

На правах рукописи

Путов Антон Викторович

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОБИЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ
КОМПЛЕКС ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ
СВОЙСТВ АЭРОДРОМНЫХ И АВТОДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель -
кандидат технических наук, доцент Шелудько Виктор Николаевич

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Лохин Валерий Михайлович
кандидат технических наук, доцент Яковенко Николай Григорьевич

Ведущая организация - государственное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»

Защита диссертации состоится «__» декабря 2010г. в ____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «__» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
Д 212.238.05
к.т.н., доцент

М.П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Несовершенство существующего мирового парка мобильных средств непрерывного контроля фрикционных свойств аэродромных и автодорожных покрытий в экстремальных погодных условиях, с одной стороны, и необходимость обеспечения гарантированной безопасности посадки воздушных судов и надежного торможения наземных транспортных средств в условиях все возрастающих требований к их безопасности, расширение самолетного и автомобильного парков и повышение интенсивности авиа- и автоперевозок, с другой стороны, предъявляют высокие требования к созданию точных, высокоэффективных, оперативных, универсальных и отвечающих самым современным международным требованиям автоматизированных мобильных комплексов измерения фрикционных свойств аэродромных и автодорожных покрытий.

В области методов средств измерения фрикционных свойств покрытий наиболее востребованной сегодня является техника предпосадочного оперативного контроля покрытий аэродромов гражданской авиации, так как от состояния взлетно-посадочных полос зависит благополучная посадка пассажирских воздушных судов, а значит, здоровье и жизнь одновременно десятков и даже сотен людей.

Предпосадочное измерение свойств сцепления поверхности покрытий с колесами воздушных судов при их торможении на посадке осуществляется в настоящее время в аэропортах всего мира прокаткой по полосе с задаваемым кинематически постоянным скольжением измерительных колес с помощью мобильных (буксируемых или самоходных) установок аэродромного и дорожного обслуживания. Во всем мире техническая эволюция устройств такого назначения преодолела большой путь, начав со сравнительно простых деселерометров и громоздких неуклюжих машин диагонального торможения, и остановившись на современных самоходных или буксируемых установках, осуществляющих непрерывную прокатку измерительных колес. При этом во всех современных мобильных установках, представленных сегодня на международном рынке наземных средств обслуживания аэродромов гражданской авиации, измерительное колесо кинематически связывается с транспортными (ведущими) колесами мобильной установки с помощью редуктора, чем обеспечивается его принудительное торможение с постоянным скольжением, равным, например, 0,1. Предполагается, что такому значению скольжения соответствуют действительные режимы торможения колес воздушного судна на посадке. Однако ни пилоты не могут, ни автоматы торможения колес не позволяют обеспечить режимы торможения колес с постоянным значением скольжения, поэтому расчеты прогнозируемых величин тормозного пути, опирающиеся на результаты измерений в таких установках, могут значительно отличаться от истинных величин, тогда как просчеты здесь недопустимы, так как могут привести к аварии самолета при посадке и гибели людей.

Мировым лидером разработки мобильных установок, реализующих принцип механического подтормаживания измерительного колеса с постоянным скольжением, является шведская компания ASFT (Airport Surface Friction Tester). Мобильные установки этой компании используют более 200 аэропортов Европы и Америки. Все установки ASFT содержат бортовой контроллер, принтер, панель управления, монитор, электрогидравлический подъемный механизм измерительного колеса с системой, обеспечивающей постоянное давление прижима его к покрытию, датчики момента трения, положения измерительного колеса и пройденного расстояния. Все установки снабжены современной компьютерной системой обработки информации и системами радиопередачи данных в диспетчерскую службу аэропорта в режиме реального времени и являются, с точки зрения компьютерной автоматизации, наиболее современным воплощением указанного механического принципа подтормаживания. В мире существуют и другие разработки систем измерения коэффициентов сцепления с поверхностью, реализующие принцип механического подтормаживания измерительного колеса с постоянным скольжением. Таковы, например, ус-

тановка SFT5041 (SFT 5042) американской компании ICC - International Cybernetics Corporation или аналогичная установка английской компании Tradewind Scientific типа Grip Tester, а также установка Mu-Meter английской компании Specialist Electronic Services, все состоящие из трехколесной буксируемой тележки, оборудованной электронной измерительной системой, которая управляется компьютером. Широко используется в мире буксируемая установка измерения модели Skidometer BV 11, выпускаемая финской компанией «Patria Industries Oyj». Она также снабжена современной компьютерной системой обработки данных, легка в использовании наземным персоналом и надежна в обслуживании. На российских аэродромах гражданской авиации уже более 30 лет находится единственное национальное средство измерения коэффициента сцепления - буксируемая аэродромная тормозная тележка АТТ-2, представляющая собой простую реализацию принципа механического подтормаживания в виде двухколесного прицепа с ведущим и измерительными колесами разных диаметров, чем и обеспечивается постоянное скольжение измерительного колеса относительно ведущего, равное отношению разности диаметров колес к большему диаметру ведущего колеса. Тензометрические измерения значений коэффициента сцепления в АТТ-2 усиливаются и регистрируются стрелочным прибором и вручную заносятся в протокол оператором, который следит за его показаниями. Очевидно, что такая установка в настоящее время уже не удовлетворяет международным стандартам, глубоко морально устарела и требует замены. Компания «АвтоВАЗ» пыталась освоить возникшую отечественную нишу, разрабатывая измеритель сил трения «Лада-Аэро», в основе своей копирующий продукцию ASFT и устанавливаемый на автомобиле ВАЗ-2108, но так и не приступила к его серийному производству.

Цель диссертационной работы – создание, исследование и практическая реализация автоматизированного мобильного электромеханического комплекса для непрерывного измерения коэффициента сцепления аэродромных и автодорожных покрытий, осуществляемого путем прокатки измерительного (транспортного) колеса с одновременным торможением с помощью автоматически управляемого электромеханического устройства.

В диссертационной работе ставятся и решаются следующие задачи:

1. Разработать управляемое электромеханическое устройство торможения (ЭМУТ) измерительного (транспортного) колеса, применяемое в создаваемом мобильном комплексе для измерения коэффициента сцепления.
2. Разработать математическую модель динамических процессов торможения колеса в рамках ЭМУТ, учитывающую срывной характер процесса торможения измерительного колеса, обусловленный нелинейными упругими свойствами пневматика и особенностями характеристики сухого трения.
3. Разработать адаптивную систему автоматического управления ЭМУТ колеса, обеспечивающую возможность приблизить режимы торможения измерительного колеса к реальным режимам торможения транспортных колес в условиях неопределенности параметров, действия нелинейностей и внешних возмущений.
4. Разработать эскизную компоновку конструкции мобильного электромеханического комплекса в виде буксируемой установки.
5. Разработать схемотехническое, алгоритмическое и программное обеспечение адаптивной системы автоматического управления ЭМУТ, реализованной на базе средств силовой электроники и микроконтроллера в виде бортового электрошкафа управления.
6. Разработать функциональную схему, алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной информационно-управляющей системы мобильного электромеханического комплекса, реализованной в виде переносного компьютерного пульта управления и индикации на базе промышленного компьютера.
7. Разработать методику поверочного метрологического обслуживания мобильного электромеханического комплекса как измерительного средства и программное и аппаратное обеспечение ее реализации в виде переносного калибровочного стенда.

Методы исследования. Основные теоретические и прикладные результаты работы получены в рамках методов электротехники, электромеханики и электроники; беспойсковых методов построения адаптивных систем управления нелинейными динамическими объектами, базирующихся на их приближенных с мажорирующими функциями математических моделях; алгебраических методов теории систем; методов аналитической механики, уравнений Лагранжа и малых колебаний упругих систем; численных методов интегрирования дифференциальных уравнений; компьютерных методов исследования (моделирования) на базе стандартных программных продуктов; методов программирования на языках различных уровней; методов проектирования, конструирования и экспериментального исследования макетов, экспериментальных и опытных образцов электронных и микроконтроллерных плат, механических конструкций; методик сертификационных испытаний аэродромной техники.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Функциональные схемы управляемых электромеханических устройств торможения (ЭМУТ) измерительного (транспортного) колеса, построенных на базе управляемых электрических машин и преобразователей энергии торможения.
2. Математическая модель динамических процессов электромеханического торможения колеса с пневматической шиной.
3. Адаптивная система автоматического управления процессами электромеханического торможения (скольжения) колеса, построенная на основе предложенной математической модели.
4. Эскизная конструкторская проработка мобильного электромеханического комплекса в виде буксируемой электромеханической установки (тележки) (БЭТ),
5. Алгоритмическое, программное и схемотехническое обеспечение реализации адаптивной системы автоматического управления ЭМУТ на базе микроконтроллера и средств силовой электроники.
6. Алгоритмическое, программное и схемотехническое обеспечение реализации автоматизированной информационно-управляющей системы мобильного электромеханического комплекса на базе промышленного компьютера.
7. Методика метрологического обслуживания (калибровки) мобильного электромеханического комплекса и ее программная и аппаратная реализация.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Управляемые электромеханические устройства торможения колеса разработаны на базе электромеханического каскада из двух электрических машин постоянного тока и на базе синхронной электрической машины переменного тока с динамическим торможением.
2. Математическая модель динамических режимов торможения колеса с ЭМУТ учитывает одновременно упругие свойства пневматической шины и главную особенность характеристики сухого трения, имеющей резко падающий участок в начале скольжения обода шины по поверхности покрытия (эффект Штрибека), обуславливающие вместе сдвиг максимальных значений срывной силы сухого трения в область ненулевых значений скольжения.
3. Адаптивная система автоматического управления торможением (скольжением) измерительного (транспортного) колеса с ЭМУТ построена по структуре прямой беспойсковой системы с параметрической настройкой, причем в закон адаптивного управления и алгоритмы настройки его параметров дополнительно введены специальные функции, приближенно учитывающие нелинейный характер упругих деформаций пневматика и сухого трения, а реализация системы в условиях недоступности измерения упругих деформаций пневматика обеспечивается наблюдателем состояния.
4. Эскизная конструкторская проработка мобильного комплекса в виде буксируемой электромеханической установки как средства непрерывного измерения коэффициента сцепления определяет облик нового мобильного комплекса с управляемым электромеха-

ническим прокатыванием измерительного колеса и является основой разработки конструкторской документации для его серийного освоения.

5. Комплексное алгоритмическое, программное и схемотехническое обеспечение реализации в реальном времени адаптивной системы автоматического управления торможением (скольжением) колеса с ЭМУТ является неотъемлемой частью любых модификаций создаваемого мобильного комплекса и защищено как объект интеллектуальной собственности.

6. Комплексное алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной информационно-управляющей системы, осуществляющей полную автоматизацию процессов управления, измерения и компьютерной обработки результатов, их визуализацию и протоколирование, определение текущего маршрута движения мобильного комплекса по GPS-приемнику и его визуализацию на электронной карте аэродрома, формирование и передачу по GSM-каналу компьютерной экспертной информации на электронные табло автомагистралей или на диспетчерский пункт аэродрома для принятия решения о посадке подлетающего воздушного судна, является неотъемлемой частью любых модификаций создаваемого мобильного комплекса и защищено как объект интеллектуальной собственности.

7. Методика калибровки и ее программное и аппаратное обеспечение являются основой для разработки серийных средств метрологического обслуживания мобильных комплексов различной конструкции и защищены как объект интеллектуальной собственности.

Обоснованность и достоверность полученных научных и практических результатов. Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы в построении управляемых ЭМУТ, математической модели и адаптивной системы управления процессами торможения измерительного (транспортного) колеса с ЭМУТ обуславливается корректным применением перечисленных выше методов исследования. Достоверность результатов работы по созданию схемотехнического, алгоритмического и программного обеспечения мобильного комплекса подтверждается результатами разработки и отладки электрошкафа управления бортовым микроконтроллером и компьютерного пульта управления и индикации с промышленным контроллером, макетной отладки электронных схем силовой и управляющей электроники ЭМУТ, многоэтапными аэродромными сертификационными испытаниями опытных образцов мобильного электромеханического комплекса по утвержденным методикам Межгосударственного авиационного комитета, завершившимися выдачей Сертификата государственного образца, лицензии на серийный выпуск сертифицированной типовой конструкции комплекса и Свидетельства о государственной регистрации комплекса как измерительного средства для аэродромов гражданской авиации РФ.

Практическая ценность состоит в следующем: результаты диссертационной работы по созданию мобильного электромеханического комплекса, состоящего из ЭМУТ измерительного колеса с адаптивной системой управления процессами торможения, реализованными на базе синхронной электрической машины переменного тока и средств силовой и управляющей электроники в виде бортового электрошкафа (ЭШУ) управления, автоматизированной информационно-управляющей системы, реализованной на базе промышленного компьютера ТРС 1260Н в виде переносного компьютерного пульта управления и индикации (ПУИ), механической конструкции, реализованной в виде буксируемой установки, выполненной на базе переднего моста шасси серийного автомобиля «Нива-Chevrolet», и средств метрологического обслуживания мобильного комплекса как аэродромного измерительного оборудования, реализованного в виде переносного калибровочного стенда с программным управлением, послужили основой для разработки полного комплекта конструкторской документации и программного обеспечения; совместно с холдинговой компанией «Созвездие Водолея» созданы три идентичных опытных образца комплекса, проведены государственные сертификационные летние и зимние испытания, по результатам которых выданы сертификат типа № 483 Межгосударственным авиационным комитетом (25.06.2009 г.) и лицензия № 005574-ИР от 10.06.2009 г. на серийный вы-

пуск Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии Министерства промышленности и торговли РФ, а также получено Регистрационное удостоверение № 224-06-2009 о включении комплекса в государственный «Перечень специальных средств измерений гражданской авиации РФ» Федерального агентства воздушного транспорта «РОСАВИАЦИЯ» Министерства транспорта РФ. Разработка защищена патентом № 2369856 от 10.10.2009, а программное обеспечение – свидетельствами об официальной регистрации № 2007613124 от 20.12.2007, № 2009610238 от 11.01.2009, № 2010615788 от 07.09.2010.

Реализация результатов работы. Теоретические положения и практические результаты диссертационной работы использованы в 19 НИР и НИОКР, выполненных при участии автора в течение 2001 – 2010 г.г., источниками финансирования которых являлись федеральный бюджет, гранты РФФИ, Правительства Санкт-Петербурга, министерства образования и науки, министерство обороны, внебюджетные средства. Разработка внедрена в серийное производство на предприятиях ОАО «Экспериментальный завод» Х/К «Ленинец» и научно-производственной компании «Созвездие» Х/К «Созвездие Водолея». В СПбГЭТУ в 2007 году при кафедре систем автоматического управления создана учебно-научная лаборатория «Мехатронные комплексы подвижных объектов и мобильные установки аэродромного обслуживания», в рамках которой созданы действующие образцы нескольких модификаций мобильных электромеханических комплексов и уникальный испытательный и метрологический стенд «с бегущей дорожкой», позволяющий имитировать прокатку измерительного колеса в лабораторных условиях, сертифицированы три программы переподготовки и повышения квалификации специалистов аэродромных служб по эксплуатации и обслуживанию мобильных электромеханических комплексов. Документы, подтверждающие внедрение, приведены в Приложении к диссертации.

Апробация работы. Основные теоретические и практические результаты диссертации были доложены и получили одобрение на 28 международных и всероссийских научно-технических конференциях, в том числе: на XIV международной конференции - выставке «Fourteenth Annual NASA Tire/Runway Friction Workshop» May 14-18, 2007, Wallops Flight Facility, VA, на XIV-XXI всероссийских научно-техн. конф. «Экстремальная робототехника» (2003 - 2010 годы, г. Санкт-Петербург), на IX-XIII межд. конф. и выставках «Современные методики контроля и восстановления искусственных покрытий аэродромов и автомобильных дорог» (2006 - 2010 годы, г. Санкт-Петербург), межд. научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах», Пенза, 2004 г., межд. научно-техн. конф. «Наука, образование и общество в XXI веке», (СПб, 2006 г.), Первой Российской мультikonференции по проблемам управления, (СПб, 2006 г.), конф. молодых ученых «Навигация и управление движением» (СПб, 2007 г.), межд. конф. по интегрированным навигационным системам (СПб, 2007), VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых (СПб, 2007), на 3-5 Всероссийских научно-техн. конф. «Мехатроника, автоматизация, управление» (2005-2007 г., г. Санкт-Петербург), на Третьей международной научно-практич. конф. «Дни науки – 2007» (2007 г., г. Днепропетровск), на международной научно-техн. конф. «Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники» (2007 г., г. Дивноморское); на внутривузовских научно-технических конференциях в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2005-2010 гг., а также на научных семинарах кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Публикации. Основные положения, теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 47 работах, среди которых 11 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, а также научно-методических работ в других изданиях - 4, докладов - 28. Основные положения выносимые на защиту защищены 1 патентом и 3 свидетельствами регистрации программ ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав с выводами, заключения, и практических рекомендаций. Она изложена на 149 страницах машинопис-

ного текста, включает 133 рисунка, 5 таблиц, 3 приложений и содержит список литературы из 121 наименования, среди которых 111 отечественных и 10 иностранных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность совершенствования методов и технических средств непрерывного контроля фрикционных свойств аэродромных и автодорожных покрытий, формулируются цель и задачи диссертации, излагаются основные научные результаты, выносимые на защиту, их научная новизна и практическая полезность, реализация результатов в НИР и НИОКР, вопросы внедрения разработки в состав оборудования аэродромов гражданской авиации РФ.

В первой главе анализируются современные требования к методам и технике обеспечения безопасности посадки воздушных судов, выработанные международными сообществами эксплуатантов аэропортов гражданской авиации и формулируемые в правилах международной или национальной сертификации измерительных средств. На основе анализа современного мирового рынка мобильных (буксируемых и встроенных в автомобиль) установок для непрерывного измерения (22 установки 13-ти наиболее известных компаний – производителей из шести ведущих стран мира – США, Великобритании, Швеции, Франции, Финляндии, Норвегии) делается вывод о неудовлетворительности распространенного в мировой практике непрерывного метода измерения коэффициента сцепления (КС) с постоянным скольжением и формулируется необходимость создания более совершенной технологии непрерывного измерения КС, базирующейся на применении нового метода измерения КС с **управляемым скольжением измерительного колеса**, что позволит в процессе измерения формировать режимы торможения измерительного колеса, приближающиеся к реальным режимам торможения колес шасси воздушных судов при посадке.

Во второй главе на основании литературного и патентного обзора формулируются основные требования к облику и техническим характеристикам современного полностью автоматизированного мобильного комплекса для непрерывного измерения КС аэродромных и дорожных покрытий и на основе наиболее современных и перспективных предложений и собственного опыта автора разрабатывается некий синтетический облик современного мобильного комплекса с управляемым электромеханическим устройством торможения (ЭМУТ), наиболее полно удовлетворяющего сегодняшним международным требованиям, изученным и обобщенным в первой главе. Дальнейший материал второй главы посвящен вопросам разработки автоматически управляемых ЭМУТ. Обсуждается сам способ электромеханического торможения измерительного колеса и обобщенная схема реализующего его устройства, выполненного на основе электрической машины как обратимого преобразователя механической и электрической энергии (в частности, работающей в режиме генератора), кинематически соединенной измерительным колесом и электрически связанной с обобщенным блоком преобразования энергии торможения (БПЭТ), и содержащего систему автоматического управления (САУ). Отмечается, что в способе и реализующем его обобщенном устройстве не уточняются вид и род тока электрической машины и не конкретизируются структуры БПЭТ и САУ, но введены все необходимые измерительные датчики и связи между блоками БПЭТ, САУ и электрической машиной, объединяющие их в обобщенную функциональную схему ЭМУТ. Далее показывается, как из построенной обобщенной функциональной схемы ЭМУТ, конкретизируя тип электрической машины, вид БПЭТ и структуры САУ, можно получать различные конкретные функциональные схемы ЭМУТ. В диссертации рассматриваются две структуры автоматически управляемых ЭМУТ, в разработке, исследовании и практической реализации которых автор принимал непосредственное участие:

- ЭМУТ, выполненного на основе двух электрических машин постоянного тока, включен-

ных по схеме электромеханического каскада взаимной нагрузки (вариант ЭМУТ-1) и - ЭМУТ, выполненного на основе трехфазной синхронной электрической машины переменного тока с индуктором на постоянных магнитах (вариант ЭМУТ-2).

Вариант ЭМУТ-1 (рис. 1) получен из обобщенной функциональной схемы выбором в качестве тормозного генератора (ТГ) машины постоянного тока с независимым возбуждением, а в качестве БПЭТ принята также машина постоянного тока с якорем, подключенным встречно-параллельно к якорю ТГ, кинематически соединенная с несущими колесами и играющая роль нагрузочного двигателя (НД) в электромеханическом каскаде, управляемом со стороны ее обмотки возбуждения. На рис. 1 введены обозначения: НК – несущие колеса мобильного комплекса; НД, ТГ – нагрузочный двигатель и тормозной генератор каскада; ОВД и ОВГ – обмотки возбуждения НД и ТГ; РЕД 1, 2 – редукторы; ИК – измерительное колесо; ДТТ, ДТВ, $ДС_{НК}$, $ДИ_{ИК}$ – датчики тока торможения, тока возбуждения, угловых скоростей НК и ИК; УУН – усилитель управляемого напряжения; БВР – блок вычисления разности; ИПН – источник постоянного напряжения; АКБ – аккумуляторная батарея; $F_{\text{торм}}$ – сила нормального нагружения ИК; $u_y(t)$ – управление, вырабатываемое САУ; П – программатор САУ. Второй вариант ЭМУТ-2 (рис. 2) получен из обобщенной схемы выбором в качестве ТГ синхронной электрической машины, включенной по схеме динамического торможения на нагрузочный реостат НР, выполняющий совместно с управляемым силовым электронным переключателем УЭП роль БПЭТ; В – выпрямитель трехфазного тока, остальные обозначения такие же, как на рис. 1. Подробно описана работа обоих устройств торможения и проведен сравнительный анализ их достоинств и недостатков по 13 показателям. Отмечается, в частности, что главным достоинством варианта ЭМУТ-1, является наиболее широкий диапазон регулирования скольжения S измерительного колеса

$$\text{а) } 0 \leq S < 1,0; \text{ б) } S \geq 1,0; \text{ в) } S < 0. \quad (1)$$

по сравнению с любыми другими возможными вариантами ЭМУТ, порождаемыми обобщенной функциональной схемой. В варианте ЭМУТ-1 возможна работа электрической машины, соединенной с измерительным колесом, не только в режиме тормозного генератора, обеспечивающего регулирование скольжения в поддиапазоне (а), но и можно прокатывать ИК «юзом» ($S=1,0$) и вращать его в направлении, противоположном вращению нагрузочных колес ($S>1,0$), когда НД также переходит в режим генератора, а также вращать ИК с опережением вращения нагрузочных колес ($S<0$), когда тормозной генератор переходит в двигательный режим. Конечно, поддиапазоны б) и в) не являются востребованными при измерениях, но режим работы «юзом» необходим при исследованиях тормозных режимов транспортных колес. Однако главный недостаток варианта ЭМУТ-1 – эксплуатационная уязвимость коллектора и щеточных узлов - делает его весьма ненадежным и мало практичным в условиях эксплуатации на аэродромах и трассах в экстремальных погодных условиях и в агрессивных средах, создаваемых хим.реагентами, поэтому в работе отдается предпочтение (с точки зрения реализации), варианту ЭМУТ-2, лишенному этого недостатка, хотя он и обладает ограниченным диапазоном регулирования скольжения ($0 \leq S \leq 0,4 \div 0,8$), впрочем, вполне удовлетворяющим требованиям к режимам измерений, предъявляемым эксплуатационной практикой.

В третьей главе рассматриваются вопросы разработки математической модели, описывающей в форме дифференциальных уравнений динамические процессы торможения измерительного колеса в рамках предлагаемых ЭМУТ. В построении математической модели рассматриваются, в первую очередь, такие существенные факторы, проявляющиеся при торможении колес с пневматической шиной по сухим и влажным искусственным аэродромным и дорожным покрытиям, как нелинейные упругие свойства пневматика и

явление сухого трения, характеризуемого при начале пробуксовки колес ($S=0+0$) круто спадающим участком зависимости силы трения от величины скольжения трущихся поверхностей (так называемым эффектом Штрибека). Кроме того, учитываются крутильные упругие деформации и зазоры трансмиссии (редуктора или цепной передачи) .

На рис. 3 показана расчетная кинематическая схема подвески тормозящего измерительного колеса с ЭМУТ, учитывающая нелинейные упругие свойства пневматика и трансмиссии. Для учета упругих деформаций введены условные вращательные моменты инерции: J - обода шины, соприкасающейся с покрытием; $J_{ст}$ - ступицы с частью шины и трансмиссии и $J_{тг}$ - ротора тормозного генератора с другой частью трансмиссии, соединенные невесомыми упругими связями с коэффициентами упругости пневматика $p_{пн}$ и трансмиссии $p_{тр}$; зазор 2δ , соответствующие угловые скорости $\omega_{об}$, $\omega_{ст}$, $\omega_{тг}$; $M_{тр}$ - момент трения, $V_{лин}$ - линейная скорость осей подвески.

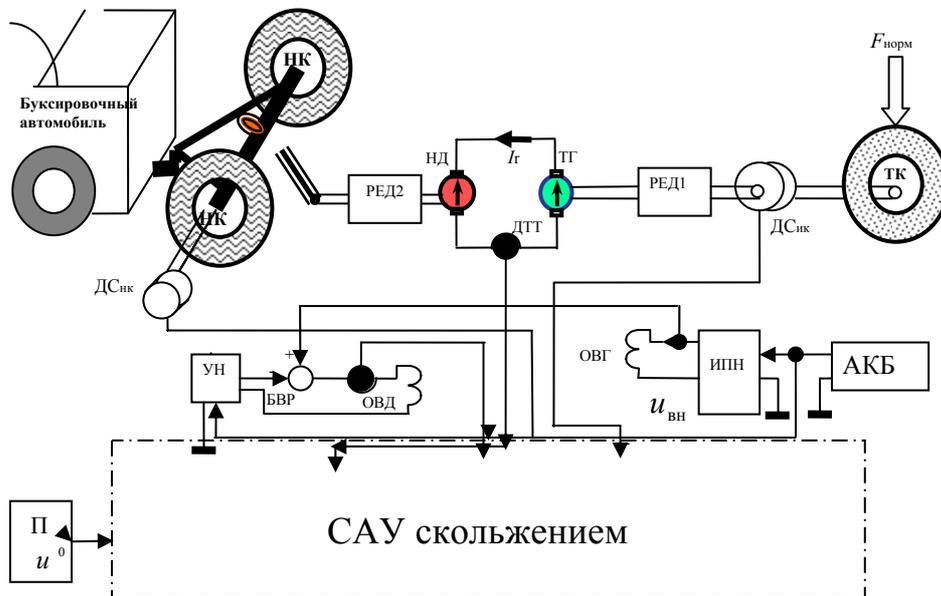


Рис. 1. Автоматически управляемое электромеханическое устройство торможения, выполненное на базе двух встречно включенных электрических машин постоянного тока (вариант ЭМУТ-1)

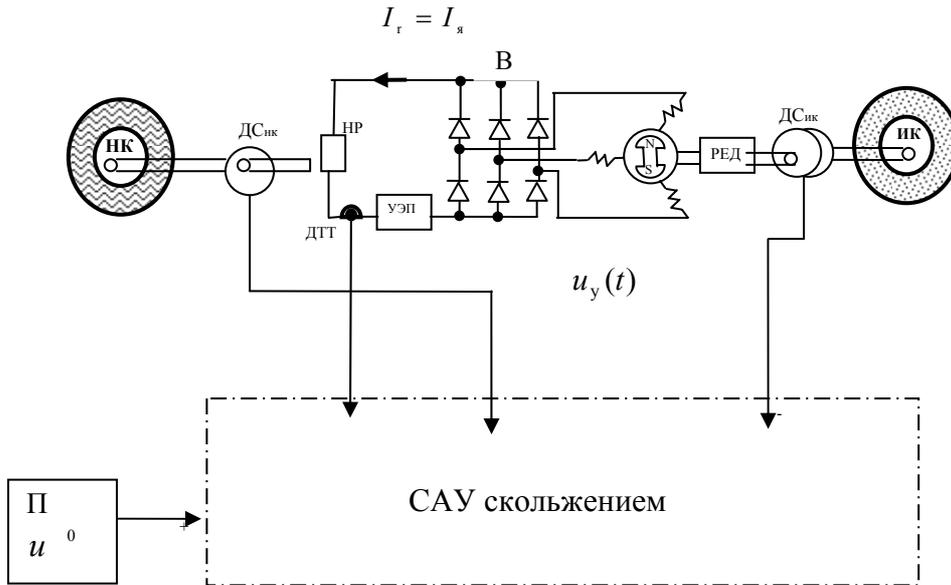


Рис. 2. Автоматически управляемое электромеханическое устройство торможения, выполненное на базе синхронного генератора с постоянными магнитами, включенного по схеме управляемого динамического (реостатного) торможения (вариант ЭМУТ-2)

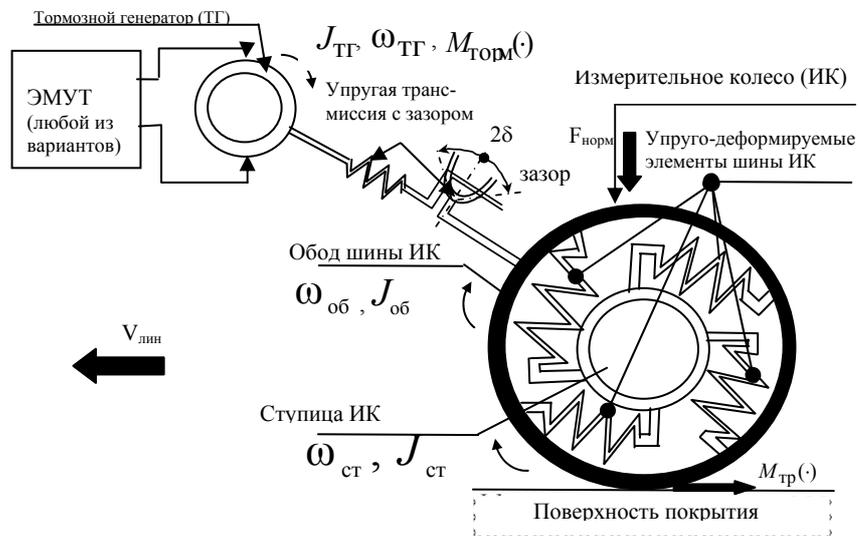


Рис. 3. Кинематическая схема подвески электромеханического торможения измерительного колеса, учитывающая упругие свойства шины и трансмиссии

Дифференциальные уравнения, описывающие динамику электромеханического торможения транспортного колеса с пневматической шиной, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{S}_{об} &= -(J_{об} V_{лин})^{-1} R_{ик} (m_{y2} - M_{тр}(\cdot)); \\
 (\dot{\omega}_{об} &= J_{об}^{-1} (m_{y2} - M_{тр}(\cdot)); \\
 \dot{m}_{y2} &= p_{пн} (\omega_{ст} - \omega_{об}); \\
 \dot{\omega}_{ст} &= J_{ст}^{-1} (f_{y1} - m_{y2}); \\
 \dot{m}_{y1} &= p_{тр} (\omega_{тг} - \omega_{ст}); \\
 \dot{\omega}_{тг} &= -J_{тг}^{-1} f_{y1} + J_{тг}^{-1} M_{торм}(\cdot); \\
 f_{y1} &= \begin{cases} m_{y1} - p_{ст} \delta, & \text{если } m_{y1} \geq p_{ст} \delta; \\ 0, & \text{если } |m_{y1}| < p_{ст} \delta; \\ m_{y1} + p_{ст} \delta, & \text{если } m_{y1} \leq -p_{ст} \delta. \end{cases} \\
 \dot{M}_{торм} &= \frac{k_M}{L_{я}} (k_e \omega_{тг} - R_{\Sigma} I_T - U_{уЭП}); \\
 U_{уЭП} &= k_{уЭП} \cdot u_T, u_T = \beta_T \cdot (u_S - k_T \cdot I_T), u_S = \beta_S \cdot (u_{\Sigma} - k_S \cdot S_{тг}) \\
 S_{тг} &= \frac{\omega_{об} - \omega_{тг}}{\omega_{об}}; S_{ст} = \frac{\omega_{об} - \omega_{ст}}{\omega_{об}}; S_{об} = \frac{\omega_{об} - \omega_{об}}{\omega_{об}}; \omega_{об} = V_{лин} R_{ик}^{-1}; \\
 M_{тр}(\cdot) &= m_f (M_3 \cdot \exp(-M_2 \cdot S_{об}) + M_1 \cdot S_{об} + M_0) \\
 M_0 &= \mu_{min}, M_1 = \mu_{blok} - \mu_{min}, M_2 = \frac{d}{S_{min}}, M_3 = \mu_{max} - \mu_{min}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь m_{y1}, m_{y2} - упругие моменты; $\omega_{об}, S_{об}, \omega_{ст}, S_{ст}, \omega_{тг}, S_{тг}$ - угловые скорости и скольжения соответствующих дисков; $M_{тр}(\cdot)$ - момент трения скольжения; f_{y1} - нелинейная функция, учитывающая влияние зазора; $M_{торм} = k_M I_T$; I_T - ток торможения; $k_M, k_e, k_T, \beta_T, \beta_S, m_f$ - расчетные коэффициенты; $R_{ик}$ - радиус ИК; $M_{тр}(\cdot)$ описывается уравнением аналитической характеристики сухого, полусухого и жидкостного трения; где μ_{max} - момент страгивания; μ_{min} - минимум характеристики $M_{тр}(\cdot)$; S_{min} - значение $S_{об}$, соответствующее μ_{min} ; μ_{blok} - значение момента трения («юза») при $S_{об} = 1,0$; d - коэффициент, определяющий крутизну кривой в зоне эффекта Штрибека ($d = 1 \div 100$); $L_{я}, R_{\Sigma}$ - индуктивность и сопротивление цепи выпрямленного тока

I_T ; $U_{уэп}$ - управляемое напряжение цепи I_T ; $k_{уэп}$ - коэффициент скважности включения-выключения цепи тока торможения; u_T, u_s - сигналы контурных регуляторов САУ; $u_\Sigma = u^0 + u_{л}u_a$; u^0 - программное, $u_{л}, u_a$ - адаптивное управления ($u_{л}, u_a$ подлежат определению в рамках САУ).

В работе отмечается, что **одновременный** учет упругих деформаций пневматика и срывного эффекта в аналитической характеристике сухого трения в рамках построенной математической модели (2) динамики торможения пневматического колеса позволяет автоматически (в отличие, например, от известных параметризованных уравнений ЛуГре) учесть присущие упругому пневматику с сухим трением явления сдвига максимума силы страгивания (момента страгивания) из точки $S = 0$ (+0) в область малых положительных значений $S > 0$. Заметим, что это явление сдвига максимума срывной силы сухого трения, принятое в научно-техническом обиходе за несомненное, вряд ли может быть достоверно изучено экспериментальным путем в силу невозможности получить установившиеся режимы в точках, соответствующих ниспадающему участку зависимости силы трения от скольжения.

В четвертой главе кратко излагаются необходимые сведения по методике построения беспоисковых адаптивных систем управления с параметрической настройкой и специально вводимыми мажорирующими функциями для нелинейных динамических объектов, допускающих неопределенность не только числовых параметров, но и вида нелинейных характеристик, строятся адаптивные системы управления электромеханическим торможением колеса в рамках построенных вариантов ЭМУТ с учетом динамики электромагнитных процессов в ЭМУТ и нелинейных и упругих свойств пневматика и трансмиссии.

Так для математической модели вида (2) как объекта управления его вектор состояния содержит шесть переменных: $\mathbf{x} = (M_{\text{торм}}, \omega_{\text{об}}, m_{y2}, \omega_{\text{ст}}, m_{y1}, \omega_{\text{тг}})^T$,

причем неопределенными являются следующие параметры и функциональные зависимости $J_{\text{об}}(\cdot)$; $J_{\text{ст}}$; $p_{\text{тр}}$; $p_{\text{пн}}(\cdot)$; δ ; $M_{\text{тр}}(\cdot)$, а переменные состояния $\omega_{\text{об}}, m_{y2}, \omega_{\text{ст}}, m_{y1}$ недоступны измерению с помощью датчиков, поэтому уравнения адаптивной системы управления торможением колеса с ЭМУТ-2, записанные для краткости с помощью векторов и матриц соответствующих размерностей, будут содержать:

а) идентификатор состояния шестого порядка вида

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_0 \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{l} \mathbf{c}^T (\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}) + \mathbf{b}_0 u_\Sigma ; \quad (3)$$

б) модальное управление по вектору оценки $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{M}_{\text{торм}}, \hat{\omega}_{\text{об}}, \hat{m}_{y2}, \hat{\omega}_{\text{ст}}, \hat{m}_{y1}, \hat{\omega}_{\text{тг}})^T$ вида

$$u_{л} = \mathbf{k}^T \hat{\mathbf{x}} = k_1 \hat{M}_{\text{торм}} + k_2 \hat{\omega}_{\text{об}} + k_3 \hat{m}_{y2} + k_4 \hat{\omega}_{\text{ст}} + k_5 \hat{m}_{y1} + k_6 \hat{\omega}_{\text{тг}} ; \quad (4)$$

в) эталонную модель в «физических переменных» вида

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{M}} &= \mathbf{A}_{\mathbf{M}}\mathbf{x}_{\mathbf{M}} + \mathbf{b}_{\mathbf{M}}u_{\mathbf{S}}^0, \\ \mathbf{A}_{\mathbf{M}} &= \mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0\mathbf{k}^T, \\ \mathbf{x}_{\mathbf{M}} &= (M_{\text{ТОРМ}}^M, \omega_{\text{ОБ}}^M, m_{y2}^M, \omega_{\text{СТ}}^M, m_{y1}^M, \omega_{\text{ТГ}}^M)^T;\end{aligned}\quad (5)$$

г) адаптивное управление вида

$$u_a(t) = \mathbf{k}_{\mathbf{A}}^T(t) \mathbf{diag}\{f_p(\hat{x}_r)\}_1^6 \hat{\mathbf{x}} + k_b(t)u_{\mathbf{S}}^0(t) \quad (6)$$

с алгоритмами параметрической настройки

$$\left. \begin{aligned}\dot{\mathbf{k}}_{\mathbf{A}}(t) &= -\gamma_a \delta(\hat{\mathbf{e}}) \hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{diag}\{f_p(\hat{x}_r)\}_1^6 - \lambda_a \mathbf{k}_{\mathbf{A}}(t); \quad r = \overline{1, 6}, \\ \dot{k}_b(t) &= -\gamma_b \delta(\hat{\mathbf{e}}) u_{\mathbf{S}}^0(t) - \lambda_b k_b(t),\end{aligned}\right\} \quad (7)$$

где $\delta(\hat{\mathbf{e}}) = \mathbf{b}_{\mathbf{M}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{e}}$; $\hat{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{\mathbf{M}}$, а мажорирующие функции, содержатся в диагональной матрице вида

$$\mathbf{diag}\{f_p(\hat{x}_r)\}_1^6 = \mathbf{diag}\{1, \hat{I}_{\text{ВД}}^p, \hat{\omega}_{\text{ОБ}}^p, \hat{m}_{y2}^p, 1, \hat{m}_{y1}^p, 1\} \quad (8)$$

Здесь: \mathbf{c} – вектор измерений; \mathbf{l}, \mathbf{k} – векторы обратных связей наблюдателя и модального регулятора; $\mathbf{A}_0, \mathbf{b}_0$ – матрицы состояния и входа объекта (2) с некоторыми усредненными (номинальными) параметрами электромеханической системы торможения; $\mathbf{A}_{\mathbf{M}}, \mathbf{b}_{\mathbf{M}}$ – матрицы эталонной модели, $\mathbf{A}_{\mathbf{M}}$ – гурвицева; $\mathbf{k}_{\mathbf{A}}, k_b$ – настраиваемые параметры (матрица-строка и скаляр) адаптивного управления (6), \mathbf{P} – матрица – решение уравнения Ляпунова вида

$$\mathbf{A}_{\mathbf{M}}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_{\mathbf{M}} = -\mathbf{G}. \quad (9)$$

В пятой главе излагается методика расчета адаптивных систем управления электромеханическим торможением измерительного колеса, проиллюстрированная примером расчета адаптивной системы вида (2) – (8), и проводится ее математическое моделирование с помощью визуальной системы Simulink. На рисунках 4 - 9 показаны некоторые результаты моделирования адаптивной системы (2) – (8) при учете упругости пневматика (и при пренебрежении упругими свойствами трансмиссии).

На каждом из рисунков 4 - 9 показаны графики процессов торможения (скольжения $S(t)$) колеса при реакции на ступенчатое входное воздействие $u_{\mathbf{S}}^0 = 0.1$; ($S^0 = 0,1$) при постоянном (кривая 1) и срывном (кривая 2) характере момента трения ИК с упругим пневматиком и сухим трением и при условии, что установка движется по гладкой однородной поверхности с коэффициентом сцепления $\mu = 0.7$ (сухой асфальт) для следующих случа-

ев:

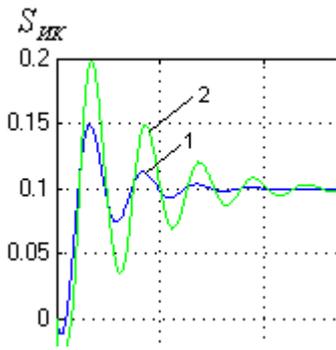


Рис. 4. Результаты моделирования в неадаптивной системе с подчиненным управлением и усредненными параметрами $J_{ТГ}^0, p_{ПН}^0$

1. В неадаптивной системе с подчиненным управлением и усредненными параметрами $J_{ТГ}^0, p_{ПН}^0$ (рис. 4).

2. В неадаптивной системе с модальным управлением и усредненными (номинальными) параметрами (рис. 5).

3. В неадаптивной системе с модальным управлением: при изменении упругости пневматика в четыре раза $p_{ПН} = 0,25p_{ПН}^0$ (рис. 6) и при изменении момента инерции присоединенных масс к измерительному колесу в четыре раза ($J_{ТГ} = 4J_{ТГ}^0$) (рис. 7).

4. В адаптивной системе: при изменении упругости в четыре раза ($p_{ПН} = 0,25p_{ПН}^0$) (рис. 8) и при изменении момента инерции присоединенных масс к ИК в

четыре раза ($J_{ТГ} = 4J_{ТГ}^0$) (рис. 9)

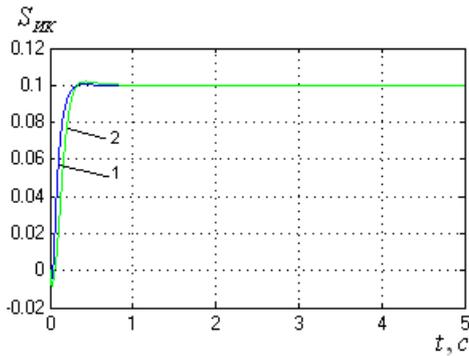


Рис. 5. Результаты моделирования в неадаптивной системе с модальным управлением и усредненными параметрами

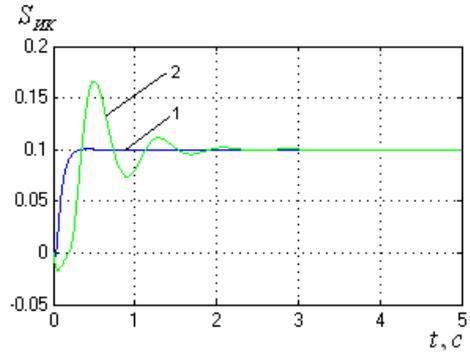


Рис. 6. Результаты моделирования в неадаптивной системе с модальным управлением: при изменении упругости пневматика в четыре раза $p_{ПН} = 0,25p_{ПН}^0$

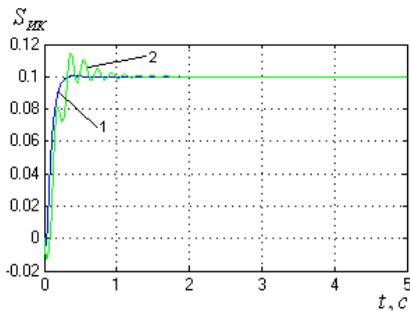


Рис. 7. Результаты моделирования в неадаптивной системе с модальным управлением: при изменении момента инерции присоединенных масс к измерительному колесу в четыре раза ($J_{ТГ} = 4J_{ТГ}^0$)

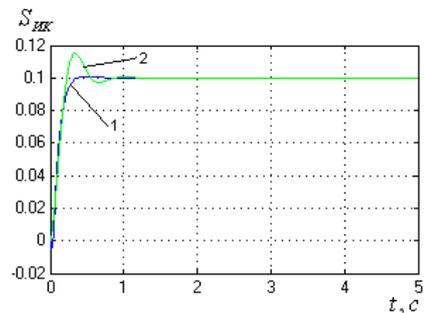


Рис. 8. Результаты моделирования в системе с адаптивным управлением: при изменении упругости в четыре раза ($p_{ПН} = 0,25p_{ПН}^0$)

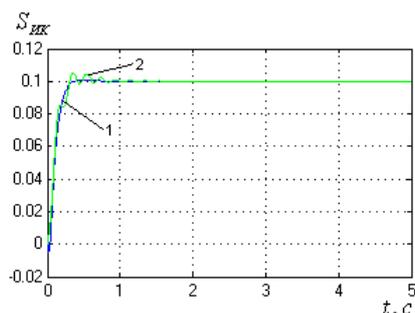


Рис. 9. Результаты моделирования в системе с адаптивным управлением: при изменении момента инерции присоединенных масс к ИК в четыре раза ($J_{\text{тр}} = 4J_{\text{тр}}^0$)

Из приведенных результатов исследования видно, что в системе с подчиненным управлением упругие колебания не подавляются (рис. 4);

система с модальным управлением удовлетворительно функционирует только при номинальных значениях параметров, на которые рассчитаны настройки наблюдателя и модального управления (рисунки 5, 6, 7);

в адаптивной системе упругие колебания эффективно подавляются даже при четырехкратном изменении параметров (рисунки 8, 9).

Шестая глава посвящена вопросам конструкторской, схемотехнической, алгоритмической и программной проработки создаваемого мобильного электротехнического комплекса и средств его управления и автоматизации. Комплекс состоит из буксируемой электромеханической тележки (БЭТ), бортового электрошкафа управления (ЭШУ), переносного компьютерного пульта управления и индикации (ПУИ) и переносного метрологического (калибровочного) стенда. Внешний вид действующего образца мобильного комплекса модели ИКС-1, выполненной на базе варианта ЭМУТ-2 с синхронным генератором торможения и реостатом, показан на рис. 10. Конструкция мобильного комплекса представляет собой буксируемую электромеханическую установку (тележку) (БЭТ), объединенную рамой переднего моста автомобиля ВАЗ 21213 («НИВА-ШЕВРОЛЕ»), а также снабженную фаркопом для сцепления с автомобилем – буксировщиком. Облик механической конструкции мобильного комплекса представлен на рис. 11 чертежом в 3D-проекции. БЭТ собрана на базе переднего моста шасси ВАЗ 21213, элементы которого крепятся к несущей раме (10). Центр масс БЭТ относительно оси вращения НК (13) смещен в сторону сцепки (8), образуя давление на опору фаркопа автомобиля-буксировщика силой не более 50 кг. Общая снаряженная масса БЭТ не превышает 500 кг. В передней части рамы (10) установлен тормозной синхронный генератор (6), на валу которого жестко закреплена звездочка. Тормозной генератор закреплен на раме при помощи балки (5) и угольника (4). Сцепка (8) снабжена устройством, позволяющим вручную регулировать высоту прицепного устройства так, чтобы при буксировании БЭТ в измерительном режиме она всегда находилась в горизонтальном положении. Измерительное колесо (ИК) размещено между НК (13) на подвеске, состоящей из рычага (2). Основной частью БЭТ является подвеска узла измерительного колеса (ИК), включающая в себя сам узел ИК (1), рычаг (2), связанный с несущей груз балкой (7) через амортизатор, обеспечивающий нормальное нагружение ИК. узел крепления тензодатчика (9), тормозной генератор. В задней части тележки установлен электрошкаф (14), содержащий аккумуляторную батарею, силовые электронные блоки и платы, управляемые микроконтроллером модели C-164 компании Infineon Technologies.



Рис. 10. Внешний вид буксируемого мобильного электромеханического комплекса модели ИКС-1



Рис. 12. Вид внутреннего устройства электрошкафа управления (ЭШУ)

силовой трехфазный мостовой выпрямитель постоянного тока; гелевый аккумулятор; влагозащищенные соединительные разъемы. За пределы ЭШУ вынесена плата усилителя сигнала тензодатчика, которая находится в отдельном корпусе в непосредственной близости от тензодатчика. В диссертации разработаны полный комплект электрических принципиальных схем плат всех модулей ЭШУ и схема его внутренних соединений. Трехфазный ток статора тормозного генератора выпрямляется по силовой трехфазной мостовой выпрямительной схеме. В цепь выпрямленного тока включен силовой ключ, выполненный на IGBT транзисторе, который управляется сигналом, поступающим с платы драйвера IGBT. Плата драйвера IGBT соединена с платой управления и микроконтроллером С164. На боковой поверхности ЭШУ расположены влагозащищенные соединительные разъемы, при помощи которых осуществляется соединение со статорной обмоткой тормозного генератора, тензодатчиком, датчиками угловых скоростей ПУИ.

Разработано программное обеспечение микроконтроллера. Программа обработки сигналов и адаптивной системы управления скольжением записана в ПЗУ микроконтроллера С164 и предназначена для сбора и оцифровки всех данных с БЭТ, выдачи информации по порту RS232 в ПУИ и управления силовой частью для поддержания заданного оператором скольжения. Программный цикл длится 1/390-ую секунды, за это время получают все сигналы с АЦП, просчитывается управление и выдается в ШИМ и выполняются команды от компьютера оператора (если таковые имеются). Значения с датчиков 30 раз в секунду передаются по порту RS232 на компьютер оператора со скоростью 9600 бит в секунду. От ПУИ приходят сигналы на изменение задания по скольжению, значения радиусов ИК, НК и сигналы запуска и остановки измерения, эти сигналы контроллер обрабатывает по прерыванию. На верхней стенке ЭШУ установлен GPS-приемник, опреде-

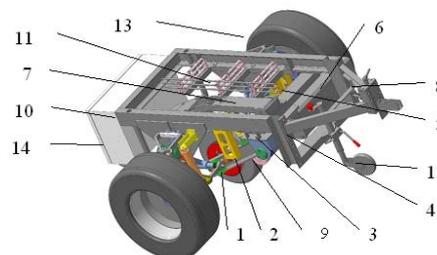


Рис. 11. Конструкция буксируемой электромеханической тележки (БЭТ) мобильного комплекса

Электрошкаф управления (ЭШУ), показанный на рис. 12, связан с ПУИ, находящимся в автомобиле-буксировщике, проводной связью. В ЭШУ расположены: драйвер IGBT; датчик тока; модуль ЗУ; плата управления с микроконтроллером С164; силовой транзистор IGBT; GPS-приемник; силовой транзистор IGBT;

ляющий текущие координаты БЭТ и передающий их на плату управления. Приёмник вместе с антенной смонтирован в герметичном корпусе.

Разработана автоматизированная информационно-управляющая система мобильного комплекса как автоматизированного средства непрерывного измерения коэффициента сцепления покрытий, которая реализуется на базе промышленного компьютера в виде переносного пульта управления и индикации (ПУИ) оператора комплекса и выполняет следующие функции:

1. Текущее измерение коэффициента сцепления (КС) с точностью не более 0,01.
2. Визуальную индикацию в процессе подготовки к проведению измерения коэффициента сцепления в процессе измерения КС.
3. Измерение, визуальную индикацию и документальную регистрацию осредненных по заданному участку покрытия значений КС, полученных при неоднократном выполнении измерений в одинаковых условиях (места, состояния покрытия, скорости измерения) с погрешностью не более $\pm 0,02$ во всем диапазоне измерений.
4. Измерение, визуальную индикацию и документальную регистрацию текущих значений скорости движения с погрешностью не более ± 1 км/ч.
5. Измерение и документальную регистрацию пройденного расстояния при измерении КС в диапазоне от 0 до 10 км с погрешностью не более $\pm 1\%$ во всем диапазоне измерений.
6. Визуальную индикацию электронной карты аэродрома и мобильного комплекса, вычисление и регистрацию на электронной карте местоположения с отклонением не более ± 5 м.
7. Передачу информации с помощью GSM-модема в диспетчерскую службу аэродрома непосредственно в процессе измерения с регистрацией текущего времени.
8. Регистрацию, архивирование и возможность воспроизведения всего объема накопленных результатов измерения и обработанной информации за период времени не менее чем 2 года.
9. Задание следующих данных:
 - даты, номера месяца, двух цифр года проведения измерений (определяется автоматически);
 - времени суток в часах и минутах проведения измерений (определяется автоматически);
 - обозначение наименования элемента летного поля аэродрома, длина участка покрытия ВПП, на котором намечается провести измерение КС, и его номер (информация о месте проведения измерения КС отображается также на карте аэропорта);
 - код лица, выполняющего измерение.
10. Формирование и документирование экспертной информации, необходимой для принятия диспетчером аэродрома решения о безопасной посадке подлетающего воздушного судна.

Компьютерный переносной пульт управления и индикации (ПУИ) (см. рис.14) выполнен на базе промышленного компьютера ТРС 1260Н фирмы Advantech.

В соответствии с выполняемыми ПУИ функциями, перечисленными выше, разработано полное алгоритмическое и программное обеспечение. Основное окно панели визуализации и управления процессом измерений на сенсорном цветном экране ПУИ появляется при включении электропитания установки (рис. 15). Функции изображений кнопок управления поясняются соответствующими надписями в основном окне.



Рис. 14. Компьютерный переносной пульт управления и индикации (ПУИ)

Основное окно (рис. 15) является виртуальной панелью, содержащей все органы управления процессом измерений и визуализации его результатов. После окончания измерительного заезда оператор может просмотреть полученную и обработанную информацию, нажав в основном окне на кнопку «ПРОСМОТР ПРОТОКОЛОВ», и передать ее на КДП аэродрома. При нажатии на кнопку «ПРОСМОТР ПРОТОКОЛОВ», появляется диалоговое окно меню выбора протоколов (см. рис. 16).

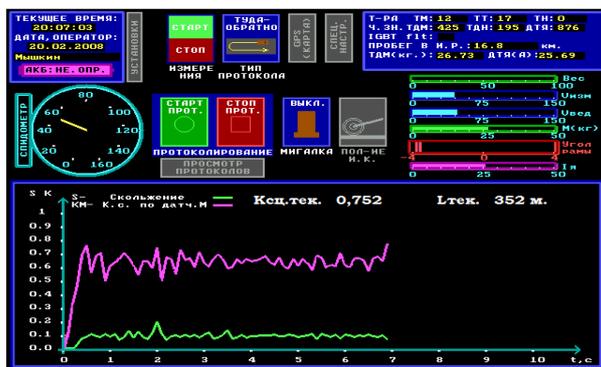


Рис. 15. Основное окно панели визуализации и управления



Рис. 16. Меню выбора протоколов

Протоколы измерений, записываемых и хранящихся на диске в ПУИ, могут быть представлены в четырех видах:

- 1. Протокол в стандартном виде.** При нажатии в основном окне на кнопку «ПРОТОКОЛ В СТАНДАРТНОМ ВИДЕ» появляются столбцовые диаграммы распределения значений измерения коэффициента сцепления вдоль измеряемого участка по обоим направлениям (см. рис. 17);
- 2. Протокол в виде графиков.** При нажатии в основном окне на кнопку «ПОКАЗАТЬ ПРОТОКОЛ В ВИДЕ ГРАФИКОВ» появляются графики распределения значений коэффициента сцепления, скольжения и линейной скорости мобильной установки вдоль измеряемого участка (см. рис. 18);
- 3. Протокол на карте аэродрома.** При нажатии в основном окне на кнопку «ПОКАЗАТЬ ПРОТОКОЛ НА КАРТЕ» появляется карта аэропорта с указанием места проведения измерений (см. рис. 19). На карте ставится метка начала измерений – белая буква «Н» в черном круге;
- 4. Протокол в числовом виде.** При нажатии в основном окне на кнопку «ПОКАЗАТЬ ПРОТОКОЛ В ЧИСЛОВОМ ВИДЕ» появляются таблицы распределения числовых значений коэффициента сцепления, скольжения и линейной скорости мобильной установки вдоль измеряемого участка (см. рис. 20).

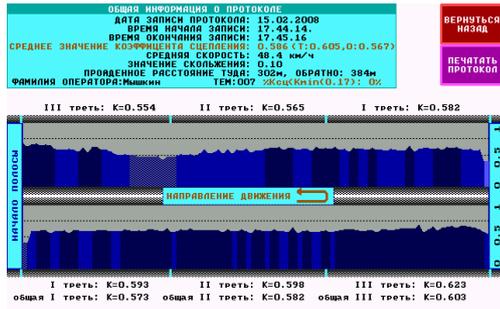


Рис. 17. Окно просмотра стандартного вида протокола

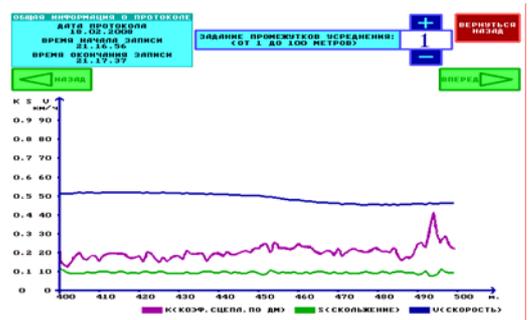


Рис. 18. Окно просмотра протокола в виде графиков



Рис. 19. Окно просмотра протокола на карте

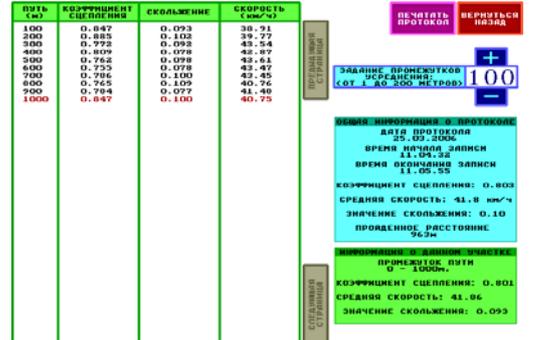


Рис. 20. Окно просмотра протокола в числовом виде

Разработанный компьютерный ПУИ является универсальным прибором обслуживания любого мобильного комплекса для непрерывного измерения КС и может выступать в качестве самостоятельного рыночного продукта.

В седьмой (заключительной) главе рассматриваются вопросы разработки методики метрологического обслуживания (калибровки), ее программного обеспечения и аппаратной реализации в виде переносного калибровочного стенда. Стенд предназначен для калибровки тензометрической системы измерения силы торможения (трения) измерительного колеса и измерительно-вычислительного тракта мобильного комплекса и представляет собой подвижную платформу с весами, на которые устанавливается измерительное колесо комплекса, двумя тензометрическими датчиками измерения касательной силы натяжения ИК и нормальной силы прижатия в пятне контакта с поверхностью, а также снабжен цифровыми индикаторами VT 100(см. рис. 21).



Рис. 21. Калибровочный стенд с установленным на нем измерительным колесо мобильного комплекса (вид со стороны индикаторов VT100)

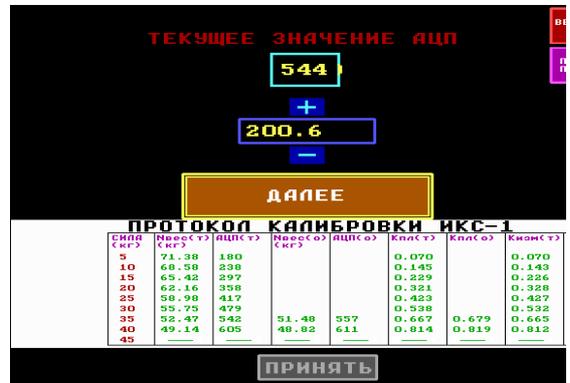


Рис. 22. Заполнение протокола калибровки мобильного комплекса в окне на экране ПУИ

В диссертации разработано алгоритмическое и программное обеспечение методики калибровки, реализуемой на стенде под управлением компьютера ПУИ, по результатам которой компьютером заполняется протокол калибровки (см. рис. 22).

Переносной калибровочный стенд является универсальным прибором для метрологического обслуживания любых мобильных комплексов непрерывного измерения КС и может рассматриваться в качестве самостоятельного рыночного продукта.

Разработанные в диссертации эскизная конструкция, схемотехническое, алгоритмическое и программное обеспечение послужили основой для создания полного комплекта конструкторской документации на изготовление 3-х действующих образцов мобильного электротехнического комплекса, выполненных с вариантом ЭМУТ-2 совместно с Холдинговой компанией «Созвездие Водолея» и при ее финансовой поддержке. В 2008 – 2009 г. при деятельном участии автора проводились государственные сертификационные испытания 3-х действующих образцов комплексов в соответствии с «Сертификационными требованиями (базисом)», разработанными и утвержденными Межгосударственным авиационным комитетом (МАК) и приведенными в Приложении 1 диссертации. По результатам успешно проведенных испытаний получены подтверждающие документы государственного образца, приведенные в Приложении 2.

Заключение.

1. Разработано управляемое электромеханическое устройство торможения (ЭМУТ) измерительного (транспортного) колеса, применяемое в создаваемом мобильном комплексе для измерения коэффициента сцепления.

2. Разработана математическая модель динамических процессов торможения колеса в рамках ЭМУТ, учитывающая срывной характер процесса торможения измерительного колеса, обусловленный нелинейными упругими свойствами пневматика и особенностями характеристики сухого трения.

3. Разработана адаптивная система автоматического управления ЭМУТ колеса, обеспечивающая возможность приблизить режимы торможения измерительного колеса к реальным режимам торможения транспортных колес в условиях неопределенности параметров, действия нелинейностей и внешних возмущений.

4. Разработана эскизная компоновка конструкции мобильного электромеханического комплекса в виде буксируемой установки.

5. Разработано схемотехническое, алгоритмическое и программное обеспечение адаптивной системы автоматического управления ЭМУТ, реализованной на базе средств силовой электроники и микроконтроллера в виде бортового электрошкафа управления.

6. Разработана функциональная схема, алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной информационно-управляющей системы мобильного электромеханического комплекса, реализованной в виде переносного компьютерного пульта управления и индикации на базе промышленного компьютера.

7. Разработана методика поверочного метрологического обслуживания мобильного электромеханического комплекса как измерительного средства и программное и аппаратное обеспечение ее реализации в виде переносного калибровочного стенда.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в Перечень ВАК РФ:

1. В.В. Путов, А.В. Низовой, Ш.А. Дашаев, А.А. Иванов, А.В. Путов, В.П. Казаков Электромеханическая мобильная установка аэродромного обслуживания нового поколения для оперативного контроля взлетно-посадочной полосы [Текст]// Мехатроника, автоматизация и управление № 5.-2003.-С. 32-39

2. В.В. Путов, А.В. Низовой, Н.А. Тимчук, А.В. Путов, В.П. Казаков Электромеханическая мобильная установка нового поколения для автоматизированного контроля взлетно-посадочной полосы [Текст]// Известия государственного электротехнического университета. Серия «Автоматизация и управление».СПб:СПбГЭТУ «ЛЭТИ».- №1.-2003.-С.3-7
3. В. В. Путов, В.Н. Шелудько, А.В. Низовой, А.В. Путов Автоматизированная мобильная электромеханическая установка нового поколения для измерения фрикционных свойств взлетно-посадочной полосы [Текст]// Авиакосмическое приборостроение № 6.-2004, с. 27-37
4. В.В. Путов, Ю.К. Козлов, В.П. Казаков, А.В. Путов Адаптивные электромеханические системы наведения и стабилизации специальных объектов и мобильных робототехнических комплексов [Текст]// Известия государственного электротехнического университета. Серия «Автоматизация и управление».СПб:СПбГЭТУ «ЛЭТИ».- №1.-2004, с. 3-8
5. А.В. Путов Измерительно-вычислительный комплекс оперативного контроля состояния поверхности автодорожных и аэродромных покрытий [Текст]// Известия государственного электротехнического университета. Серия «Автоматизация и управление».СПб:СПбГЭТУ «ЛЭТИ».- № 1.-2005, с. 48-52
6. В. Н. Шелудько, А.В. Путов, Е.В. Друян Система автоматического управления электромеханическим каскадом торможения буксируемого колеса в задачах исследования аэродромных и автодорожных покрытий [Текст]// Известия государственного электротехнического университета. Серия «Автоматизация и управление».СПб:СПбГЭТУ «ЛЭТИ».- №1.-2006.- С
7. В.В. Путов, В.Е. Хильченко, А.В. Путов, В.Н. Шелудько. Новое поколение мобильных электромеханических установок для оперативного контроля аэродромных покрытий [Текст]// Мехатроника, автоматизация и управление № 10.-2007.- С.25-30
8. В. В. Путов, Шелудько В.Н, Лебедев В.В, Зунг Ч.А, Казаков В.Н, Путов А.В, Друян Е.В. Семейство аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления нелинейными упругими электромеханическими объектами [Текст]// Мехатроника, автоматизация и управление № 10.-2007.- С. 16-25
9. Е.В. Друян, А.В. Путов, В. В. Путов, В. Н. Шелудько Испытательный стенд для нового поколения буксируемых электромеханических установок аэродромного обслуживания [Текст]// Известия СПбГЭТУ. СПб:СПбГЭТУ «ЛЭТИ».- № 4.-2010.- С. 22-28
10. В.В. Путов, В.Н. Шелудько, А.В. Путов, Я.Н. Сколяров Автоматически управляемые электромеханические устройства торможения транспортных колес [Текст]// Известия СПбГЭТУ. СПб:СПбГЭТУ «ЛЭТИ».- № 8.-2010.- С. 61-68
11. В.В. Путов, В.Н. Шелудько, А.В. Путов, Т.Л. Русяева Автоматически управляемая буксируемая электромеханическая установка для измерения коэффициента сцепления аэродромных и автодорожных покрытий ИСК-1 [Текст]// Известия СПбГЭТУ. СПб:СПбГЭТУ «ЛЭТИ».- № 9.-2010.- С. 67-74

Патенты и свидетельства регистрации программы ЭВМ:

12. Путов В.В., Путов А.В., Хильченко В.Е. Устройство для измерения коэффициента сцепления с поверхностью аэродромных и дорожных покрытий // патент РФ на изобретение. № 2369856 от 10.10.2009
13. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007613124. Путов В.В., Путов А.В.. Программа для информационно-управляющего комплекса установки для определения состояния взлетно-посадочной полосы. Опубл. в RU ОБПБТ № 4 (61) 20.12.2007, с. 6
14. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2010615788. Шелудько В.Н., Путов А.В., Друян Е.В. Программа для управления стендом для измерительных мобильных установок аэродромного обслуживания. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07.09.2010

15. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Шелудько В.Н., Путов А.В., Друян Е.В. Программа управления испытательным калибровочным стендом для электромеханических установок измерения коэффициента сцепления аэродромных и автодорожных покрытий. Подана заявка на регистрацию 27.10.2010

Другие статьи и конференции:

16. В.В. Путов, Н.А. Тимчук, А.В. Путов, В.П. Казаков, Р.В. Ленц, А.В. Низовой, Ю.К. Козлов Электромеханический энергосберегающий мобильный комплекс предпосадочного контроля состояния аэродромной полосы в экстремальных погодных условиях [Текст]// Сб. докл. «Управление и информационные технологии». УИТ-2003.-СПб.: ИСПОСервис.-2003.-С.246-251
17. В.П. Казаков, А.В. Путов Информационно-управляющая система мобильной системы контроля ВПП [Текст]// Доклад на 14 конференции «Экстремальная робототехника» ЦНИИ РТК. СПб.: 2003. с. 226-230
18. В.В. Путов, А.В. Путов, В.Н. Шелудько Компьютерная система управления и автоматизации мобильной установкой измерения фрикционных свойств взлетно-посадочной полосы [Текст]// Межд. научно-технической конференция «Проблемы автоматизации и управления в технических системах». Пенза.: 2004., с. 204-210
19. В.В. Путов, В.Н. Шелудько, А.В. Низовой, А.В. Путов Мобильная автоматизированная установка нового поколения для измерения коэффициента сцепления взлетно-посадочной полосы [Текст]// 15-ая научно-практическая конференция «Экстремальная робототехника. СПб.: 2004, с. 375-379.
20. В.В. Путов, Низовой В. А., Шелудько В.Н., Путов А.В., Русяева Т.Л. Электромеханическая мобильная установка нового поколения для оперативного предпосадочного контроля аэродромов гражданской авиации [Текст]// 1-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Мехатроника, автоматизация, управление» (МАУ"2004). Владимир.:2004, с. 400-403.
21. А.В. Путов, В.П. Казаков Микроконтроллерная система обработки информации и управления мобильной установкой контроля фрикционных свойств взлетно-посадочной полосы [Текст]//15-ая научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника». СПб.: 2004, с. 363-367
22. А.В. Путов Измерительно-вычислительный комплекс оперативного контроля состояния поверхности автодорожных и аэродромных покрытий [Текст]// 16-ая научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника». СПб.: 2005, с. 223-227
23. В.В. Путов, В.Н. Шелудько, А.В. Путов Мобильная электромеханическая установка нового поколения для измерения коэффициента сцепления взлетно-посадочных полос аэродромов гражданской авиации [Текст]// 2-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Мехатроника, автоматизация, управление» (МАУ"2005). Уфа.:2005, с. 284-292.
24. В.В. Путов, В.Н. Шелудько, А.В. Путов Новое поколение мобильных установок автоматизированного контроля качества аэродромных и автодорожных покрытий: исследование, сертификация, серийное освоение [Текст]// 16-ая научно-практическая конференция «Экстремальная робототехника. СПб.: 2005. с. 207-215
25. В.В. Путов, В.Н. Шелудько, А.В. Путов Мобильная установка нового поколения для оперативного предпосадочного контроля фрикционных свойств аэродромных покрытий [Текст]// доклад на межд. научно-техн. конф. «Наука, образование и общество в XXI веке» 15 июня 2006 г., г. СПб., СПбГЭТУ
26. В.П. Казаков, Путов В.В., Чан А.З., Путов А.В., Друян Е.В. Параметрическая адаптация для управления двухмассовыми нелинейными упругими электромеханическими объектами [Текст]// труды 9-ой Всероссийской научно-практическойконференции. Том 5. Экстремальная робототехника. СПб: 2006. С. 206-214
27. Ш.А. Дашаев, В.В. Путов, В.Н. Шелудько, А.А. Иванов, А.В. Путов Автоматизированная мобильная установка нового поколения для оперативного предпосадочного контроля фрикционных свойств аэродромных покрытий [Текст]// Журнал «Аэропорт», № 1. 2006. с.
28. Путов В.В., Шелудько В.Н., Путов А.В., Дашаев Ш.А. Автоматизированная мобильная установка нового поколения для оперативного предпосадочного контроля фрикционных свойств аэродромных покрытий [Текст]// Первая Российская мультиконференция по проблемам управления 10-12 октября 2006. СПб, с. 192-197.

29. А.В. Путов, Е.В. Друян. Компьютеризированный, информационно-управляющий пульт оператора мобильных установок для контроля состояния аэродромных покрытий [Текст]//IX конф. молодых ученых «Навигация и управление движением». 13-15 марта 2007 г.СПб.:2007
30. В.П. Казаков, А.В. Путов Микропроцессорная электромеханическая система подавления упругих колебаний, возникающих при управлении механическими объектами на подвижном основании [Текст]// IX конф. молодых ученых «Навигация и управление движением». 13-15 марта 2007 г.СПб.:2007
31. А.В. Путов, Е.В. Друян Компьютеризированный информационно-управляющий пульт оператора мобильных установок для контроля состояния аэродромных покрытий [Текст]//XIV межд. конф. по интегрированным навигационным системам. 28-30 мая 2007. СПб.: 2007
32. А.В. Путов, В.П. Казаков Сравнительный анализ аналитического и нейросетевого (обученного по аналитическому) алгоритмов управления двухмассовым упругим объектом [Текст]// XIV межд. конф. по интегрированным навигационным системам. 28-30 мая 2007. СПб.: 2007
33. В.П. Казаков, А.В. Путов Построение нейросетевого, обученного по аналитическому, алгоритма управления двухмассовым упругими объектом [Текст]// межд. науч.-техн. конф. «Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники». 24-29 сентября 2007г. Дивноморское. 2007. Изд-во Таганрогского ИЮФУ. с. 220-225
34. А.В. Путов, Е.В. Друян Компьютеризированный информационно-управляющий комплекс для электромеханической мобильной установки измерения коэффициента сцепления аэродромных покрытий [Текст]// межд. науч.-техн. конф. «Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники». 24-29 сентября 2007г. Дивноморское. 2007. Изд-во Таганрогского ИЮФУ. с. 445-450
35. Гарцев И.Б., Путов А.В. Автоматизированная система управления торможением колес летального аппарата [Текст]// межд. науч.-техн. конф. «Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники». 24-29 сентября 2007г. Дивноморское. 2007. Изд-во Таганрогского ИЮФУ. с. 372-374
36. С.Е. Голик, А.В. Вейнмейстер, Е.В. Друян, В.П. Казаков, А.В. Путов Микропроцессорные устройства: Метод. указания к лабораторным работам. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2007. 88 с.
37. Путов В.В, Шелудько В. Н., Путов А. В. Современная техника аэродромного обслуживания от «ЛЭТИ» [Текст]// Вестник авиации и космонавтики. Москва. №1. 2008. с.22-25
38. Путов В.В, Шелудько В. Н., Путов А. В., В. П. Казаков, Е.В. Друян, А. С. Пекаровский, Н. А. Русяев, Н. А. Щербаков Инновационные проекты в проектировании современных средств оценки тормозящих свойств искусственных ВПП [Текст]//VII межд. конф. «Материалы, оборудование и технологии, применяемые для содержания аэродромов гражданской авиации». 24-25 сентября 2009
39. А. В. Путов Разработка компьютеризированного информационно-управляющего пульта оператора мобильных установок для контроля состояния аэродромных покрытий [Текст]// доклад на VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. 18 января 2010 г. СПбГЭТУ
40. Е.В. Друян, А.В. Путов, А.Н. Щербаков Испытания буксируемых электромеханических измерителей коэффициента сцепления в лабораторных условиях [Текст]// XI конф. молодых ученых «Навигация и управление движением». 15-18 марта 2010 г. СПб.:2010
41. Путов В.В, Шелудько В. Н., Путов А. В., В. П. Казаков, Е.В. Друян, А.С. Пекаровский, А.Н. Щербаков, Н. А. Русяев. Аэродромный измеритель коэффициента сцепления нового поколения ИКС-1: сервис, обучение, развитие [Текст]// IX межд. конф. и выставка «Современные методики контроля и восстановления искусственных покрытий аэродромов и автомобильных дорог». 24-25 июня 2010.
42. Путов В.В, Путов А. В, В. П. Казаков, Е.В. Друян, А.С. Пекаровский, А.Н. Щербаков, Н. А. Русяев. Испытания буксируемых электромеханических измерителей коэффициента сцепления в лабораторных условиях [Текст]// IX межд. конф. и выставка «Современные методики контроля и восстановления искусственных покрытий аэродромов и автомобильных дорог». 24-25 июня 2010
43. Информационно-управляющие комплексы аэродромного обслуживания: Методические указания к лабораторным работам/ Сост.: Путов В.В, Путов А. В, Казаков В. П., Друян Е.В., Русяева Т.Л. Электронные методические указания по дисциплине «Информационно-управляющие комплексы аэродромного обслуживания». 2010. 115 с.