

На правах рукописи



БОРОДИН Алексей Леонидович

**МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО ТОРМОЗНОГО
ЦИЛИНДРА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ
АВТОМОБИЛЯ**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Курган – 2024

Работа выполнена на кафедре «Автомобили и автомобильный транспорт»
ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», г. Курган

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Автомобили и
автомобильный транспорт ФГБОУ ВО
«Курганский государственный университет»
Васильев Валерий Иванович

Официальные оппоненты: **Федотов Александр Иванович**, доктор
технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Автомобильный транспорт»
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»;

Енаев Александр Андреевич, доктор
технических наук, профессор, профессор
кафедры «Автомобильный транспорт»
ФГБОУ ВО «Псковский государственный
университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится 19 апреля 2024 г. в 16.00 часов на заседании
диссертационного совета 24.2.352.01, созданного на базе ФГБОУ ВО
«Оренбургский государственный университет» по адресу: 460018, г. Оренбург,
пр. Победы, 13, ауд. 170215.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на
официальном сайте ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»
(www.osu.ru).

Автореферат разослан: «__» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Хасанов Ильгиз Халилович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Статистика дорожно-транспортной аварийности в категории причин «по технической неисправности» показывает, что до 60% аварий происходит из-за неисправностей тормозной системы, причем данные дорожно-транспортные происшествия (ДТП) являются наиболее опасными по тяжести последствий. В условиях постоянно увеличивающегося количества автомобилей на дорогах страны и увеличения плотности транспортного потока все большее количество ДТП происходит при попутном следовании (до 35-40%) с использованием режима служебного торможения. На этом режиме качественную работу тормозов обеспечивает техническая исправность узлов и деталей гидравлической тормозной системы (ГТС). В первую очередь это относится к главному тормозному цилиндру (ГТЦ), правильная работа которого влияет на всю тормозную систему автомобиля. Обеспечить полноценный контроль технического состояния ГТЦ должно диагностирование. Исследования в этом направлении обращены, в большей мере, на общее диагностирование, а поэлементное (углубленное) изучено недостаточно. Углубленное диагностирование поможет выявлять неисправные элементы ГТЦ, а своевременная замена поможет продлить срок службы базовых деталей. Поэтому актуальной является разработка метода углубленного диагностирования ГТЦ на основе дополнительных исследований закономерностей влияния неисправностей его элементов на характер протекания процесса изменения силы нажатия на педаль тормоза с различными законами воздействия на нее.

Степень разработанности темы исследования.

Исследованиям в области теории торможения, рабочих процессов, протекающих в тормозных системах, изменения технического состояния в них посвящены труды многих отечественных и зарубежных ученых, таких как: *А.В. Бойко, А.П. Болдин, В.И. Васильев, Б.Б. Генбом, Н.Я. Говорущенко, Л.В. Гуревич, А.Н. Доморозов, А.А. Енаев, И.С. Жуков, Г.И. Клишковштейн, В.В. Котов, В.А. Меламуд, С.М. Мороз, Г.В. Осипов, Ю.П. Петин, А.Н. Пойда, Е.М. Портнягин, А.А. Смолин, А.Н. Степанов, А.В. Шарыпов, А.И. Федотов, М.М. Шукин, E. Bakker, J.E. Bernard, H. Dugoff, P.S. Fancher, R. Gupta, N.K. Mital, H. Moncarz, L. Nyborg, L. Segel, J.T. Tielking* и др.

Обзор исследований показал, что вопросы разработки методов и средств углубленного диагностирования ГТЦ остаются малоизученными, что не позволяет достоверно выделить неисправные детали. Определение отдельных режимов воздействия на педаль тормоза на участке срабатывания тормозной системы повысит достоверность и поможет ориентированно выделять неисправные элементы ГТЦ.

Цель диссертации – повышение безопасности движения автомобилей на основе разработки метода диагностирования главного тормозного цилиндра гидравлической тормозной системы.

Задачи исследования.

1. Выявить перечень наиболее часто отказывающихся деталей ГТЦ, определяющих его работоспособность, и провести анализ их характерных неисправностей;

2. Разработать математическую модель функционирования гидравлического тормозного привода с двухконтурным ГТЦ автомобиля, алгоритм моделирования рабочих процессов ГТЦ и программное обеспечение моделирования;

3. Теоретически определить оптимальный комплекс диагностических параметров и информативные тестовые режимы диагностирования ГТЦ;

4. Выполнить экспериментальную проверку метода диагностирования двухконтурного ГТЦ гидравлической тормозной системы по параметрам воздействия на орган управления;

5. Разработать практические рекомендации по применению разработанного метода диагностирования и определить его экономическую эффективность.

Объект исследования – процесс изменения технического состояния главного тормозного цилиндра гидравлической тормозной системы автотранспортного средства.

Предмет исследования – закономерности влияния неисправностей элементов двухконтурного ГТЦ легкового автомобиля на характер протекания процесса изменения силы нажатия на педаль тормоза с различными законами воздействия на нее.

Область исследования соответствует направлениям исследований паспорта специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта: 9. Исследования в области *безопасности движения с учетом технического состояния автомобиля*, дорожной сети, организации движения автомобилей, качеств водителей; проведение дорожно-транспортной экспертизы, разработка мероприятий по снижению аварийности; 15. Технологические процессы и организация технического обслуживания, ремонта; *методы диагностирования технического состояния автомобилей, агрегатов и материалов*.

Новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты:

1. Комплекс диагностических параметров, отличающийся тем, что параметры измеряются на режимах служебного торможения, и позволяющий определить техническое состояние элементов, наиболее часто отказывающихся деталей ГТЦ, определяющих его работоспособность.

2. Диагностическая математическая модель работы ГТЦ, отличающаяся учетом влияния на выходные характеристики ГТЦ технического состояния элементов, определяющих его работоспособность, и позволяющая моделировать влияние эксплуатационных факторов на комплекс диагностических параметров.

3. Закономерности изменения диагностических параметров от структурных параметров при различном времени воздействия на орган управления тормозной системой, отличающиеся возможностью определения влияния неисправностей ГТЦ на диагностические параметры, и позволяющие на этой основе

прогнозировать степень изменения технического состояния ГТЦ от степени изменения структурных параметров деталей, определяющих работоспособность ГТЦ и определяющих его техническое состояние.

4. Тестовые режимы (время и сила нажатия на педаль) диагностирования ГТЦ по выбранному комплексу диагностических параметров, предельно допустимые значения диагностических параметров на этих режимах и алгоритм постановки диагноза, отличающиеся их реализацией в диапазоне служебных торможений и позволяющие максимально реализовать информативную возможность каждого из диагностических параметров.

5. Метод углубленного диагностирования ГТЦ ГТС (Патент РФ № 2751101, приоритет 26.02.2020 г.), отличающийся использованием в качестве диагностических динамические параметры силы нажатия на педаль тормоза на режимах служебного торможения, позволяющий определять техническое состояние пружин и уплотнительных колец первого и второго контуров ГТЦ и повысить безопасность дорожного движения.

Практическая значимость. Ценность представляют разработанные метод диагностирования и практические рекомендации по его технической и технологической реализации, позволяющие своевременно устранять обнаруженные неисправности при выполнении операций технического обслуживания и ремонта. Результаты исследования могут использоваться в учебном процессе подготовки квалифицированных кадров для отрасли автомобильного транспорта страны.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.

Общая методология исследований построена на комплексе теоретических и экспериментальных методов, включающих имитационное моделирование, теорию автомобиля и его технической эксплуатации, методы теории вероятности, математической статистики и оценку сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований. Это обеспечивает достоверность научных положений и результатов, а также адекватность результатов теории и эксперимента.

Реализация результатов работы. Результаты работы в виде комплекса диагностических параметров, их предельно допустимых значений, режимов и технологии диагностирования гидравлических тормозных систем автомобилей используются в диагностическом подразделении автотранспортного цеха предприятия ООО «Кургантрансколод». Результаты исследования также внедрены в учебный процесс подготовки студентов автотранспортного профиля ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития автомобильного транспорта» (г. Курган, КГУ, 2013 г.); Международной научно-технической конференции «Транспортные и транспортно-технологические системы» (г. Тюмень, ТИУ, 2020 г.); III Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство» (г. Омск, СибАДИ, 2020 г.); XIV Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и

транспорт Сибири» (г. Иркутск, ИРНТУ, 2020 г.); XVII Международной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах» (г. Оренбург, ОГУ, 2022 г.).

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 11 научных работах, в том числе 5 – в рецензируемых научных журналах из «Перечня...» ВАК, 1 – в научных изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus, получен 1 патент РФ на способ.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и основных выводов, списка литературных источников, содержащего 126 наименований, и приложений. Работа изложена на 190 страницах, включает в себя 7 таблиц, 60 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, описывается основная идея и определяется цель исследования, ставятся задачи. Представляются новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, указывается практическая значимость.

Первая глава *«Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследования»* содержит аналитический обзор состояния вопроса и включает в себя анализ влияния неисправностей гидравлической тормозной системы и, в частности, ГТЦ на безопасность дорожного движения, анализ существующих методов и средств оценки технического состояния гидравлических тормозных систем.

На основании проведенных исследований выявлено: разработка метода поэлементного диагностирования ГТЦ является актуальной задачей; математические модели, описывающие работу ГТЦ и привода в динамике, не могут применяться для поэлементного диагностирования без доработки; оценку работы ГТС наиболее перспективно проводить по тормозной диаграмме, на режиме срабатывания привода, используя для этого величины силы и времени нажатия тормозной педали.

В результате анализа определена основная идея исследования, которая заключается в том, что, во-первых, характер изменения силы нажатия на педаль тормоза на участке срабатывания достаточно полно отражает силовую динамику взаимодействия основных элементов ГТС, включая ГТЦ, и, следовательно, техническое состояние определяющих работоспособность деталей, и, во-вторых, степень проявления уровня технического состояния этих деталей при торможении различна на разных режимах (время и сила нажатия на педаль) торможения.

В заключение главы ставится цель исследования, формируются задачи и принимается к реализации общая структура исследования.

Вторая глава *«Теоретические предпосылки разработки метода диагностирования главного тормозного цилиндра»* посвящена обоснованию принятой идеи исследования, в ней дается описание основных этапов общей

методики исследований, обосновывается предварительный комплекс диагностических параметров, приводятся описание математической модели, а также алгоритмическое и программное обеспечение процесса моделирования по разработанной модели.

В соответствии с принятой общей методикой исследование начиналось с пассивного эксперимента по выявлению перечня наиболее часто отказывающихся деталей ГТЦ, определяющих его работоспособность, их характерных неисправностей и измерения структурных параметров, их характеризующих. Данные собирались в диагностическом подразделении и агрегатном цехе предприятия ООО «Кургантрансхолд». Подтверждено, что наиболее характерными неисправностями ГТЦ являются: изменение жесткости пружин ГТЦ первого и второго контуров (53% от общего количества неисправностей); износ уплотнительных колец ГТЦ первого и второго контуров (32%); увеличение силы трения уплотнительных колец о стенки цилиндра из-за разбухания материала (10%), из которого они изготовлены. Установлены диапазоны изменения их характеристик в реальных условиях эксплуатации.

Далее согласно общей методике была выполнена серия предварительных экспериментов по обоснованию рабочей гипотезы. В эксперименте участвовали 35 автомобилей ВАЗ (классика). Подробное описание этого этапа приведено в главе 4 диссертации. В серии экспериментов первого этапа было выявлено существенное различие процесса изменения тормозных сил на колесах одной оси транспортного средства при воздействии с различным временем нажатия на педаль тормоза (рисунок 1).

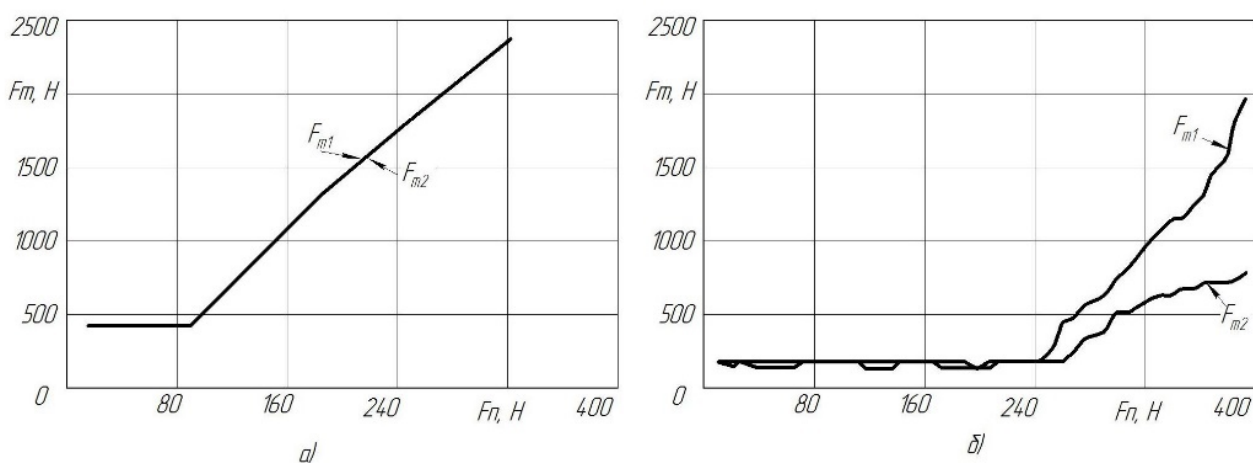


Рисунок 1 – Пример зависимости тормозной силы колес одной оси от силы нажатия при различном времени нажатия педаль тормоза: а) при времени движения педали 0,2 с; б) при времени движения педали 1,0 с; F_{m1} – тормозная сила на заднем правом колесе; F_{m2} – тормозная сила на заднем левом колесе

Эксперимент проводился с использованием устройства нажатия на педаль тормоза с временем нажатия на педаль: $T = 0,2$ с и $T = 1,0$ с, которое устанавливалось на автомобиль ВАЗ 21074, с двухконтурной тормозной системой 2+2 параллельного типа. Двигатель запущен, вакуумный усилитель работает.

Различие тормозных сил для одного автомобиля можно объяснить наличием неисправностей в ГТЦ, а его углубленное диагностирование с различными временами нажатия на педаль тормоза позволит определить эти неисправности.

При этом сила нажатия на педаль тормоза отражает динамическую характеристику исследуемых процессов. Анализ полученных результатов первого этапа эксперимента показал также, что на участке срабатывания тормозного привода в ГТЦ имеются два характерных локальных минимума, отображающих момент страгивания с места и остановки поршня второго контура гидроцилиндра (рисунок 2). При этом с уменьшением времени нажатия на тормозную педаль эти участки выделяются более четко.

На основе изложенного была сформулирована основная идея исследования, приведенная выше.

Анализ результатов первого этапа эксперимента позволил выявить также и состав предварительного комплекса диагностических параметров: $S1$ – время $t1$ от начала нажатия на педаль тормоза до первого локального минимума, начала движения второго поршня ГТЦ; $S2$ – время $t2$ от начала нажатия на педаль тормоза до второго локального минимума, окончания движения поршня второго контура ГТЦ; $S3$ – время $t1-t2$ между участками первым и вторым или время движения второго поршня ГТЦ; $S4$ – сила $F1$ на педали тормоза в момент начала движения поршня второго контура ГТЦ; $S5$ – сила $F2$ на педали тормоза в момент окончания движения второго поршня ГТЦ и $S6$ – разность сил $F1-F2$.

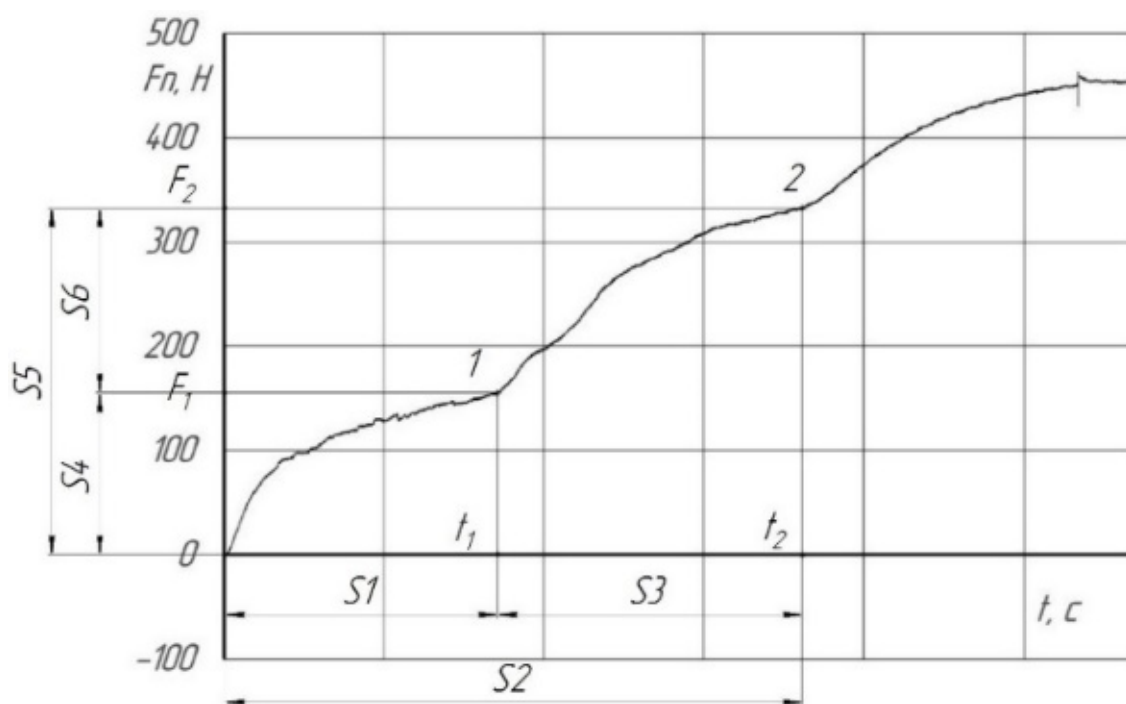


Рисунок 2 – Предварительный комплекс диагностических параметров

Для теоретического исследования влияния эксплуатационных неисправностей деталей на выбранный комплекс диагностических параметров была составлена математическая диагностическая модель по ГТЦ автомобиля ВАЗ-21074, (рисунок 3).

Математическая модель составлялась согласно схеме гидравлической цепи тормозной системы автомобиля, состоящей из двух контуров, переднего и заднего (рисунок 3), с упрощением.

Диагностическая математическая модель гидравлической цепи с двумя отдельно сосредоточенными объемами жидкости описывает динамические процессы, происходящие в такой цепи при известном режиме нажатия (сила и время нажатия) на педаль тормоза. Основу этой модели составляет система, состоящая из следующих нелинейных дифференциальных уравнений, все основные переменные описаны в подрисуночной надписи (рисунок 3):

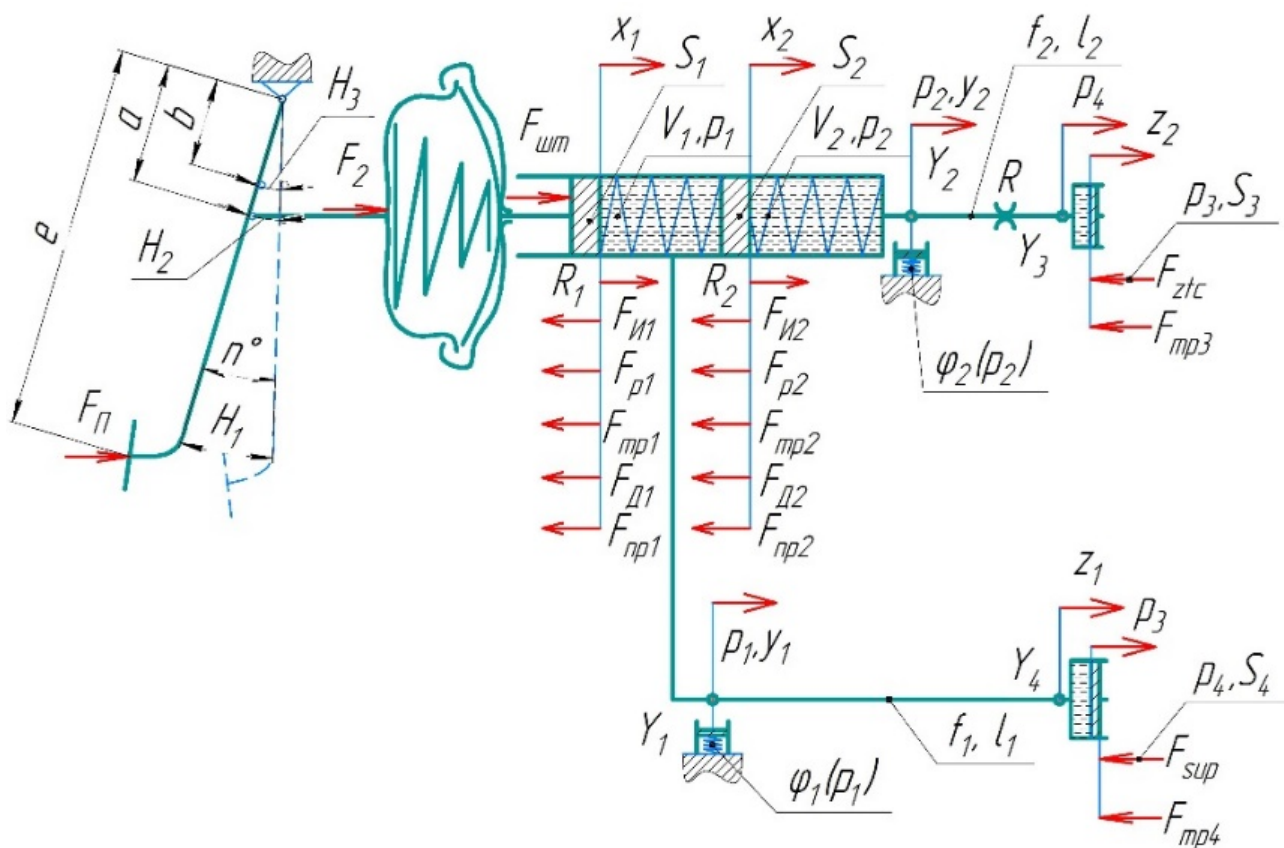


Рисунок 3 – Упрощенная расчетная схема гидравлической цепи тормозной системы: a, e, b – плечи рычагов педали; H_1, H_2, H_3 – перемещения разных точек педали тормоза; n – угол перемещения педали тормоза; V_1, V_2 – объемы тормозной жидкости первого и второго контуров ГТЦ; x_1, x_2 – перемещения поршней первого и второго контуров ГТЦ; z_1, z_2 – перемещения поршня суппорта и заднего тормозного цилиндра; S_1, S_2 – площади поршней первого, второго контуров ГТЦ; l_1, l_2 и f_1, f_2 – длины и площади сечения первого и второго трубопроводов; p_3, p_4 и S_3, S_4 – давление и площадь переднего и заднего тормозного цилиндра; p_1, p_2 – давления в первом и втором контуре ГТЦ; F_{II} – сила нажатия на педаль тормоза; F_2 – сила воздействия на вакуумный усилитель тормозов; $F_{шт}$ – управляющая сила на штоке главного тормозного цилиндра; F_{II1}, F_{II2} – силы действия пружин и силы инерции поршней первого и второго контуров; F_{P1}, F_{P2} – силы от давления в первом и втором контурах ГТЦ; $F_{д1}, F_{д2}$ – силы демпфирования первого и

второго контуров ГТЦ; F_{mp1}, F_{mp2} – сила трения от уплотнительных колец поршней первого и второго контуров; R_1, R_2 – реакции опор от поршней первого и второго контуров; F_{sup}, F_{ztc} – сила сопротивления движению поршня суппорта и заднего тормозного цилиндра; F_{mp4}, F_{mp3} – силы трения поршня суппорта и заднего тормозного цилиндра; $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, y_1, y_2$ – расчетные точки и условные перемещения тормозной жидкости, необходимые для расчета коэффициента податливости; R – дроссель регулятора тормозных сил задней оси.

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{шт} + R_1 = F_{np1} + F_{и1} + F_{p1} + (F_{д1} + F_{тр1} + F_{тр2}) \cdot \operatorname{sgn}\left(\frac{dx_1}{dt}\right); \\ F_{np1} + F_{p1} + R_2 = F_{np2} + F_{и2} + F_{p2} + (F_{д2} + 2 \cdot F_{тр2}) \cdot \operatorname{sgn}\left(\frac{dx_2}{dt}\right); \\ m_{п1} \frac{d^2 z_1}{dt^2} + F_{sup} + F_{тр4} \operatorname{sign} \frac{dz_1}{dt} - p_3 S_3 = 0; \\ m_{п2} \frac{d^2 z_2}{dt^2} + F_{ztc} + P_{тр3} \operatorname{sign} \frac{dz}{dt} - p_4 S_4 = 0; \\ a_{1.1} \frac{d^2 z_1}{dt^2} + a_{2.1} \frac{dz_1}{dt} + a_{3.1} \left(\frac{dz_1}{dt}\right)^2 \operatorname{sgn} \frac{dz_1}{dt} + \frac{F_{тр4}}{S_3} \operatorname{sgn} \frac{dz_1}{dt} + p_3 = p_1; \\ a_{1.2} \frac{d^2 z_2}{dt^2} + a_{2.2} \frac{dz_2}{dt} + a_{3.2} \left(\frac{dz_2}{dt}\right)^2 \operatorname{sgn} \frac{dz_2}{dt} + \frac{F_{тр3}}{S_4} \operatorname{sgn} \frac{dz_2}{dt} + p_4 = p_1; \\ \frac{dx_1}{dt} = \frac{S_3}{S_1} \frac{dz_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} + \left[(x_{max1} - x_1) + \frac{S_3}{S_1} (z_{min1} + z_1) + \frac{f_1 l_1}{S_1} \right] \psi_1(p_1) \frac{dp_1}{dt}; \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{S_4}{S_2} \frac{dz_2}{dt} + \left[(x_{max2} - x_2) + \frac{S_4}{S_2} (z_{min2} + z_2) + \frac{f_2 l_2}{S_2} \right] \psi_2(p_2) \frac{dp_2}{dt}. \end{array} \right. \quad (1)$$

где t – текущее время работы системы; $m_{п1}, m_{п2}$ – масса подвижных частей, приведенная к поршню переднего и заднего тормозного цилиндра; sgn – кусочно-постоянная функция действительного аргумента (величины перемещения первого и второго поршней); k_ε – коэффициент аппроксимации, значение которого зависит от относительной шероховатости ε гидравлических магистралей; ρ – плотность тормозной жидкости; ν – кинематический коэффициент вязкости; ζ_1 – коэффициент местного сопротивления; $\psi_1(p_1), \psi_2(p_2)$ – нелинейные коэффициенты податливости первого и второго контура соответственно.

В соответствии с задачами данного исследования, *входными параметрами модели* являются: сила F_n и время перемещения педали тормоза; $\psi_{1,2}$ – коэффициент податливости тормозной жидкости в контурах ГТЦ, характеризующий содержание воздуха в ней, %; $C1, C2$ – жесткость возвратных пружин первого и второго контура соответственно, $H/м$; $\Delta d1, \Delta d2$ – изменение диаметра сечения уплотнительных колец первого и второго контуров для

характеристики их износа, мм; $D1$, $D2$ – наружный диаметр уплотнительных колец первого и второго контуров для характеристики их разбухания, мм.

Выходными параметрами модели являлись значения диагностических параметров $S1$ - $S6$.

В ходе математического моделирования, в системе дифференциальных уравнений, были преобразованы выражения для определения следующих величин: коэффициента податливости, жесткости пружин первого и второго контуров, сил демпфирования и трения. При моделировании были приняты следующие допущения: исполнительные механизмы, тормозные шланги и трубопроводы – исправны; податливостью в исполнительных механизмах пренебрегаем; рабочие цилиндры передних и задних тормозных механизмов приведены к одному цилиндру с увеличенным вдвое диаметром, на каждый контур; расчет приведенной массы жидкости к поршню управляющего и исполнительного механизмов проводим по усредненной длине трубопроводов; волновые процессы в гидромагистралях вследствие сравнительно малой длины их не влияют на переходной процесс; вязкость, плотность, температура тормозной жидкости и количество нерастворенного воздуха не изменяются в течение переходного процесса; отсутствуют утечки рабочей жидкости; тормозную педаль в движение приводит автоматическое устройство, обеспечивающее стабильность входных параметров; работа вакуумного усилителя учитывалась согласно классической теории расчета исходя из диаметра вакуумного цилиндра, диаметра втулки поршня усилителя, жесткости возвратной пружины корпуса клапана, давлений воздуха в цилиндре и атмосферного.

Моделирование проводилось для четырех режимов нажатия на педаль тормоза с временем: $T1$ – время нажатия на педаль тормоза составляет 0,2 с; $T2$ – 0,7 с; $T3$ – 1,0 с; $T4$ – 1,4 с. Время воздействия на орган управления выбраны согласно анализу результатов предварительных экспериментальных исследований. Значения констант и переменных, характеризующих конструкцию ГТЦ автомобиля, брались характерными для автомобилей семейства ВАЗ (классика).

Фрагмент укрупненного алгоритма моделирования приведен на рисунке 4. Дифференциальные уравнения решались с помощью метода Рунге – Кутты 4 порядка.

Третья глава «*Математическое моделирование работы главного тормозного цилиндра*» посвящена результатам моделирования и их анализу с целью определения закономерностей влияния неисправностей ГТЦ на выбранный предварительный комплекс диагностических параметров. Обработка и анализ результатов моделирования проводились с использованием Excel 2013 и Statistica 13 Trial 64-bit. Часть результатов моделирования в качестве примера приведены на рисунке 5.

В процессе анализа полученных закономерностей было проведено сравнение чувствительности каждого диагностического параметра к изменению структурных параметров (неисправности) на исследуемых тестовых режимах диагностирования.

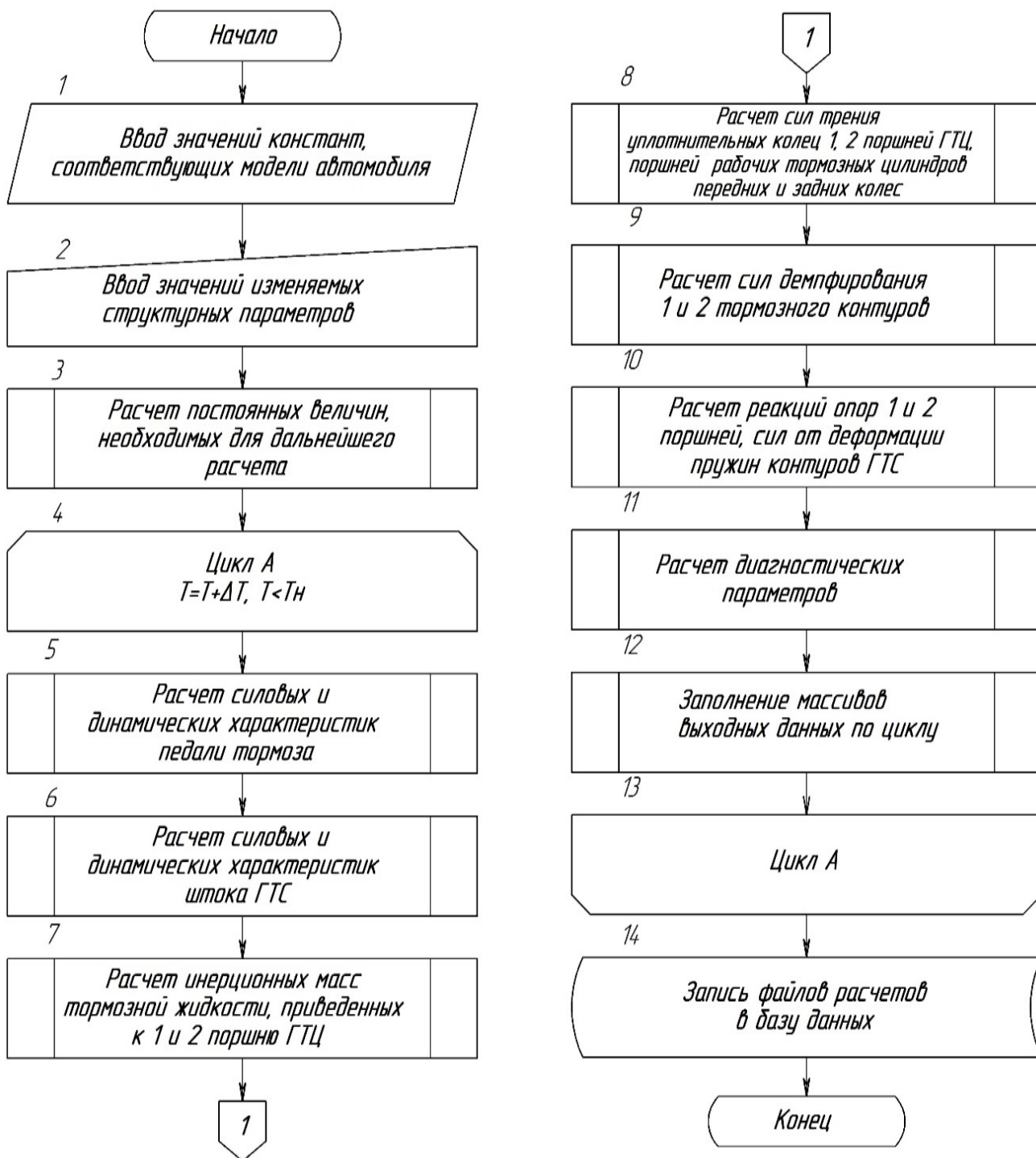
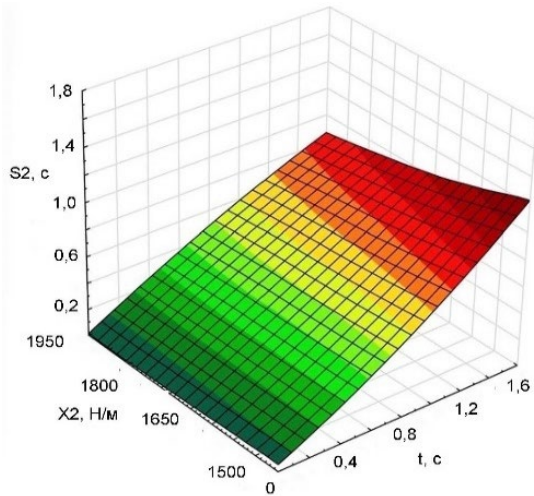


Рисунок 4 – Алгоритм моделирования влияния неисправностей ГТЦ на диагностические параметры

Проведено балльное ранжирование параметров по методике суммы занятых мест. Оно показало, что состояние тормозной жидкости $X1$ и структурные параметры $X2, X4, X5, X7$ оказывают значительное влияние на диагностические параметры $S2, S3, S4, S5, S6$, а ухудшение характеристик $X3$ и $X6$ практически не изменяют диагностических параметров, и поэтому в дальнейшем исследовании их не рассматривали.

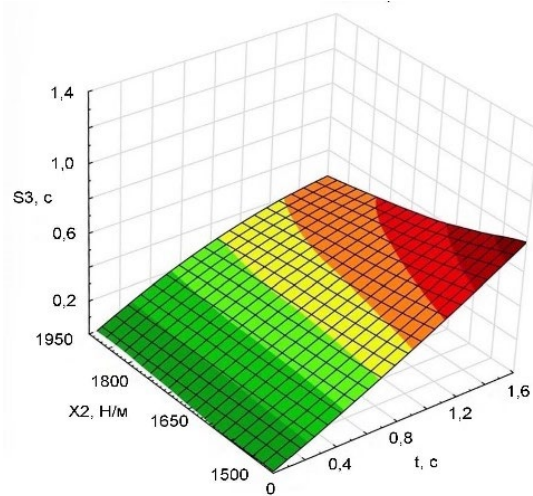
$$S2=1,62 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot X2 + 2,53 \cdot 10^{-7} \cdot X2^2 + 1,357 \cdot T - 8 \cdot 10^{-4} \cdot X2 + 0,59$$

$$S3=2,5 \cdot 10^{-7} \cdot X2^2 - 5,2 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot X2 + 1,15 \cdot T - 8 \cdot 10^{-4} \cdot X2 + 0,57$$



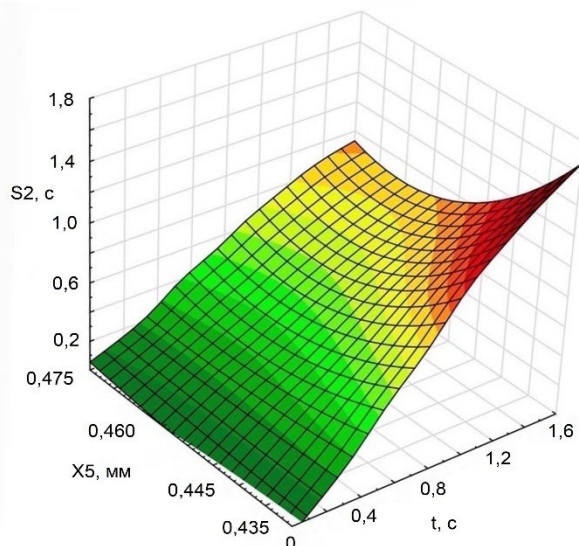
а

$$S2=496,2 \cdot X5^2 + 7,02 \cdot T - 449 \cdot X5 - 0,084 \cdot T^2 - 13,6 \cdot T \cdot X5 + 101,5$$

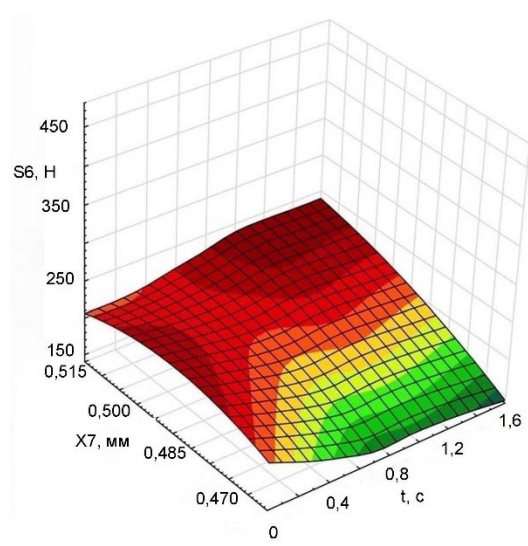


б

$$S6=12,03 \cdot T^2 + 1175,7 \cdot T \cdot X7 - 27796,4 \cdot X7^2 - 601,9 \cdot T + 27601,7 \cdot X7 - 6628,4$$



в



г

Рисунок 5 – Закономерности изменения диагностических параметров S от изменения структурных параметров X режима торможения T и их графические интерпретации: а – S2 от жесткости пружины первого контура X2; б – параметра S3 от жесткости пружины первого контура X2; в – S2 от износа уплотнительного кольца поршня первого контура ГТЦ X5; г – S6 от разбухания уплотнительного кольца поршня второго контура ГТЦ X7

Четвертая глава «Экспериментальные исследования» посвящена описанию экспериментальных исследований и сравнению их результатов с результатами теоретических исследований. Приводится описание общей и частных методик экспериментальных исследований, аппаратного обеспечения экспериментальных исследований, определены предельно-допустимые значения диагностических параметров разрабатываемого метода.

В состав разработанного экспериментального комплекса входит роликовый тормозной стенд CARTEC BDE-2304 и система регистрации данных. Разработанный измерительный комплекс позволяет в ходе диагностирования тормозной системы определять следующие показатели: тормозную силу на роликах стенда; величину давления в контурах тормозной системы; перемещение и силу нажатия педали тормоза.

В качестве устройства регистрации сигналов используется персональный компьютер ASUSK50IJ; к нему по интерфейсу USB версии 1.1 подключен внешний универсальный модуль АЦП/ЦАП L-CARDE14-440. Закон движения органа управления задает устройство для нажатия на педаль тормоза (пневмопедаль с возможностью регулирования времени и силы нажатия на педаль тормоза). В Microsoft Excel данные автоматически обрабатывались, масштабировались, корректировались и визуализировались на экране в виде графиков (пример на рисунке 6).

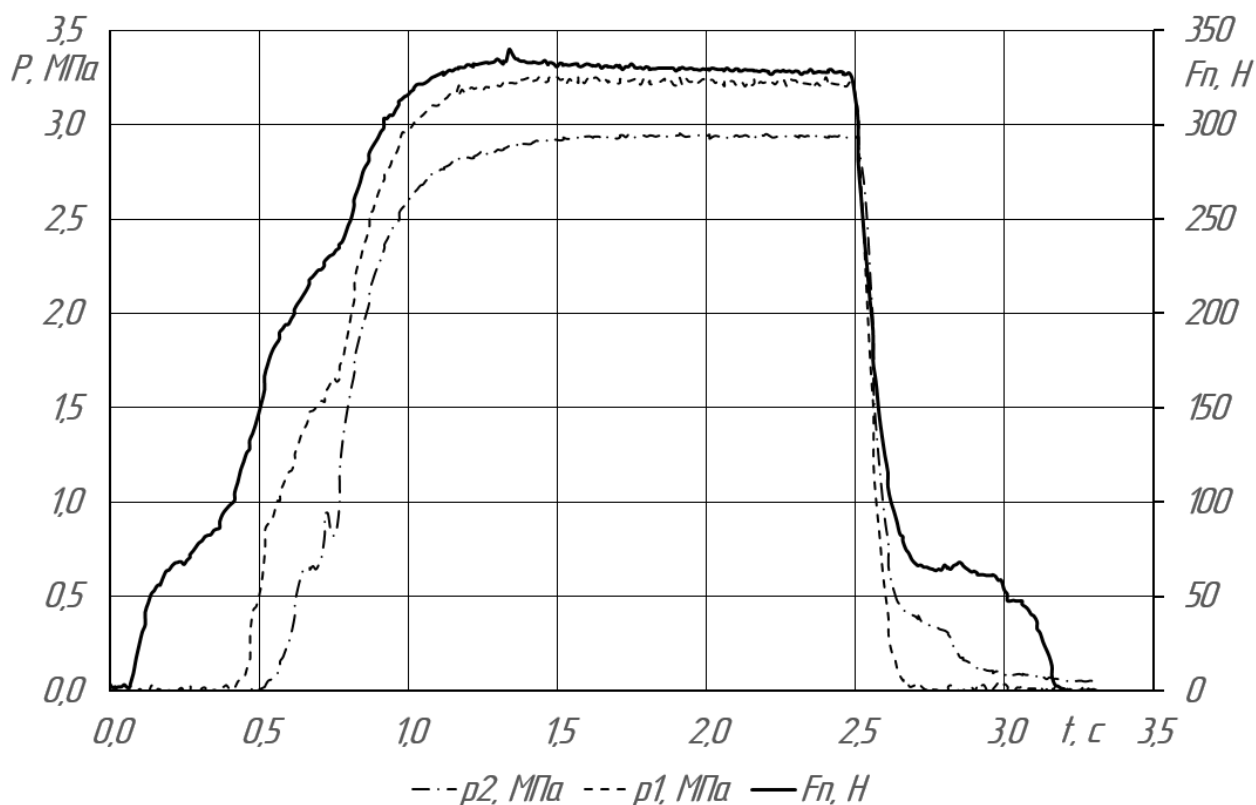


Рисунок 6 – Пример визуализации обработанных экспериментальных данных в Microsoft Excel

На рисунке 7 показано влияние износа уплотнительного кольца поршня второго контура и наличия воздуха в первом контуре ГТЦ, на характер изменения силы нажатия на педаль тормоза. Произведенное сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало, что средняя погрешность отклонения теоретической кривой от экспериментальной составляет в среднем 1,42%.

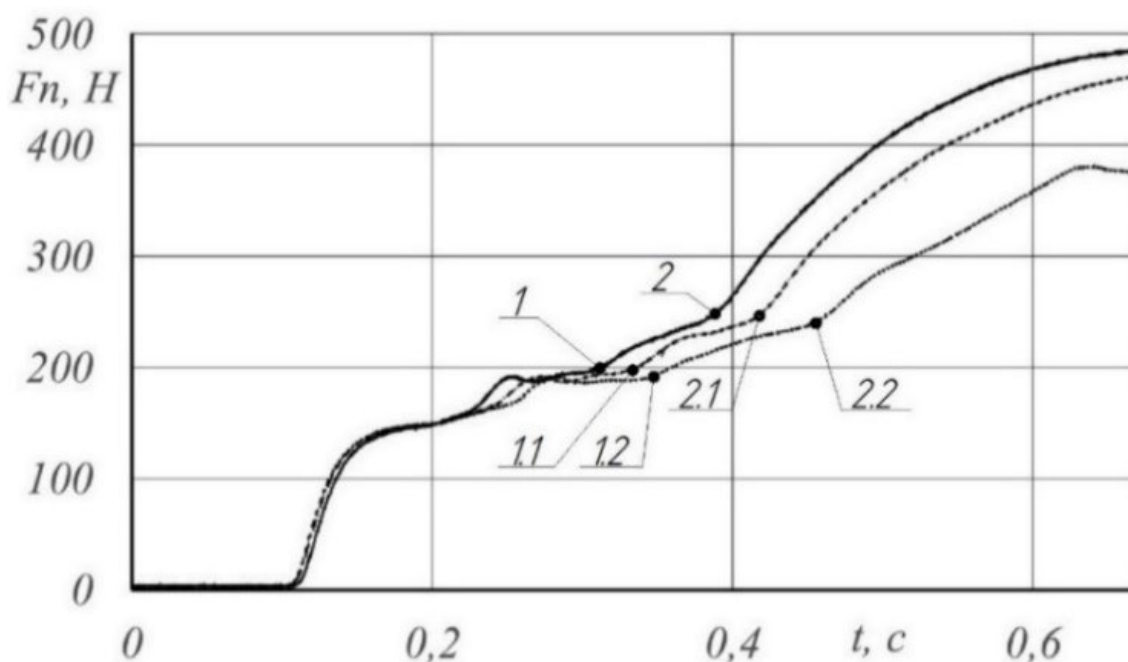


Рисунок 7 – Пример визуализации экспериментальных данных по влиянию неисправностей X1 и X5 на процесс на режиме T3:

— – ГТЦ исправен; – неисправность X5 (износ уплотнительного кольца поршня второго контура ГТЦ); - - - - - – неисправность X1 (завоздушен второй контур ГТЦ на 10%; 1 и 2 – участок начала движения и остановки поршня второго контура исправного ГТЦ; 1.1 и 2.1 – участок начала движения и остановки поршня второго контура ГТЦ при неисправности X1; 1.2 и 2.2 – участок начала движения и остановки поршня второго контура ГТЦ при неисправности X5

В процессе эксперимента были собраны данные по замеру диагностических и структурных параметров у 35 автомобилей ВАЗ 21074, проходивших ТО-6 (50000 км).

Диагностика автомобилей проводилась в диагностическом подразделении предприятия ООО «Кургантрансколод», г. Курган. Исследуемый автомобиль оснащался устройством для нажатия на педаль тормоза (педометром), и при выбранных режимах (сила и время нажатия) на педаль тормоза проводились замеры с последующей их фиксацией. После проведения диагностирования снимался ГТЦ, разбирался в агрегатном цехе предприятия и оценивалось состояние всех элементов цилиндра с проведением соответствующих замеров.

Экспериментально подтверждены результаты теоретического исследования по формированию оптимального комплекса диагностических параметров.

Экспериментально установлена нецелесообразность использования тестового режима T2, так как результаты диагностирования на этом режиме дублируются режимом T4, и диагностического параметра S1, который оказался неинформативным на всех тестовых режимах и из дальнейших исследований исключен.

Определены на основе статистического метода предельно допустимые значения диагностических параметров главного тормозного цилиндра (таблица

1), учитывающего вероятностные процессы возникновения неисправностей изменения технического состояния. Особенностью нормирования диагностических параметров разрабатываемого метода является необходимость нормирования параметров отдельно для каждого тестового режима диагностирования.

Таблица 1 – Предельно допустимые значения диагностических параметров

Диагностический параметр	Ед. измерения	Допустимое значение диагностического параметра		
		Режим T1	Режим T3	Режим T4
S2 _{HTi}	с	0,164	0,73	0,97
S3 _{HTi}	с	0,09	0,4	0,54
S4 _{HTi}	Н	260	207	183
S5 _{HTi}	Н	459	412	376
S6 _{HTi}	Н	218	178	175

Пятая глава «Рекомендации по практическому применению и оценка эффективности метода» посвящена описанию разработанного алгоритма постановки диагноза на основе применения нового метода диагностирования. Даны общие рекомендации для практической реализации предлагаемого метода. Приведена оценка эффективности результатов исследования. Укрупненно схема алгоритма постановки диагноза представлена на рисунке 8.

Разработанный метод диагностирования защищен Патентом РФ 2751101 «Способ диагностирования главного тормозного цилиндра гидравлической тормозной системы по динамическим параметрам силы сопротивления нажатию на педаль тормоза» и может быть реализован на практике в трех вариантах.

Первый вариант – реализация разработанного алгоритма в виде дополнительного файла, размещаемого в файловой системе управляющего компьютера стандартного стенда тормозных качеств. В этом случае (с разрешения завода-изготовителя) повышается информативность существующего отечественного диагностического оборудования при минимуме затрат.

Второй вариант – реализация разработанного метода в виде отдельного автономного прибора на основе применения недорогого микропроцессора (например, контроллер Arduino UNO). В этом случае реализация обойдется дороже ввиду необходимости установки дополнительных датчиков, устройств согласования и сопряжения, а также драйверов.

Третий вариант – реализация метода в виде дополнительной подсистемы общей системы бортового диагностирования автомобиля. В этом случае диагностический режим будет включаться автоматически при совпадении режима нажатия на тормозную педаль с одним из режимов, на которые настроен метод (T1, T3, T4). Данные будут накапливаться, и информация может быть выведена или на диагностический разъем или может быть продублирована штатным индикатором автомобиля «check engine».

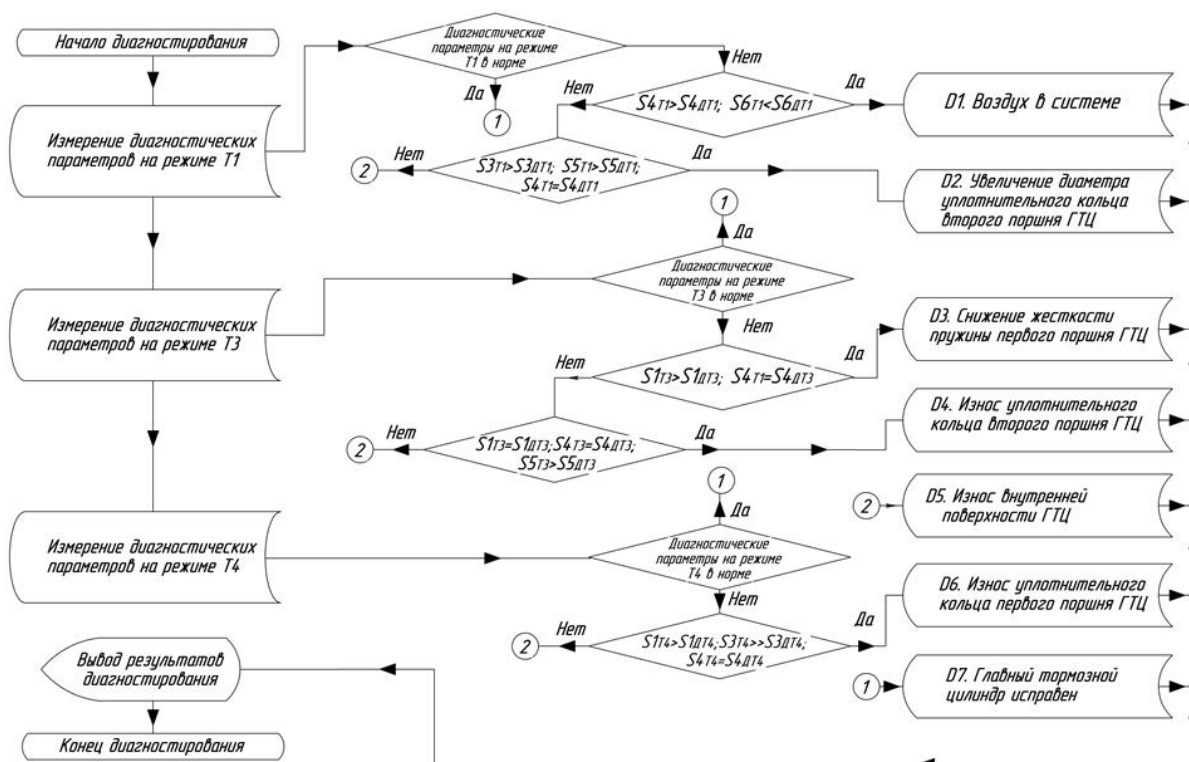


Рисунок 8 – Алгоритм постановки диагноза ГТЦ

Определена рекомендуемая периодичность стационарного диагностирования ГТЦ разработанным методом, которая составила 10 тыс. км.

Расчет экономической эффективности проводился для легковых автомобилей (на примере Курганской области по состоянию за 2021 год) и составил 1192 руб. на один автомобиль в год.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выявлено, что деталями, определяющими работоспособность ГТЦ, являются пружины первого и второго контуров, а также уплотнительные кольца поршней этих контуров. При этом наиболее характерными неисправностями этих деталей ГТЦ являются: изменение жесткости пружин ГТЦ первого и второго контуров (53% от общего количества неисправностей); износ уплотнительных колец ГТЦ первого и второго контуров (32%); увеличение силы трения уплотнительных колец о стенки цилиндра из-за разбухания материала (10%), из которого они изготовлены. Установлены диапазоны изменения их характеристик в реальных условиях эксплуатации.

2. Разработана математическая модель гидравлического тормозного привода транспортного средства с двухконтурным ГТЦ, алгоритм моделирования влияния на выходные характеристики ГТЦ технического состояния элементов, определяющих его работоспособность и реализующее его программное обеспечение. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден комплекс из пяти диагностических параметров (время от начала нажатия на педаль тормоза до окончания движения поршня второго контура ГТЦ; время движения поршня второго контура ГТЦ; сила нажатия на педаль тормоза в

момент начала и в момент окончания движения поршня второго контура ГТЦ, а также разность сил на педали между началом и окончанием движения поршня второго контура ГТЦ), позволяющий определять техническое состояние его влияющих на работоспособность деталей. Установлены закономерности изменения диагностических параметров от структурных, определяющих техническое состояние ГТЦ, которые при моделировании менялись в установленных диапазонах изменения.

3. Определены информативные тестовые режимы диагностирования ГТЦ по выбранному, оптимальному комплексу диагностических параметров: Т1 (экстренное торможение или $T=0,2$ с), Т3 (служебное торможение $T=1,0$ с), Т4 (служебное торможение $T=1,4$ с) и предложен алгоритм постановки диагноза.

4. Выполнена экспериментальная проверка метода диагностирования двухконтурного ГТЦ ГТС по параметрам воздействия на орган управления. Средняя погрешность отклонения теоретической кривой от экспериментальной составила 1,42%.

5. Разработан алгоритм постановки диагноза и даны рекомендации по внедрению метода в практику, включающие в себя три направления реализации (в виде доработки стандартного программного обеспечения стенда тормозных качеств, в виде отдельного автономного прибора и в виде дополнительной подсистемы общей системы бортового диагностирования автомобиля). Определена экономическая эффективность внедрения полученных результатов исследования, которая составляет 1192 руб. на один автомобиль в год.

6. В рамках поставленных задач решена актуальная научно-техническая задача обеспечения эффективности функционирования тормозной системы на основе разработки метода диагностирования главного тормозного цилиндра гидравлической тормозной системы автомобиля, защищенного патентом РФ 2751101. Дальнейшие научные исследования рекомендуется проводить по направлениям оценки функционирования ГТЦ и его диагностирования на режимах растормаживания.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

- в рецензируемых научных журналах из «Перечня...» ВАК:

1. **Бородин, А. Л.** Методика синтеза алгоритма постановки диагноза агрегатов и систем автомобиля / А. Л. Бородин, В. И. Васильев, В. Н. Шабуров // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, 2022 г. – № 4 (78). – Симферополь: КИПУ, 2022. – С. 231-237.

2. **Бородин, А. Л.** Выбор оптимального комплекса диагностических параметров в рамках нового метода диагностирования главного тормозного цилиндра гидравлической тормозной системы автомобиля / А. Л. Бородин, В. Н. Шабуров, В. И. Васильев // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2023. – № 5. – С. 53-57. – DOI 10.36535/0236-1914-2023-05-8. – EDN KZPYRS.

3. **Бородин, А. Л.** Метод углубленного диагностирования главного тормозного цилиндра автотранспортного средства / А. Л. Бородин, В. И. Васильев, В. Н. Шабуров // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 5. – С. 82–91, DOI 10.25198/2077-7175-2023-5-82.

4. **Бородин, А. Л.** Разработка метода диагностирования гидравлических тормозных систем автотранспортных средств на режимах служебного торможения / А. Л. Бородин, В. И. Васильев, А. В. Шарыпов, А. П. Черепанов // Вестник Курганской ГСХА. Серия: Технические науки. – №4 (16). - Курган: КГСХА, 2015. – С. 29–32.

5. **Бородин, А. Л.** Разработка экспериментального комплекса для исследования закономерностей функционирования гидравлических тормозных систем / А. Л. Бородин, А. П. Черепанов, А. В. Шарыпов // Известия ТулГУ. Серия: Технические работы. – Вып. 6. - Тула: ТулГУ, 2015. – С. 11-17.

- в научных изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus:

6. **Borodin A. L.** Mathematical diagnostic model of brake master cylinder of hydraulic brake system of automobile / A. L. Borodin, V. I. Vasiliev, G. I. Maltseva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1061 (1), 012011- 2021, p.135-139.

- патенты Российской Федерации:

7. **Бородин А.Л.** Пат. 2751101 Российская Федерация МПК51 В60Т 11/16, В60Т 17/22, G01М 17/00. Способ диагностирования главного тормозного цилиндра гидравлической тормозной системы по динамическим параметрам силы сопротивления нажатия на педаль тормоза / А.Л. Бородин, В.И. Васильев, В.Е. Овсянников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КГУ. - № 2020135237; заявл. 26.10.2020; опубл.08.07.2021 Бюл. № 19. – 7с.

- в прочих изданиях:

8. **Бородин, А. Л.** Проверка адекватности динамической математической модели гидравлической тормозной системы натурным экспериментом / А. Л. Бородин, В. И. Васильев, А. В. Шарыпов // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции. – Тюмень: ТИУ, 2020. – С. 92-95.

9. **Бородин, А. Л.** Определение оптимального комплекта диагностических параметров в рамках нового метода диагностирования гидравлической тормозной системы / А. Л. Бородин, А. В. Шарыпов // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: материалы III национальной научно-практической конференции. – Омск: СибАДИ, 2020. – С. 34-37.

10. **Бородин, А.Л.** Анализ методов и средств диагностирования тормозных систем автомобилей с гидравлическим приводом // Сборник научных трудов аспирантов и соискателей Курганского государственного университета. Серия: Природа. Общество. Техника. Культура. – Вып.14. - Курган: КГУ, 2012. – С. 67-68.

11. **Бородин, А.Л.** Разработка метода диагностирования тормозных систем автомобилей на роликовом тормозном стенде в режимах служебного торможения (в порядке обсуждения) / А. Л. Бородин, А. В. Шарыпов // Проблемы и перспективы развития автомобильного транспорта: материалы Международной научно-практической конференции. - Курган: КГУ, 2013. – С. 42-45.

Подписано в печать 16.02.2024 г.
Формат 297x210 1/2. Бумага офсетная.
Уч.-изд. листов 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 02
Отпечатано: ИП Востриков Павел Владимирович
460052, г. Оренбург, ул. Плеханова, д. 13
Тел.: +7-903-395-33-60
www.poliart.ru; e-mail: poliart@gmail.com