

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 629.113-592

**ТРЕТЬЯК**  
**Дмитрий Владимирович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ  
АВТОМОБИЛЕЙ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ  
ПОТЕРЬ В ДИСКОВЫХ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМАХ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

Минск - 2011

Репозиторий БНТУ

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете и на ОАО "Минский автомобильный завод".

**Научные руководители:**

Захарик Юрий Михайлович, доктор технических наук, главный специалист ОАО "МАЗ-Купава";  
Иванов Валентин Георгиевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Автомобильная техника", Технический университет г. Ильменау, Германия

**Официальные оппоненты:**

Скойбеда Анатолий Тихонович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Детали машин и подъемно-транспортные машины и механизмы", Белорусский национальный технический университет;

Харитончик Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, директор Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля ГНУ "Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси"

**Оппонирующая организация -** ОАО "Белорусский автомобильный завод"

Защита состоится 11 марта 2011 г. в 14 часов на заседании докторского совета по защите диссертаций Д 02.05.04 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, Белорусский национальный технический университет, корп.1, ауд. 202, тел. (017) 292-83-85.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан " " февраля 2011 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций

Ч.И. Жданович

© Третьяк Д.В., 2011

© БНТУ, 2011

Репозиторий БНТУ

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В диссертационной работе отображены результаты комплексного исследования, направленного на повышение эффективности тормозных систем (ТС) автомобилей за счет разработки методики проектирования и расчёта дисковых тормозных механизмов (ДТМ) на основе анализа силовых факторов и гистерезисных кривых в них, а также разработки компьютерных моделей тормозных механизмов (ТМ) и создания перспективных ДТМ с самоусилением, обладающих минимальным гистерезисом, сниженными энергетическими потерями и повышенным коэффициентом полезного действия за счет введения в конструкцию положительной обратной связи.

*Основные этапы исследования:* разработка методики расчета параметров ДТМ с учетом факторов, определяющих гистерезисные потери; компьютерное моделирование дисковых тормозов; экспериментальное исследование эффективности ТС автомобилей и их компонентов; создание конструкции ДТМ повышенной эффективности.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Тема соответствует следующим приоритетным направлениям научно-технической деятельности для Республики Беларусь, принятым Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований: машиноведение; механика, надежность и безопасность машин и технических систем; трение и износ в машинах; теория проектирования, мехатронные системы машин и механизмов.

Диссертационная работа является частью исследований, выполненных в рамках договоров с ОАО "МАЗ" по следующим темам ГНТП "Машиностроение": АТ-01.16 "Разработать и освоить производство семейства седельных автопоездов среднетоннажного класса грузоподъемностью до 12,5 т для пригородных, региональных и междугородных перевозок, соответствующих нормам по экологии Евро-3, 4, 5" № ГР 20065550, этап АТ-01.16.08 "Выполнить расчетную оценку управляемости седельного автопоезда и выработать рекомендации по ее улучшению"; АТ-01.19 "Разработать и освоить производство автопоездов нового поколения повышенной грузоподъемности для международных и междугородных перевозок, соответствующих международным нормам по экологии Евро-4, Евро-5 в составе: бортовых тягачей типа 4×2 с 3-хосным прицепом с общим объемом кузовов 110-112 м<sup>3</sup>; бортовых тягачей типа 6×2 с 2-хосным прицепом с центральными осями с общим объемом кузовов 115-117 м<sup>3</sup>" № ГР 20066328, этап АТ-01.19.13 "Выполнить оценку тормозных свойств и управляемости автопоездов и дать рекомендации".

Также работа выполнялась в рамках:

- научного проекта "Исследование и разработка конструкции и методов расчета ДТМ с самоусилением мобильных машин" Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, № ГР 20082592 (2008–2010 гг.);
- программы научных исследований Германской службы академических обменов (DAAD), реферат 325, индекс A/06/91256 (2007–2008 гг.);
- программы поддержки международных обменов Международной федерации обществ автомобильных инженеров (FISITA Student Travel Bursary Programme), реферат DTRETSIAK STB, индекс 001285/001578 (2006 г.).

### **Цель и задачи исследования**

*Цель* – повышение эффективности тормозных систем автомобилей за счет снижения гистерезисных потерь в дисковых тормозных механизмах путем введения в конструкцию положительной обратной связи, обеспечивающей самоусиление.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи исследования*:

- создать методику расчета ДТМ, позволяющую определять величину гистерезисных потерь в конструкциях на стадии их проектирования;
- разработать имитационные модели дисковых тормозов и провести их компьютерные испытания;
- теоретически обосновать и экспериментально подтвердить концепцию создания ДТМ с пониженным гистерезисом за счет введения положительной обратной связи;
- получить зависимости показателей эффективности ТС от величины гистерезисных потерь в ДТМ и их конструктивных параметров с помощью экспериментальных исследований компонентов ТС автомобилей для апробации предложенных теоретических решений;
- разработать конструкцию ДТМ с самоусилением на основе полученных результатов исследований, а также алгоритм управления дисковым тормозом для перспективных моделей автомобильной техники отечественного производства.

### *Объект и предмет исследования*

Объектом настоящего диссертационного исследования являются ДТМ гидравлической и пневматической ТС автомобилей и перспективные дисковые тормозы мехатронных ТС, предмет исследования – гистерезис в ДТМ и его влияние на показатели эффективности ТС.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- методика расчета ДТМ на основе зависимости величины гистерезисных потерь и характера протекания гистерезисных кривых от параметров ТМ, отличающаяся тем, что позволяет определять величину гистерезиса в конструкциях;
- теоретически обоснованная и экспериментально подтвержденная концепция создания ДТМ с пониженным гистерезисом за счет введения положительной обратной связи;
- методика создания имитационных моделей ДТМ, позволяющих определять гистерезис, выходные характеристики и параметры ТМ;
- методика выбора коэффициента усиления в ДТМ, отличающаяся тем, что позволяет разрабатывать конструкции дисковых тормозов, обладающие минимальным гистерезисом, сниженными энергетическими потерями и повышенным коэффициентом полезного действия за счет введения в локальную подсистему колодка-тормозной диск положительной обратной связи, обеспечивающей самоусиление.

### **Личный вклад соискателя**

Автор самостоятельно получил основные результаты диссертационного исследования. Все результаты, выносимые на защиту, принадлежат лично автору. Совместно с научными руководителями разработал концепцию проведения исследования, соавторы совместных публикаций участвовали в постановке задач и обсуждении результатов исследований. Автор работы является основным разработчиком и заявителем патентов на изобретение и полезную модель конструкции ДТМ с самоусилением для различных типов приводов ТС автомобилей. Все результаты экспериментальных исследований, моделирования и их обработки получены автором самостоятельно.

### **Апробация результатов диссертации**

Результаты исследований, включенные в диссертацию, обсуждались на следующих научных собраниях: восьмая международная научно-техническая конференция "Наука – образованию, производству, экономике" в БНТУ (Минск, 2010 г.); 12-й Европейский автомобильный конгресс ЕАЕС 2009 в г. Братиславе (Словакия, 2009 г.); 32-й Всемирный автомобильный конгресс и Студенческий конгресс FISITA в г. Мюнхене (Германия, 2008 г.); внутривузовская конференция на базе кафедры "Транспортная мехатроника" в Техническом университете г. Дрездена (Германия, 2008 г.); внутривузовская конференция на базе кафедры "Автомобильная техника" в Техническом университете г. Ильменау (Германия, 2007 г.); 31-й Всемирный автомобильный конгресс и Студенческий конгресс FISITA в г. Иокогаме (Япония, 2006 г.); 11-я Международная конференция "Механика 2006" в г. Каунасе (Литва, 2006 г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах: 7 статей в перечне изданий ВАК Беларуси и 2 в рецензируемых зарубежных научных изданиях (4 авторских листа), 7 – в материалах конференций, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 1 методическое пособие и 1 отчет о НИР.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и приложений. Полный объем – 282 страницы, 73 иллюстрации на 33 страницах, 19 таблиц на 6 страницах, 15 приложений на 123 страницах, библиографический список в количестве 207 на 14 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ**

Во *введении* обоснованы актуальность темы диссертации и необходимость проведения исследований по совершенствованию и повышению эффективности ТС автомобилей и их компонентов.

В *главе 1* проведен анализ работ по исследуемой проблематике, сформулированы цель и задачи исследований. Первые попытки создания комплексного подхода к проектированию тормозных устройств автомобиля, учитывающего целую гамму целевых конструктивных факторов, относятся к началу XX века. Большой вклад в исследование данных вопросов внесли такие ученые как Д.А. Антонов, Ю.Б. Беленький, Н.В. Богдан, М. Буркхардт, Дж. Вонг, М.С. Высоцкий, А.Б. Гредескул, А.И. Гришкевич, Л.В. Гуревич, Н.Ф. Метлюк, М. Мичке, Т.П. Ньюкомб, В.В. Осепчугов, М.А. Петров, А.А. Ревин, Г.А. Смирнов и др.

Определяющим фактором активной безопасности являются тормозные свойства автомобиля. Торможение, особенно экстренное, – это один из самых критических манёвров. Этим вопросам посвящены обширные теоретические исследования В.Д. Балакина, В.А. Иларионова, В.И. Кнороза, А.С. Литвинова и др.

Наиболее важные компоненты ТС – это ТМ, так как именно они преобразуют приводное усилие в тормозной момент, прикладываемый к колесу автомобиля. В большинстве проанализированных работ, связанных с вопросами конструктивного исполнения перспективных ТМ, отмечается, что одним из перспективных инструментов является применение устройств с эффектом самоусиления. Установлено, что проблема создания высокоэффективных ДТМ с самоусилением, особенно для грузовых автомобилей и автобусов, не может быть решена без разработки рациональных моделей и методик расчёта основных критических характеристик ДТМ, к которым относятся гистерезис, колебательные и акустические процессы.



Под **гистерезисом** (от греч. hysteresis – отставание) в общем случае понимается запаздывание изменения одной физической величины от изменения другой физической величины, определяющейся внешними условиями.

В настоящей работе под гистерезисом понимается запаздывание изменения усилия со стороны тормозной колодки (ТК), прикладываемого к тормозному диску, для получения тормозного момента, от изменения управляющего воздействия со стороны тормозного привода (ТП). Применительно к ДТМ гистерезис имеет место при изменении знака сил трения в режиме оттормаживания, который на определенном конечном интервале уменьшения управляющего воздействия поддерживает постоянное усилие сжатия на поверхности трения.

Большинство современных аналитических моделей ДТМ разработано для исследования шумовых и вибрационных процессов в механизмах. Использование их для решения задачи уменьшения гистерезисных потерь не представляется возможным, так как они не учитывают такие важные конструктивные и эксплуатационные факторы, влияющие на величину гистерезиса, как зазоры между колодками и тормозным диском, моменты и силы трения в элементах ТМ.

Проведенный анализ показал, что разработка методики расчета ДТМ на основе зависимости величины и характера протекания гистерезисных кривых от параметров дисковых тормозов, вопросы проведения стендовых испытаний компонентов ТС, разработка методик их проведения и моделирование этих испытаний с использованием современных компьютерных средств и программного обеспечения, а также создание перспективных конструкций ДТМ с самоусилением для различных типов приводов ТС являются актуальными научными проблемами. В соответствии с этим были определены цели и задачи диссертационного исследования.

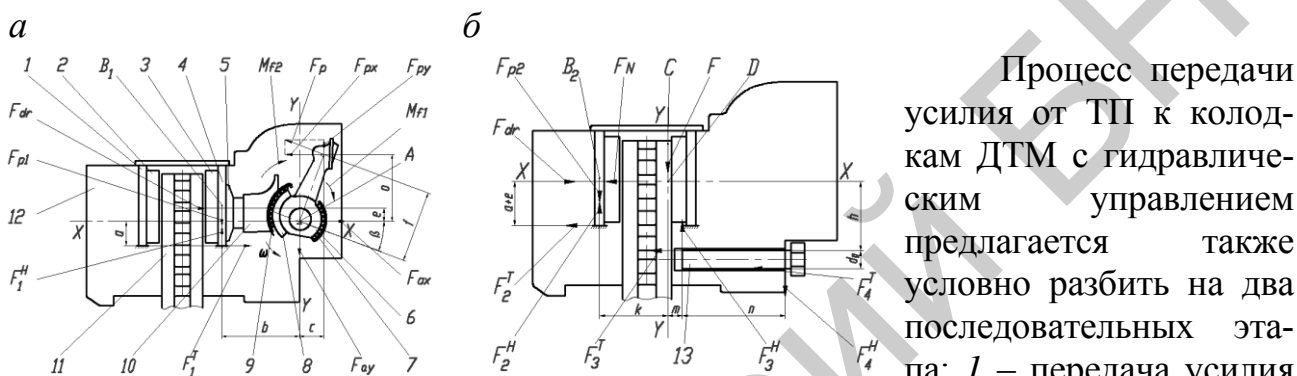
*Глава 2* описывает методику расчета ДТМ на основе зависимости величины гистерезисных потерь и характера протекания гистерезисных кривых от параметров дисковых тормозов для наиболее распространенных типов ДТМ, применяемых в гидравлической и пневматической ТС автомобилей. Основная цель создания методики – выявление величины гистерезисных потерь и характера протекания гистерезисных кривых в зависимости от параметров дисковых тормозов, которые оказывают преимущественное влияние на величину гистерезисных потерь в ТМ, а следовательно и на их эффективность и определение величины гистерезиса в конструкциях на стадии их проектирования.

Процесс передачи усилия от тормозной камеры к колодкам ДТМ с пневматическим управлением предлагается условно разбить на два последовательных этапа: 1 – передача усилия от тормозной камеры к внутренней колодке через рычаг привода, втулку, роликовые подшипники, толкатель и упор (рисунок 1, а); 2 – от тормозной камеры к внешней колодке через скобу и ее направляющие (рисунок 1, б).

В результате проведенных математических преобразований получено выражение для определения величины гистерезисных потерь в ДТМ:

$$\Delta = \left( (1 - K_1) - \frac{2}{S_d P_p} K_2 (K_3 F_p^T + K_4 F_c^T) \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – гистерезисные потери в тормозе, %;  $p_p$  – давление воздуха в тормозной камере при торможении, МПа;  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$  – коэффициенты передачи;  $F_p^T$  – суммарная сила трения тормозной колодки (ТК) с фрикционной накладкой, Н;  $F_c^T$  – суммарная сила трения скобы тормоза, Н.



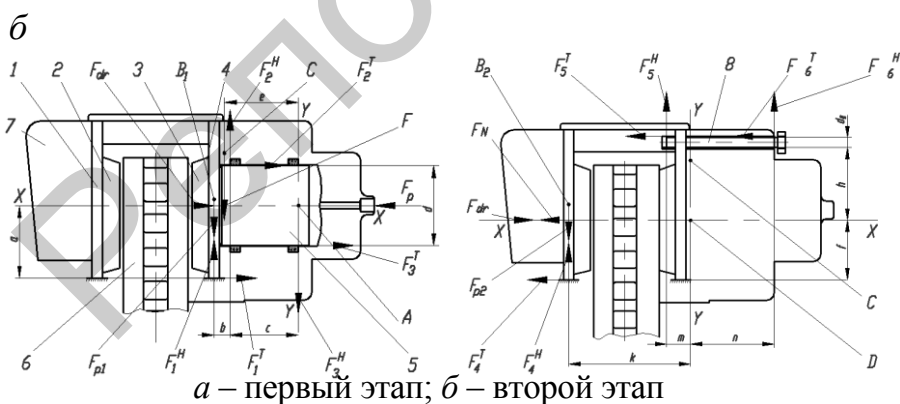
*a* – первый этап; *б* – второй этап

1, 4 – колодки; 2, 3 – фрикционные накладки; 5 – упор; 6 – рычаг привода; 7 – правый роликовый подшипник с обоймой; 8 – втулка; 9 – левый роликовый подшипник с обоймой; 10 – толкатель; 11 – тормозной диск; 12 – скоба;

13 – направляющая скобы

Процесс передачи усилия от ТП к колодкам ДТМ с гидравлическим управлением предлагается также условно разбить на два последовательных этапа: 1 – передача усилия от ТП к внутренней колодке через поршень (рисунок 2, *a*); 2 – от ТП к внешней колодке через скобу и ее направляющие (рисунок 2, *б*).

**Рисунок 1 – Расчетные схемы передачи усилия в тормозе на первом и втором этапах**



*a* – первый этап; *б* – второй этап

1, 4 – колодки; 2, 3 – фрикционные накладки; 5 – поршень; 6 – тормозной диск; 7 – скоба; 8 – направляющая скобы

Аналогично в результате получено выражение для определения величины гистерезисных потерь в ДТМ и найдены аналитические зависимости для коэффициентов передачи:

**Рисунок 2 – Расчетные схемы передачи усилия в тормозе на первом и втором этапах**

$$\Delta = \frac{1}{p_h} (K_1 (K_2 F_c^T + 2 \cdot F_p^T)) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $p_h$  – давление жидкости в тормозной системе при торможении, МПа.

Проведен комплексный анализ для получения качественной и количественной оценки влияния конструктивных параметров ДТМ пневматической и гидравлической ТС на величину гистерезиса в них. В результате определены параметры механизмов, оказывающие преимущественное влияние на величину гистерезиса.

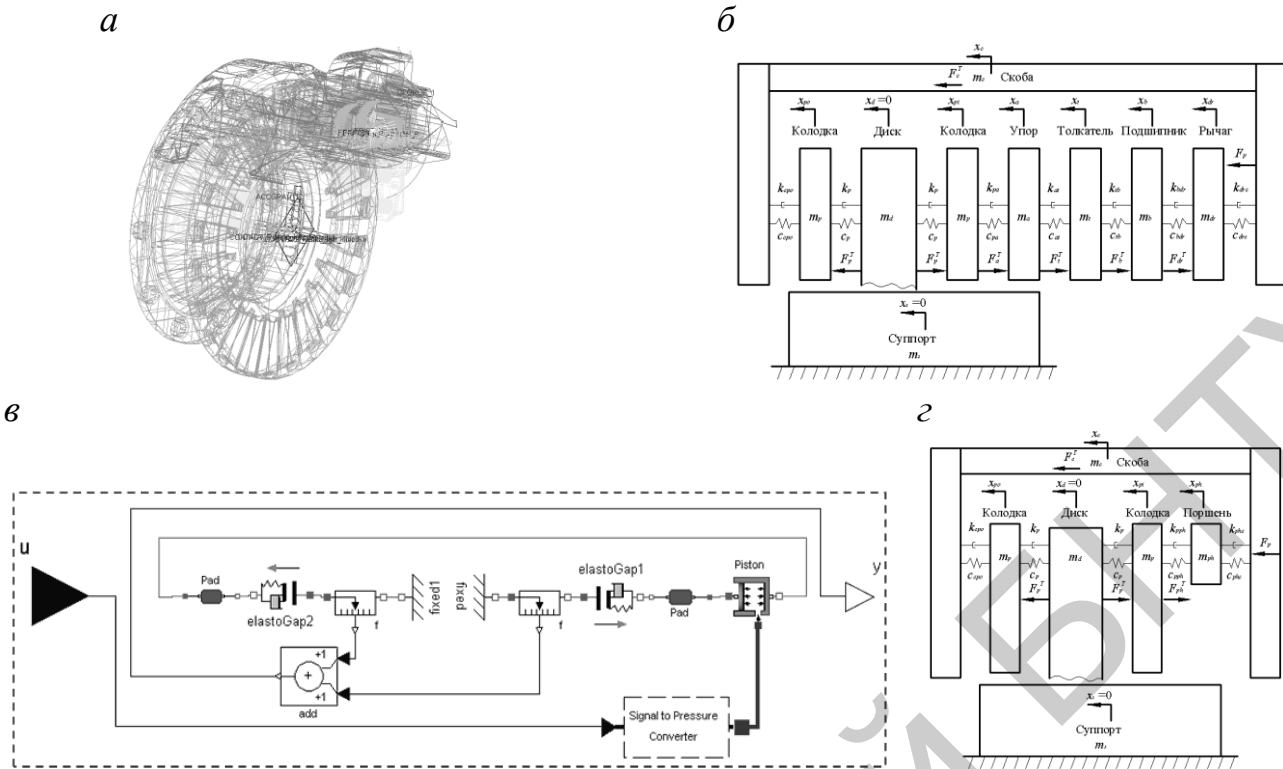
Выполнено сравнение результатов теоретического расчета с результатами стендовых испытаний ДТМ, проведенных на Минском автомобильном заводе и в Техническом университете г. Ильменау, Германия. Установлено, что ошибка при расчете гистерезиса в ДТМ с пневматическим управлением по сравнению с экспериментально полученным значением не превышает 2,3 %, а в ДТМ с гидравлическим управлением – 1,6 %.

В *главе 3* описывается компьютерное моделирование работы ТС автомобилей и их компонентов.

Разработана методика создания имитационных моделей ДТМ и проведения компьютерных испытаний дисковых тормозов в среде MSC.ADAMS. В пакете моделирования сложных комплексных систем Dymola создана библиотека компонентов гидравлической ТС и разработаны новые компоненты для моделирования работы гидравлической ТС. В частности, создана модель ДТМ с гидравлическим управлением, получена его статическая характеристика и определен гистерезис. На рисунке 3 представлены графические изображения и динамические модели ДТМ с пневматическим и гидравлическим управлением, реализованные в MSC.ADAMS и Dymola соответственно.

Анализ мероприятий по совершенствованию и повышению эффективности работы ТС и их компонентов показал, что одним из наиболее эффективных методов повышения эффективности ТС является применение ТМ с самоусилением. В результате автором разработана конструкция ДТМ с самоусилением, лишенная недостатков серийных образцов тормозов данного типа, на которую получены патенты Республики Беларусь на изобретение и полезную модель.

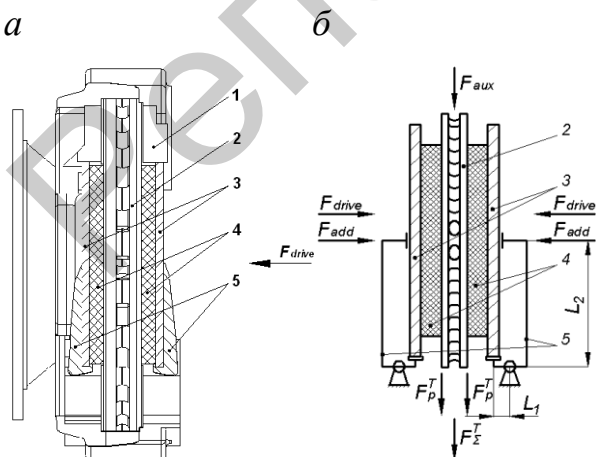
Конструкция дискового тормоза, содержащего суппорт 1, тормозной диск 2, расположенные по обе стороны от него ТК 3 с фрикционными накладками 4, скобу (условно не показана), отличается тем, что ТМ дополнительно содержит усилительные вилки 5, связанные с ТК и опирающиеся на суппорт (рисунок 4). Введение усилительных вилок позволяет автоматически увеличивать значение тормозного момента механизма транспортного средства при торможении.



*a* – графическое изображение модели ДТМ с пневматическим управлением в MSC.ADAMS; *б* – динамическая модель ДТМ с пневматическим управлением, реализованная в MSC.ADAMS; *в* – графическое изображение модели ДТМ с гидравлическим управлением в Dymola; *г* – динамическая модель ДТМ с гидравлическим управлением, реализованная в Dymola

**Рисунок 3 – Модели ДТМ с пневматическим и гидравлическим управлением**

Работа тормоза основана на том, что при торможении под действием трения в контакте тормозного диска 2 с фрикционными накладками 4 появляются силы  $F_p^T$ , которые стремятся сместить ТК 3 с накладками в сторону вращения диска. Через колодки силы передаются на усиленные вилки 5. За счет наличия в конструкции вилок далее эти усилия дополнительно прилагаются к колодкам, тем самым автоматически увеличивая значение приводной силы  $F_{drive}$  (рисунок 4).



*a* – конструктивная схема ДТМ с самоусилением; *б* – схема приложения усилий в тормозе; 1 – суппорт; 2 – тормозной диск; 3 – ТК; 4 – фрикционные накладки ТК; 5 – усиленные вилки;  $F_{aux}$  – осевая сила, Н;  $F_{drive}$  – усилие со стороны привода механизма, Н;  $F_{add}$  – дополнительная сила от эффекта самоусиления, Н;  $F_p^T$  – сила трения одной колодки, Н;  $F_\Sigma^T$  – суммарная сила трения, Н;  $L_1, L_2$  – размерные параметры усиленных вилок, мм

**Рисунок 4 – Схема дискового тормоза с самоусилением**

Функциональные схемы серийного ДТМ и ТМ с самоусилением при рассмотрении их как систем с автоматическим регулированием по нагрузке, приведены на рисунке 5, а, б. Согласно им объектом регулирования таких систем является тормозной диск, выходным параметром которого является тормозной момент. ТК и усилительные вилки в ДТМ с самоусилением включены в обратную связь, при этом часть нормального усилия, действующего со стороны диска на колодки, преобразуется с определенным коэффициентом усиления за счет наличия вилок в силы прижатия ТК к тормозному диску. Далее эти силы суммируются с усилиями на колодках со стороны ТП.

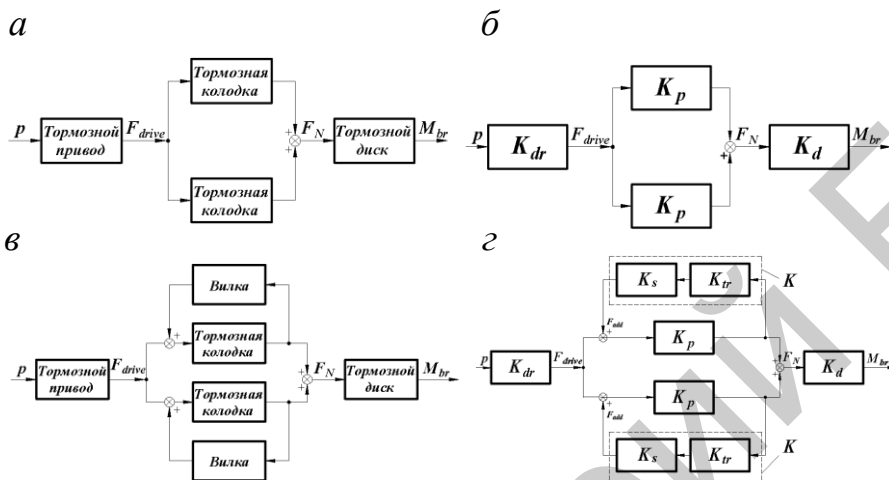


Рисунок 5 – Функциональные и структурные схемы ДТМ

На основании функциональных схем были составлены структурные схемы применительно к серийному ДТМ и ТМ с самоусилением (рисунок 5, в, з). ДТМ с самоусилением представляет собой систему с положительной обратной связью по усилию со стороны ТП.

Соответственно величина самоусиления должна быть такой, при которой не происходило бы блокирования колеса и заклинивания механизма. Для предотвращения блокирования необходимо, чтобы тормозной момент, создаваемый колесным тормозом, не превышал величину момента сцепления в контакте колеса с дорогой. Таким образом, с использованием закономерностей преобразования структурных схем, применяемых в теории автоматического регулирования, было получено выражение для определения требуемого значения коэффициента усиления:

$$K_s < \frac{1}{\mu} \left[ 1 - \frac{2 \cdot F_{drive} \cdot \mu \cdot r_{\mu}}{R_z \cdot \varphi \cdot r_0} \right], \quad (3)$$

где  $K_s$  – коэффициент усиления;  $\mu$  – коэффициент трения между тормозным диском и накладками ТК;  $F_{drive}$  – приводная сила механизма без учета самоусиления, Н;  $r_{\mu}$  – средний радиус трения, мм;  $R_z$  – нагрузка на колесо транспортного средства при торможении, Н;  $\varphi$  – коэффициент сцепления колеса с дорогой;  $r_0$  – радиус качения колеса, мм.

С целью проверки эффективности предложенной конструкции по разработанной и апробированной методике была разработана компьютерная модель ДТМ с самоусилением для автомобиля-тягача МАЗ-544008-060-030. После проведения ком-

пьютерных испытаний и обработки их результатов получены гистерезисные характеристики ТМ. Установлено, что исходя из равенства тормозных моментов, развиваемых механизмами, с точки зрения величины гистерезиса предпочтительным является ДТМ с самоусилением, так как за счет введения самоусиления удалось снизить требуемое усилие со стороны привода и тем самым уменьшить приводное давление. Таким образом, в результате введения самоусиления в конструкцию ДТМ с пневматическим управлением для обеспечения необходимого тормозного момента требуется на 9,1 % меньшее усилие со стороны ТП. При этом гистерезисные потери в тормозе снизились на 17,5 % (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты компьютерных испытаний ДТМ

Параметр	Серийный ДТМ	ДТМ с самоусилением	Уменьшение, %
Максимальное усилие со стороны тормозной камеры, Н	12690	11640	9,1
Гистерезисные потери, %	18,3	15,1	17,5

Соответственно конструкции ДТМ с самоусилением для пневматических ТС

обладает большей эффективностью и меньшим гистерезисом по сравнению с серийной конструкцией ТМ. Разработан алгоритм управления ДТМ с самоусилением на основании информации, получаемой от датчиков частоты вращения колес. Созданный алгоритм является трехфазным с учетом эффекта самоусиления. Выполнена программная реализация алгоритма в среде Matlab/Stateflow. Проведены компьютерные испытания эффективности ТС грузового автомобиля (аналог МАЗ-4370) при установке разработанной конструкции ДТМ с самоусилением и работе САБ по созданному алгоритму управления. Установлено, что при использовании ДТМ с самоусилением ТС обладает повышенной эффективностью – тормозной путь уменьшается на 1 м или 4 %.

**Глава 4** посвящена экспериментальному исследованию эффективности ТС автомобилей и их компонентов. В результате стендовых испытаний ДТМ пневматической ТС получена статическая характеристика тормоза, с помощью которой определена величина гистерезиса в нем. Подтверждена адекватность имитационной модели ДТМ и ее перспективность как инструмента в дальнейших исследованиях путем сравнения результатов моделирования с результатами испытаний.

Проведено экспериментальное исследование эффективности пневматической ТС автомобиля-тягача МАЗ-544008-060-030, оборудованного ДТМ. При этом использовалось следующее измерительное оборудование: комплект приборов для измерения параметров движения автомобиля фирмы "Peiseler" VTS-WB III и манометры (рисунок 6).

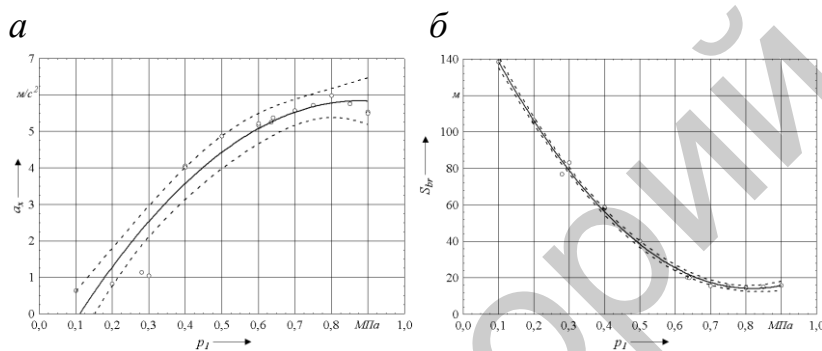
Влияние величины самоусиления в ТМ на эффективность ТС автомобиля было предложено проанализировать на основе зависимости эффективности ТС от

величины давления воздуха, подаваемого в тормозные камеры ТМ со стороны ТП. Для оценки этого влияния достаточно подавать избыточное давление к тормозным камерам ТМ и анализировать изменение эффективности ТС в этом случае.



*a* – "пятое" колесо и регистратор "Peiseler"; *б* – манометры  
**Рисунок 6 – Измерительное оборудование и приборы**

В результате получены зависимости параметров эффективности ТС автомобиля от давления, подаваемого к колесным ТМ (рисунок 7), или от приводного усилия, прикладываемого к ТМ со стороны ТП.



*a* – замедление; *б* – тормозной путь

**Рисунок 7 – Показатели эффективности ТС**

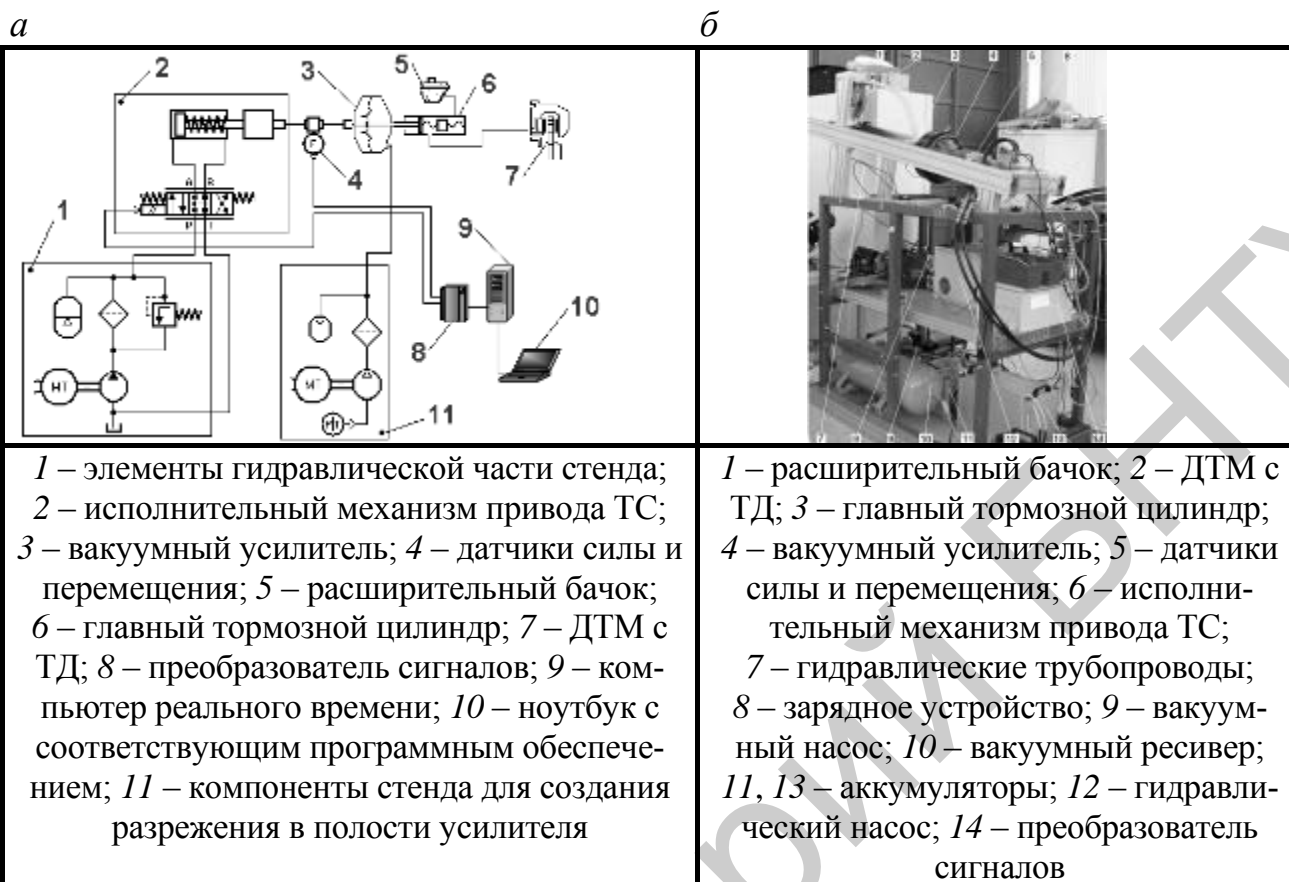
Таким образом, экспериментально доказано, что при использовании разработанного автором ДТМ с самоусилением заметно по-

вышается эффективность ТС автомобиля-тягача: за-

медление увеличивается на

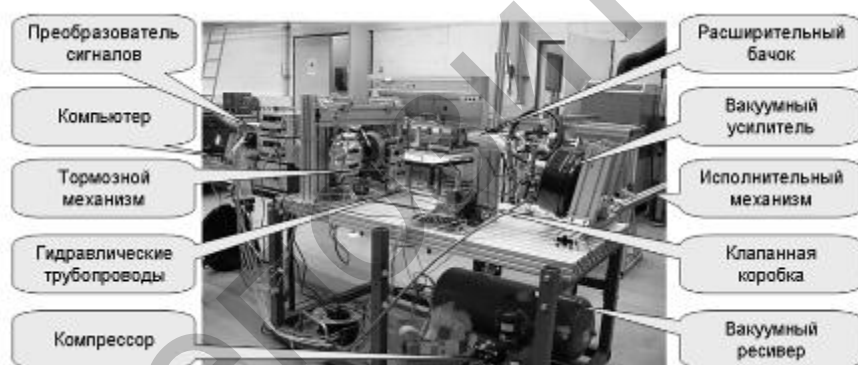
2,5 %, а тормозной путь снижается на 7,2 % или 1,1 м, что подтверждает научную значимость и эффективность разработанной конструкции ТМ. Кроме того, с помощью полученных зависимостей было определено, что при значении коэффициента усиления  $K_s > 0,23$  эффективность ТС автомобиля снижается. Разработана методика проведения испытаний для исследования компонентов гидравлических ТС автомобилей с учетом возможностей используемого стендового оборудования (рисунок 8). Верификация модели ДТМ с гидравлическим управлением осуществлялась с помощью сравнения полученных результатов при компьютерном моделировании с результатами стендовых испытаний. Объектом испытаний при анализе влияния гистерезиса в ДТМ на эффективность гидравлической ТС являлись компоненты этой ТС в составе САБ среднетоннажного грузового автомобиля (МАЗ-4370). При этом использовался специализированный стенд для исследования алгоритмов управления САБ и систем динамической стабилизации автомобилей, выполненный по hardware-in-the-loop технологии, рисунок 9. Аппаратная часть комплекса состояла из главного тормозного цилиндра, четырех ДТМ и блока ESP производства компа-

нии Bosch, из которого удалена оригинальная электронная часть управления клапанной коробки.



*a* – схема станда; *б* – внешний вид станда

**Рисунок 8 – Стенд для исследования компонентов ТС**

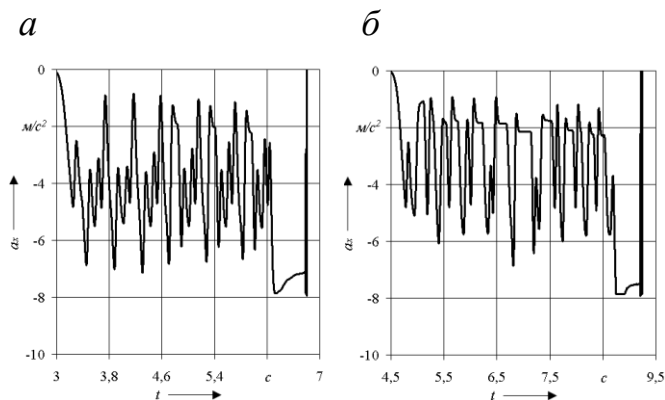


**Рисунок 9 – Внешний вид станда**

Для исследования влияния гистерезисных потерь в ДТМ на работу САБ в составе ТС автомобиля было предложено изменять величину фазы выдержки пропорционально величине гистерезиса. Время выдержки изменялось в интервале от 100 до 300 мс. Таким образом, оценивалось изменение эффективности ТС при увеличении гистерезиса в три раза. Эксперименты проводились для следующих режимов торможения: торможение автомобиля с начальной скорости 60 и 90 км/ч на дорогах с коэффициентом сцепления 0,8, 0,5 и 0,2 соответственно. На рисунке 10 в качестве примера представлены графики замедления автомобиля при торможении со скорости 60 км/ч на дороге с коэффициентом сцепления 0,8 с исходной и увеличенной в три раза величиной гистерезиса.



Методом наименьших квадратов по экспериментальным данным получены аналитические зависимости тормозного пути автомобиля, то есть эффективности его ТС, от изменения гистерезиса ТМ с доверительным интервалом 98 %. При этом рассчитывался коэффициент корреляции зависимостей. Для исследуемого автомобиля установлено, что при увеличении гистерезиса в ДТМ более чем на 47 % от исходной величины его ТС не будет соответствовать требованиям Правил № 13 ЕЭК ООН по эффективности работы.



*a* – исходный гистерезис; *б* – гистерезис увеличен в три раза

**Рисунок 10 – Замедление автомобиля**

Аналитические зависимости изменения тормозного пути автомобиля от изменения гистерезиса в ДТМ позволяют анализировать эффективность ТС автомобиля на стадии проектирования и совершенствовать конструкцию дисковых тормозов с целью повышения эффективности ее работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных аналитических и экспериментальных исследований ДТМ пневматических, гидравлических и мехатронных ТС автомобилей определено перспективное направление их развития и созданы необходимые теоретические предпосылки для дальнейшего исследования их работы и конструктивной разработки.

### Основные научные результаты диссертации:

**1 Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена методика расчета ДТМ на основе зависимости величины гистерезисных потерь и характера протекания гистерезисных кривых от параметров дисковых тормозов.**

В результате получены аналитические зависимости, которые позволяют на стадии проектирования ДТМ определять величину гистерезиса в них [4, 5, 8].

Сравнение результатов теоретического расчета с результатами стендовых испытаний дисковых тормозов показало, что ошибка при расчете гистерезиса в ДТМ с пневматическим управлением с помощью разработанной методики расчета по сравнению с экспериментально полученным значением не превышает 2,3 %, а в ДТМ с гидравлическим управлением – 1,6 % [4, 5, 8].

Возможность определения гистерезисных потерь на стадии проектирования без использования дорогостоящего экспериментального оборудования и проведения длительных стендовых испытаний позволяет оценить требования к компоновке ДТМ с точки зрения гистерезиса на начальном этапе проектирования ТМ.

**2 Имитационное моделирование с использованием многокомпонентных и многомассовых динамических систем позволяет адекватно определять значения двух важнейших параметров тормозов: создаваемый тормозной момент и гистерезисные потери в них.** Разработана методика создания имитационных моделей дисковых тормозов и проведения компьютерных испытаний ДТМ, позволяющая, не проводя длительных и дорогостоящих стендовых испытаний, определять гистерезис, выходные характеристики и параметры дисковых тормозов [14, 19].

Результаты создания модели ДТМ с пневматическим управлением в среде автоматического динамического анализа механических систем MSC.ADAMS и ДТМ с гидравлическим управлением в среде моделирования сложных комплексных систем Dymola с их последующей апробацией подтвердили адекватность и перспективность данного аналитического инструмента в исследованиях ТС [14, 19].

В развитие имитационного моделирования ТС создана библиотека компонентов гидравлической ТС BrakeLib в среде DYMOLA и разработаны новые библиотечные приложения для моделирования данного типа ТС автомобилей и ее элементов [7, 13].

Проведено сравнение результатов моделирования с результатами стендовых испытаний дисковых тормозов. В результате установлено, что ошибка при определении гистерезиса в ДТМ с пневматическим управлением с помощью компьютерного моделирования по сравнению с экспериментально полученным значением не превышает 4,6 %, а в ДТМ с гидравлическим управлением – 4,7 % [7, 14, 19].

**3 Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена концепция создания ДТМ с пониженным гистерезисом за счет введения положительной обратной связи.**

Разработана и запатентована конструкция ДТМ с самоусилением для различных типов приводов ТС автомобилей [17-18], а также выполнена конструктивная проработка дискового тормоза применительно к грузовому автомобилю производства Минского автомобильного завода. Установлено, что в результате введения положительной обратной связи в конструкцию ДТМ с пневматическим управлением грузового автомобиля (аналог – автомобиль-тягач МА3-544008-060-030) для обеспечения требуемого тормозного момента нужно на 9,1 %

меньшее усилие со стороны ТП. При этом гистерезисные потери в тормозе снижаются на 17,5 % [3, 6, 15].

Выполнен синтез алгоритма управления ДТМ с самоусилением на основании информации, получаемой от датчиков частоты вращения колес. Алгоритм является трехфазным с учетом эффекта самоусиления. Выполнена программная реализация алгоритма в среде Matlab/Stateflow. В результате проведенных компьютерных испытаний эффективности ТС грузового автомобиля (аналог МАЗ-4370) при установке предложенной конструкции ДТМ с самоусилением и работе САБ по разработанному алгоритму управления с использованием SIL технологии установлено, что при использовании ДТМ с самоусилением ТС обладает повышенной эффективностью – тормозной путь уменьшается на 1 м или 4 % [19].

**4. Проведенные ходовые и стендовые испытания ТС и их компонентов позволили получить зависимости показателей эффективности ТС от величины гистерезисных потерь в ДТМ и их конструктивных параметров для апробации предложенных теоретических решений.** Экспериментальные исследования эффективности пневматической ТС грузового автомобиля (аналог – автомобиль-тягач МАЗ-544008-060-030) показали, что при использовании разработанного ДТМ с самоусилением значительно повышается эффективность его ТС: замедление увеличивается на 2,5 %, а тормозной путь снижается на 7,2 % или 1,1 м, что подтверждает научную значимость и эффективность разработанной конструкции ТМ [16–18] (по статистике Всемирной организации здравоохранения, для предотвращения 70 % дорожно-транспортных происшествий в среднем не хватает 2–3 м тормозного пути).

Получены аналитические зависимости изменения тормозного пути автомобиля от изменения гистерезиса в ДТМ по результатам проведенного исследования на основе методики интегрированного процесса (одновременное моделирование движения мобильной машины и натурное функционирование исполнительных механизмов САБ). Для среднетоннажного грузового автомобиля (аналог – МАЗ-4370) при увеличении гистерезиса более чем на 47 % от исходной величины его ТС не будет соответствовать требованиям Правил № 13 ЕЭК ООН по эффективности работы [2, 10].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Методики расчета ДТМ на основе зависимости величины гистерезисных потерь и характера протекания гистерезисных кривых от параметров дисковых тормозов позволяют определять величину гистерезиса в ТМ. Соответственно они могут использоваться с целью совершенствования конструкций ДТМ для различных типов ТС, а также разработки алгоритмов управления САБ и систем ассистирования

водителя с учетом влияния гистерезисных потерь на их работу [1, 11]. Разработанные методики расчета переданы и внедрены на Минском автомобильном заводе и ОДО "ДИСКОМС", что подтверждено соответствующим актом внедрения и справкой о практическом использовании результатов диссертационных исследований.

Методика создания имитационных моделей ДТМ автомобилей и проведения компьютерных испытаний дисковых тормозов, разработанная по результатам диссертационной работы, внедрена в производство на Минском автомобильном заводе и ОДО "ДИСКОМС", что отражено в акте внедрения и справке о практическом использовании результатов диссертационных исследований. С ее помощью можно, не проводя длительных и дорогостоящих стендовых испытаний, определять выходные характеристики и параметры дисковых тормозов. Также методика внедрена в учебный процесс и применяется при выполнении лабораторной работы "Сравнение характеристик серийного пневматического ДТМ с дисковым тормозом с самоусилением" для подготовки инженеров по специальности 1-37 01 02 "Автомобилестроение (по направлениям)" в целях ознакомления с современными подходами к компьютерному моделированию узлов и агрегатов автомобилей, изучения методики создания имитационных моделей ДТМ автомобилей и проведения компьютерных испытаний данных узлов [20]. Об этом свидетельствует соответствующий акт о практическом использовании результатов диссертационного исследования.

Методика выбора коэффициента усиления в ДТМ, отличающаяся тем, что позволяет разрабатывать конструкции дисковых тормозов, обладающие минимальным гистерезисом, сниженными энергетическими потерями и повышенным коэффициентом полезного действия за счет введения в локальную подсистему колодка-тормозной диск положительной обратной связи, обеспечивающей самоусиление, внедрена на Минском автомобильном заводе.

Результаты проведенных компьютерных и натурных испытаний показали, что конструкция ДТМ с самоусилением для пневматических ТС обладает большей эффективностью и меньшим гистерезисом по сравнению с серийной конструкцией дискового тормоза с пневматическим управлением, испытанным на Минском автомобильном заводе.

Предложенная автором конструкция ДТМ выгодно отличается от рассмотренных выше ТМ минимальными изменениями, которые необходимо внести в конструкцию серийного тормоза. Также разработанный дисковый тормоз с самоусилением может использоваться в перспективных автономных колесных узлах и мехатронных ТС автомобилей, что очень актуально в связи с мировой тенденцией перехода от обычных ТС (гидравлических, пневматических) к перспективным системам "Brake-by-Wire".

С учетом перспективного плана развития производства грузовых автомобилей и автобусов в Республике Беларусь конструкция ДТМ с самоусилением, разработанная автором в рамках данной диссертационной работы, может пред-

ставлять особый интерес для отечественных производителей автотранспортных средств (МАЗ, БелАЗ, Белкоммунмаш).

Репозиторий БНТУ

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### *Статьи*

1. Альгин, В.Б. Концепция ассистента водителя для критических ситуаций и ее реализация на примере экстренного торможения автомобиля / В.Б. Альгин, Д.В. Третьяк, О.В. Дробышевская // *Механика машин, механизмов, материалов*. – 2010. – № 4 (5). – С. 11–17.

2. Захарик, Ю.М. HIL-технология проектирования дисковых тормозных механизмов / Ю.М. Захарик, А.М. Захарик, Д.В. Третьяк // *Грузовик: Строительно-дорожные машины, автобус, троллейбус, трамвай*. – 2010. – № 10. – С. 30–37.

3. Захарик, Ю.М. Высокоэффективные тормозные системы на основе дисковых тормозных механизмов с обратной связью / Ю.М. Захарик, А.М. Захарик, Д.В. Третьяк // *Грузовик: Строительно-дорожные машины, автобус, троллейбус, трамвай*. – 2010. – №12 – С. 17–23.

4. Руктешель, О.С. Методика расчета параметров дисковых тормозных механизмов с гидравлическим управлением / О.С. Руктешель, Ю.М. Захарик, Д.В. Третьяк, И. И. Богданова // *Вестник БНТУ*. – 2010. – № 2. – С. 44–48.

5. Третьяк, Д.В. Исследование гистерезиса дискового тормозного механизма для большегрузных транспортных средств / Д.В. Третьяк, В.Г. Иванов // *Трение и износ*. – 2007. – Т. 28, № 3. – С. 261–268.

6. Третьяк, Д.В. Исследование дисковых тормозных механизмов с самоусилением для большегрузных автомобилей / Д.В. Третьяк // *Механика машин, механизмов, материалов*. – 2008. – № 3 (4). – С. 39–43.

7. Третьяк, Д.В. Моделирование дисковых тормозных механизмов для различных типов транспортных средств / Д.В. Третьяк // *Горная механика*. – 2008. – № 2. – С. 78–86.

8. Tretsiak, D. Investigation on Hysteresis Losses into Disc Brake Gear for Heavy Vehicles / D. Tretsiak, V. Ivanov // *SAE Technical Paper Series. No. 2006-01-3212*. – Warrendale: SAE, 2006. – 7 pp.

9. Tretsiak, D.V. Research in hydraulic brake components and operational factors influencing the hysteresis losses / D.V. Tretsiak, S.V. Kliuzovich, K. Augsburg, J. Sandler, V.G. Ivanov // *Journal of Automobile Engineering*. – 2008. – Vol. 222, Part D. – P. 1633–1645.

### *Материалы конференций*

10. Третьяк, Д.В. Исследование влияния гистерезисных потерь в дисковых тормозных механизмах на эффективность гидравлической тормозной системы с помощью HILS-технологии / Д.В. Третьяк // "Наука – образованию, производству, экономике": материалы восьмой международной научно-технической конференции в трех томах. – Минск: БНТУ, 2010. – Т. 2. – С. 4.

11. Algin, V. Investigations in Advanced Brake Assistant Systems / V. Algin, D. Tretsiak, O. Drobyshevskaya // Proc. of 12th EAEC European Automotive Congress. – Bratislava, Slovak Republic, 2009. – 13 pp.

12. Shyrokau, B. Investigation in intelligent active safety control based on software fusion / B. Shyrokau, U. Sarachan, D. Tretsiak, U. Siakhovich, S. Kliuzovich, S. Kazlouski, V. Ivanov // Proc. of FISITA 2006 World Automotive Congress. – Yokohama, Japan, 2006. – 11 pp.

13. Tretsiak, D. Enhancement of the vehicle brake systems efficiency due to the hysteresis losses reducing / D. Tretsiak, S. Kutter // Proc. of FISITA 2008 Student Congress. – Munich, Germany, 2008. – 8 pp.

14. Tretsiak, D. Investigation on Brake Gear Parameters for Heavy Vehicles / D. Tretsiak, V. Ivanov // Proc. of 11th Internal Conference MECHANICA 2006. – Kaunas, Lithuania. – 2006. – P. 351–354.

15. Tretsiak, D. Research in self-boosting disc brakes for commercial vehicles / D. Tretsiak, S. Kliuzovich // Proc. of FISITA 2006 Student Congress. – Yokohama, Japan, 2006. – 8 pp.

16. Tretsiak, D.V. Experimental investigation of truck tractor's brake system efficiency equipped with disc brakes / D.V. Tretsiak // Proc. of International Congress of Heavy Vehicles, Road Trains and Urban Transport. – Minsk, Belarus, 2010. – P. 115–124.

#### ***Патенты***

17. Дисковый тормоз: пат. 12441 Респ. Беларусь, МПК(2006) F16D 55/22, B60T 8/54 / Д.В. Третьяк, А.И. Бондарчук, С.В. Клевзович, В.Г. Иванов; заявитель Д.В. Третьяк, А.И. Бондарчук. – № а 20060867; заявл. 30.08.06; опубл. 30.11.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 127.

18. Дисковый тормоз: пат. 3799 Респ. Беларусь, МПК7 С 08 J 5/20, С 08 G 2/30 / Д.В. Третьяк, А.И. Бондарчук, С.В. Клевзович, В.Г. Иванов, Б.Н. Широков; заявитель Д.В. Третьяк, А.И. Бондарчук. – № а 0000011; заявл. 12.02.07; опубл. 30.08.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 174.

#### ***Отчет о НИР***

19. Исследование и разработка конструкции и методов расчета дисковых тормозных механизмов с самоусилением мобильных машин: отчет о НИР (заключ.) / Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси; рук. темы Д.В. Третьяк. – Минск, 2010. – 87 с. – № ГР 20082592.

#### ***Учебное пособие***

20. Автоматизация проектирования автомобилей: лабораторные работы по программному пакету ADAMS для студентов специальности 1-37 01 02 "Автомобилестроение" / сост.: О.С. Руктешель, С.А. Сидоров, Д.В. Третьяк. – Минск: БНТУ, 2009. – 88 с.

## РЭЗІЮМЭ

Трэццяк Дзмітрый Уладзіміравіч

Павышэнне эфектыўнасці тармажных сістэм аўтамабіляў за кошт зніжэння гістэрэзісных страт у дыскавых тармажных механізмах

Ключавыя словы: гістэрэзісныя страты, методыка разліку, ДТМ, самаўзмацненне, эксперыментальныя даследаванні, камп'ютарнае мадэляванне, MSC.ADAMS, Dymola.

Мэта – павышэнне эфектыўнасці тармажных сістэм аўтамабіляў за кошт зніжэння гістэрэзісных страт у дыскавых тармажных механізмах шляхам увядзення ў канструкцыю станоўчай зваротнай сувязі, якая забяспечвае самаўзмацненне.

Ужыты метады сістэмнага аналізу тэхнічных сістэм, разлікова-тэарэтычныя і эксперыментальныя метады, метады аўтаматызаванага праектавання і камп'ютарнага мадэлявання; пры эксперыментальных даследаваннях праводзіліся хадавыя і стэндавыя выпрабаванні кампанентаў ТС. Пры гэтым выкарыстоўваліся сучасная стэндавая, вымяральная апаратура і праграмнае забеспячэнне.

Тэарэтычна абгрунтавана і эксперыментальна пацверджана методыка разліку ДТМ, заснаваная на залежнасці велічыні гістэрэзісных страт і характару гістэрэзісных крывых ад параметраў дыскавых тормазаў. У выніку атрыманы аналітычныя залежнасці, якія дазваляюць на стадыі праектавання ДТМ вызначаць велічыню гістарэзісу ў іх.

Распрацавана методыка стварэння імітацыйных мадэляў дыскавых тормазаў і правядзення камп'ютарных выпрабаванняў ДТМ, якая дазваляе вызначаць гістэрэзіс, выходныя характарыстыкі і параметры дыскавых тормазаў.

Тэарэтычна абгрунтавана і эксперыментальна пацверджана канцэпцыя стварэння ДТМ з паніжаным гістэрэзісам за кошт увядзення станоўчай зваротнай сувязі. Распрацавана і запатэнтавана канструкцыя ДТМ з самаўзмацненнем для розных тыпаў прыводаў ТС аўтамабіляў. Выкананы сінтэз алгарытму кіравання ДТМ з самаўзмацненнем на падставе інфармацыі, атрыманай ад датчыкаў частаты кручэння колаў.

Вынікі даследаванняў знайшлі практычнае прымяненне і ўкаранёны ў вытворчасць на Мінскім аўтамабільным заводзе і ТДА "ДЫСКОМС", а таксама ў вучэбны працэс пры падрыхтоўцы інжэнераў па спецыяльнасці "Аўтамабілебудаўніцтва (па напрамках)" БНТУ.



## РЕЗЮМЕ

### Третьяк Дмитрий Владимирович Повышение эффективности тормозных систем автомобилей за счет снижения гистерезисных потерь в дисковых тормозных механизмах

Ключевые слова: гистерезисные потери, методика расчета, ДТМ, самоусиление, экспериментальные исследования, компьютерное моделирование, MSC.ADAMS, Dymola.

Цель – повышение эффективности тормозных систем автомобилей за счет снижения гистерезисных потерь в дисковых тормозных механизмах путем введения в конструкцию положительной обратной связи, обеспечивающей самоусиление.

Применены методы системного анализа технических систем, расчетно-теоретические и экспериментальные методы, методы автоматизированного проектирования и компьютерного моделирования; при экспериментальных исследованиях проводились ходовые и стендовые испытания компонентов ТС. При этом использовалась современная стендовая, измерительная аппаратура и программное обеспечение.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена методика расчета ДТМ, основанная на зависимости величины гистерезисных потерь и характера протекания гистерезисных кривых от параметров дисковых тормозов. В результате получены аналитические зависимости, которые позволяют на стадии проектирования ДТМ определять величину гистерезиса в них.

Разработана методика создания имитационных моделей дисковых тормозов и проведения компьютерных испытаний ДТМ, позволяющая определять гистерезис, выходные характеристики и параметры дисковых тормозов.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена концепция создания ДТМ с пониженным гистерезисом за счет введения положительной обратной связи. Разработана и запатентована конструкция ДТМ с самоусилением для различных типов приводов ТС автомобилей. Выполнен синтез алгоритма управления ДТМ с самоусилением на основании информации, получаемой от датчиков частоты вращения колес.

Результаты исследований нашли практическое применение и внедрены в производство на Минском автомобильном заводе и ОДО "ДИСКОМС", а также в учебный процесс при подготовке инженеров по специальности 1-37 01 02 "Автомобилестроение (по направлениям)" БНТУ.

Репозиторий БНТУ

## SUMMARY

Tretsiak Dzmitry Uladzimiravich

Enhancement of vehicle brake system efficiency by means of hysteresis losses reducing at disc brakes

Key words: hysteresis losses, design procedure, disc brake, self-boosting, experimental investigations, computer simulation, MSC.ADAMS, Dymola.

Aim of investigation – enhancement of vehicle brake system efficiency by means of hysteresis losses reducing at disc brakes due to positive feedback at disc brake design which provides a self-boosting effect.

Methods of system analysis for technical systems, design-theoretical and experimental methods, computer simulation and computer-aided design have been used. Ride and bench tests of brake systems components have been lead. Modern bench and measuring equipment and software has been used for it.

Design procedure is theoretically validated and experimentally conformed for disc brakes on the base of dependences of hysteresis losses value and hysteresis curves on disc brakes parameters. As a result, analytical dependences have been obtained which allow calculate a hysteresis losses value at disc brakes on designing stage.

Design procedure has been developed for imitating models of disc brakes and carrying out of computer tests which is allow calculate a hysteresis losses value, output characteristics and parameters of disc brakes.

Conception of disc brake with self-boosting is theoretically validated and experimentally conformed due to positive feedback at disc brake design. This brake has minimal hysteresis. Design of disc brake with self-boosting has been developed and patented for different types of brake systems. Control algorithm has been created for developed disc brake with self-boosting on the base of information from rotational velocity sensor of vehicle wheels.

Results of carried out investigations are used during vehicle production on Minsk automobile plant, "DISCOMS" firm and in a learning process for engineers by specialization 1-37 01 02 "Automobiles (in directions)" in Belarussian national technical university.

Репозиторий БНТУ

Научное издание

ТРЕТЬЯК  
Дмитрий Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ  
АВТОМОБИЛЕЙ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ  
ПОТЕРЬ В ДИСКОВЫХ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМАХ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

---

Подписано в печать 31.01.2011.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 60. Заказ 94.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ №02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.