

На правах рукописи

УДК 629.33

**Захаров Александр Юрьевич**

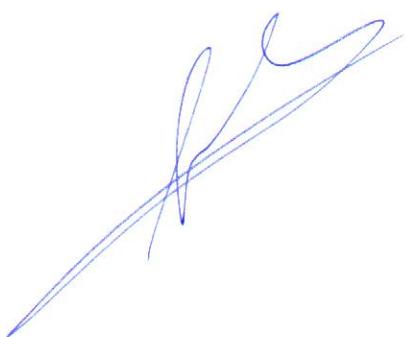
**ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА СТЕНДАХ С  
ИМИТАЦИЕЙ КАЧЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПО ОПОРНОЙ  
ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва 2016

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (г. Москва).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва)  
Горелов Василий Александрович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ (г. Волгоград)  
Дыгало Владислав Геннадиевич;

доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник Отдела технической политики Департамента государственной политики в области автомобильного и городского пассажирского транспорта Министерства транспорта Российской Федерации  
Котляренко Владимир Иванович.

Ведущая организация: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Защита диссертации состоится «\_\_» декабря 2016 г. в \_\_ на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Сарач Е.Б.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Натурные испытания являются неотъемлемой частью проектирования, технологического процесса изготовления и эксплуатации колесных машин. Необходимость их проведения обусловлена исследовательскими и экспериментальными задачами по оценке качественных и количественных показателей транспортных средств в целом, а также отдельных узлов и агрегатов, для проверки работоспособности конструкции, соответствия требованиям, заявленным в техническом задании на проектирование, а также для решения других сопутствующих задач. Очевидно, что существующее многообразие конструктивных особенностей колесных машин предъявляет требования по разработке методов проведения экспериментальных исследований, а также по созданию для этих целей оригинального стендового оборудования.

Ценность дорожных испытаний заключается в исследовании реальных условий взаимодействия полноразмерного автомобиля с внешней средой. Вместе с тем, дорожные испытания сопряжены с проблемами корректного сбора данных, с затратами на организацию и обслуживание полигонов (трасс) для проведения исследований, с необходимостью организации работы коллектива испытателей и многим другим.

Известны аналоги испытаний автомобилей в дорожных условиях. Например, эксперименты в условиях стендов с имитацией качения движителей по опорной поверхности (стенды с беговыми барабанами или роликовые) имеют основную положительную особенность, заключающуюся в возможности управления сочетанием тяговых и тормозных нагрузок, скоростных режимов и условий внешнего воздействия, причем установившийся режим может быть организован длительное время с целью проведения всех необходимых измерений, т.к. в отличии от дорожных условий, обеспечение постоянства условий эксперимента не ограничено по времени. Еще одной немаловажной положительной особенностью стендовых испытаний является независимость от сезонно-климатических условий.

Основной недостаток стендовых испытаний полноразмерных автомобилей – несоответствие условий качения автомобильных шин по барабану (ролику) реальным дорожным покрытиям, которые практически невозможно имитировать на поверхности барабанов. При решении проблемы стендовой имитации движения по реальной дорожной поверхности, стендовые испытания превратятся в самый предпочтительный по эффективности метод исследования транспортных средств.

Для существующих колесных машин с традиционными схемами трансмиссии (дифференциальная и блокированная связь) и разрабатываемых образцов автомобильной техники с электромеханическими трансмиссиями, а также другими типами трансмиссий, позволяющими организовывать индивидуальное управление каждым движителем транспортного средства, представляется актуальной задача по разработке методов испытаний на стенах с беговыми барабанами с целью совершенствования систем распределения мощности по колесам. При современном уровне развития вычислительной техники определенный круг задач, связанный с оценкой работоспособности и эффективности предлагаемых теоретических

разработок, целесообразно решать с помощью имитационного математического моделирования рабочих процессов на ЭВМ.

Таким образом, задача воспроизведения на стенде реальных дорожных условий имеет важное научное и практическое значение, решение которой позволит повысить эффективность натурных испытаний на стенах с имитацией качения движителей по опорной поверхности, необходимых для решения широкого круга задач, в том числе, для сокращения сроков проектирования и снижения стоимости доводочных испытаний колесной техники.

Цели и задачи. Целью работы является повышение эффективности натурных испытаний колесной техники на стенах с имитацией качения движителей по опорной поверхности путем совершенствования методов проведения экспериментальных исследований.

Для достижения цели в работе решены следующие основные задачи:

- разработаны математические модели динамики одиночного колесного движителя на беговом барабане при различных режимах качения и математическая модель динамики колесной машины 8×8 с различными схемами трансмиссий на стенде с беговыми барабанами;
- разработанные математические модели реализованы в одном из программных пакетов имитационного моделирования динамики систем;
- разработаны новые методы проведения экспериментальных исследований колесной техники на стенах с беговыми барабанами, позволяющие имитировать реальные дорожные эксплуатационные условия;
- проведены теоретические исследования динамики одиночного колеса при различных режимах качения и колесной машины 8×8 с индивидуальным приводом движителей на беговых барабанах, подтверждающие работоспособность и эффективности предлагаемых методов;
- доказана работоспособность и эффективность предлагаемых методов имитации дорожных условий при испытаниях транспортных средств с различными схемами трансмиссий (блокированный и дифференциальный привод);
- проведены экспериментальные исследования колесной машины на стенде с беговыми барабанами для оценки адекватности и точности разработанных математических моделей путем сопоставления данных, полученных в ходе натурных и вычислительных экспериментов.

Научная новизна работы заключается:

- в создании математической модели динамики колесной машины с различными схемами трансмиссий и режимами нагружения на стенде с имитацией качения движителей по опорной поверхности;

- в разработке технологии экспериментальных исследований колесной техники на стенах с имитацией качения движителей по опорной поверхности, позволяющей воспроизводить широкий спектр реальных дорожных эксплуатационных условий, включая движение на подъем/спуск, изменение характеристик взаимодействия движителей с опорным

основанием в функции пути, движение транспортного средства в различных режимах и т.д.;

- в результатах теоретических исследований динамики одиночного колеса при различных режимах качения и колесной машины 8×8 с различными схемами трансмиссий на беговых барабанах, подтверждающих работоспособность и эффективность предлагаемых методов управления стендом с целью имитации дорожных эксплуатационных условий.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов базируются на теоретических и экспериментальных исследованиях динамики транспортных средств на стенах с беговыми барабанами, а также на использовании апробированных методов имитационного математического моделирования.

Практическая ценность работы. В ходе выполнения исследований для практического использования при проведении испытаний колесных транспортных средств на стенах с имитацией качения движителей по опорной поверхности созданы:

- комплекс программ для ЭВМ, позволяющий имитировать динамику транспортных средств при различных схемах и типах трансмиссии на стенах с беговыми барабанами и проводить оценку эффективности законов управления стендом с целью воспроизведения дорожных эксплуатационных условий;
- методы проведения экспериментальных исследований колесных транспортных средств с различными типами трансмиссий на стенах с беговыми барабанами.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», в ПАО «КАМАЗ», в НОЦ «Транспорт» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, в НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также используются в учебном процессе при подготовке специалистов на кафедре СМ-10 «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана и магистров на кафедре «Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались:

- на научно-технических семинарах кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана в 2013...2016 гг. (г. Москва);
- на научно-техническом семинаре кафедры «Тягачи и амфибийные машины» ГТУ МАДИ (г. Москва, 2015 г.);
- на 85-ой международной научно-технической конференции ААИ «Будущее автомобилестроения в России» (г. Москва, 2014 г.);
- на научно-технической конференции «Вычислительные системы реального времени» (г. Москва, 2014 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 научные работы, из них по списку, рекомендованному ВАК РФ, 3.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов и списка литературы. Работа изложена на 171 листе машинописного текста, содержит 119 рисунков, 14 таблиц. Библиография работы содержит 104 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования: развития методов проведения экспериментальных исследований колесной техники на стендах с имитацией качения движителей по опорной поверхности.

В первой главе диссертации проведен обзор и анализ работ, посвященных методам испытаний наземных колесных транспортных средств, конструктивным особенностям и областям применения стендов с имитацией качения движителей по опорной поверхности. Представлен анализ современных методов решения задач динамики наземных колесных транспортных средств

Особенно отмечены работы Гладова Г.И., Д.А. Антонова, А.С. Литвинова, П.В. Аксенова, В.А. Петрушова, А.Б. Дика, Ю.Л. Рождественского, Г.А. Смирнова, А.И. Федотова, А.А. Хачатурова, В.Н. Шелудько и др., а также труды научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАДИ, МАМИ, 21 НИИИ МО РФ, ФГУП ГНЦ «НАМИ», Академии БТВ, НИЦИАМТ.

Проведенный анализ современного состояния вопроса по использованию стендов с имитацией качения движителей по опорной поверхности для решения различных задач, связанных с динамикой колесных транспортных средств, подтвердил необходимость совершенствования методов проведения экспериментальных исследований в силу того, что достигнут значительный прогресс в развитии конструкций подобных стендов, а главное, в системах управления приводом, позволяющих имитировать широкий спектр внешних условий, в том числе, движение на подъемах и спусках, при различных коэффициентах взаимодействия каждого движителя с опорным основанием и т.п.

Выполненные в первой главе исследования позволили для достижения цели работы обосновать необходимость решения ряда научных задач, решению которых посвящены остальные главы диссертации.

Во второй главе представлены разработанные математические модели динамики как одиночного движителя на беговом барабане, так и полноразмерного автомобиля с колесной формулой 8x8 и различными типами трансмиссий, а также математические модели динамики движителя и автомобиля по дороге, используемые для получения информации, необходимой для управления приводными системами стендса. Представлена программная реализация разработанных и используемых математических моделей динамики и алгоритмов управления стендом.

Расчетная схема динамики одиночного колеса на беговом барабане представлена на Рис. 1.

На Рис. 1:  $P_z = m \cdot g = R_z$ , где  $P_z$  – вертикальная нагрузка, приходящаяся на колесо;  $m$  – часть массы транспортного средства, приходящаяся на одно колесо;  $R_z$  – нормальная реакция в пятне контакта колеса с поверхностью барабана.

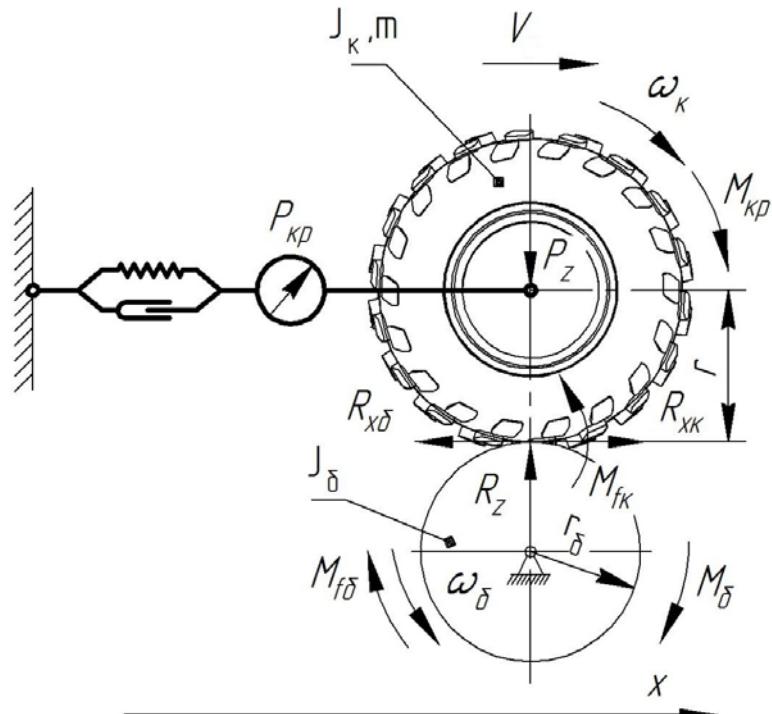


Рис. 1. Расчетная схема динамики одиночного колеса на беговом барабане

Задача имитационного математического моделирования решалась для автомобиля с колесной формулой 8×8 и различными типами трансмиссий. Расчетная схема динамики автомобиля на стенде «Беговые барабаны» представлена на Рис. 2.

В качестве допущений представим удерживающее устройство, препятствующее съезду автомобиля с поверхности барабана, в виде упруго-демпфирующей связи. Сила, удерживающая автомобиль на стенде, действует только вдоль оси  $x$ . Пренебрегаем смещением вертикальной оси  $i$ -го колеса относительно вертикальной оси  $i$ -го барабана, заменяя их действием  $i$ -ых моментов сопротивления.

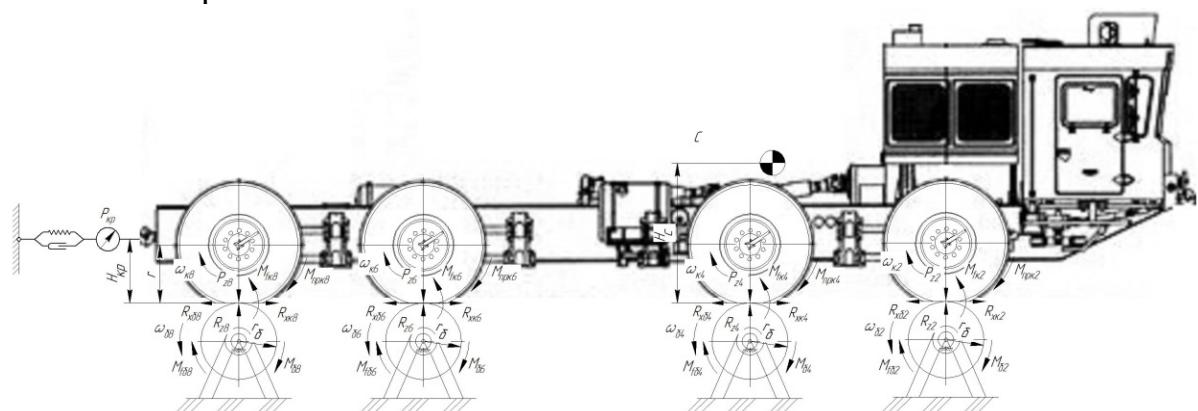


Рис. 2. Расчетная схема динамики автомобиля на стенде «Беговые барабаны»

Уравнения, описывающие динамику системы «колесная машина - беговые барабаны», могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{cases} m \cdot \dot{V} = \sum_{i=1}^n R_{x\kappa_i} - P_{kp}; \\ J_{\kappa_i} \cdot \dot{\omega}_{\kappa_i} = M_{kp_i} - M_{fk_i} - R_{x\kappa_i} \cdot r_i; \\ J_{\delta_i} \cdot \dot{\omega}_{\delta_i} = R_{x\delta_i} \cdot r_{\delta_i} - M_{f\delta_i} \pm M_{\delta_i}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $i = 1, \dots, n$ ;  $\dot{V}$  – продольное ускорение центра масс автомобиля на стенде (имеет значения, близкие к нулю);  $R_{x\kappa_i}$  – продольная реакция  $i$ -го колеса при взаимодействии с поверхностью  $i$ -го барабана;  $R_{x\delta_i}$  – продольная реакция на поверхности  $i$ -го барабана при взаимодействии с  $i$ -ым колесом;  $P_{kp}$  – сила на крюке;  $\dot{\omega}_{\kappa_i}$  – угловое ускорение  $i$ -го колеса;  $\dot{\omega}_{\delta_i}$  – угловое ускорение  $i$ -го барабана;  $J_{\kappa_i}$ ,  $J_{\delta_i}$  – приведенные моменты инерции  $i$ -го колеса и  $i$ -го барабана, соответственно;  $M_{kp_i}$  – крутящий (приводной) момент на  $i$ -ом колесе;  $M_{fk_i}$  – момент сопротивления вращению  $i$ -го колеса на  $i$ -ом барабане;  $M_{f\delta_i}$  – момент сопротивления, передаваемый на  $i$ -ый барабан от  $i$ -го колеса;  $M_{\delta_i}$  – тормозной (приводной) момент, реализуемый системой привода  $i$ -го барабана;  $r_i$ ,  $r_{\delta_i}$  – расстояния от точки контакта до оси  $i$ -го колеса и  $i$ -го барабана, соответственно.

Продольная реакция  $i$ -го колеса при взаимодействии с поверхностью  $i$ -го барабана зависит от величины нормальной реакции и коэффициента взаимодействия:

$$R_{x\kappa_i} = R_{x\delta_i} = \varphi_{x_i} \cdot R_{z_i}, \quad (2)$$

где  $\varphi_{x_i}$  – коэффициент взаимодействия  $i$ -го колеса с  $i$ -ым барабаном.

Зависимость коэффициента взаимодействия от коэффициента буксования определяется по формуле

$$\varphi_x = \varphi_{x_{\max}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{S}{S_0}} \right) \cdot \left( 1 + e^{-\frac{S}{S_1}} \right), \quad (3)$$

Коэффициент буксования для  $i$ -ой пары «колесо – беговой барабан» определяется зависимостью:

$$S_i = \frac{\omega_{\kappa_i} \cdot r_i^* - \omega_{\delta_i} \cdot r_{\delta_i}}{\omega_{\kappa_i} \cdot r_i^*}, \quad (4)$$

Принимаем одинаковое значение всех радиусов для всех барабанов  $r_{\delta_i}$ , приведенное в технических характеристиках стенда. Под величиной  $r_i^*$  следует понимать радиус качения  $i$ -го колеса без скольжения на  $i$ -ом барабане. Условия взаимодействия всех колеса с соответствующим барабаном для всех колес одинаковые.

Момент сопротивления качению  $i$ -го колеса  $M_{fk_i}$ , действующий в плоскости его вращения, может быть оценен зависимостью:

$$M_{fk_i} = f \cdot R_{z_i} \cdot r_i^*. \quad (5)$$

Момент сопротивления  $M_{f\ddot{o}_i}$ , передаваемый на барабан от колеса:

$$M_{f\ddot{o}_i} = M_{f\dot{k}_i}. \quad (6)$$

Нормальные реакции  $R_{z_i}$  определяются из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^8 R_{z_i} = m \cdot g; \\ \sum_{i=1}^8 R_{z_i} \cdot x_{k_i} = \sum M_{OTH}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\sum M_{OTH} = -(m \cdot \dot{V} \cdot H_c + P_{kp} \cdot H_{kp} + \sum_{i=1}^8 M_{f\dot{k}_i})$  – сумма крутящих моментов относительно проекции центра масс автомобиля на опорную плоскость;  $H_c$  – высота центра масс автомобиля;  $H_{kp}$  – высота приложения силы на крюке  $P_{kp}$ ,  $x_{k_i}$  – расстояние от центра масс автомобиля до  $i$ -го колеса по оси  $x$ .

Дополнительные уравнения для решения системы (7) составляются на основе положения, что концы векторов нормальных реакций лежат в одной плоскости. Доказательство основано на следующих допущениях: подвеска автомобиля независимая и эквивалентна пружине, не сопротивляющейся поперечно, динамикой корпуса пренебрегаем.

Сила на крюке  $P_{kp}$ , препятствующая съезду автомобиля с поверхности барабана, может быть определена с учетом упруго-демпфирующих характеристик удерживающего устройства по зависимости:

$$P_{kp} = c \cdot x + \mu \cdot V. \quad (8)$$

Известны различные конструкции стендов с беговыми барабанами. В относительно простых по исполнению вариантах на барабане реализуется лишь дополнительное сопротивление вращению колеса за счет приложения тормозного момента. В современных конструктивных исполнениях стендов, как правило, беговой барабан связан с электрическим приводом (Рис. 3), за счет которого может быть реализовано как дополнительное сопротивление (тормозной момент), так и добавочный крутящий момент (приводной).



Рис. 3. Автомобиль на стенде «Беговые барабаны»

Будем полагать, что момент на  $i$ -ом барабане  $M_{\delta_i}$  зависит от конструктивных параметров и системы управления и может быть определен по зависимости:

$$M_{\delta_i} = M_{\delta \max} \cdot h_{\delta_i}, \quad (9)$$

Разработанная математическая модель динамики автомобиля на стенде реализована в Matlab/Simulink. Общая блок-схема модели, представленная на Рис. 4, включает в себя две подсистемы (subsystem): подсистему «АВТОМОБИЛЬ», в которой решаются уравнения динамики машины и подсистему «СТЕНД», в которой решаются восемь уравнений динамики барабанов, представленные в общем виде последним уравнением системы (1). В подсистему «АВТОМОБИЛЬ» из подсистемы «СТЕНД» для определения величины скольжения  $S_i$  подаются значения угловых скоростей барабанов  $\omega_{\delta_i}$ . Таким образом, связь между первой и второй подсистемами реализуется через значения продольных реакций на поверхностях барабанов ( $R_{x_i} = R_{x_{K_i}} = R_{x_{\delta_i}}$ ), которые определяются в подсистеме «АВТОМОБИЛЬ» и используется в подсистеме «СТЕНД» (Рис. 4).

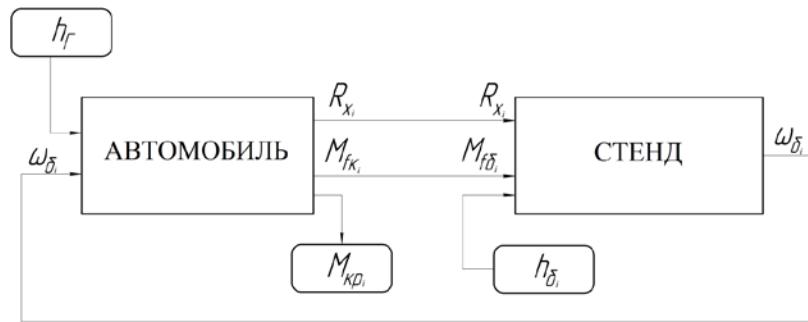


Рис. 4. Блок-схема модели «АВТОМОБИЛЬ-СТЕНД»

Разработанная математическая модель динамики автомобиля на стенде «Беговые барабаны» (подсистемы «АВТОМОБИЛЬ» и «СТЕНД» на Рис. 4) реализуется в одной подсистеме с названием «Динамика автомобиля на стенде» (Рис. 5). Блок-схема (Рис. 5) дополняется подсистемой «Динамика автомобиля на дороге», в которой решается задача динамики автомобиля с теми же параметрами, что и в условиях стенда, но по опорному основанию, отличающемуся по своим характеристикам от поверхностей барабанов.

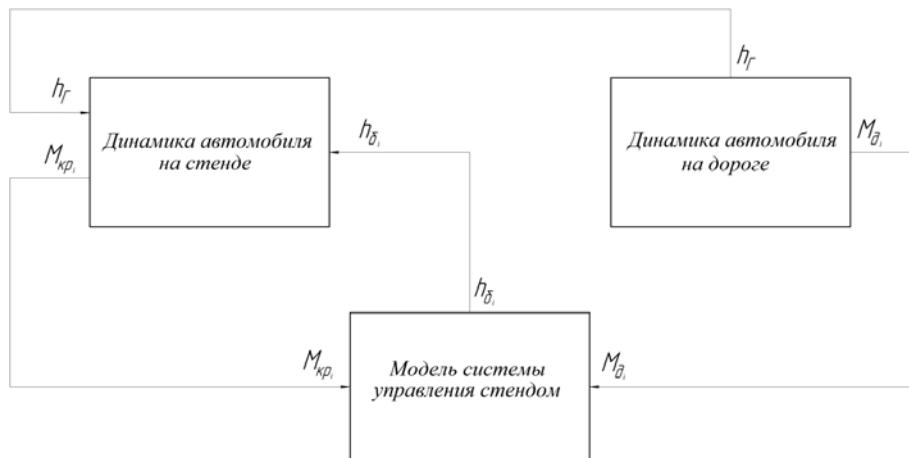
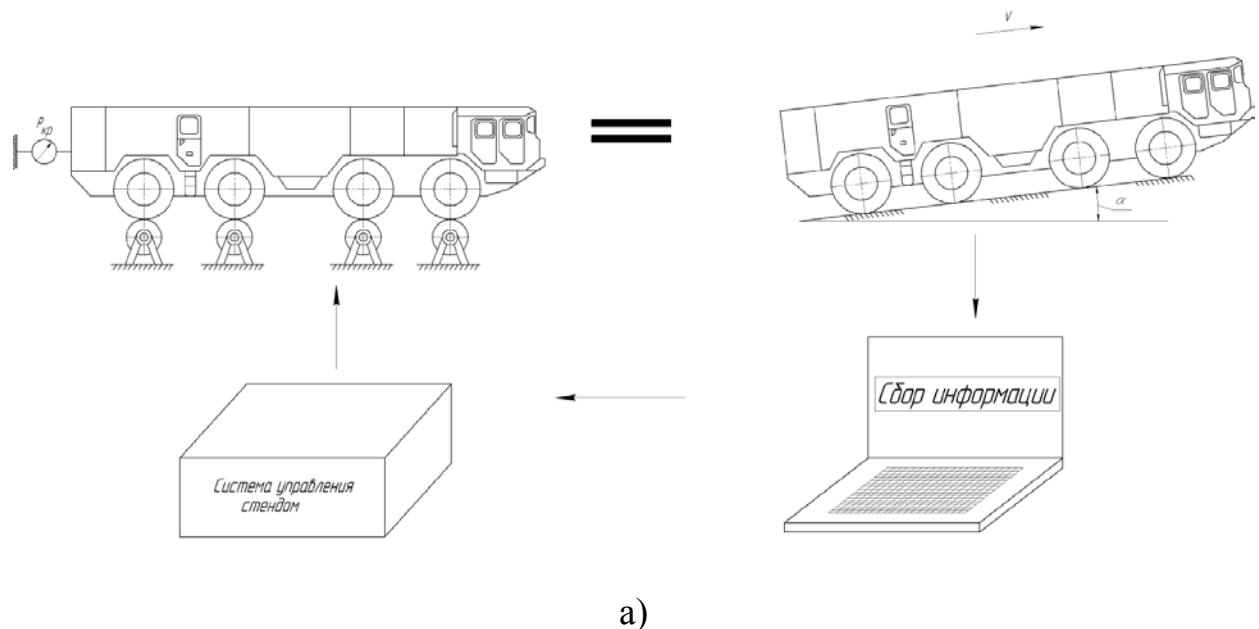


Рис. 5. Блок-схема модели «Автомобиль на стенде – автомобиль на дороге»

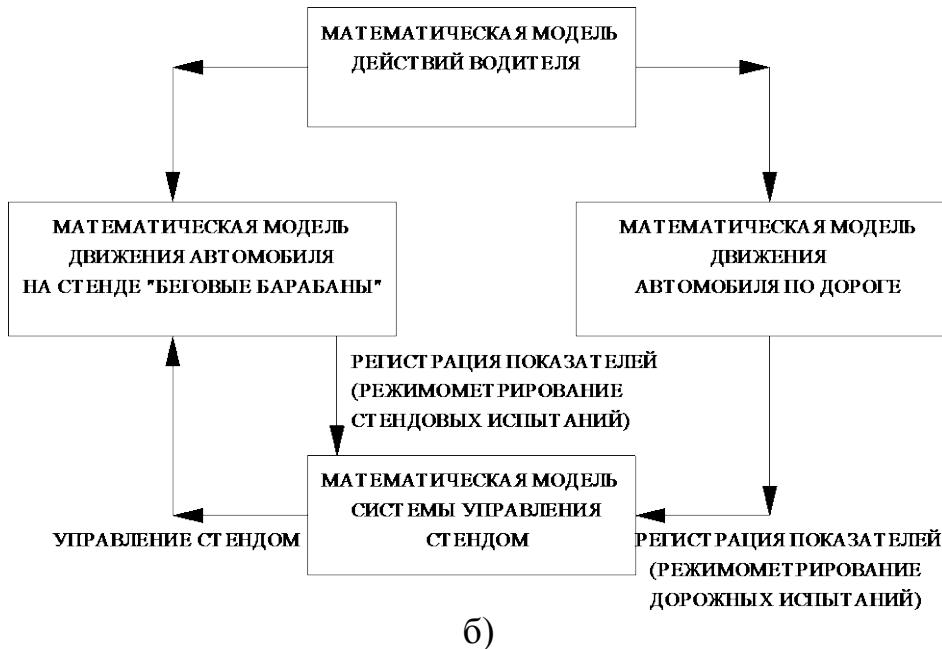
В третьей главе представлена технология испытаний колесных машин на стенах с имитацией качения движителей по опорной поверхности. Разработаны метод и алгоритм управления стендом беговые барабаны для воспроизведения реальных условий эксплуатации колесных транспортных средств. Проведен анализ работоспособности метода проведения экспериментальных исследований колесной техники на стенах с беговыми барабанами, приведены результаты теоретических исследований динамики одиночного движителя на беговом барабане при всех известных режимах качения и полноразмерного автомобиля с колесной формулой 8×8 и различными типами трансмиссий на стенде с беговыми барабанами.

Суть метода проведения экспериментальных исследований заключается в следующем. При натурных испытаниях колесной машины с помощью установленных измерительных систем регистрируются показатели, характеризующие движение в данных эксплуатационных условиях, которые будем считать входными параметрами для системы управления приводом стенд «Беговые барабаны». Управление приводными двигателями стендадолжно быть организовано так, чтобы значения силовых и кинематических параметров, зафиксированные при дорожных испытаниях, в точности воспроизводились на стенде.

С целью проверки работоспособности данного метода предлагается на начальном этапе исследований от схемы, представленной на Рис. 6 а), перейти к схеме (Рис. 6 б), т.е. заменить реальные объекты колесной техники на дороге и в условиях стендадих математическими моделями.



а)



б)

Рис. 6. Принцип управления приводом стенда «Беговые барабаны»

Управление стендом с беговыми барабанами организовано так, чтобы условия качения колеса на барабане оказались идентичными дорожным. В процессе моделирования движения колеса по дороге непрерывно (или с какой-либо частотой) отслеживается величина крутящего момента на колесе  $M_d$ . Крутящий момент зависит от угловой скорости колеса и определяется внешними условиями, а также уровнем использования мощности ТЭД  $h_T$ . Таким образом, в случае, если в условиях движения колеса на барабане удастся реализовать полную синхронизацию  $M_{kp}$  приводному моменту  $M_d$ , который реализуется при движении по дороге, то при одинаковом уровне использования мощности ТЭД можно добиться полного совпадения угловых скоростей вращения колес на стенде и на дороге. Совпадение по приводным моментам и угловым скоростям вращения означает то, что нагружочный режим, который имеет место при движении по дороге, полностью воспроизводится в условиях стенда.

В процессе моделирования из подсистем «Динамика колеса на дороге» и «Динамика колеса на стенде» в подсистему «Модель системы управления приводом стенда» подаются моменты  $M_{kp}$  и  $M_d$ . В правой части третьего уравнения системы (1) присутствует момент на барабане  $M_b$ , управляя которым, возможно добиться совпадения приводных моментов на колесах при качении по дорожной поверхности и на беговом барабане.

С целью реализации соответствия  $M_{kp}$  моменту  $M_d$  в модели организуется пропорциональное изменение командного воздействия  $h_b$  [-1...1], определяющего уровень и направление приложения момента на барабане, в зависимости от относительной разницы  $\Delta(M_d / M_{kp})$ :

$$\Delta(M_d / M_{kp}) = \frac{M_d - M_{kp}}{M_d}. \quad (10)$$

Отметим, что управление педалью «газ» автомобиля на стенде должно быть полностью согласовано с этим же параметром при испытаниях автомобиля на дороге. Предполагается, что при проведении испытаний автомобиля на стенде «Беговые барабаны» эта функция будет реализована с помощью автоматизированной системы.

Эффективность предлагаемого метода подтверждена с помощью имитационного математического моделирования. Исходные данные для моделирования следующие:  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $m = 60000 \text{ кг}$ ;  $J_k = 300 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $J_\delta = 300 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $r = 0,725 \text{ м}$ ,  $r_\delta = 0,6 \text{ м}$ ;  $f_{\delta ap}$  (на стенде) = 0,016;  $f_{\delta op}$  (на дороге) = 0,1;  $\varphi_{x_{\max}}$  (на стенде) = 0,7;  $\varphi_{x_{\max}}$  (на дороге) = 0,4;  $M_{\delta_{\max}} = 10000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;  $M_{\max} = 39 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ;  $N_{\max} = 60 \text{ кВт}$ ;  $c = 5 \times 10^7 \text{ Н/м}$ ;  $\mu = 2,5 \times 10^7 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$ ;  $H_c = 1,925 \text{ м}$ ;  $H_{kp}$  (на стенде) = 0,88 м;  $x_{k_1} = 4,245$ ;  $x_{k_8} = -1,905$ . Движение на стенде и на дороге начинается с начальной скорости  $V_0 = 1 \text{ км/ч}$ . Угол подъема в направлении движения  $\alpha = 10^\circ$ . Управление стендом (изменение моментов  $M_{\delta}$ ) начинается со 2-ой секунды движения, т.е. до этого автомобиль на стенде движется независимо от условий на дороге; уровень использования мощности при движении по дороге изменяется линейно за первую секунду движения от значения  $h_\Gamma = 0,1$  до значения  $h_\Gamma = 1$  и в дальнейшем не изменяется. Управление уровнем использования мощности ТЭД на стенде  $h_\Gamma$  синхронизировано с этим же параметром при движении по дороге. Время моделирования  $t = 10$  секунд.

Результаты моделирования представлены на Рис. 7-10. В заданных условиях при движении по дороге с углом подъема в направлении движения  $\alpha = 10^\circ$  за 10 секунд моделирования автомобиль достиг предельно возможной скорости 2,8 м/с (Рис. 7).

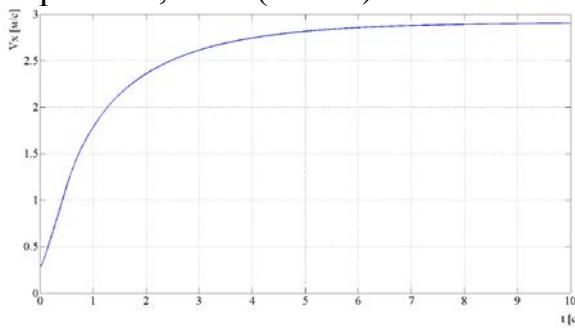


Рис. 7. Линейная скорость автомобиля при движении по дороге

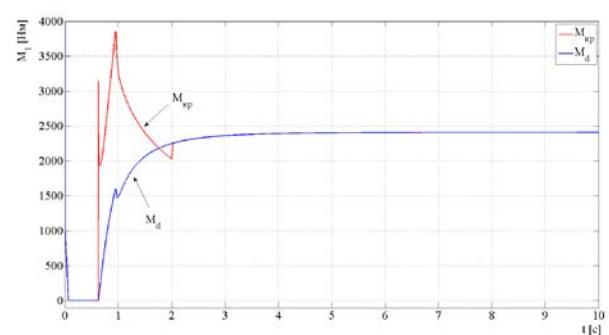


Рис. 8. Приводные моменты на колесах №1 (на стенде и на дороге)

Результаты моделирования представлены для колес №1 и №8.

Анализируя Рис. 8, можно отметить, что до 2-ой секунды движения крутящий момент, подводимый к колесу №1 при движении по дороге  $M_d$ , и крутящий момент  $M_{kp}$ , подводимый к колесу №1 на барабане, формировались независимо друг от друга. При этом управляющее воздействие  $h_\delta$  (Рис. 9) на изменение момента на барабане до 2-ой секунды движения не осуществлялось.

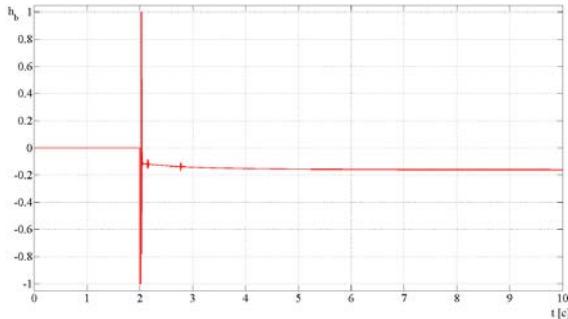


Рис. 9. Управляющее воздействие  $h_b$  для приводного барабана стенда (колесо №1)

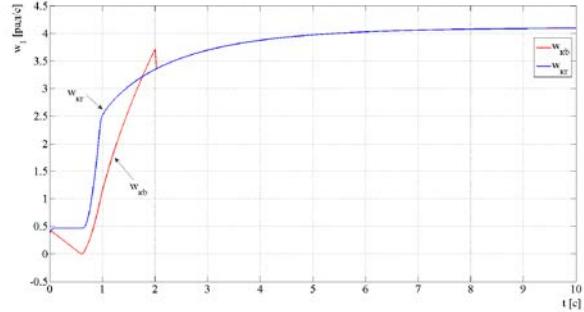


Рис. 10. Угловые скорости колес №1 (на стенде и на дороге)

Со второй секунды движения осуществлялось управление моментом на барабане (Рис. 9) с целью выравнивания приводных моментов, что и было достигнуто (Рис. 8).

График изменения угловых скоростей колес (Рис. 10) позволяет сделать следующий вывод: поскольку до 2-ой секунды движения на барабане №1 не создавался момент сопротивления, а приводной момент формировался в зависимости от перераспределения нормальных реакций, которые у автомобиля, двигающегося в подъем по дороге, естественно, меньше, чем у автомобиля на стенде, угловая скорость колеса №1, находящегося на барабане, возрастила медленнее, чем у этого же колеса при движении автомобиля по дороге (Рис. 10). В дальнейшем за счет управления моментом на барабане №1  $M_{d_1}$  было реализовано совпадение приводных моментов  $M_{d_1}$  и  $M_{kp_1}$  (Рис. 8), а поскольку характеристики тяговых двигателей представляют собой зависимость момента от частоты вращения, то при одинаковом уровне использования их мощности (что является условием проведения эксперимента) при проведении численного моделирования зафиксировано совпадение угловых скоростей колес (Рис. 10) после второй секунды движения.

Максимальное значение силы на крюке составило  $10,6 \times 10^4$  Н.

Анализ результатов моделирования позволил сделать вывод о том, что на всех колесах автомобиля после начала управления приводом беговых барабанов (2-ая секунда движение) также было реализовано совпадение крутящих моментов и угловых скоростей за счет формирования управляющего воздействия в соответствии с командным сигналом.

Эффективность разработанного алгоритма управления приводными двигателями беговых барабанов по критерию обеспечения равенства приводных моментов на каждом колесе в трансмиссии автомобиля с индивидуальным приводом подтверждена с помощью математического моделирования на ЭВМ. При этом удалось достичь как совпадения моментов, так и угловых скоростей при условии синхронизации управления степенью используемой мощности силовой установки.

В случае исследования автомобилей с блокированной и дифференциальной трансмиссией индивидуально управлять каждым приводным моментом на колесо не удастся. Момент и угловая скорость на

каждом из колес получается в зависимости от степени использования мощности силовой установки, от ее характеристики и от внешних условий, в которых будет находиться каждое из колес.

В случае дифференциальной трансмиссии даже при условии обеспечения равенства приводных моментов на колесах невозможно будет на стенде добиться совпадения угловых скоростей вращения, поскольку различаются значения нормальных нагрузок, а также условия взаимодействия колес с опорным основанием. При блокированной трансмиссии на стендах с беговыми барабанами также не удастся реализовать полное совпадение и силовых и кинематических параметров по колесам: различие приводных моментов на колесах одной оси вполне допустимо при одновременном обеспечении одинаковой угловой скорости.

Согласование значений моментов  $M_o$ , развиваемых силовой установкой при динамике на дороге и на стенде, как и предполагалось не позволило реализовать полное совпадение и силовых, и кинематических параметров на каждом из колес.

Таким образом, был сделан вывод о необходимости корректировки разработанного подхода для имитации реальных условий эксплуатации на стендах с беговыми барабанами для случаев трансмиссий с блокированными и дифференциальными связями.

Для достижения полного совпадения как приводного момента, так и угловой скорости по каждому из колес при дифференциальной и блокированной схемах трансмиссии, необходимо и достаточно, чтобы момент сопротивления на колесе  $M_{k_i} = M_{fk_i} + R_{xk_i} \cdot r_i^*$  совпадал при динамике на дороге и в условиях стенда. Иными словами, управление крутящим (тормозным) моментом на каждом приводном беговом барабане должно быть организовано не по критерию совпадения крутящих моментов на колесе, а по критерию совпадения моментов сопротивления, приведенных к каждому из движителей. При этом необходимо учитывать, что синхронизация моментов сопротивления должна быть реализована с самой начальной фазы движения, поскольку в противном случае удастся реализовать не выравнивание угловых скоростей, а только их ускорений. Соответственно, будет выровнен и общий суммарный уровень используемой мощности, но на каждом из колес этот показатель согласовать не удастся.

Методика имитации дорожных условий при испытаниях автомобилей с блокированной и дифференциальной связью в трансмиссии на стендах с беговыми барабанами заключается в следующем:

1. На основе математической модели динамики автомобиля, прошедшей оценку адекватности и точности, регистрируются значения приведенных моментов сопротивления к каждому из колес во всем временном диапазоне испытаний.

2. В математическую модель системы управления приводными двигателями стендса с беговыми барабанами зафиксированные значения приведенных моментов сопротивления к каждому из колес подаются в виде входных параметров, на основе которых формируется управляющий сигнал. В данном пункте необходимо учесть, что используемая математическая

модель динамики транспортного средства на беговых барабанах также должна пройти процедуру оценки адекватности и установления точности.

3. При проведении виртуальных испытаний динамики автомобиля на стенде с беговыми барабанами регистрируются выходные параметры математической модели системы управления приводными двигателями барабанов во всем временном диапазоне исследований.

4. При натурных испытаниях транспортного средства на стенде с беговыми барабанами управление каждым беговым барабаном реализуется на основе данных, полученных с помощью имитационного математического моделирования по пункту №3.

Таким образом, можно достичь имитации нагрузочных режимов, действующих при движении транспортного средства по дороге, при проведении экспериментальных исследований на стенах с беговыми барабанами.

Результаты моделирования для полностью блокированной схемы трансмиссии представлены на Рис. 11-14. Угол подъема в направлении движения составляет  $\alpha = 15^\circ$ .

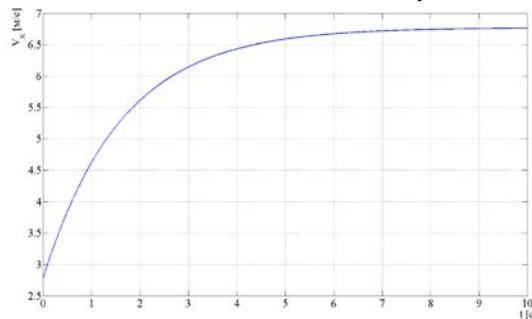


Рис. 11. Линейная скорость автомобиля при движении по дороге

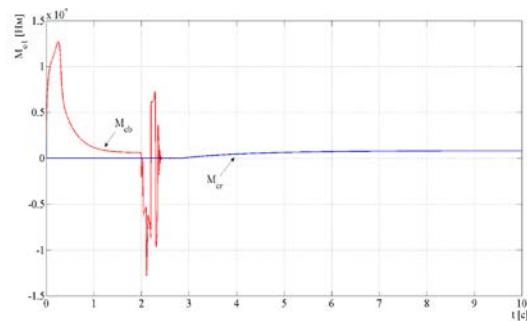


Рис. 12. Моменты сопротивления, приведенные к колесам №1 (на стенде и на дороге)

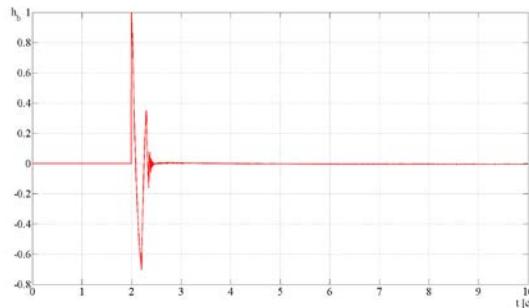


Рис. 13. Управляющее воздействие  $h_6$  для приводного барабана стенда (колесо №1)

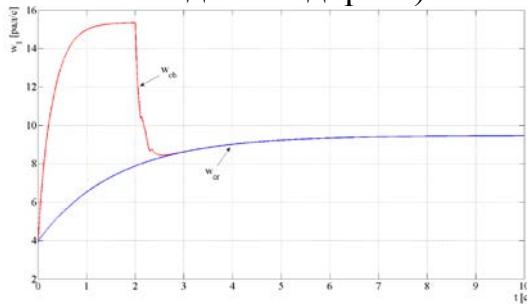


Рис. 14. Угловые скорости колес №1 (на стенде и на дороге)

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям автомобиля на стенде с беговыми барабанами. Сформулированы цели и задачи экспериментальных исследований, описаны конструктивные особенности стенда. Представлен состав аппаратурно-измерительной части. Разработана методика проведения экспериментальных исследований и приведены результаты с учетом погрешностей измерений. На основе сопоставления данных экспериментальных и теоретических исследований

сформулированы выводы об адекватности разработанных математических моделей динамики систем на стенде с беговыми барабанами.

Экспериментальные исследования проводились на стенде «Беговые барабаны» кафедры СМ-10 «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Стендовое оборудование представляет собой два беговых барабана диаметром 1350 мм, соединенных жесткой осью. На оси установлен дисковый четырехпоршневой гидравлический тормоз оригинальной конструкции. Объектом испытаний является автомобиль УАЗ-3741.

Автомобиль фиксируется на беговых барабанах за прицепное устройство с помощью штанги с динамометром  $P_3$ , которая жестко закреплена на основании стенда. С помощью динамометра регистрируется значение крюковой нагрузки. Для измерения крутящего момента, создаваемого на беговых барабанах, используется рычажное шарнирное соединение тормозного механизма с основанием стенда.

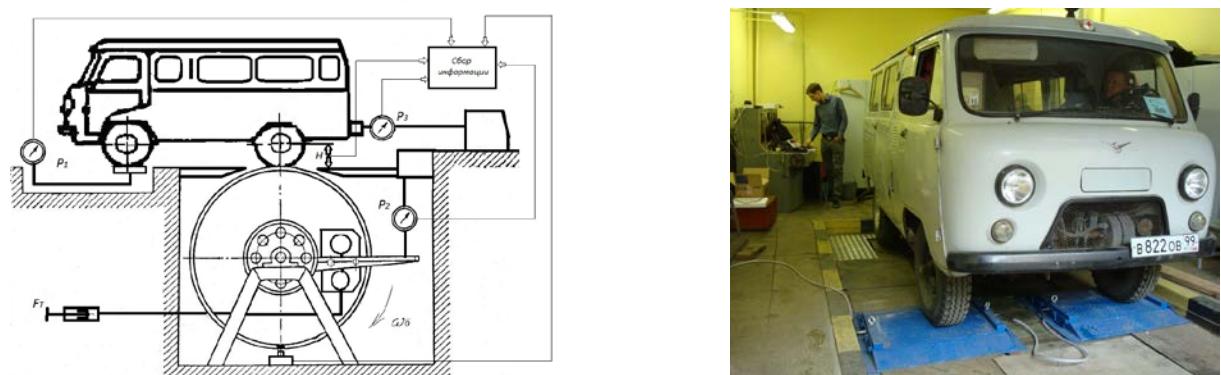


Рис. 15. Общие виды объекта исследований

Зарегистрированные экспериментальные и теоретические данные были проверены на принадлежность к одной генеральной совокупности, подверглись математической, статистической и сравнительной обработке, на основании чего были сделаны выводы об адекватности предложенной модели динамики автомобиля на стенде с беговыми барабанами.

#### Сравнение результатов расчетных и экспериментальных данных

Таблица 1

	1-я передача		2-я передача		3-я передача			4-я передача	
$h$	0,4	1	0,4	0,2	0,6	1	0,5	1	
$P_1$	экспериментальные значения								
	1030	940	1020	1075	1040	1010	995	1000	
$P_3$	теоретические значения								
	1120	990	1050	1200	1150	1060	1020	1030	
$V$	экспериментальные значения								
	146	400	153	89	198	294	190	210	
	теоретические значения								
	155	420	160	94	205	312	200	215	
	экспериментальные значения								
	15	34	17	22	40	42	45	70	
	теоретические значения								
	17	38	19	24	43	47	50	73	

Сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований позволила сделать вывод об адекватности предложенной модели и пригодности её при решении различных задач, связанных с динамикой колесных машин на стендах с имитацией качения движителей по опорной поверхности. Относительное расхождение результатов по следующим основным показателям составляет: по силе на крюке  $P_3$  - 8%; по нагрузке на переднюю ось  $P_1$  - 7%; по угловой скорости вращения барабана - 12%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработаны математические модели динамики одиночного колеса при различных режимах качения и автомобиля с колесной формулой 8×8 на стенде с беговыми барабанами. Особенностями модели динамики полноразмерного автомобиля являются: возможность изменения характеристик взаимодействия пары «движитель-беговой барабан»; вариативность при моделировании силовой установки и системы привода в целом; возможность реализации различных законов и алгоритмов в модели управления стендом.

2. Сравнением результатов имитационного моделирования и натурных экспериментов доказана адекватность разработанной математической модели динамики автомобиля на стенде с беговыми барабанами во всем скоростном диапазоне исследований с точностью, приемлемой для решения задач, связанных с отработкой законов управления стендом. Относительная погрешность по основным показателям не превышает 12%;

3. Разработаны методы проведения экспериментальных исследований колесной техники на стенах с беговыми барабанами, позволяющие имитировать реальные дорожные эксплуатационные условия при различных схемах трансмиссии. Реализация нагрузок, соответствующих дорожным условиям, на стенде достигается за счет изменяемого крутящего (либо тормозного) момента на каждом беговом барабане. Критерием для изменения момента на каждом беговом барабане является либо приводной момент на каждом колесе автомобиля в случае индивидуального привода, потребный для обеспечения движения в заданных дорожных условиях, либо суммарный приведенный к колесу момент сопротивления при блокированной и дифференциальной схеме. Новые математические модели и методы испытаний являются составными частями разработанной технологии экспериментальных исследований колесных транспортных средств на стенах с имитацией качения движителей по опорной поверхности.

4. С помощью имитационного математического моделирования динамики автомобиля с колесной формулой 8×8 на стенде с беговыми барабанами доказана работоспособность и эффективность разработанных методов имитации реальных дорожных эксплуатационных условий при различных схемах трансмиссии.

5. Сформулированы рекомендации по практической реализации метода имитации дорожных условий при испытаниях автомобилей с блокированной и дифференциальной связью в трансмиссии на стенах с беговыми барабанами в виде последовательности действий (методики), которой

должны придерживаться инженерные службы при проведении экспериментальных исследований.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. Захаров А.Ю., Горелов В.А., Котиев Г.О. Исследование динамики колесных машин на стенде с беговыми барабанами // Автомобильная промышленность. №7. 2014 г. М.: Машиностроение. С. 9-12.
2. Захаров А.Ю., Горелов В.А., Котиев Г.О. Имитационное моделирование динамики прямолинейного движения колесной машины на стенде «Беговые барабаны» [Электронный ресурс] // Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». 2014. Выпуск DOI:10.7463/0414.0707918 – Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/707918.html>, свободный. 2015 г.
3. Захаров А.Ю., Котиев Г.О., Горелов В.А. Метод оценки тягово-динамических свойств автомобиля с колесной формулой 8×8 и индивидуальным приводом движителей на стенде «Беговые барабаны» // Известия МГТУ «МАМИ». 2015. №1(23), Т.1. С. 14-24.
4. Захаров А.Ю. Алгоритм управления привода стендом «Беговые барабаны» для испытаний колесных транспортных средств // Сб. докл. научно-техн. конф. «Вычислительные системы реального времени». ОАО Концерн «Моринсис-Агат». М., 2014. С. 277.