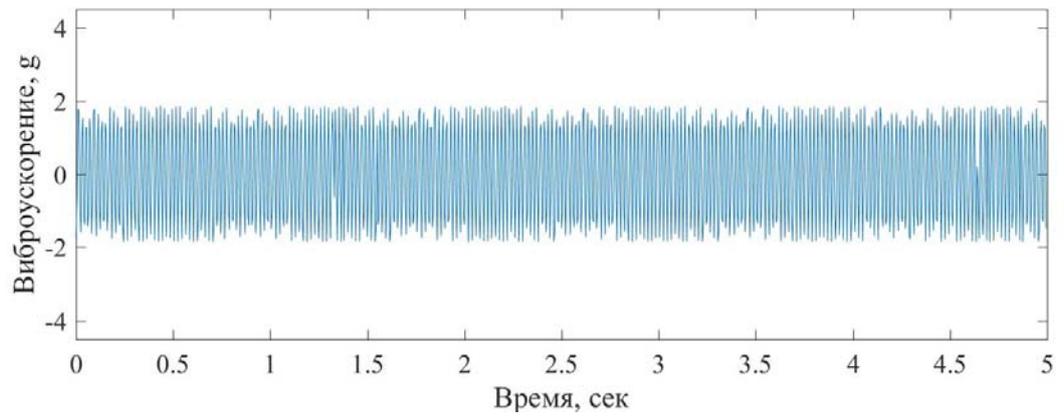
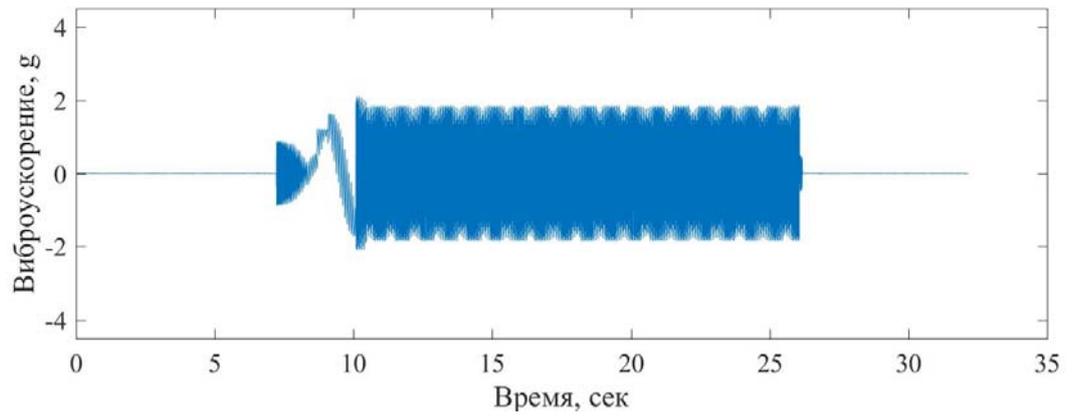




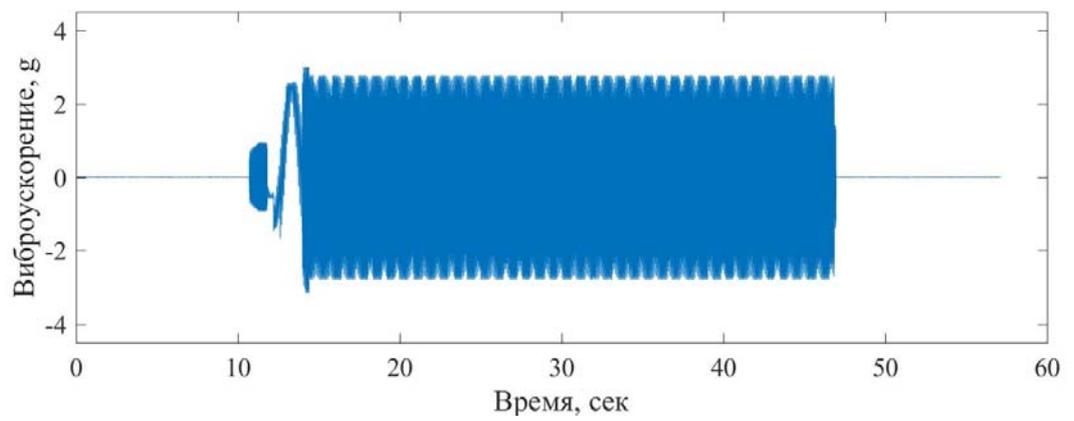
25

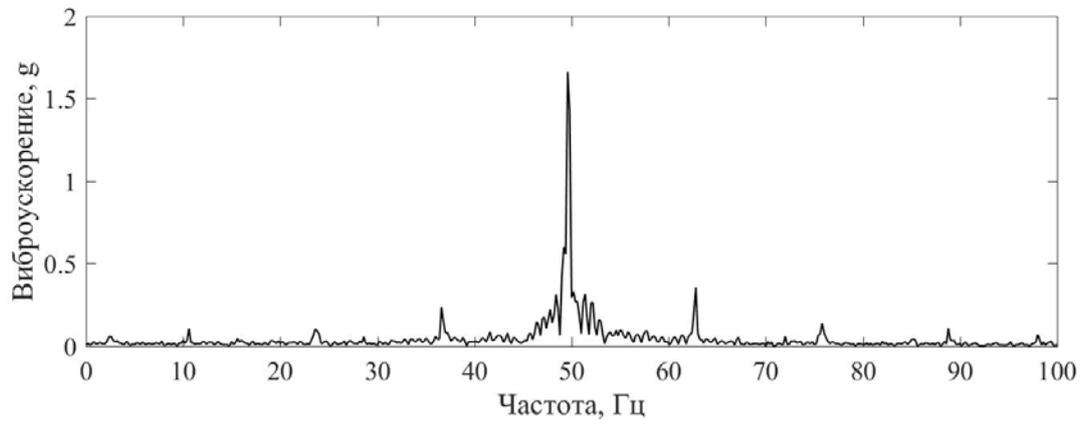
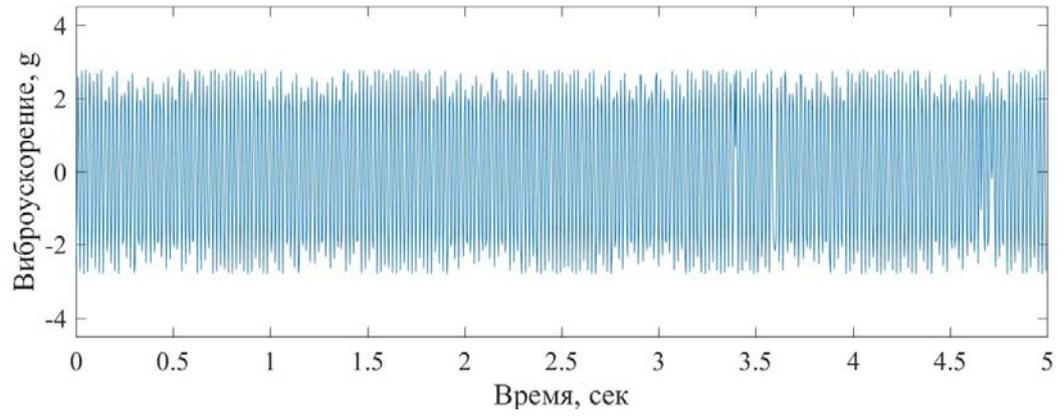


26

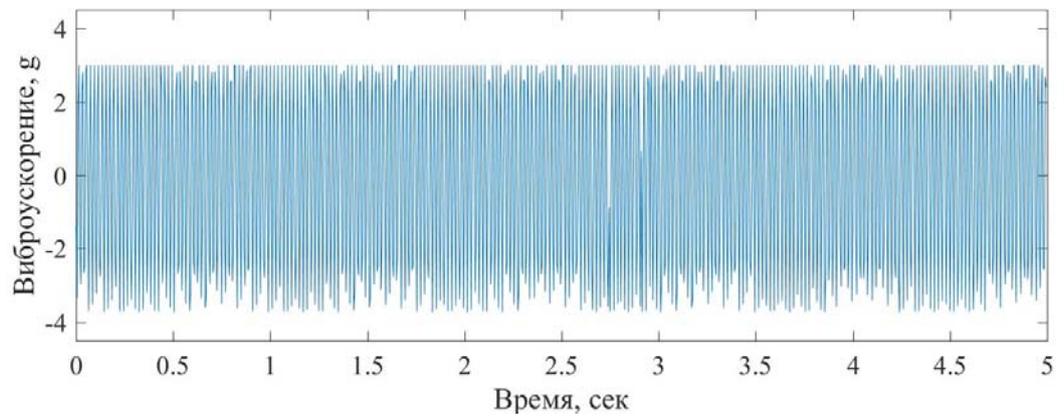
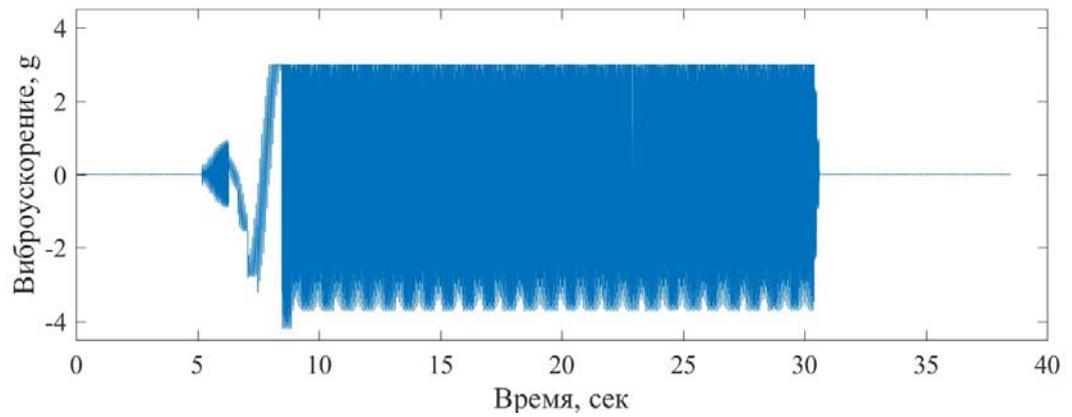


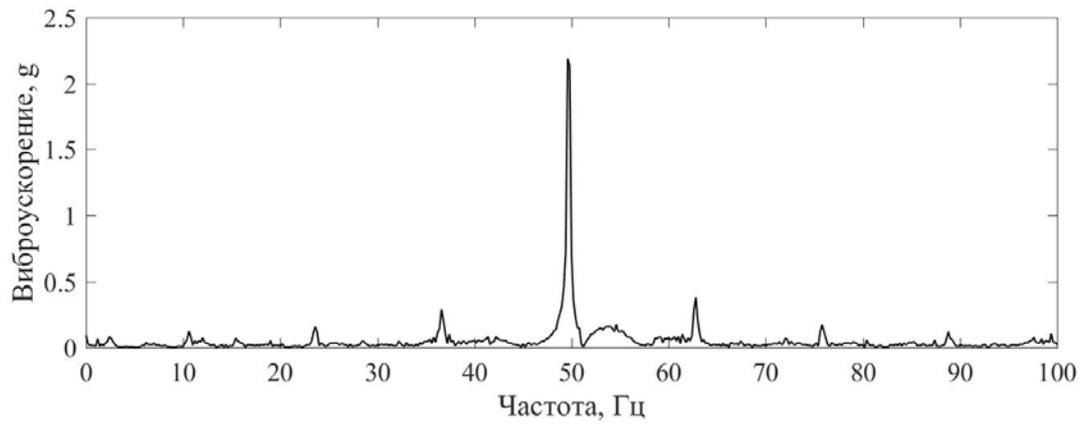
27



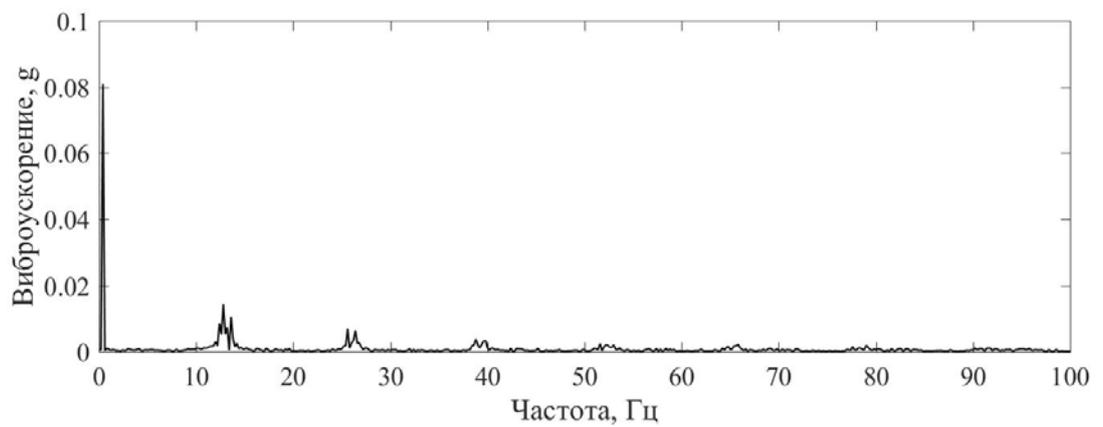
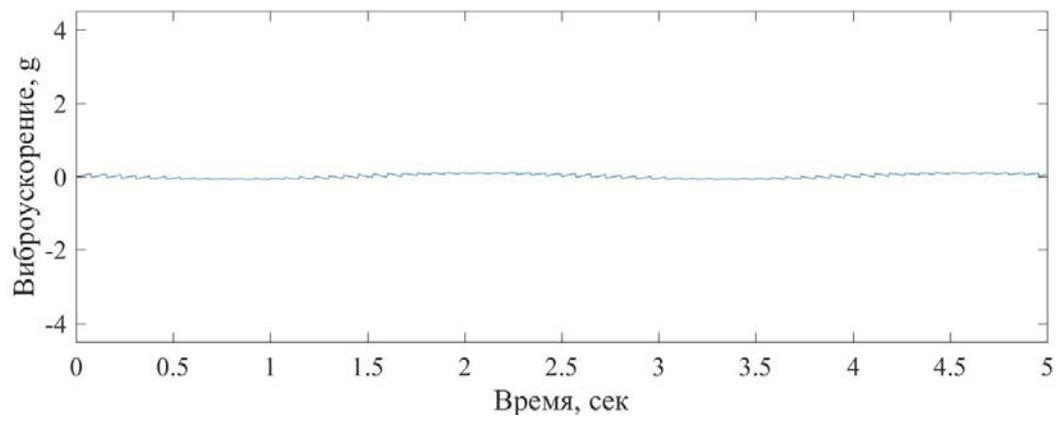
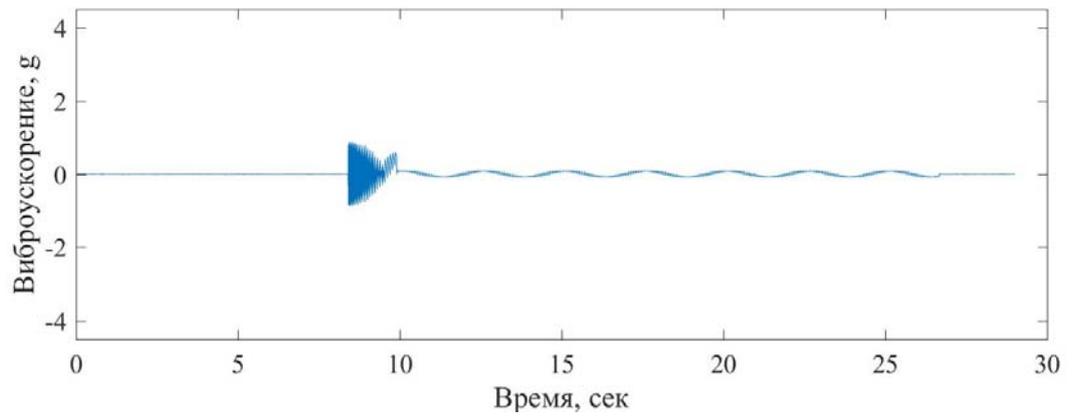


28

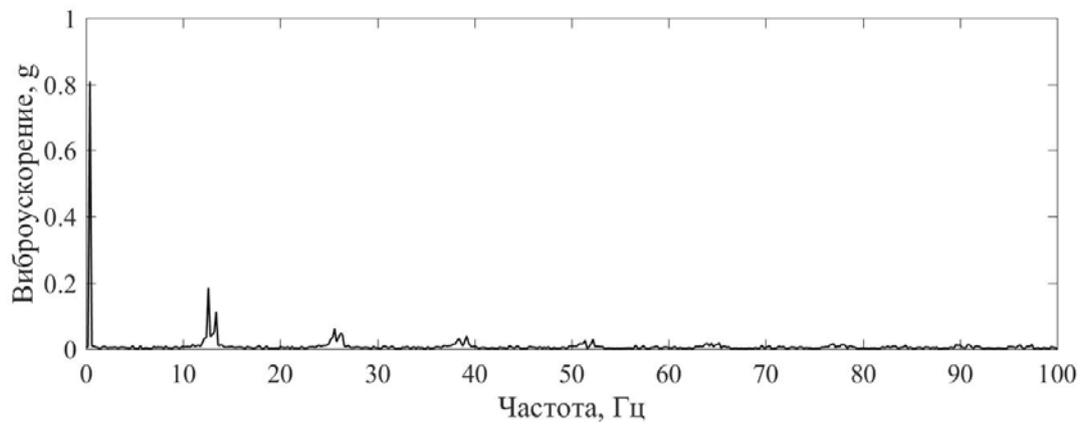
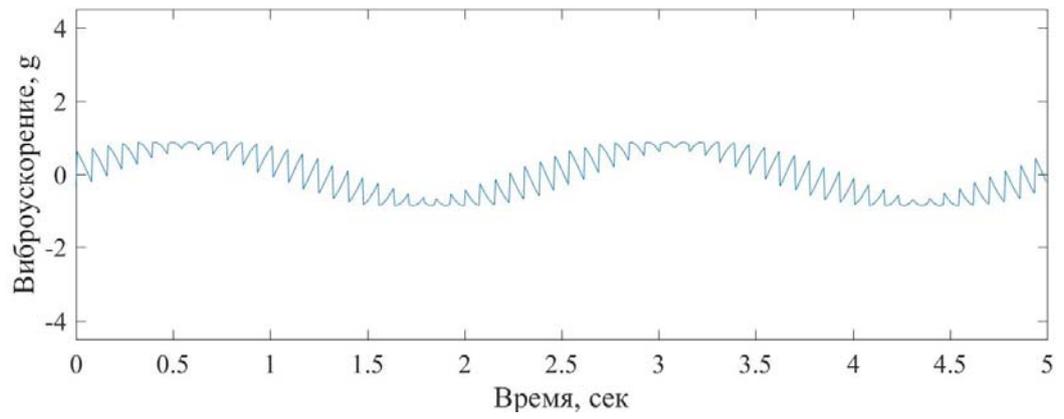
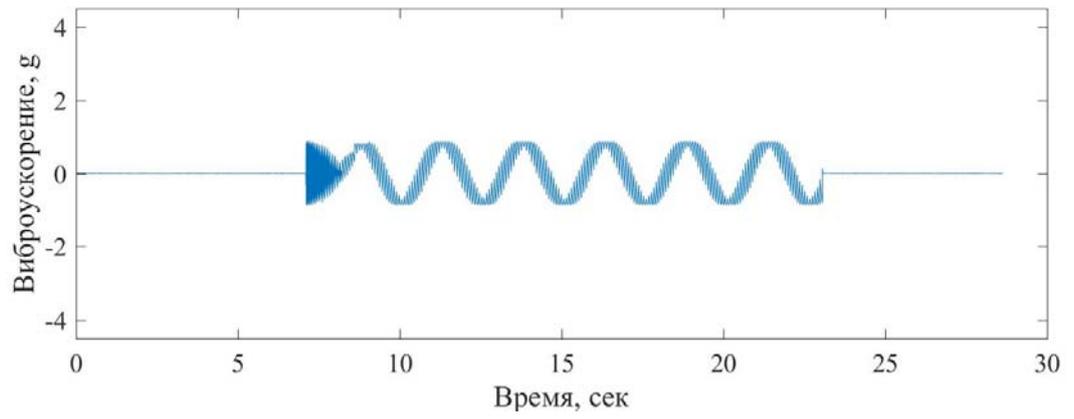




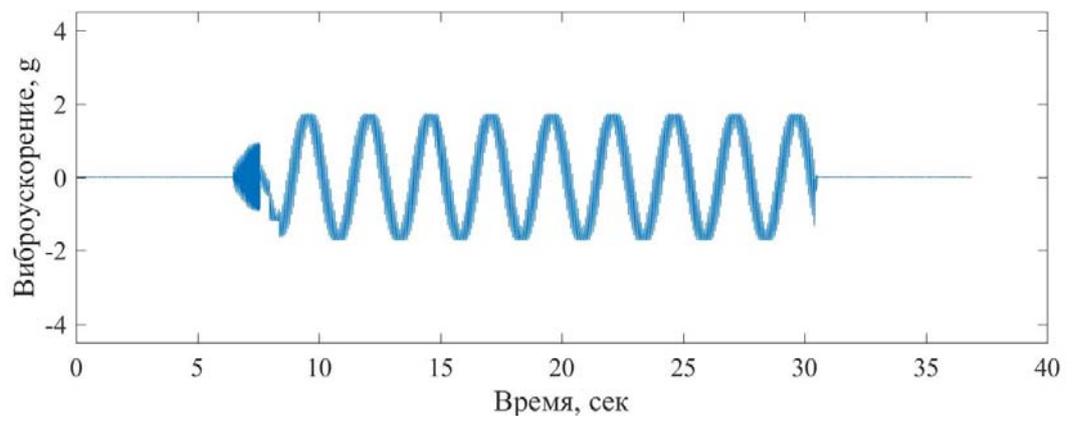
29

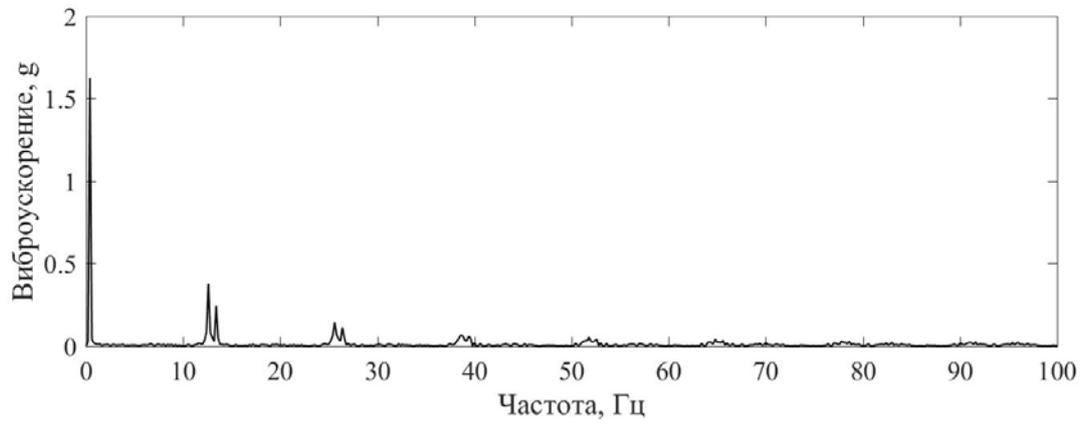
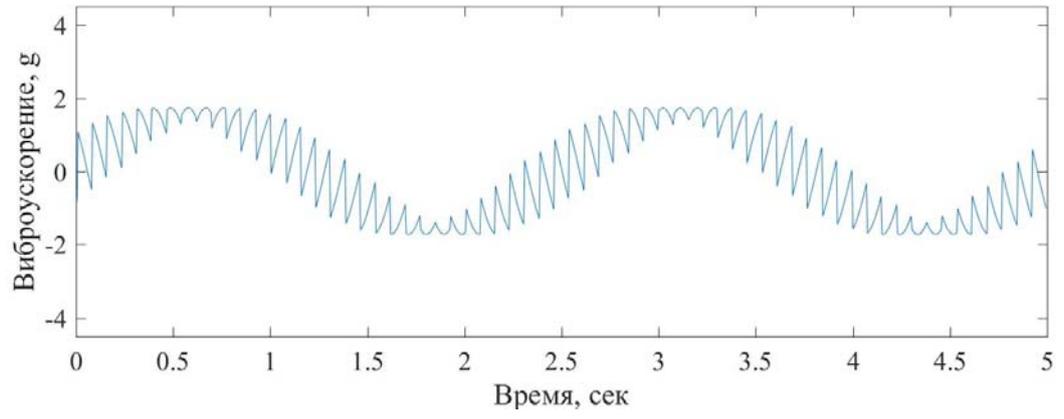


30

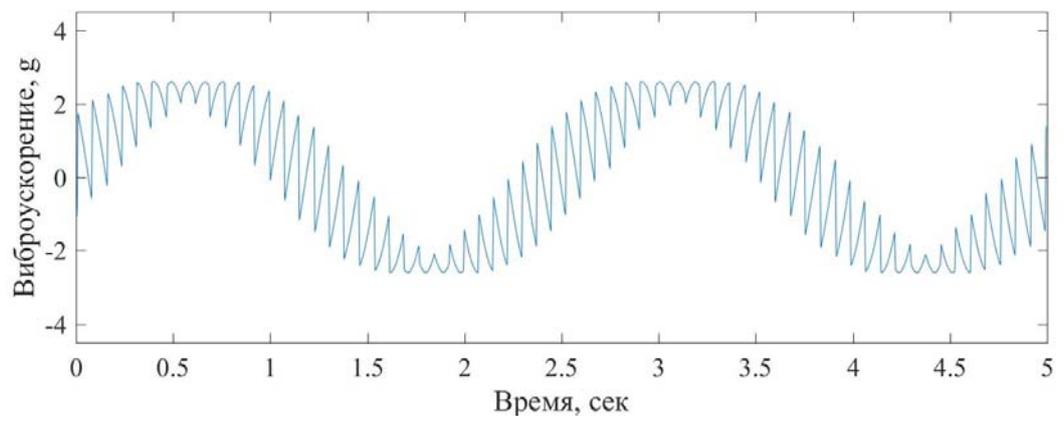
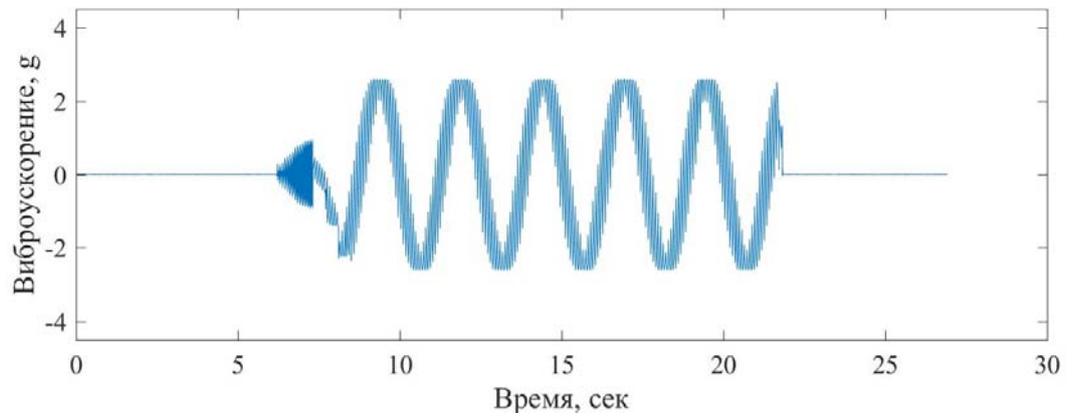


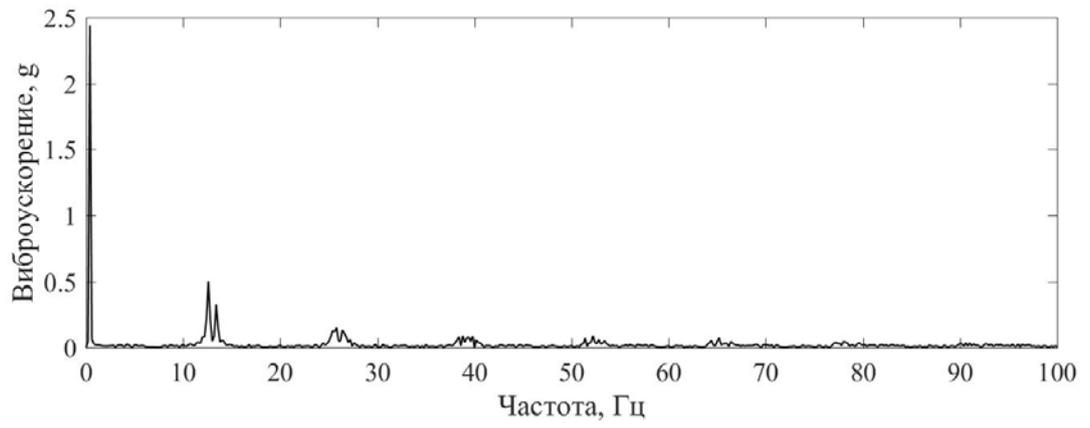
31



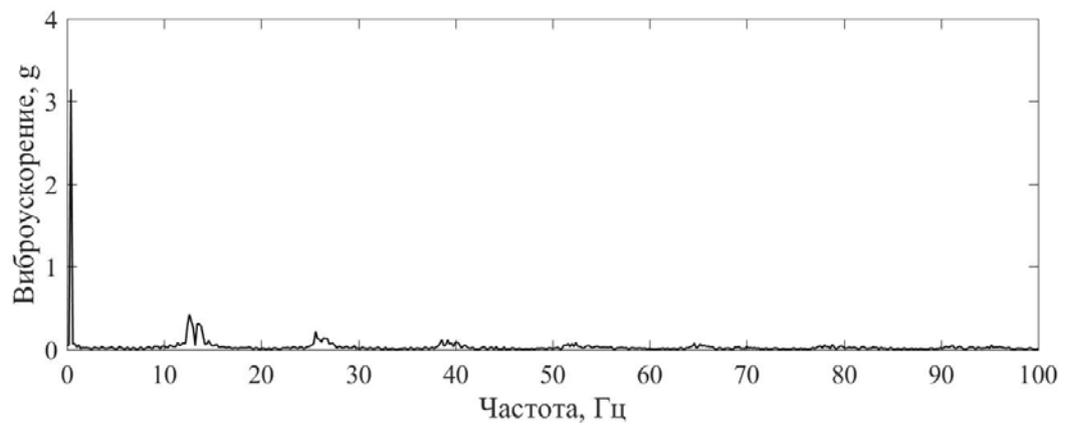
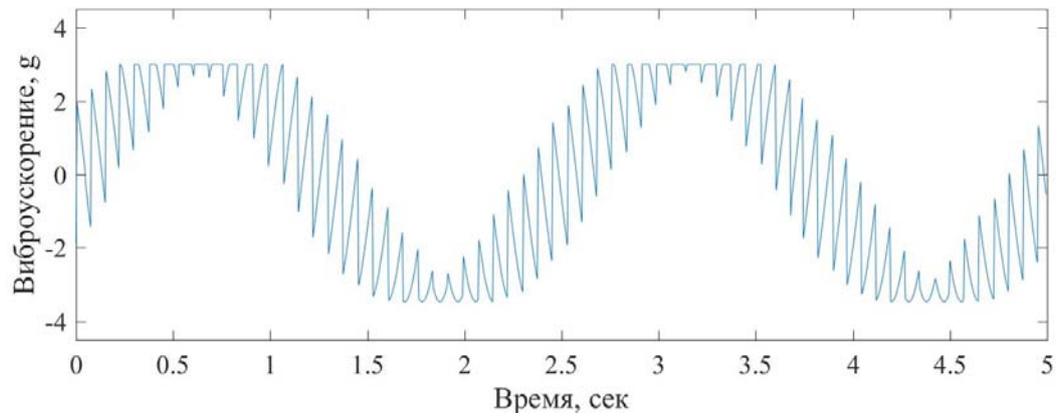
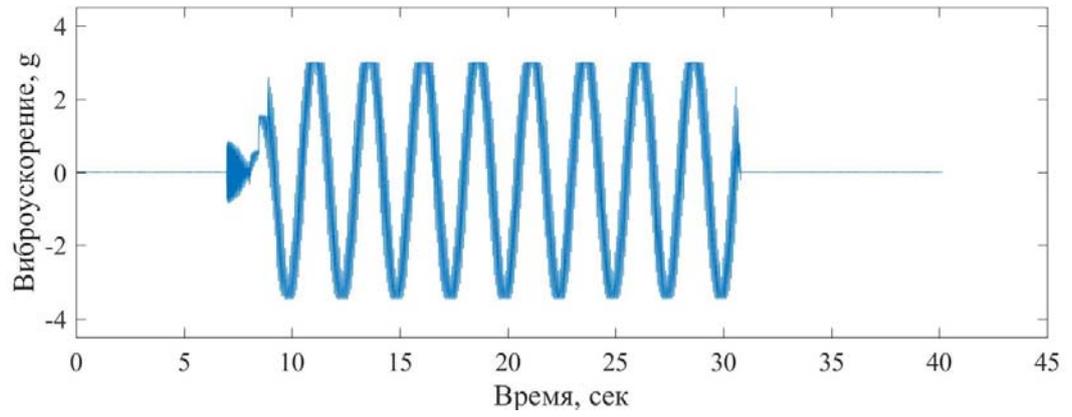


32





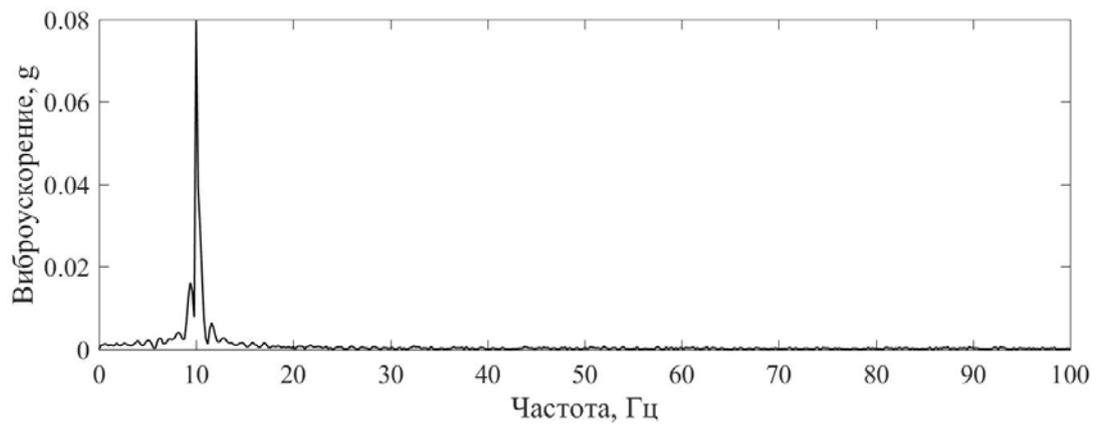
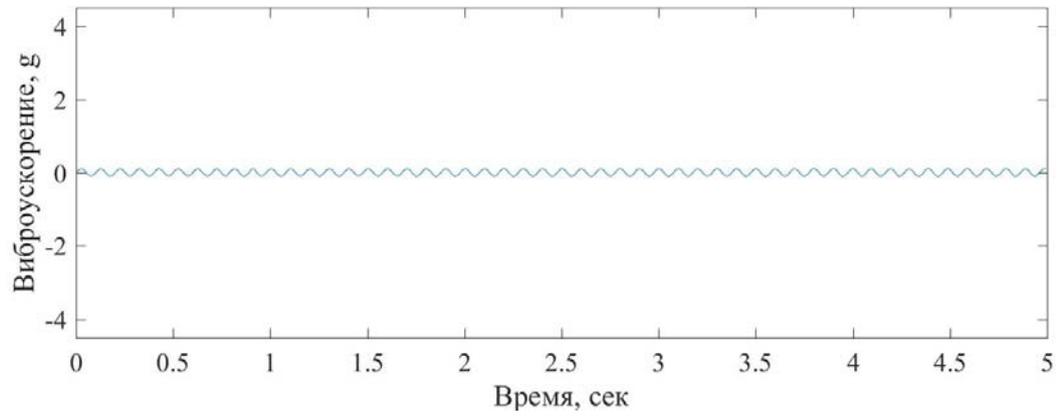
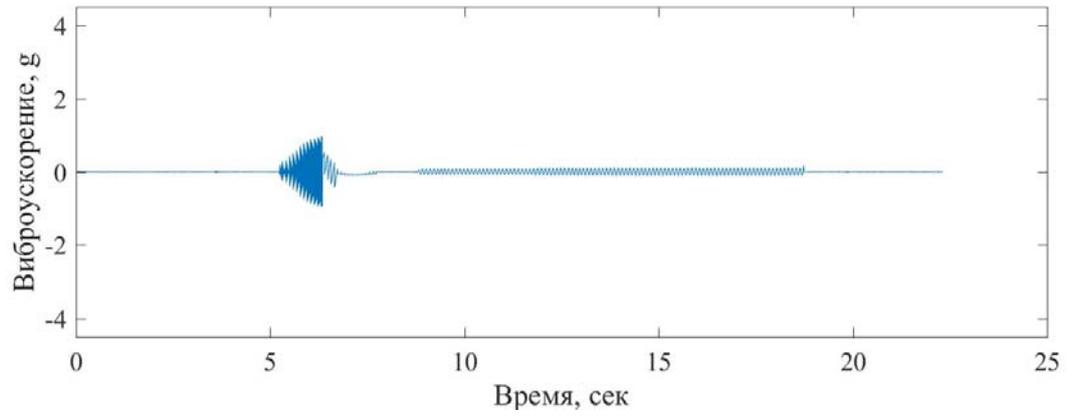
33



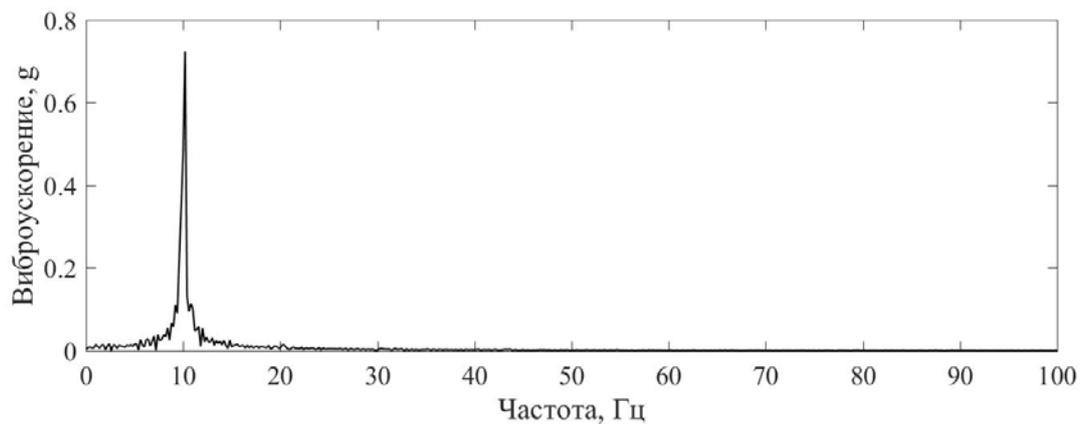
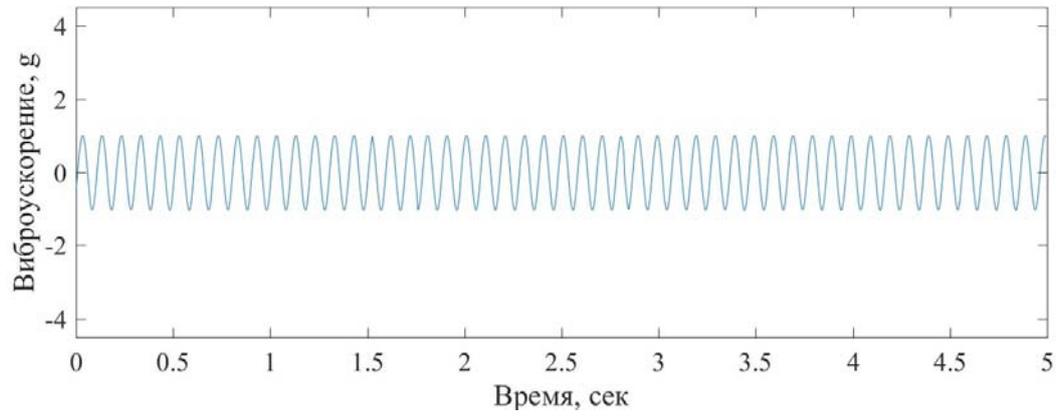
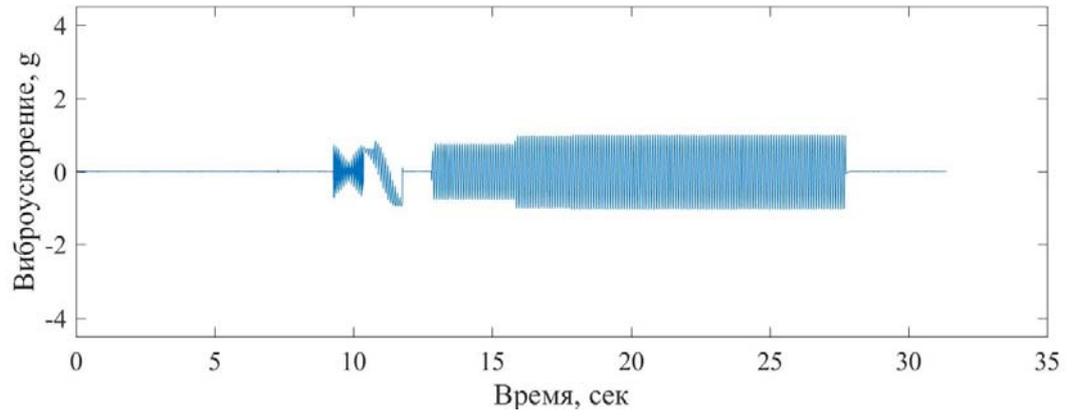
## Данные в направлении Z

№ эксперимента / сигнал вибрации

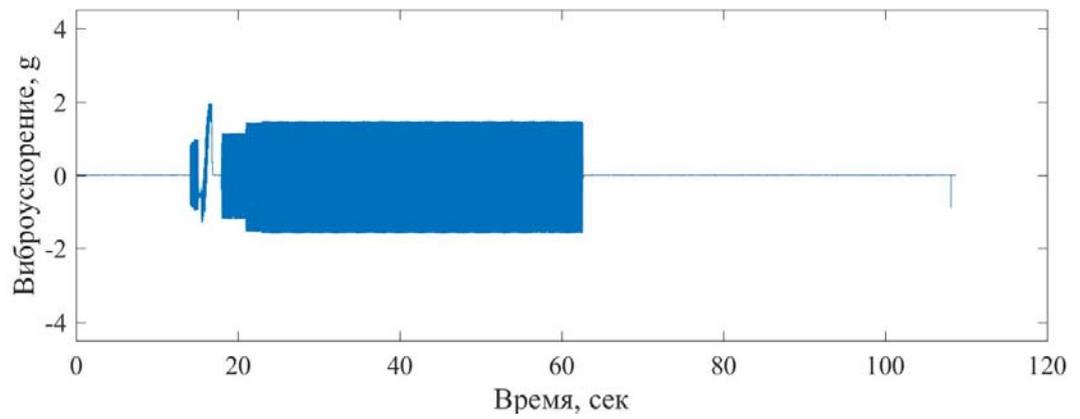
1

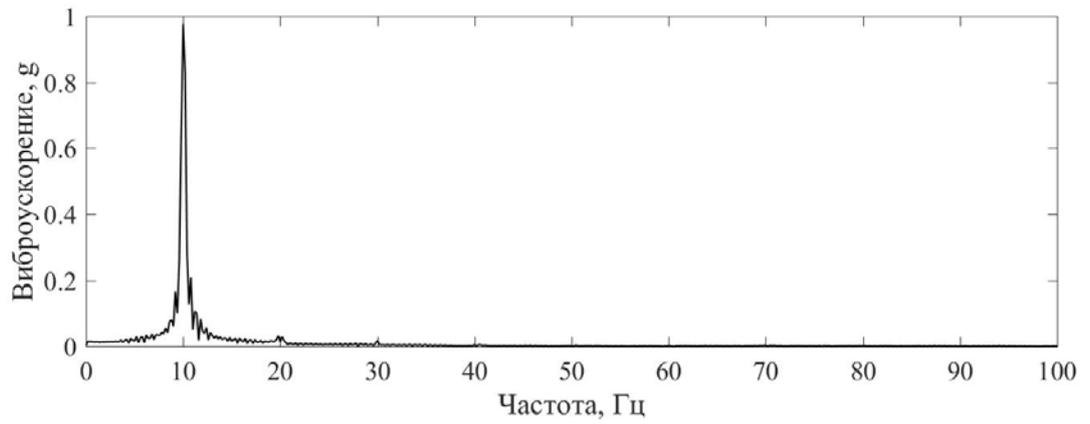
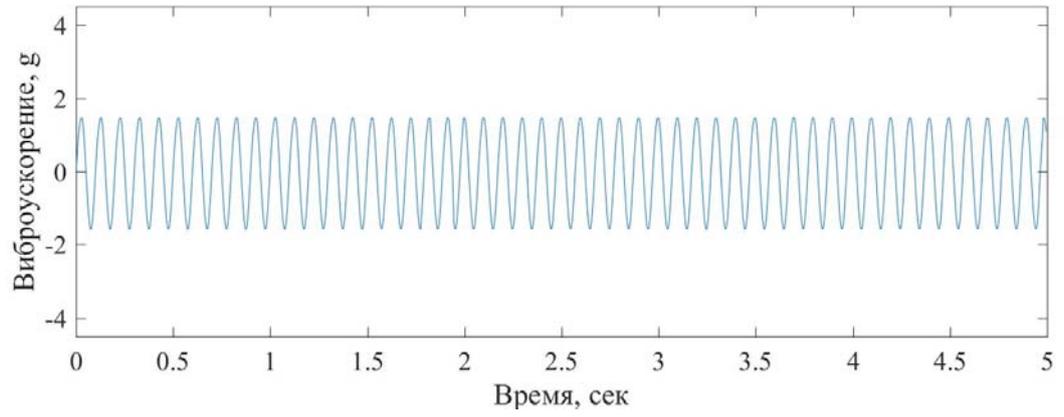


2

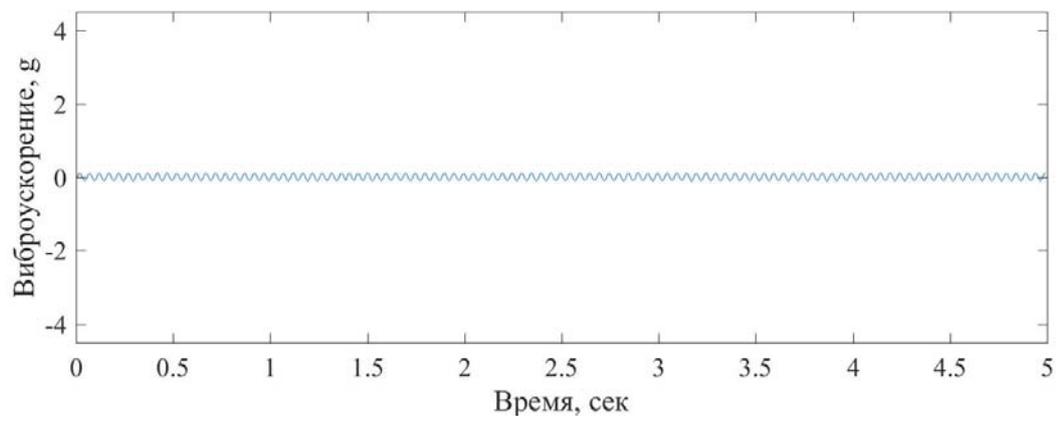
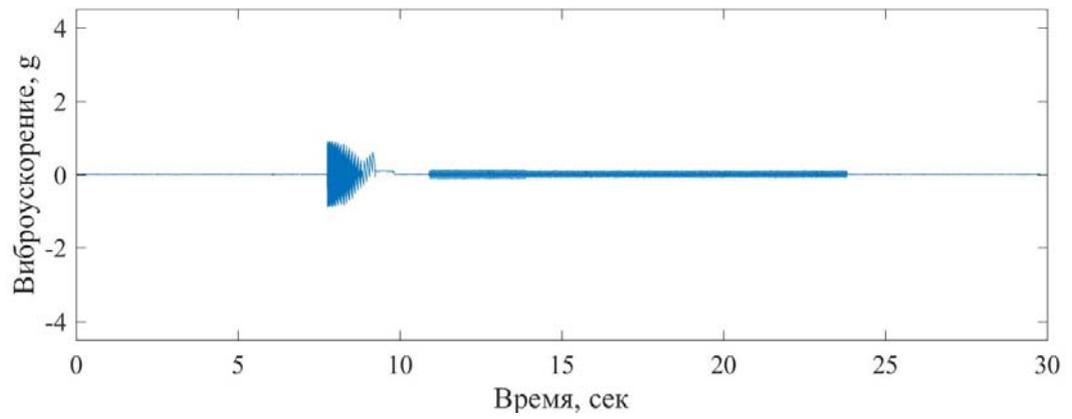


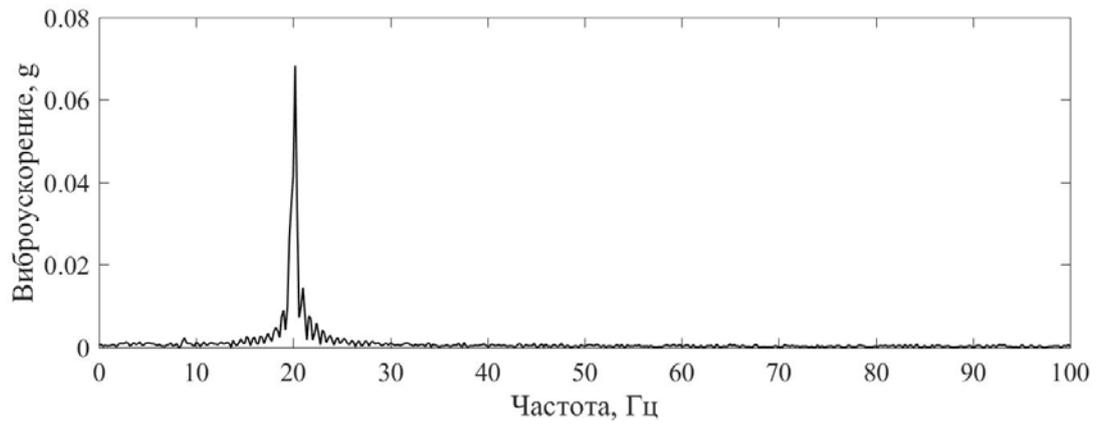
3



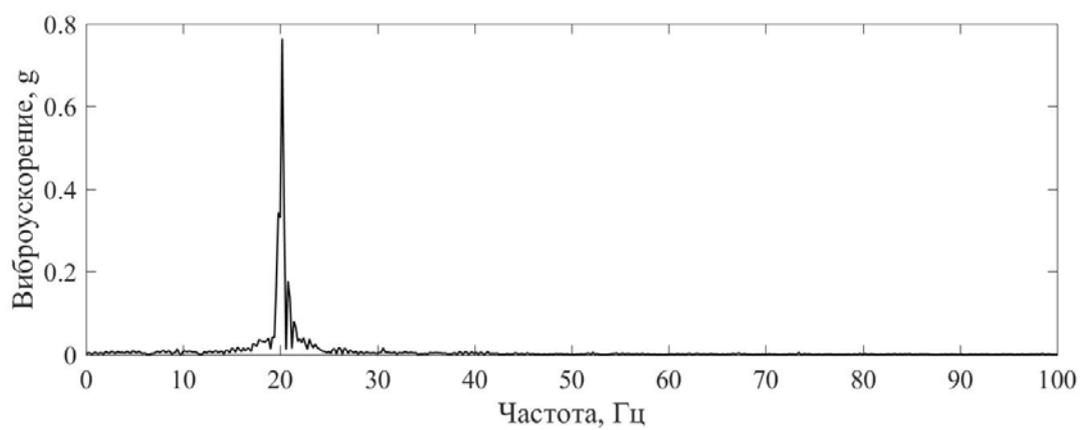
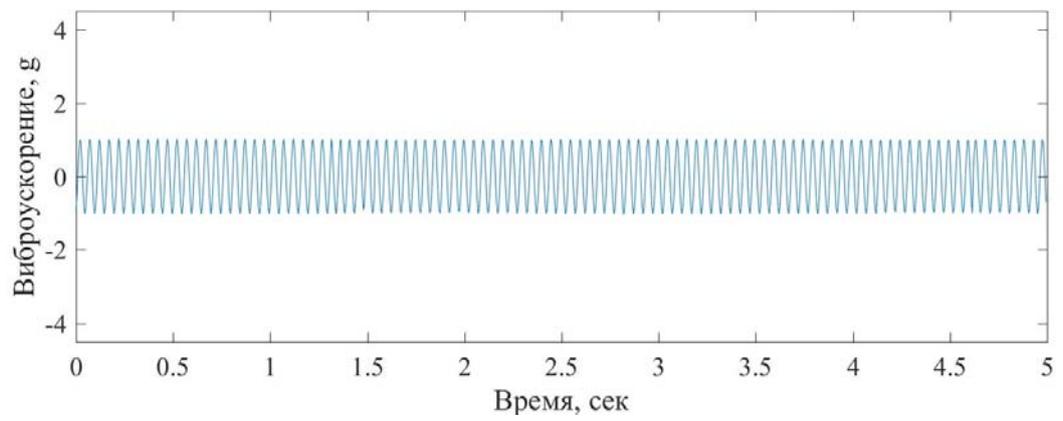
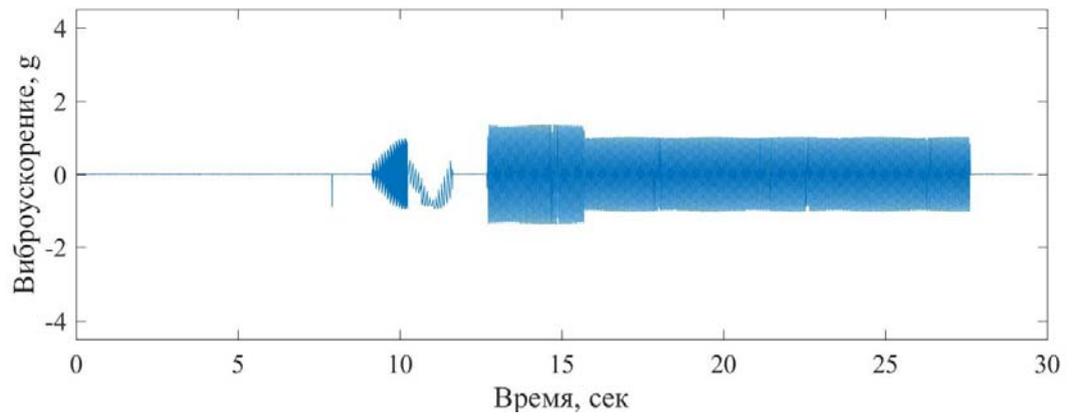


4

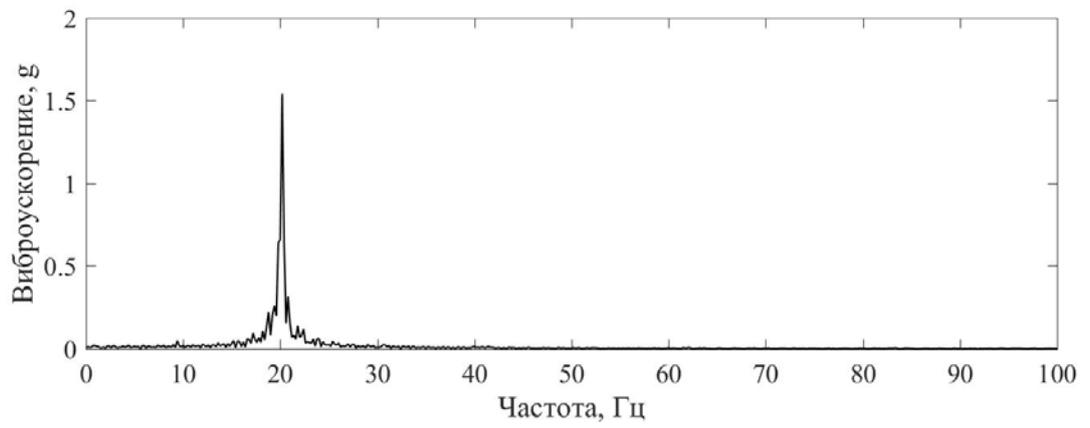
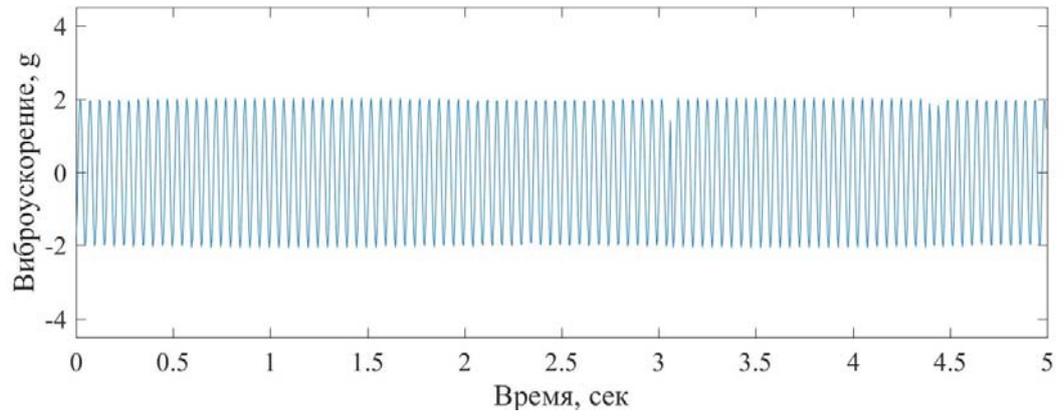
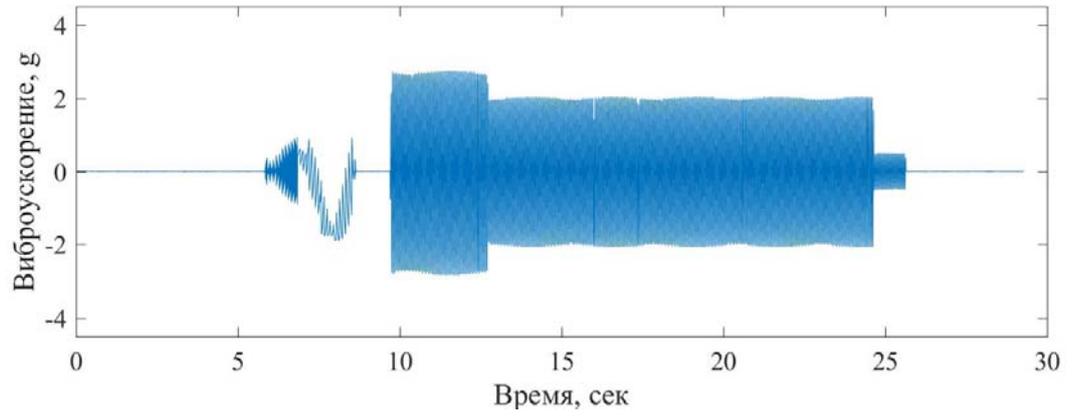




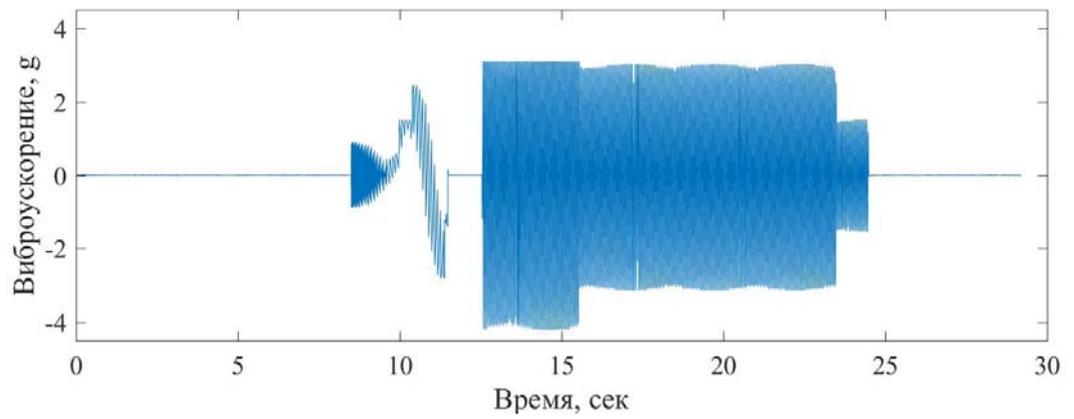
5

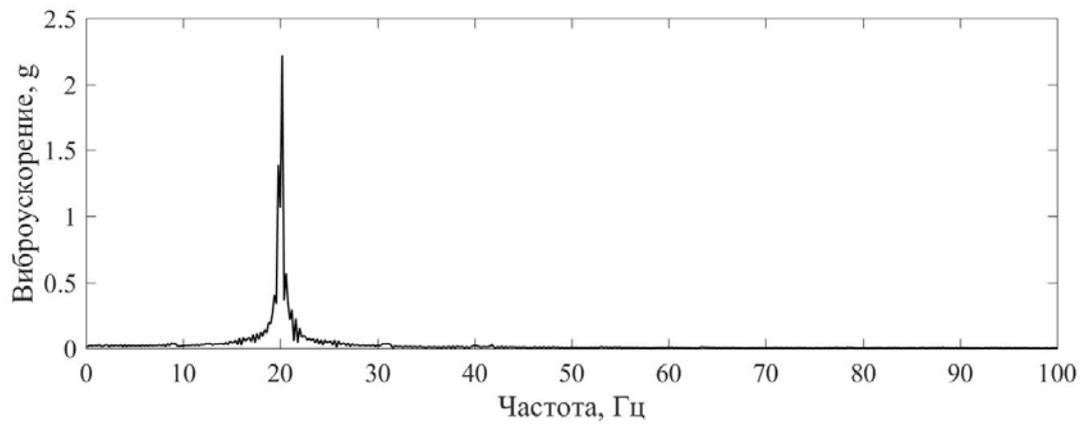
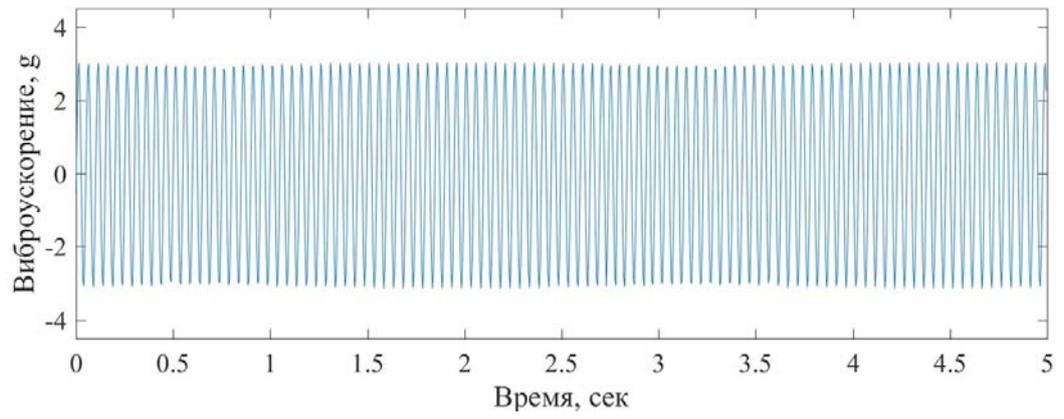


6

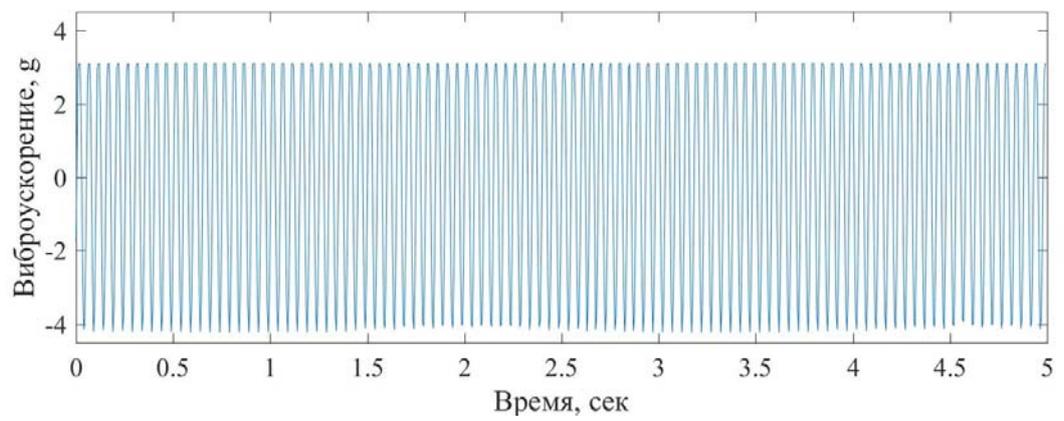
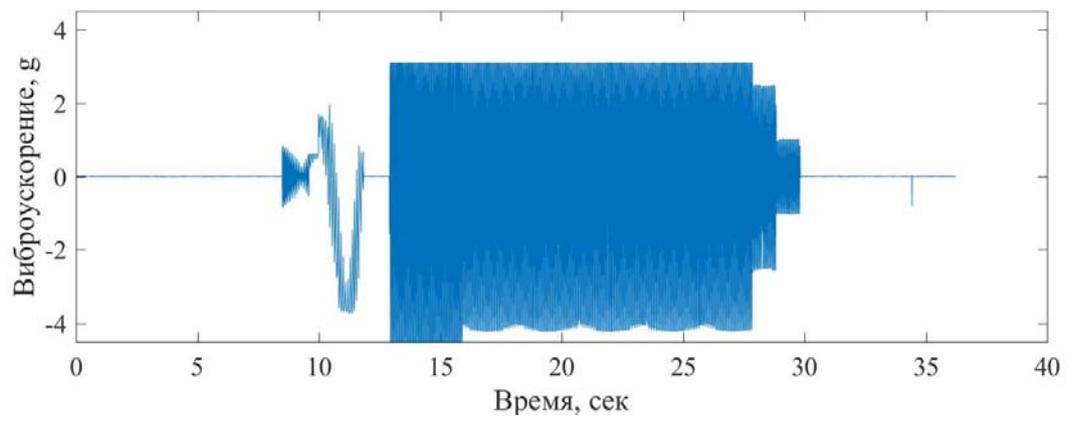


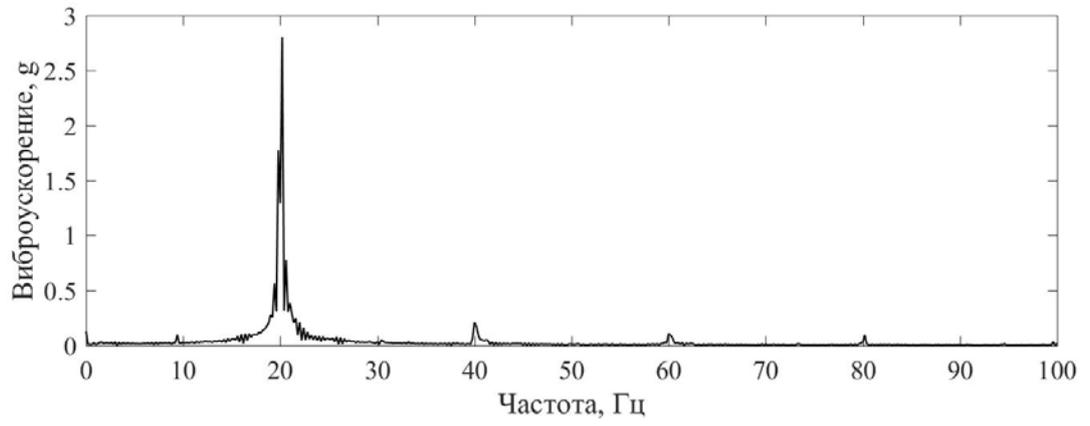
7



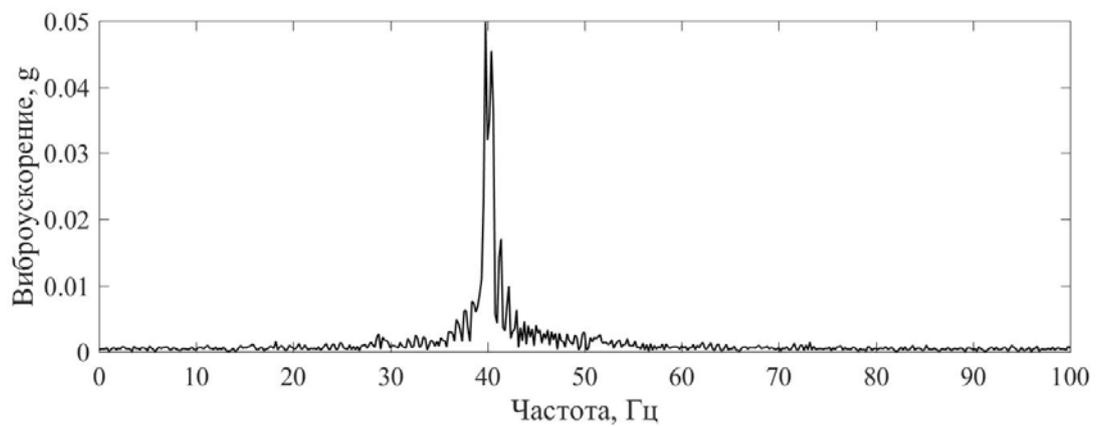
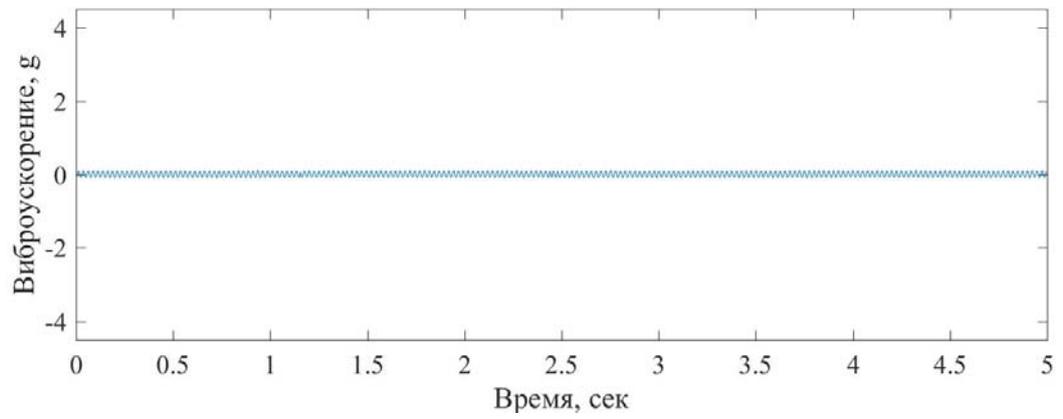
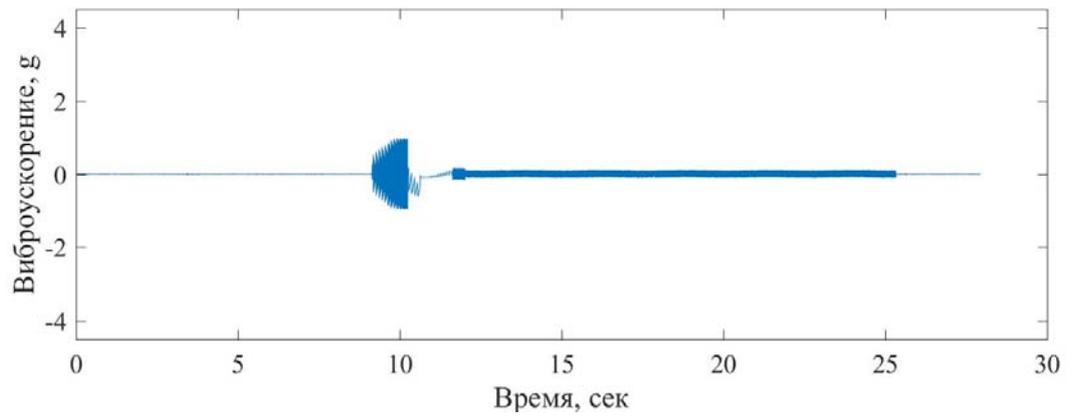


8

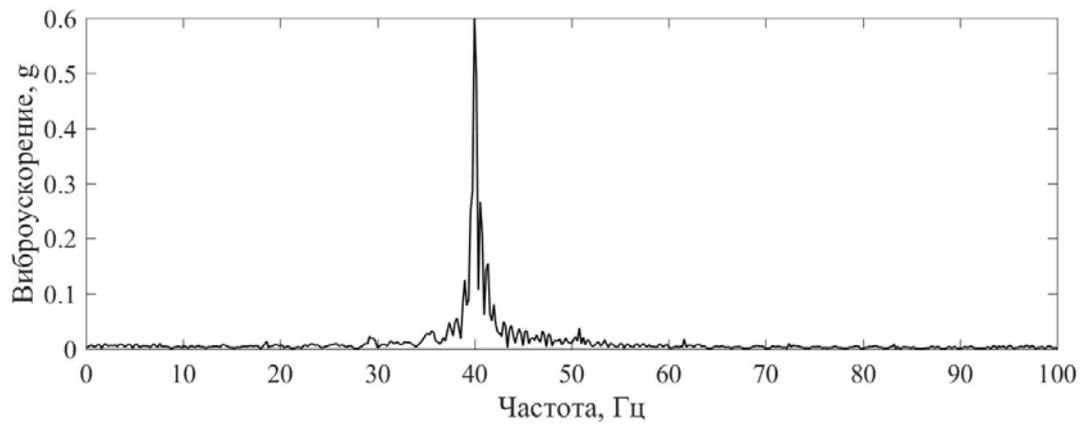
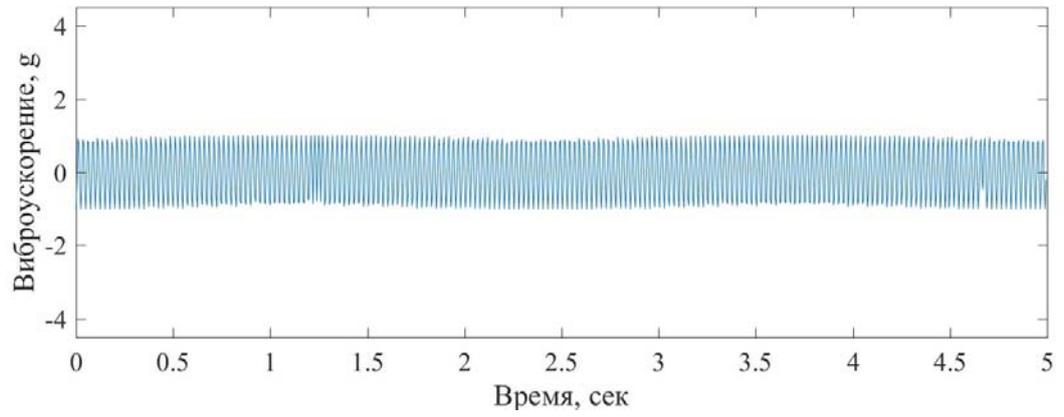
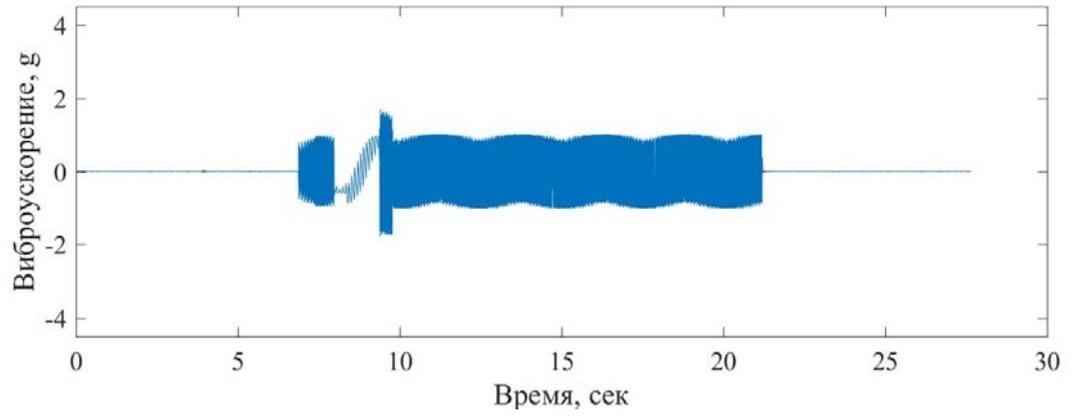




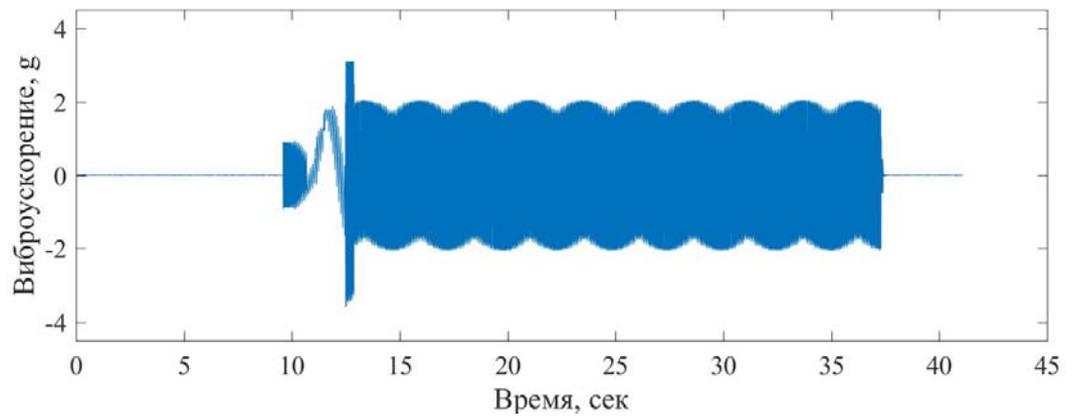
9

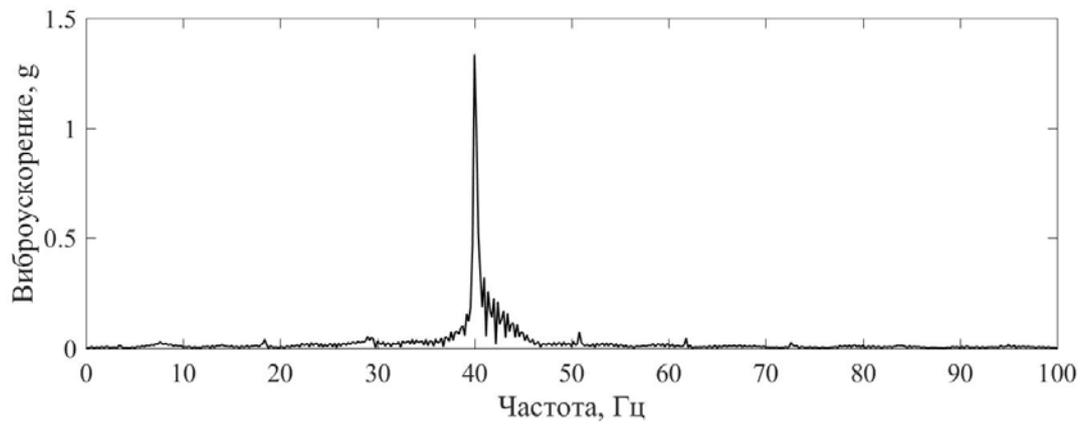
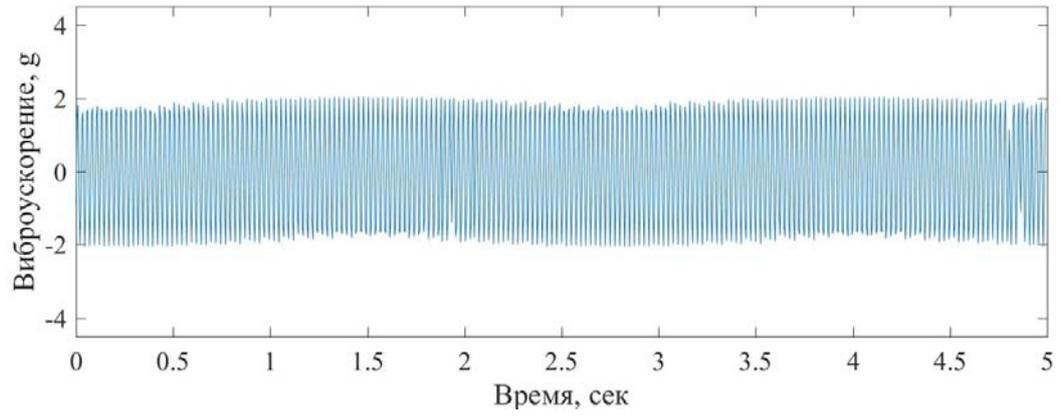


10

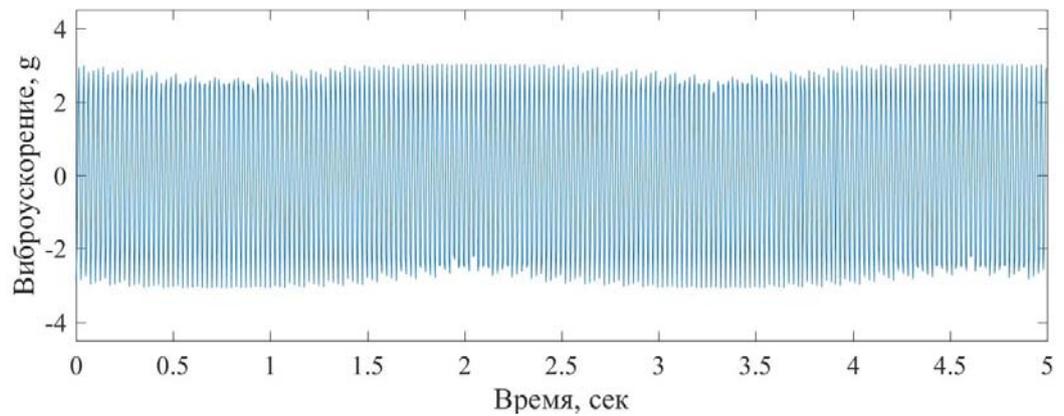
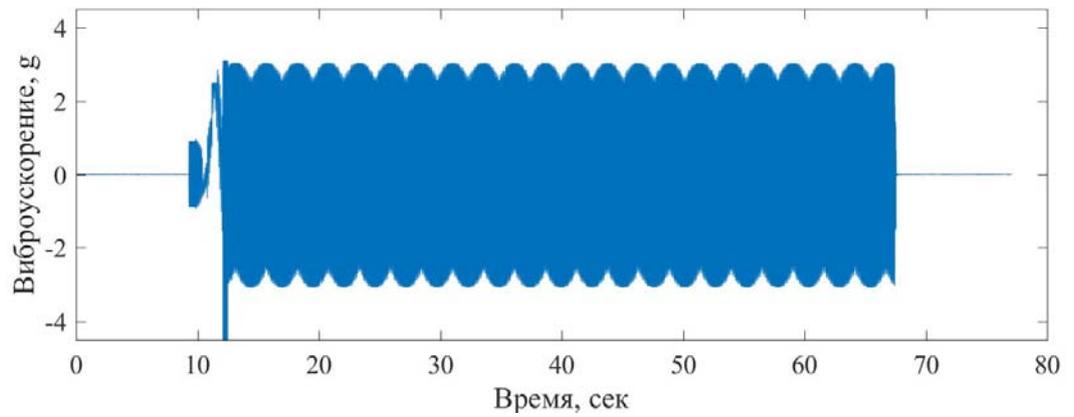


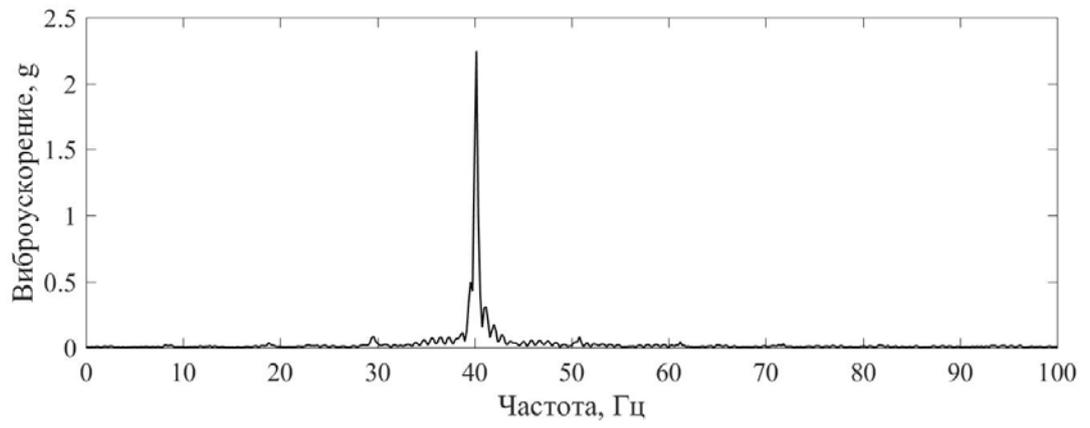
11



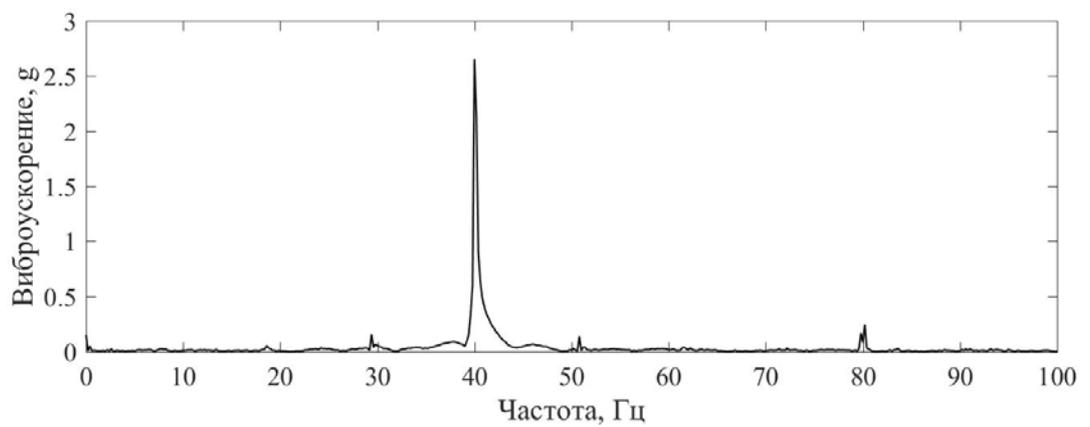
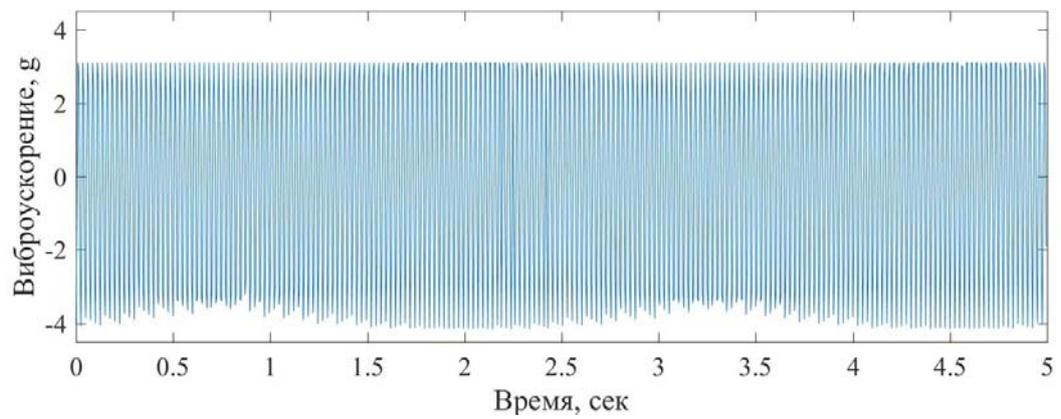
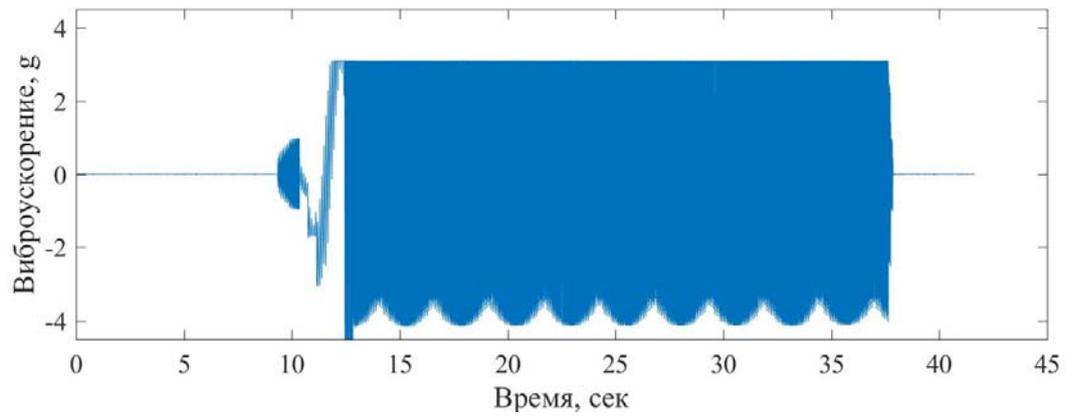


12

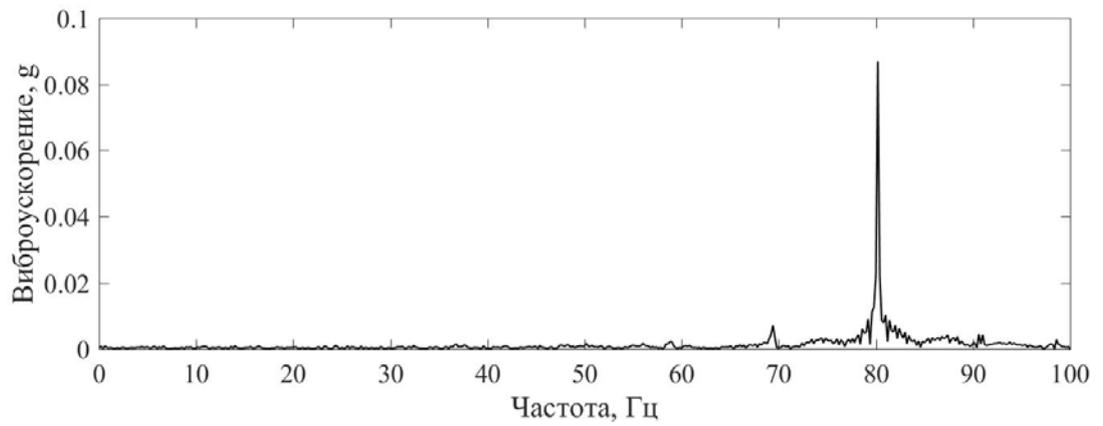
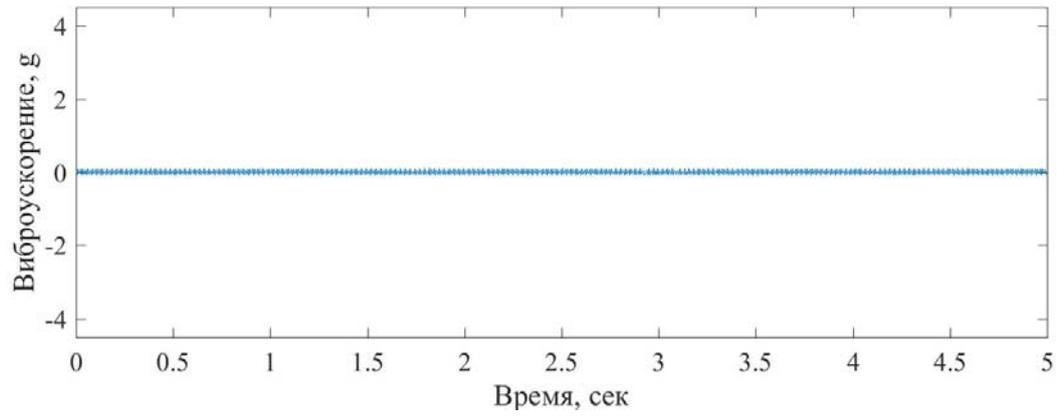
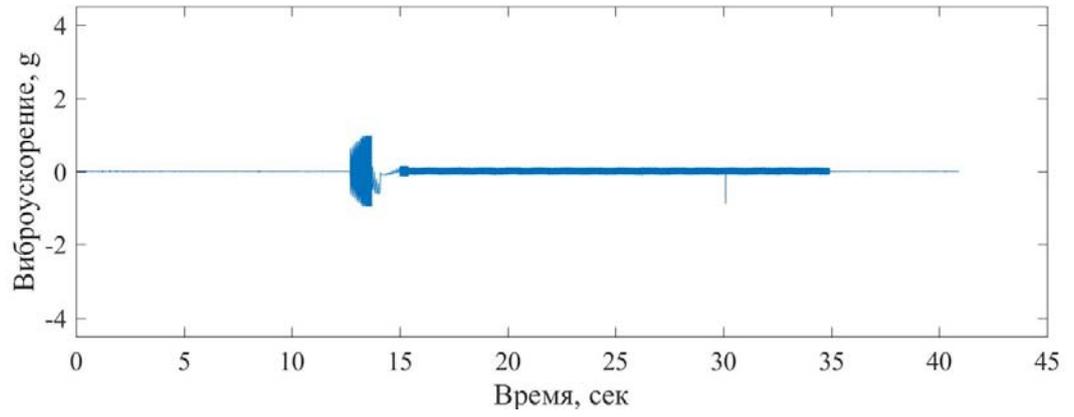




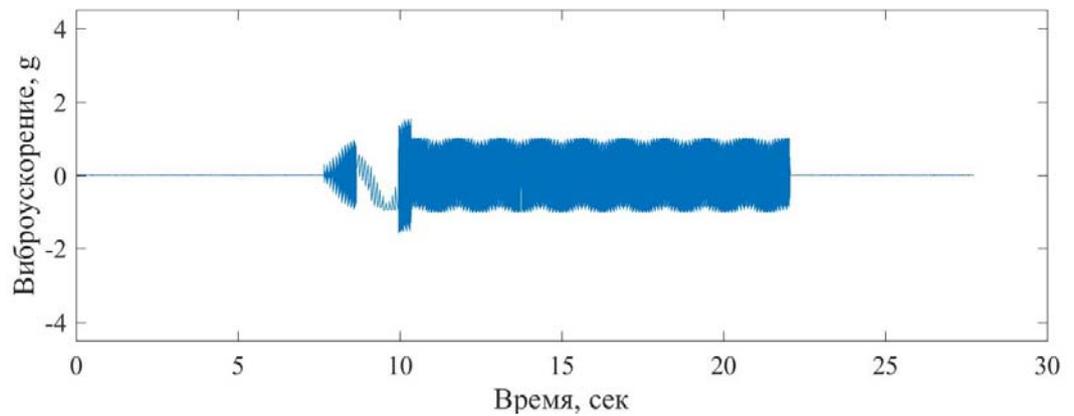
13

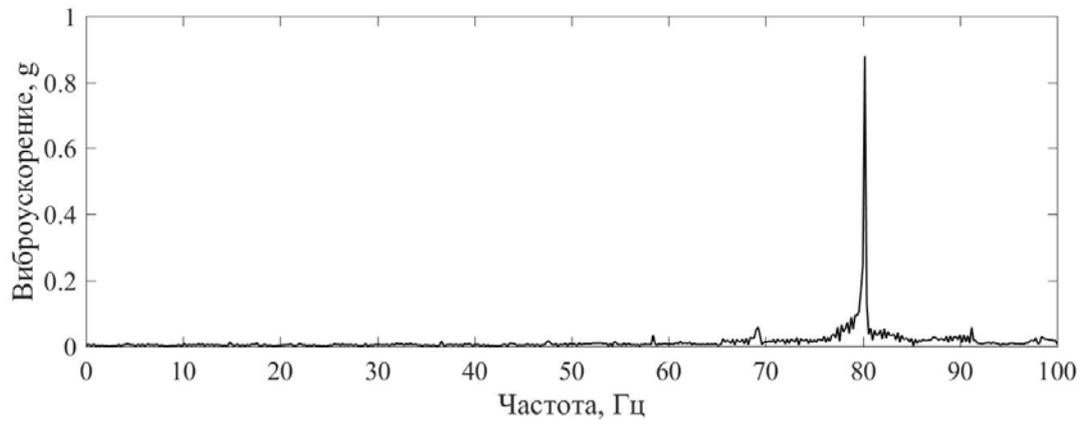
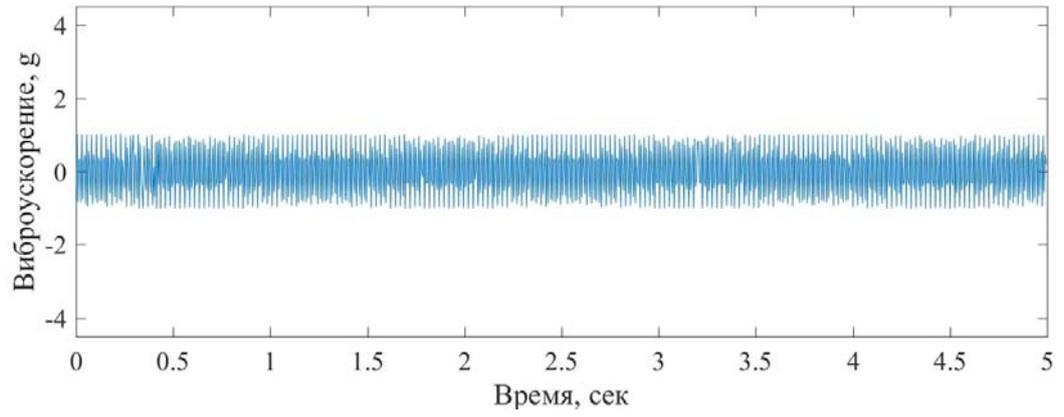


14

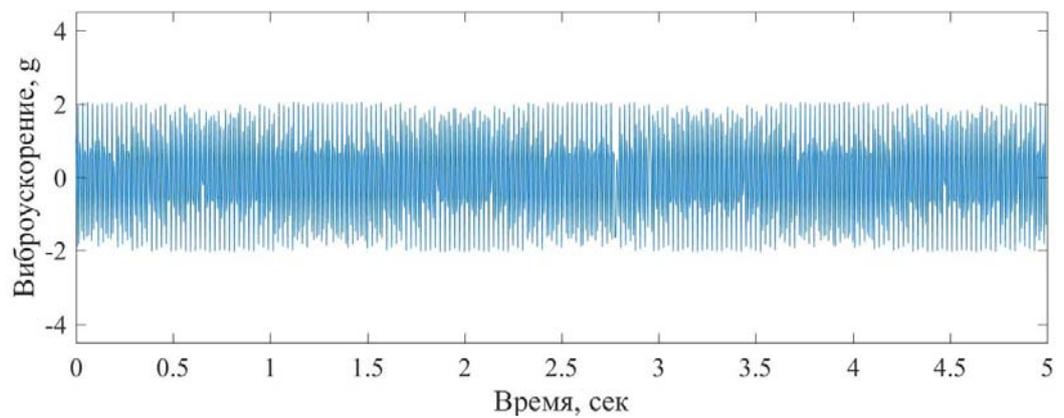
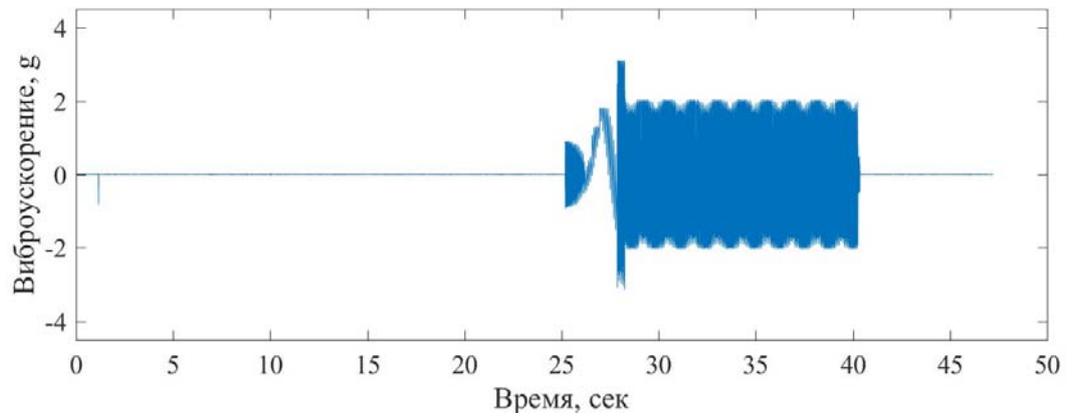


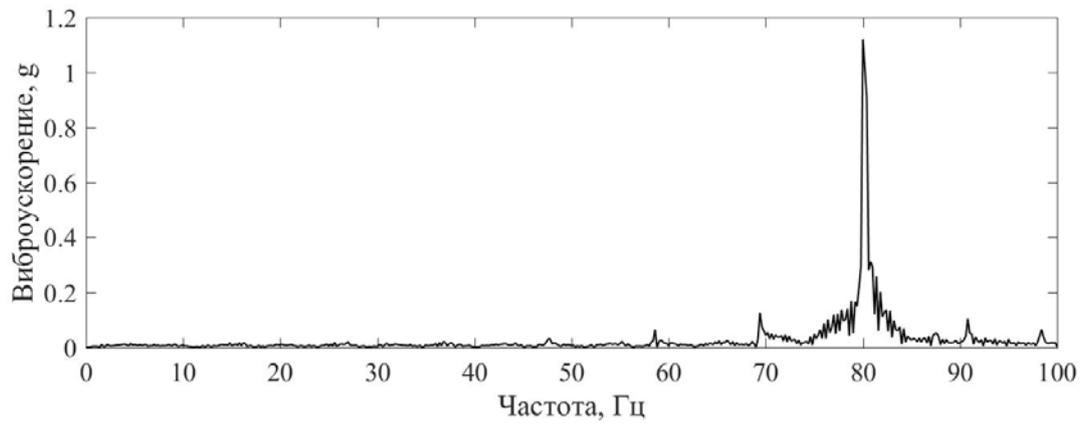
15



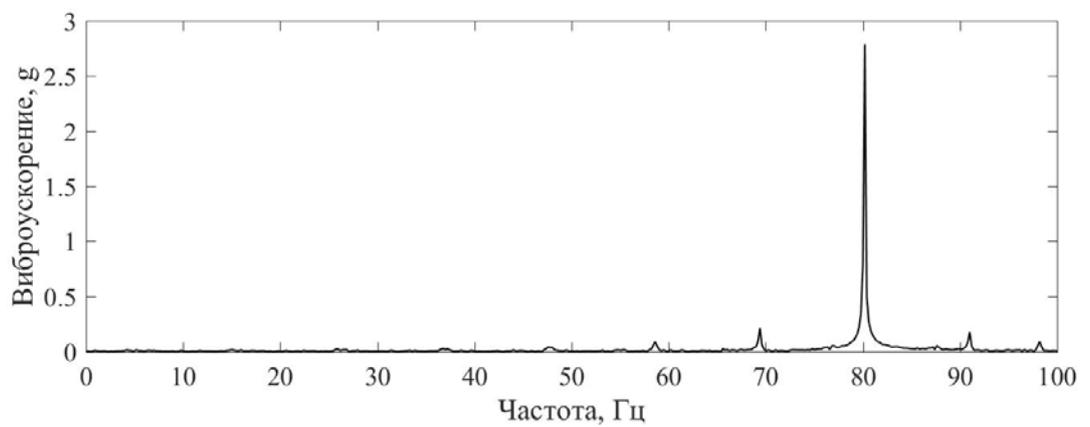
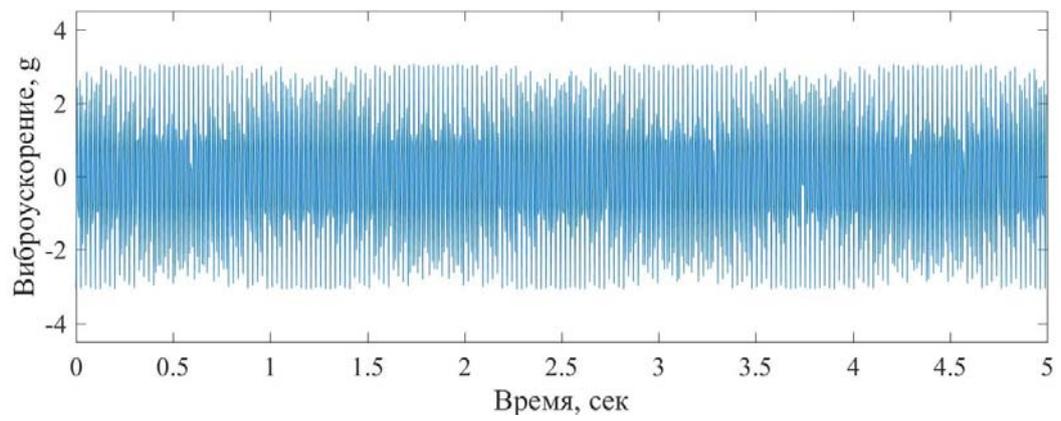
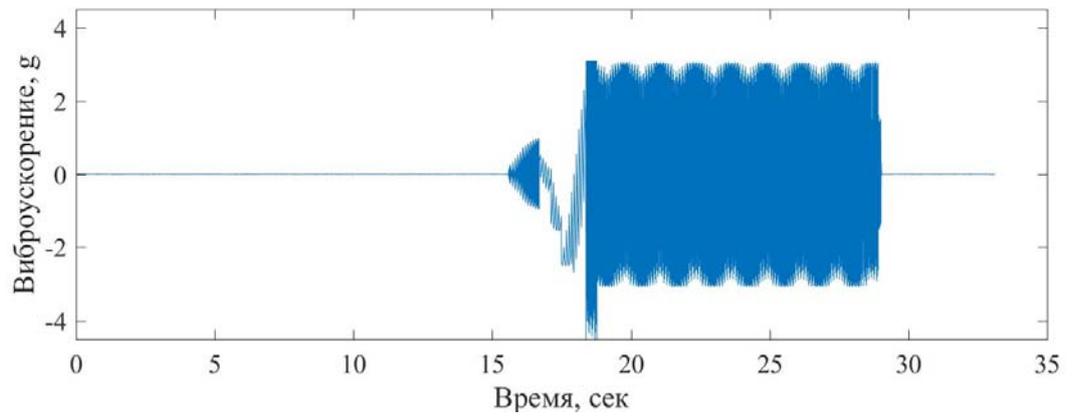


16

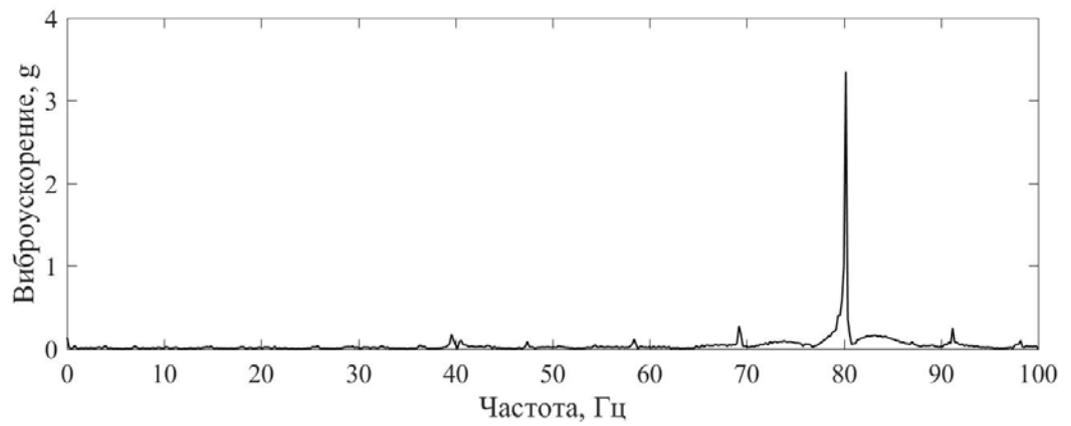
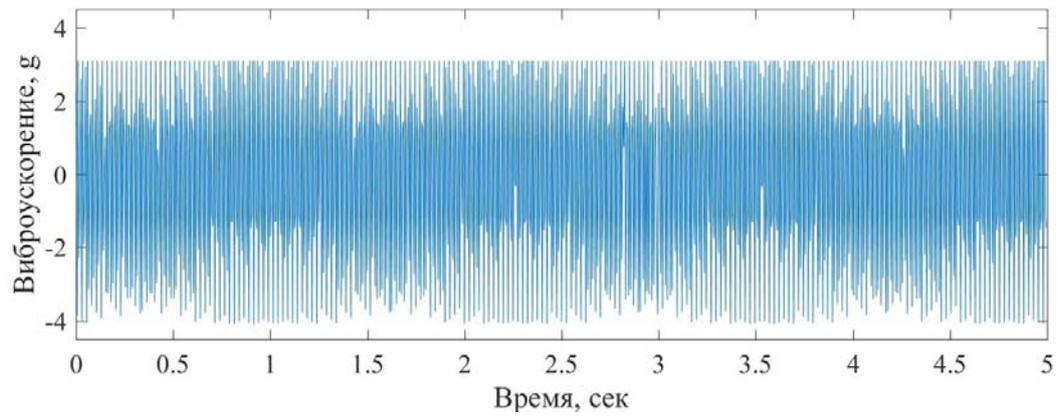
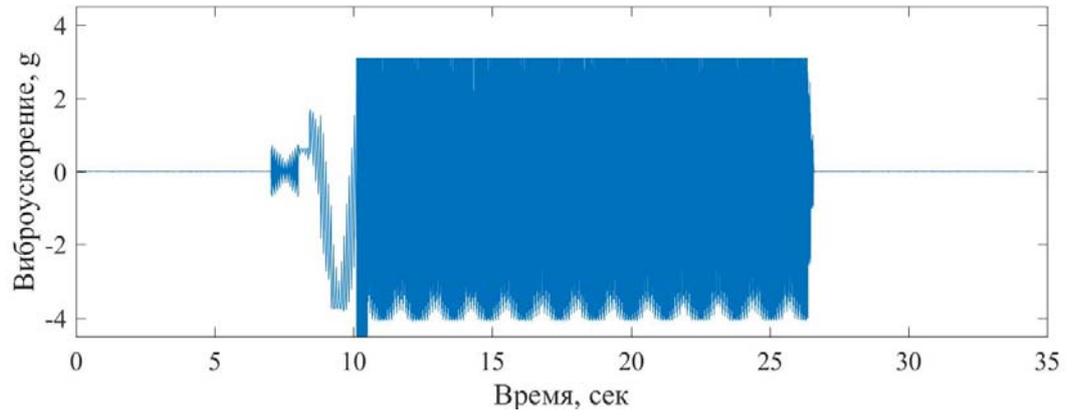




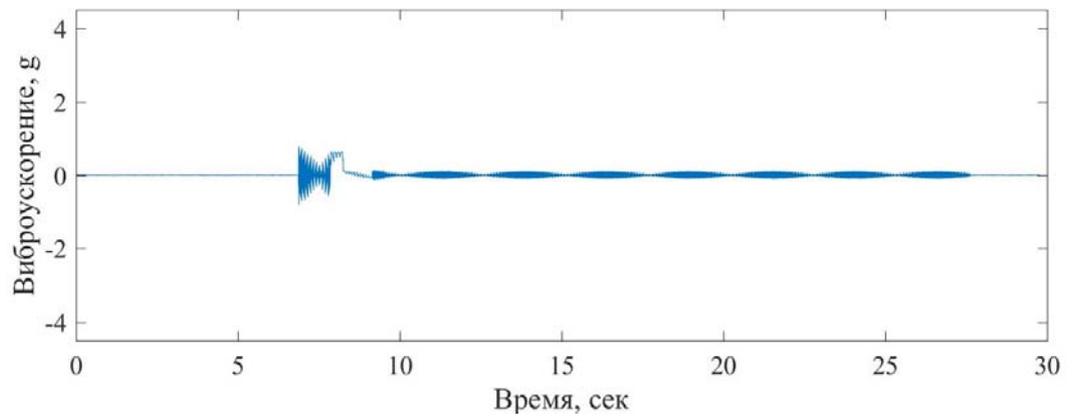
17

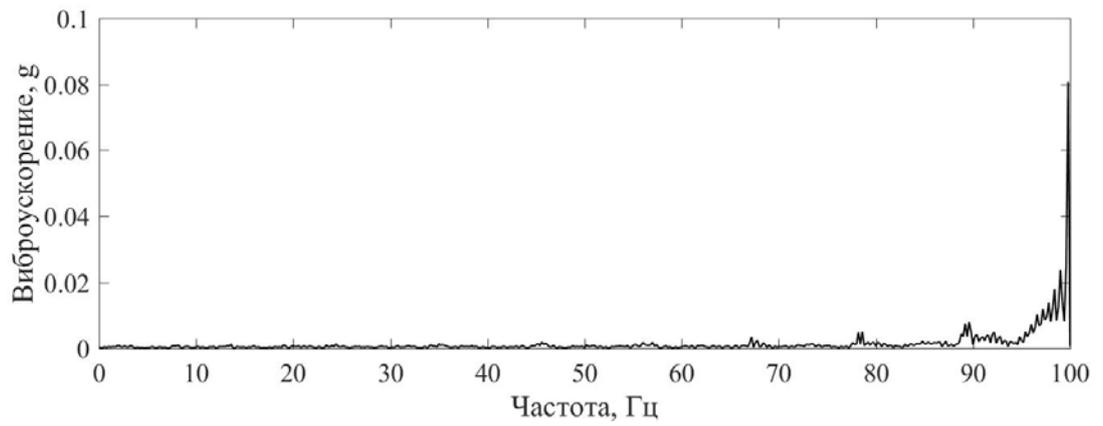
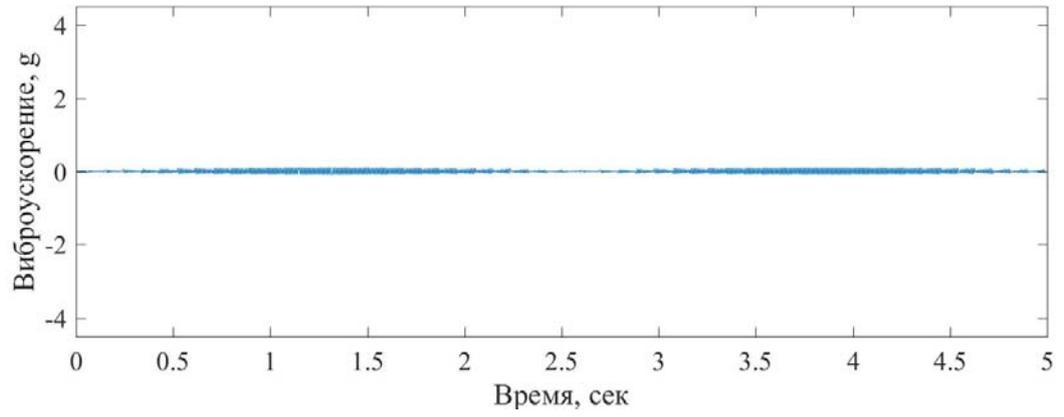


18

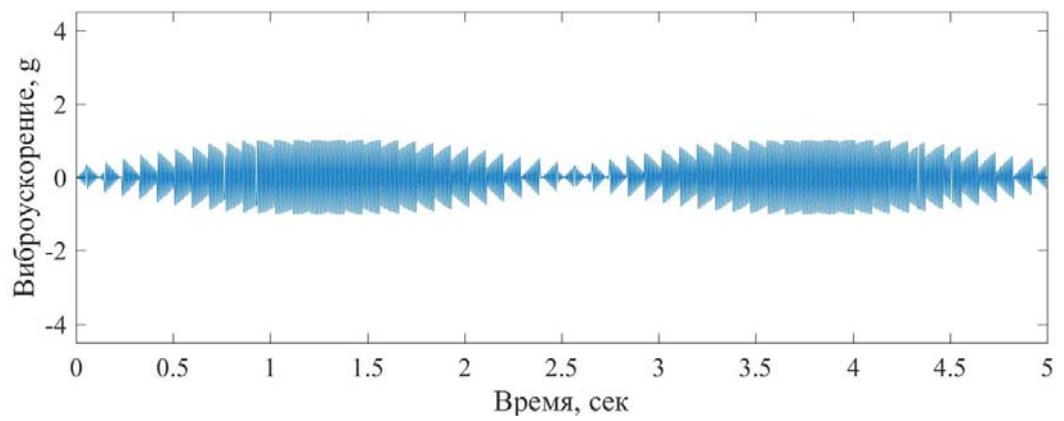
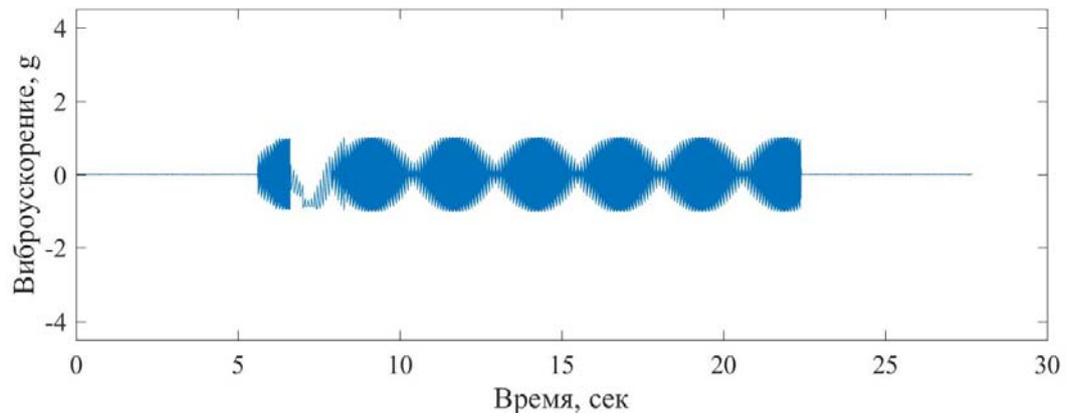


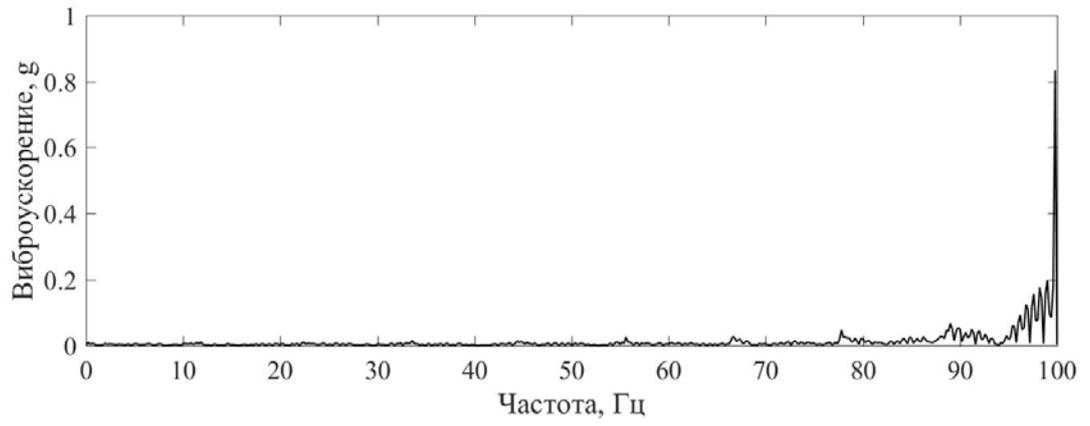
19



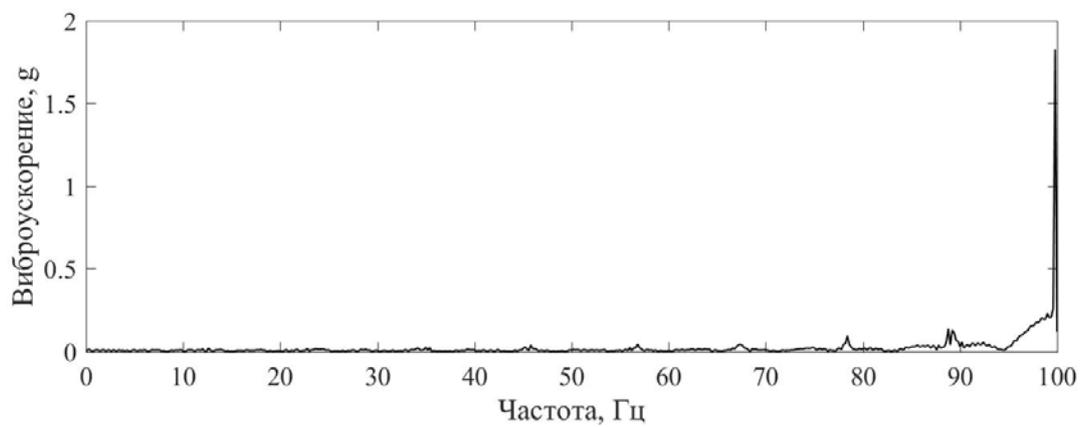
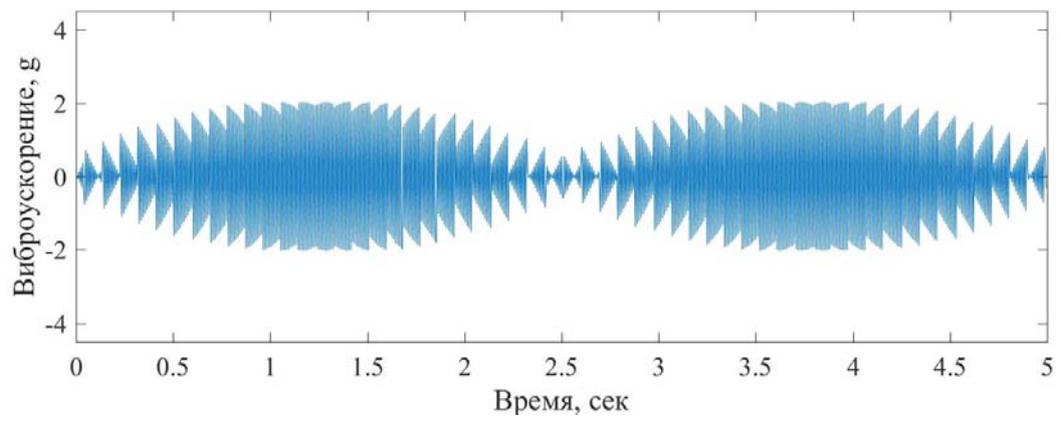
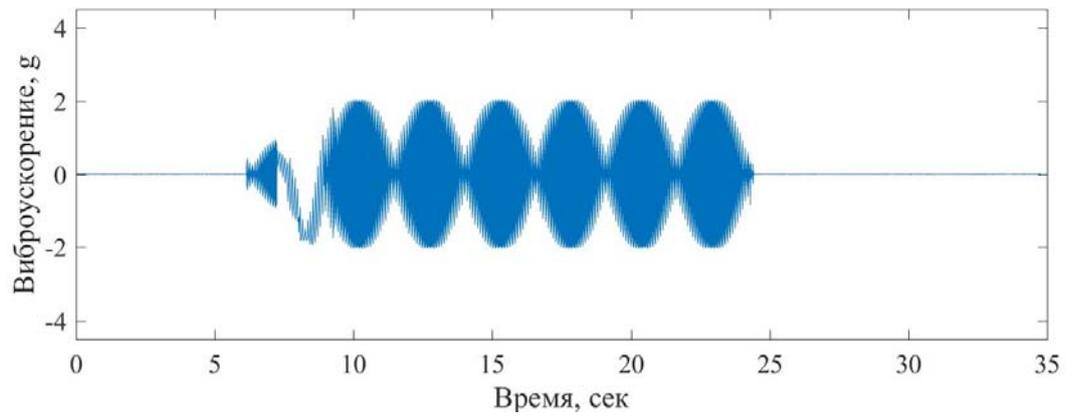


20

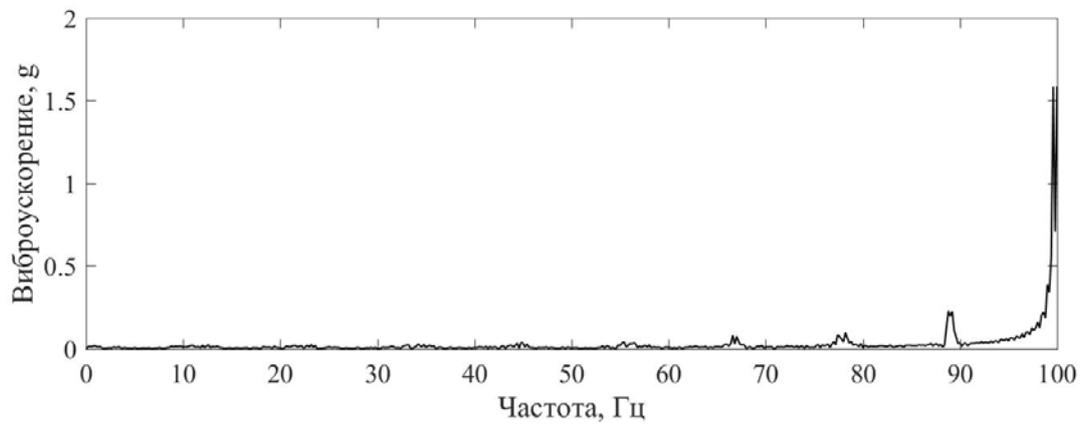
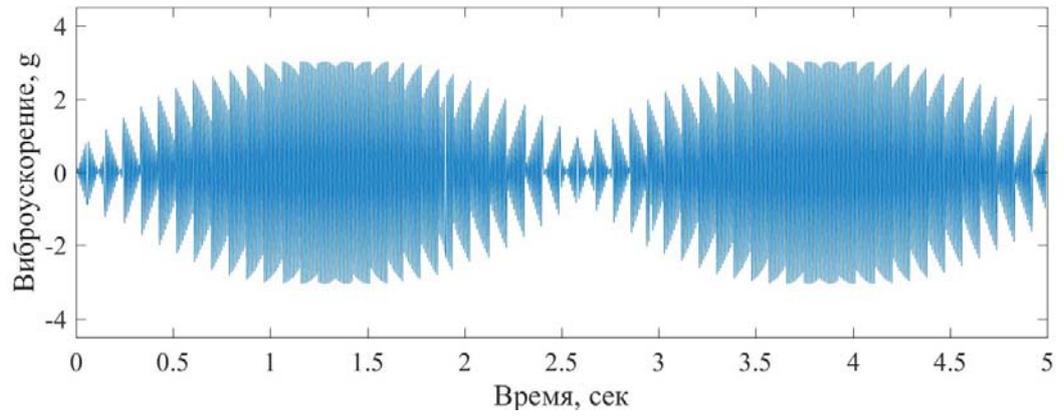
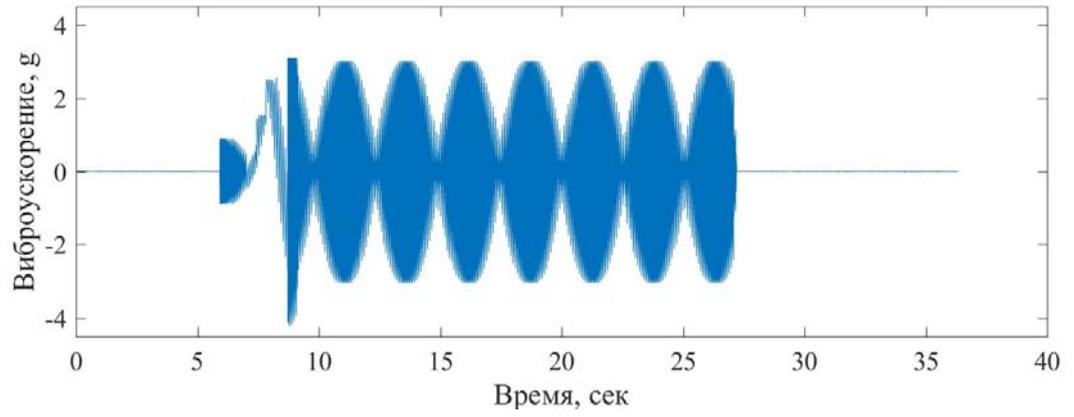




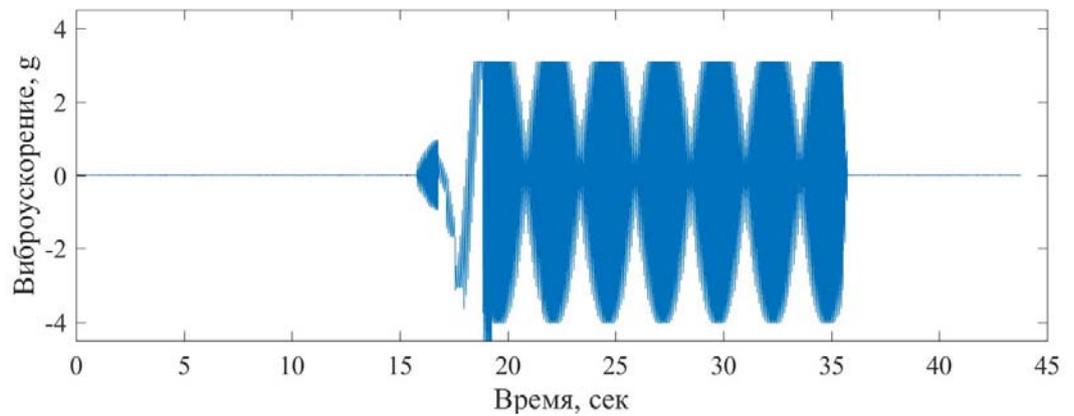
21

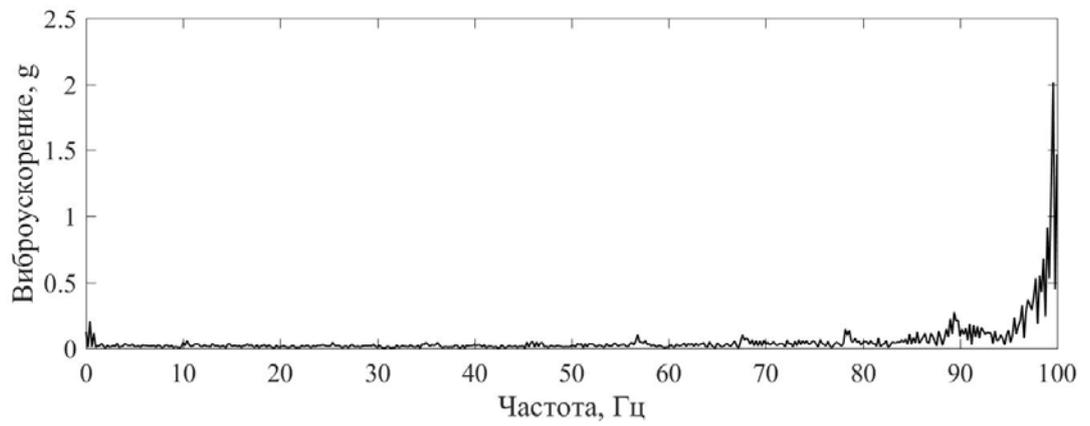
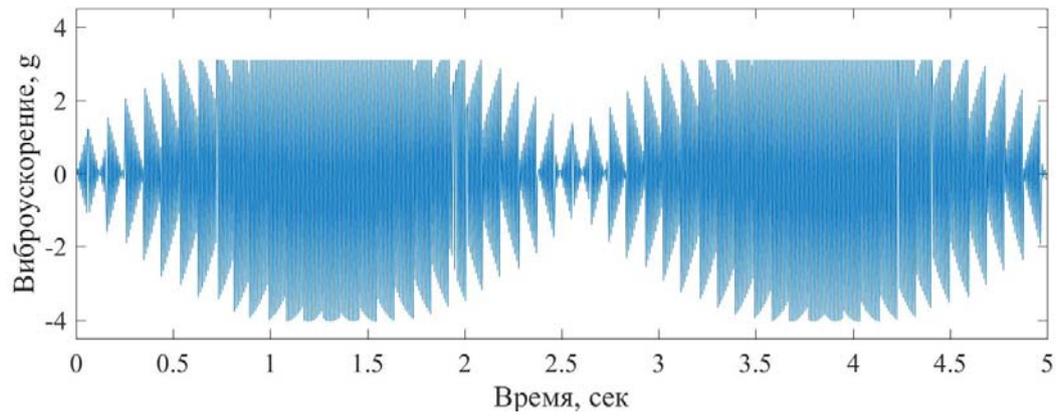


22

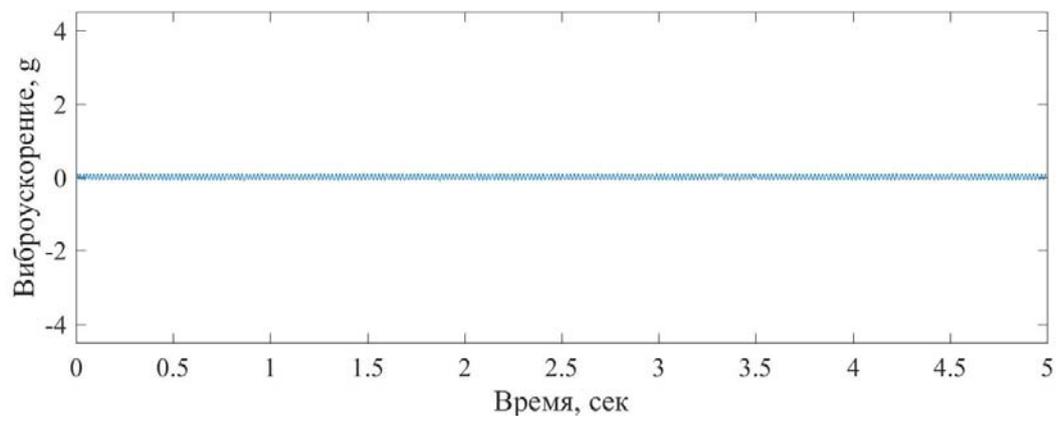
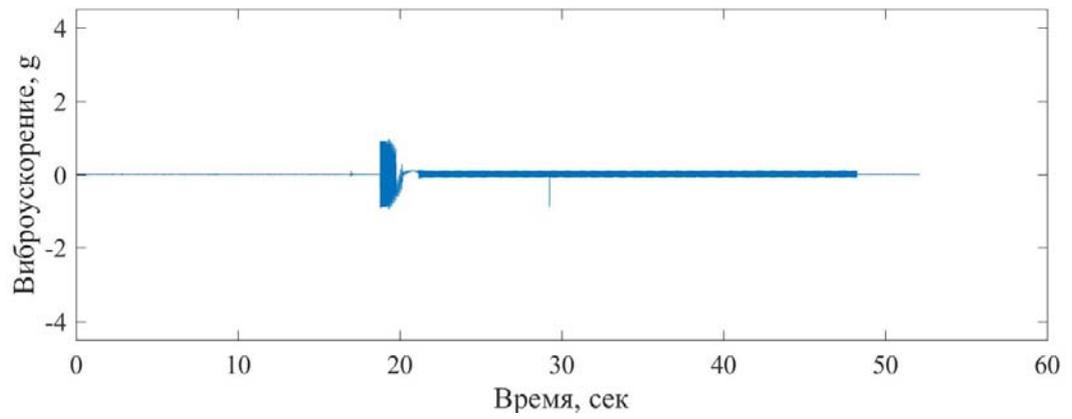


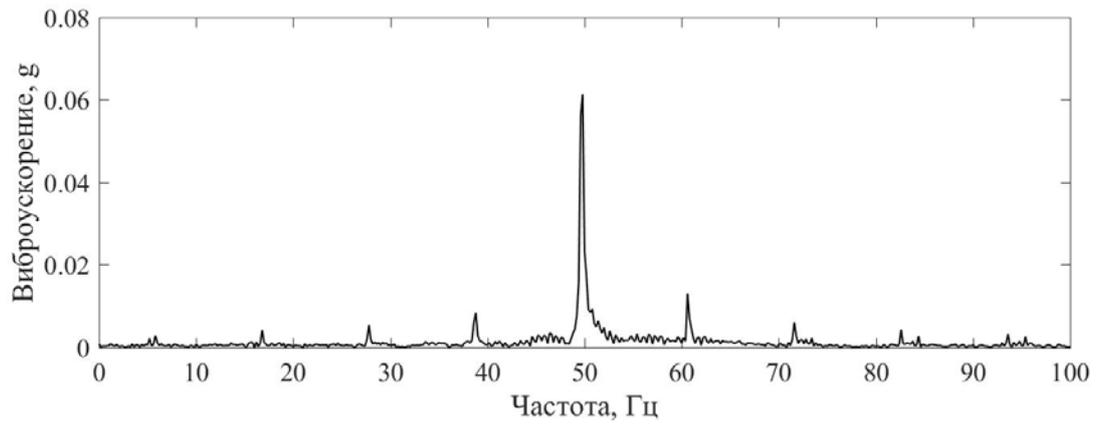
23



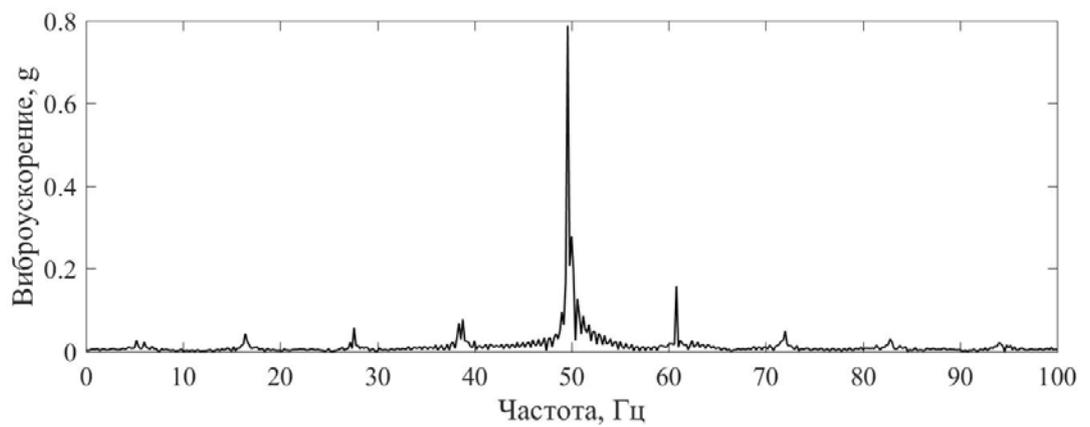
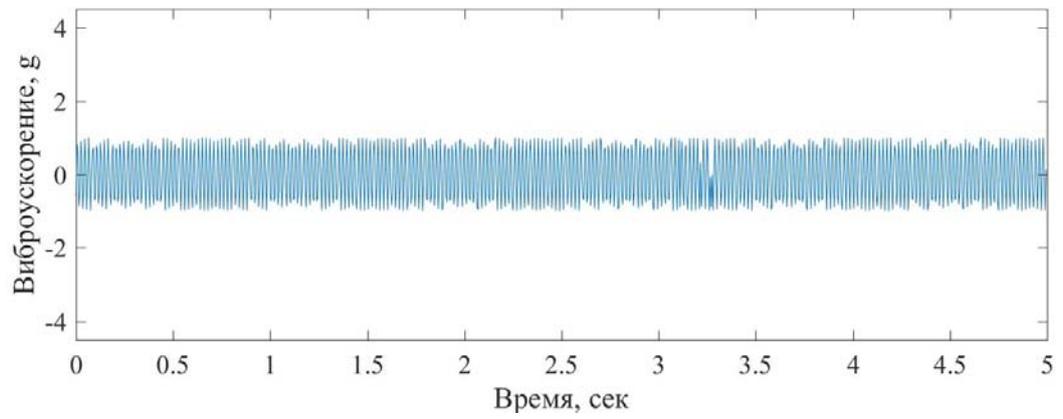
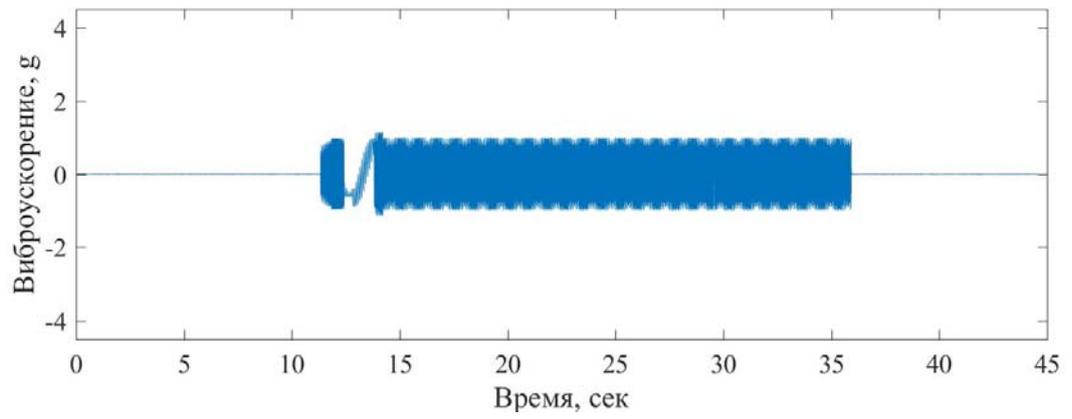


24

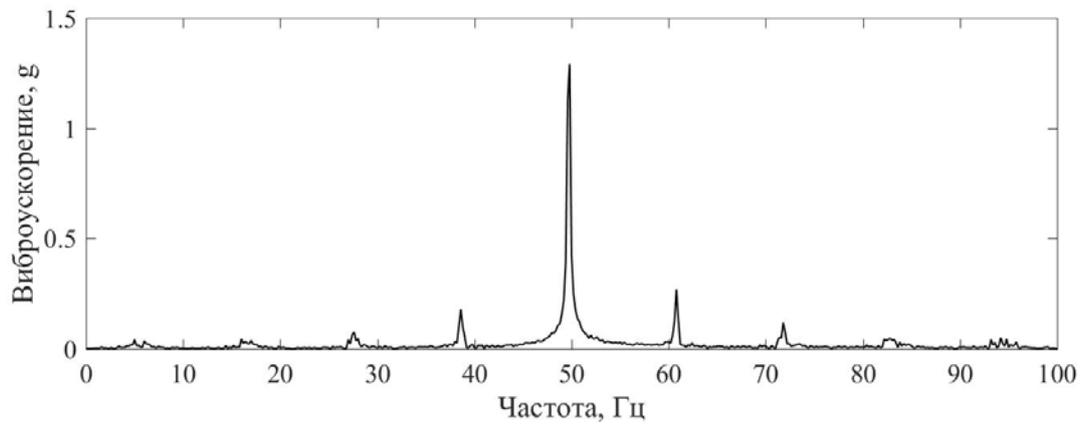
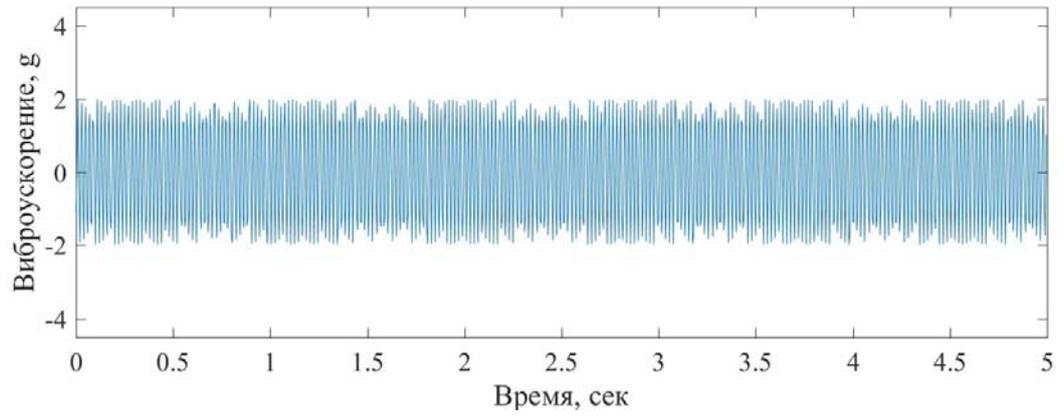
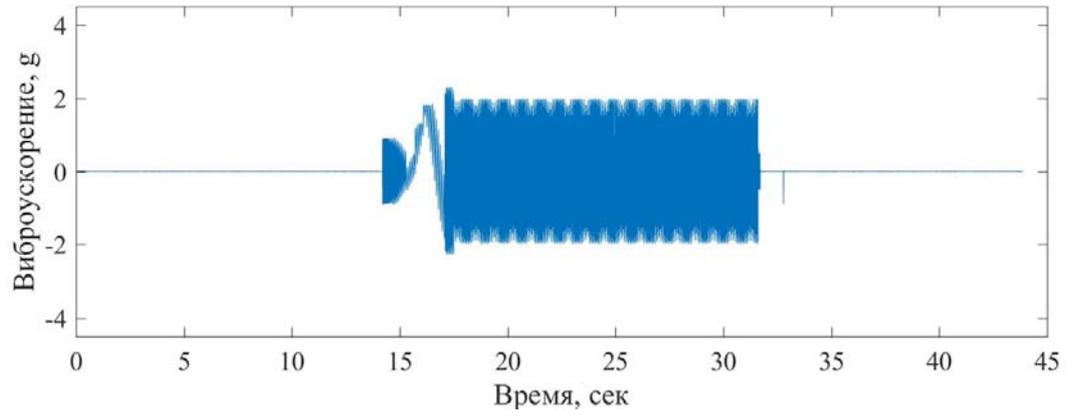




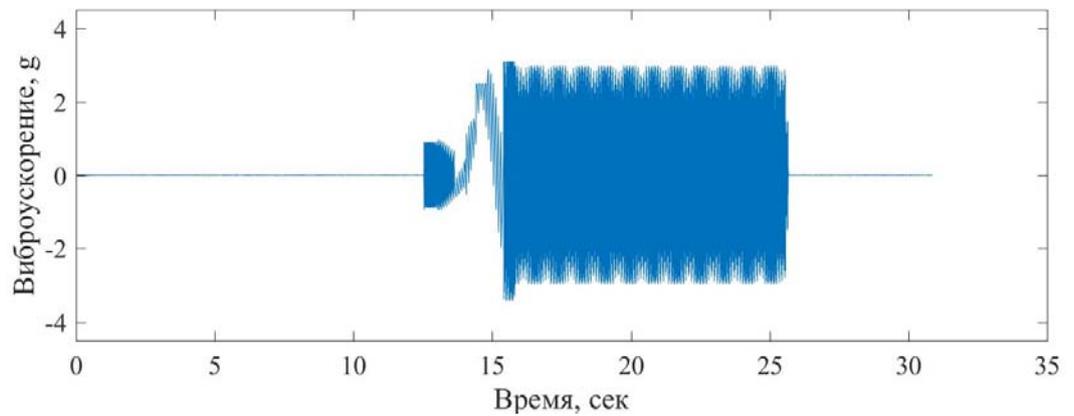
25

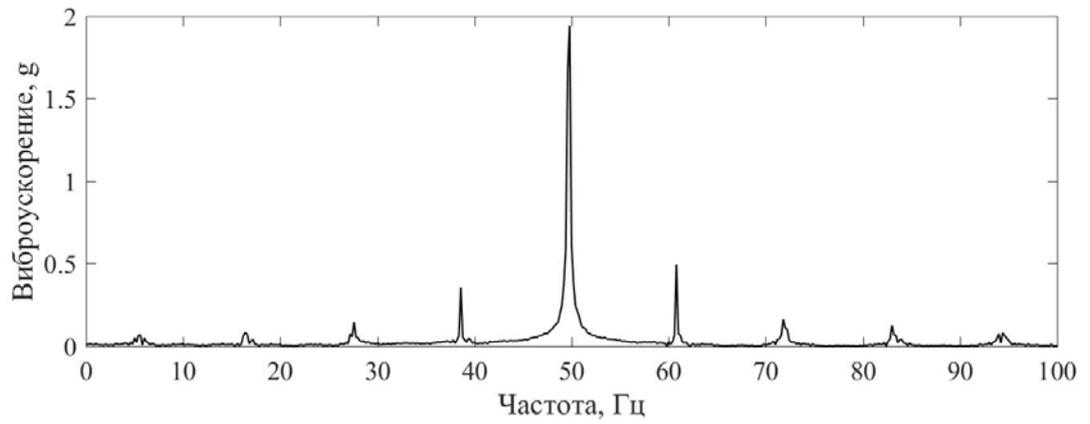
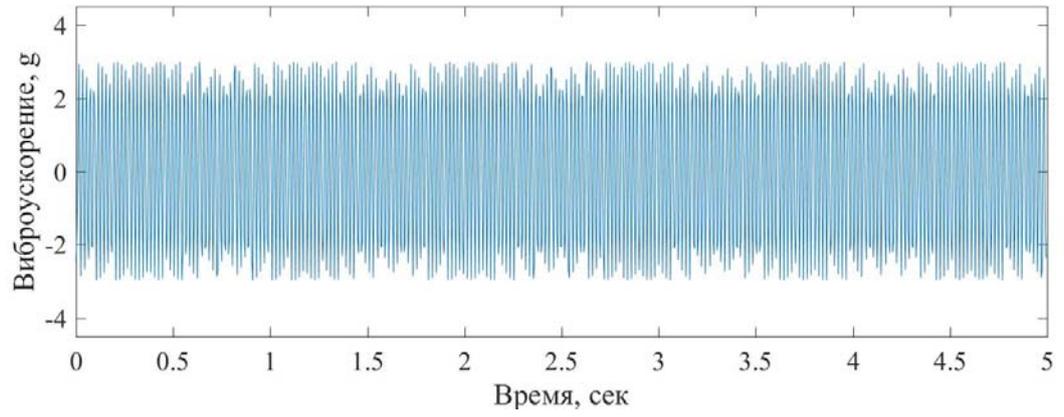


26

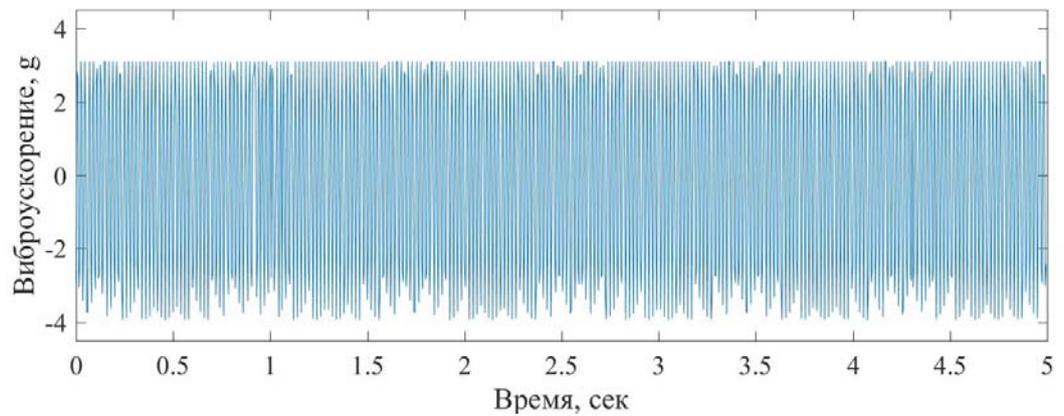
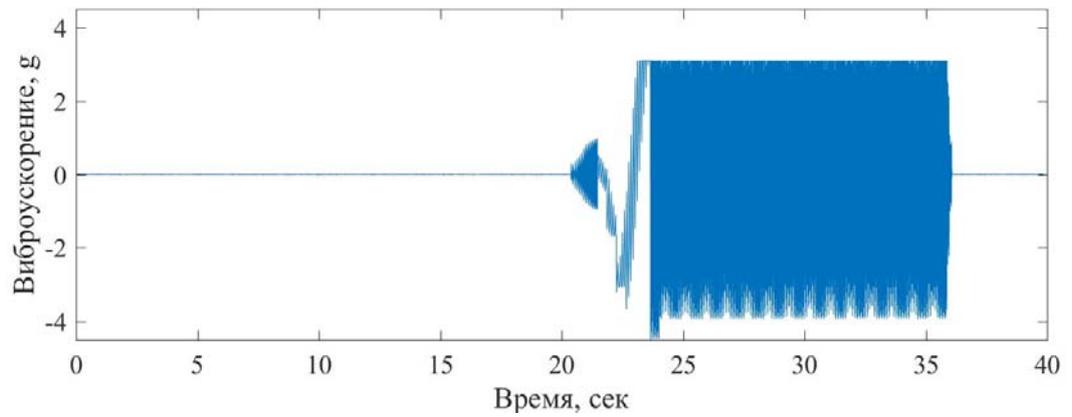


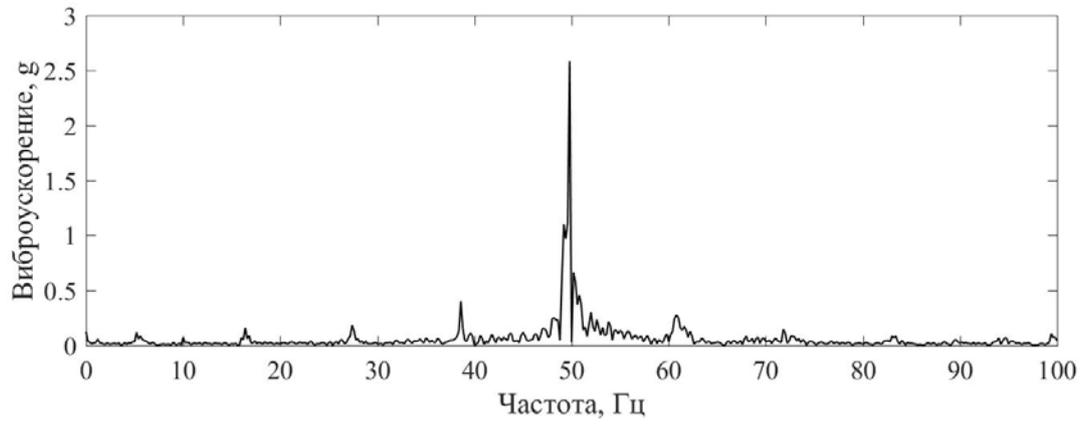
27



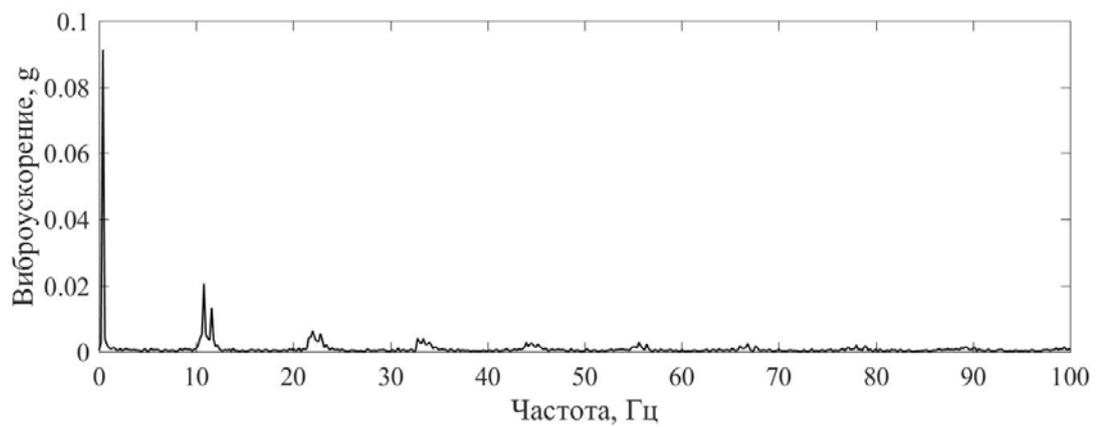
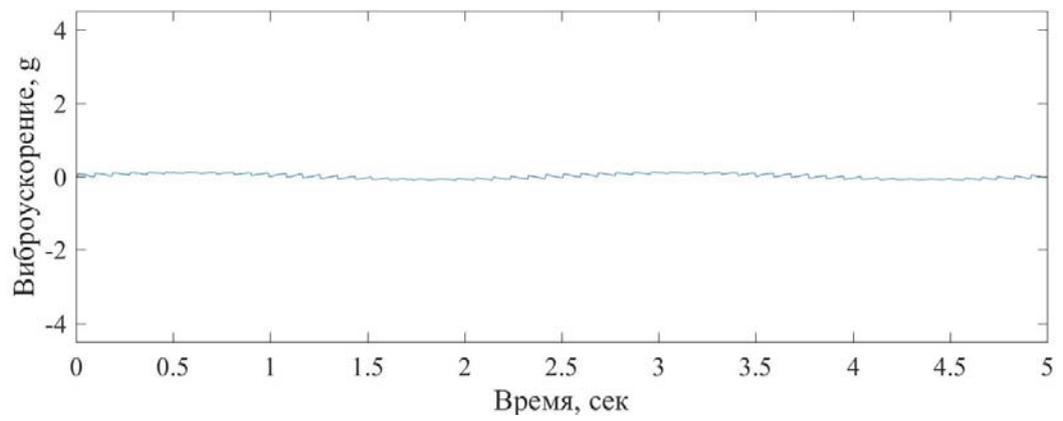
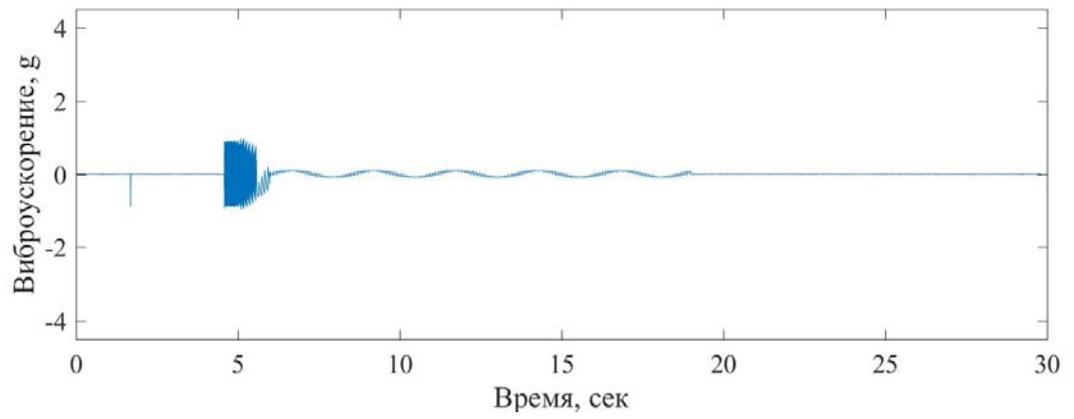


28

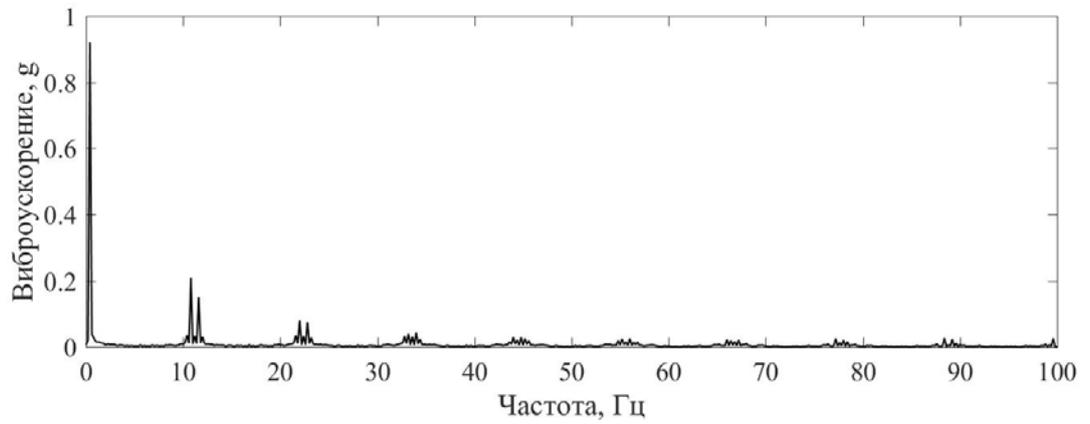
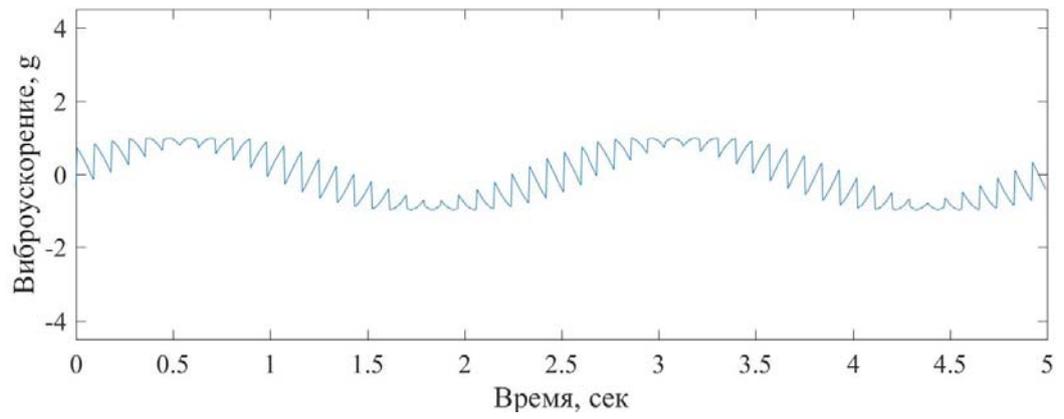
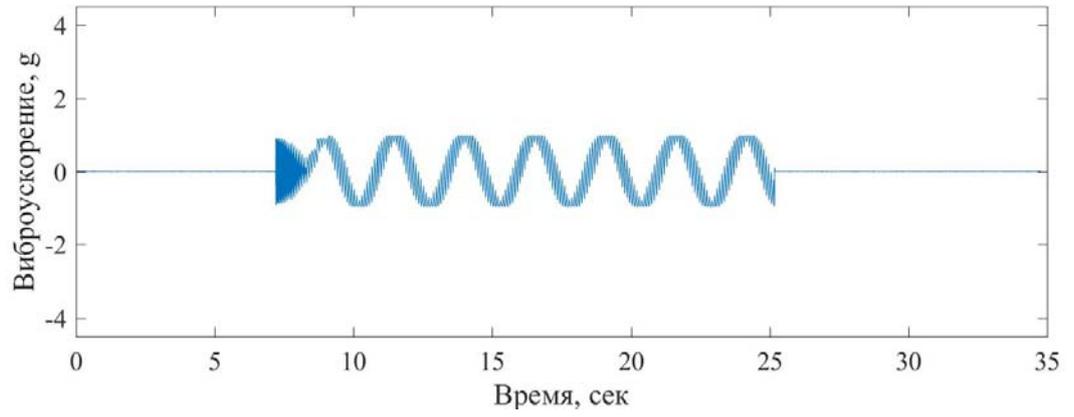




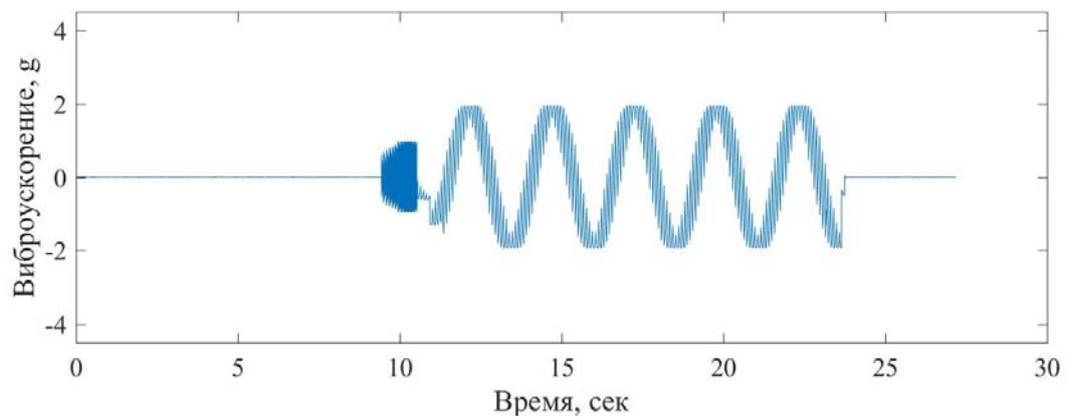
29

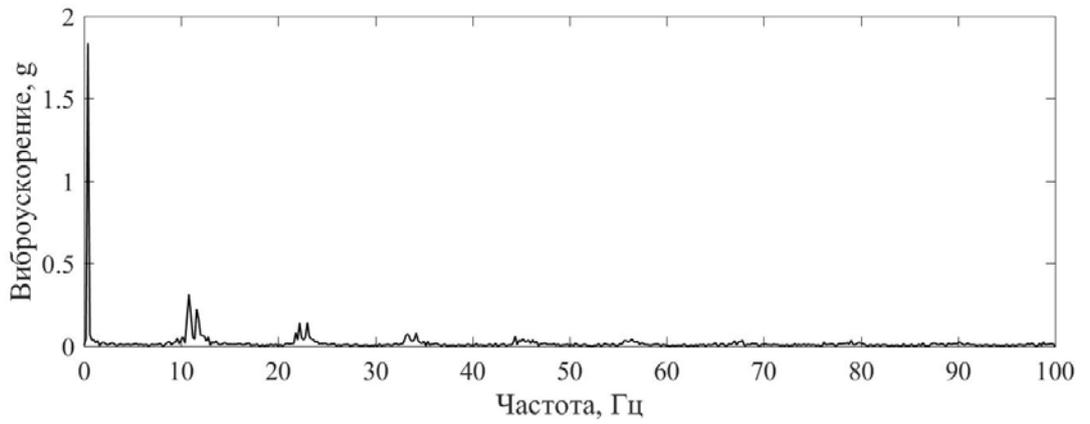
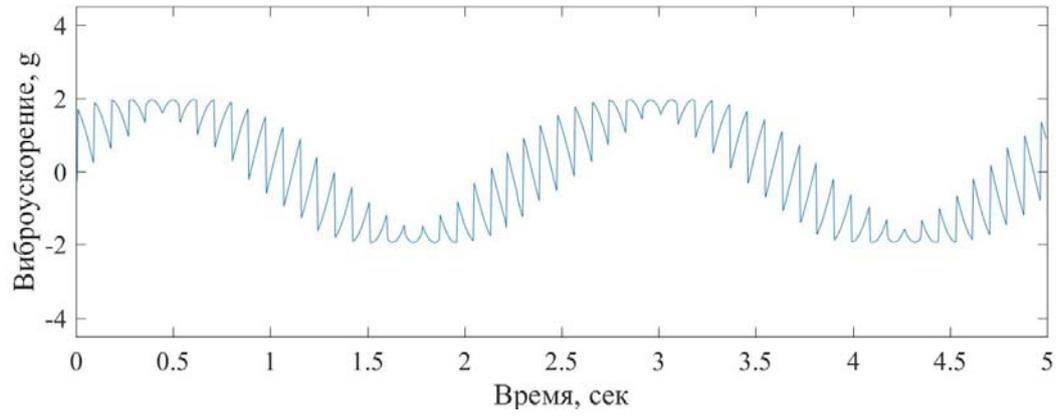


30

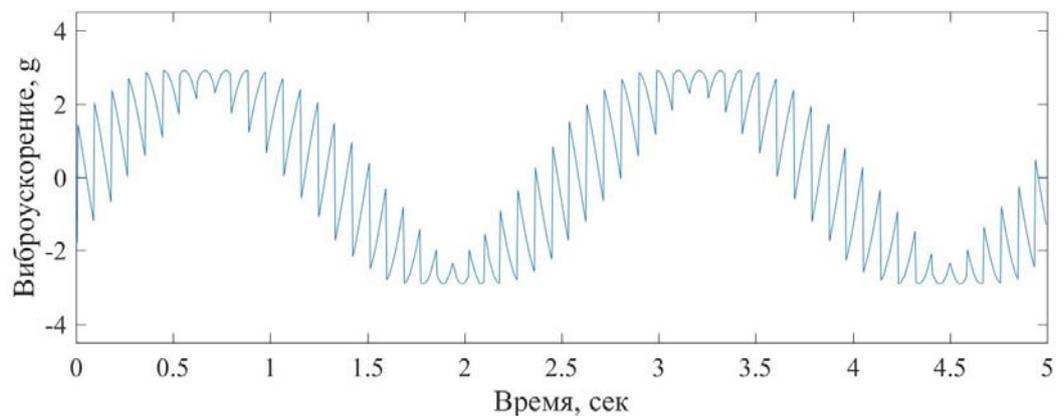
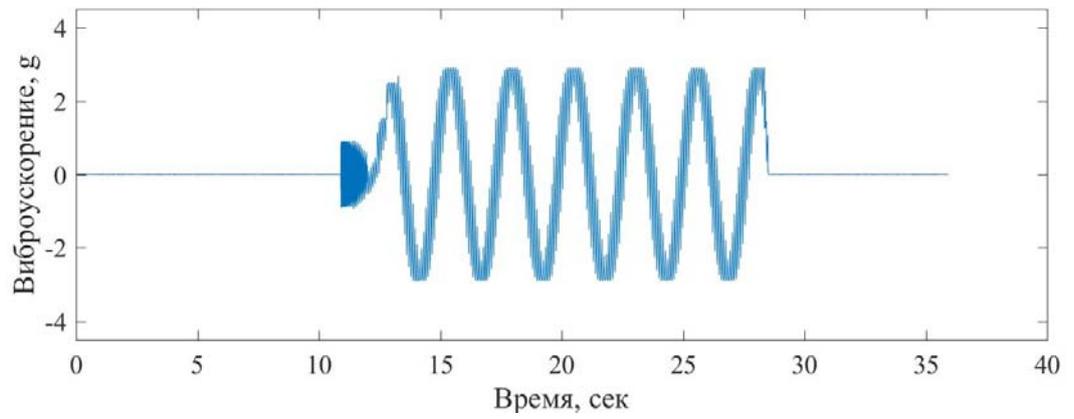


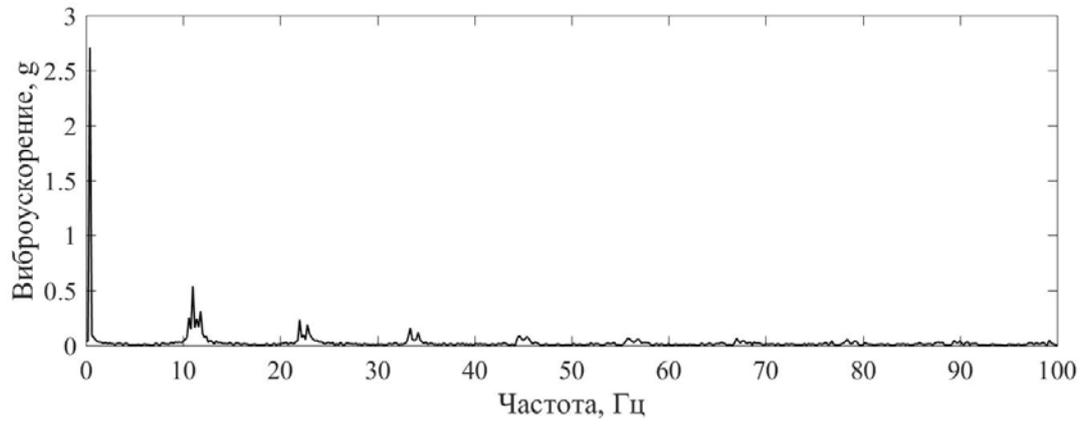
31



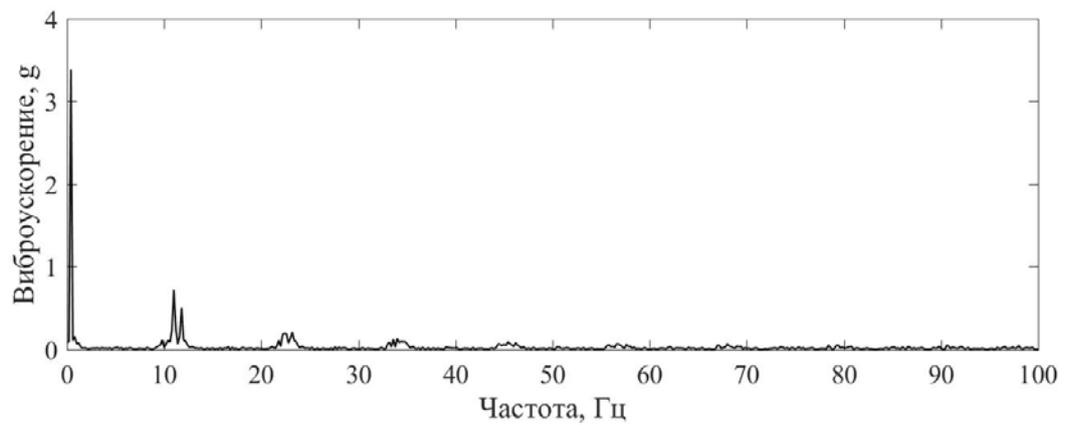
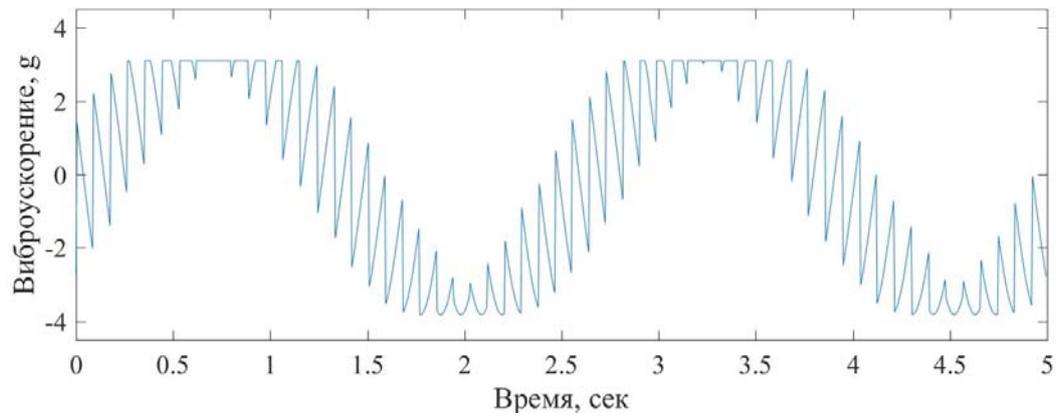
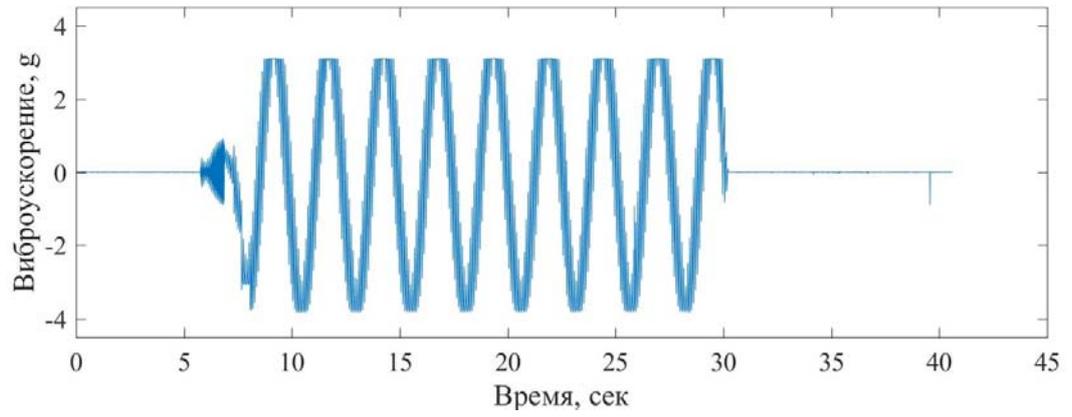


32





33



## Приложение Б

### Пример суточного отчета

**Отчёт 2023-11-01 - СПК5**

**\*наименование оборудования\*, инвентарный номер \*№ \***

Секунд всего	Секунд работы	Процент работы в сутки, %	Процент работы в рабочее время, %	Потреблен- ная мощ- ность, кВт*ч	Деталей	Инстру- ментов	Период форми- рования
86400	56370	65.24	69.59	579.46	41	0	0:00:00 - 23:59:59
3600	2106	58.5	58.5	23.14	3	0	0:00:00 - 1:00:00
3600	2504	69.56	69.56	24.77	1	0	1:00:00 - 2:00:00
3600	1968	54.67	54.67	23.37	2	0	2:00:00 - 3:00:00
3600	2074	57.61	57.61	23.23	1	0	3:00:00 - 4:00:00
3600	2410	66.94	66.94	23.8	2	0	4:00:00 - 5:00:00
3600	1822	50.61	50.61	21.76	2	0	5:00:00 - 6:00:00
3600	2649	73.58	73.58	23.9	1	0	6:00:00 - 7:00:00
3600	2012	55.89	55.89	22.96	2	0	7:00:00 - 8:00:00
3600	2080	57.78	57.78	22.46	1	0	8:00:00 - 9:00:00
3600	1932	53.67	53.67	23.37	2	0	9:00:00 - 10:00:00
3600	2666	74.06	74.06	25.45	1	0	10:00:00 - 11:00:00
3600	2351	65.31	65.31	24.7	2	0	11:00:00 - 12:00:00
3600	2180	60.56	60.56	22.22	2	0	12:00:00 - 13:00:00
3600	2740	76.11	76.11	24.05	1	0	13:00:00 - 14:00:00
3600	2235	62.08	62.08	24.33	2	0	14:00:00 - 15:00:00
3600	2431	67.53	67.53	23.67	1	0	15:00:00 - 16:00:00
3600	2656	73.78	73.78	24.42	2	0	16:00:00 - 17:00:00
3600	2265	62.92	62.92	25.31	2	0	17:00:00 - 18:00:00
3600	2507	69.64	69.64	25.03	1	0	18:00:00 - 19:00:00
3600	2633	73.14	73.14	24.03	2	0	19:00:00 -

							20:00:00
3600	2359	65.53	65.53	25.73	2	0	20:00:00 - 21:00:00
3600	2636	73.22	73.22	26.67	2	0	21:00:00 - 22:00:00
3600	2573	71.47	71.47	25.79	2	0	22:00:00 - 23:00:00
3600	2581	71.69	71.69	25.3	2	0	23:00:00 - 23:59:59

**Обработанные детали**

00:03:51 - 00:13:41 Деталь 3  
00:16:40 - 00:51:40 Деталь 4  
00:54:10 - 01:28:20 Деталь 4  
01:32:00 - 02:06:20 Деталь 4  
02:09:15 - 02:43:25 Деталь 4  
02:48:00 - 03:22:30 Деталь 4  
03:24:57 - 03:59:17 Деталь 4  
04:02:15 - 04:37:15 Деталь 4  
04:39:30 - 05:13:40 Деталь 4  
05:18:06 - 05:52:16 Деталь 4  
05:57:38 - 06:32:38 Деталь 4  
06:35:02 - 07:10:02 Деталь 4  
07:12:15 - 07:46:35 Деталь 4  
07:50:00 - 08:24:10 Деталь 4  
08:36:16 - 09:10:36 Деталь 4  
09:18:03 - 09:52:13 Деталь 4  
09:54:58 - 10:29:28 Деталь 4  
10:31:26 - 11:05:36 Деталь 4  
11:08:13 - 11:43:13 Деталь 4  
11:44:45 - 12:19:45 Деталь 4  
12:23:01 - 12:57:11 Деталь 4  
12:59:44 - 13:34:04 Деталь 4  
13:36:08 - 14:10:18 Деталь 4  
14:12:17 - 14:47:17 Деталь 4  
14:49:00 - 15:23:10 Деталь 4  
15:26:35 - 16:00:45 Деталь 4  
16:02:45 - 16:37:05 Деталь 4  
16:39:15 - 17:13:45 Деталь 4  
17:15:35 - 17:49:45 Деталь 4  
17:52:50 - 18:27:00 Деталь 4  
18:27:39 - 19:01:49 Деталь 4  
19:01:50 - 19:36:00 Деталь 4  
19:39:20 - 20:04:20 Деталь 5  
20:09:30 - 20:34:30 Деталь 5  
20:40:58 - 21:05:58 Деталь 5  
21:08:58 - 21:33:58 Деталь 5  
21:37:49 - 22:02:49 Деталь 5  
22:06:01 - 22:31:01 Деталь 5  
22:34:03 - 22:59:03 Деталь 5  
23:02:34 - 23:27:34 Деталь 5  
23:30:53 - 23:55:53 Деталь 5

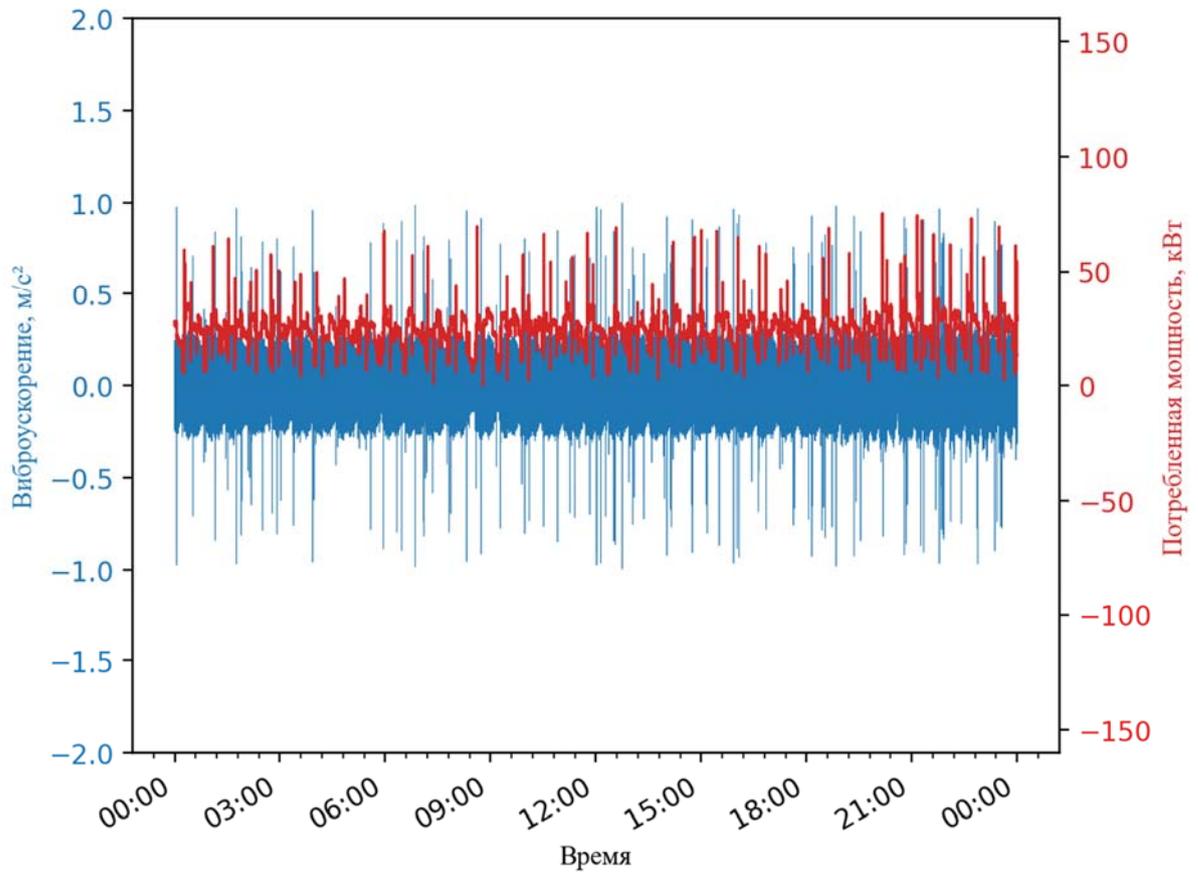


Рисунок 1 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности за 2023-11-01

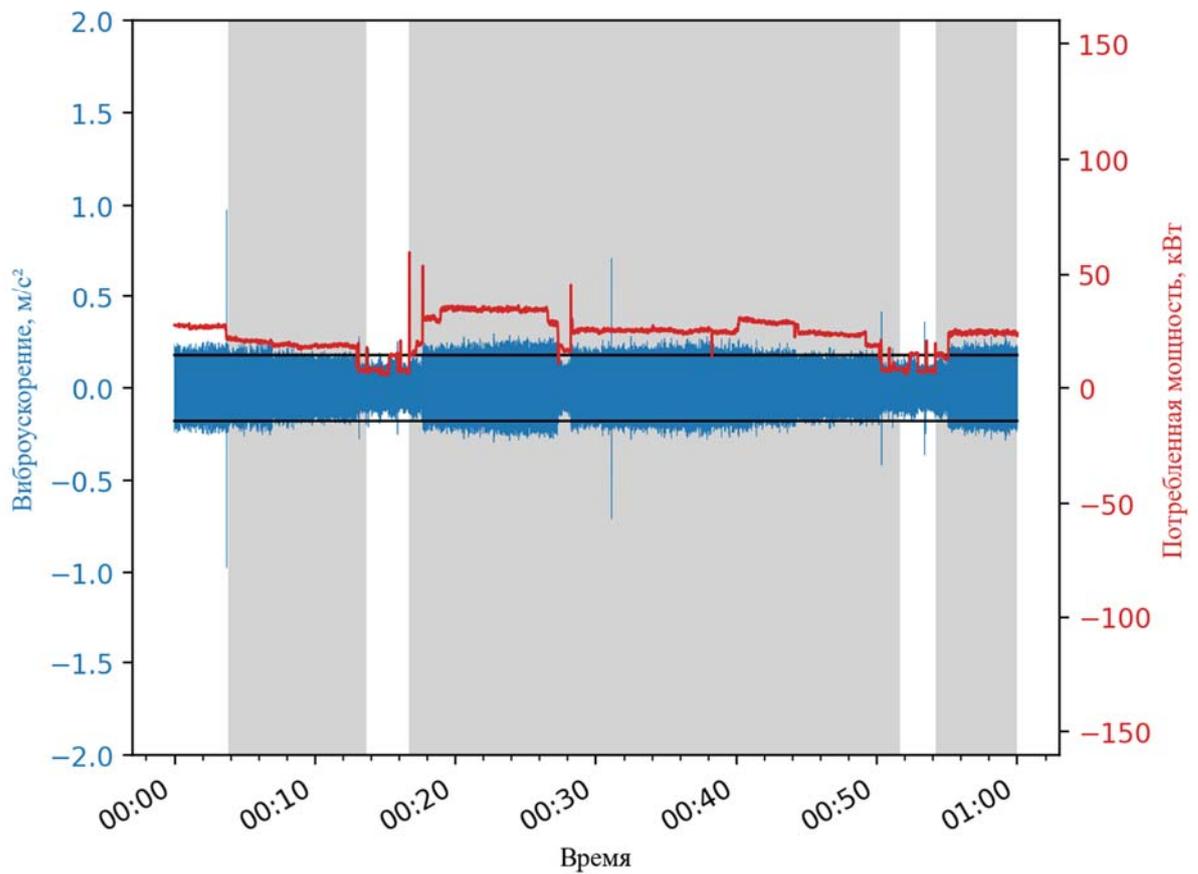


Рисунок 2 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 00:00 до 01:00

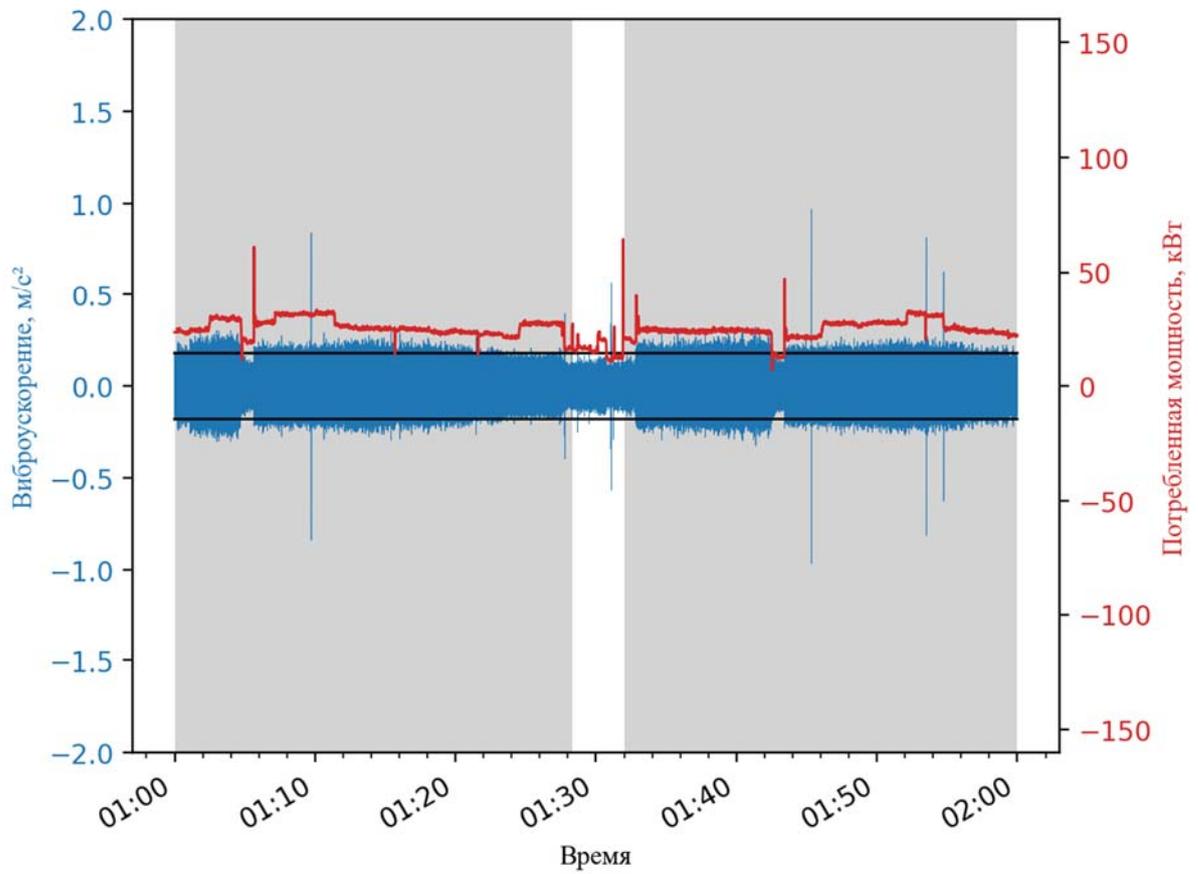


Рисунок 3 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 01:00 до 02:00

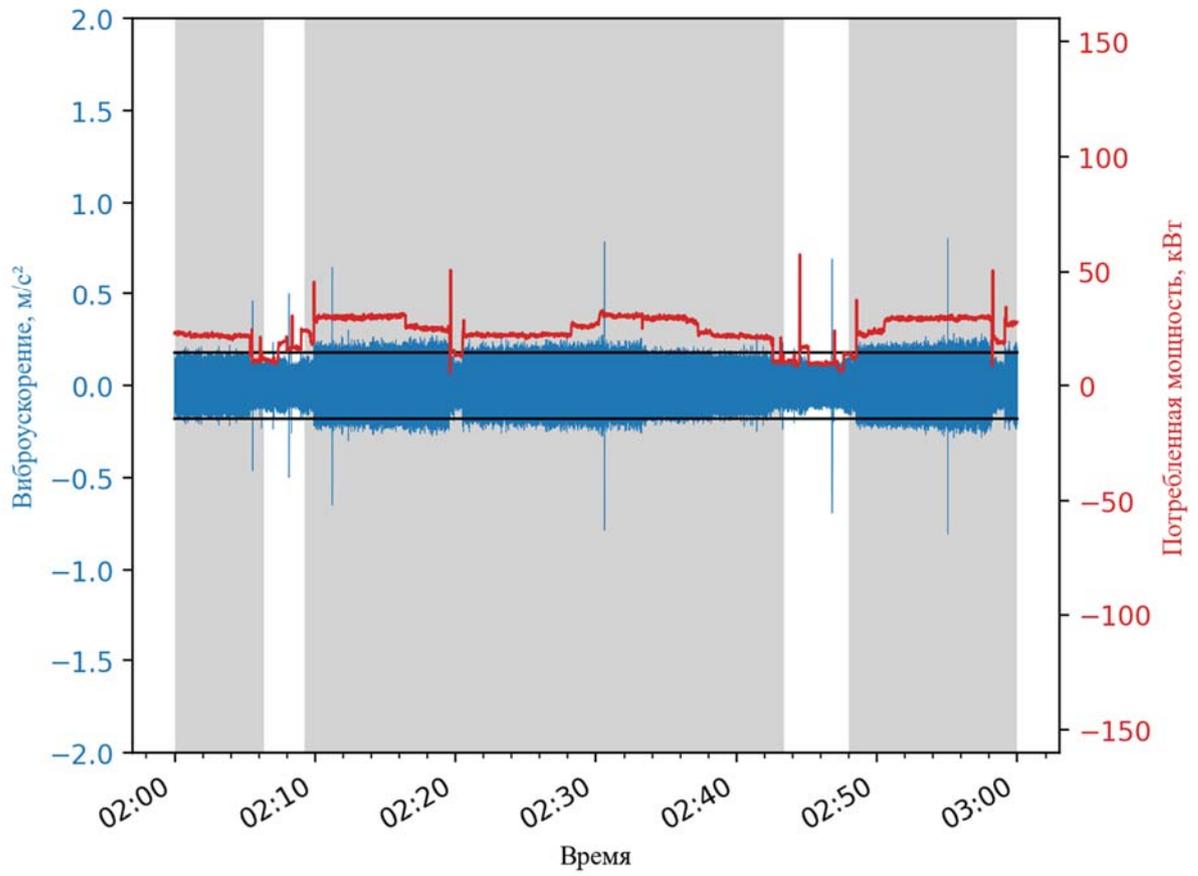


Рисунок 4 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 02:00 до 03:00

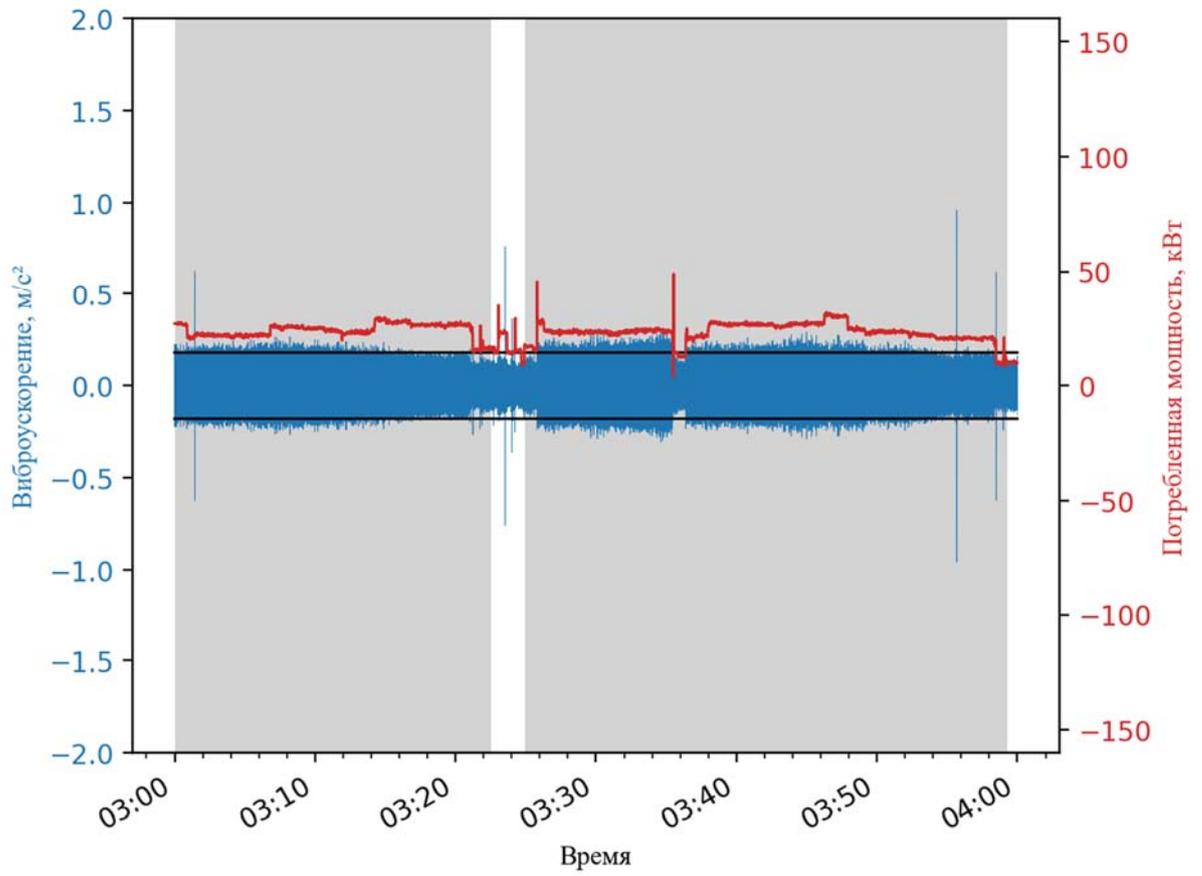


Рисунок 5 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 03:00 до 04:00

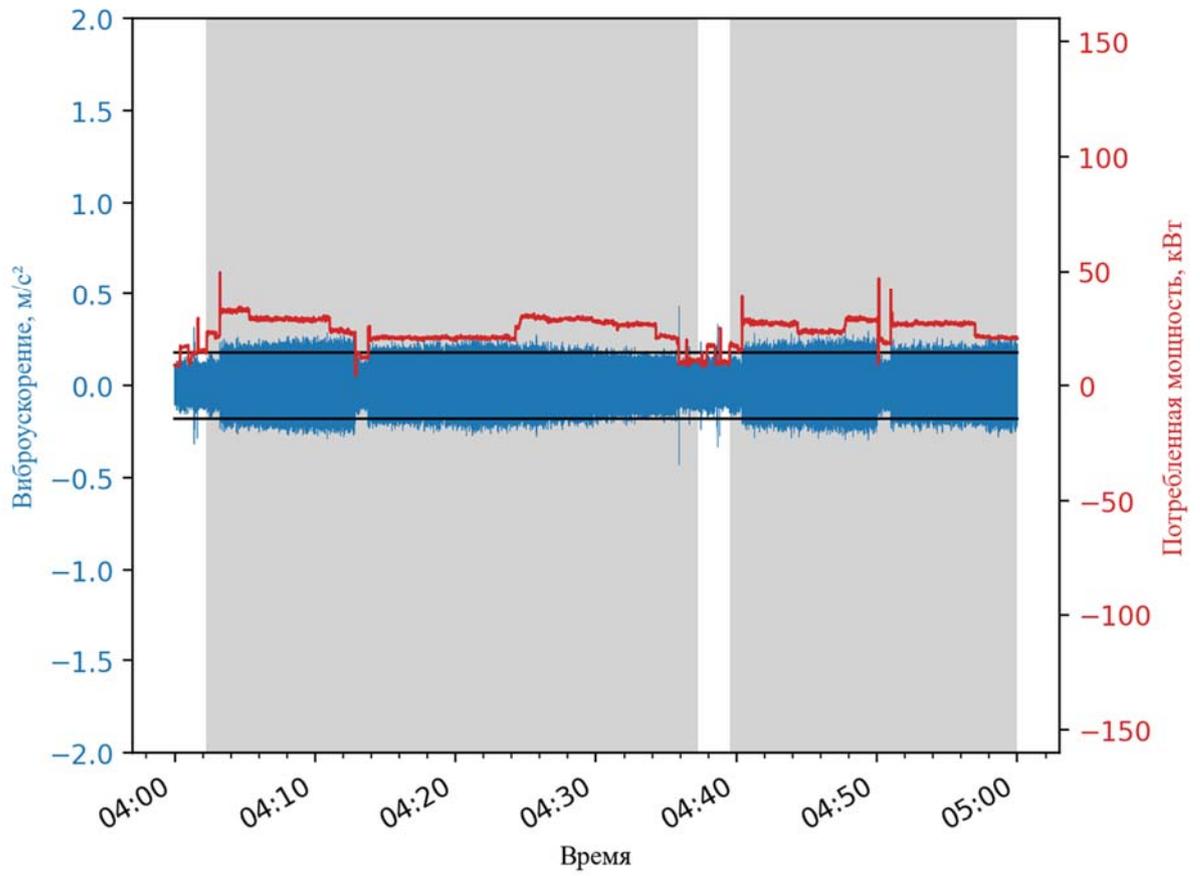


Рисунок 6 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 04:00 до 05:00

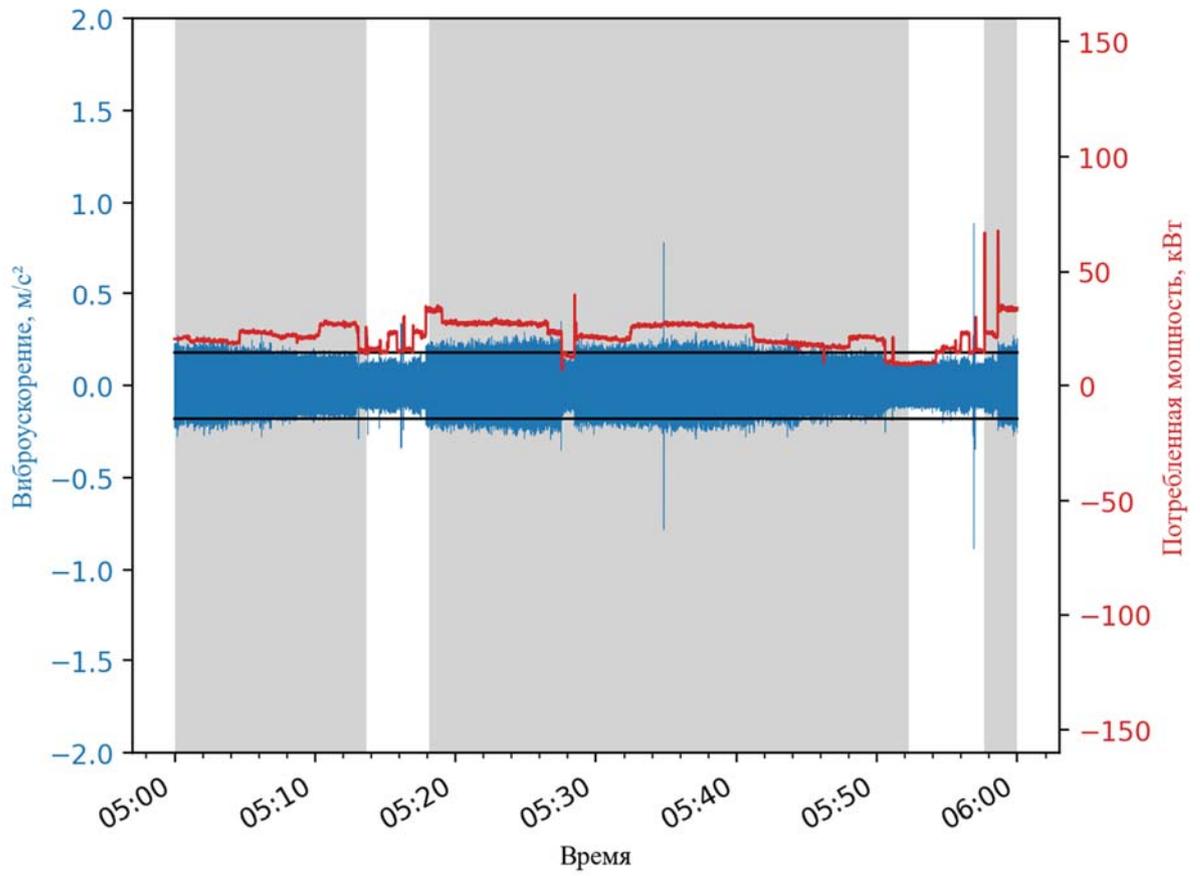


Рисунок 7 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 05:00 до 06:00

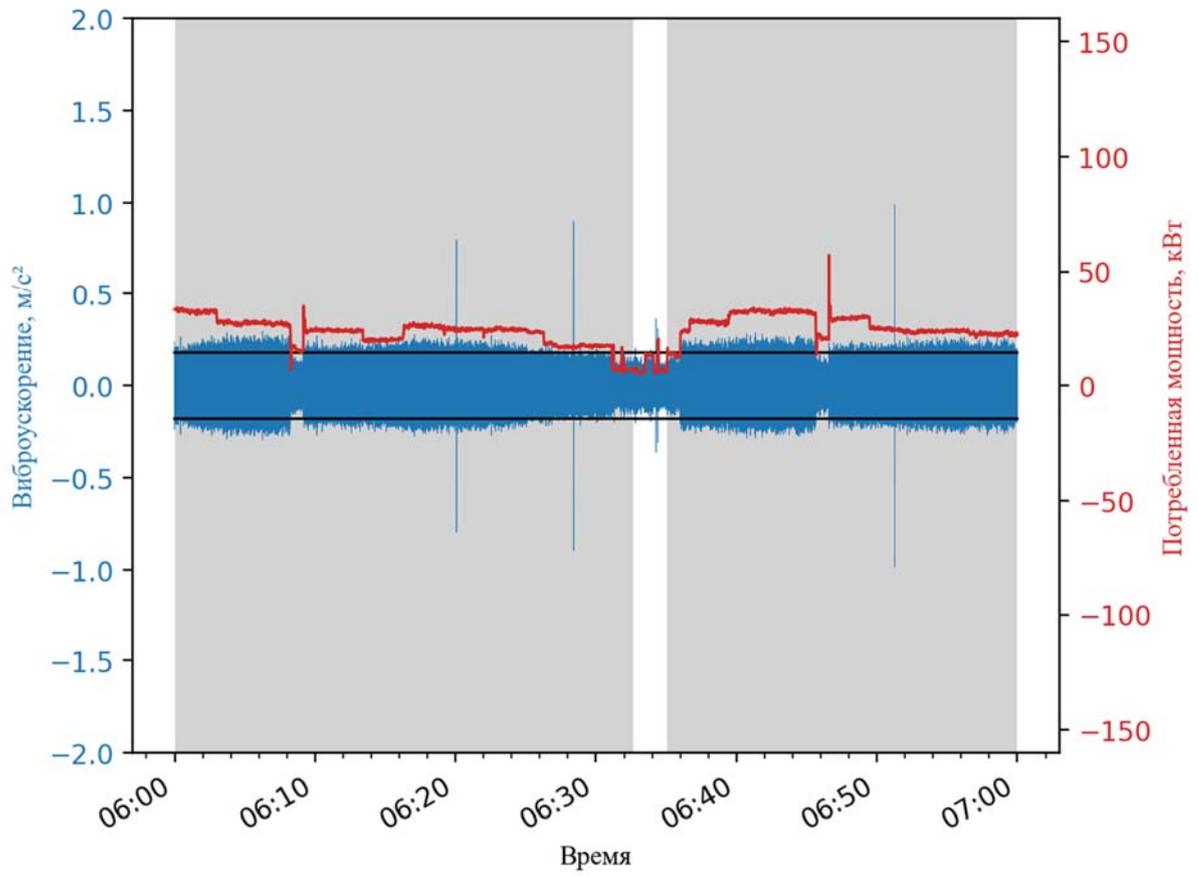


Рисунок 8 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 06:00 до 07:00

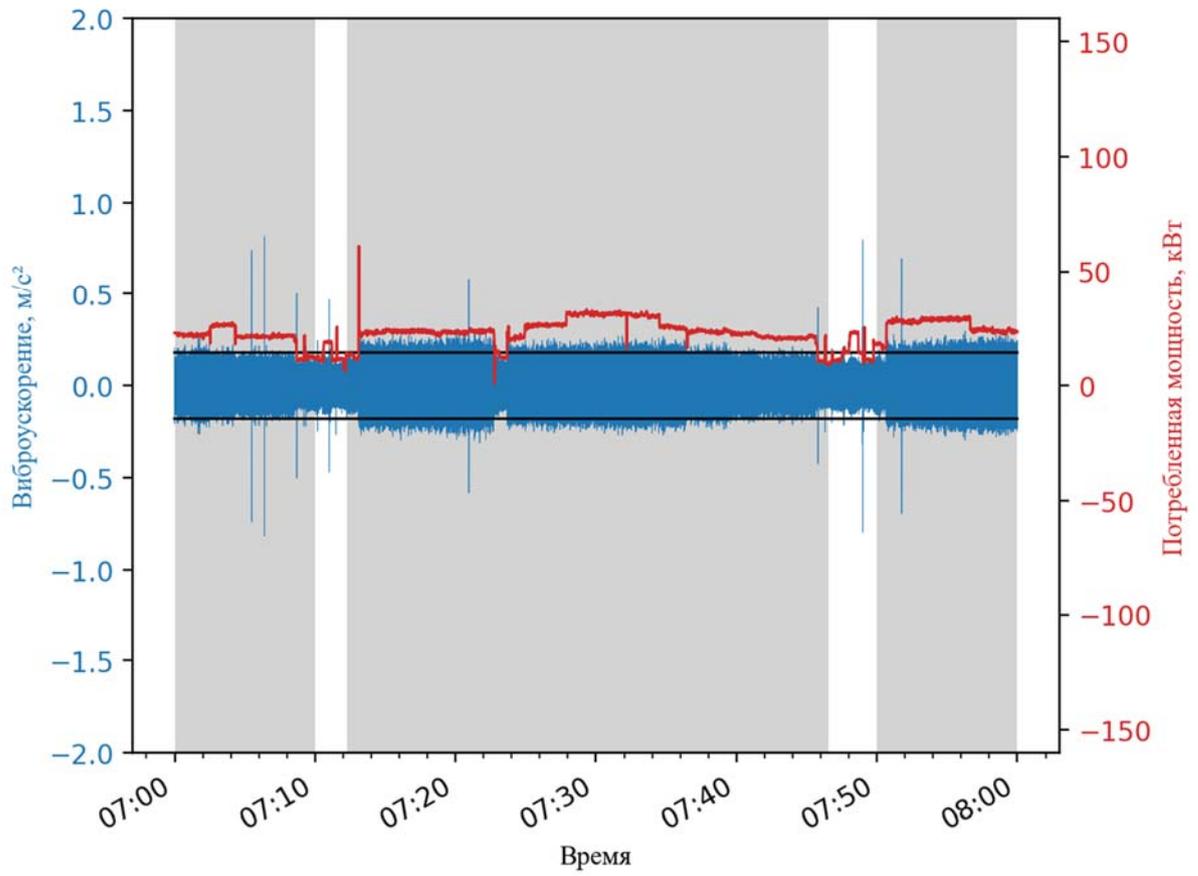


Рисунок 9 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 07:00 до 08:00

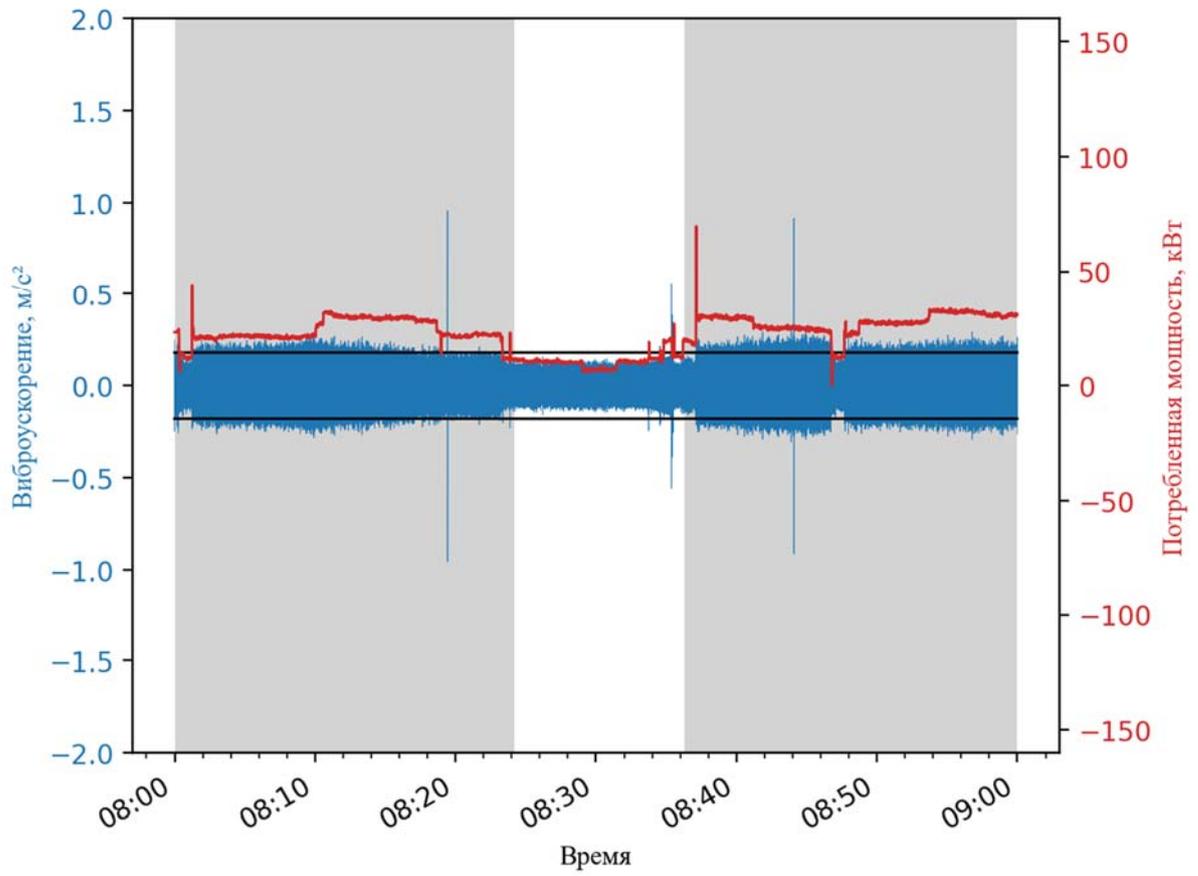


Рисунок 10 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 08:00 до 09:00

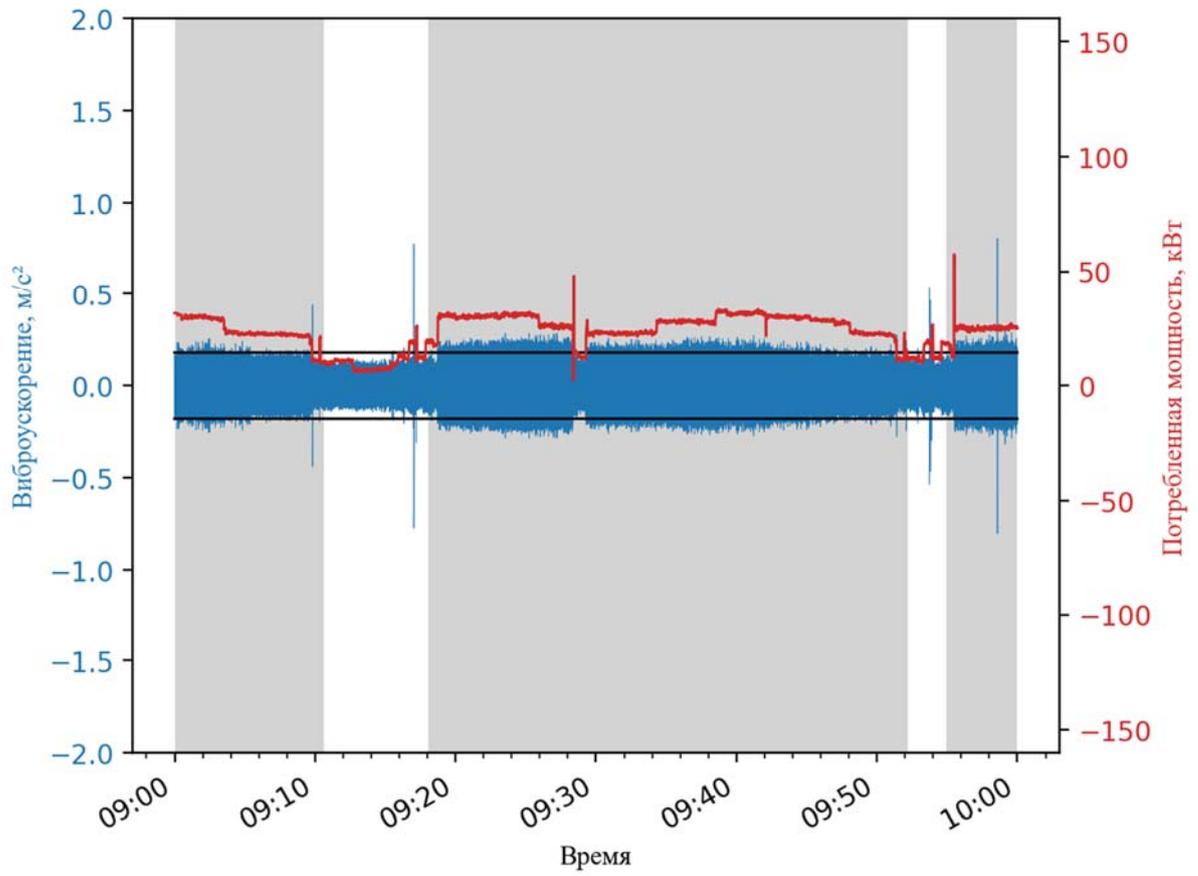


Рисунок 11 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 09:00 до 10:00

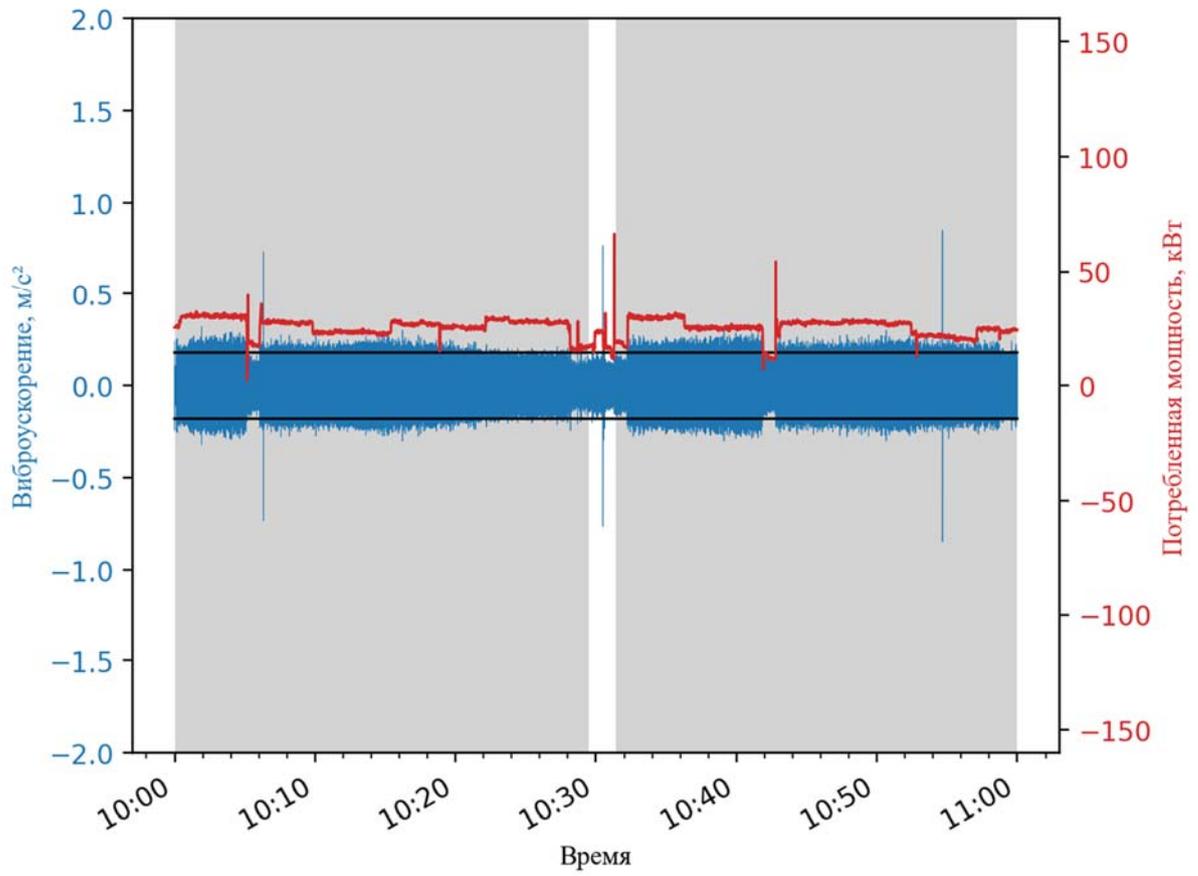


Рисунок 12 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 10:00 до 11:00

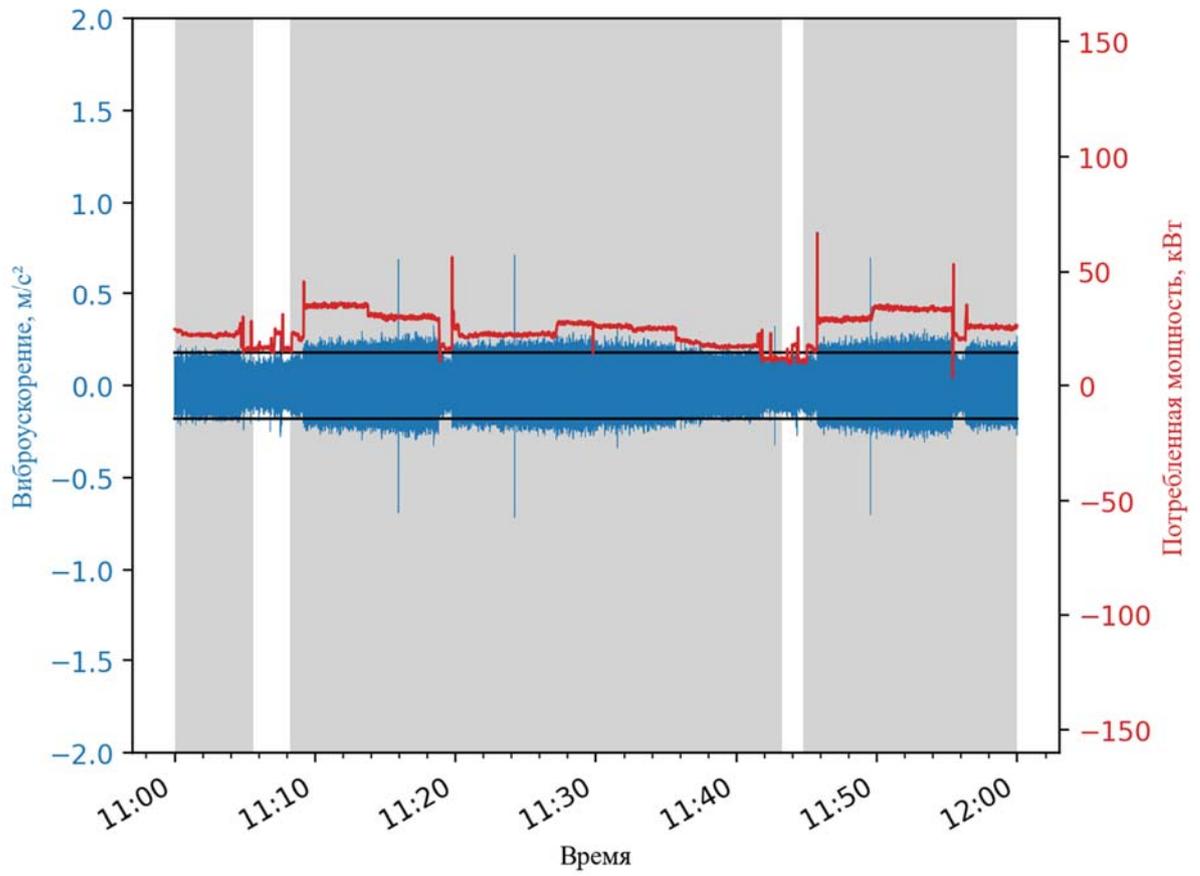


Рисунок 13 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 11:00 до 12:00

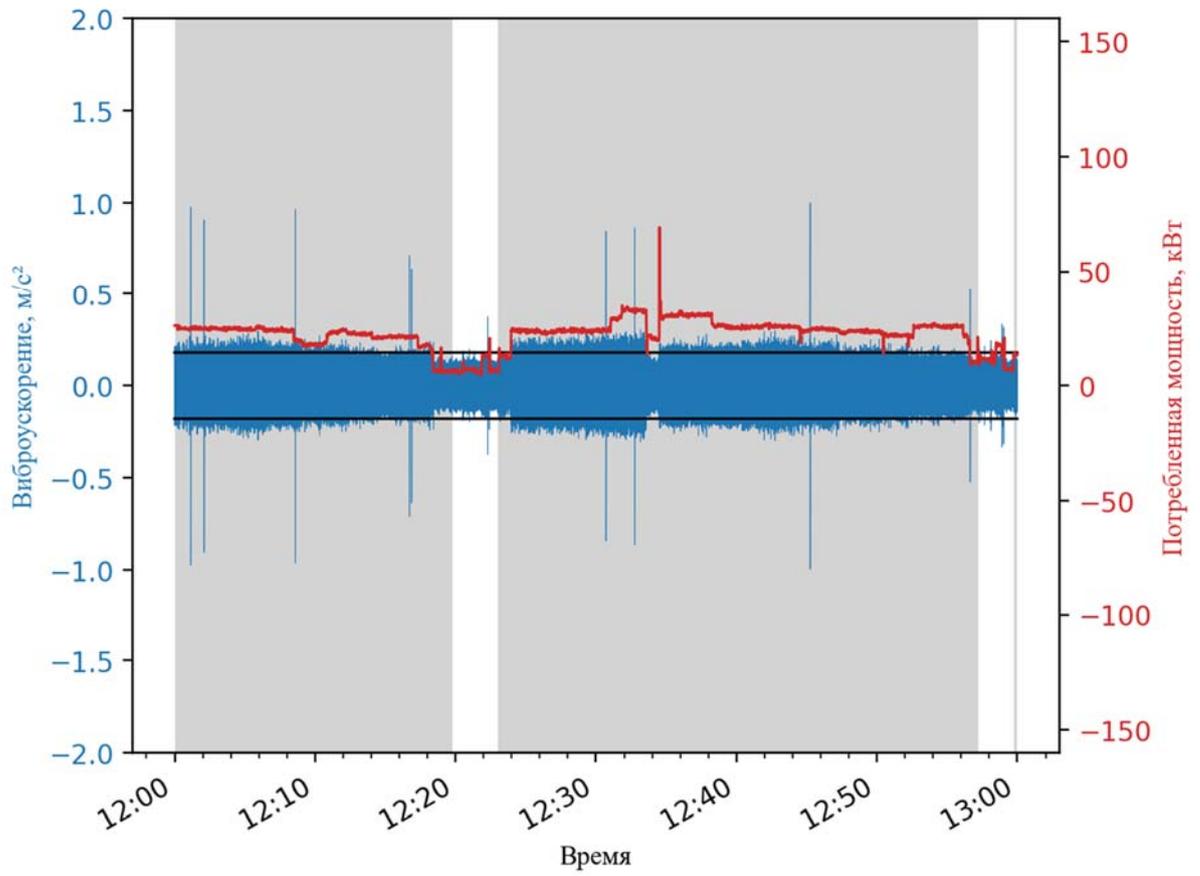


Рисунок 14 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 12:00 до 13:00

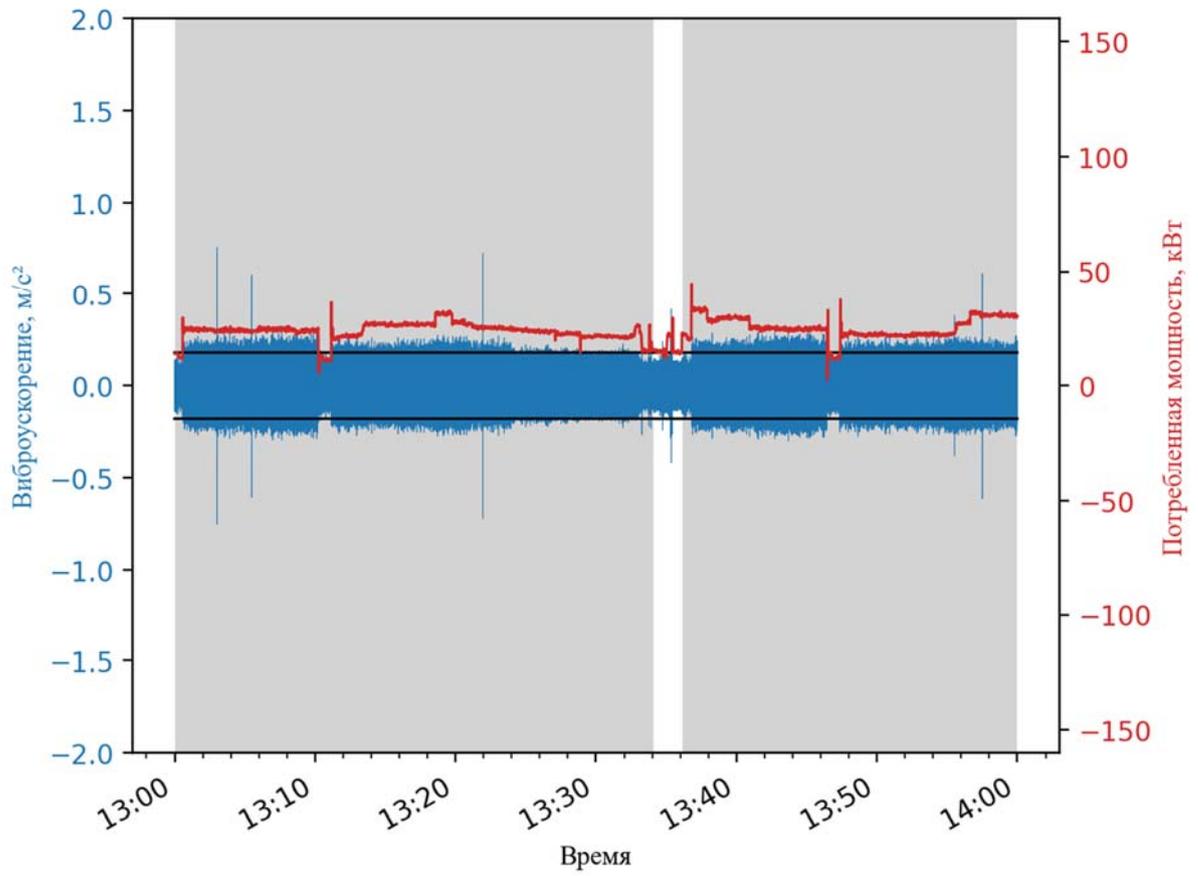


Рисунок 15 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 13:00 до 14:00

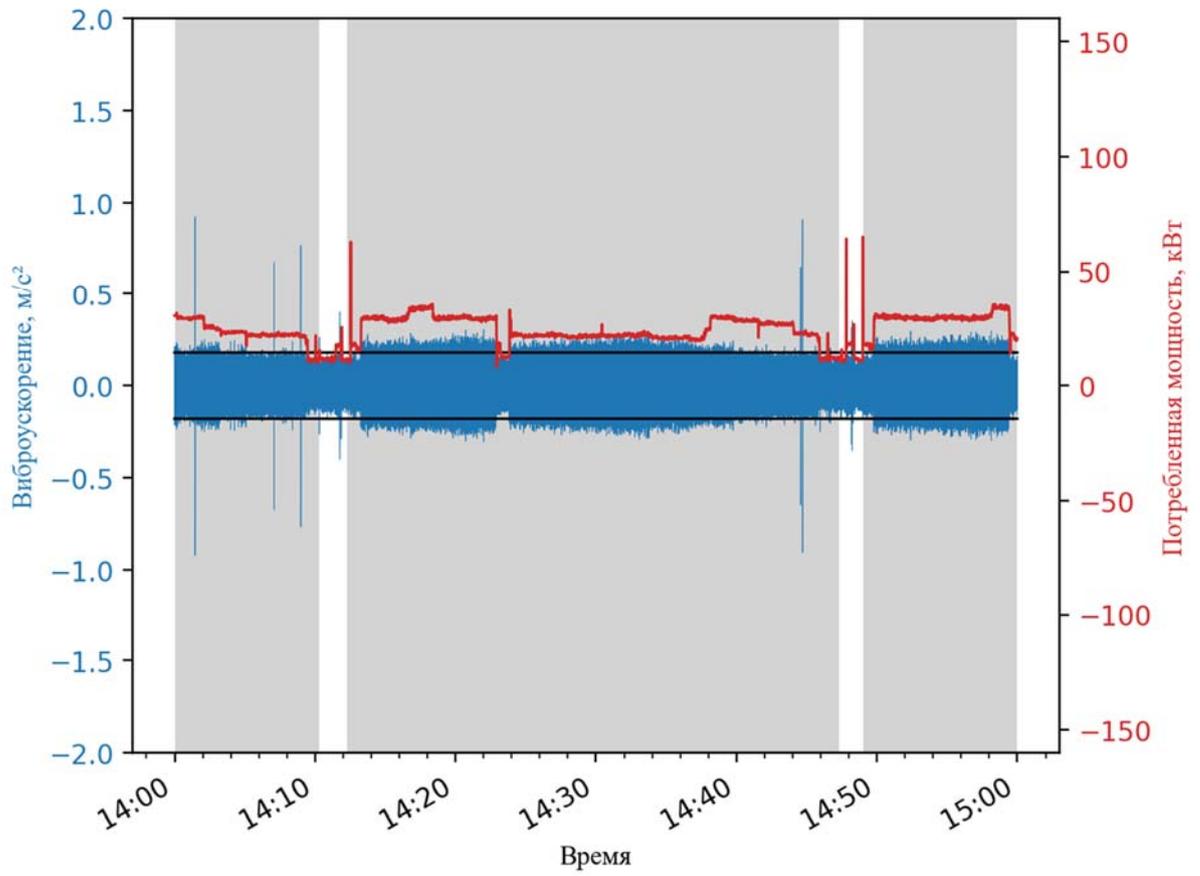


Рисунок 16 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 14:00 до 15:00

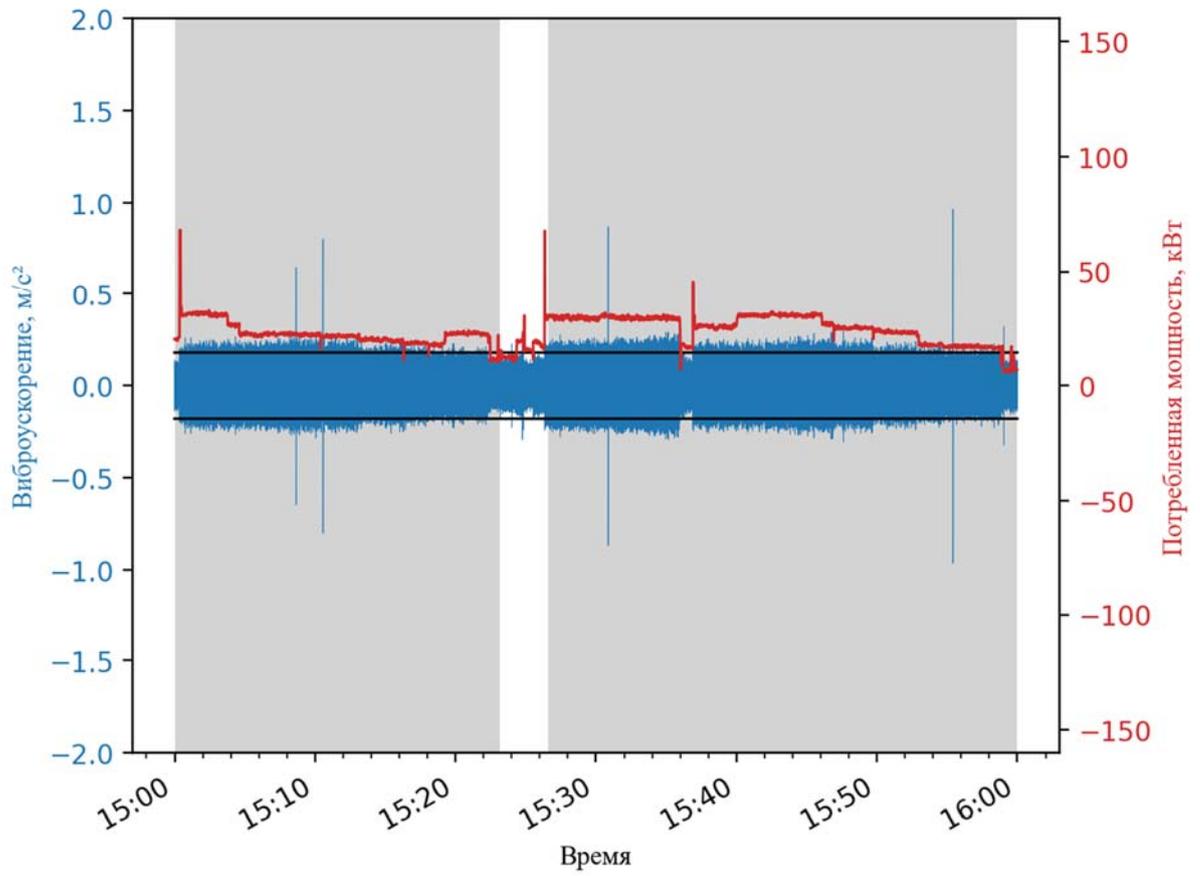


Рисунок 17 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 15:00 до 16:00

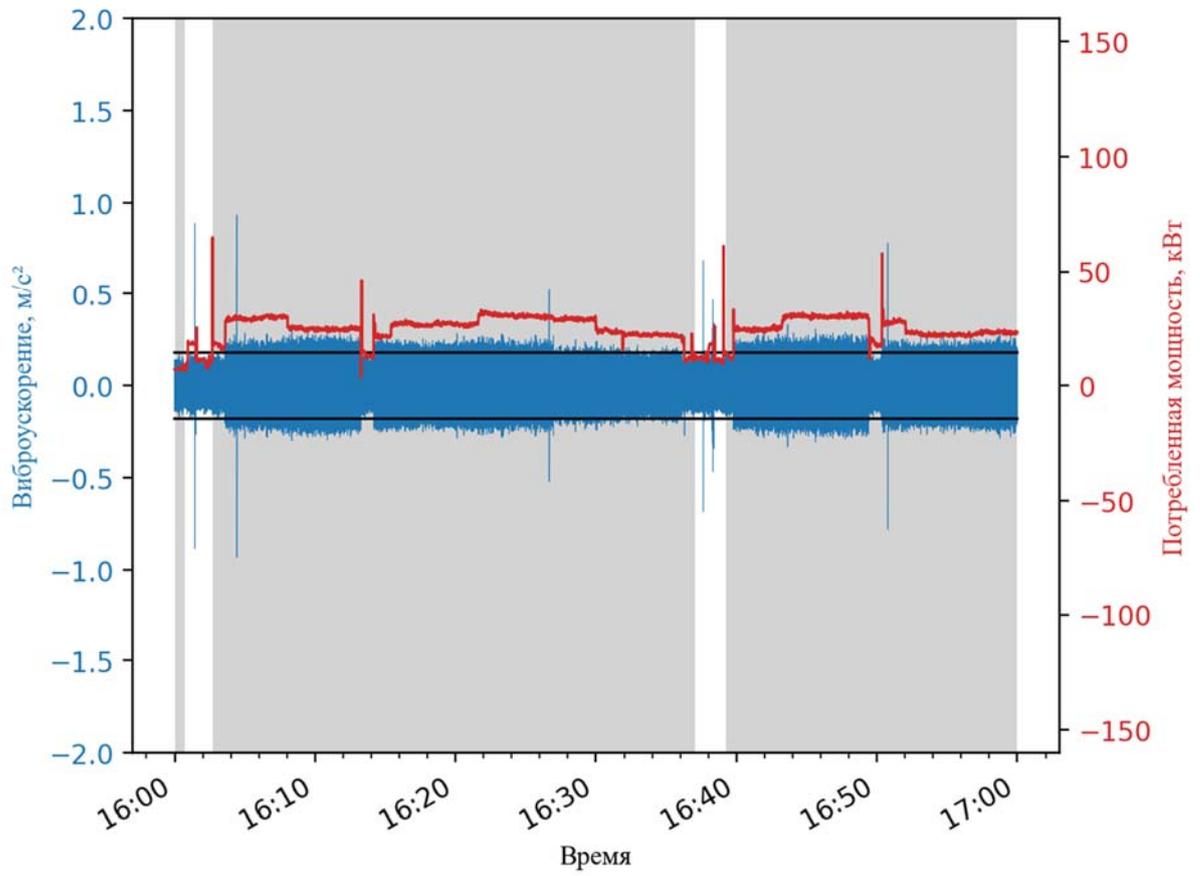


Рисунок 18 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 16:00 до 17:00

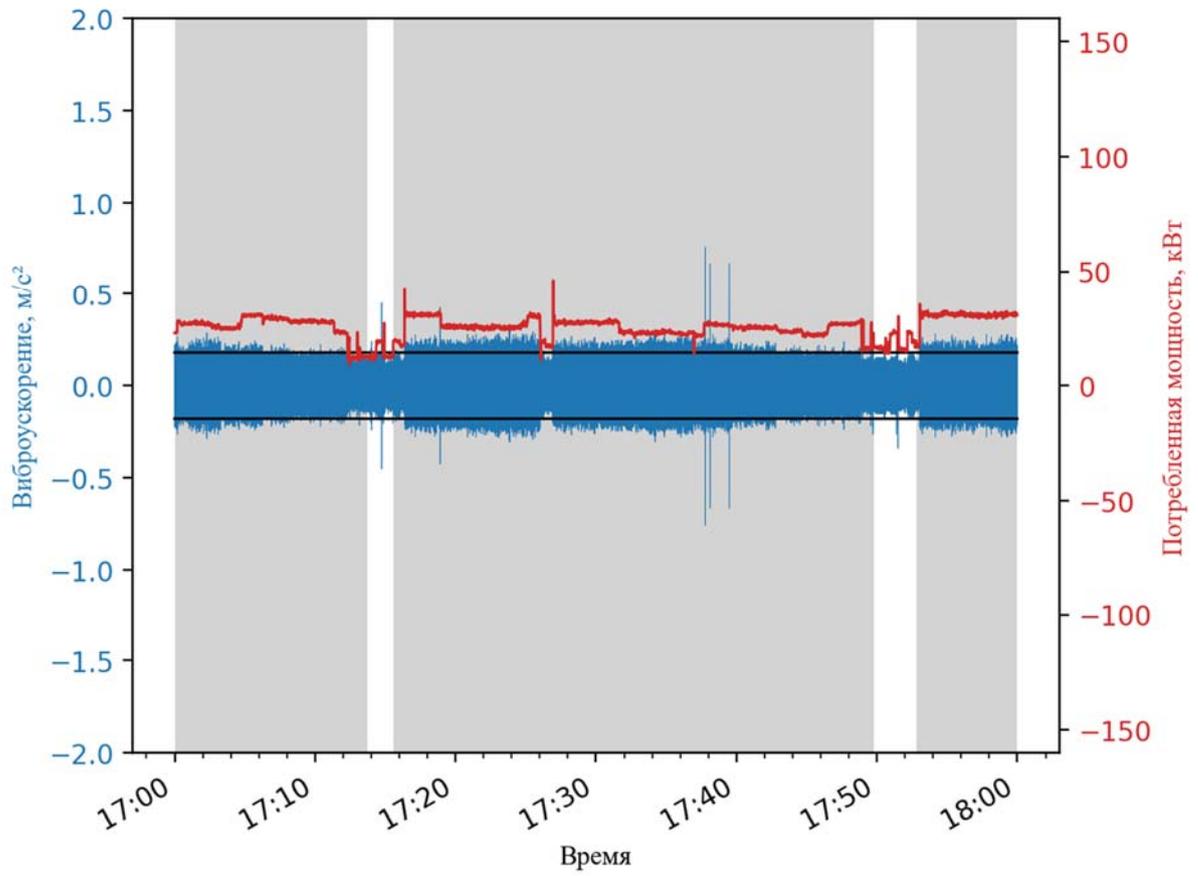


Рисунок 19 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 17:00 до 18:00

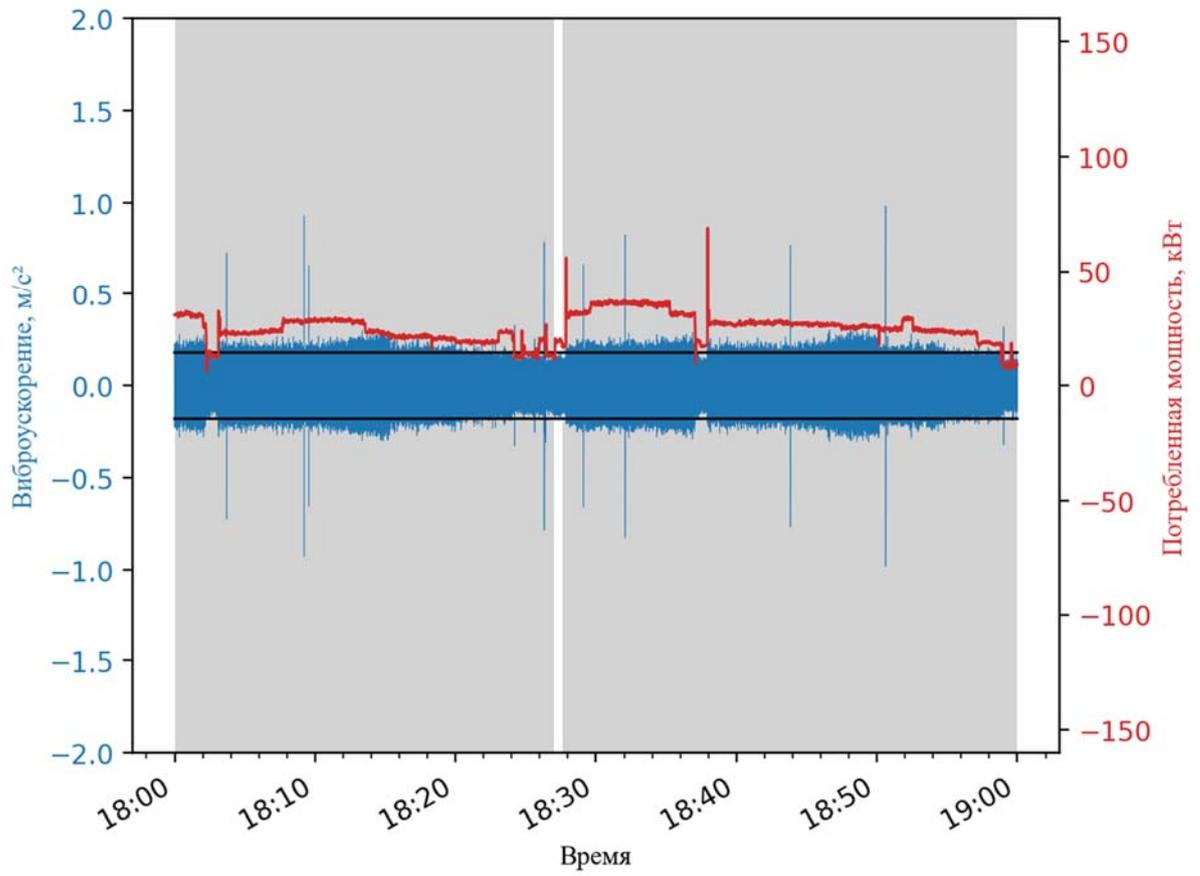


Рисунок 20 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 18:00 до 19:00

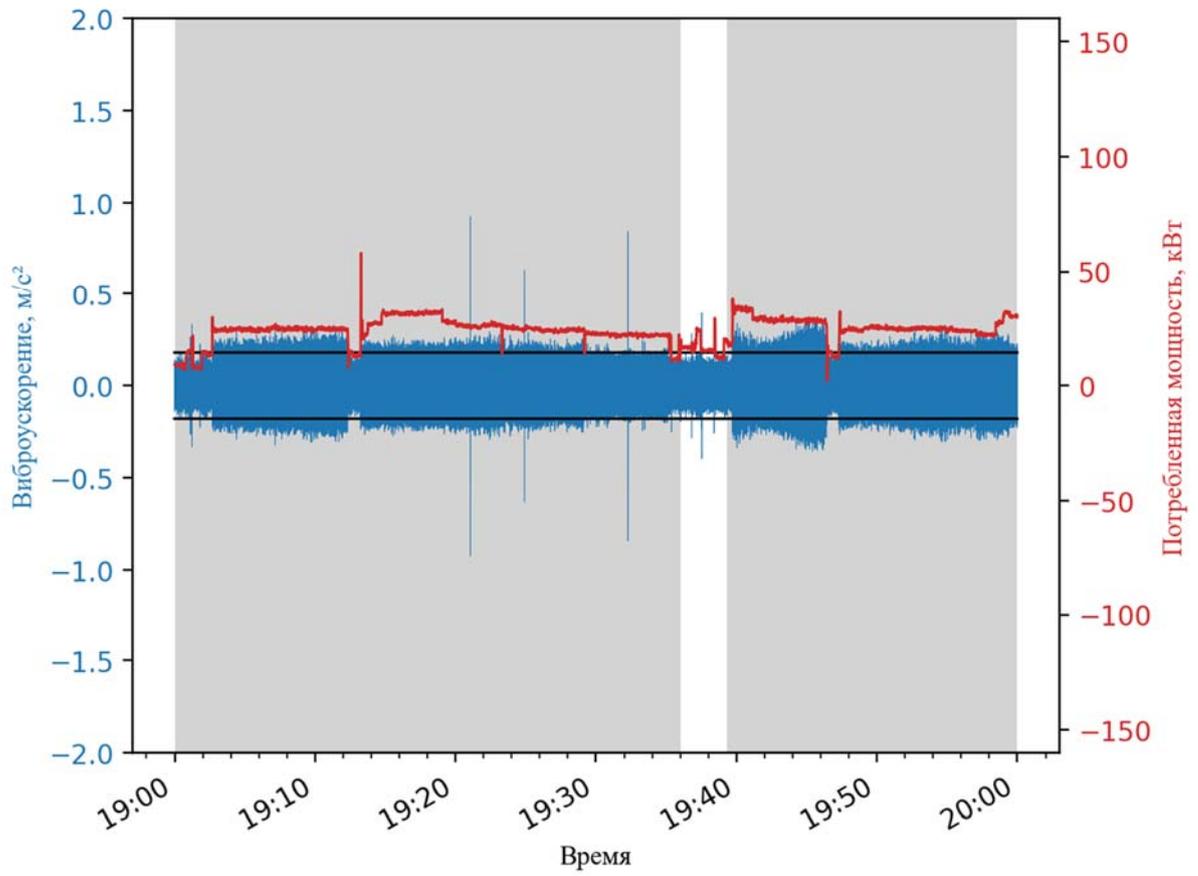


Рисунок 21 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 19:00 до 20:00

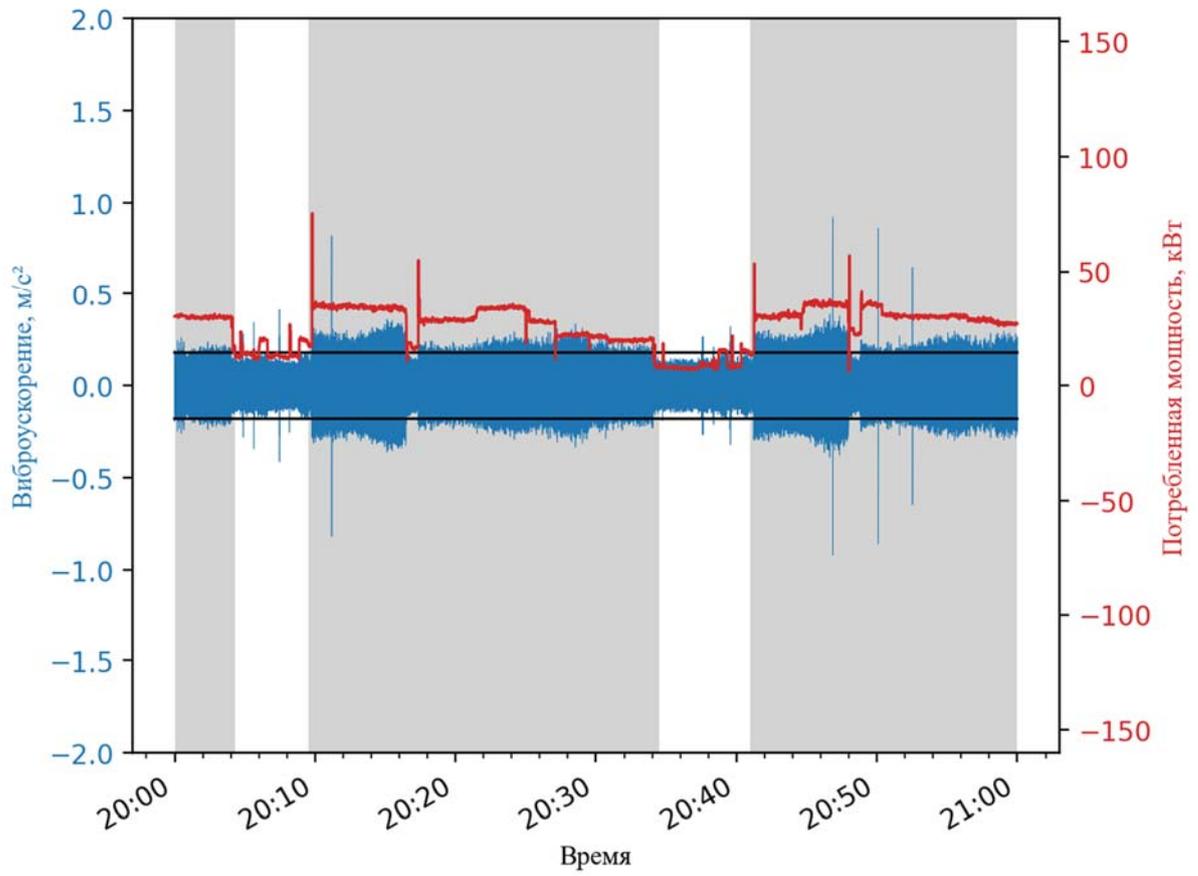


Рисунок 22 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 20:00 до 21:00

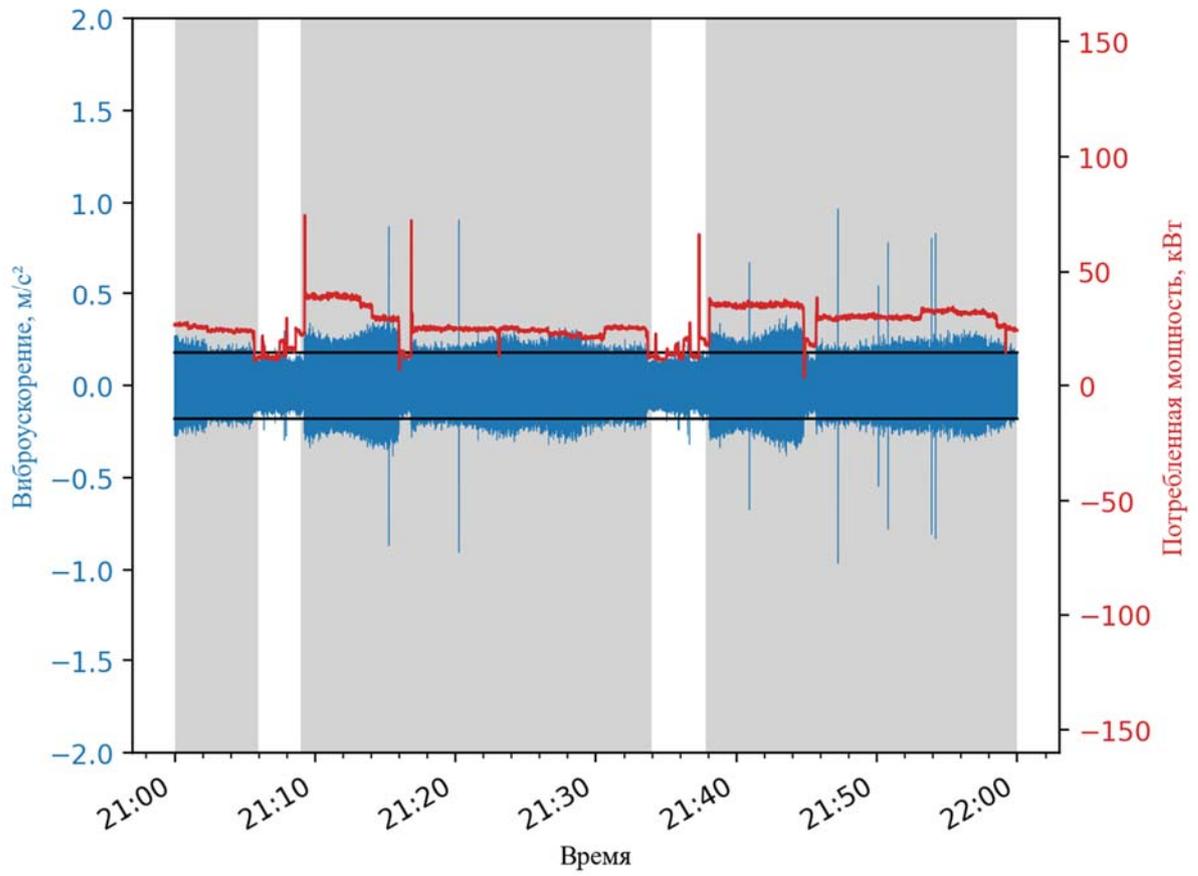


Рисунок 23 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 21:00 до 22:00

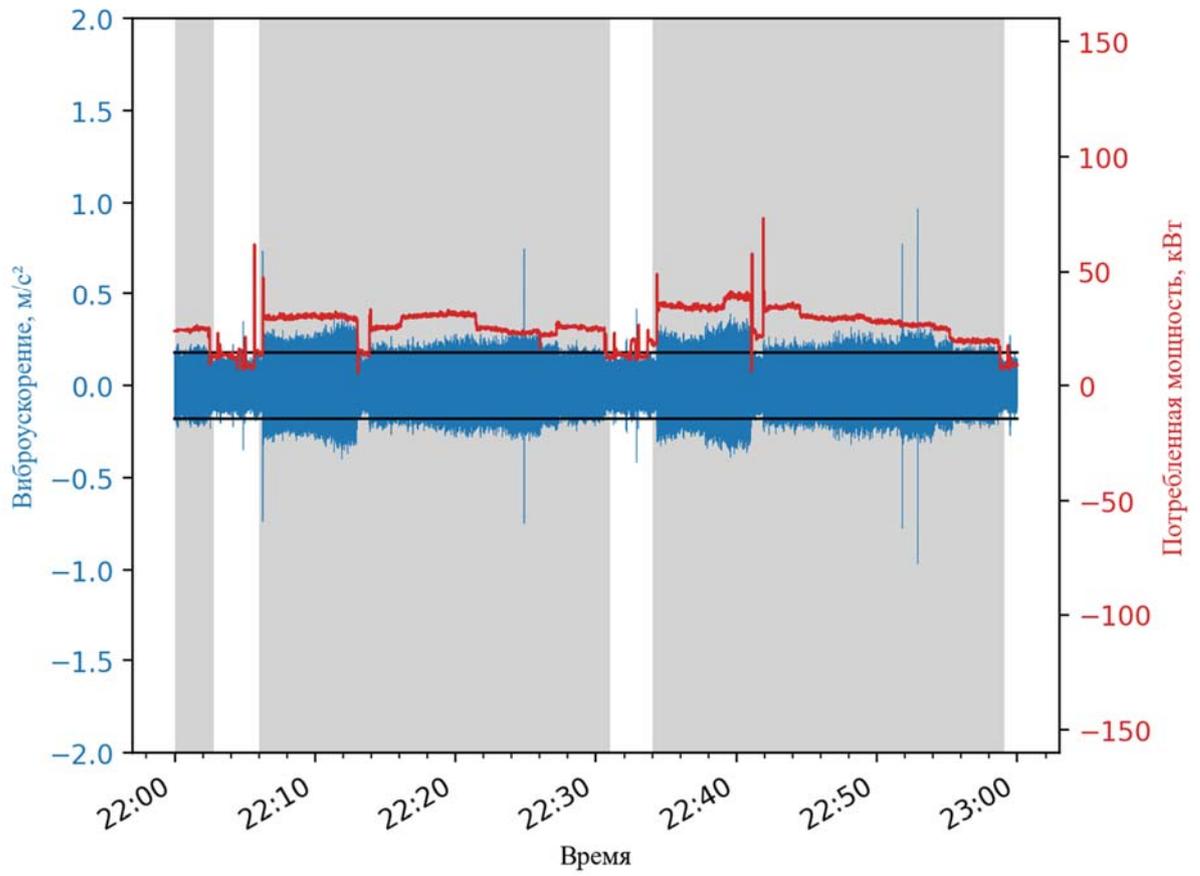


Рисунок 24 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 22:00 до 23:00

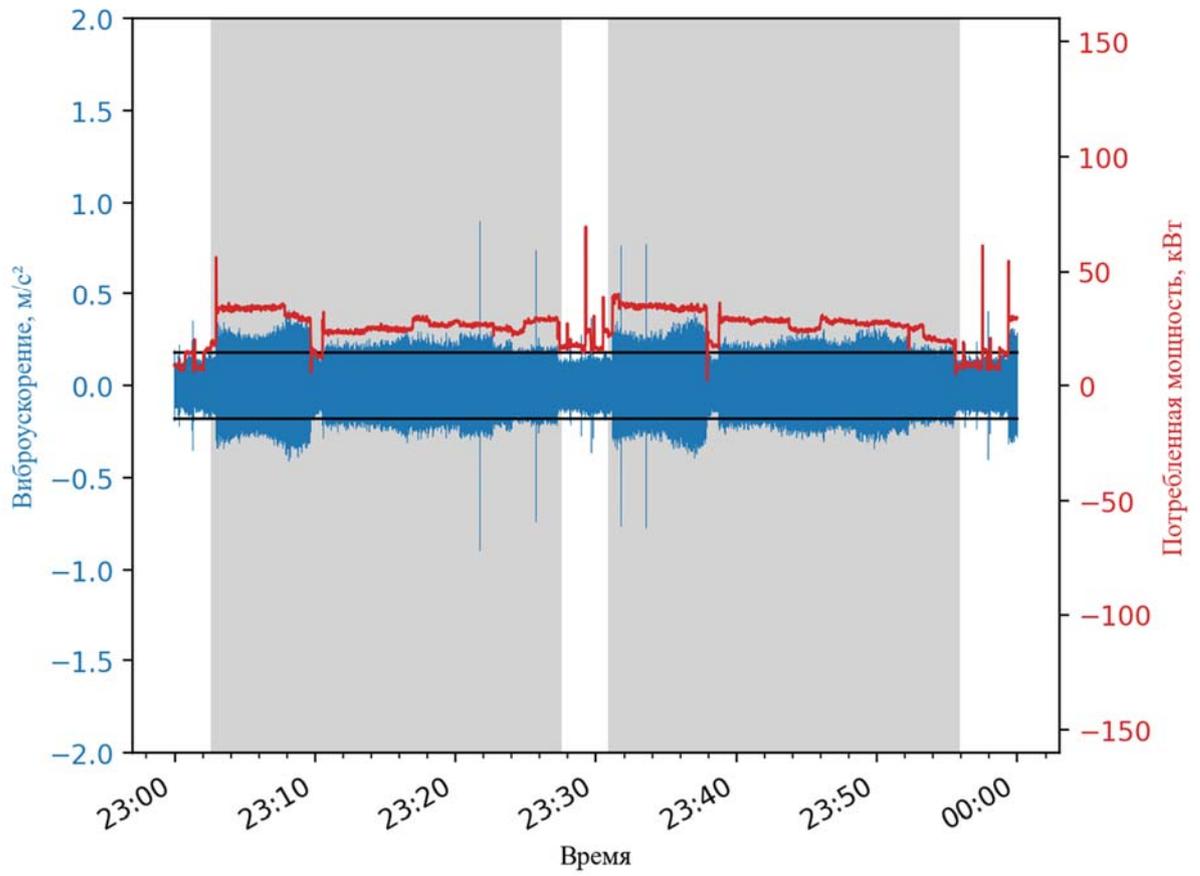


Рисунок 25 – Сигнал виброускорения и потребляемой мощности в период с 23:00 до 00:00

## Приложение В

### Результаты исследования технологического процесса

Нормативное время резания детали «Корпус» тип 1.

№ операции	Содержание операции	Время резания, с
1	Подрезка торца и черновое внутреннее растачивание	96
2	Чистовое внутреннее растачивание	131
3	Точение внутренней канавки	134
4	Нарезание упорной резьбы	171
Итого		532

Результаты обработки 51 заготовки детали «Корпус» тип 1.

№ детали	Время резания, с	Примечание
1	532	
2	1199	Повторное чистовое растачивание и точение канавки
3	730	Пауза в процессе обработки между черновым и чистовым растачиваниями, повторное точение канавки
4	532	
5	532	
6	532	
7	532	
8	532	
9	532	
10	532	
11	532	
12	532	
13	532	
14	532	
15	532	
16	754	Повторное нарезание резьбы

17	575	Повторное нарезание резьбы
18	570	Пауза в процессе обработки между растачиванием и точением канавки
19	532	
20	532	
21	532	
22	532	
23	532	
24	532	
25	532	
26	793	Пауза в процессе обработки между растачиванием и точением канавки
27	625	Пауза в процессе обработки между черновым и чистовым растачиваниями
28	532	
29	532	
30	532	
31	644	Пауза в процессе обработки между растачиванием и точением канавки
32	532	
33	532	
34	532	
35	532	
36	532	
37	532	
38	532	
39	867	Повторное чистовое растачивание
40	1116	Повторное чистовое растачивание и нарезание резьбы
41	1211	Повторное черновое и чистовое растачивания
42	775	Повторное чистовое растачивание
43	532	
44	532	
45	532	
46	532	
47	532	
48	532	
49	532	
50	532	

51	532	
----	-----	--

### Нормативное время резания детали «Корпус» тип 2

№ операции	Содержание операции	Время резания, с
1	Подрезка торца и черновое внутреннее растачивание	96
2	Чистовое внутреннее растачивание	131
3	Точение внутренней канавки	94
4	Нарезание упорной резьбы	171
Итого		492

### Результаты обработки 64 заготовок детали «Корпус» тип 2

№ детали	Время резания, с	Примечание
1	7246	Наладка первой детали. Привязка всех инструментов
2	861	Перенарезание резьбы
3	1423	Повторное точение канавки и нарезание резьбы
4	492	
5	492	
6	492	
7	492	
8	492	
9	492	
10	492	
11	492	
12	492	
13	492	
14	492	
15	492	
16	492	
17	492	
18	492	
19	492	

20	664	Пауза в обработке после чистовой расточки
21	618	Пауза в обработке после чистовой расточки
22	492	
23	492	
24	492	
25	492	
26	492	
27	492	
28	492	
29	492	
30	492	
31	492	
32	492	
33	492	
34	492	
35	1227	Повторное нарезание резьбы и растачивания
36	1620	Повторное нарезание резьбы
37	492	
38	492	
39	492	
40	492	
41	492	
42	492	
43	492	
44	492	
45	492	
46	492	
47	492	
48	492	
49	492	
50	1142	Повторное нарезание резьбы
51	492	
52	492	
53	492	

54	492	
55	492	
56	492	
57	492	
58	492	
59	492	
60	492	
61	492	
62	492	
63	492	
64	492	

## Приложение Г

## Результаты интеллектуальной деятельности

409

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022612735

Управляющая программа панели оператора на базе  
Raspberry Pi аппаратно-программного комплекса  
оптимизации течения тонкостенных заготовок

Правообладатель: *Акционерное общество «Научно-производственное объединение «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева» (АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева») (RU)*

Авторы: *Анцев Александр Витальевич (RU), Воротилин Михаил Сергеевич (RU), Янов Евгений Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022611961

Дата поступления 14 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 февраля 2022 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

8.9.10

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022612744

**Управляющая программа модуля сбора информации  
аппаратно-программного комплекса оптимизации  
точения тонкостенных заготовок**

Правообладатель: *Акционерное общество «Научно-производственное объединение «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева» (АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева») (RU)*

Авторы: *Анцев Александр Витальевич (RU), Воротилин Михаил Сергеевич (RU), Янов Евгений Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022611965

Дата поступления 14 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 февраля 2022 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 216025****Беспроводная система измерения механических колебаний вращающихся заготовок**

Патентообладатель: *Акционерное общество "Научно-производственное объединение "СПЛАВ" им. А.Н. Ганичева" (RU)*

Авторы: *Анцев Александр Витальевич (RU), Воротилин Михаил Сергеевич (RU), Янов Евгений Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022103334

Приоритет полезной модели 09 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 13 января 2023 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 09 февраля 2032 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 62b90077514400394e4ebd24145d5c7  
Владелец: *Зубов Юрий Сергеевич*  
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

*Ю.С. Зубов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024611002

**Интеллектуальная система эффективной эксплуатации лезвийных инструментов с учетом вариабельности процессов резания**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Анцев Александр Витальевич (RU), Янов Евгений Сергеевич (RU), Арсеньева Алина Алексеевна (RU), Сальников Сергей Владимирович (RU)*

Заявка № 2023689736

Дата поступления 27 декабря 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 января 2024 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 429b6a0fe3853164ba96f83b73b4aa7  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

*Ю.С. Зубов*

## Приложение Д

### Показатели экономической эффективности

Но- мер пункт а	Наименование пункта методики	ед.из- мере- ния	*	
3.2	Снижение затрат на простои в отчетный период (в час), <b>Эт0</b>	руб.	*	10,5 %
	Время простоя до внедрения, <b>T1</b>	час	*	
	Время простоя после внедрения, <b>T2</b>	час	*	
	Средняя себестоимость выпускаемого продукта, <b>Ссс</b>	руб.	*	
	Объем производства ед. продукции за 1 час, <b>Vч</b>	шт.	*	
	Затраты на внедрения мероприятия, <b>Звнедр</b>	руб.	*	
	Снижение затрат на простои в отчетный период (в год, <b>1972 часа</b> )	руб.	*	
3.4	Снижение потерь от сокращения продолжительности переналадок оборудования, <b>ЭНАЛ1</b>	руб.	*	0,2%
	Время переналадки до внедрения, <b>T1</b>	н/час	*	
	Время переналадки после внедрения, <b>T2</b>	н/час	*	
	Стоимость одного нормо-часа работы рабочего, <b>СРАБ</b>	руб.	*	
	Коэффициент дополнительной заработной платы, <b>КДОП</b>		*	
	Коэффициент страховых взносов, <b>КСВ</b>		*	
	Годовой объем производства детали, <b>V</b>	шт.	*	
	Количество деталей в партии, на которую ведется переналадка, <b>ПНАЛ</b>	шт.	*	
	Затраты на внедрения мероприятия, <b>Звнедр</b>	руб.	*	
3.5	Снижение потерь от сокращения количества переналадок оборудования (1 смена), <b>ЭНАЛ2</b>	руб.	*	9,6%
	Годовой объем производства детали, <b>V</b>	шт.	*	
	Количество деталей в партии, на которую ведется переналадка, до внедрения, <b>ПНАЛ1</b>	шт.	*	
	Количество деталей в партии, на которую ведется переналадка, после внедрения, <b>ПНАЛ2</b>	шт.	*	
	Продолжительность переналадки, трудоёмкость на 1 шт., <b>ТНАЛ</b>	н/час	*	
	Стоимость одного нормо-часа работы рабочего, <b>СРАБ</b>	руб.	*	
	Коэффициент дополнительной заработной платы, <b>КДОП</b>		*	

	Коэффициент страховых взносов, <b>КСВ</b>		*	
	Затраты на внедрения мероприятия, <b>Звнедр</b>	руб.	*	
	Снижение потерь от сокращения количества переналадок оборудования (год, <b>247 смен</b> )	руб.	*	
4.4	Снижение затрат на сокращение длительности производственного цикла, <b>ЭРПЦ</b>	руб.	*	4,7 %
	Плановые переменные затраты на годовой объём производства продукции, у которой изменилась длительность производственного цикла, <b>СПЛ.ПЕРЕМ</b>	руб.	*	
	Длительность производственного цикла до внедрения, <b>T1</b>	дней	*	
	Длительность производственного цикла после внедрения, <b>T2</b>	дней	*	
	Средняя годовая процентная ставка по кредитам, привлекаемым предприятием, <b>ИКР</b>	%	*	
	Затраты на внедрения мероприятия, <b>Звнедр</b>	руб.	*	
	Снижение затрат на сокращение длительности производственного цикла (год, 247 смен)	руб.	*	
5.1	Снижение затрат от сокращения брака продукции, <b>ЭБР</b>	руб.	*	28,5 %
	Количество забракованных изделий в базовом периоде до внедрения, <b>Б1</b>	шт.	*	
	Количество забракованных изделий в базовом периоде после внедрения, <b>Б2</b>	шт.	*	
	Производственные затраты на бракованную продукцию, включая затраты на исправление и т.д., <b>СБ</b>	руб.	*	
	Затраты на внедрения мероприятия, <b>Звнедр</b>	руб.	*	
6.5	Снижение затрат от увеличения стойкости инструмента, <b>ЭИНС</b>	руб.	*	40,9 %
	Расход инструмента в натуральных величинах до внедрения на 1 единицу изделия, <b>P1</b>	шт./1 ед.	*	
	Расход инструмента в натуральных величинах после внедрения на 1 единицу изделия, <b>P2</b>	шт./1 ед.	*	
	Годовой объём производства детали, <b>V</b>	шт.	*	
	Стоимость инструмента до внедрения, <b>ЦИНС1</b>	руб.	*	
	Стоимость инструмента после внедрения, <b>ЦИНС2</b>	руб.	*	

6.7	Снижение затрат от сокращения цикла обработки продукции на оборудовании, <b>ЭЦ</b>	руб.	*	5,6 %
	Время цикла обработки единицы продукции на оборудовании до внедрения, <b>T1</b>	час/ год	*	
	Время цикла обработки единицы продукции на оборудовании после внедрения, <b>T2</b>	дней	*	
	Стоимость одного машино-часа для данного типа оборудования, <b>СОБ</b>	руб.	*	
	Годовой объём производства продукции, <b>V</b>		*	
	Затраты на внедрения мероприятия, <b>Звнедр</b>	руб.	*	
	Стоимость оборудования в соответствии с договором поставки, <b>ЦОБ</b>	руб.	*	
	Годовой фонд рабочего времени, <b>ФГОД</b>	час/ год	*	
Количество лет амортизации на донное оборудование, <b>ТАМ</b>	лет	*		
Усредненный расчетный экономический эффект на 36 станков с учетом дефляторов		руб.	5250687,33	

## Приложение Е

### Результаты внедрения

УТВЕРЖДАЮ

И.о. заместителя генерального директора  
по инфраструктуре  
АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»



Ю. А. Иванов

« 15 » 12 2023 г.

#### АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов научно-исследовательских работ

Настоящим актом подтверждаем, что разработанная Яновым Е.С. (руководитель НИР, АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева») и Анцевым А.В. (руководитель СЧ НИР, ФГБОУ ВО ТулГУ) в рамках НИР «Система» комплексная система предиктивной аналитики и поддержки принятия решений по рациональному использованию режущего инструмента на операциях механической обработки деталей серийных образцов РС РСЗО внедрена в опытную эксплуатацию на АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева».

Экономический эффект от внедрения на АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева» указанной комплексной системы составляет 52 250 687,33 руб. в год за счет использования в производстве самообучающейся интеллектуальной системы мониторинга протекания процессов механической обработки и предиктивной аналитики состояния технологического оборудования, расположенного в цехе №21 и цехе №3.

Заместитель генерального директора  
по экономике и финансов

М.Г. Рапота

Начальник механического  
производства

П.В. Шорохов

Начальник отдела 75 –  
руководитель НИР

Е.С. Янов

**ТЕХНОДИНАМИКА** 

ООО «Видис Групп»  
115184, Россия, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ  
Замоскворечье, ул. Большая Татарская д.9, помещ. 1/2  
Тел./факс: +7 (495) 133-0-133  
info@widis.ru | www.widis.ru

 **WIDIS**  
GROUP

ООО «Видис Групп»

Утверждаю  
11.09.2024г.

### АКТ

#### использования результатов диссертационного исследования

Настоящим подтверждаем, что методика повышения эффективности использования станочных систем и информационно измерительная система, предложенная Яновым Евгением Сергеевичем, в диссертационном исследовании использовалась ООО «Видис Групп» при внедрении на предприятии АО НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева режущего инструмента для определения эффективных режимов его использования.

Руководитель обособленного  
подразделения



Веселов Дмитрий Анатольевич



e-mail: tula@widis.ru  
Тел. +7 (968) 862-85-20

Металлорежущий инструмент и оснастка

**ООО «Вебер Комеханикс»**109052, Москва  
ул. Новохоловская, 21 к2/с1

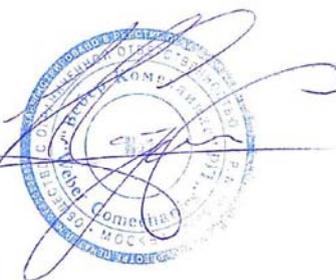
Тел.: +7 (495) 925 8887

weber@weber.ru  
www.weber.ru

Исх. б/н от 30.04.2024г.

**АКТ****внедрения результатов диссертационной работы**

Настоящим подтверждаем, что цифровой двойник технологического процесса на раскатно-деформирующих станках, предложенный в диссертационном исследовании Яновым Евгением Сергеевичем, применялся в компании ООО «Вебер Комеханикс» при внедрении оборудования на промышленных предприятиях и позволил повысить эффективность его использования на 21,3%.

Директор департамента  
ООО «Вебер Комеханикс»

Смирнов И.В.