

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.22

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-35-44>

Методика вибрационной диагностики гидравлической системы технологических машин при выполнении сельскохозяйственных работ на примере шестеренного насоса НШ-32А

О.А. Ступин¹✉, А.В. Шитикова², А.С. Апатенко³^{1,2,3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ stupin@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-1466-572X>² plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430>³ a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>

Аннотация. Традиционная система технического обслуживания и ремонта гидравлических систем технологических машин не позволяет прогнозировать внезапные отказы. Для перехода к обслуживанию по фактическому состоянию необходимо разработать методику, позволяющую в режиме реального времени выявлять дефекты деталей и сборочных единиц. Оценка состояния элементов гидросистем можно эффективно выполнять на основе вибрационного анализа. Исследования проведены с целью разработки и апробации методики вибрационной диагностики гидравлических систем технологических машин на основе спектрального анализа плотности мощности вибросигнала. Предложенная методика включает в себя этапы: получение исходных данных с датчика контролируемых механизмов; предварительная обработка данных и выделение признаков для снижения размерности необработанных данных и получения полезной информации из сигнала; СПМ-анализ и расчет пик-фактора и эксцесса; диагностическая классификация неисправностей, выявление дефектов; визуализация данных в режиме реального времени. Для автоматизированной обработки вибросигналов разработан программный комплекс. Проведенный анализ по показателю спектральной плотности мощности вибросигнала показал эффективность идентификации дефектов при различных режимах работы. Апробацию методики проводили на шестеренном гидронасосе НШ-32А при трех рабочих режимах: 1000, 1500 и 2000 об/мин. При этом выделяли информативные признаки в вибросигнале для диагностирования четырех состояний насоса (исправное, износ подшипника, износ шестерни, комбинированный дефект) с точностью 90...93%. Применение методики контроля технического состояния гидравлических систем технологических машин позволило диагностировать появление внезапных отказов с высокой точностью. В дальнейших исследованиях планируется установить зависимость изменения виброускорения на величину объемного КПД шестеренного насоса.

Ключевые слова: вибродиагностика; гидронасос; диагностика неисправностей; спектральный анализ; дефекты; неисправности; КПД шестеренного насоса; методика вибрационной диагностики

Для цитирования: Ступин О.А., Шитикова А.В., Апатенко А.С. Методика вибрационной диагностики гидравлической системы технологических машин на примере шестеренного насоса НШ-32А // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 6. С. 35-44. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-35-44>

ORIGINAL ARTICLE

Vibration diagnostics method applied to the hydraulic equipment of technological machines: a case of a gear pump NSh-32A

O.A. Stupin¹, A.V. Shitikova², A.S. Apatenko³^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ stupin@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-1466-572X>² plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430>³ a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>

Abstract. The conventional system of maintenance and repair of hydraulic systems in technological (or industrial) machines cannot predict sudden failures. Transition to condition-based maintenance requires developing a methodology for real-time detection of defects in parts and assemblies. The condition of hydraulic system components can be more effectively assessed with the vibration analysis. The research aimed to develop and test a methodology for vibration diagnostics of hydraulic systems in technological machines based on the spectral

analysis of the spectral power density of a vibration signal. The proposed methodology includes the following stages: obtaining raw data from sensors of the monitored mechanisms; preliminary data processing and feature selection to reduce the dimensionality of the raw data and obtain useful information from the signal; SPM-analysis and calculation of the peak factor and kurtosis; diagnostic classification of faults, defect identification; and real-time data visualization. The authors have developed a software package for automated processing of vibration signals. The analysis based on measuring the spectral density of vibration signal power demonstrated the effectiveness of defect identification under various operating modes. The methodology was tested on an NSh-32A gear-type hydraulic pump at three operating modes: 1000, 1500, and 2000 rpm. Informative features were detected from the vibration signal for diagnosing four pump conditions (serviceable, worn bearing, worn gear, and combined defects) with an accuracy of 90 to 93%. The developed methodology for controlling the hydraulic systems of technological machines can diagnose sudden failures with high accuracy. Future research plans to establish the relationship between the change in vibration acceleration and the volumetric efficiency of the gear pump.

Keywords: vibration diagnostics; hydraulic pump; fault diagnosis; spectral analysis; defects; malfunctions; gear pump efficiency; vibration diagnostic technique

For citation: Stupin O.A., Shitikova A.V., Apatenko A.S. Vibration diagnostics method applied to the hydraulic equipment of technological machines: a case of a gear pump NSh-32A. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):35-44 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-35-44>

Введение

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 7 февраля 2025 года)) и задачами, определенными в рамках реализации Государственной программы развития сельского хозяйства, ключевым направлением является обеспечение технологической независимости и конкурентоспособности агропромышленного комплекса России. Достижение этих стратегических целей напрямую связано с поддержанием высокого уровня технической готовности и надежности машинно-тракторного парка. Гидравлические системы являются основным силовым элементом большинства современных технологических машин, включая широкий парк сельскохозяйственной техники. Эти системы обеспечивают выполнение критически важных операций – от подъема навесного оборудования и поворота рулевых механизмов до привода рабочих органов посевных и уборочных агрегатов. Надежность гидравлики обеспечивает бесперебойность технологических циклов в растениеводстве, где простои техники в периоды посевной или уборочной кампании ведут к критическим нарушениям сроков выполнения агротехнических задач и как следствие, значительным экономическим потерям. При этом традиционная система планово-предупредительного обслуживания демонстрирует низкую эффективность, не позволяя прогнозировать внезапные отказы. В этих условиях развитие методов анализа данных и средств диагностики, в том числе вибродиагностики, создает возможность для перехода к интеллектуальному

мониторингу технического состояния в режиме реального времени. Вместе с тем, существующие методы вибродиагностики не обеспечивают необходимой точности при работе в нестационарных режимах, что особенно актуально для мобильной сельскохозяйственной техники, работающей в условиях ограничения сроков выполнения сельскохозяйственных работ.

При эксплуатации в нестационарных режимах, в условиях высокой запыленности и вибрационных нагрузках ресурс гидравлических насосов существенно снижается.

Гидравлическая система применяется практически в каждой технологической машине. Гидравлические системы обладают высокой энергонасыщенностью, способны к плавному регулированию скорости и усилий в широком диапазоне, устойчивы к ударным нагрузкам. Надежная и эффективная работа гидросистемы обеспечивает непрерывность технологического процесса.

Диагностирование элементов гидравлической системы в режиме реального времени позволяет контролировать ее техническое состояние, выявлять дефекты и неисправности для дальнейшего технического обслуживания и ремонта.

Вибрационный метод – один из актуальных методов диагностики гидросистем [1-3], позволяющий по параметрам вибраций определять техническое состояние элементов гидросистем технологических машин. Метод позволяет оперативно и дистанционно проводить диагностику в режиме реального времени, однако очень сложно обрабатывать вибросигналы и выявлять полезную диагностическую информацию.

Можно ожидать, что применение методики контроля технического состояния гидравлических

систем технологических машин по параметрам вибрации с использованием разработанной программы ЭВМ обеспечит высокую точность диагностики.

Цель исследований: разработка методики адаптивной системы вибрационного диагностирования гидросистем технологических машин при выполнении сельскохозяйственных работ.

Материалы и методы

Рассмотрели основные технологии и методы мониторинга и теоретико-методологические предпосылки проблем мониторинга и диагностирования технических систем. Исследовали информационные свойства и диагностические признаки вибрационных сигналов, генерируемых шестеренным гидравлическим насосом. Классифицировали методы диагностики неисправностей по трем категориям: методы, основанные на режиме, знаниях и сигналах. Признаки неисправностей предложили структурировать по трем областям: временной, частотной и частотно-временной.

Применили аналитический инструментальный мониторинг обработки данных технического состояния оборудования по параметрам вибраций. Разработали программную платформу для автоматизированного анализа вибрационных сигналов с использованием СПМ-анализа.

Апробацию методики проводили на шестеренном гидронасосе НШ-32А при трех рабочих режимах: 1000, 1500 и 2000 об/мин. В качестве гидравлической жидкости использовали масло И-20А. Датчиком служил пьезоэлектрический акселерометр (модель Metrix SA6200A), установленный на корпусе насоса (рис. 1). Характеристики датчика представлены в таблице 1.

Акселерометр подключен к блоку формирования сигнала (анализатору X-Viber FFT), где сигнал проходит через усилитель заряда и аналого-цифровой преобразователь. Сигнал вибрации в цифровом виде подается на компьютер через порт USB. Программное обеспечение SpectraPro-4, прилагаемое к блоку формирования сигналов, используется для записи сигналов непосредственно во вторичную память компьютера. Затем сигнал считывается из памяти и обрабатывается для извлечения БПФ спектра вибрации. Максимальная частота сигнала составляла 1 кГц.

Вибрационные сигналы обрабатывали с использованием классического БПФ-метода (быстрое преобразование Фурье) и спектральной плотности мощности СПМ(f), рассчитываемой по формуле:

$$\text{СПМ}(f) = \frac{2|X(f)|^2}{(t_2 - t_1)},$$

где $|X(f)|$ – амплитудный спектр сигнала; $(t_2 - t_1)$ – длительность сигнала.

Таблица 1

Характеристики акселерометра
для измерения виброускорения

Table 1

Characteristics of an accelerometer used
for measuring vibration acceleration

Параметр, размерность	Значение
Диапазон измеряемых частот, Гц	0,5...10000
Температурный диапазон, °C	–54...+121
Резонансная частота, кГц	13
Материал корпуса	Нержавеющая сталь
Материал чувствительного элемента	Кварц
Масса, г	91



Рис. 1. Расположение датчика на корпусе насоса

Fig. 1. Sensor placement on the pump casing

При сравнении методов выявлены существенные погрешности БПФ-метода при нестационарных режимах, тогда как СПМ-анализ обеспечивал стабильное выделение дефект-специфических признаков.

При анализе БПФ-методом спектры идентичных дефектов демонстрировали значительную вариабельность, затрудняя однозначную диагностику. В отличие от него 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.

Результаты и их обсуждение

Усложнение функциональности современных сельскохозяйственных машин сопровождается повышенными требованиями к их надежности и эффективности эксплуатации. В этих условиях традиционные методы планово-предупредительного

обслуживания оказываются неэффективными. Развитие методов анализа данных и средств диагностики создает возможность для перехода к интеллектуальному мониторингу технического состояния в режиме реального времени [4]. Общая эволюция концепций систем мониторинга, отражающая этот технологический переход, представлена на рисунке 2.

Каждая новая концепция систем мониторинга содержит основные элементы предыдущих. Научной базой первого поколения систем мониторинга являются физические процессы, последующие поколения интегрируют разработки из области информатики, сенсорики и теории управления.

Концепция системы обслуживания по состоянию ориентирована на данные режимов работы оборудования для определения состояния машин и механизмов и текущего состояния оборудования (неисправность/отказ), планирования ремонтно-технических воздействий и предварительного технического обслуживания (ТО).

В общем случае систему обслуживания по состоянию можно рассматривать для уменьшения неопределенности работ по ТО [5]. Система непрерывного мониторинга позволяет выявлять и решать проблемы заранее, до возникновения неисправностей.

Система обслуживания по состоянию шестеренных насосов ориентирована на диагностику конкретных компонентов – таких, как подшипники и/или

шестерни, путем анализа изменений их вибрации. Система мониторинга целостности конструкции оценивает объект как единое целое с учетом влияния внешней среды. Отличие объектов оценки определяет различие датчиков: в системе обслуживания применяются внешние датчики, а в системе мониторинга – интегрированные. Несмотря на различия вибродиагностика остается общим эффективным методом для обеих систем.

В сложных технических системах у сопрягаемых деталей со временем меняется геометрия поверхности взаимодействия, что в свою очередь вызывает повышение вибраций. Величина вибраций нормируется и ограничивается в соответствии с функциональной эффективностью, ресурсом и сроком службы агрегата.

В вибродиагностике о состоянии оборудования сообщает виброакустический сигнал, содержащий информацию о колебательных процессах и акустическом шуме^{1,2}. Вибрационный сигнал имеет сложную форму, и проводить его анализ на работающей машине весьма сложно. Однако если из широкополосного вибрационного сигнала с помощью полосового частотного фильтра выделить информативный диапазон частот, то форма сигнала позволит получить информацию и зафиксировать дефектное состояние контролируемого сопряжения³ (рис. 3).

При разработке методик контроля и диагностирования наиболее сложными являются поиск



Рис. 2. Эволюция концепций систем мониторинга

Fig. 2. Evolution of monitoring system concepts

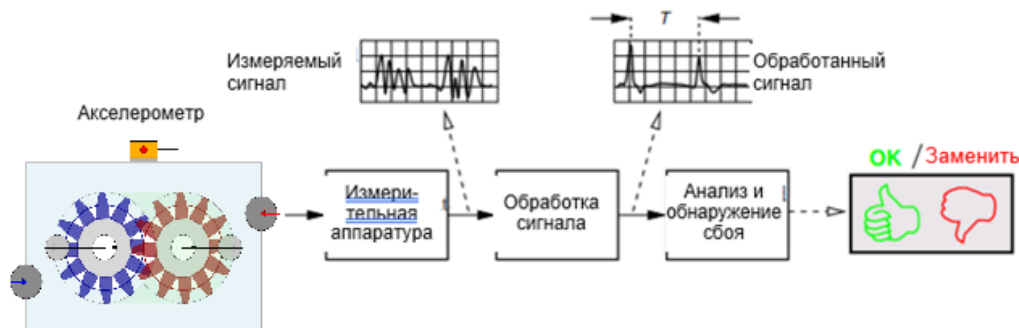


Рис. 3. Схема процесса вибродиагностики

Fig. 3. Vibration diagnostics process diagram

¹ Балицкий Ф.Я. Современные методы вибрационной диагностики машин и конструкций. М.: МЦНТИ, 2015. 115 с.

² Ширман А., Соловьев А. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М.: Спектр-инжиниринг, 1996. 252 с.

³ Там же.

и выделение из вибрационного сигнала информативных диагностических признаков дефектов, по которым в дальнейшем выстраиваются эталоны нормального и неисправного состояний для принятия решения о принадлежности текущего технического состояния объекта диагностирования тому или иному классу состояний.

Сложность выделения вибрационного сигнала обусловлена зависимостью параметров вибрации от большого количества факторов, оказывающих влияние на возникновение неисправности, а также факторных признаков идентификации их видов [6].

В соответствии с ГОСТ^{4,5,6} обработка данных включает в себя сбор исходных данных, фильтрацию «белого-серого» шума и других сигналов, не представляющих интерес для последующего анализа, и представление сигналов в форме, требуемой для проведения диагностики.

Большинство классических методов анализа вибраций обеспечивает точные результаты только для стационарных сигналов [7]. В этой связи для анализа нестационарных сигналов и обработки большого количества переменных применяются современные технологии: распределение Вигнера-Вилле (РВВ), метод эмпирической модовой декомпозиции (ЭМД) и вейвлет-преобразования (ВП). Unal и соавт [8] предложили несколько методов выделения признаков с помощью анализа огибающей, поддерживаемого преобразованием Гильберта и быстрым преобразованием Фурье.

Исходные характеристики неисправности, полученные современными методами обработки сигналов, содержат определенную избыточность (представлены в нелинейной, неоднородной и рассредоточенной форме). При использовании таких сигналов скорость обнаружения неисправностей может быть низкой. Следовательно, на этапе первичной обработки данных необходимо произвести отбор наиболее отличительных признаков неисправности с помощью методов интеллектуального анализа.

Методы выделения признаков можно структурировать по трем областям: временной, частотной и частотно-временной. Например, методы выделения признаков во временной области включают в себя статистический анализ, который учитывает среднее и стандартное отклонение, среднеквадратическое

значение (Root Mean Square, RMS), асимметрию, эксцесс, максимум, минимум и пик-фактор. В общем случае для диагностики неисправности нет необходимости использовать все признаки.

Эффективность методики диагностики в значительной степени зависит от качества используемых признаков. В случае переменных условий работы признаки в явной или неявной формах должны содержать всю информацию об этих вариациях.

Пример процедуры извлечения признаков представлен на блок-схеме (рис. 4).

Методика оценки состояния элементов гидросистем технологических машин на основе вибрационного анализа включает в себя:

- получение исходных данных с датчика контролируемых механизмов;
- предварительную обработку данных и выделение признаков для снижения размерности необработанных данных и получения полезной информации из сигнала;
- СПМ-анализ и расчет пик-фактора и эксцесса;
- диагностическую классификацию неисправностей, выявление дефектов;
- визуализацию данных в режиме реального времени.

Для диагностики шестеренных насосов с использованием СПМ-анализа разработана программная платформа, представляющая собой инструментарий, формализующий вычислительные алгоритмы для автоматизированного анализа вибрационных сигналов. Основной целью разработки стала экспериментальная верификация эффективности предложенного метода в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

Архитектура программного комплекса построена по модульному принципу, где каждый компонент соответствует этапам диагностического процесса.

Ядро системы реализовано на языке Python с использованием научных библиотек SciPy и NumPy (которые входят в стандартный набор дополнений в платформе программирования PyCharm на языке программирования Python), обеспечивающих эффективные математические вычисления. Вычисления включают в себя три последовательных этапа: предварительную обработку сигнала, спектрально-статистический анализ и диагностическую классификацию. На этапе обработки сигнала

⁴ГОСТ Р ИСО 13374-1-2011. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 1. Общее руководство. М.: Стандартинформ, 2018. 20 с.

⁵ГОСТ Р ИСО 13374-2-2011. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 2. Обработка данных. М.: Стандартинформ, 2018. 42 с.

⁶ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. М.: Стандартинформ, 2018. 36 с.

применяются 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 реализовали через метод Уэлча с использованием окна Хэннинга длиной 1024 отсчета, что обеспечило оптимальное соотношение между частотным разрешением и вычислительной эффективностью. Программа автоматически идентифицирует и маркирует гармоники вращательного движения, отмечая первые 5 гармоник вертикальными линиями красного цвета с соответствующими подписями частот (рис. 5).

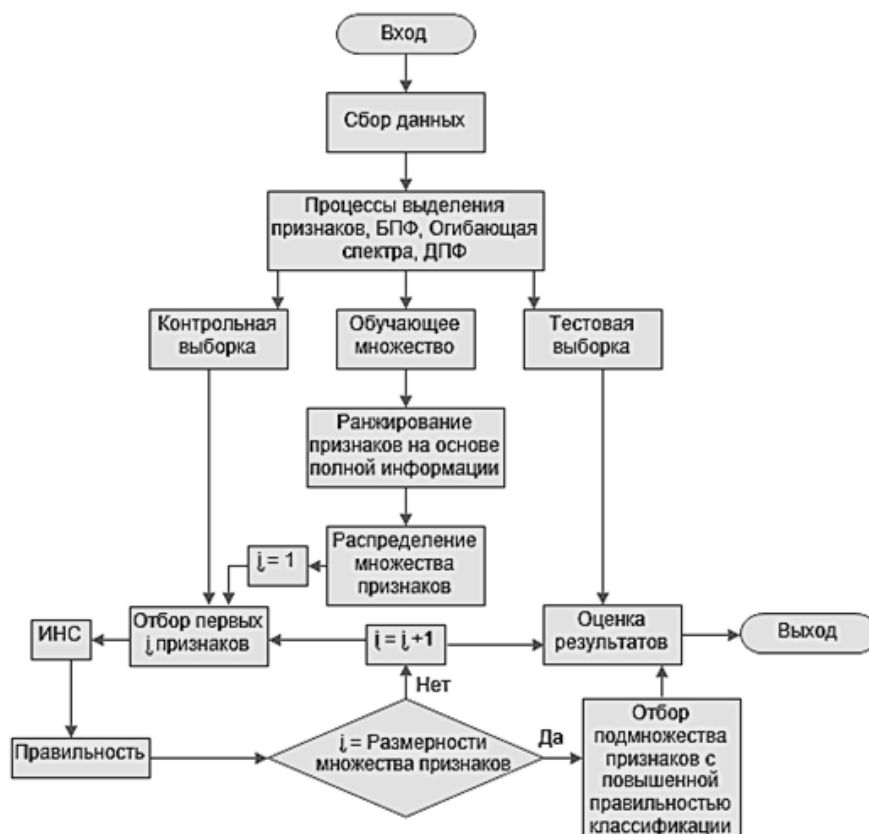


Рис. 4. Алгоритм отбора признаков, выделенных из сигнальной информации вибродиагностики

Fig. 4. Feature selection algorithm based on vibration diagnostic signal information

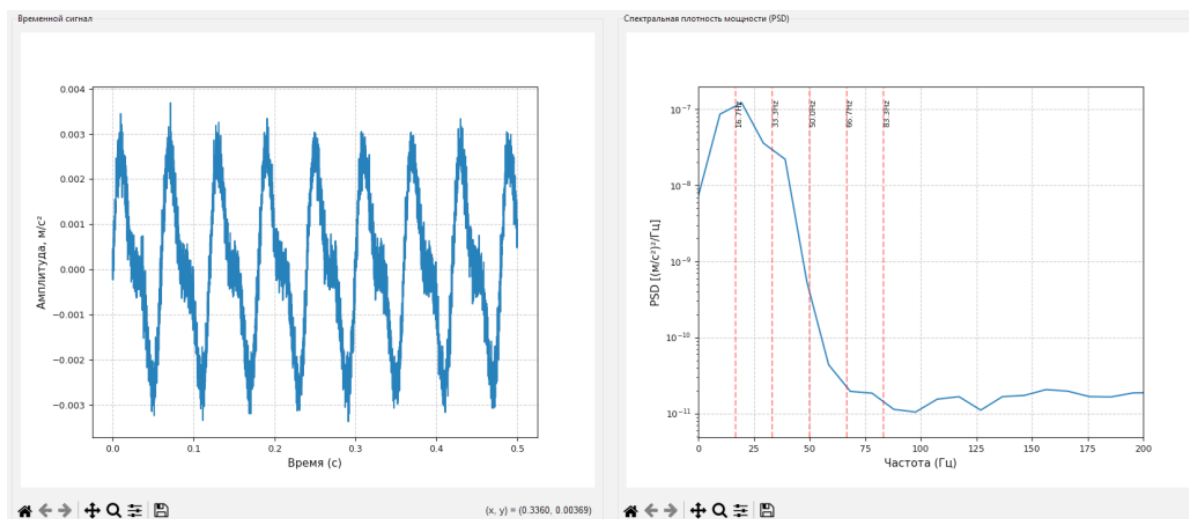


Рис. 5. Демонстрация преобразования вибросигнала в спектральную плотность мощности

Fig. 5. Demonstration of vibration signal transformation into spectral power density

Для каждой гармоники рассчитывается энергетический вклад через коэффициент гармонических искажений. Параллельно вычисляются статистические параметры сигнала⁷: среднеквадратичное значение (статус «Норма» при 2,30 мм/с); пиковое значение (статус «Норма» при 3,69 мм/с); пик-фактор (статус «Норма» при 1,61); эксцесс (статус «Норма» при 2,06); асимметрия и импульсный фактор, доказавшие свою диагностическую значимость в экспериментальных исследованиях.

Диагностический модуль основан на адаптивной системе пороговых значений, которые динамически корректируются в зависимости от скорости вращения вала шестеренного 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 среднеквадратичного значения свидетельствует о развитии кавитационных процессов. Каждое диагностическое правило имеет коэффициент достоверности, рассчитанный на основе байесовского подхода к анализу экспериментальных данных.

Визуализационная подсистема обеспечивает многоуровневое отображение результатов и представлена в интерфейсе программного окна (рис. 6).

Архитектура системы предусматривает возможность интеграции новых диагностических модулей через API, что открывает перспективы для адаптации программы при диагностике других типов оборудования гидравлических систем технологических машин⁸ [9].

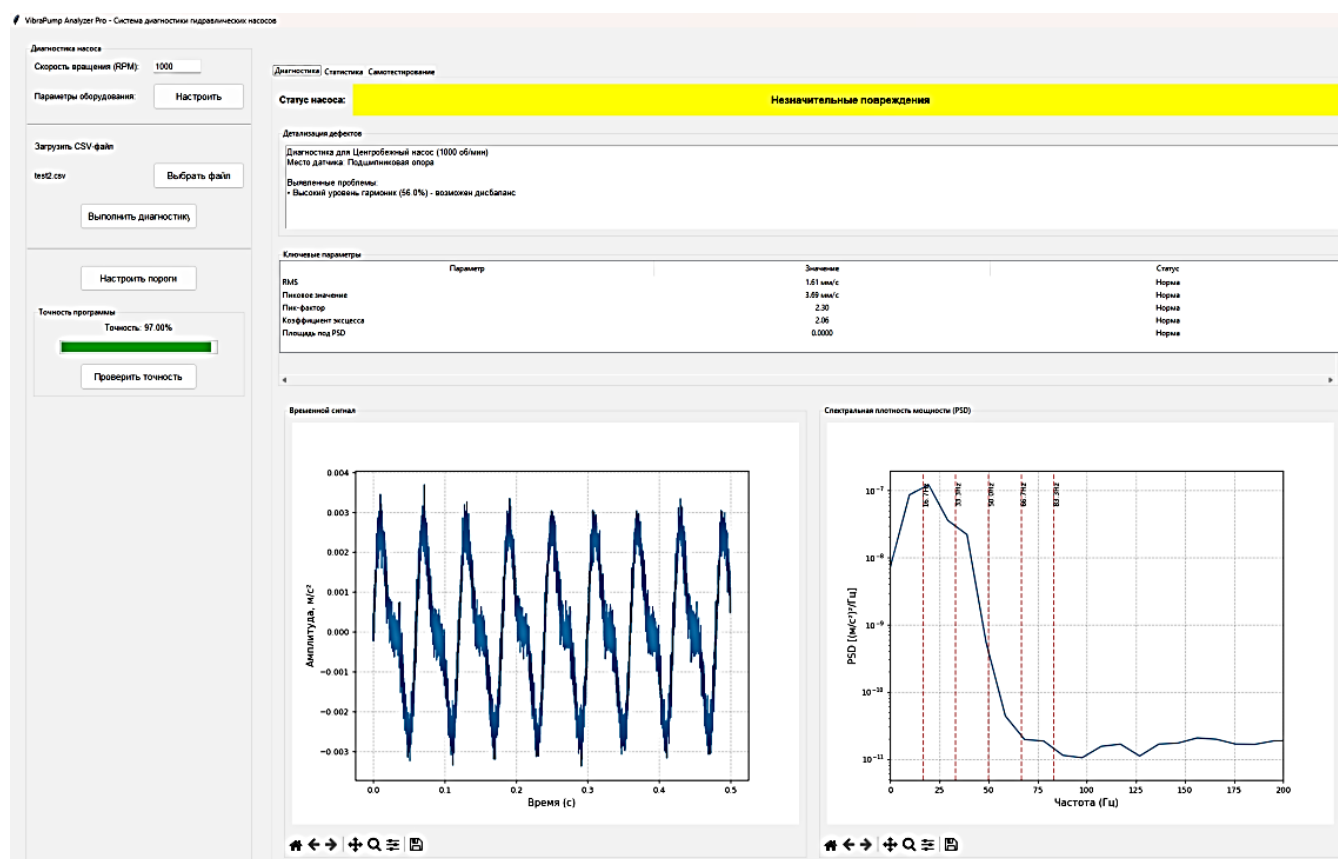


Рис. 6. Интерфейс программного окна получения информации о состоянии шестеренного насоса в режиме реального времени

Fig. 6. Software window interface providing real-time information on the gear pump condition

⁷ Использование размерности, мм/с, в диагностических признаках «среднеквадратичное значение» и «пиковое значение» и процедура использования акселерометра являются требованием международного стандарта вибродиагностики ISO 20816, которое реализуется разработанным программным обеспечением. Остальные показатели имеют безразмерное значение (примеч. авт.).

⁸ Цифровизация в сфере технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники: Аналитический обзор / И.Г. Голубев, Н.П. Мишуков, В.Ф. Федоренко и др. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2023. 80 с. EDN: SLRTIS

Апробацию представленной методики провели на гидравлическом насосе НШ-32А, устанавливаемом на тракторах МТЗ-82.2, МТЗ-1005, МТЗ-1221, широко распространенных в отечественной сельскохозяйственной отрасли. В результате экспериментальных исследований получили сигналы вибрации, характерные для различных состояний деталей насоса. Первоначально данные получили от исправно работающего насоса, а затем – при выявленных отклонениях в геометрии и целостности компонентов, вызывающих в последующем неисправность. Каждому типу выявленных неисправностей присваивался статус (табл. 2). Точность выявления дефектов с использованием СПМ-анализа и разработанной программной платформы составляет 90-93%. Классификация состояний насоса НШ-32А с выявленными неисправностями представлена на рисунке 7.

Решение о необходимости приостановки эксплуатации насоса и проведении внепланового технического обслуживания в рамках предложенной методики принимается на основе комплексной оценки двух ключевых факторов:

1. Превышение адаптивных пороговых значений диагностических признаков, рассчитываемых

в зависимости от скорости вращения вала насоса. Критическими считаются случаи, когда такие показатели, как пик-фактор ($>5,0$) и эксцесс ($>4,5$), одновременно превышают установленные для данного режима работы пороги, что с высокой достоверностью свидетельствует о развитии усталостных разрушений в подшипниковых узлах.

2. Выявление комбинированного дефекта (класс IV по разработанной классификации), характеризующегося одновременным ростом энергии вибрации в нескольких частотных диапазонах – например, в зонах характерных частот подшипника и зацепления шестерен. Такой сценарий указывает на комплексный износ сопрягаемых элементов и риск возникновения отказа.

Таким образом, диагностируемые дефекты подшипников и шестерен напрямую влияют на главный эксплуатационный параметр насоса – его объемный КПД. Развитие этих дефектов приводит к увеличению зазоров и росту внутренних утечек, что вызывает падение производительности (объемного КПД) насоса. Превышение вибрационных порогов служит прямым указанием на достижение критического уровня износа и принятие решения об остановке эксплуатации насоса.

Учитываемые неисправности насоса НШ-32А (фрагмент алгоритма)

Таблица 2

Recorded NSh-32A pump faults (algorithm fragment)

Table 2

Номер	Тип неисправности	Кодирование метки классификации
1	Насос работает в штатном режиме, неисправности не обнаружены	I статус
2	Выявлено отклонение в геометрии и/или целостности опорного подшипника – внутренний торцевой износ	II статус
3	Выявлено отклонение в геометрии и/или целостности шестерни – износ торца зуба	III статус
4	Выявлен комплекс отклонений в сопрягаемых блоках	IV статус

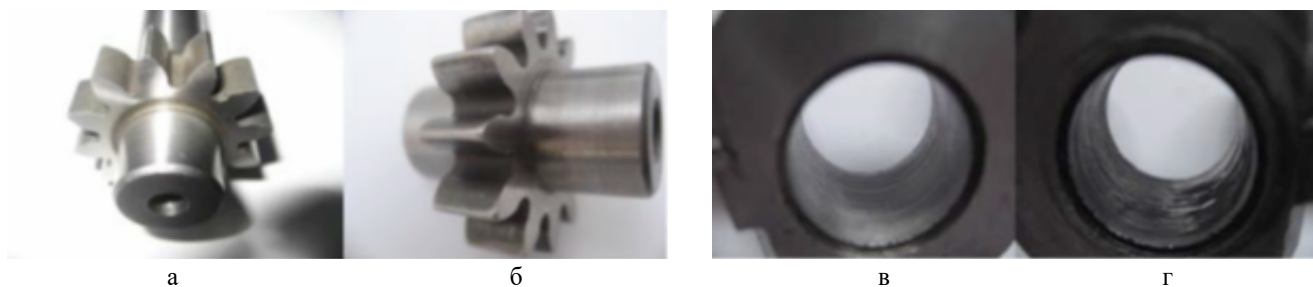


Рис. 7. Детали насоса НШ-32А:

а) исправная шестерня; б) шестерня с износом торца зуба; в) рабочий опорный подшипник; г) опорный подшипник с внутренним износом

Fig. 7. NSh-32A pump parts:

a) serviceable gear; b) gear with a worn tooth face; c) serviceable support bearing; d) support bearing with internal wear

Гипотеза подтверждена: применение предложенной методики контроля технического состояния гидравлических систем технологических машин позволило диагностировать неисправности с высокой точностью.

Направления дальнейших исследований будут ориентированы на установление зависимостей изменения значения виброускорения на величину объемного КПД шестеренного насоса. Это позволит перейти от диагностики по пороговым значениям к прогнозированию остаточного ресурса на основе динамики вибрационных характеристик.

Выводы

1. Разработанная методика вибродиагностики, эффективность которой экспериментально подтверждена на примере работы гидравлического насоса НШ-32А, устанавливаемого на тракторах МТЗ-82.2, МТЗ-1005, МТЗ-1221, создает возможность в режиме

реального времени оценить его состояние и перейти от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию. При этом минимизируются внеплановые простои технологических машин в период посевных и уборочных работ, уменьшаются затраты на ремонт машин и повышается эффективность сельскохозяйственных работ.

2. Предложенная методика контроля технического состояния гидравлических систем позволяет преобразовывать вибросигналы в систему нечеткого вывода, выявлять/диагностировать 4 состояния насоса (исправное, износ подшипника, износ шестерни, комбинированный дефект) с точностью 90...93% при рабочих скоростях вала 1000...2000 об/мин.

3. С помощью разработанной методики можно дистанционно в режиме онлайн проводить оценку функционального параметра шестеренного насоса – объемного КПД.

Список источников

1. Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. Механизм распознавания состояния конструктивных элементов технологических машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 12. С. 23-28. EDN: DCCVQD
2. Севрюгина Н.С., Апатенко А.С. Интеграция профилей цифровых двойников технологических машин в сфере эксплуатации и сопровождения // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. С. 84-91. EDN: BTHBCT
3. Ступин О.А., Некрасов С.И., Кучинский Р.Г. Вибродиагностика как современный метод контроля и диагностирования гидроприводов технологических машин // Международный технико-экономический журнал. 2022. № 5-6. С. 75-86. EDN: SMEEFO
4. Herszberg I., Bannister M.K., Li H.C.H., Tomson R.S. Structural Health Monitoring for advanced composite structures. ICCM International Conferences on Composite Materials. 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/289645207_Structural_health_monitoring_for_advanced_composite_structures
5. Peng Y., Dong M., Zuo M. Current status of machine prognostics in condition – based maintenance: a review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010;50:297-313. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2482-0>
6. Ступин О.А., Некрасов С.И. Анализ методов обработки вибросигналов при диагностировании элементов гидросистем технологических машин // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: Материалы IX Международной научно-практической конференции, Саратов, 27-28 апреля 2022 г. Саратов: ООО «Амирит», 2022. С. 371-374. EDN: HBCUDE
7. Saravanan N., Ramachandran K.I. Fault diagnosis of spur bevel gear box using discrete wavelet features and Decision Tree classification. Expert Systems with Applications. 2019;36(5):9564-9573. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.089>
8. Unal M., Onat M., Demetgul M., Kucuk H. Fault diagnosis of rolling bearings using a genetic algorithm

References

1. Apatenko A.S., Sevryugina N.S. Mechanism for state recognition of structural components of processing machines. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2020;12:23-28. (In Russ.)
2. Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Integration of digital twin profiles for technological machines in the field of operation and maintenance. *Nauchno-informatsionnoe obespechenie innovatsionnogo razvitiya APK = Scientific and Information Support for the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*. M.: FSBNI "Rosinformagrotekh". 2023:84-91. (In Russ.)
3. Stupin O.A., Nekrasov S.I., Kuchinskiy R.G. Vibrodiagnostics as a modern method of monitoring and diagnostics of hydraulic drives of technological machines. *International Technical Journal*. 2022;5-6:75-86. (In Russ.)
4. Herszberg I., Bannister M.K., Li H.C.H., Tomson R.S. Structural Health Monitoring for advanced composite structures. ICCM International Conferences on Composite Materials. 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/289645207_Structural_health_monitoring_for_advanced_composite_structures
5. Peng Y., Dong M., Zuo M. Current status of machine prognostics in condition – based maintenance: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010;50:297-313. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2482-0>
6. Stupin O.A., Nekrasov S.I. Analysis of vibration signal processing methods for diagnostics of elements of hydrosystems of technological machines. *Innovatsii v prirodoobustroytve i zashchite v chrezvychaynykh situatsiyakh = Innovations in Environmental Management and Protection in Emergency Situations: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference*, Saratov, April 27-28, 2022. Saratov: ООО "Amirit", 2022:371-374. (In Russ.)
7. Saravanan N., Ramachandran K.I. Fault diagnosis of spur bevel gear box using discrete wavelet features and Decision Tree classification. *Expert Systems with Applications*. 2019;36(5):9564-9573. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.089>
8. Unal M., Onat M., Demetgul M., Kucuk H. Fault diagnosis of rolling bearings using a genetic algorithm

optimized neural network. Measurement. 2014;58:187-196. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.041>

9. Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Import substitution and monitoring of workpiece quality. Russian Engineering Research. 2023;43(8):927-933. <https://doi.org/10.3103/s1068798x23080294>

Информация об авторах

¹ Ступин Олег Александрович, старший преподаватель; stupin@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-1466-572X>; SPIN-код 8620-2870

² Шитикова Александра Васильевна, д-р с.-х. наук, профессор; plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430>; SPIN-код: 8094-8014

³ Апатенко Алексей Сергеевич, д-р техн. наук, профессор; a.apatenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>; SPIN-код: 7553-2715

^{1, 2, 3} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

А.С. Апатенко – научное руководство, формулирование основной концепции исследований;

А.В. Шитикова – ресурсы и описание используемых агротехнологий;

О.А. Ступин – разработка и описание программного комплекса, проведение экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 29.08.2025, после рецензирования и доработки 29.10.2025; принята к публикации 31.10.2025

optimized neural network. Measurement. 2014;58:187-196. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.041>

9. Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Import substitution and monitoring of workpiece quality. Russian Engineering Research. 2023;43(8):927-933. <https://doi.org/10.3103/s1068798x23080294>

Author Information

Oleg A. Stupin¹, Senior Lecturer; stupin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1466-572X>

Aleksandra V. Shitikova², DSc (Ag), Professor; plant@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5943-0430>
Scopus Author ID: 57212139251;
Researcher ID: A-2946-2016

Alexey S. Apatenko³, DSc (Eng), Professor;
a.apatenko@rgau-msha.ru;
<https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>;
Scopus Author ID: 57216908465

^{1, 2, 3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

A.S. Apatenko – research supervision, conceptualization;

A.V. Shitikova – resources;

N.S. Sevryugina – literature review, writing – original draft, manuscript review and editing;

O.A. Stupin – development and description of the software package, experimental work.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Received 29.08.2025; Revised 29.10.2025; Accepted 31.10.2025