

На правах рукописи

СТУПИН ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА
ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ НАСОСОВ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре технического сервиса машин и оборудования в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева).

- Научный руководитель:** **Апатенко Алексей Сергеевич,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технического сервиса машин и оборудования ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»
- Официальные оппоненты:** **Зорин Владимир Александрович,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры производства и ремонта автомобилей и дорожно-строительных машин ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
- Петрищев Николай Алексеевич,**
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела диагностики, технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники и оборудования ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Российский государственный университет народного хозяйства имени В. И. Вернадского»

Защита состоится 21 апреля 2026 года в 12.30 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел/факс: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязева, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
кандидат технических наук, доцент

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В соответствии с положениями «Стратегии развития сельского хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года» (утвержденной распоряжением Правительства РФ от 8 сентября 2022 г. № 2567-р (с изменениями на 19 декабря 2025 года)) и задачами, определенными в рамках реализации Государственной программы развития сельского хозяйства, ключевым направлением является обеспечение технологической независимости и конкурентоспособности агропромышленного комплекса. Достижение этих стратегических целей напрямую связано с поддержанием высокого уровня технической готовности и надежности сельскохозяйственной техники. В современной сельскохозяйственной технике для управления навесным оборудованием, рулевого управления, привода рабочих органов и их позиционирования широко применяются гидравлические системы что обусловлено высокой удельной мощностью, компактностью и точностью управления. Работоспособность гидросистемы является важным аспектом для обеспечения непрерывности технологического процесса. Согласно данным ФГБНУ «Росинформагротех», 15 % отказов сельскохозяйственной техники связано с гидравлическими системами, при этом отказы распределяются следующим образом: около 35 % приходится на рукава высокого давления, 25 % – на гидронасосы, 20 % – на распределители, 10 % – на гидроцилиндры и ещё 10 % – на прочие элементы.

Таким образом, гидравлические насосы, как одни из наиболее нагруженных узлов сельскохозяйственной техники, работают в условиях интенсивных динамических нагрузок и переменных режимов, что обуславливает прогрессирующее ухудшение их технического состояния и является частой причиной внезапных отказов.

Отказ гидравлического насоса в периоды выполнения ответственных агротехнологических операций ведет к остановке машины и как следствие к прямым экономическим потерям и срыву установленных сроков работ.

Диагностирование гидравлических насосов в режиме онлайн позволяет оценить и контролировать их техническое состояние с целью выявления дефектов на ранней стадии неисправностей и обеспечения своевременного и эффективного технического обслуживания и ремонта.

Одним из перспективных методов диагностирования гидравлических насосов является вибрационный. Он позволяет определять техническое состояние элементов (деталей) по параметрам вибраций. Основными преимуществами выбранного метода являются: возможность производить диагностирование без разборки агрегата, высокая скорость определения неисправностей. Основным недостатком вибродиагностирования является высокая сложность обработки сигналов и выявления полезной, диагностической

информации на фоне характерных для гидравлических насосов вибрационных процессов.

Существующие методы вибродиагностирования часто недостаточно эффективны в нестационарных режимах, характерных для эксплуатации сельскохозяйственной техники. В этой связи разработка автоматизированного метода, направленного на выявление дефектов, снижающих объемный коэффициент полезного действия гидравлического насоса, представляет актуальную научно-практическую задачу. Это формирует основу для перехода от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию.

Степень разработанности темы исследования. Изучению вопросов диагностирования гидравлических систем и оборудования посвящены работы: Аллилуева В.А., Артемьева Ю.Н., Бельских И.Б., Буклагина Д.С., Гальперина А.Р., Гринчара Н.Г., Дидманидзе О.Н., Зорина В.А., Кальбуса Г.Л., Колчина А.В., Кривенко П.М., Михлина В.М., Павлова Ю.Н., Петрищева Н.А., Пильщикова Н.А., Северного А.Э., Севрюгиной Н.С., Сивцова В.Н., Скибневского К.Ю., Черноиванова В.И., Черепанова С.С. При этом изучению вибродиагностирования гидравлических систем и оборудования посвящены работы: Баркова А.В., Бишоп А.Я., Герасимова В.С., Денисова В.С., Костюкова В.Н., Макуева В.Б., Павлова Б.В., Рубичева Н.А., Ширмана А.Р., Чечета В.А., Cheng J., Choy F.K., Deng X., Li Z., Unal M., Zheng H. и других.

При этом проведенный анализ публикаций отечественных и зарубежных авторов по вибродиагностированию технического состояния оборудования выявил недостаточное внимание к исследованиям и разработкам таких важных составляющих системы, как методы выделения и отбора признаков дефектов на этапе предварительной обработки сигналов и методов выявления и диагностирования неисправностей гидравлических насосов. Недостаточная разработанность этих вопросов значительно снижает качество информации, получаемой в процессе мониторинга для принятия решений по техническому обслуживанию гидравлических насосов.

Актуальность проблемы, её недостаточная научная разработка определили цель, задачи, объект и предмет диссертационного исследования.

Цель исследования – повышение эффективности эксплуатации сельскохозяйственной техники путем совершенствования методов вибродиагностирования гидравлических насосов.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1. Провести системный анализ, обзор и синтез современных методов вибродиагностирования технических систем.

2. Разработать адаптивный алгоритм вибродиагностирования гидравлических насосов сельскохозяйственной техники, основанный на интеллектуальном отборе информативных признаков из вибрационного сигнала.

3. Разработать и экспериментально обосновать комбинированный метод вибродиагностирования для оценки технического состояния гидравлических насосов.

4. Разработать программный комплекс для автоматизированного вибродиагностирования с реализацией адаптивных алгоритмов анализа сигналов и интеллектуальной классификации дефектов гидравлических насосов.

5. Провести оценку точности разработанного программного комплекса для автоматизированного вибродиагностирования гидравлических насосов, установить и обосновать диагностические пороги для ключевых дефектов, дать рекомендации по использованию полученных результатов на предприятиях технического сервиса сельскохозяйственной техники АПК России.

6. Обосновать экономическую эффективность внедрения разработанного программного комплекса вибродиагностирования гидравлических насосов при эксплуатации сельскохозяйственной техники АПК России.

Объект исследований – интеллектуальные методы диагностирования гидравлических насосов сельскохозяйственной техники.

Предмет исследований – информационные свойства и диагностические признаки вибрационных сигналов, генерируемые гидравлическим насосом, для последующего их использования при определении технического состояния.

Научная новизна состоит в получении математической зависимости комбинированного индекса дефектности от ключевых диагностических параметров, который позволяет комплексно оценивать техническое состояние насоса, а также в разработке комбинированного метода вибродиагностирования гидравлических насосов, основанного на совместном использовании спектрального анализа (СПМ), алгоритма J48 для отбора признаков и нечёткого вывода для классификации.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость заключается в развитии методов вибродиагностирования гидравлических насосов за счёт комплексного использования энергетического, статистического и спектрального анализа сигналов. Разработанный комбинированный подход расширяет теоретические представления о выделении информативных признаков и классификации дефектов гидравлических насосов в условиях нестационарных режимов работы сельскохозяйственной техники.

Практическая ценность заключается в создании программного комплекса для автоматизированного вибродиагностирования гидравлических насосов, который реализует разработанный комбинированный метод, и может быть использован при эксплуатации сельскохозяйственной техники и на предприятиях технического сервиса АПК России.

Методология и методы исследования.

При решении поставленных задач применялся системный подход. Использовались методы обработки сигналов: быстрое преобразование Фурье,

вейвлет-анализ, расчёт спектральной плотности мощности; методы анализа данных и снижения размерности: анализ главных компонент и независимых компонент; методы классификации: деревья решений (J48) и нечёткий логический вывод.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод вибродиагностирования гидравлических насосов, основанный на использовании анализа спектральной плотности мощности вибросигнала для помехоустойчивого выделения признаков, алгоритма деревьев решений J48 для автоматизированного отбора информативных диагностических параметров и генерации логических правил, и нечёткого логического вывода для интерпретируемой классификации технических состояний, обеспечивающий достоверное распознавание дефектов в условиях нестационарных режимов работы.

2. Программный комплекс для автоматизированного вибродиагностирования, реализующий разработанный комбинированный метод и обеспечивающий обработку сигналов – от первичного сбора данных до формирования диагностического заключения с оценкой вероятности дефектов, интегрируемая в действующие процессы технического обслуживания сельскохозяйственной техники.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования изложены в 17 научных публикациях, из которых 4 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, выпущены 2 учебных пособия и 1 монография, получено 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертационное исследование выполнялась в рамках программы «Студенческий-стартап 2022» при поддержке Фонда Содействия Инновациям и тематического плана выполнения научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева по заказу Минсельхоза России за счет бюджетных средств в 2023 году.

По результатам проведенных исследований разработаны: программный комплекс для анализа шестеренных гидравлических насосов VibraPump Analyzer (свидетельство о государственной регистрации для ЭВМ № 2025685795); программный комплекс, адаптированный под аксиально-поршневые насосы AxialVibeAnalyst (свидетельство № 2025684170); интерактивные тренажеры диагностирования шестеренных, пластинчатых и радиально-поршневых насосов (свидетельства о государственной регистрации для ЭВМ №2025689770, №2025690844 и №2025695365).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 209 страницах, включает 61 рисунок и 16 таблиц. Библиография содержит 144 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность исследования, сформирована цель, поставлены задачи, изложены научная новизна, практическая и теоретическая значимости работы, представлены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе установлена теоретическая иерархия систем мониторинга технических систем. Проанализирована эволюция концепций: от реактивного неразрушающего контроля к проактивному обслуживанию по состоянию, далее к мониторингу целостности конструкций и интегрированному подходу управления техническим состоянием. Доказано, что прогнозирование и управление техническим состоянием обеспечивает максимальную эффективность путем предотвращения внезапных отказов и минимизации затрат на эксплуатацию. Ключевые этапы эволюции визуализированы на рисунке 1.



Рисунок 1 – Эволюция концепций систем мониторинга

Эффективность этих концепций, напрямую зависит от качества обработки и интерпретации данных о состоянии оборудования. Это обуславливает необходимость разработки эффективного аналитического инструментария.

Для реализации стратегий обслуживания по состоянию, мониторинга целостности конструкции и управления техническим состоянием гидравлических насосов разработана методология обработки вибрационных сигналов. Она включает три взаимодополняющих направления: временной анализ (ключевые статистические метрики: среднее квадратичное значение (СКЗ), пик-фактор, асимметрия, эксцесс), частотный анализ (БПФ, спектр огибающей, идентификация характерных частот дефектов для подшипников) и частотно-временной анализ. Критически оценена ограниченность классических методов (например, спектрального анализа) при работе с нелинейными сигналами. Предложено использование анализа главных компонент для выделения наиболее информативного набора признаков из избыточных данных, где ключевыми метриками являются СКЗ и Пик-фактор (1).

$$\text{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2} \quad \text{пик-фактор} = \frac{\max(\text{abs}(x))}{\text{СКЗ}} \quad (1)$$

Для эффективного использования обработанных данных обоснованы методы отбора диагностически значимых признаков. Показано, что методы снижения размерности, такие как анализ главных компонент и анализ независимых компонент, эффективно устраняют корреляцию признаков,

сокращая вычислительные затраты. Деревья решений (С4.5, J48) обеспечивают интерпретируемый отбор наиболее информативных признаков с демонстрируемой точностью классификации свыше 93 %. Дискриминантный анализ Фишера эффективен для линейной классификации, но требует адаптации для нелинейных задач. Анализ подтвердил, что оптимальный набор признаков (алгоритм отбора признаков представлен на рисунке 2) отобранный предложенными методами, повышает точность вибродиагностирования на 15...20 %.

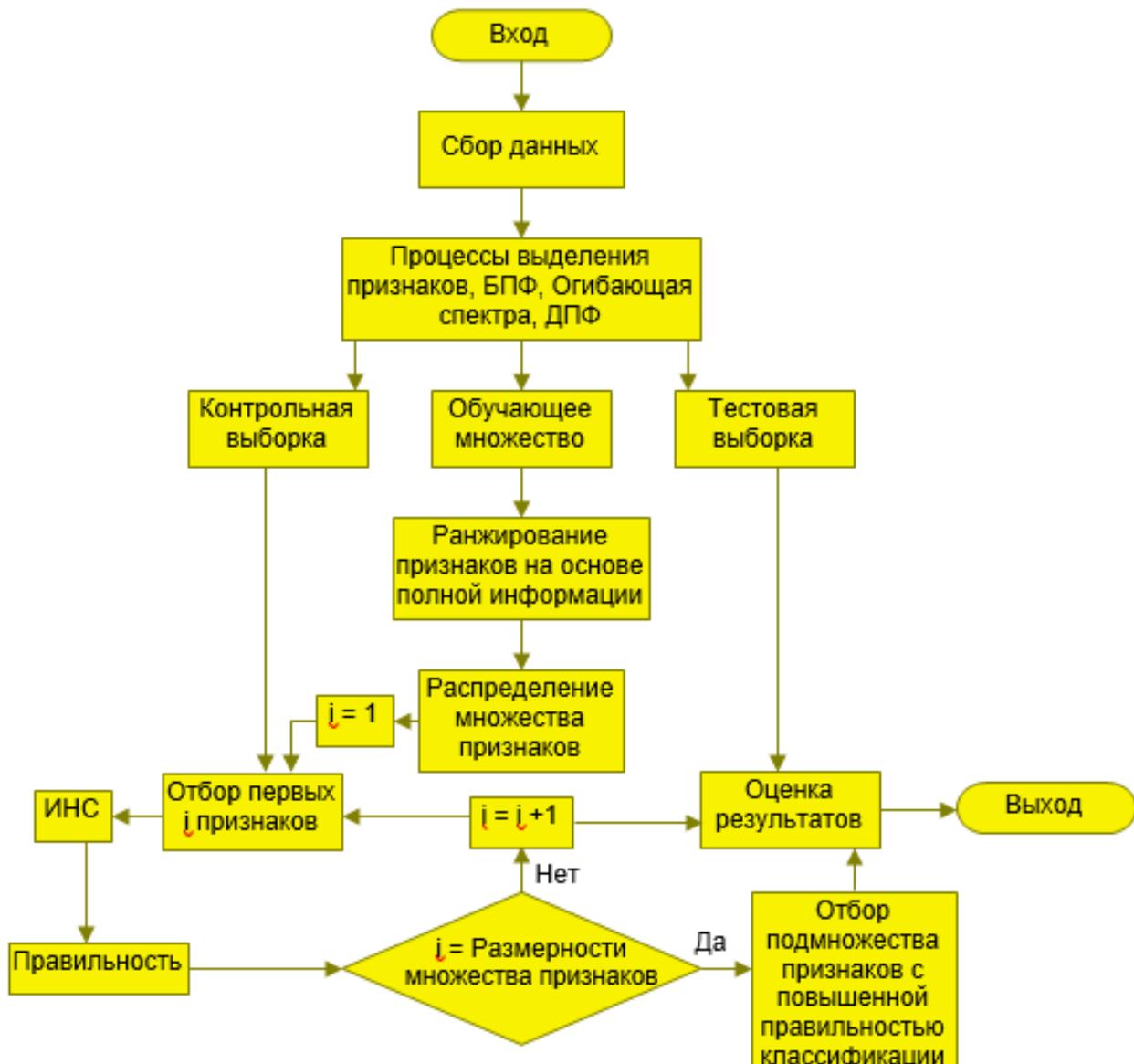


Рисунок 2 – Алгоритм отбора признаков, выделенных из сигнальной информации вибродиагностирования

Во второй главе проведён анализ современных методов вибродиагностирования гидравлических систем. Систематизированы подходы к обработке сигналов, включая временной, частотный и частотно-временной анализ. Особое внимание уделено спектральным методам и расчёту спектральной плотности мощности как инструментам, обеспечивающим энергетическую оценку вибрационных процессов в условиях переменных

режимов работы. Проанализированы алгоритмы выделения диагностических признаков из вибросигналов, методы снижения размерности признаков и современные подходы к классификации технических состояний.

$$\text{СПМ}(f) = \frac{2}{f_s \times U} \times \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |X_k(f)|^2 \quad (2)$$

На основе СПМ предложен метод оценки энергии вибрации в критических полосах частот, позволяющий идентифицировать кавитацию и дефекты подшипников:

$$E = \int_{f_a}^{f_b} \text{СПМ}(f) df \quad (3)$$

Предложена модульная архитектура системы диагностирования, интегрирующая спектральный анализ с расчётом спектральной плотности мощности сигнала, классификацию и систему пороговых значений. Проверка архитектуры проводилась на гидравлическом насосе с использованием пьезоэлектрического акселерометра Metrix SA6200A и анализатора вибросигналов X-Viber. Такой подход позволил реализовать полный цикл обработки сигнала от первичных измерений до классификации дефектов с учетом режимов работы оборудования.

Архитектура обеспечивает полный цикл обработки сигнала: от первичных измерений и предварительной фильтрации через спектрально-статистический анализ с выделением диагностических признаков до интеллектуальной классификации дефектов с использованием алгоритма J48 для отбора информативных параметров и адаптивной системы нечёткого логического вывода. Динамическая подстройка под параметры оборудования реализована за счёт корректировки пороговых значений в зависимости от скорости вращения вала гидравлического насоса, что обеспечивает достоверность диагностирования в различных эксплуатационных режимах сельскохозяйственной техники.

В третьей главе представлена методика и изложены этапы выполнения экспериментальных исследований, которые выполнялись на шестеренном гидравлическом насосе НШ-32А, трактора МТЗ-82.1, при трех скоростных режимах: 1000, 1500 и 2000 об/мин с использованием гидравлической жидкости И-20А в учебно-научно-производственном центре (УНПЦ) садоводства и овощеводства имени В.И. Эдельштейна ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева. Пьезоэлектрический акселерометр установлен на корпусе гидравлического насоса (рисунок 3), что обеспечивало возможность контроля четырех диагностируемых состояний: исправное состояние (НОРМ), износ подшипника (ИПТ), износ шестерни (ИТЗ) и комбинированный дефект (КОМБ), представленных в таблице 1.

Вибрационные сигналы обрабатывались с использованием классического БПФ и спектральной плотности мощности вибросигнала, рассчитываемой по формуле (2), сравнение методов выявило существенные погрешности БПФ при

нестационарных режимах, тогда как СПМ-анализ обеспечивал стабильное выделение дефект-специфических признаков.

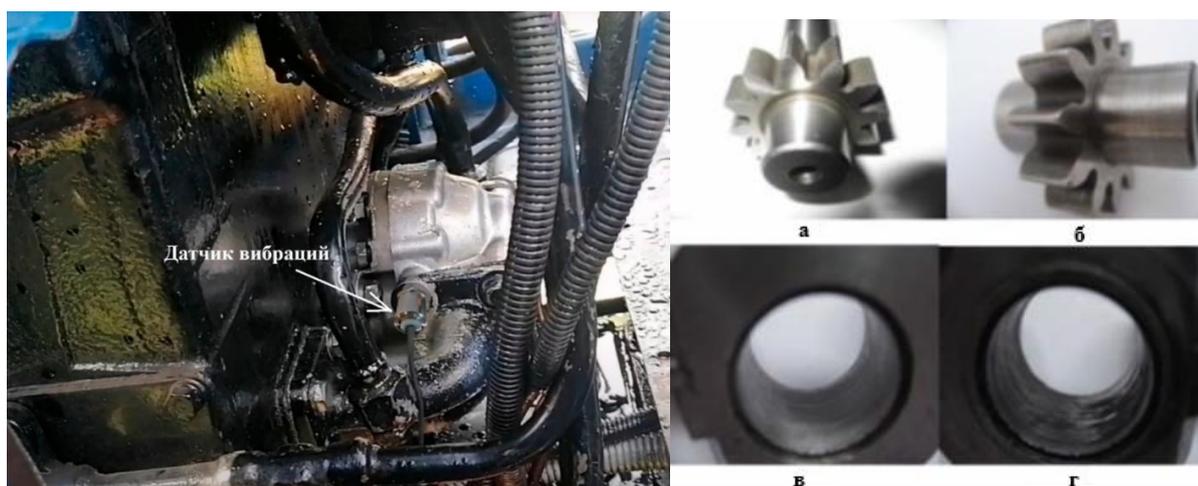


Рисунок 3 – Расположение датчика на корпусе насоса и рассмотренные дефекты
 а – Исправная шестерня. б – Шестерня с износом торца зуба (ИТЗ). в – Рабочий опорный подшипник. г – Опорный подшипник с внутренним износом (ИПТ)

Таблица 1 – Неисправности гидравлического насоса

Номер	Тип неисправности	Метка классификации
1	Рабочий гидравлический насос	НОРМ
2	Опорный подшипник с внутренним торцевым износом	ИПТ
3	Шестерня с износом торца зуба	ИТЗ
4	Сочетание неисправностей номер 2 и 3	КОМБ

При анализе БПФ-методом спектры идентичных дефектов демонстрировали значительную вариабельность, затрудняя диагностирование. В отличие от этого, СПМ-анализ показал устойчивые закономерности – при развитии дефектов наблюдалось систематическое увеличение пиковых значений на 40...60 % и смещение энергетического максимума в диапазон 70...120 Гц., (Рисунок 4).

На СПМ-диаграмме прослеживаются изменения амплитуд в критических частотных диапазонах при различных дефектах, что позволило разработать энергетический метод оценки износа через расчет площади под кривой СПМ.

Разработанный комбинированный метод вибродиагностирования гидравлических насосов сельскохозяйственной техники, реализующий последовательную трехэтапную процедуру (рисунок 5), на первом этапе спектральная плотность мощности вибросигнала рассчитывается по формуле (2), обеспечивая точное энергетическое представление сигналов и выявление устойчивых закономерностей при дефектах, на втором этапе деревья решений J48 автоматически идентифицируют ключевые диагностические параметры (экссесс, дисперсию, стандартное отклонение) и их пороговые значения, на

третьем этапе эти параметры преобразуются в нечеткие правила классификации с функциями принадлежности, что позволяет достичь точности диагностирования до 94,6 % при 1500 об/мин и средней эффективности 93,5 % по всем режимам.

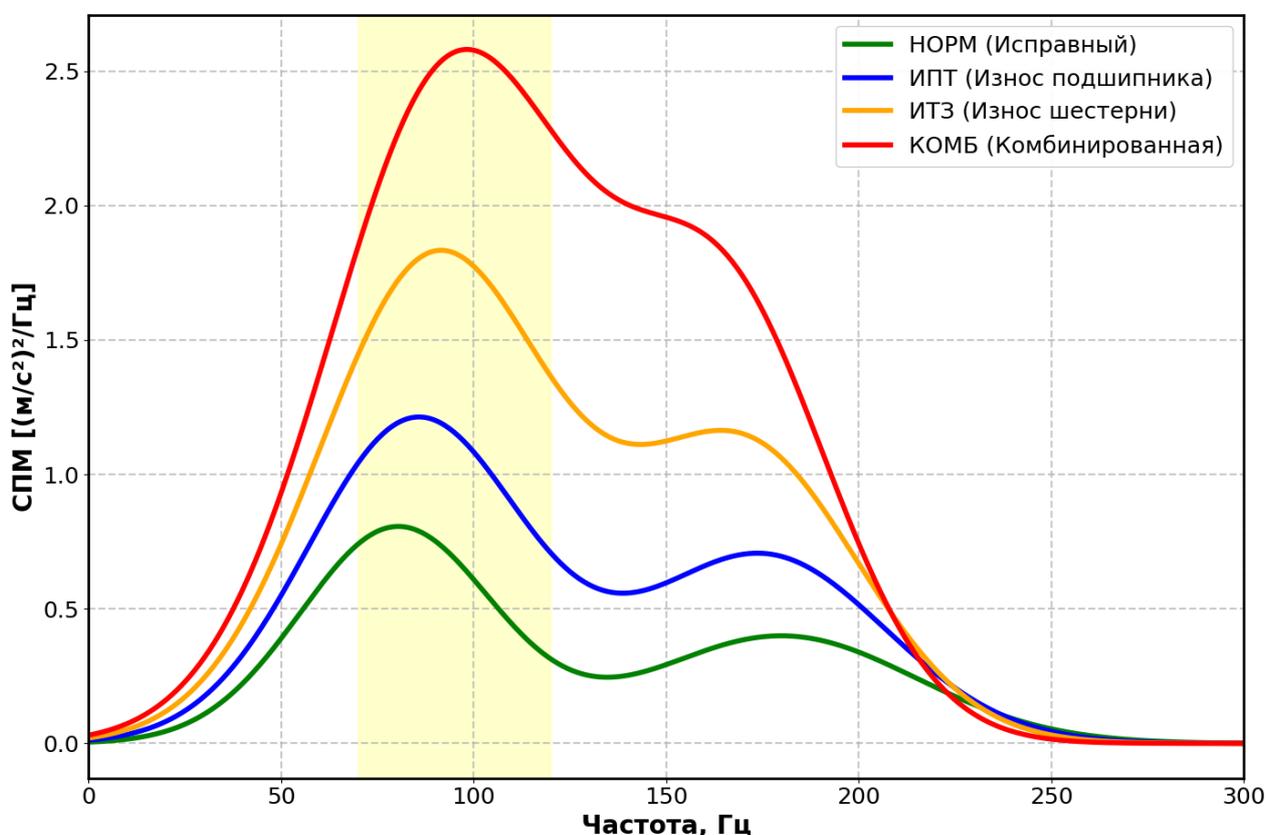


Рисунок 4 – Диаграмма зависимости СПМ сигнала от частоты для условий 1500 об/мин



Рисунок 5 – Комбинированный метод вибродиагностирования гидравлических насосов

В четвертой главе разработана программный комплекс для практического применения комбинированного метода вибродиагностирования гидравлических насосов. Система представляет собой специализированный научный инструментарий, формализующий теоретические принципы в вычислительные алгоритмы для автоматизированного анализа вибрационных сигналов гидравлических насосов. Продолжением разработки комплекса стала экспериментальная оценка эффективности комбинированного метода вибродиагностирования гидравлических насосов в условиях эксплуатации сельскохозяйственной техники.

Архитектура программного комплекса построена по модульному принципу, где каждый компонент соответствует этапам диагностического процесса. На рисунке 6 представлена блок-схема работы программы, демонстрирующая последовательность обработки данных от исходного сигнала до диагностического заключения.

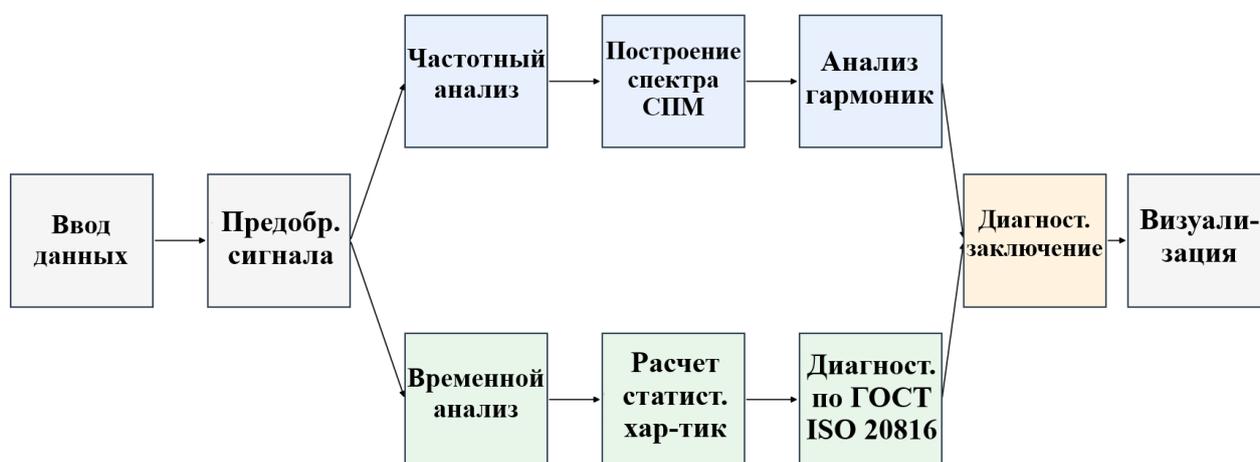


Рисунок 6 – Блок-схема работы программы

Ядро системы реализовано на языке Python с использованием научных библиотек SciPy и NumPy в среде PyCharm, обеспечивающих эффективные математические вычисления. Вычисления включают три последовательных этапа: предварительную обработку сигнала, спектрально-статистический анализ и диагностическую классификацию. На первом этапе применяется цифровая фильтрация Баттерворта 4-го порядка для устранения низкочастотных помех (ниже 5 Гц), вызванных вибрацией корпуса, и нормализация амплитуд по методу Z-score для компенсации вариативности датчиков. Алгоритм автоматически определяет частоту дискретизации по временным меткам данных, что исключает ошибки ручного ввода параметров и обеспечивает воспроизводимость результатов.

Спектральный анализ реализован через метод Уэлча, что обеспечивает оптимальное соотношение между частотным разрешением и вычислительной эффективностью. Как показано на рисунке 7 и 8, программа автоматически идентифицирует и маркирует гармоники вращательного движения гидравлического насосов, отмечая первые пять гармоник ($1\times$, $2\times$, $3\times$, $4\times$ и $5\times$ RPM) вертикальными линиями красного цвета с соответствующими подписями частот.

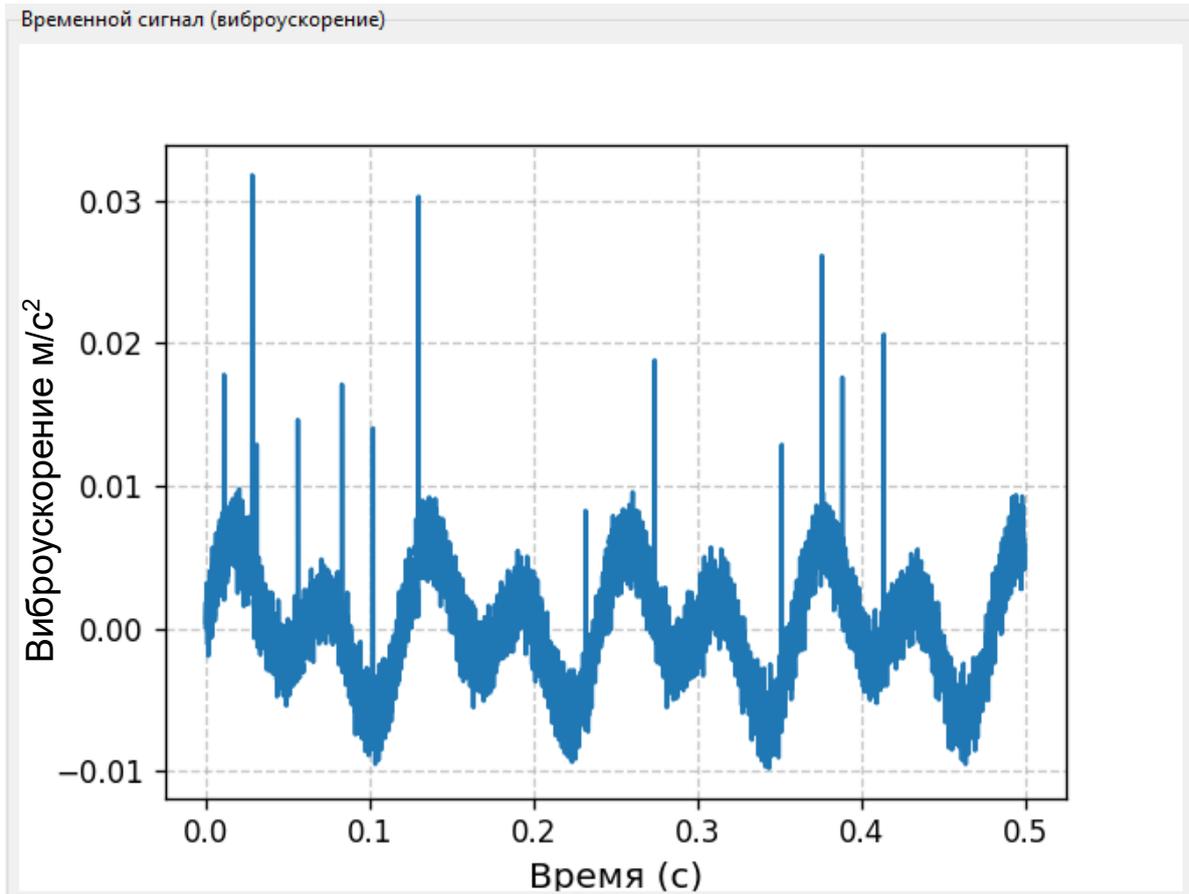


Рисунок 7 – Исходный сигнал виброускорения

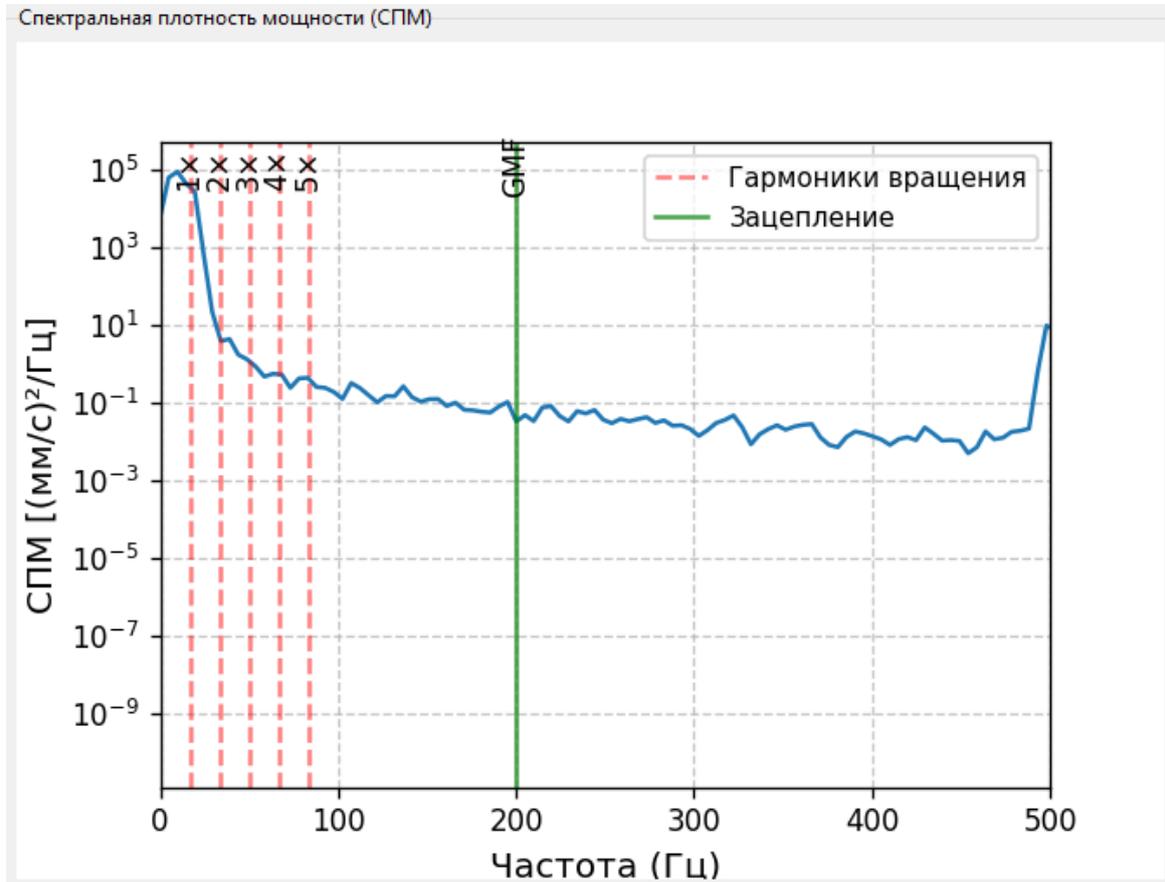


Рисунок 8 – Преобразованный сигнал виброускорения в спектральную плотность мощности

Для каждой гармоники рассчитывается энергетический вклад через коэффициент гармонических искажений. Параллельно вычисляются статистические параметры сигнала, среди которых среднеквадратичное значение, пик-фактор, эксцесс, асимметрия и импульсный фактор, доказавшие свою диагностическую значимость в экспериментальных исследованиях, в таблице 2 представлены все диагностические параметры, вычисляемые программным комплексом.

Таблица 2 – Диагностические параметры, вычисляемые программным комплексом

Параметр	Формула	Вид дефекта
Статистические		
Среднеквадратичное значение (СКЗ)	$СКЗ = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$	Общий уровень вибрации, дисбаланс, износ
Пик-фактор	$C_f = \frac{\max(x_i)}{СКЗ}$	Локальные дефекты (трещины, выкрашивание)
Эксцесс	$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{\sigma^4} - 3$	Ударные процессы, усталостные разрушения
Асимметрия	$S = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{\sigma^3}$	Наличие ударных процессов
Энергетические		
Площадь СПМ (общая энергия)	$A_{СПМ} = \int_0^{f_{max}} СПМ(f) df$	Общая вибрационная нагрузка
Энергия в полосе гармоник вращения	$E_h = \sum_{k=1}^5 \int_{kF_1 - \Delta f}^{kF_1 + \Delta f} СПМ(f) df$	Дисбаланс, несоосность
Энергия в полосе зацепления	$E_m = \int_{GMF - \delta f}^{GMF + \delta f} СПМ(f) df$	Износ зубьев шестерен
Энергия боковых полос	$E_{sb} = \sum_{k=1}^5 \left[\int_{kF_1 + GMF - \delta f}^{kF_1 + GMF + \delta f} + \int_{kF_1 - GMF - \delta f}^{kF_1 - GMF + \delta f} \right] СПМ(f) df$	Амплитудная модуляция, износ зубьев
Низкочастотная энергия	$E_{LF} = \int_0^{F_1} СПМ(f) df$	Дисбаланс, ослабление креплений
Высокочастотная энергия	$E_{HF} = \int_{1000}^{f_{max}} СПМ(f) df$	Дефекты подшипников, кавитация
Интегральные		
Индекс модуляции	$I_m = \frac{E_{sb}}{E_m + \epsilon}$	Равномерность износа зубьев
Комбинированный индекс дефектности	$I_d = w_1 \times \frac{СКЗ}{R_0} + w_2 \times \frac{C_f}{C_0} + w_3 \times \frac{K}{K_0} + w_4 \times \frac{E_{HF}}{E_{LF} + \epsilon}$	Интегральная оценка технического состояния

Диагностический модуль основан на адаптивной системе пороговых значений, которые динамически корректируются в зависимости от скорости вращения вала гидравлического насоса согласно экспериментально установленным зависимостям. Для формализации правил классификации разработана математическая модель, связывающая статистические параметры с типами дефектов. Например, комбинация повышенного эксцесса (>4.5) и высокого пик-фактора (>5.0) интерпретируется как признак усталостного разрушения подшипника, а рост энергии в высокочастотном диапазоне СПМ (>100 Гц) при одновременном снижении СКЗ свидетельствует о развитии кавитационных процессов.

Визуализационная подсистема обеспечивает многоуровневое представление результатов, что показано на рисунке 9.

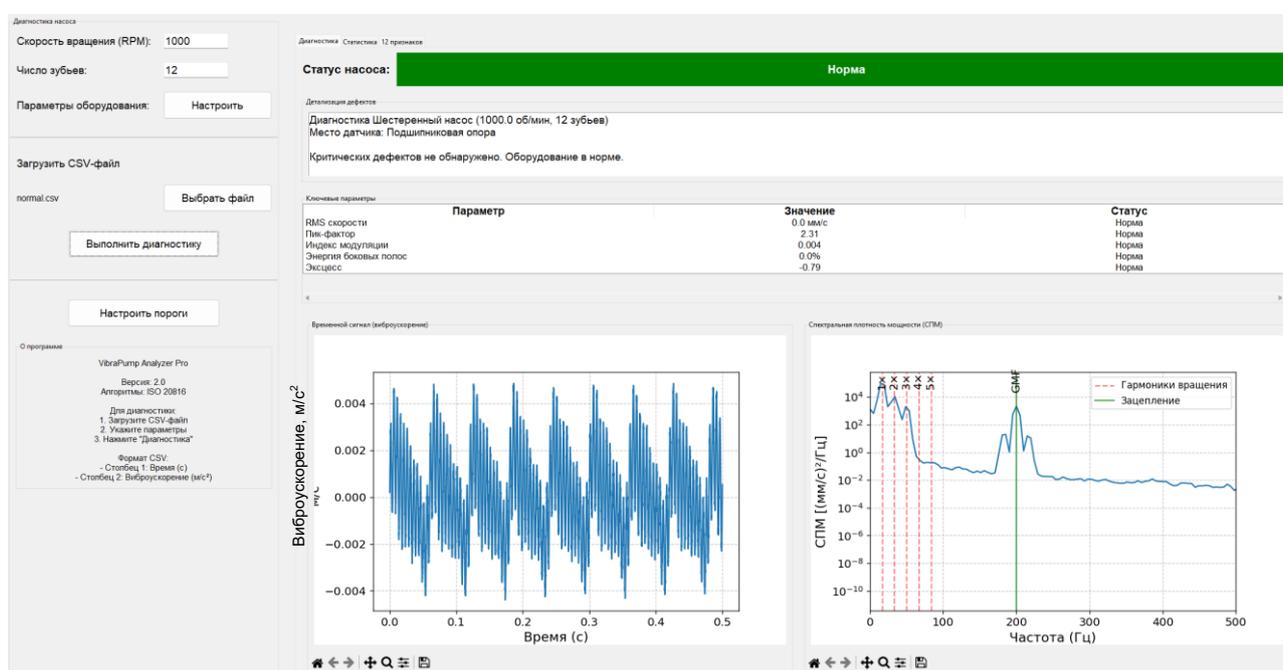


Рисунок 9 – Интерфейс программы

График временного сигнала реализован с инструментами интерактивного масштабирования, позволяющими детально исследовать переходные процессы. Спектральная плотность мощности вибросигнала отображается в логарифмическом масштабе с четкой маркировкой гармоник вращения. На рисунках 10 и 11 представлены примеры сравнительного анализа спектров для исправного и неисправного гидравлического насоса, наглядно демонстрирующий изменения в энергетическом распределении при развитии дефектов.

Оценка показала, что погрешность определения СКЗ не превышает 2,3 %, эксцесса – 3,1 %, площади СПМ – 4,7 % по сравнению с эталонными значениями. Точность классификации дефектов гидравлического насоса НШ-32А составила 93,5 % для износа подшипников (ИПТ), 93,5 % для износа зубьев шестерен (ИТЗ) и 91,8 % для комбинированных дефектов (КОМБ), пример результатов диагностирования с помощью программы представлен на рисунке 12.

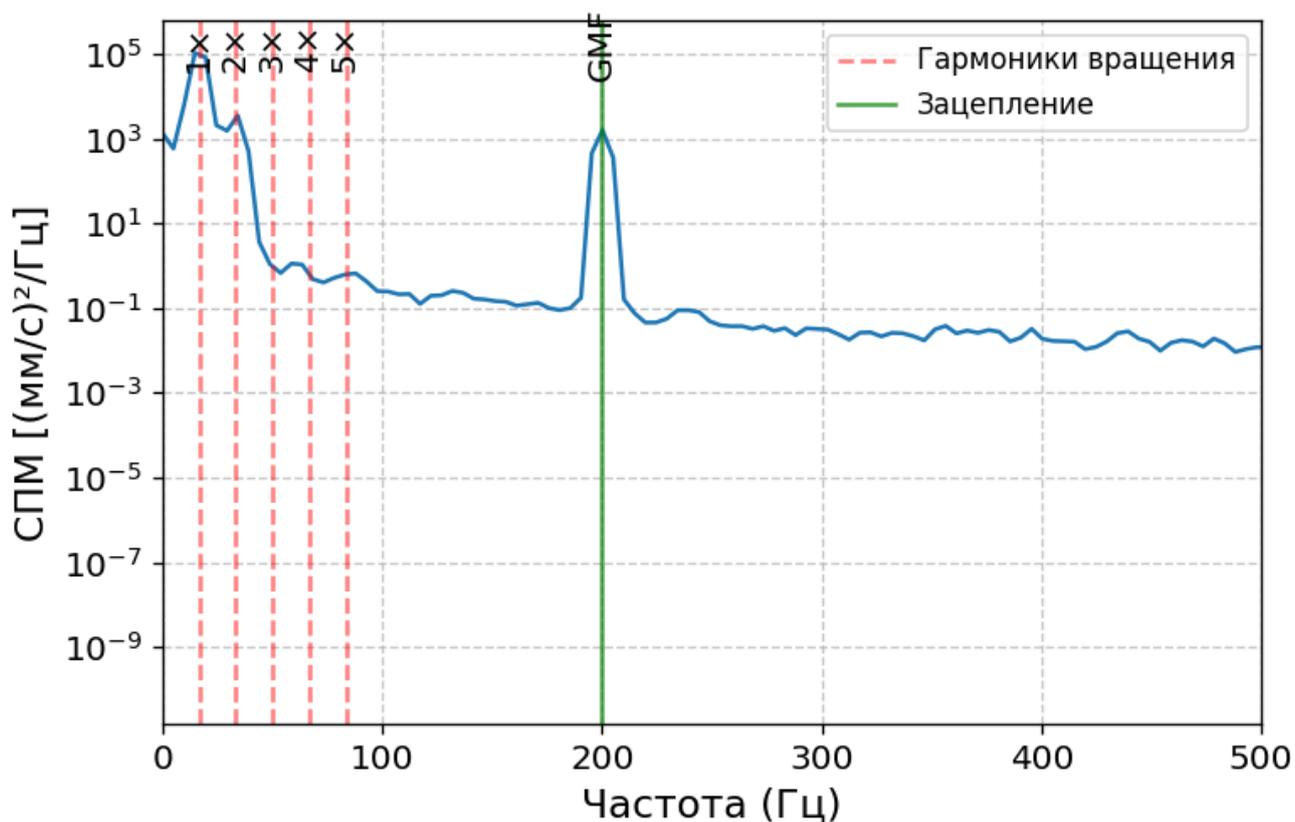


Рисунок 10 – График спектральной плотности мощности вибрационного сигнала исправного гидравлического насоса НШ-32А

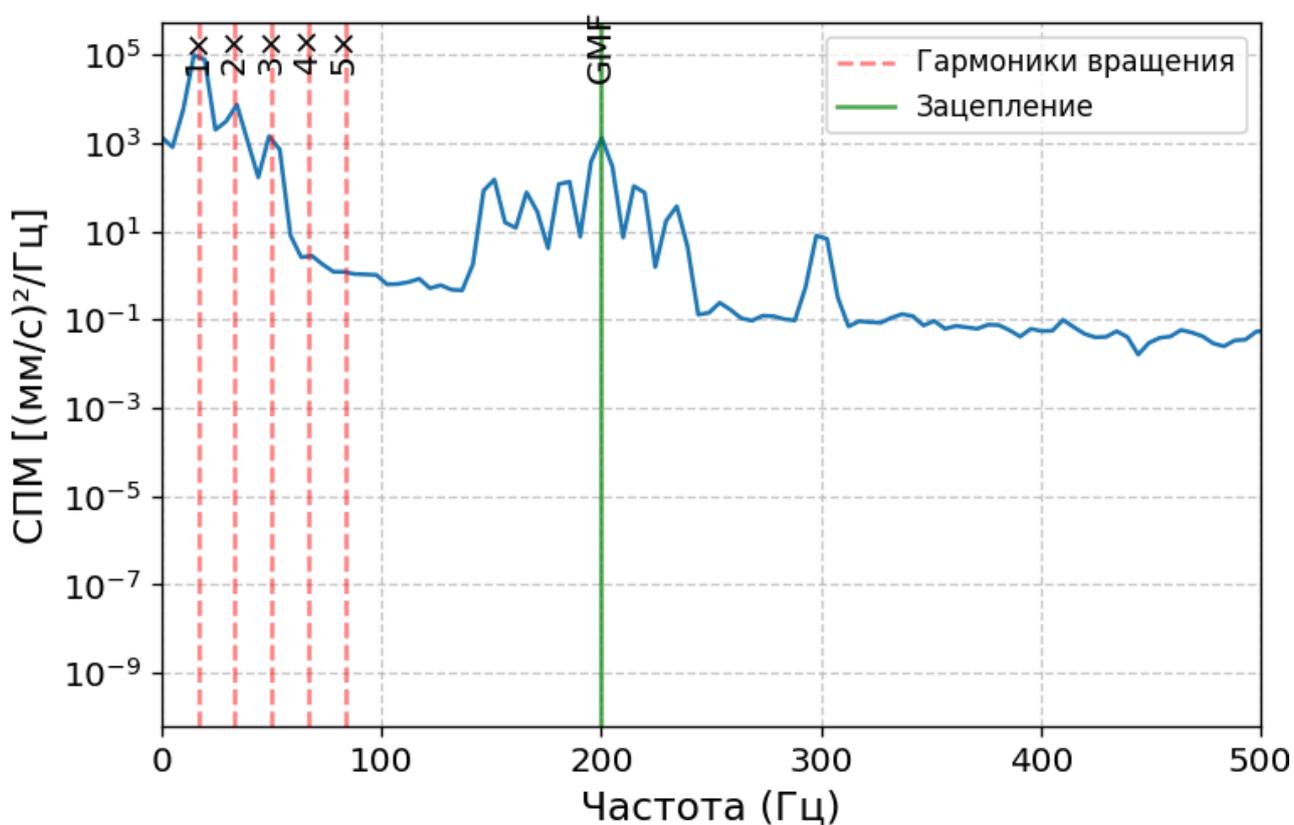


Рисунок 11 – График спектральной плотности мощности вибрационного сигнала неисправного гидравлического насоса НШ-32А

Статус насоса:	Норма
Детализация дефектов	
Диагностика Шестеренный насос (1000.0 об/мин, 12 зубьев) Место датчика: Подшипниковая опора	
Критических дефектов не обнаружено. Оборудование в норме.	

Рисунок 12 – Пример результата диагностирования

Для оценки диагностических возможностей программного комплекса проведен регрессионный анализ динамики пяти ключевых диагностических параметров в функции наработки: среднееквдратичного значения вибрации, энергии боковых полос, высокочастотной энергии, уровня гармоник и эксцесса. Все параметры демонстрируют высокую предсказуемость изменения, описываясь полиномиальными моделями второй степени со средним коэффициентом детерминации $R^2 = 0,902$. На Рисунке 13 в качестве примера представлена аппроксимация изменения среднееквдратичного значения вибрации, имеющего наиболее универсальный диагностический характер ($R^2 = 0,915$).

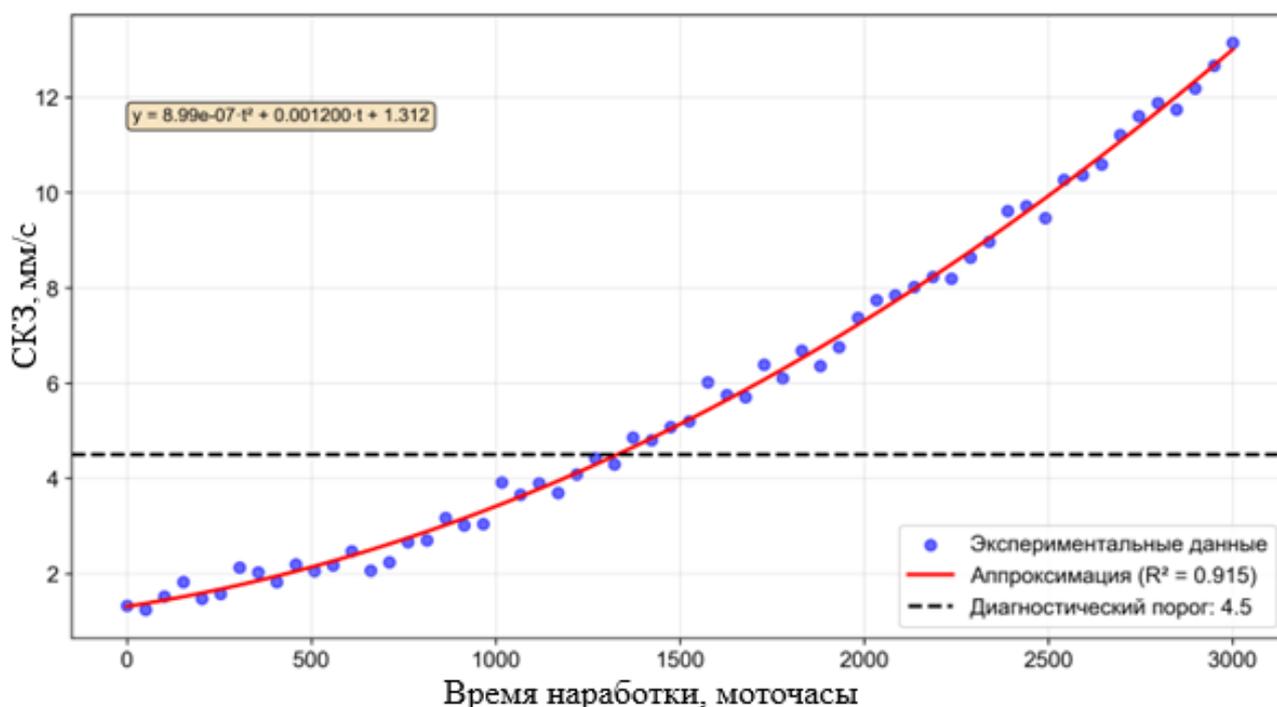


Рисунок 13 – Аппроксимация изменения среднееквдратичного значения вибрации

Использование квадратичной регрессии физически обосновано нелинейным характером процессов износа гидравлического шестеренного насоса НШ-32А. На основе комплексного анализа двенадцати параметров программный комплекс обеспечивает среднюю точность классификации дефектов 90 %.

Для обеспечения воспроизводимости результатов в программном комплексе вибродиагностирования гидравлических насосов

сельскохозяйственной техники реализованы функции экспорта данных: необработанных сигналов, параметров СПМ, статистических характеристик и диагностических заключений в формате CSV. Архитектура программного комплекса предусматривает возможность интеграции новых диагностических модулей через API, что открывает перспективы для адаптации программы для диагностирования других типов гидрооборудования сельскохозяйственной техники.

В пятой главе представлены результаты внедрения программного комплекса вибродиагностирования гидравлических насосов сельскохозяйственной техники в СПК «Стрелецкий» Тульской области.

Экономический эффект от внедрения разработанного комбинированного метода вибродиагностирования гидравлических насосов и программного комплекса, реализующий его в СПК «Стрелецкий» Тульской области на один трактор типа МТЗ-82 с наработкой 1500 мото-часов составил 237,9 тыс. рублей, за счет сокращения затрат на ремонт гидравлических насосов (27,9 тыс. руб.) и уменьшения времени на ожидание устранения последствий отказов гидравлических насосов на 60 часов (210 тыс. руб.). При этом, сокращение времени на устранение последствий отказов гидравлического насоса составило 15...45 %, а затраты на их устранение стали меньше на 30...70 %.

Проведенное экономическое обоснование в СПК «Стрелецкий» Тульской области подтверждает, что разработанный комбинированный метод вибродиагностирования гидравлических насосов повышает эффективности эксплуатации сельскохозяйственной техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен комплексный анализ, систематизация и критическая оценка современных методов вибродиагностирования технических систем. Для условий нестационарных режимов и наличия шумов обоснован и предложен к применению следующий комплекс методов и признаков: для обработки сигналов – анализ спектральной плотности мощности (СПМ); для извлечения признаков – набор статистических (среднеквадратичное значение, пик-фактор, эксцесс, асимметрия, импульсный фактор) и энергетических параметров (общая энергия, энергия в гармонических и боковых полосах, высокочастотная энергия, комбинированный индекс дефектности); для классификации – подход на основе пороговых значений, скорректированных под скорость вращения и тип оборудования.

2. Разработан адаптивный алгоритм вибродиагностирования гидравлических насосов сельскохозяйственной техники, который комбинирует анализ сигнала во временной и частотной областях, интеллектуально отбирает ключевые диагностические признаки вибросигнала, классифицирует состояние гидравлического насоса по стандарту ГОСТ ISO 20816 и детализирует дефекты гидравлических насосов по спектральным параметрам.

3. Проведенное тестирование в УНПЦ садоводства и овощеводства имени В.И. Эдельштейна ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева разработанного комбинированного метода вибродиагностирования для оценки технического состояния гидравлических насосов, на примере насоса НШ-32А трактора МТЗ-82.1 с использованием пьезоэлектрического акселерометра Metrix SA6200A и анализатора вибросигналов X-Viber подтвердило его адекватность в зависимости от разных состояний тестируемого гидравлического насоса.

4. Разработан программный комплекс для автоматизированного метода вибродиагностирования гидравлических насосов на основе комбинированного анализа временных, частотных и статистических характеристик сигнала. Погрешность оценки диагностических параметров определялась сопоставлением с результатами измерений анализатором SpectraPro-4 и не превысила: СКЗ – 2,3 %, пик-фактор – 3,1 %, эксцесс – 3,5 %, энергия СПМ – 4,7 %, что соответствует требованиям ГОСТ ISO 20816.

5. Анализ точности диагностирования разработанного программного комплекса подтвердил его эффективность при обнаружении дефектов гидравлических насосов. На основе статистического анализа достигнута точность классификации: исправное состояние – 98 %, износ зубьев шестерен – 92 %, износ подшипников – 90 %, комбинированные дефекты – 88 %. Средняя точность диагностирования дефектов составляет 90,0 %. Разработанный комплекс рекомендован к использованию при диагностировании гидравлических систем сельскохозяйственной техники, при проведении технического обслуживания ТО-1 тракторов, на предприятиях технического сервиса машин и оборудования АПК России.

6. Внедрение результатов исследования в СПК «Стрелецкий» Тульской области подтвердило эффективность разработанного комбинированного метода вибродиагностирования гидравлических насосов сельскохозяйственной техники, при этом время на устранение последствий отказов гидравлических насосов сократилось на 15...45 %, а потери на ожидание их устранения на 30...70 %. Годовой экономический эффект от внедрения разработанного комбинированного метода вибродиагностирования гидравлических насосов на один трактор типа МТЗ-82 с наработкой 1500 мото-часов составил 237,9 тыс. рублей, за счет сокращения затрат на ремонт гидравлических насосов (27,9 тыс. руб.) и уменьшения времени на ожидание устранения последствий отказов гидравлических насосов около 60 часов (210 тыс. рублей).

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Рекомендуется использование разработанного комбинированного метода вибродиагностирования и программного комплекса при эксплуатации сельскохозяйственной техники на предприятиях АПК. Результаты работы могут использоваться в учебных материалах для подготовки специалистов по направлениям 35.03.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.05.01 «Наземные транспортно-

технологические средства» в образовательных учреждениях Российской Федерации.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием разработанного комбинированного метода вибродиагностирования гидравлических насосов, включая: создания алгоритмов прогнозирования остаточного ресурса на основе анализа временных рядов диагностических параметров; адаптацию метода для других типов гидравлического оборудования; создание программного обеспечения с расширенными возможностями сбора и анализа данных.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Ступин, О. А.** Методика вибрационной диагностики гидравлической системы технологических машин при выполнении сельскохозяйственных работ на примере шестеренного насоса НШ-32А / О. А. Ступин, А. В. Шитикова, А. С. Апатенко // *Агроинженерия*. – 2025. – Т. 27, № 6. – С. 35-44. – DOI 10.26897/2687-1149-2025-6-35-44.
2. Севрюгина, Н. С. Модульный принцип составления технологических карт для повышения качества ремонта спецтехники / Н. С. Севрюгина, А. Ю. Фомин, **О. А. Ступин** // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. – 2025. – № 11. – С. 27-34. – DOI 10.31044/1684-2561-2025-0-11-27-34.
3. **Ступин, О. А.** Вибродиагностика как современный метод контроля и диагностирования гидроприводов технологических машин / О. А. Ступин, С. И. Некрасов, Р. Г. Кучинский // *Международный технико-экономический журнал*. – 2022. – № 5-6. – С. 75-86. – DOI 10.34286/1995-4646-2022-86-5/6-76-87.
4. **Ступин, О. А.** Информационный банк параметрических данных для контроля ресурсного нагружения элементов технических систем технологических машин / А. С. Апатенко, Н. С. Севрюгина, А. В. Миронов, О. А. Ступин // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. – 2021. – № 7. – С. 24-29. – DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-7-24-29.

Публикации в других научных изданиях

5. Скворцов, В. В. Исследование ремонтпригодности штоков гидроцилиндров технологических машин / В. В. Скворцов, **О. А. Ступин**, А. С. Апатенко // *Будущее науки - 2024 : Сборник научных статей 11-й Международной молодежной научной конференции*. В 5-ти томах, Курск, 18–19 апреля 2024 года. – Курск: ЗАО "Университетская книга", 2024. – С. 175-177.
6. Ступин, О. А. Проблема обработки сигналов при использовании вибрационного метода диагностики элементов гидросистем строительных и дорожных машин во время их эксплуатации / **О. А. Ступин**, А. С. Апатенко, С. И. Некрасов // *Транспортные и транспортно-технологические системы : Материалы Международной научно-технической конференции*, Тюмень, 13–14

апреля 2023 года / Отв. редактор П.В. Евтин. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. – С. 194-198.

7. Ступин, О. А. Вариативность информационного потока сигналов при мониторинге состояния машин по параметрам вибраций / **О. А. Ступин** // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы : Сборник докладов 27-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 95-летию подготовки инженеров-механиков МИСИ-МГСУ, Москва, 26–27 апреля 2023 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. – С. 343-345.

8. Ступин, О. А. Информационная чистота параметров вибрации в гидроприводах технологических машин / **О. А. Ступин**, А. С. Апатенко // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : Материалы X Международной научно-практической конференции, Саратов, 16–17 мая 2023 года. – Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. – С. 452-456.

9. Ступин, О. А. Кепстральный анализ как современный метод обработки вибрационных сигналов при диагностике элементов транспортно-технологических машин / **О. А. Ступин**, Р. Г. Кучинский // Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25–26 января 2023 года. Том 2. – Москва: ООО «Сам полиграфист», 2023. – С. 345-349.

Авторские свидетельства, патенты, лицензии

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025695365 Российская Федерация. Интерактивный тренажер диагностики радиально-поршневых гидронасосов : заявл. 28.11.2025 : опубл. 10.12.2025 / И. Н. Кравченко, В. М. Корнеев, Д. И. Петровский [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025690844 Российская Федерация. Интерактивный тренажер диагностики пластинчатых гидронасосов : заявл. 16.10.2025 : опубл. 11.11.2025 / М. А. Карапетян, С. С. Гусев, Т. В. Остапчук [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689770 Российская Федерация. Интерактивный тренажер диагностики шестеренных гидронасосов : заявл. 16.10.2025 : опубл. 30.10.2025 / А. С. Апатенко, Н. С. Севрюгина, А. Ю. Фомин, **О. А. Ступин** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684170 Российская Федерация. AxialVibeAnalyst : заявл. 11.08.2025 : опубл. 11.09.2025 / **О. А. Ступин**.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685795 Российская Федерация. VibraPump Analyzer : заявл. 10.09.2025 : опубл. 26.09.2025 / **О. А. Ступин**.

Учебные пособия

15. Надежность и техническая безопасность транспортных и транспортно-технологических машин: учебное пособие / Н. С. Севрюгина, А. С. Апатенко, А. Ю. Фомин, С. И. Некрасов, **О. А. Ступин**. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Учебно-методический центр "Триада", 2025. – 177 с. – ISBN 978-5-9546-0122-0.

16. Agricultural vehicles. – Москва: ООО "Издательство "Спутник+", 2023. – 177 p. – ISBN 978-5-9973-6734-3.

Монография

17. Научно-аналитический обзор технологий ресурсосбережения при эксплуатации технических средств в АПК / А. С. Апатенко, И. Н. Кравченко, Н. С. Севрюгина, Л.А. Журавлева, А. Ю. Фомин С. И. Некрасов, **О. А. Ступин**. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью "Амирит", 2023. – 152 с. – ISBN 978-5-00207-449-5.