

На правах рукописи



Ус Семён Сергеевич

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО  
ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ БЕЗРАЗБОРНОЙ  
ДИАГНОСТИКИ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного  
комплекса

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Благовещенск - 2026

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

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
**Кузнецов Евгений Евгеньевич**

**Официальные оппоненты:** **Неговора Андрей Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
Башкирский государственный аграрный  
университет, кафедра мобильных энергетических  
и транспортных средств, заведующий

**Лимаренко Николай Владимирович**  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
Донской государственный технический  
университет, кафедра «Приборостроение и  
биомедицинская инженерия», профессор

**Ведущая организация** ФГБОУ ВО Арктический государственный  
агротехнологический университет

Защита состоится 24.06.2026 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.013.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет», по адресу: 675005, Амурская область, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86, корпус 1, ауд. 117.  
Телефон: +7 (4162) 99-51-12; E-mail: dis35201303@dalgau.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет» по адресу [www.dalgau.ru](http://www.dalgau.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Панова Елена Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования и степень её разработанности.** Повышение эффективности системы сервисного, а также планового технического обслуживания и ремонта продолжает оставаться одной из приоритетных задач в обеспечении устойчивой эксплуатационной надежности сельскохозяйственной техники. Эффективная организация этих процессов способствует минимизации временных и экономических издержек, связанных с эксплуатацией машин и оборудования, что особенно актуально и важно в условиях высокоинтенсивного использования техники в агропромышленном комплексе. Научными исследованиями доказано, что повышение качества диагностических, обслуживающих или ремонтных работ и сокращение времени реакции производственных сил на необходимость проведения технологических, или ремонтных воздействий прямо коррелируют с уменьшением простоев машин, увеличением их производительности, повышением технической готовности, а также продлением эксплуатационного срока использования машин и оборудования.

Известные в современном машиностроении приборные комплексы, предназначенные для исследования параметров и диагностирования сельскохозяйственных агрегатов, обладают как явными преимуществами, так и существенными недостатками. К наиболее значимым недостаткам можно отнести недостаточную параметральность и лимитированную направленность средств внешнего диагностирования, при этом необходимость отвлечения агрегатов от выполнения непосредственных операций, связанных с сельскохозяйственным производством, в целях установления контрольных датчиков и проведения исследований в стационарных условиях, приводит к дополнительным финансовым потерям и увеличению сроков простоя техники, снижая эффективность её применения.

Вопросам повышения эффективности диагностирования и установления граничных параметров эксплуатации машин и агрегатов в сельском хозяйстве и машиностроении посвящены работы авторов: Б.А. Гордеева, Ю.Ж. Дондокова, В.И. Полякова, А.Л. Назолина, Е.И. Аббакумова, И.Н. Ужвы, Д.А. Жданко, Н.В. Лимаренко, В.В. Мокшина, В.В. Подовинникова, А.Г. Арженовского, С.В. Асатурияна, К.Г. Совина, Ю.В. Катаева, Е.А. Градова, Г.Е. Кокиевой и других исследователей. Проведением стендовых испытаний на тормозных и специализированных стендах занимались такие исследователи как И. Н. Ужва, Д. А. Жданко, В. В. Мокшин, В. В. Подовинников и другие. Работы ученых А.В. Неговоры, К. Г. Совина, Ю. В. Катаева, Е. А. Градова, Н.В. Лимаренко, И.А Юхина, И.А. Успенского, В. В. Побединского, В. Е. Колпакова, С. М. Овчаренко, Г.А. Иовлева направлены на исследования темы совершенствования компьютерной диагностики, применения компьютерных алгоритмов и нейронных сетей.

Расширение методов классической диагностики рассмотрено следующими исследователями: В.А. Аллилуевым, В.И. Бельских, А.В. Неговора, В.М. Михлиным, А.В. Николаенко, С.Н. Ольшевским, А.В. Серовым, К.Ю. Скибневским. Виброакустическим и пирометрическим способам диагностики посвятили свои работы А.Н. Мурашко, Н.В. Василенко, Л.И. Билык, А.А. Горбачёв, В.М. Казаков, Р.Н. Абдряшитов. Тепловая диагностика рассматривалась в работах авторов: Г.А. Курмашева, В.П. Денисова, А.П. Домбровского, В.М. Янзина, А.Н. Карташевича, Е.П. Тимашова.

В связи с чем, основываясь на анализе научных работ и ранее проведённых исследований, актуальности рассматриваемой тематики для современного рационального и бережливого производства была предложена **гипотеза исследований**-современные высокоточные цифровые приборы, обладающие расширенным диапазоном измеряемых показателей, могут быть использованы для позиционирования исследуемого объекта в пространстве, измерения его колебательных величин и показателей физических полей в движении, в целях фиксации измеряемых параметров и получения исчерпывающих сведений о техническом состоянии, что позволит осуществить мобильную безразборную диагностику технического состояния объекта проверки, снизить экономические издержки и повысить эффективность диагностирования в сельскохозяйственном производстве.

Для подтверждения гипотезы, формирования объекта, предмета, направлений и задач исследования определена **цель работы** – обоснование и разработка нового высокоэффективного цифрового приборно-диагностического комплекса, выполненного на базе высокоточных цифровых инклинометров-акселерометров.

И сформулированы **задачи исследования**:

1. Изучить современное состояние средств и способов мобильного диагностирования, обозначить направления совершенствования приборно-диагностической базы сельскохозяйственных предприятий и определить категорию современных высокоточных цифровых приборов, обладающих соответствующими диапазонами измеряемых показателей, для применения в качестве диагностического оборудования.

2. Теоретически обосновать возможности применения высокоточных цифровых инклинометров-акселерометров, обладающих расширенным диапазоном измеряемых показателей, для осуществления безразборной мобильной диагностики технического состояния энергетических средств;

3. Провести подбор элементов и изготовить новый высокоэффективный приборно-диагностический комплекс, выполненный на базе высокоточных цифровых инклинометров-акселерометров;

4. Разработать программное и техническое обеспечение предлагаемого комплекса, способствующее получению, хранению и обработке информации об объекте диагностики;

5. Провести экспериментальную проверку предлагаемых технических и программных решений в производственных условиях, дать технико-экономическую и энергетическую оценку проводимых исследований.

**Объект исследования** – технологические и конструктивные характеристики разрабатываемого цифрового приборно-диагностического комплекса.

**Предмет исследования** – изучение процесса безразборного диагностирования при применении разработанного цифрового приборно-диагностического комплекса (на примере определения технического состояния опор двигателя трактора).

#### **Научная новизна**

- Обосновано использование цифровых приборов- инклинометров-акселерометров для осуществления безразборной диагностики, измерения и фиксации параметров агрегатов и систем энергетических средств в движении и изготовлен новый высокоэффективный приборно-диагностический комплекс, выполненный на базе высокоточных цифровых инклинометров-акселерометров;

- Определены направления разработки способов диагностирования технического состояния автотракторной техники с использованием предлагаемого диагностического приборного комплекса, выполненного на базе высокоточных цифровых инклинометров-акселерометров;

- Разработано программное и техническое обеспечение для нового инклинометрического приборно-диагностического комплекса, способствующее получению, хранению и обработке информации об объекте диагностики;

- Сформированы алгоритмы, способствующие определению параметров исследуемого объекта, позволяющие провести сравнительный анализ с эталонными показателями и содействующие принятию верного управленческого решения.

Новизна и оригинальность применённого математического и формульного аппарата защищена свидетельствами РФ на программы для ЭВМ «Программа для комплекса безразборной вибрационной диагностики ВИБРУМ» № 2025662808, «Программа для инклинометрической диагностики кривошипно-шатунного механизма двигателя внутреннего сгорания» № 2025669818, «Программа для инклинометрической диагностики газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания» № 2025680051, «Программа для инклинометрической диагностики опор двигателя внутреннего сгорания» № 2025680379, «Программа получения экспериментальных данных модернизированного колёсного агрегата при использовании инклинометрического комплекса» № 2025683722, «Программа

инклинометрической проверки качества сборки колёсного технологического агрегата, прошедшего капитальный ремонт» № 2025684379.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Определена категория современных высокоточных цифровых приборов, обладающих соответствующими диапазонами измеряемых показателей для применения в качестве диагностического оборудования. Теоретически обоснованы и экспериментально проверены в реальных условиях производственной эксплуатации новые подходы, доказывающие эффективность применения способов исследования технического состояния трактора с использованием нового приборно-диагностического комплекса, выполненного на базе высокоточных цифровых инклинометров-акселерометров (на примере определения технического состояния опор двигателя трактора).

Установлено, что применение нового приборно-диагностического комплекса, выполненного на базе высокоточных цифровых инклинометров-акселерометров позволяет с наименьшими материальными затратами осуществить безразборную мобильную диагностику (на примере определения технического состояния опор двигателя трактора), что даёт возможность осуществления рационального планирования процессов технического обслуживания и ремонта, своевременного заказа подлежащих ремонту или замене деталей, без отрыва техники от выполнения производственных задач. Что, в целом повысит эффективность и ресурсообеспеченность сельскохозяйственного производства региона.

Новый приборно-диагностический комплекс и программное обеспечение носят унифицированный характер и могут быть использованы для контроля состояния работающих узлов, машин, отдельных агрегатов и механизмов. В перспективе проводимые научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в обозначенном направлении позволят внести изменения в существующую систему производственных способов проверки и фиксации параметров объекта диагностирования, расширить методику исследований сложных восстанавливаемых объектов сельскохозяйственного и промышленного машиностроения.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований успешно внедрены и применяются в АО «ЛУЧ» (с. Ивановка, Ивановского района), ООО «Амурагрокомплекс» (г. Благовещенск), ООО «Анновское» (с. Анновка, Ивановского района), ООО «Диагностика», АО «Дальтимбермаш» (г. Благовещенск), ООО "СПЕЦМАШВОСТОК" (г. Благовещенск). Предложения по усовершенствованию способов исследования технического состояния колёсного трактора и автомобилей используются в учебном процессе на кафедре эксплуатации и ремонта транспортно-технологических машин и комплексов, кафедре транспортно-энергетических средств и механизации АПК факультета механизации сельского хозяйства ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ при преподавании профильных дисциплин и в научной работе.

**Методология и методы исследования.** Исследования по теме диссертации выполнены в ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ в соответствии с научно-технической программой:

- на 2021-2025 г.г. тема 8 - «Мобильная энергетика» ФГБОУ ВО Дальневосточный ГАУ, номер государственной регистрации № 121022000099-61.

Тематика исследования доложена, обсуждена и получила одобрение на реализацию научной работы по гранту «Студенческий Стартап (очередь V)» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере ГНО Фонд содействия инновациям, договор № 4496ГССС15-L/99613 от 12.12.2024. 22.08.2025 получен АКТ о выполнении обязательств по договору.

Теоретические исследования современного состояния средств мобильного диагностирования, поиск способов совершенствования приборно-диагностической базы предприятий и определение категории современных высокоточных цифровых приборов, обладающих соответствующими диапазонами измеряемых показателей для применения в качестве диагностического оборудования проведены с использованием метода парных сравнений, системы взвешенных критериев, анализа SWOT, алгоритмики Байеса с использованием фильтра Калмана.

В исследованиях использован математический аппарат линейного программирования и вариационного исчисления, процесс создания и модификации компьютерных программ, трёхмерное моделирование и алгоритмическое проектирование.

Экспериментальные исследования проведены в реальных условиях производственной эксплуатации. Полученные экспериментальные данные обработаны в соответствии с современными методами теории вероятностей, математической статистики и планирования экспериментальных исследований с применением специализированных программ «Blender», «Sigma Plot 15.0», «Python» «Mathcad» и «Компас 3D V23» и авторских программных продуктов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- аналитические зависимости, позволяющие рассчитать эффективность приборного комплекса, выполненного на базе высокоточных цифровых инклинометров-акселерометров, на единичную и потоковую диагностическую технологическую операцию;
- математическая модель, характеризующая влияние предложенных высокоточных цифровых инклинометров-акселерометров на основные технологические параметры диагностического комплекса и закономерности, обосновывающие снижение временных затрат и расширение параметров диагностирования;
- конструктивное изготовление, техническое оснащение и программные средства, обеспечивающие рабочие характеристики предлагаемого устройства;
- результаты производственной проверки предлагаемого способа диагностики в реальных условиях эксплуатации, расчёт экономической и энергетической эффективности.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных данных подтверждается значительной степенью сходимости теоретических и экспериментальных исследований, результатами лабораторно-полевых испытаний, проведённых с достаточным количеством опытов и применением программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего требуемую точность измерений, обработкой опытных данных методами математической статистики с использованием специализированных математических программ на ПЭВМ, в соответствии с поставленными целью, задачами, выбором объекта, предмета, способностью воспроизводимости результатов в типичных условиях, высокими экономическими показателями внедрения и производственного применения предложенных методологических и технических решений, программных средств и рекомендаций в эксплуатационных условиях, а также использованием результатов исследований конструкторскими, образовательными и другими организациями.

Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на тематических научных конференциях международного, национального и регионального уровней, проводимых в период 2021-2025 г.г.: «Молодёжь XXI века: шаг в будущее» (2021 г., г. Благовещенск), «Актуальные вопросы развития аграрного сектора экономики Байкальского региона» (2021 г., г. Улан-Удэ); «Молодёжь XXI века: шаг в будущее» (2022 г., г. Благовещенск); Всероссийский конкурс на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых учёных аграрных образовательных и научных организаций России (2022 г., г. Благовещенск); «Актуальные вопросы автомобильного транспорта» (2022 г., г. Барнаул); «Чтения И.П. Терских», (2022 г., г. Иркутск); E3S WEB OF CONFERENCES, «International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2023» (2023 г., г. Новосибирск, EDP Sciences); «Актуальные вопросы автомобильного транспорта» (2023 г., г. Барнаул); «Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования» (2023 г., г. Новосибирск); стендовый доклад на ежегодной инновационной выставке-конкурсе Амурской области «АмурТехно2023» (14 декабря 2023 г., г. Благовещенск); «Развитие современной аграрной науки: актуальные вопросы, достижения и инновации» (2024 г., г. Нальчик); «Состояние и инновации технического сервиса конструкций, машин и оборудования» (2024 г., г. Новосибирск); «Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития» (2024 г., г. Благовещенск); «Актуальные вопросы автомобильного транспорта» (2024 г., г. Барнаул); доклад на ежегодной межрегиональной инновационной выставке-конкурсе Амурской области «АмурТехно2024» (17 октября 2024 г., г. Благовещенск); Всероссийский конкурс на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых

учёных аграрных образовательных и научных организаций России (2025 г., г. Благовещенск); «Научный прогресс и устойчивое развитие» (2025 г. г. Владивосток); «Развитие науки и технологий в современной России» (2025 г., г. Москва); стендовый доклад на ежегодной межрегиональной инновационной выставке-конкурсе Амурской области «АмурТехно2025» (31 октября 2025 г., г. Благовещенск).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 2021-2025 г.г. в сборниках международных, национальных и региональных научно-практических конференций, научных трудов, в журналах: «Аграрный научный журнал», категория К1, «Известия Оренбургского государственного аграрного университета», категория К2, «Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета» (Научный журнал КубГАУ), категория К2.

Всего по теме диссертации опубликовано 32 научных работы, в том числе 1 статья в издании, индексируемом в международной цитатно-аналитической базе данных Scopus, 4 статьи в научных журналах из Перечня рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, получено 6 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 260 страницах, содержит 34 таблицы, 117 рисунков и 48 приложений. В списке литературы содержится 173 наименования, из них 17 на иностранном языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, изложена степень её разработанности, представлены цель и задачи исследования, научная новизна, методология и методы проведённых исследований, теоретическая и практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту, аргументирована степень достоверности и приведены данные по апробации результатов исследования.

**В первой главе** дан аналитический обзор средств, методов и способов мобильного диагностирования. При этом исследовано наличие и качественный состав средств механизации в агропромышленном комплексе Амурской области, проанализированы способы исследования технического состояния колёсных тракторов и сельскохозяйственных машин с применением приборно-диагностических комплексов для вибрационной диагностики, рекомендована и приведена структура диагностики (на примере машинно-тракторного агрегата (МТА)) с использованием разнонаправленных эксплуатационных приборов по проверочным рабочим блокам, предложено обоснование реализации предлагаемого цифрового инклинометрического комплекса безразборной диагностики (далее ЦИКБД) при диагностировании опор двигателя трактора.

Установлено, что оптимизация системы сервисного и технического обслуживания, ремонта остаётся ключевой задачей в повышении эксплуатационной надёжности сельскохозяйственной техники, так как повышение качества и оперативности ремонта и обслуживания напрямую способствует снижению простоев техники, улучшению её производительности, повышению эксплуатационных коэффициентов, а также продлению срока эксплуатации без значительных капиталовложений в обновление парка, что возможно своевременным применением диагностических методов и способов. При этом методы диагностики позволяют на должном уровне провести исследование параметров машин и сельскохозяйственной техники. Однако известное приборное оборудование рассчитано только на использование при одном выбранном способе диагностики, что позволяет достаточно обоснованно предположить, что применение единого приборного комплекса при совмещении нескольких способов диагностики будет востребовано производством и является перспективным направлением исследований. Определено, что научные изыскания в направлении применения инклинометрических приборных комплексов и гироскопических систем для изучения объектов диагностирования, таких как сельскохозяйственные машины и тракторы, рассматривались

только в работах, посвящённых виброакустической диагностике, при этом осуществлялось отвлечение трактора от выполнения полевых операций, что делает проводимые исследования актуальными, прогнозируя их успешное внедрение и применение в промышленной и аграрной сфере. Подтверждено, что подушки двигателя внутреннего сгорания, играющие многогранную, ответственную и важную роль в работе энергетических средств, обоснованно заслуживают внимания как с точки зрения проектирования, так и с точки зрения выбора оптимальных решений для конкретных моделей. Следовательно, их диагностика под нагрузкой при проведении работ представляется необходимой манипуляцией, позволяющей получить оперативные данные о техническом состоянии, что возможно при реализации предлагаемого ЦИКБД. Установлено, что для определения необходимых средств получения и фиксации диагностических параметров, формализации и поиска известных и изыскиваемых научных материалов, необходимо проведение дальнейших исследований.

**Во второй главе** изложены теоретические исследования и осуществлён подбор средств перспективного цифрового инклинометрического комплекса безразборной диагностики, определены соответствия показателей, проведено обоснование преобразования математических данных и нормализации данных приборного комплекса для дальнейшего программирования в среде Python, обоснована математическая модель и осуществлено априорное ранжирование факторов эффективности проектируемого цифрового инклинометрического комплекса безразборной диагностики (ЦИКБД), на базе датчиков WT9011DCL-BTL5.0 AHRS IMU выполнена разработка программных средств синхронизации и контроля приборных датчиков ЦИКБД, установочных модулей для приборных датчиков разрабатываемого ЦИКБД, предложены формулы расчёта коэффициента технического использования, средней удельной трудоёмкости, среднего удельного времени простоя, вычисления производительности за цикл использования для трактора, обслуживаемого при использовании предлагаемого ЦИКБД.

При этом определение соответствия показателей и обоснование преобразования измеряемых параметров для нормализации данных приборного комплекса в отношении ранее выбранного объекта исследования осуществлялось способом трансформации исходного кода для измеряемых величин на основании первоначальных формул, относящихся к заводскому программному обеспечению прибора, что необходимо для последующего перевода в язык программирования «Python» и обработки данных.

#### Результаты перевода исходного кода в математический вид

Чтобы представить первоначальные формулы в стройной и читаемой математической форме, уберем операции сдвига и побитового, и операции побитового И (AND), побитового ИЛИ (OR), побитового исключаящего ИЛИ (XOR), побитового отрицания (NOT), заменив их эквивалентными действиями.

После преобразования получены формулы последующего вычисления для следующих измеряемых показателей.

**Угловая скорость,** 
$$wx = \frac{wxH \cdot 256 + wxL}{32768} \cdot 2000 \text{ (}^\circ/\text{s)}.$$
 (1)

Где  $wx$  — угловая скорость вокруг оси  $x$  ( $^\circ/\text{s}$ );  $wxH$  — старший байт измеренного значения от гироскопа (MSB, most significant byte);  $wxL$  — младший байт измеренного значения от гироскопа (LSB, least significant byte);  $256=2^8$  — коэффициент, соответствующий сдвигу влево на 8 бит ( $\ll 8$ );  $32768=2^{15}$  — максимальное значение 16-битного регистра для нормализации результата (с учетом двоичной разрядности);  $2000 \text{ (}^\circ/\text{s)}$  — установленный полный диапазон измерений гироскопа.

$$wy = \frac{wyH \cdot 256 + wyL}{32768} \cdot 2000 \text{ (}^\circ/\text{s)}. \quad (2)$$

$$wz = \frac{wzH \cdot 256 + wzL}{32768} \cdot 2000 \text{ (}^\circ/\text{s)}. \quad (3)$$

**Угол наклона.** Разберем приведенные формулы и перепишем их в строгом математическом виде для дальнейшего использования. Формулы описывают вычисление углов наклона (Roll, Pitch, Yaw) на основании данных акселерометра.

Формулы в математической записи принимают вид

1. **Roll (угол вокруг оси X).** Исходная запись

$$Roll (X axis) = \frac{(RollH \ll 8) | RollL}{32768} \cdot 180 (^\circ). \quad (4)$$

Приведем это выражение в математический вид, заменяя побитовый сдвиг ( $\ll$ ) и побитовое ИЛИ ( $|$ ) соответствующими действиями

$$Roll = \frac{RollH \cdot 256 + RollL}{32768} \cdot 180 (^\circ). \quad (5)$$

где Roll — угол крена (наклона) вокруг оси X в градусах; RollH — старший байт значения акселерометра (MSB); RollL — младший байт значения акселерометра (LSB);  $256=2^8$  — коэффициент сдвига влево ( $\ll 8$ );  $32768=2^{15}$  — нормализационный коэффициент для преобразования данных в диапазон от -1 до 1;  $180 (^\circ)$  — максимальный угол в градусах.

2. **Pitch (угол вокруг оси Y).** Исходная запись

$$Pitch (Y axis) = \frac{(PitchH \ll 8) | PitchL}{32768} \cdot 180 (^\circ). \quad (6)$$

Запишем в математической форме  $Pitch = \frac{PitchH \cdot 256 + PitchL}{32768} \cdot 180 (^\circ).$  (7)

Где Pitch — угол тангажа (наклона) вокруг оси Y в градусах; PitchH — старший байт значения акселерометра; PitchL — младший байт значения акселерометра;  $256=2^8$  — коэффициент сдвига влево ( $\ll 8$ );  $32768=2^{15}$  — нормализационный коэффициент для преобразования данных в диапазон от -1 до 1;  $180 (^\circ)$  — максимальный угол в градусах.

3. **Yaw (угол вокруг оси Z).** Исходная запись:

$$Yaw (Z axis) = \frac{(YawH \ll 8) | YawL}{32768} \cdot 180 (^\circ). \quad (8)$$

Приведем к математическому виду:

$$Yaw = \frac{YawH \cdot 256 + YawL}{32768} \cdot 180 (^\circ). \quad (9)$$

где Yaw — угол рыскания (поворота вокруг оси Z) в градусах; YawH — старший байт значения акселерометра; YawL — младший байт значения акселерометра;  $256=2^8$  — коэффициент сдвига влево ( $\ll 8$ );  $32768=2^{15}$  — нормализационный коэффициент для преобразования данных в диапазон от -1 до 1;  $180 (^\circ)$  — максимальный угол в градусах.

Таким образом, приведенные формулы позволяют с высокой точностью вычислить пространственные углы наклона на основе данных акселерометра, обеспечивая эффективное применение в задачах ориентации и стабилизации устройства для определения измеряемых показателей объекта исследований.

**Магнитное поле.** В записях используем младшие и старшие байты данных (LSB и MSB), измеряемых и фиксируемых датчиком. Проведём преобразования и получим формульные данные Magnetic (x axis): компонент  $H_x$ . Старший байт  $H_xH$  сдвигается влево на 8 бит (что эквивалентно умножению на  $28=256$ ), а младший байт  $H_xL$  добавляется к результату.

$$\text{В итоге получаем} \quad H_x = H_xH \cdot 256 + H_xL. \quad (10)$$

Аналогично получаем формулы для следующих компонентов

$$\text{Magnetic (y axis): компонент } H_y. \text{ Таким же образом операция выполняется для второго компонента} \quad H_y = H_yH \cdot 256 + H_yL. \quad (11)$$

Magnetic (z axis): компонент  $H_z$ . Операция для третьего компонента:

$$H_z = H_zH \cdot 256 + H_zL. \quad (12)$$

где  $H_xH$ ,  $H_xL$ ,  $H_yH$ ,  $H_yL$ ,  $H_zH$ ,  $H_zL$  — старший (H) и младший (L) байты измерений магнитного поля, полученные с акселерометра/магнитометра;  $256=2^8$  — коэффициент сдвига, преобразующий старший байт в его полное значение. В общем случае итоговые значения  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  представляют компоненты магнитного поля в соответствующих направлениях x, y, z, измеренные в младших единицах датчика (обычно в некалиброванных единицах, которые затем можно нормировать или перевести в физические единицы, такие как Гауссы или Теслы). Представленные формулы описывают процессы получения данных о состоянии магнитного поля в пространстве через младшие и старшие байты, предоставляемые акселерометром.

**Кватернион.** Для представления данных формул в строгом математическом виде применим следующий подход, при этом учтём, что каждая формула представляет собой преобразование данных, полученных от акселерометра в формате старший байт (H) и младший байт (L), в

стандартные значения при нормировке на делитель 32768. Числовые регистры объединяются с использованием битового сдвига влево на 8 бит (что эквивалентно умножению на  $2^8=256$ ) для получения полного 16-битного значения. Тогда перевод исходных формул в математическом виде приобретает следующую форму

1. Для Q0: сначала объединяем старший и младший байт

$$Q0 = \frac{Q0H \cdot 256 + Q0L}{32768}. \quad (13)$$

2. Для Q1: аналогично для Q1:

$$Q1 = \frac{Q1H \cdot 256 + Q1L}{32768}. \quad (14)$$

3. Для Q2: преобразование для Q2:

$$Q2 = \frac{Q2H \cdot 256 + Q2L}{32768}. \quad (15)$$

4. Для Q3: аналогично для Q3:

$$Q3 = \frac{Q3H \cdot 256 + Q3L}{32768}. \quad (16)$$

Общий вид формулы для Qk, если сделать обобщение для всех компонентов Qk, где k=0,1,2,3, уравнение принимает вид

$$Qk = \frac{QkH \cdot 256 + QkL}{32768}. \quad (17)$$

где  $k \in \{0,1,2,3\}$ . Введённые значения Q0, Q1, Q2, Q3 представляют соответствующие компоненты, например, при работе с кватернионами, они могут отражать ориентацию акселерометра в трёхмерном пространстве.

Для вычисления **углового ускорения** по оси x формула будет выглядеть так:

$$ax = \frac{(axH \cdot 256 + axL)}{32768} \cdot 16g. \quad (18)$$

где axH — старший байт значения акселерометра, axL — младший байт значения акселерометра;  $256=2^8$  — коэффициент, эквивалентный сдвигу  $\ll 8$ ;  $32768=2^{15}$  — значение, определяемое 16-битной разрядностью регистра, разделенное на половину диапазона (для нормализации);  $g=9.8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения.

Значение двухбайтового регистра ускорения по оси x, разделенного на максимальное возможное значение 215, переводится в единицы ускорения ( $\text{м/с}^2$ ) с учетом диапазона измерений акселерометра ( $\pm 16g$ ).

Общая интерпретация для остальных осей y и z получает значения

$$ay = \frac{(ayH \cdot 256 + ayL)}{32768} \cdot 16g. \quad (19)$$

$$az = \frac{(azH \cdot 256 + azL)}{32768} \cdot 16g. \quad (20)$$

Так как для диагностирования опор двигателя, проводимого в целях проверки технологических свойств разрабатываемого комплекса, наиболее приемлемым параметром проверки представляется именно угловое ускорение, предлагается ввести коэффициент амплитудного соответствия  $K_{ac}$ , для осей фиксации X, Y, Z, отражающий отклонения в измеряемых параметрах для сравнительного и экспериментального объекта исследования в виде

$$K_{xac} = \frac{A_{xэ} \cdot v_{п}}{A_{xc} \cdot v_{п}} = \frac{A_{xэ}}{A_{xc}} \leq 1. \text{ -для оси X,} \quad (21)$$

$$K_{yac} = \frac{A_{yэ} \cdot v_{п}}{A_{yc} \cdot v_{п}} = \frac{A_{yэ}}{A_{yc}} \leq 1. \text{ -для оси Y,} \quad (22)$$

$$K_{zac} = \frac{A_{zэ} \cdot v_{п}}{A_{zc} \cdot v_{п}} = \frac{A_{zэ}}{A_{zc}} \leq 1. \text{ -для оси Z,} \quad (23)$$

где  $A_{xэ}$  — максимальная амплитуда отклонения по оси X экспериментального объекта исследования, м,  $A_{xc}$  — максимальная амплитуда отклонения по оси X сравнительного объекта исследования, м,  $v_{п}$  — обороты двигателя, об/мин,  $A_{yэ}$  — максимальная амплитуда отклонения по оси Y экспериментального объекта исследования, м,  $A_{yc}$  — максимальная амплитуда отклонения по оси Y сравнительного объекта исследования, м,  $A_{zэ}$  — максимальная амплитуда отклонения по оси Z экспериментального объекта исследования, м,  $A_{zc}$  — максимальная амплитуда отклонения по оси Z сравнительного объекта исследования, м,

Таким образом получаем искомые параметры для сравнительного объекта в виде

$$ax_c = \frac{(axH \cdot 256 + axL)}{32768} \cdot 16gK_{\text{хас}} \quad (24)$$

$$ay_c = \frac{(ayH \cdot 256 + ayL)}{32768} \cdot 16gK_{\text{уас}} \quad (25)$$

$$az_c = \frac{(azH \cdot 256 + azL)}{32768} \cdot 16gK_{\text{зас}} \quad (26)$$

Предложенные формулы могут быть применены для преобразования показаний датчиков WT9011DCL-BTL5.0 AHRS IMU, выраженных в двухбайтовом формате (старший и младший байт), в нормализованное значение в диапазоне  $[-1;1]$ , где деление на 32768 выполняет нормализацию. В общем случае ЦИКБД, выполненный на базе датчиков WT9011DCL-BTL5.0 AHRS IMU обладает возможностью считывания следующих показателей- ускорение, температура, угловая скорость, угол отклонения, магнитное поле, кватернион. Что даёт возможность его широкого использования для безразборной диагностики в виде измерительного средства для различных способов изучения технического состояния тракторов, автомобилей и сельскохозяйственной техники в рамках нового инклинометрического комплекса исследований.

Таким образом, предложенные формулы могут быть использованы для обоснования преобразования и нормализации данных инклинометра- акселерометра при дальнейшем программировании в среде «Python», направленном на обеспечение работоспособности цифрового инклинометрического комплекса безразборной диагностики (ЦИКБД) для нужд сельского хозяйства и промышленности.

Учитывая, что применение ЦИКБД позволяет заблаговременно прогнозировать выход детали из строя, существенным фактором, значимо влияющим на коэффициент технической готовности  $a_T$  является  $W_K$  – производительность ЦИКБД, так как стоимость единичной проверочной операции, время проверки единичной детали и количество проверенных единиц в час и смену, используемые в расчёте этого параметра, позволят обосновать и скорректировать сроки проведения технологических операций системы технического обслуживания и ремонта на предприятии.

При этом определён комплекс факторов, оказывающих существенное влияние на производительность ЦИКБД, из которых к числу наиболее значимых можно отнести следующие:  $T_{\text{пров}}$  – время единичной операции диагностики, ч.;  $C_{\text{ед.оп.}}$  – стоимость единичной операции диагностики, руб.;  $n_{\text{п.п.}}$  – количество проверяемых параметров;  $C_{\text{п.к.}}$  – общая стоимость проверочно-диагностического комплекса, руб.;  $N_{\text{ед./см.}}$  – количество проверенных единиц в смену, ед;  $N_{\text{ед./ч.}}$  – количество проверенных единиц в час, ед.;  $T_{\text{подг.оп}}$  – время подготовки объекта к проведению диагностической операции, ч.;  $D_d$  – способность к дистанционной диагностике.

Исходя из этого, целевая функция  $W_K$  представлена математической моделью в следующем виде:

$$W_K = f(T_{\text{пров}}, T_{\text{подг.оп}}, C_{\text{ед.оп.}}, n_{\text{п.п.}}, C_{\text{п.к.}}, N_{\text{ед./ч.}}) \quad (27)$$

при ограничениях  $\sum C_{\text{ед.оп.}} + C_{\text{п.к.}} \rightarrow \min, \sum T_{\text{пров}} + T_{\text{подг.оп}} \rightarrow \min, \sum n_{\text{п.п.}} \rightarrow \max$

$$\sum N_{\text{ед./ч.}} \rightarrow \max$$

При этом  $T_{\text{подг.оп}} = T_{\text{снятия}} + T_{\text{транспортировки}} + T_{\text{установки}}$ .

Где  $T_{\text{снятия}}$  – время снятия проверяемой детали с машины, ч,  $T_{\text{транспортировки}}$  – время транспортировки проверяемой детали к месту проведения диагностики, ч;  $T_{\text{установки}}$  – время установки проверяемой детали в машину, ч,  $T_{\text{см}}$  – время смены, ч. При чём  $W_K$  предлагается определять по формульной зависимости

$$W_{\text{кч}} = C_{\text{ед.оп.}} \cdot N_{\text{ед./ч.}} \quad (28)$$

где  $W_{\text{кч}}$  – часовая производительность ЦИКБД

$$\text{и} \quad W_{\text{кс}} = (C_{\text{ед.оп.}} \cdot N_{\text{ед./ч.}}) \cdot T_{\text{см}} \cdot T_{\text{об}} \quad (29)$$

где  $W_{\text{кс}}$  – сменная производительность ЦИКБД;  $T_{\text{об}}$  – коэффициент использования времени рабочей смены (учитывает время на продолжительность обслуживания комплекса, время на отдых и личное время оператора-диагноста, время на подготовительную и заключительную работу, настройку и калибровку комплекса).

Для определения степени влияния выделенных факторов на производительность ЦИКБД, на основании методики Е.С. Кузнецова было проведено экспертное исследование, которое заключалось в создании и проведении специализированного опроса группы экспертов, в качестве которых выступали специалисты с производства, в частности АО «Дальтимбермаш» и ООО «Спецмашвосток» с подтверждённой квалификацией профильного образования ВУЗа уровня магистратуры, а также проведение многоступенчатого ранжирования значимости каждого параметра. В дальнейшем, на основе материалов анкетирования проведено априорное ранжирование рассматриваемых факторов.

Проверка соответствия мнения экспертов осуществлялась с учётом коэффициента конкордации Кендалла. Значение 0,89, полученное в ходе расчёта показало превышение порогового значения 0,5, что говорит о значительной согласованности мнения экспертов по вопросам анкетирования. Степень неслучайности описываемой согласованности оценивалась по критерию Пирсона. Полученное значение оказалось равным 19,3, оно выше ожидаемого для данной вероятности, что говорит о неслучайности совпадения мнений экспертов.

Таким образом получен комплексный набор показателей, ответственных за проведение диагностических мероприятий- стоимость единичной проверочной операции, время проверки единичной детали и количество проверенных единиц в час.

При теоретических исследованиях, базируясь на действующих регламентирующих документах, с учётом изменения ответственных показателей, отражающих эффективность системы технического обслуживания и ремонта на производстве при применении ЦИКБД получены формульные зависимости для:

- общей трудоёмкости при проведении обслуживающих работ экспериментального трактора за цикл эксплуатации (до проведения капитального ремонта);
- общей продолжительности простоя экспериментального трактора за цикл эксплуатации ( до проведения капитального ремонта);
- коэффициента технического использования для трактора, обслуживаемого при использовании предлагаемого ЦИКБД;
- среднего удельного времени простоя при ТО и Р;
- производительности энергетического средства за цикл использования.

Выбранные средства диагностирования в виде инклинометра-акселерометра WT9011DCL-BTL5.0 AHRS IMU обладают встроенным оригинальным программным обеспечением, однако их совмещение в одном проверочном комплексе и выполнение всех программных операций с получаемыми данными требует применения необходимого авторского программного обеспечения. Структурная схема разрабатываемого приборно-диагностического комплекса представлена на рисунке 1.

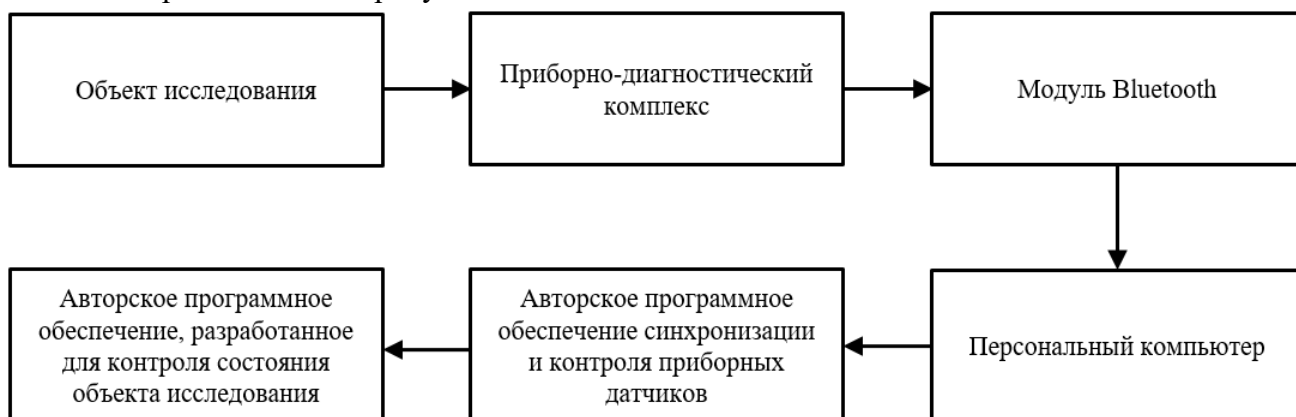


Рисунок 1- Структурная схема разрабатываемого приборно-диагностического комплекса

**В третьей главе** приводится обоснование конструктивной сборки приборно-измерительного комплекса на примере диагностирования технического состояния опор двигателя трактора, программа исследований, алгоритмика и методика экспериментальных исследований.

Особенностью разработанной измерительной аппаратуры является применение в качестве измерительных датчиков высокоточных инклинометров-акселерометров, способных считывать и передавать в реальном времени с использованием bluetooth-модуля указанные ранее показатели без предварительной подготовки поверхности объекта и отвлечения его от проведения производственных операций, рисунок 2.

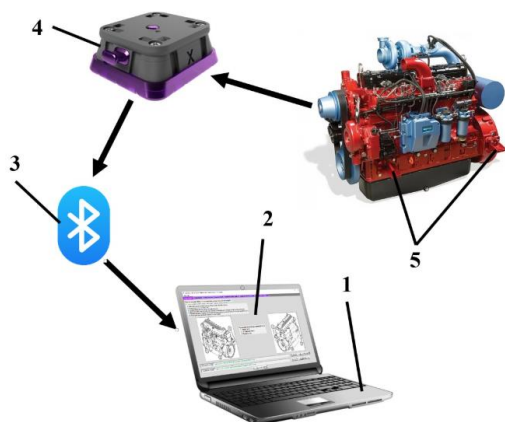


Рисунок 2- Рабочая схема цифрового инклинометрического комплекса безразборной диагностики (ЦИКБД) (1- персональный компьютер оператора-диагноста, 2-авторское программное обеспечение, 3- bluetooth-модуль, 4- диагностический датчик инклинометра-акселерометра, 5-объект исследования)

К преимуществам использования разрабатываемого приборного комплекса можно отнести возможность одновременной установки до 5 датчиков на объект исследования. А также возможность применения диагностического комплекса непосредственно во время выполнения трактором сельскохозяйственных операций, во время которых наиболее явно видны неисправности подушек двигателя и наличие чрезмерной вибрационной нагрузки ДВС.

При помощи дополнительного программного обеспечения для сличения эталонных показателей с рабочими, существует возможность долгосрочного отслеживания работоспособности опор двигателя, что является положительной отличительной характеристикой разрабатываемого комплекса. За счёт встроенного в программное обеспечение фильтра Калмана, датчики программного комплекса имеют минимальную ошибку по критическим отклонениям.

Проверка работоспособности разрабатываемого ЦИКБД проведена при диагностировании опор двигателя. Для определения уровня вибрационной нагрузки предлагаемым ЦИКБД ориентируемся на: ISO-10816-6, ГОСТ 32108-2013. В качестве объектов исследования при получении доказательной базы эффективности предлагаемого ЦИКБД и реализации способа диагностики опор двигателя приняты сельскохозяйственные тракторы New Holland T9.505 в количестве 3 единиц с различным сроком эксплуатации, при этом один из них взят в качестве сравниваемого образца. Расстановка датчиков осуществлялась согласно схемы на рисунке 3 и 4.

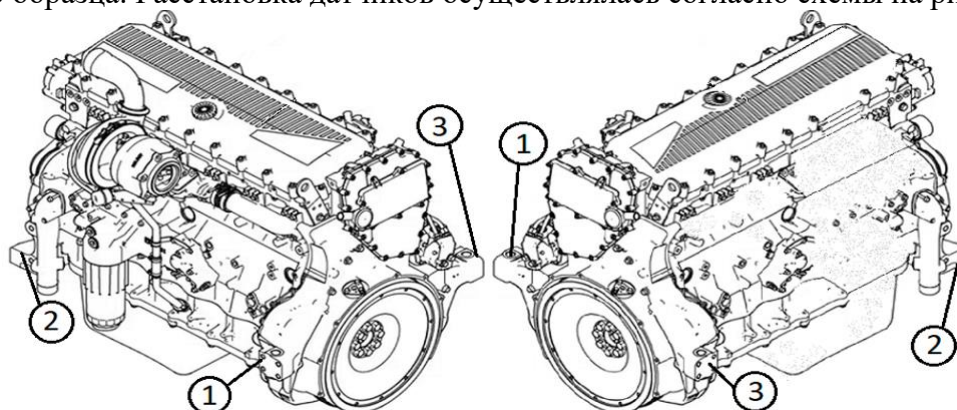


Рисунок 3– Рекомендуемые точки установки датчиков ЦИКБД при реализации способа диагностики опор двигателя

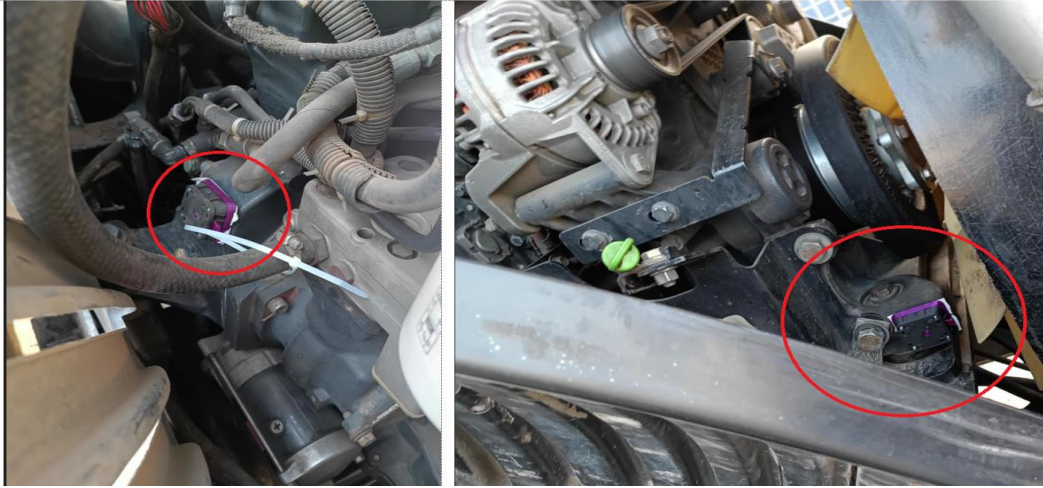


Рисунок 4 - Места установки диагностических датчиков на опоры двигателя

Показатели диагностических датчиков формировали общий массив данных, поступали в авторскую программу ЦИКБД ВИБРУМ и вторично обрабатывались программой для инклинометрической диагностики опор двигателя внутреннего сгорания, рисунок 5, на которую получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025680379 «Программа для инклинометрической диагностики опор двигателя внутреннего сгорания».

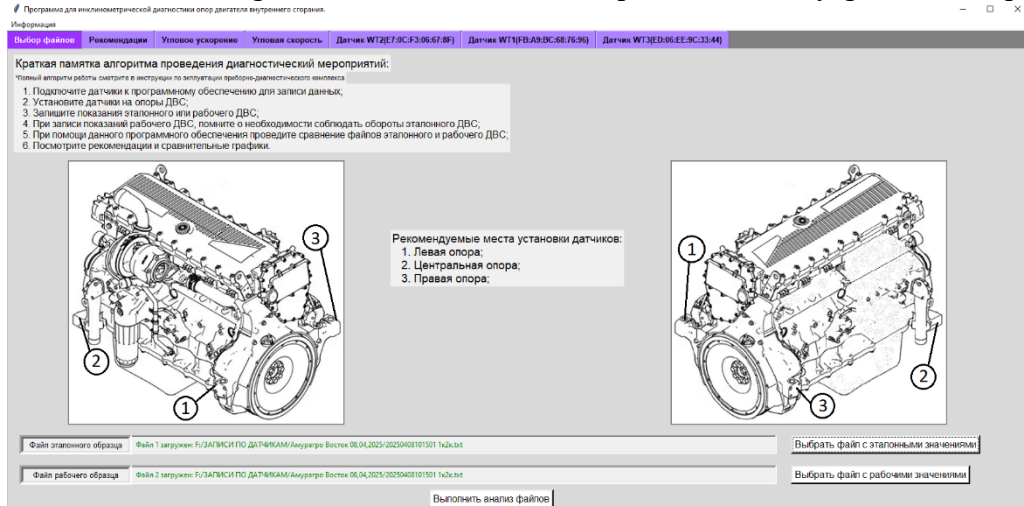


Рисунок 5 – Основное окно программного обеспечения

Принятие решения о дальнейшей эксплуатации подушек двигателя складывается из вкладки «Рекомендации» программного обеспечения, но также из анализа приведённых графиков, который формирует программное обеспечение.

**В четвёртой главе** работы представлены результаты проведения авторского программирования и опытных экспериментов, сравнительный анализ полученных экспериментальных диагностических показателей, расчёт изготовления установочных модулей для приборных датчиков разрабатываемого ЦИКБД и расчёт экономической эффективности разрабатываемого ЦИКБД, приведена сравнительная топливно-энергетическая оценка диагностики с применением разработанного комплекса.

Как указывалось ранее, оригинальное программное обеспечение выбранных приборных средств диагностирования не позволяет использовать их для применения в составе ЦИКБД. В связи с чем было проведено дополнительное программирование в среде Python, которое, базируясь на оригинальном программном обеспечении, модернизировалось для обеспечения информативных потребностей предлагаемого диагностического комплекса – ЦИКБД. Функциональные возможности программы «Программа для инклинометрической диагностики опор двигателя внутреннего сгорания» заключаются в загрузке и сравнении двух файлов в расширении .txt с данными полученными от комплекса безразборной вибрационной диагностики, выдаче рекомендаций по дальнейшей работе с изучаемым объектом: определение

необходимости замены опор двигателя и составлении сравнительных графиков углового ускорения, угловой скорости и угла наклона. Программа может использоваться в сельском хозяйстве и в автотранспорте для диагностики опор двигателя внутреннего сгорания. Результаты эксперимента по диагностированию опор двигателя колёсных тракторов NewHolland T9.505. с применением ЦИКБД (сравниваемый объект с гос. номером 2321 и экспериментальный объект с гос. номером 0711) представлены на рисунках 6 и 8.

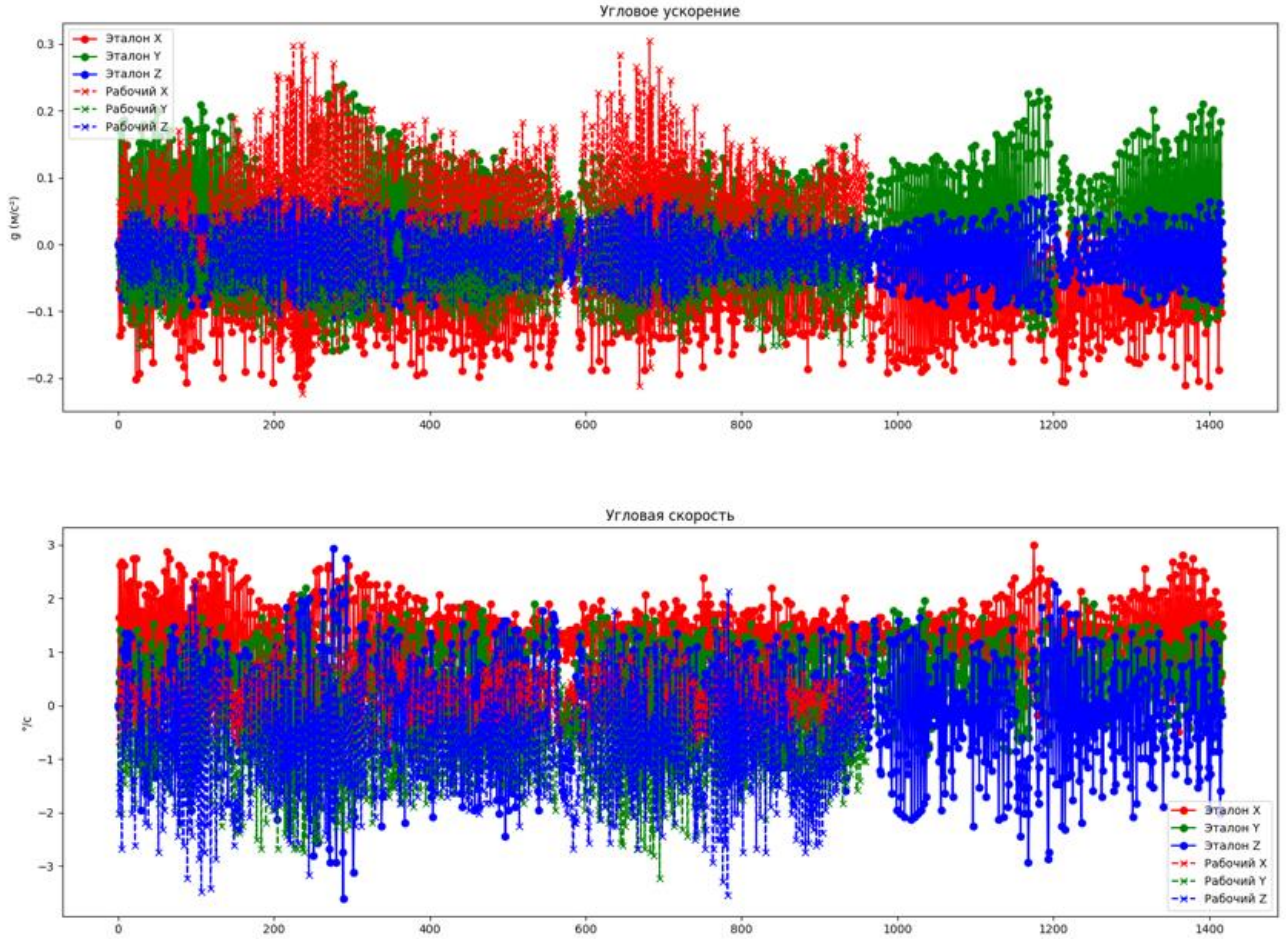


Рисунок 6– Сравнительные графики датчика в точке 1 для измеряемых объектов  
Рекомендации ЦИКБД приведены на рисунке 7.

Программа для инклинометрической диагностики опор двигателя внутреннего сгорания

Информация

Выбор файла Рекомендация Угловое ускорение Угловая скорость Датчик WT1(FB.A9.BC.68.76.96) Датчик WT3(ED.06.EE.9C.33.44) Датчик WT2(E7.0C.F3.06.67.8F)

Название датчика	Угловое ускорение	Угловая скорость	Рекомендации
WT1(FB.A9.BC.68.76.96)	Эталон: X=0.045, Y=0.059, Z=0.998 Рабочий: X=0.054, Y=0.049, Z=1.009 Коэффициенты: X=1.417, Y=0.823, Z=1.012	Эталон: X=0.417, Y=0.489, Z=0.736 Рабочий: X=0.370, Y=0.585, Z=0.842 Коэффициенты: X=0.886, Y=1.196, Z=1.144	Диапазон коэффициента от 1,05 до 1,10 (требует внимания): Легкое отклонение от нормы. Проверьте общее состояние опор ДВС, креплений и состояние узлов. Рекомендуется равняя диагностика.
WT2(E7.0C.F3.06.67.8F)	Эталон: X=0.070, Y=0.030, Z=0.983 Рабочий: X=0.056, Y=0.039, Z=1.003 Коэффициенты: X=0.801, Y=1.298, Z=1.021	Эталон: X=2.117, Y=1.889, Z=0.678 Рабочий: X=0.582, Y=0.670, Z=0.478 Коэффициенты: X=0.275, Y=0.355, Z=0.705	Диапазон коэффициента от 1,00 до 1,05 (условный верхний предел нормы): Коэффициент вибрационной нагрузки в пределах нормы. Значения углового ускорения находятся в допустимом диапазоне.
WT3(ED.06.EE.9C.33.44)	Эталон: X=0.040, Y=0.046, Z=1.001 Рабочий: X=0.061, Y=0.041, Z=1.016 Коэффициенты: X=1.529, Y=0.904, Z=1.015	Эталон: X=0.000, Y=0.000, Z=0.000 Рабочий: X=0.000, Y=0.000, Z=0.000 Коэффициенты: X=1.000, Y=1.000, Z=1.000	Диапазон коэффициента от 1,10 до 1,15 (критический уровень): Повышенный коэффициент вибрации! Соблюдайте осторожность. Проведите диагностику и устраните аномалии.

Рисунок 7– Рекомендации авторского программного обеспечения

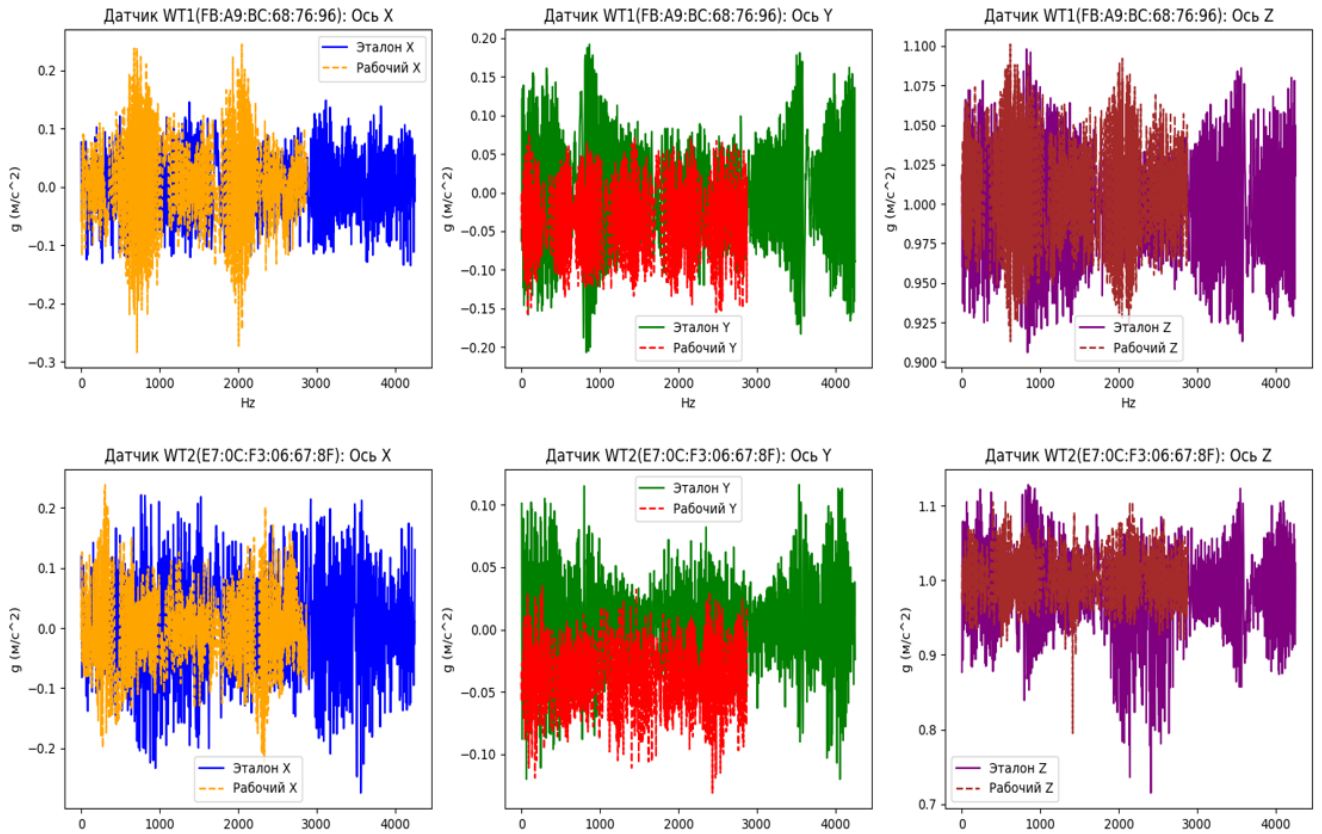


Рисунок 8 – Замеры углового ускорения датчиков по трём осям

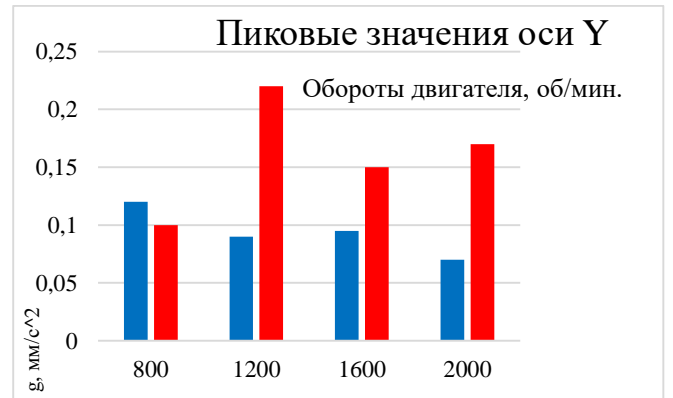
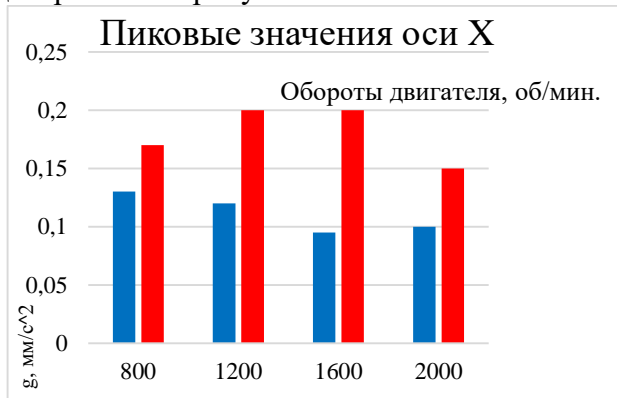
Рекомендации программного обеспечения говорят о следующем:

Точка(датчик) 1 – WT1(FB:A9:BC:68:76:96) – Диапазон коэффициента от 1,05 до 1,10 (требует внимания): Легкое отклонение от нормы. Проверьте общее состояние опор ДВС, креплений и состояние узлов. Рекомендуется ранняя диагностика.

Точка(датчик) 2 – WT2(E7:0C:F3:06:67:8F) – Диапазон коэффициента от 1,00 до 1,05 (условный верхний предел нормы): Коэффициент вибрационной нагрузки в пределах нормы. Значения углового ускорения находятся в допустимом диапазоне.

Точка(датчик) 3 – WT3(ED:06:EE:9C:33:44) – Диапазон коэффициента от 1,10 до 1,15 (критический уровень): Повышенный коэффициент вибрации! Соблюдайте осторожность. Проведите диагностику и устраните аномалии.

Визуальное отображение полученных и обработанных данных приведено в виде диаграммы на рисунке 9.



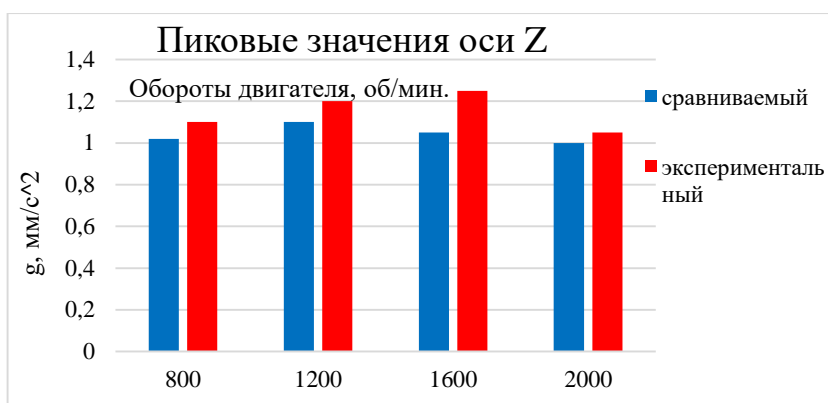


Рисунок 9 – Усреднённые пиковые значения углового ускорения датчиков по трём осям кватерниона

Проведённые полевые исследования ЦИКБД при использовании способа инклинометрической диагностики опор двигателя подтвердили работоспособность предлагаемого комплекса и возможность применения алгоритмики способа для диагностики опор двигателя для проведения мониторинга технического состояния трактора.

Полученные данные так же позволили определить значение искомым коэффициентов  $K_{xас}$ ,  $K_{yас}$ ,  $K_{zас}$ , в следующих величинах, рисунок 10 – 12.

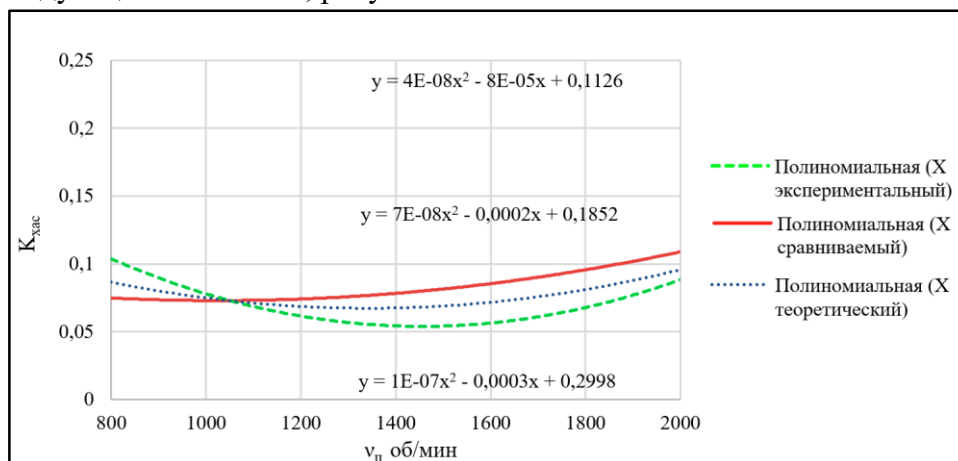


Рисунок 10 – Экспериментальные показатели коэффициента  $K_{xас}$  для оси X

Полученные значения  $K_{xас}$  для оси X могут быть описаны полиномиальными уравнениями:

$$\text{Для сравнимого объекта } y = 4E - 08x^2 - 8E - 05x + 0,1126. \quad (30)$$

$$\text{Для экспериментального объекта } y = 1E - 07x^2 - 0,0003x + 0,2998. \quad (31)$$

Находятся в пределах от 0,052 до 0,105, в зависимости от оборотов двигателя.

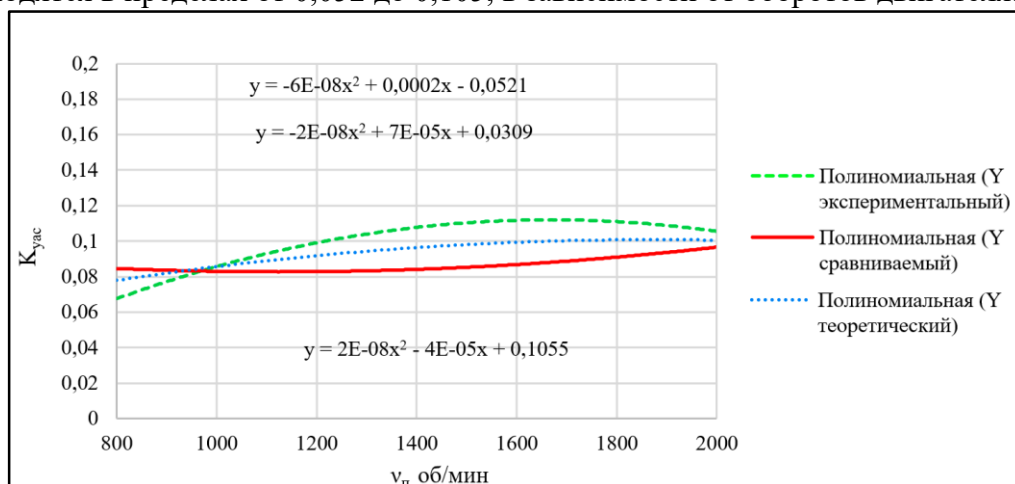


Рисунок 11 - Экспериментальные показатели коэффициента  $K_{yас}$  для оси Y

Полученные значения  $K_{yac}$  для оси  $Y$  могут быть описаны полиномиальными уравнениями: Для сравниваемого объекта  $y = 2E - 08x^2 - 4E - 05x + 0,1055$ . (32)

Для экспериментального объекта  $y = -6E - 08x^2 + 0,0002x - 0,0521$ . (33)

Находятся в пределах от 0,069 до 0,112, в зависимости от оборотов двигателя.

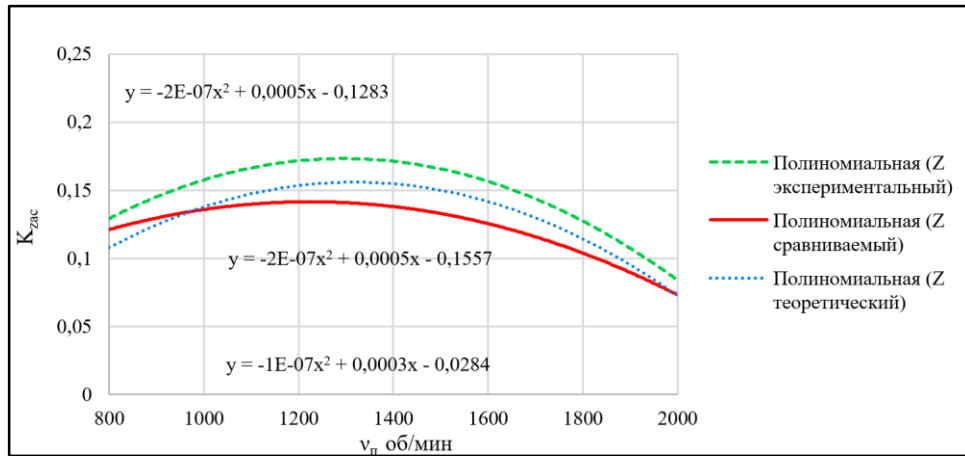


Рисунок 12 - Экспериментальные показатели коэффициента  $K_{zac}$  для оси  $Z$

Полученные значения  $K_{zac}$  для оси  $Z$  могут быть описаны полиномиальными уравнениями: Для сравниваемого объекта  $y = -1E - 07x^2 + 0,0003x - 0,0284$ . (34)

Для экспериментального объекта  $y = -2E - 07x^2 + 0,0005x - 0,1283$ . (35)

Находятся в пределах от 0,127 до 0,175, в зависимости от оборотов двигателя.

Таким образом, полученные данные подтверждают теоретические исследования, находятся в пределах коридора адекватности и указывают, что наиболее рациональным проверочно-диагностическим режимом являются обороты двигателя от 800 до 1800 об/мин, что соответствует производственному диапазону.

Для обработки результатов проведения диагностирования использовалась методика многофакторного эксперимента. При определении точности определения вибрационной нагрузки при помощи цифрового инклинометрического комплекса безразборной диагностики определены основные факторы, влияющие на критерии оптимизации изучаемого процесса, а также уровни их варьирования.

Основными независимыми факторами были выбраны  $x_1 - n$  - обороты двигателя, об/мин. и  $x_2 - t$  - время, с. Результирующей функцией выбрана  $Y_1, Y_2, Y_3 - g$  - угловое ускорение по трём осям соответственно  $X, Y$  и  $Z$ ,  $m/c^2$ .

Полученные поверхности отклика представлены на рисунке 13-15.

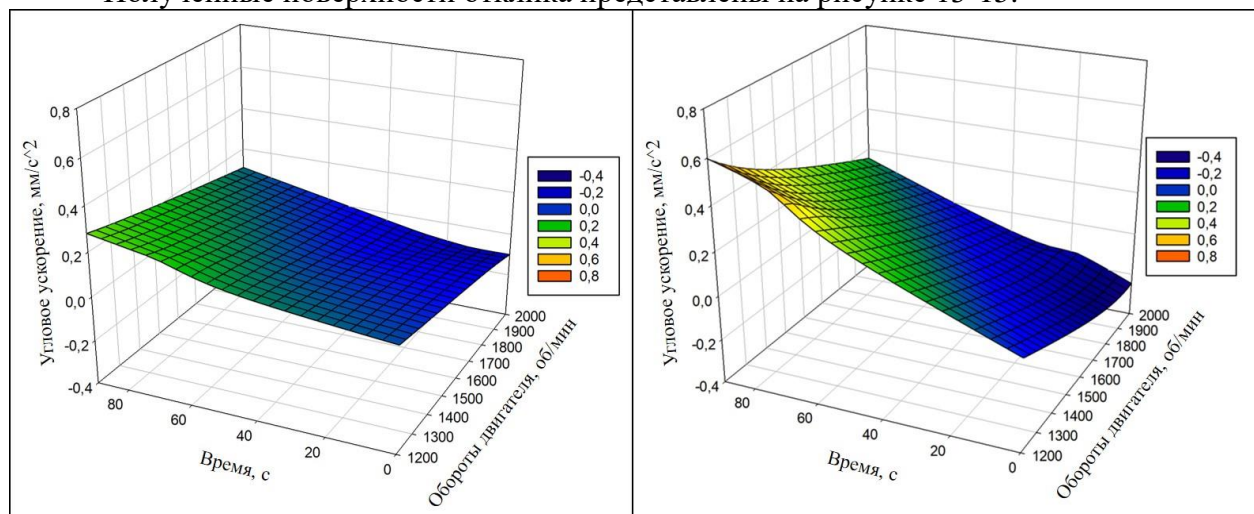


Рисунок 13 - Поверхности отклика  $g$  (углового ускорения оси  $X$ ) в зависимости от  $X_1 n$  (обороты двигателя) и  $X_2 t$  (время), сравниваемого (слева) и экспериментального (справа) объектов диагностирования

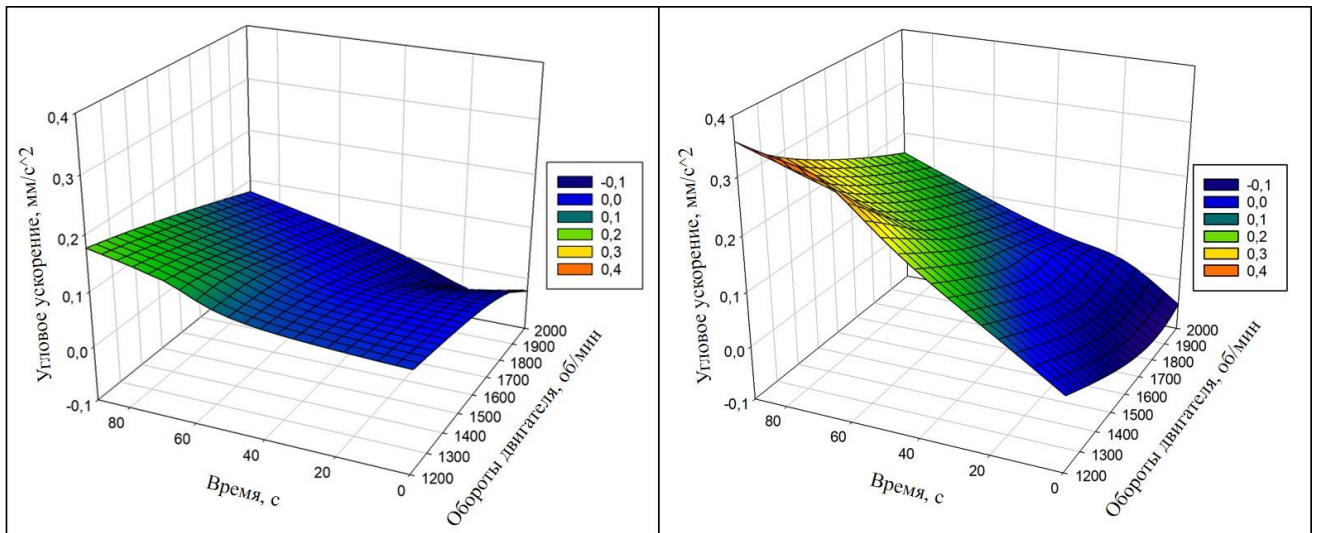


Рисунок 14- Поверхности отклика  $g$  (углового ускорения оси  $Y$ ) в зависимости от  $X_1 n$  (обороты двигателя) и  $X_2 t$  (время), сравниваемого (слева) и экспериментального (справа) объектов диагностирования

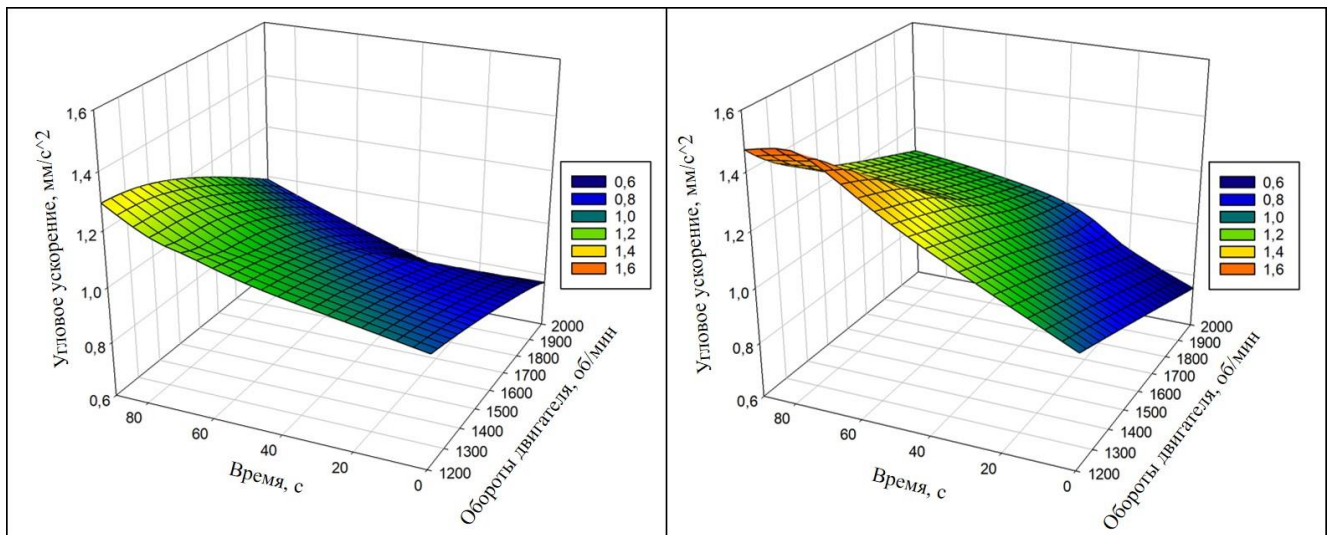


Рисунок 15 - Поверхности отклика  $g$  (углового ускорения оси  $Z$ ) в зависимости от  $X_1 n$  (обороты двигателя) и  $X_2 t$  (время), сравниваемого (слева) и экспериментального (справа) объектов диагностирования

Таким образом получены визуальные отображения оптимальных оборотов двигателя в зависимости от времени.

Себестоимость изготовления корпусов установочных модулей для приборных датчиков и кейса приборного комплекса рассчитывался по формульному аппарату, представленному в главе 2. Расчёт экономической эффективности предлагаемого ЦИКБД осуществлён в соотношении с действующими аналогами, предназначенными для проведения вибродиагностических исследований, проведён в отношении набора показателей, ответственных за проведение диагностических мероприятий, таблица 1.

Таблица 1- Сравнительные экономические показатели известных приборов в соотношении с разрабатываемым комплексом

Тип прибора	Наименование	Страна производитель	$T_{\text{пров}}, \text{ч.}$	$C_{\text{ед.оп.}}, \text{руб.}$	$n_{\text{п.п.}}$	$C_{\text{п.к.}}, \text{руб.}$	$N_{\text{ед./ч.}}$	$W_{\text{кч}}$	$W_{\text{кс}}$
Виброметры	Вибротес-т-МГ4	Россия	0,5	1600	2	102000	2	3200	19200
	BC-473-200	Россия	0,5	2150	1	185000	2	4300	25800
Анализатор вибрации	ВИБРАН-3	Россия	0,5	4800	2	516000	2	9600	57600
Портативные вибродиагностические системы	VA-12 RION	Япония	0,5	1965	4	166000	2	3930	17685
	SPM Leonova Diamond	Швеция	0,5	5216	2	688000	2	10432	62592
Вибродатчики (акселерометры)	АЦТ-90	Россия	0,5	938	2	53700	2	1876	11256
	ВД06А	Россия	0,8	314	1	12700	2	628	3768
ЦИКБД		Россия	0,25	545	6	21325	4	2180	17440

Расчёт производительности и топливно-энергетическая оценка диагностики с применением ЦИКБД осуществлены в отношении стоимости единичной операции в процентном и суммарном выражении, и сравнении с известными диагностическими приборами.

Согласно проведённым экономическим и энергетическим расчётам, разрабатываемый ЦИКБД имеет преимущество при проведении единичной диагностической операции. Учитывая данные, полученные при расчётах, можно обоснованно утверждать о высокой скорости и точности проведения диагностических мероприятий разрабатываемым комплексом для безразборной диагностики (ЦИКБД) в отличие от имеющихся на рынке, применяемых в производстве и промышленности диагностических комплексов и средств.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам исследований, проведенных в диссертационной работе, получены результаты, позволяющие сформулировать следующие обоснованные выводы:

- Изучено современное состояние средств и способов мобильного диагностирования, обозначены направления совершенствования приборно-диагностической базы предприятий, определена категория современных высокоточных цифровых приборов, обладающих соответствующими диапазонами измеряемых показателей для применения в качестве диагностического оборудования;
- Теоретически обоснованы возможности применения высокоточных цифровых инклинометров-акселерометров, обладающих расширенным диапазоном измеряемых показателей, для осуществления безразборной мобильной диагностики технического состояния энергетических средств. Методом аналитической выборки определено высокоточное цифровое устройство-инклинометр-акселерометр, обладающий расширенным набором снимаемых, фиксируемых и передаваемых данных по bluetooth-модулю для обработки на персональный компьютер;
- Изготовлен новый высокоэффективный приборно-диагностический комплекс, выполненный на базе высокоточных цифровых инклинометров-акселерометров и предложен способ исследования технического состояния опор двигателя трактора для его реализации. При этом опытная

проверка, проведённая в производственных условиях, доказательно подтвердила целесообразность внедрения предложенных технических решений.

- Разработано программное и техническое обеспечение нового приборно-диагностического комплекса-ЦИКБД, позволяющее реализовать способ исследования технического состояния опор двигателя трактора. Для чего проведена трансформация исходного кода выбранного прибора в читаемый математический формат для обеспечения дальнейших формульных действий и разработано программное обеспечение, направленное на синхронизацию получаемых, обрабатываемых и предоставляемых данных в составе разрабатываемого приборно-диагностического комплекса (ЦИКБД). Техническое обеспечение работоспособности комплекса ЦИКБД заключается в расчёте и изготовлении установочных элементов для диагностических датчиков и кейса для переноски комплекса ЦИКБД с необходимыми материалами.

- Проведена экспериментальная проверка предлагаемых технических и программных решений в производственных условиях и дана технико-экономическая оценка проводимых исследований. При опытной проверке экспериментального объекта установлено значение искомым коэффициентов амплитудного соответствия  $K_{xac}$ ,  $K_{yac}$ ,  $K_{zac}$  для осей углового ускорения в пределах: для оси X от 0,052 до 0,105; для оси Y от 0,069 до 0,112; для оси Z от 0,127 до 0,175, в зависимости от оборотов двигателя. Данные находятся в пределах коридора адекватности и указывают, что наиболее рациональным проверочно-диагностическим режимом являются обороты двигателя от 800 до 1800 об/мин.

- Сравнительный анализ данных эксперимента показывает, что оптимальные значения углового ускорения стремятся к 2000 об/мин, что свидетельствует не только о работоспособности опор двигателя, но и об общем работоспособном состоянии ДВС, что так же подтверждается графиками, полученными при помощи авторского программного обеспечения. Установлено, что минимальные колебания на опорах наблюдаются при оборотах двигателя, приближенных к максимальным, а при 1400 об/мин и 1800 об/мин отмечены гармонические колебания, с общими минимальными отклонениями в  $0,3 \text{ м/с}^2$ .

- Расчётным методом установлена стоимость изготовления элементов технического обеспечения и определены показатели экономической эффективности предложенного приборно-диагностического комплекса ЦИКБД. Так стоимость единичной проверочной операции составила 545, 0 руб., что является наименьшим показателем в исследуемой области техники, при этом сменная производительность в 17440,0 руб. представится наиболее эффективным показателем в сравнении с известными аналогами предлагаемого диагностического комплекса.

- Доказано, что экономия энергозатрат при использовании ЦИКБД составляет 381,25 МДж в сравнении со стандартным методом диагностики в ремонтной мастерской, и в рублёвом эквиваленте по шкале теплотворности дизельного топлива и его стоимости в Амурской области на период января 2026 года за 1л ДТ= 77,0 рубля, позволяет получить экономию в 687,5 рублей на одну диагностическую операцию. В сравнении с методом диагностики и применением диагностического комплекса ВС-473-200 экономия энергозатрат составила 115,28 МДж, в рублёвом эквиваленте – 207,8 рублей.

**Рекомендации производству.** Программные продукты и конструктивные схемы предлагаемых технических решений, позволяют произвести техническое диагностирование опор двигателей колёсных тракторов различных конструкций в короткие сроки и, учитывая небольшую стоимость ЦИКБД, получить экономию денежных средств и ресурсов за счёт снижения времени проведения диагностики, быстрого получения и сбора аналитических, и сравнительных данных, что будет востребовано при планировании и проведении операций системы технического обслуживания и ремонта на предприятиях АПК.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Дальнейшее развитие тематики использования ЦИКБД, учитывая, что комплекс обладает возможностью считывания следующих показателей- ускорение, температура, угловая скорость, угол отклонения, магнитное поле, кватернион, предполагает расширение сферы его применения для диагностирования сложных объектов, конструкций, систем и агрегатов автомобилей (тракторов),

сельскохозяйственных машин (орудий), внедрение диагностических датчиков непосредственно в конструкцию трактора (автомобиля), разработку новых способов диагностирования и испытаний, минимизацию считывающе-расчётных машин и масштабное применение авторской программной оболочки для использования в мобильных коммуникационных устройствах.

### **Список основных работ, опубликованных по теме исследования**

#### ***В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus:***

1. Investigation of the motion parameters of technological complexes using a quaternion data fixation apparatus / S. Us, E. Kuznetsov, S. V. Shchitov [et al.] // E3S Web of Conferences : International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 2023, Novosibirsk, Russia, 16–19 мая 2023 года. Vol. 402. – Novosibirsk, Russia: EDP Sciences, 2023. – P. 03002. – DOI 10.1051/e3sconf/202340203002. – EDN MKONKD.

#### ***В изданиях из перечня научных изданий, рекомендованного ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:***

2. Ус, С. С. Применение современных цифровых приборов для фиксации параметров движения сельскохозяйственных агрегатов / С. С. Ус, Е. В. Маршанин, К. Е. Кузнецов [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 8. – С. 147-154. – DOI 10.28983/asj.y2023i8pp147-154. – EDN ZBRLHT.

3. Ус, С. С. Исследование параметров движения колёсных сельскохозяйственных агрегатов применением кватернионного аппарата фиксации данных / С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов, С. В. Щитов [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 1(105). – С. 142-148. – EDN PZXIRY.

4. Ус, С. С. Определение параметров продольной устойчивости экспериментального колёсного агрегата с применением цифрового инклинометрического приборно-диагностического комплекса / М. С. Соколов, С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2025. – № 5(115). – С. 88-94. – DOI 10.37670/2073-0853-2025-115-5-88-94. – EDN JVJMZM.

5. Ус С.С. Расчёт основных показателей проведения технического обслуживания при внедрении цифрового комплекса безразборной инклинометрической диагностики / Ус С.С., Кузнецов Е.Е., Ковалевский В.Н., Петроченко В.В., Самуйло В.В. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2026. – №03(217). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2026/03/pdf/40.pdf>, 0,698 у.п.л. – IDA [article ID]: 2172603040. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-217-040>

#### ***Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:***

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662808 Российская Федерация. Программа для комплекса безразборной вибрационной диагностики ВИБРУМ : заявл. 13.05.2025 : опубл. 23.05.2025 / С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов ; заявитель ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "ВИБРУМ". – EDN QHVFBF.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025669818 Российская Федерация. Программа для инклинометрической диагностики кривошипно-шатунного механизма двигателя внутреннего сгорания : заявл. 26.06.2025 : опубл. 31.07.2025 / С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов, Д. В. Беляков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет». – EDN JUWBHW.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025680051 Российская Федерация. Программа для инклинометрической диагностики газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания : заявл. 26.06.2025 : опубл. 01.08.2025 / С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов, Д. В. Беляков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет». – EDN YSQUIUO.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025680379 Российская Федерация. Программа для инклинометрической диагностики опор двигателя внутреннего сгорания : заявл. 26.06.2025 : опубл. 05.08.2025 / С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов, Д. В. Беляков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет». – EDN FXNVGX.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683722 Российская Федерация. Программа получения экспериментальных данных модернизированного колёсного агрегата при использовании инклинометрического комплекса : заявл. 29.07.2025 : опубл. 05.09.2025 / С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов, А. И. Гончарук [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет». – EDN QAEVLO.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684379 Российская Федерация. Программа инклинометрической проверки качества сборки колёсного технологического агрегата, прошедшего капитальный ремонт : заявл. 29.07.2025 : опубл. 15.09.2025 / С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов, Д. В. Беляков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет». – EDN AJKWNV.

*В прочих научных изданиях:*

12. Ус, С. С. Высокоточная цифровая инклинометрическая диагностика ходовой части легкового автомобиля / М. В. Черноус, С. С. Ус // Молодёжь XXI века: шаг в будущее : Материалы XXII региональной научно-практической конференции, Благовещенск, 20 мая 2021 года. – Благовещенск: Благовещенский государственный педагогический университет, 2021. – С. 831-832. – EDN GYKINT.

13. Ус, С. С. Применение цифровой инклинометрии для диагностики системы зажигания двигателя / С. С. Ус, М. В. Черноус // Молодёжь XXI века: шаг в будущее : Материалы XXII региональной научно-практической конференции, Благовещенск, 20 мая 2021 года. – Благовещенск: Благовещенский государственный педагогический университет, 2021. – С. 827-828. – EDN SFRIKR.

14. Ус, С. С. Применение цифровой инклинометрии при технической диагностике опор двигателя / С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов, С. В. Щитов // Актуальные вопросы развития аграрного сектора экономики Байкальского региона : материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной Дню Российской науки, Улан-Удэ, 04–10 февраля 2021 года. – Улан-Удэ: Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова, 2021. – С. 117-120. – EDN PXCBS.

15. Ус, С. С. Применение цифровых методов фиксации данных для диагностики устройства стабилизации движения сельскохозяйственной машины / А. Н. Щитков, С. С. Ус // Молодёжь XXI века: шаг в будущее : Материалы XXIII региональной научно-практической конференции, Благовещенск, 24 мая 2022 года. Том 4. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2022. – С. 35-37. – EDN NIUSTY.

16. Ус, С. С. Применение перспективных цифровых способов анализа работы агрегатов и 3D-аддитивных технологий в АПК / С. С. Ус, А. Н. Щитков, Е. Е. Кузнецов // Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК : Материалы X Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 90-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора

технических наук, профессора Терских Ивана Петровича, Молодёжный, 06–08 октября 2022 года / Редколлегия: Н.Н. Дмитриев [и др.]. – Молодёжный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2022. – С. 298-305. – EDN GGHDAK.

17. Ус, С. С. Применение цифровой инклинометрии для определения эффективности перспективных устройств и модулей / С. С. Ус, А. Н. Щитков // Молодёжь XXI века: шаг в будущее : Материалы XXIII региональной научно-практической конференции, Благовещенск, 24 мая 2022 года. Том 4. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2022. – С. 29-31. – EDN NDXIGA.

18. Ус, С. С. Перспективный комплекс инклинометрической безразборной диагностики транспортно-технологических машин и комплексов / С. С. Ус, Р. О. Сурин, Е. Е. Кузнецов // Актуальные вопросы автомобильного транспорта (ават-2022) : Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Барнаул, 15–16 декабря 2022 года. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2023. – С. 92-96. – EDN UWIGST.

19. Ус, С. С. 3D-моделирование и исследование перспективных средств механизации / Р. О. Сурин, С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов, С. В. Щитов // Актуальные вопросы автомобильного транспорта (Ават-2022) : Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Барнаул, 15–16 декабря 2022 года. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2023. – С. 51-55. – EDN MTVZAU.

20. Ус, С. С. Применение современных методов 3D-визуализации для анализа производственных процессов в агропромышленном комплексе / С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов, З. Ф. Кривуца, Т. В. Шарипова // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы всероссийской научно-практической конференции, Благовещенск, 20–21 апреля 2023 года. Том 2. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2023. – С. 253-259. – DOI 10.22450/9785964205401\_2\_253. – EDN JTPUFM.

21. Ус, С. С. Применение современных цифровых комплексов в сельском хозяйстве / С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов, С. В. Щитов [и др.] // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования : Материалы XV международной научно-практической конференции, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова, Новосибирск, 09–11 ноября 2023 года. – Новосибирск: Издательский центр НГАУ "Золотой колос", 2023. – С. 150-155. – EDN ULZNWT.

22. Ус, С. С. Обеспечение инклинометрических исследований технологических процессов, объектов механизации и оборудования в АПК / С. С. Ус, К. Е. Кузнецов, Т. В. Шарипова, Е. Е. Кузнецов // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : Материалы международной научно-практической конференции. В 5 томах, Благовещенск, 18–19 апреля 2024 года. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2024. – С. 247-255. – DOI 10.22450/978-5-9642-0633-0-247-255. – EDN HRKZXD.

23. Ус, С. С. Разработка программного обеспечения и алгоритмика диагностического приборного комплекса на основе 3-х осевого инклинометра / С. С. Ус, А. И. Гончарук, В. Н. Ковалевский, Е. Е. Кузнецов // Состояние и инновации технического сервиса конструкций, машин и оборудования : Материалы XVI международной научно-практической конференции, посвященной 80-ти летию Инженерного института, Новосибирск, 13–15 ноября 2024 года. – Новосибирск: ИЦ НГАУ "Золотой колос", 2024. – С. 137-141. – EDN HIZQK.

24. Ус, С. С. Экспериментальное подтверждение эффективности применения высокоточных инклинометров для проведения замера колебательных характеристик коробки передач трактора / С. С. Ус, Е. В. Маршанин, Е. Е. Кузнецов, А. И. Гончарук // Развитие современной аграрной науки: актуальные вопросы, достижения и инновации : международная научно-практическая конференция, посвященная памяти заслуженного деятеля науки РФСР, доктора сельскохозяйственных наук, профессора Петра Григорьевича Лучкова, Нальчик, 08 февраля 2024 года. – Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова, 2024. – С. 130-134. – EDN WGYHET.

25. Ус, С. С. Обоснование способа исследования характеристик движения тракторно-транспортного агрегата / С. С. Ус, К. Е. Кузнецов, Е. Е. Кузнецов // Актуальные вопросы

автомобильного транспорта (АВАТ-2023) : Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Барнаул, 15 декабря 2023 года. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2024. – С. 124-127. – EDN UXDPKY.

26. Ус, С. С. Применение инклинометрического комплекса для безразборной диагностики амортизаторов подвески легкового автомобиля / С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов, В. Н. Ковалевский // Актуальные вопросы автомобильного транспорта (АВАТ-2024) : Сборник статей всероссийской научно-практической конференции, Барнаул, 13 декабря 2024 года. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2025. – С. 35-38. – EDN PMJJMI.

27. Ус, С. С. Адаптация приборного диагностического комплекса к проведению исследований колесных тракторов / С. С. Ус, В. И. Худовец, В. А. Мунгалов, Е. Е. Кузнецов // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию Дальневосточного государственного аграрного университета. В 3 т., Благовещенск, 16–17 апреля 2025 года. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2025. – С. 388-394. – DOI 10.22450/978-5-9642-0480-0-388-394. – EDN XRSAUF.

28. Ус, С. С. Результаты экспериментальных исследований по определению технического состояния амортизаторов передней подвески «MacPherson» легковых автомобилей / В. Н. Ковалевский, Е. Е. Кузнецов, В. В. Самуйло, С. С. Ус // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию Дальневосточного государственного аграрного университета. В 3 т., Благовещенск, 16–17 апреля 2025 года. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2025. – С. 299-304. – DOI 10.22450/978-5-9642-0480-0-299-304. – EDN PAXHFD.

29. Ус, С. С. Использование аддитивных технологий для восстановления деталей сельскохозяйственной и автомобильной техники / Н. А. Акимов, А. В. Лисицкий, Д. С. Соколов [и др.] // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию Дальневосточного государственного аграрного университета. В 3 т., Благовещенск, 16–17 апреля 2025 года. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2025. – С. 233-239. – DOI 10.22450/978-5-9642-0480-0-233-239. – EDN PMHTAD.

30. Ус, С. С. Результаты экспериментальных исследований по диагностированию элементов передней подвески типа «McPherson» ходовой части легковых автомобилей с применением инклинометрического комплекса / А. А. Меншун, С. С. Ус, Е. Е. Кузнецов [и др.] // Научный прогресс и устойчивое развитие : Сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Владивосток, 17 апреля 2025 года. – Санкт-Петербург: ООО Издательский дом "Сциентиа", 2025. – С. 99-103. – EDN JJXXFA.

31. Ус, С. С. Современное состояние методов диагностирования технических параметров колёсных энергетических средств и концептуальные направления их развития / С. С. Ус, А. С. Безруков, Е. В. Лоскутова [и др.] // Развитие науки и технологий в современной России : Сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 31 мая 2025 года. – Москва: Знание-М, 2025. – С. 595-601. – EDN XZPQCS.

32. Ус, С. С. Применение математических методов для разработки ответственных элементов современного диагностического приборного комплекса / С. С. Ус, А. С. Безруков, Е. В. Лоскутова [и др.] // Развитие науки и технологий в современной России : Сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 31 мая 2025 года. – Москва: Знание-М, 2025. – С. 588-594. – EDN LPXFVM.