

На правах рукописи



Игнатъев Константин Васильевич

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ИМИТАТОР АНТИБЛОКИРОВОЧНЫХ
РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ КОЛЁС**

Специальность: 05.09.03 Электромеханические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2016

Работа выполнена на кафедре систем автоматического управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Путов Виктор Владимирович, профессор кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Дыда Александр Александрович**, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского», профессор кафедры Автоматических и информационных систем

кандидат технических наук, доцент **Лукичёв Дмитрий Вячеславович**, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», доцент кафедры Электротехники и прецизионных электромеханических систем

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет» (МИРЭА), г. Москва

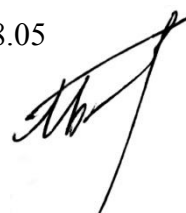
Защита диссертации состоится 28 декабря 2016 года в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте университета www.eltech.ru в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах».

Автореферат разослан 27 октября 2016 года.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.238.05

К.Т.Н



М.П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема обеспечения безопасности посадки воздушных судов в экстремальных погодных условиях актуальна как для стран с холодным, так и с жарким климатом. Снег, лед, изморозь, слякоть, песок, грязь, лужи, стоячая вода, мокрый асфальт, нефтепродукты и резиновые отложения одинаково являются с точки зрения международных руководств по эксплуатации аэродромов гражданской авиации загрязнителями взлётно-посадочных полос и принадлежат к экстремальным погодным факторам. Поэтому для обеспечения безопасности посадки в экстремальных погодных условиях и при наличии таких загрязнителей необходимо проводить предпосадочные оперативные измерения коэффициента сцепления взлётно-посадочных полос с целью определения безопасной тормозной дистанции приземляющихся воздушных судов. Разработка методов измерения коэффициента сцепления с помощью прокатывания измерительного колеса с постоянным скольжением и реализующих их мобильных установок осуществляется со второй половины прошлого века трудами многих отечественных и зарубежных ученых и инженеров, в их числе Аргунов С.Е., Андриади Ф.К., Булах А.И., Васильев А.П., Глуховский В.Н., Дрюян Е.В., Дубовец А.М., Елисеев Б.М., Журавлева С.Н., Иваница Е.В., Ивантев А.М., Каазик А.И., Казаков В.П., Кейн В.М., Кельман И.И., Кизима С.С., Косый Я.А., Котвицкий А.Ф., Лакатош Ю.А., Максимовский В.А., Медрес Л.П., Низовой А.В., Орловская Г.В., Печерский М.А., Рахубовский Ю.С., Русяева Т.Л., Петров Н.П., Порубай В.В., Путов А.В., Путов В.В., Сегал Я.С., Транквиллевский В.Г., Тырса В.Е., Флорман В., Шелудько В.Н., Шестопапов А.А., Щербаков В.В., Gösta Kullberg, Olle Nordström, Göran Palmkvist, Ottar Kollerud, Ragnar Malmus, Sven Edvin, Oddvard Johnsen, Hurson James, Tomas Yager и многие другие.

Одной из основных проблем в этой области является проблема соответствия, или, как принято говорить «корреляции» результатов непрерывного измерения коэффициента сцепления взлётно-посадочных полос с реальными характеристиками торможения приземляющихся воздушных судов. Характеризуя современное состояние научно-технической проблемы корреляции, можно указать на такие крупные международные проекты, как RuFAB (Runway Friction Characteristics Measurement and Aircraft Braking), IRIS (Integrated Runway Information Systems), JWRFP (Программа измерения коэффициента сцепления взлётно-посадочных полос в зимних условиях) и др., посвященные решению этой проблемы. Выработаны некоторые табличные рекомендации по корреляции в виде так называемых Международного (IRFI – International Runway Friction Index) и Канадского (CRFI – Canadian Runway Friction Index) индексов трения взлётно-посадочных полос в зимних условиях, однако применение их в оперативных условиях аэродромных измерений является непростым делом и влечет за собой погрешности и даже грубые просчеты.

В то же время, в исследованиях, предпринятых в рассмотренных проектах, был установлен факт независимости вырабатываемых корреляционных коэффициентов от конкретных технических характеристик воздушных судов. Показано, что определяющим фактором, влияющим на величины корреляционных коэффициентов, являются технические характеристики тормозных колесных систем воздушных судов, в то время как другие эксплуатационные характеристики приземляющихся воздушных судов на эти оценки не оказывают существенного влияния. Поэтому в рамках настоящей диссертационной работы исследуется новый, выдвинутый в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» подход к решению проблемы повышения точности и достоверности измерений коэффициента сцепления взлётно-посадочных полос, базирующийся на имитации измерительным колесом в процессе измерений антиблокировочных режимов самолетных систем торможения колес приземляющихся воздушных судов.

Применение адаптивного и интеллектуального подходов к управлению динамическими объектами также является актуальной проблемой и ставится в трудах многих отечественных и зарубежных учёных, таких как Андриевский Б.Р., Борцов Ю.А., Буков В.Н., Воронов А.А., Вукобратович М.А., Громыко В.Д., Гелиг А.Х., Дыда А.А., Емельянов С.В., Еремин Е.Л., Земляков С.Д., Красовский А.А., Кирчански Н., Коровин С.К., Леонов Г.А., Лохин В.М., Манько С.В., Мирошник И.В., Никифоров В.О., Овсепян Ф.А., Путов В.В., Поляхов Н.Д., Петров Б.Н., Полушин И.Г., Романов М.П., Рутковский В.Ю., Срагович В.Г., Солодовников В.В., Санковский Е.А., Слукин Н.М., Тимофеев А.В., Терехов В.М., Тюкин И.А., Уткин В.И., Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Цыпкин Я.З., Шумский В.М., Шпракко Л.С., Якубович В.А., Ядыгин И.Б., Annaswany A.M., Carrol R., Ercberger H., Fu K., Goldberg D., Gonsales R., Hiza J., Holland J.H., Lindorff D., Li W., Ljung T., Li K., Landau T.D., Miikkulainen R., Naraendra K.S., Ortega R., Slotine J.-J.E., Stanley K.O., Stocich D., Tang Y., Valavani L.S. и многих других.

Таким образом, тема работы является актуальной и представляет научный и практический интерес.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка, исследование и программная реализация электромеханического имитатора режимов торможения измерительного колеса буксируемого комплекса для измерения коэффициента сцепления аэродромных покрытий, с адаптивной системой управления, обеспечивающей автоматическое управление антиблокировочными режимами торможения прокатываемого измерительного колеса, близкими к реальным режимам торможения колес приземляющихся воздушных судов, в условиях неопределенности параметров и внешних возмущений.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать автоматически управляемое электромеханическое устройство торможения измерительного колеса как имитатора антиблокировочных режимов торможения колес приземляющегося воздушного судна и построить его нелинейную математическую модель, учитывающую упругие деформации пневматической шины в «пятне» контакта с покрытием и механической трансмиссии, а также «срывной» характер сил сухого трения при проскальзывании деформированной шины в «пятне» контакта.

2. Разработать структуры и математические модели неадаптивных с постоянными настройками, аналитических адаптивных с параметрической и сигнальной настройками и интеллектуальных (нейронечетких) систем автоматического управления электромеханическим имитатором, а также исследовать их эффективность в подавлении упругих деформаций двух- и трёхмассового упругих электромеханических объектов.

3. Разработать методику расчета контуров параметрической настройки беспоисковых адаптивных систем, основанную на применении генетических алгоритмов выбора наилучшей стратегии по критерию наперед заданной динамической точности процессов адаптации.

4. Разработать математическую модель процесса непрерывного измерения располагаемого (максимального) коэффициента сцепления вдоль аэродромного покрытия и исследовать моделированием влияние на результаты измерения вариаций параметров антиблокировочных режимов торможения измерительного колеса.

5. Разработать программное обеспечение микроконтроллерной реализации адаптивной системы управления электромеханическим имитатором и провести полунатурные исследования влияния антиблокировочных режимов торможения на результаты измерений экспериментального образца буксируемого измерительного комплекса на базе испытательного стенда с управляемой «бегущей дорожкой».

Методы исследований. При выполнении поставленных задач в диссертации использованы методы современной теории систем автоматического управления, методы

численного моделирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, а также методы теории нечётких множеств и генетических алгоритмов.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Разработано автоматически управляемое электромеханическое устройство торможения измерительного колеса как имитатора антиблокировочных режимов торможения колес приземляющегося воздушного судна и построена его нелинейная математическая модель, учитывающая упругие деформации пневматической шины в «пятне» контакта с покрытием и механической трансмиссии, а также «срывной» характер сил сухого трения при проскальзывании деформированной шины в «пятне» контакта.

2. Разработаны структуры и математические модели неадаптивных с постоянными настройками, аналитических адаптивных с параметрической и сигнальной настройками и интеллектуальных (нейронечетких) систем автоматического управления электромеханическим имитатором, а также исследована их эффективность в подавлении упругих деформаций двух- и трёхмассового упругих электромеханических объектов.

3. Разработана методика расчета контуров параметрической настройки беспоисковых адаптивных систем, основанная на применении генетических алгоритмов выбора наилучшей стратегии по критерию наперед заданной динамической точности процессов адаптации.

4. Разработана математическая модель процесса непрерывного измерения располагаемого (максимального) коэффициента сцепления вдоль аэродромного покрытия и исследовано моделированием влияние на результаты измерения вариаций параметров антиблокировочных режимов торможения измерительного колеса.

5. Разработано программное обеспечение микроконтроллерной реализации адаптивной системы управления электромеханическим имитатором и проведены полунатурные исследования влияния антиблокировочных режимов торможения на результаты измерений экспериментального образца буксируемого измерительного комплекса на базе испытательного стенда с управляемой «бегущей дорожкой».

Научная новизна результатов работы.

1. Интеллектуальная (нейронечёткая) система управления электромеханическим имитатором торможения колеса с обучением по прямой адаптивной системе управления с параметрической настройкой, открывающая новые возможности создания адаптивных систем на базе нейронечеткого подхода.

2. Методика расчёта беспоисковых адаптивных систем управления упругими электромеханическими объектами, основанная на применении генетических алгоритмов, впервые в теории аналитических адаптивных систем позволяющая напрямую связать выбор параметров усилений цепей настройки и матрицы целевого функционала с качеством динамических процессов адаптации.

3. Впервые проведён посредством математического моделирования анализ влияния параметров антиблокировочных режимов торможения измерительного колеса на результаты измерения коэффициента сцепления с использованием электромеханического устройства торможения с адаптивным управлением с параметрической настройкой, доказывающий правомерность исследуемого подхода к организации измерений коэффициента сцепления, основанного на имитации измерительным колесом в процессе измерений антиблокировочных режимов самолетных систем торможения колес приземляющихся воздушных судов.

4. Впервые экспериментально исследовано влияние параметров антиблокировочных режимов торможения измерительного колеса на результаты измерения коэффициента сцепления с использованием экспериментального образца электромеханического устройства торможения, подтвердившего результаты моделирования и продемонстрировавшего правомерность выдвинутого подхода.

Степень обоснованности и достоверности полученных научных и практических результатов:

Обоснованность принимаемых в работе основных технических решений обуславливается корректным применением указанных выше теоретических и экспериментальных методов исследования.

Достоверность научных положений, результатов и выводов диссертации подтверждается результатами математического моделирования и экспериментальных исследований с применением современных компьютерных средств и программных комплексов, а также апробацией основных научных результатов на научно-технических конференциях, опубликованием статей, содержащих результаты работы, в научных реферируемых журналах, в том числе международных.

Значимость полученных результатов для науки и практики.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем:

1. Разработана интеллектуальная (нейронечёткая) система управления электромеханическим имитатором торможения колеса с обучением по аналитическим адаптивным системам управления с параметрической настройкой, раскрывающая новые возможности в создании адаптивных систем на базе нейронечёткого подхода.

2. Разработана новая методика расчёта беспоисковых адаптивных систем управления упругими электромеханическими объектами, основанная на применении генетических алгоритмов и позволяющая напрямую связывать выбор параметров усиления цепей настройки и матрицы целевого функционала аналитических адаптивных систем с качеством переходных процессов адаптации.

3. Впервые разработана методика моделирования процессов измерения распределения эффективного коэффициента сцепления вдоль взлётно-посадочных полос, основанная на модели Бурхарда и позволяющая исследовать влияние сложных, в том числе антиблокировочных, режимов торможения на результаты измерений коэффициента сцепления.

Практическая полезность работы:

Разработана конструкторская и схемотехническая документация и программное обеспечение для изготовления экспериментального образца электромеханического имитатора антиблокировочных режимов торможения с адаптивной системой управления, использованная при изготовлении экспериментального образца измерительного комплекса с электромеханическим имитатором и проведении исследовательских испытаний.

Реализация результатов работы. Теоретические положения и практические результаты диссертационной работы использованы в 12 НИР и НИОКР, выполненных при участии автора в течение 2013-2016 г.г., источниками финансирования которых являлись федеральный бюджет и внебюджетные средства федерального государственного унитарного предприятия «Крыловский государственный научный центр».

Диссертационная работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы», приоритетного направления «Транспортные и космические системы», соглашения №14.574.21.0081 от 08.07.2014.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XV юбилейная конф. молодых ученых «Навигация и управление движением». 12-15 марта 2013 г. СПб.:2013; XVIII международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM 19-21 мая 2015; IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, 2-4 February 2015; International conference on nonlinear problems in

aviation and aerospace, La Rochelle, France, July 5- July 8, 2016; International Scientific Symposium «Automated Systems and Technologies», Hannover, Germany, 12-13 October 2016.

Публикации. Основное теоретическое и практическое содержание диссертационной работы опубликовано в 17 научных работах, в числе которых 3 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 5 статей в изданиях, входящих в список Scopus, а также 7 свидетельств регистрации программ ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, заключения и приложения. Основной материал диссертации изложен на 179 страницах машинописного текста, а также включает 93 рисунка, 6 таблиц, список литературы из 104 наименований. Диссертация содержит одно приложение объемом в 7 страниц текста, включающих 25 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы и сформулированы цели и задачи диссертации.

В первой главе представлен обзор существующих методов измерения коэффициента сцепления аэродромных покрытий, рассмотрены конструкции наиболее широко применяемых в мире измерителей коэффициента сцепления, а также проанализированы научно-технические публикации, содержащие значимые исследования методов, технологий и технических решений в области измерения коэффициента сцепления покрытий и систем электромеханического торможения измерительных и транспортных колес. На основании представленного обзора делаются выводы о том, что большинство современных измерителей коэффициента сцепления реализуют технологию непрерывного прокатывания измерительного колеса с постоянным скольжением, и только в отдельных установках предусматривается возможность менять уставки постоянного скольжения. Кроме того, в нескольких установках скольжение устанавливается изменением угла «увода» измерительного колеса. Однако ни один современный измеритель коэффициента сцепления не использует динамическое изменение в процессе измерения задаваемого скольжения для имитации работы антиблокировочных режимов тормозных автоматов колёс воздушных судов и ни в одном из найденных опубликованных в открытой печати и ни в одном из известных реализованных технических решений не сделано даже попытки создания автоматически управляемых устройств торможения измерительного колеса, имитирующих его тормозные режимы, близкие к реальным тормозным режимам колес приземляющихся самолетов.

Во второй главе представлена структура и математическая модель разрабатываемого электромеханического имитатора антиблокировочных режимов торможения транспортных колёс, а также математические модели разработанных систем управления. Предлагаемый электромеханический имитатор антиблокировочных режимов торможения представляет собой буксируемую тележку с двумя ведущими и одним измерительным колесом. Решение задачи управления скольжением измерительного колеса ИК предлагается в виде системы с тормозным генератором ТГ, создающим момент, тормозящий измерительное колесо. В качестве тормозного генератора применяется трехфазная синхронная электрическая машина переменного тока с индуктором, выполненным на постоянных магнитах. Применение такой машины исключает уязвимые узлы (коллектор и щеточное устройство), присущие машинам постоянного тока. Вал тормозного генератора кинематически, через звездочку на валу генератора и цепную передачу, связан со звездочкой, находящейся на валу измерительного колеса, тем самым обеспечивая кинематическую связь тормозного генератора и измерительного колеса. Статорные обмотки тормозного генератора

соединены через трёхфазный мостовой выпрямитель с нагрузочным реостатом. Для управления током, протекающим в нагрузочном реостате, в его цепь введён датчик тока и управляемый электронный ключ. Для измерения скольжения измерительного колеса установлены датчики угловых скоростей измерительного и ведущих колёс. Кинематическая схема электромеханического имитатора, учитывающая упругости пневматической шины и трансмиссии с зазором представлена на рис. 1.

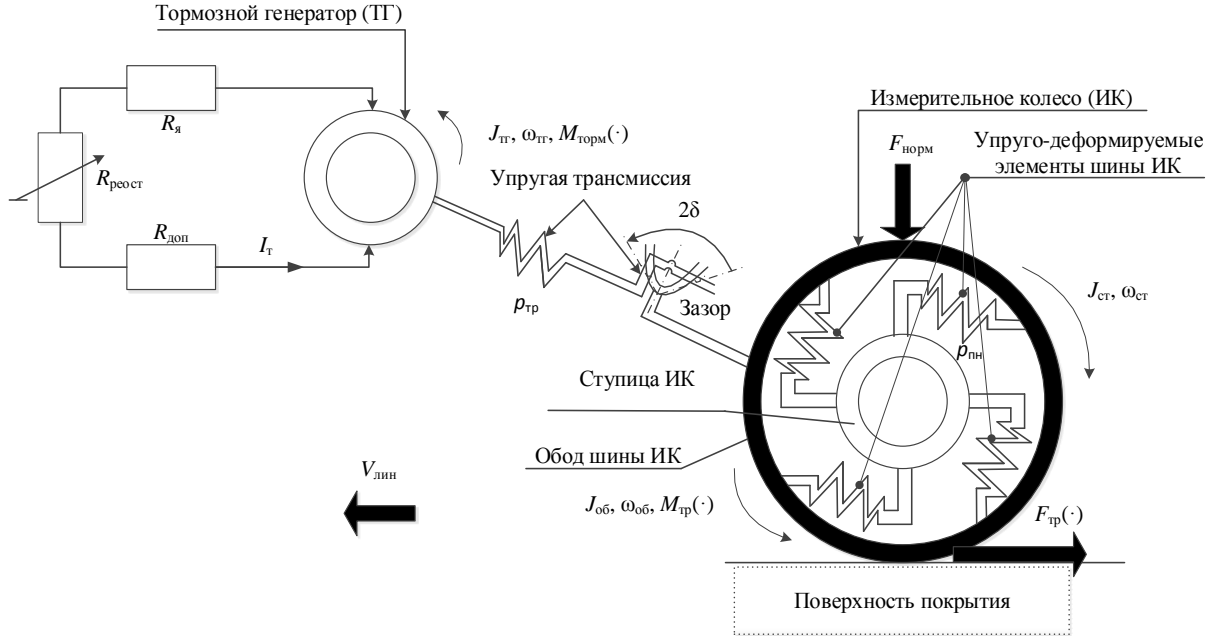


Рис. 1 – Кинематическая схема электромеханического имитатора

В математической модели динамики электромеханического имитатора электрическая цепь статора синхронной машины рассматривается в виде последовательного соединения сопротивления обмотки статора, управляемого реостата и дополнительного сопротивления, ограничивающего ток короткого замыкания статора. При таком рассмотрении ток, а значит и тормозной момент генератора регулируются с помощью управляемого сопротивления. Математическая модель динамики электромеханического имитатора представлена в виде системы нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений, включающих подчинённое управление:

$$\dot{\omega}_{об} = J_{об}^{-1}(M_{тр}(\cdot) - m_{y2}); \quad (1)$$

$$\dot{m}_{y2} = p_{пн}(\omega_{об} - \omega_{ст}); \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_{ст} = J_{ст}^{-1}(m_{y2} - f_{y1}); \quad (3)$$

$$\dot{m}_{y1} = p_{тр}(\omega_{ст} - \omega_{ТГ}); \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_{ТГ} = J_{ТГ}^{-1}(f_{y1} - M_{Торм}); \quad (5)$$

$$f_{y1} = \begin{cases} m_{y1} - p_{тр}\delta, & \text{если } m_{y1} \geq p_{тр}\delta; \\ 0, & \text{если } |m_{y1}| < p_{тр}\delta; \\ m_{y1} + p_{тр}\delta, & \text{если } m_{y1} \leq -p_{тр}\delta; \end{cases} \quad (6)$$

$$M_{Торм} = k_m I_T; \quad (7)$$

$$\dot{I}_T = L_{я}^{-1}(k_e \omega_{ТГ} - R_{реост}^{\min} I_T - R_{реост}(t) I_T); \quad (8)$$

$$R_{реост}(t) = k_y (u_T^{\max} - u_T), \quad R_{реост}(t) \in [0, R_{реост}^{\max}]; \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} u_T &= \bar{\beta}_T(u_S - k_T I_T); u_T \in [0, u_T^{\max}]; \\ u_S &= \bar{\beta}_S(u_\Sigma - k_S S_{\text{ТГ}}); \\ u_\Sigma &= u_{\text{прогр}} + u_{\text{лин}} + u_{\text{адапт}}; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{Тр}}(\cdot) &= M_{\text{Тр}}(S_{\text{об}}) = m_f \mu(S_{\text{об}}); \\ m_f &= g F_{\text{норм}} R_{\text{об}}; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\mu(S_{\text{об}}) = (\text{sign} S_{\text{об}}) \{ (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \exp[-\alpha S_{\text{об}} (\text{sign} S_{\text{об}})] + (\mu_{\text{blok}} - \mu_{\min}) S_{\text{об}} (\text{sign} S_{\text{об}}) + \mu_{\min} \}; \quad (12)$$

$$S_{\text{об}} = (\omega_{\text{об}}^{\text{своб}} - \omega_{\text{об}}) (\omega_{\text{об}}^{\text{своб}})^{-1}; \omega_{\text{об}}^{\text{своб}} = R_{\text{об}}^{-1} V_{\text{лин}} = \text{const}, \quad (13)$$

где $\omega_{\text{об}}, \omega_{\text{ст}}, \omega_{\text{ТГ}}$ – угловые скорости обода и ступицы измерительного колеса и ротора тормозного генератора соответственно, $J_{\text{об}}, J_{\text{ст}}, J_{\text{ТГ}}$ – крутильные моменты инерции масс, присоединенных к ободу и ступице измерительного колеса и ротору тормозного генератора соответственно; m_{y1}, m_{y2} – моменты упругих сил, возникающие при деформации трансмиссии и пневматической шины соответственно; $M_{\text{Торм}}(I_T)$ – электромагнитный момент (ток) торможения тормозного генератора; $p_{\text{пн}}, p_{\text{тр}}$ – коэффициенты упругих свойств пневматической шины и трансмиссии соответственно; f_{y1} – характеристика упругих свойств с учетом зазора; 2δ – величина зазора, $M_{\text{Тр}}(\cdot)$ – момент силы трения, $k_e, k_m, L_\text{я}, R_\text{я}$ – параметры электрической машины; $R_{\text{реост}} = R_{\text{реост}}(t)$ – сопротивление реостатной нагрузки, k_y – масштабирующий коэффициент, $R_{\text{доп}}$ – дополнительное сопротивление, u_T, u_S – управляющие (выходные) напряжения контурных регуляторов тока и скольжения соответственно; $u_{\text{прогр}}$ – программное задание скольжения обода $S_{\text{об}}^{\text{прогр}} \in [0, 0.5]$; $u_{\text{лин}}$ и $u_{\text{адапт}}$ – соответственно, линейное и адаптивное (или интеллектуальное) управления, подлежащие определению; $\bar{\beta}_T, \bar{\beta}_S$ – передаточные функции (в частности, коэффициенты усиления) контурных регуляторов подчинённого управления током и скольжением соответственно; k_T, k_S – коэффициенты передачи датчиков тока и скольжения соответственно; $S_{\text{об}}$ – скольжение обода измерительного колеса; $\omega_{\text{ик}}^{\text{своб}} = \omega_{\text{об}}^{\text{своб}}$ – угловая скорость свободного качения измерительного колеса. Коэффициент сцепления $\mu(S_{\text{об}})$ представляет собой совокупность трёх составляющих: 1. Сухое трение с эффектом Штрибека, рассчитываемое по формуле $(\mu_{\max} - \mu_{\min}) \exp(-\alpha S_{\text{об}})$; 2. вязкое трение, имеющее вид $(\mu_{\text{blok}} - \mu_{\min}) S_{\text{об}}$; 3. кулоновское трение вида μ_{\min} . При этом $\mu_{\min}, \mu_{\text{blok}}, \mu_{\max}, S_{\text{об}}^{\text{min}}$ – параметры характеристики коэффициента сцепления; α – параметр крутизны падения характеристики в зоне эффекта Штрибека; m_f – коэффициент пропорциональности, $R_{\text{ик}} = R_{\text{об}}$ – радиус измерительного колеса, вычисляемый с учетом деформации шины (усадки пневматика) в «пятне» контакта с покрытием; $F_{\text{норм}} = \text{const}$ – сила нормального (вертикального) нагружения измерительного колеса; g – ускорение свободного падения; $V_{\text{лин}}$ – поступательная (линейная) скорость оси измерительного колеса (скорость буксирования), $\text{sign}(\cdot)$ – знак функции, стоящей в скобках.

Была также проведена линеаризация системы (1)-(13), принявшая следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_{об} &= J_{об}^{-1}m_{y2} + J_{об}^{-1}M_{Тр}(\cdot); \dot{m}_{y2} = p_{пн}(\omega_{об} - \omega_{ст}); \dot{\omega}_{ст} = J_{ст}^{-1}(m_{y2} - m_{y1}); \\ \dot{m}_{y1} &= p_{тр}(\omega_{ст} - \omega_{тг}); \dot{\omega}_{тг} = J_{тг}^{-1}(m_{y1} - k_m I_T); \dot{I}_T = a_{65}\omega_{тг} + a_{66}I_T + a_3 I_T^* u_{\Sigma},\end{aligned}$$

где $a_{65} = a_1 + a_4 I_T^* V_{лин}^{-1} i_{ред}^{-1}$, $a_{66} = -a_2 + a_3 u_{\Sigma}^* + a_4 V_{лин}^{-1} i_{ред}^{-1} \omega_{тг}^* - 2a_5 I_T^*$, I_T^* , $\omega_{тг}^*$, u_{Σ}^* – значения тока торможения, угловой скорости вращения ротора тормозного генератора и сигнала управления соответственно в выбранном при линеаризации установившемся решении,

$$a_1 = L_{я}^{-1} k_e, a_2 = L_{я}^{-1} (R^{\min} + k_y u_T^{\max} + k_y \beta_T \beta_s k_s), a_3 = L_{я}^{-1} k_y \beta_T \beta_s,$$

$a_4 = L_{я}^{-1} k_y \beta_T \beta_s k_s R_{об}$, $a_5 = L_{я}^{-1} k_y \beta_T k_T$.

Для данной системы были разработаны и исследованы модальное; адаптивное с сигнальной настройкой; адаптивное с параметрической настройкой; интеллектуальное (нейронечёткое) управления, а также асимптотический идентификатор (наблюдатель) состояния полного порядка.

Идентификатор состояния имеет вид:

$$\left. \begin{aligned}\dot{\hat{\omega}}_{об} &= J_{об}^{-1} \hat{m}_{y2} + l_1 k_c \hat{\varepsilon}_{\omega}; \\ \dot{\hat{m}}_{y2} &= p_{пн}(\hat{\omega}_{об} - \hat{\omega}_{ст}) + l_2 k_c \hat{\varepsilon}_{\omega}; \\ \dot{\hat{\omega}}_{ст} &= J_{ст}^{-1}(\hat{m}_{y2} - \hat{m}_{y1}) + l_3 k_c \hat{\varepsilon}_{\omega}; \\ \dot{\hat{m}}_{y1} &= p_{тр}(\hat{\omega}_{ст} - \hat{\omega}_{тг}) + l_4 k_c \hat{\varepsilon}_{\omega}; \\ \dot{\hat{\omega}}_{тг} &= J_{тг}^{-1}(\hat{m}_{y1} - k_m \hat{I}_T) + l_5 k_c \hat{\varepsilon}_{\omega}; \\ \dot{\hat{I}}_T &= a_{65} \hat{\omega}_{тг} + a_{66} \hat{I}_T + l_6 k_c \hat{\varepsilon}_{\omega} + a_3 I_T^* u_{\Sigma},\end{aligned}\right\} \quad (14)$$

где $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{\omega}_{об}, \hat{m}_{y2}, \hat{\omega}_{ст}, \hat{m}_{y1}, \hat{\omega}_{тг}, \hat{I}_T)^T$ – вектор оценок переменных состояния системы, $\hat{\varepsilon}_{\omega} = \hat{\omega}_{тг} - \omega_{тг}$ – ошибка наблюдения.

Модальное управление имеет вид:

$$u_{лин} = \mathbf{k}^T \hat{\mathbf{x}} = k_1 \hat{\omega}_{об} + k_2 \hat{m}_{y2} + k_3 \hat{\omega}_{ст} + k_4 \hat{m}_{y1} + k_5 \hat{\omega}_{тг} + k_6 \hat{I}_T. \quad (15)$$

Адаптивная система с параметрической настройкой и мажорирующими функциями имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}u_{адапт}(t) &= k_{A1}(t) \hat{\omega}_{об} + k_{A2}(t) \hat{m}_{y2}^2 + k_{A3}(t) \hat{\omega}_{ст} + k_{A4}(t) \hat{m}_{y1}^2 + \\ &+ k_{A5}(t) \hat{\omega}_{тг}^2 + k_{A6}(t) \hat{I}_T^2 + k_b(t) u_{прогр}(t).\end{aligned} \quad (16)$$

Алгоритмы параметрической настройки с мажорирующими функциями принимают вид:

$$\left. \begin{aligned}\dot{k}_{A1}(t) &= -\gamma_{A1} \delta(\mathbf{e}) \hat{\omega}_{об} - \lambda_{A1} k_{A1}(t); \\ \dot{k}_{A2}(t) &= -\gamma_{A2} \delta(\mathbf{e}) \hat{m}_{y2}^2 - \lambda_{A2} k_{A2}(t); \\ \dot{k}_{A3}(t) &= -\gamma_{A3} \delta(\mathbf{e}) \hat{\omega}_{ст} - \lambda_{A3} k_{A3}(t); \\ \dot{k}_{A4}(t) &= -\gamma_{A4} \delta(\mathbf{e}) \hat{m}_{y1}^2 - \lambda_{A4} k_{A4}(t); \\ \dot{k}_{A5}(t) &= -\gamma_{A5} \delta(\mathbf{e}) \hat{\omega}_{тг}^2 - \lambda_{A5} k_{A5}(t); \\ \dot{k}_{A6}(t) &= -\gamma_{A6} \delta(\mathbf{e}) \hat{I}_T^2 - \lambda_{A6} k_{A6}(t); \\ \dot{k}_b(t) &= -\gamma_b \delta(\mathbf{e}) u_{прогр} - \gamma_b k_b(t);\end{aligned}\right\} \quad (17)$$

$$\delta(\mathbf{e}) = k_M \sum_{j=1}^6 p_{6j} (\hat{x}_j - x_M) = k_M (p_{61} (\hat{\omega}_{об} - \omega_{обM}) + p_{62} (\hat{m}_{y2} - m_{y2M}) + p_{63} (\hat{\omega}_{ст} - \omega_{стM}) + p_{64} (\hat{m}_{y1} - m_{y1M}) + p_{65} (\hat{\omega}_{тг} - \omega_{тгM}) + p_{66} (\hat{I}_T - I_{TM})).$$

где γ_{Ai} – коэффициенты усиления контуров настраиваемых параметров адаптивной системы, λ_{Ai} – коэффициенты усиления обратных связей настраиваемых параметров адаптивной системы, $\hat{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_M$ – вектор ошибки между наблюдаемым вектором состояния и вектором состояния эталонной модели, принятой в виде линеаризованной системы с номинальными параметрами и модальным управлением, \mathbf{p}_6^T – последняя строка матрицы \mathbf{P} , являющейся решением уравнения Ляпунова

$$\mathbf{A}_M^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_M = -\mathbf{G}, \quad (18)$$

где \mathbf{G} – произвольная симметричная, положительно определённая матрица.

Адаптивная система с сигнальной настройкой и мажорирующими функциями имеет вид

$$u_{\text{адапт}}(t) = -\left[h_0 + h_2 \hat{m}_{y2} + h_4 \hat{m}_{y1} + h_5 \hat{\omega}_{\text{тг}} + h_6 \hat{I}_T \right] \text{sign} \left[\delta(\hat{\mathbf{e}}(t)) \right], \quad (19)$$

где $h_0, h_r, r=1, 2, \dots, 6$ – коэффициенты усиления сигнальной настройки.

Разработанная интеллектуальная (нейронечёткая) система представляет собой систему ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). Для обучения нейронечёткой системы в среде Simulink/Matlab создаётся структурная схема модели объекта с адаптивной системой с параметрической настройкой, на вход которой подаются различные ступенчатые воздействия при варьировании параметров системы. В рабочую область среды Matlab сохраняются все текущие значения ошибки между вектором оценки состояния системы и вектором состояния эталонной модели $\hat{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_M$, а также соответствующие им выходные значения адаптивного регулятора. Таким образом, получается обучающая выборка. Для дальнейшего обучения нейронечёткого регулятора используется функция `anfis` пакета Matlab. Функция `anfis` пакета Matlab всегда настраивает архитектуру сети на максимальный набор правил, поэтому, чтобы уменьшить число нечетких правил и, соответственно, число узлов второго слоя нейронечёткого регулятора, предлагается использовать каскадное нейронечёткое управление. Тогда вместо одного нейронечёткого регулятора с 5 входами, соответствующими 5 ошибкам по переменным состояния наблюдателя и эталонной модели (переменной I_T пренебрегаем), используются 3 параллельно работающих нейронечётких регулятора, два с двумя и один с одним входами соответственно. Сигнал управления в данном случае будет рассчитываться как треть суммы выходов трёх нейронечётких регуляторов.

Входами первого нейронечёткого регулятора являются ошибки скорости третьей массы и упругого момента второй связи, входами второго нейронечёткого регулятора являются ошибки скоростей второй массы и упругого момента первой связи, а входом третьего нейронечёткого регулятора является ошибка скорости двигателя. Для нормировки входных воздействий весь вектор ошибки домножается на нормировочный коэффициент. Нормировочный коэффициент ставится также на выходе нейронечёткого регулятора.

Архитектура нейронечётких регуляторов с правилами Takagi-Sugeno-Kang выбрана следующим образом: каждый вход всех трёх регуляторов имеет 5 функций принадлежности колоколообразного вида. Обучение сети происходило по гибриднему алгоритму с числом итераций настройки, равным 60.

В третьей главе проведено исследование эффективности разработанных во второй главе систем управления электромеханическим имитатором в более общей постановке подавления ими упругих деформаций в двух- и трёхмассовых упругих электромеханических объектах. Для этого были составлены и исследованы математические модели двух- и трёхмассового упругих электромеханических объектов с подчинённым управлением и системами управления, разработанными во второй главе.

Разработанные во второй главе системы исследованы при 16-ти кратном изменении параметров двух- и трёхмассовых упругих электромеханических объектов.

На рис. 2 приведены переходные процессы в трёхмассовом объекте с рассматриваемыми системами управления (14)-(19) при уменьшении коэффициента упругости второй связи в четыре раза и уменьшении момента инерции третьей массы в четыре раза.

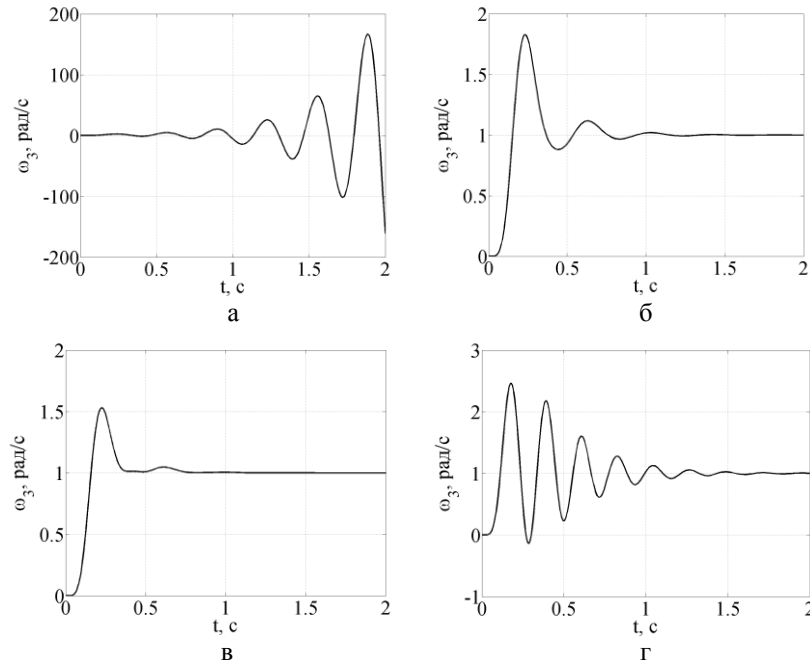


Рис. 2 – Переходные процессы в трёхмассовой упругой электромеханической системе при уменьшении коэффициента упругости второй связи в четыре раза и уменьшении момента инерции третьей массы в четыре раза в системах с модальным (а), адаптивным с сигнальной (б) и параметрической (в) настройкой и интеллектуальным (г) управлением

На основании проведённых исследований сделаны выводы о том, что система с подчинённым управлением принципиально не способна подавить упругие деформации в рассматриваемых системах; в системе с модальным управлением 2-4 кратное изменение параметров объекта может нарушить её работоспособность; адаптивные системы с параметрической и сигнальной настройкой, так же как и интеллектуальная (нейронечёткая) система обеспечивают подавление упругих колебаний в двух- и трёхмассовом упругих электромеханических объектах при 16-ти кратном изменении их параметров, причём по результатам сравнительного анализа адаптивная система с параметрической настройкой показала наименьшие отклонения от желаемой формы переходных процессов, задаваемых эталонной моделью, однако даже в ней качество переходных процессов остаётся недостаточно удовлетворительным. Поэтому в диссертации было предпринято создание новой методики расчета параметров адаптивных систем, основанные на применении генетических алгоритмов.

В четвёртой главе рассмотрены общие принципы работы генетических алгоритмов и применяемых в них генетических операторов, а также их применения в системах автоматического управления. Генетические алгоритмы широко применяются для расчёта коэффициентов ПИД-регуляторов, весовых матриц линейно-квадратичных (LQR) и линейно-квадратичных гауссовских (LQG) регуляторов. Они также применяются в качестве алгоритма оптимизации в системах управления с прогнозирующими моделями (MPC). Генетические алгоритмы также широко используются совместно с интеллектуальными нечёткими и нейросетевыми регуляторами. В нечётких системах генетические алгоритмы используются для настройки нечётких правил и соответствующих функций принадлежности. В нейросетях генетические алгоритмы

используются в качестве метода обучения нейронной сети и получения весов связей сети, а также её топологии.

В главе представлена методика расчёта контуров параметрической настройки беспоисковых адаптивных систем, основанная на применении генетических алгоритмов, эффективность которой рассмотрена на примерах расчета адаптивных систем управления двух- и трёхмассовыми упругими электромеханическими объектами.

Рассмотрим линейный стационарный объект с одним входом вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u, \quad (20)$$

где $\mathbf{x} \in R^n$ – вектор состояния объекта (20), $u = u_a + u_{л} + u_0$ – скалярное управление, в том числе, u_0 – программное управление, $u_{л}$ – линейное управление с постоянными параметрами, u_a – искомое адаптивное управление, $\mathbf{b} \in R^n$ – матрица-столбец входа, $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$ – матрица состояния объекта.

Полагаем, что \mathbf{A}, \mathbf{b} точно не известны, а известны лишь их усреднённые (номинальные) значения $\mathbf{A}_0, \mathbf{b}_0$. В этом случае можно использовать известный адаптивный закон управления (закон основного контура), следующего вида

$$u_a = \mathbf{k}_A^T \mathbf{x} + k_b u_0, \quad (21)$$

где вектор-столбец \mathbf{k}_A и скаляр k_b – настраиваемые параметры адаптивного закона (21).

Желаемая динамика адаптивной системы задаётся эталонной моделью вида

$$\dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{b}_M u_0, \quad (22)$$

где $\mathbf{A}_M, \mathbf{b}_M$ – $n \times n$ и $n \times 1$ -мерные постоянные матрицы, \mathbf{A}_M – гурвицава, $\mathbf{x}_M \in R^n$ – вектор состояния эталонной модели, u_0 – любая непрерывная ограниченная функция времени.

Дифференциальные уравнения алгоритмов настройки параметров \mathbf{k}_A, k_b имеют следующий вид

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{k}}_A^T = -\gamma_A \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{x}^T - \lambda_A \mathbf{k}_A^T, \\ \dot{k}_b = -\gamma_b \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \mathbf{e} u_0 - \lambda_b k_b, \end{cases} \quad (23)$$

где $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_M$ – n -мерный вектор ошибки, характеризующий отклонение состояния объекта от состояния эталонной модели, $\gamma_A, \gamma_b, \lambda_A$ и λ_b – положительные коэффициенты усиления алгоритмов настройки, \mathbf{P} – симметричная положительно определённая матрица, удовлетворяющая уравнению Ляпунова (18).

В настоящее время не существует каких-либо рекомендаций по выбору матриц $\mathbf{G}, \mathbf{\Gamma}_A, \mathbf{\Lambda}_A$ и коэффициентов γ_b, λ_b , отвечающих какому-либо наперёд заданному виду переходных процессов по переменным ошибки \mathbf{e} и настраиваемым параметрам \mathbf{k}_A, k_b , кроме общего требования положительной определённости, гарантирующей достаточные условия работоспособности (экспоненциальной диссипативности) адаптивной системы (20) – (23) при условии достижимости адаптивного закона.

Применим генетические алгоритмы для поиска параметров матриц \mathbf{G} и коэффициентов $\gamma_A, \gamma_b, \lambda_A$ и λ_b , по условию минимизации ошибки отклонения динамики адаптивной системы от динамики, задаваемой эталонной моделью. Заметим, что \mathbf{G} используется только для расчёта матрицы \mathbf{P} и с помощью генетических алгоритмов будем искать параметры матрицы \mathbf{P} , а не \mathbf{G} . Так как рассматриваемая система (20) – (23) имеет только один вход, то в алгоритмах (23) будет участвовать только одна строка из матрицы \mathbf{P} , поэтому поиску подлежат только n коэффициентов матрицы \mathbf{P} . Каждая особь популяции генетического алгоритма будет представлять собой один

набор коэффициентов матрицы \mathbf{P} , а также коэффициентов γ_A , γ_b , λ_A и λ_b , закодированных в виде вещественных чисел. Начальная популяция особей строится на основе коэффициентов матрицы \mathbf{P} , рассчитанных по уравнению Ляпунова при использовании единичной матрицы \mathbf{G} , а также единичных значений γ_A , γ_b , λ_A и λ_b . Минимизируемая оценочная функция генетического алгоритма строится следующим образом:

1. Моделируются переходные процессы эталонной модели с постоянным шагом интегрирования Δt_{int} для получения переходных процессов $\mathbf{x}_M(t)$.

2. Моделируются переходные процессы адаптивной системы с постоянным шагом интегрирования Δt_{int} для каждой особи при уменьшении и увеличении параметров матриц \mathbf{A} и \mathbf{b} в три раза во всех комбинациях для получения переходных процессов $\mathbf{x}(t)$.

3. Рассчитывается сумма модулей разностей между полученными переходными процессами в адаптивной системе и переходными процессами в эталонной модели для каждой точки интегрирования $s_j = \sum_{i=1}^l |x_{j_i} - x_{M_i}|$, где l – количество точек интегрирования.

4. В качестве результата оценочной функции выберется наибольшее значение из рассчитанных на этапе 3 значений для каждой конкретной особи $f = \max s_j$.

Выбор шага интегрирования Δt_{int} зависит от сходимости выбранного метода интегрирования, а количество точек интегрирования l зависит от длительности переходных процессов в рассматриваемой системе.

Покажем переходные процессы в двухмассовой упругой системе с четырьмя разными матрицами \mathbf{G} , используемыми в уравнении (18) для поиска матрицы \mathbf{P} при 16-ти кратном изменении параметров объекта на рис. 3. Жирной линией показан переходный процесс эталонной модели. Как видно из графиков, адаптивное управление позволяет обеспечить работоспособность системы при изменении её параметров, однако качество переходных процессов остаётся неудовлетворительным и случайное варьирование параметров матрицы \mathbf{G} и коэффициентов γ_A , γ_b , λ_A и λ_b алгоритмов настройки (23) не приводит к их улучшению.

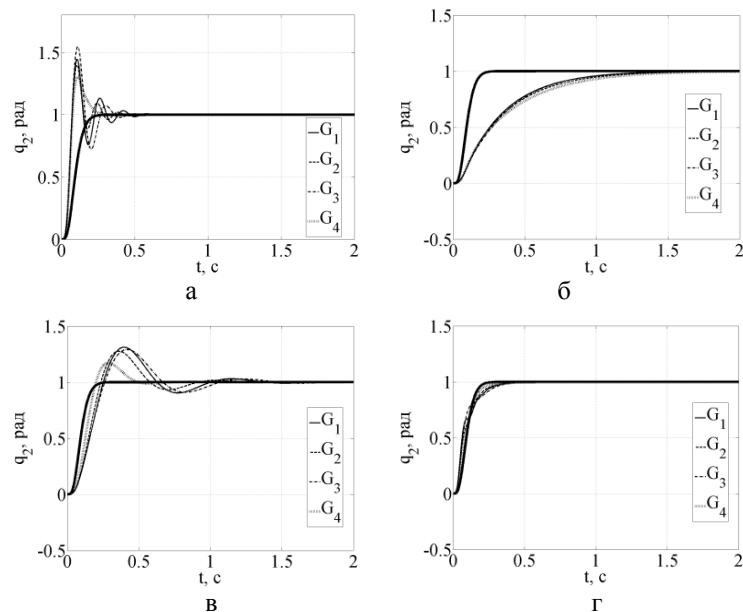


Рис. 3 – Переходные процессы системы с адаптивным управлением с параметрической настройкой и уменьшением момента инерции второй массы в 4 раза (а), увеличении момента инерции второй массы в 4 раза (б), уменьшении коэффициента упругости связи в 4 раза (в), увеличении коэффициента упругости связи в 4 раза (г)

Использование генетических алгоритмов для расчёта адаптивной системы с параметрической настройкой позволяет добиться удовлетворительного качества переходных процессов при 16-ти кратном изменении параметров системы. Переходные процессы в системе с адаптивным управлением, рассчитанным с помощью генетических алгоритмов, представлены на рис. 4. Пунктирной линией представлен график переходного процесса эталонной модели.

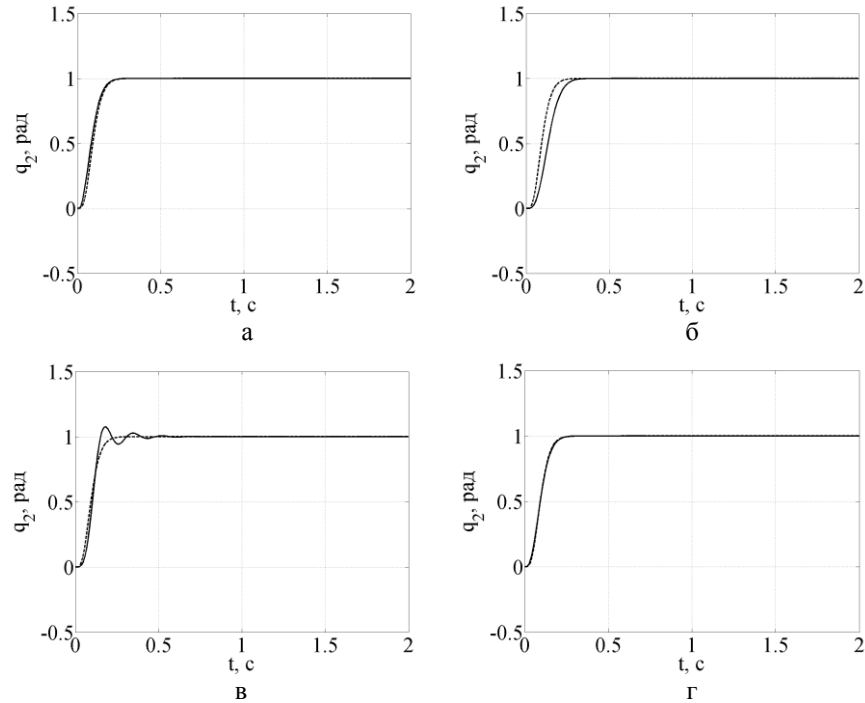


Рис. 4 – Переходные процессы системы с адаптивным управлением с параметрической настройкой, рассчитанным с помощью генетических алгоритмов, и уменьшении момента инерции второй массы в 4 раза (а), увеличении момента инерции второй массы в 4 раза (б), уменьшении коэффициента упругости связи в 4 раза (в), увеличении коэффициента упругости связи в 4 раза (г)

В четвёртой главе также рассмотрены сравнительные результаты применения асимптотического идентификатора (наблюдателя) состояния полного порядка (14) и идентификатора состояния со скользящими режимами, показанного ниже, для реализации адаптивной системы с параметрической настройкой в управлении двух- и трёхмассовым упругими электромеханическими объектами по выходу. Идентификатор (наблюдатель) состояния со скользящими режимами имеет следующий вид, (предложен В.И. Уткиным)

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{b}u + \mathbf{L}\text{sign}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}), \quad (24)$$

где $\hat{\mathbf{x}} \in R^n$ – вектор оценок состояния системы, $\mathbf{L} \in R^{n \times m}$ – матрица рассчитываемых параметров наблюдателя, n – порядок системы, m – количество измеряемых переменных состояния, $\mathbf{y} \in R^m$ – вектор измеряемых переменных состояния, рассчитываемый как $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}$, $\hat{\mathbf{y}} \in R^m$ – оценка вектора измеряемых переменных состояния, $\mathbf{C} \in R^{m \times n}$ – матрица выхода системы.

Введём обратимую матрицу трансформации размера $n \times n$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{R} \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{R} \in R^{(n-m) \times n}$ находится из уравнения $\mathbf{x}_1 = \mathbf{R}\mathbf{x}$, где $\mathbf{x}_1 \in R^{n-m}$ – вектор неизмеряемых переменных состояния.

В этом случае рассматриваемую систему (20) можно привести к виду

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{y}} &= \mathbf{A}_{11}\mathbf{y} + \mathbf{A}_{12}\mathbf{x} + \mathbf{b}_1u, \\ \dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{A}_{21}\mathbf{y} + \mathbf{A}_{22}\mathbf{x} + \mathbf{b}_2u, \end{aligned}$$

$$\text{где } \mathbf{TAT}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{Tb} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{bmatrix}.$$

С учётом введённых обозначений матрица параметров наблюдателя будет рассчитываться следующим образом:

$$\mathbf{L} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{L}_2 \mathbf{L}_1 \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{L}_1 \in R^{m \times m}$ – положительно определённая диагональная матрица, диагональные элементы которой должны быть больше, чем $\|\mathbf{A}_{11}\mathbf{e}_y + \mathbf{A}_{12}\mathbf{e}_{x_1}\|_{\infty}$, а матрица $\mathbf{L}_2 \in R^{(n-m) \times m}$ – матрица, задающая собственные числа матрицы $(\mathbf{A}_{22} - \mathbf{L}_2\mathbf{A}_{12})$, определяющей скорость схождения переменных наблюдателя к переменным состояния системы, где $\mathbf{e}_y = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}$ и $\mathbf{e}_{x_1} = \mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1$ – ошибки восстановления выходных переменных и неизмеряемых переменных состояния, $\hat{\mathbf{x}}_1 \in R^{n-m}$ – вектор оценок неизмеряемых переменных состояния.

Применение асимптотического идентификатора (наблюдателя) состояния (14) для реализации адаптивной системы с параметрической настройкой при 16-и кратном изменении параметров упругого электромеханического объекта приводит к её неработоспособности, а применение идентификатора состояния со скользящими режимами (24) позволяет сохранить качество переходных процессов на удовлетворительном уровне.

В пятой главе представлена математическая модель процесса непрерывного измерения коэффициента сцепления вдоль взлётно-посадочной полосы, разработанная на основе математической модели Бурхарда распределения располагаемого (максимального) коэффициента сцепления с дополнительным введением шума с нормальным распределением вероятности. Модель Бурхарда имеет следующую форму

$$\mu_{\text{RES}}(S) = \left(C_1(1 - e^{-C_2 S}) - C_3 S \right),$$

где C_1 – коэффициент, равный максимальному коэффициенту сцепления, C_2 – коэффициент, рассчитываемый из уравнения $C_2 \cdot e^{-C_2 S} = \frac{C_3 \cdot 100}{C_1}$, $C_3 = \mu_{\text{max}} - \mu_{\text{block}}$ – коэффициент, учитывающий падение коэффициента сцепления от максимума до коэффициента сцепления при полной блокировке колеса.

С использованием математической модели взлётно-посадочной полосы и модели электромеханического имитатора с адаптивным управлением с параметрической настройкой было проведено средствами математического моделирования исследование влияния режимов торможения измерительного колеса на результаты измерения коэффициента сцепления, которое продемонстрировало изменение в пределах от 96% до 30% измеренных (эффективных) значений коэффициента сцепления при вариации параметров антиблокировочных режимов торможения измерительного колеса.

Для проведения полунатурных исследований на базе испытательного стенда с управляемой «бегущей дорожкой», показанного на рис. 5, было разработано программное обеспечение микроконтроллерной реализации адаптивной системы управления электромеханическим имитатором антиблокировочных режимов торможения.

Результаты полунатурных исследований подтвердили результаты исследования моделированием, продемонстрировав изменение измеренных (эффективных) значений коэффициента сцепления с выбранными антиблокировочными режимами торможения измерительного колеса в пределах от 98% до 48%.



Рис. 5 – Исследовательский стенд с установленной на нём подвеской имитатора тормозных режимов

Указанные исследования, проведённые в диссертации, подтвердили правомерность выдвинутого подхода к измерению коэффициента сцепления ВПП, базирующегося на прокатывании измерительного колеса с антиблокировочными режимами торможения, что обеспечивает корреляцию результатов измерения коэффициента сцепления с реальными характеристиками торможения колёс приземляющихся воздушных судов.

Заключение. В диссертационной работе осуществлена заявленная цель и решены все поставленные задачи по теоретическому и экспериментальному обоснованию подхода к измерениям коэффициента сцепления ВПП, коррелирующих с реальными тормозными характеристиками колёс приземляющихся воздушных судов.

Публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Игнатьев К.В. / Упрощенные адаптивные системы управления нелинейными многостепенными механическими объектами, построенные по методу вычисленного момента / Путов В.В., Путов А.В., Игнатьев К.В., Русяев Н.А. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб.: 2014. – Вып.3. – С.54-59
2. Игнатьев К.В. / О работоспособности адаптивных систем управления нелинейными механическими объектами, построенными по их упрощенным моделям с мажорирующими функциями / Путов В.В., Путов А.В., Игнатьев К.В., Копычев М.М., Нгуен Тиен Тханг // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб.: 2014. – Вып.7. – С.54-59
3. Игнатьев К.В. / Применение генетических алгоритмов для расчёта беспоисковых адаптивных систем / Путов В.В., Игнатьев К.В. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб.: 2016. – (в печати)

Свидетельства регистрации программы ЭВМ:

4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. В.В. Путов, В.Н. Шелудько, А.В. Путов, В.П. Казаков, Е.В. Друян, К.В. Игнатьев Программа управления двухмассовым упругим стендом. // № 2012660851 от 29.10.2012
5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. В.В. Путов, А.В. Путов, Н.А. Русяев, В.П. Казаков, Е.В. Друян, М.М. Копычев, К.В. Игнатьев Виджеты для программы управления двухмассовым упругим стендом. // №2014614674 от 06.05.2014
6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. В.В. Путов, А.В. Путов, Н.А. Русяев, В.П. Казаков, Е.В. Друян, М.М. Копычев, К.В. Игнатьев Графический интерфейс программы управления двухмассовым упругим стендом. // №2014614675 от 06.05.2014
7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. А.Д. Стоцкая, В.В. Путов, А.В. Путов, К.В. Игнатьев, М.М. Копычев Нейросетевой регулятор на основе многослойной полносвязанной нейронной сети. // №2015610011 от 12.01.2015
8. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. К.В. Игнатьев, В.В. Путов, А.В. Путов Программный комплекс классов для программы клиента удалённого доступа к стенду двухмассового упругого объекта. // №2014619704 от 19.09.2014

9. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. К.В. Игнатьев, В.В. Путов, А.В. Путов, Е.В. Друян Программа-клиент удалённого доступа к стенду двухмассового упругого объекта. // №2014619369 от 15.09.2014

10. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. К.В. Игнатьев, В.В. Путов, М.М. Копычев, Н.А. Русяев Программа сервер удалённого доступа к двухмассовому упругому стенду. // №2014619371 от 15.09.2014

Другие статьи и материалы конференций:

11. K.V. Ignatiev On correlation between the airport runway friction coefficient measurement results and the real-life aircraft take-off and landing braking characteristics [Text] // V.V. Putov, A.V. Putov, V.N. Sheludko, V.P. Kazakov, A.D. Stotckaia, M.M. Kopichev, K.V. Ignatiev // The proceedings of the XVIII International conference on soft computing and measurements SCM`2015, Saint Petersburg, May 19–21, 2015. – 2015

12. K.V. Ignatiev Electromechanical imitator of antilock braking modes of wheels with pneumatic tire and its application for the runways friction coefficient measurement // K.V. Ignatiev, M.M. Kopichev, A.V. Putov, V.V. Putov, A.D. Stotckaia // Proceedings of International conference on nonlinear problems in aviation and aerospace WORLD CONGRESS 2016

13. K.V. Ignatiev On the Efficiency of Adaptive Control Systems of Nonlinear Control Object with the Uncertainties and Incomplete Measuring // V.V. Putov, A.V. Putov, K.V. Ignatiev, A.D. Stotckaia, E.V. Druian // Proceedings of the 2015 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2015 ElConRusNW). February 2-4, 2015. ISBN 978-1-4799-7305-7. p.p.244-248

14. K.V. Ignatiev Elevator Car Resilient Oscillations Suppression Control System // Zaskalnyuk N.S., Putov V.V., Ignatiev K.V., Rusyaeva T.L., Kopichev M.M. // Proceedings of the 2015 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2015 ElConRusNW). February 2-4, 2015. ISBN 978-1-4799-7305-7. p.p.283-289

15. K.V. Ignatiev Neural network control system for two-mass elastic electromechanical system // V.V. Putov, A.V. Putov, K.V. Ignatiev, M.M. Kopichev // The proceedings of the XVIII International conference on soft computing and measurements SCM`2015, Saint Petersburg, May 19–21, 2015. – 2015

16. K.V. Ignatiev Adaptive control system with parameter tuning for double mass elastic electromechanical system // Proceedings of International Scientific Symposium "Automated Systems and Technologies", Hannover, 2016

17. Игнатьев К.В. / Управление автономным асинхронным генератором при переменной скорости вращения / Игнатьев К.В., Копычев М.М., Путов А.В., Русяев Н.А. // 68-я научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава университета СПб ГЭТУ «ЛЭТИ»: Сб. докл. студентов, аспирантов и молодых учёных. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ. 2015. С.168-172