

На правах рукописи

КАПУСТИН Михаил Юрьевич



**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРИЦЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ
ПОЕЗДА**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (транспорт)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» МГУПС (МИИТ) на кафедре «Тяговый подвижной состав».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Абрамов Валерий Михайлович

доктор технических наук, профессор
Космодамианский Андрей Сергеевич

Официальные оппоненты: Долгий Игорь Давидович,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте»;

Никифорова Нина Борисовна,
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», комплексное отделение «Тяговый подвижной состав», ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (ОАО «ВНИКТИ»)

Защита диссертации состоится «27» апреля 2015 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 218.005.04 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» по адресу: 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУПС (МИИТ) и на сайте <http://www.miit.ru>.

Автореферат разослан «26» февраля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 218.005.04
доктор технических наук, профессор



В.Г. Сидоренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные условия динамичного экономического роста страны открывают качественно новые возможности для инновационного развития железнодорожной отрасли, наращивания объемов перевозок, повышения надежности и качества работы всей структуры. Однако, данное развитие невозможно без обеспечения безопасности движения поездов на высоком уровне. Актуальна проблема обеспечения безопасности движения поездов на тупиковых приемоотправочных путях пассажирских станций. Автоматизация ответственных процессов управления поездом, за счет внедрения систем автоматического управления (САУ), в частности САУ тормозами поезда, позволит повысить безопасность движения, в том числе на тупиковых путях.

Торможение поезда – сложный и неоднозначный процесс, в котором тормозная сила зависит от множества факторов (состояние тормозных средств поезда, погодные условия, взаимодействие колеса и рельса и др.). Известно, что априорной информации (нажатие тормозных колодок, коэффициент трения колодки о колесо, масса поезда, время срабатывания воздухораспределителей и наполнения тормозных цилиндров и др.) об объекте управления (поезде) недостаточно. В таких случаях, для автоматизации процесса управления, целесообразно применять адаптивные САУ, построенные на микропроцессорной базе. Перед адаптивной системой автоматического управления прицельным электропневматическим торможением поезда (САУЭПТ), которая относится к классу терминальных, ставится задача управления, с целью обеспечения конечного фазового состояния объекта $S = S_k$ и $V = V_k$, где S и V – текущие значения соответственно оставшегося расстояния до точки прицельной остановки и фактической скорости. Поэтому, отыскание закона управления суммарной замедляющей силой, при автоматическом управлении тормозами, с учетом переходных процессов в тормозной системе поезда и её особенностей, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Теоретические основы автоматизации управления поездом проработаны достаточно полно, однако с развитием микропроцессорной техники появилась возможность разрабатывать САУ, способные реализовывать сложные законы управления, в том числе адаптивные.

Значительный вклад в развитие научной основы для решения задач автоматизации процессов управления железнодорожным подвижным составом (ПС) внесли такие видные ученые и инженеры, как Абрамов В.М., Астрахан В.И., Баранов Л.А., Бестемьянов П.Ф., Брылеев А.М., Ветлугин Б.И., Головин В.И., Головичер Я.М., Гребенюк П.Т., Ерофеев Е.В., Кравцов Ю.А., Лисенков В.М., Лисицын А.Л., Максимов В.М., Мугинштейн Л.А., Никифоров Б.Д., Осипов С.И., Плакс А.В., Розенберг Е.Н., Савоськин А.Н., Шалягин Д.В. и др. В разработанных САУ тормозами поезда задача управления решалась при статистической оценке эффективности тормозов, т.е. после реализации нескольких торможений. Быстродействие современных вычислительных и измерительных микропроцессорных устройств позволяет производить достоверную оценку действительного тормозного коэффициента в режиме реального времени, уже на начальной стадии каждого, в отдельности взятого торможения.

Цели и задачи. Целью диссертации является разработка системы автоматического управления электропневматическими тормозами (ЭПТ) поезда для обеспечения заданной погрешности прицельной остановки, техническая реализация САУЭПТ с учетом требований функциональной безопасности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ САУ прицельным торможением поезда, показать преимущества адаптивных САУЭПТ и возможность их реализации.

2. Разработать функциональную схему адаптивной САУЭПТ и структурную схему системы торможения и прицельной остановки моторвагонного подвижного состава (МВПС) перед тупиковой призмой и у платформы (СТОП-Э).

3. Выбрать закон управления ЭПТ, учитывающий неполную априорную информацию об объекте управления и переходные процессы в тормозной системе.

4. Определить параметры адаптивной САУЭПТ, для чего разработать имитационную модель и провести имитационные эксперименты.

5. С целью формирования начальной фазовой координаты S_n организовать беспроводный канал передачи данных с пути на ПС, с учетом требований функциональной безопасности. Оценить погрешность позиционирования поезда при применении технологии радиочастотной

идентификации (RFID - *Radio Frequency IDentification*).

6. Выработать решение по обеспечению функциональной безопасности интегрированной системы «машинист – САУЭПТ».

7. Технически реализовать СТОП-Э и в условиях эксплуатации провести экспериментальные исследования, сформулировать рекомендации по внедрению.

Научная новизна:

1. Решена обратная задача установления зависимости действительного тормозного коэффициента $\widehat{\vartheta}_d$ от давления в тормозном цилиндре $p_{\text{ТЦ}}$ (ТЦ) $\widehat{\vartheta}_d = \widehat{\vartheta}_d(p_{\text{ТЦ}})$ методом регуляризации Тихонова. Найденное решение однозначно идентифицирует объект управления, что обеспечивает возможность построения адаптивной САУЭПТ.

2. Предложен адаптивный закон управления ЭПТ, позволяющий при недостатке априорной информации об объекте управления реализовать требования, предъявляемые к САУЭПТ.

3. Разработана процедура определения начальной фазовой координаты S_n , с применением технологии RFID, обеспечивающая допустимую погрешность при выполнении требований функциональной безопасности, предъявляемых к САУЭПТ.

4. Исследована функциональная безопасность интегрированной системы «машинист – САУЭПТ». Доказано, что требуемый уровень функциональной безопасности обеспечивается при построении САУЭПТ с двухканальной структурой.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны математическая модель, адекватно описывающая процесс прицельного торможения, и процедура оценки эффективности ЭПТ.

2. Экспериментальные исследования доказывают реализуемость двухканальной структуры адаптивной САУЭПТ.

3. Доказано, что двухканальная структура САУЭПТ в интегрированной системе «машинист – САУЭПТ» обеспечивает требования функциональной безопасности.

4. Определены диапазоны изменения параметров САУЭПТ,

обеспечивающие выполнение требований, предъявляемых к системе.

5. Разработана функциональная схема адаптивной САУЭПТ с настраиваемой моделью.

6. Разработана структурная схема СТОП-Э. Натурные испытания СТОП-Э подтвердили реализуемость заявленных требований по выбранным критериям качества управления.

7. Процедура оценки эффективности ЭПТ в режиме реального времени может быть использована в современных и вновь разрабатываемых САУ тормозами поезда, в том числе для обеспечения безопасности движения, а также в системах автоматизированного или автоматического ведения поезда.

Методология и методы исследования. В работе использовались методы теории автоматического управления, теории терминального управления, теории электрической тяги, математического моделирования, теории адаптивных систем управления, теории кодирования, теории надежности и натурные испытания.

Положения, выносимые на защиту:

1. Принципы построения адаптивной САУЭПТ и её реализация:
1) Идентификация ЭПТ при движении в режиме электропневматического торможения; 2) Релейный закон управления; 3) Построение СТОП-Э с двухканальной структурой; 4) Многократный приём информации от одного кодового напольного датчика (КНД) и избыточность информации при определении начальной фазовой координаты S_n .

2. Разработанная математическая модель движения электропоезда в режиме торможения позволяет идентифицировать ЭПТ по результатам измерений $(s, v, p_{тц})$, проведенных при первой ступени торможения. Методом регуляризации Тихонова решается обратная задача идентификации тормозной системы, устанавливая зависимость $\widehat{\vartheta}_d(p_{тц})$.

3. Релейный закон адаптивного управления ЭПТ, обеспечивающий прицельную остановку МВПС с погрешностью не превышающей ± 3 м.

4. Использование в интегрированной системе «машинист - САУЭПТ» адаптивной САУЭПТ с двухканальной структурой обеспечивает требуемый уровень функциональной безопасности.

5. Технология RFID полноценно обеспечивает САУЭПТ информацией о начальной фазовой координате $S_{н\bar{}}$, удовлетворяя установленным требованиям к погрешности позиционирования поезда и функциональной безопасности.

6. Результаты натурных испытаний системы торможения и прицельной остановки МВПС перед тупиковой призмой и у платформы (СТОП-Э) соответствуют требованиям по точности автоматической прицельной остановки и функциональной безопасности, предъявляемым к САУЭПТ.

Достоверность результатов подтверждается корректностью исходных математических положений и обоснованностью принятых допущений, а также допустимым различием результатов моделирования с результатами, полученными в реальных условиях эксплуатации.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических советах в ЗАО «ОЦВ» (2008–2014 гг.); на заседаниях кафедры «Тяговый подвижной состав» РОАТ (МИИТ) (2008–2015 гг.); на конференциях X, XI, XII «Безопасность движения поездов» (Москва, 2009–2011 гг.); на заседаниях секции «Железнодорожный транспорт» Российской инженерной академии (2009–2013 гг.); на международной конференции «Trans-Mech-Art-Chem» (Москва, 2010 г.); на научно-технических советах в Департаменте технической политики и в Департаменте пассажирских сообщений ОАО «РЖД» (2009–2015 гг.); на 3-й научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование – ИСУЖТ-2014» (Москва, 2014 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 13 печатных работ, из них 3 в изданиях рекомендованных ВАК для публикаций результатов исследований; получены 3 патента РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка иллюстративного материала, и приложения. Объём диссертации 99 стр. основного текста, 19 стр. рисунков, 3 таблицы, 15 стр. приложение. Список литературы включает 112 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы обеспечения безопасности движения на тупиковых путях пассажирских станций, сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

В первой главе обоснована актуальность задачи автоматизации прицельного торможения, как одного из ответственных процессов управления поездом, и показана необходимость развития теории построения адаптивных САУ тормозами поезда и поиска практических путей их реализации. Учитывая особую важность решения обозначенной проблемы в пригородном движении, в работе сделан акцент на формирование методологической основы создания адаптивной САУЭПТ для МВПС.

Во второй главе выбраны критерии качества управления прицельным электропневматическим торможением. Разработана функциональная схема САУЭПТ (рисунок 1), которая является самонастраивающейся, беспойсковой САУ с настраиваемой моделью. Задающее устройство (ЗУ) независимо от машиниста формирует и передает в суммирующее устройство (СУ) начальную фазовую координату S_n . СУ формирует текущую фазовую координату S_ϕ , определяющую расстояние до прицельной точки останова. Настраиваемая модель (НМ) на основе значений давления в ТЦ $p_{ТЦ}^*$ и фактической скорости V_ϕ^* , измеренных датчиком давления (ДДИ), датчиком пути и скорости (ДПС), формирует оценку действительного тормозного коэффициента $\widehat{\vartheta}_d(p_{ТЦ})$. Программный блок управления (ПБУ), получив зависимость $\widehat{\vartheta}_d(p_{ТЦ})$, а также S_ϕ , V_ϕ^* и $p_{ТЦ}^*$, формирует управляющее воздействие u , передаваемое системой на исполнительное устройство (ИУ), которое изменяет управляющее воздействие $p_{ТЦ}$ на объект управления (ОУ) – поезд.

На основе функциональной разработана структурная схема СТОП-Э (рисунок 2), которая имеет два независимых идентичных вычислителя (вычислитель 1 и вычислитель 2), со своими базами данных (БД1 и БД2). От бортового считывателя (БСЧ) с антенной (А) по интерфейсу CAN вычислители получают номер считанного КНД, установленного в известной точке пути. По номеру КНД вычислители из своих баз данных вызывают пакет информации.

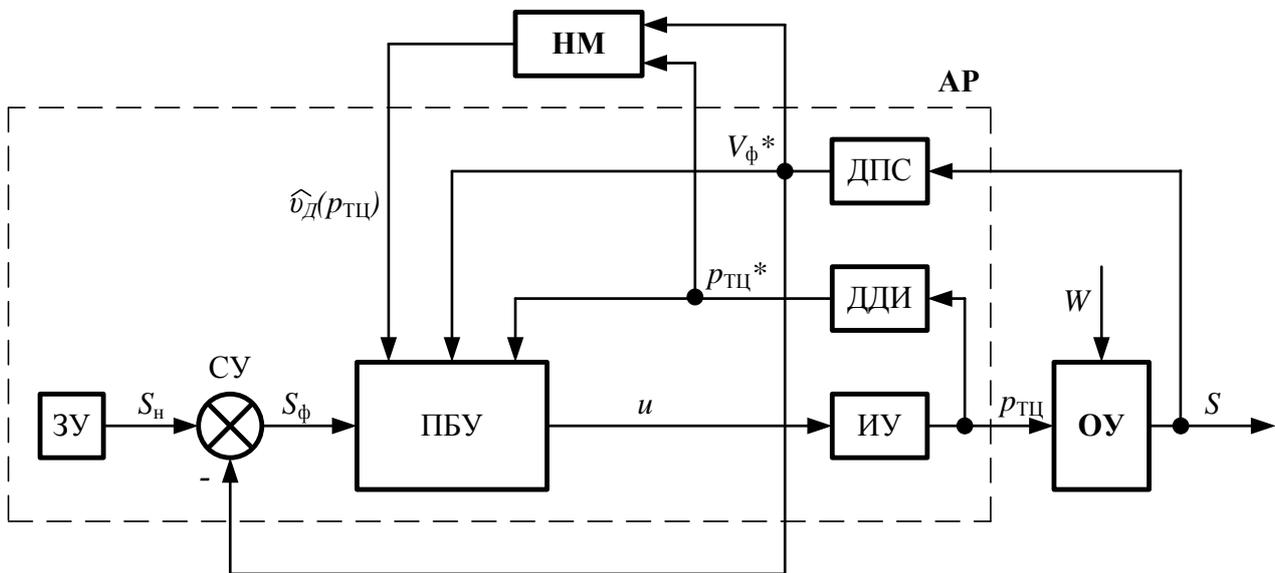


Рисунок 1 Функциональная схема САУЭПТ

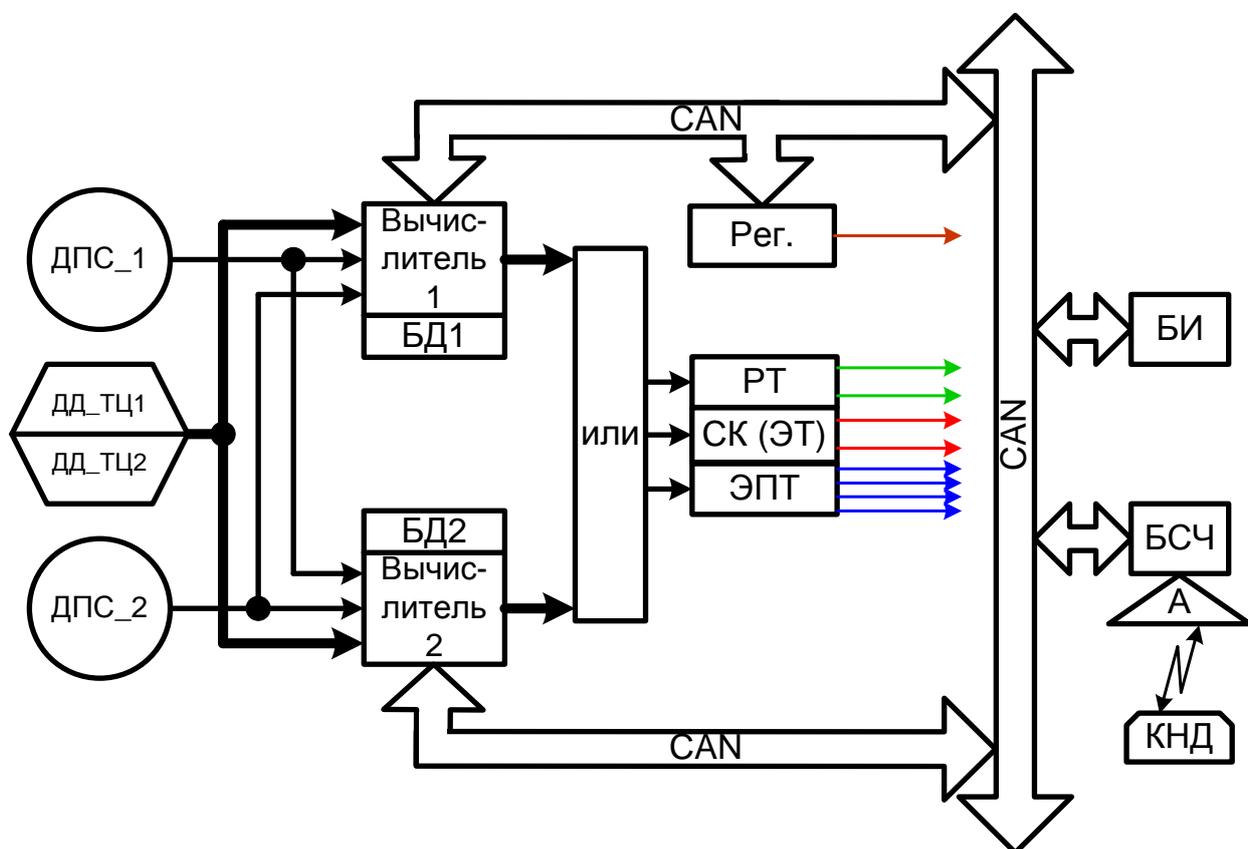


Рисунок 2 Структурная схема СТОП-Э

Каждый вычислитель независимо получает информацию о пройденном пути от ДПС1 и ДПС2 и давлении в ТЦ от ДД ТЦ 1 и ДД ТЦ 2, при этом принимаются наибольшие значения, что обусловлено требованиями функциональной безопасности. Управляющий сигнал от каждого вычислителя передается на электропневматические вентили ЭПТ (ЭПТ), срывной клапан ЭПК (СК) и разбор цепи тяги (РТ). Выбор управляющей команды (ИЛИ) по условиям безопасности

построен так, что высоким приоритетом обладает команда на торможение, низким – отпуск, средним – перекрыша. Поэтому, работа исправного вычислителя может быть нарушена неисправным только с усилением тормозной силы, что отвечает требованиям функциональной безопасности. Для дополнительного обеспечения безопасной работы СТОП-Э модуль безопасности (МБ) периодически тестирует вычислители и при выходе из строя активного выключает его и включает в работу второй, находящийся в горячем резерве. Аппаратная безопасность МБ обеспечивается схемотехническими решениями.

В третьей главе предложена математическая модель объекта управления – электропоезда, учитывающая наличие двух типов вагонов (прицепной и моторный) с различным нажатием тормозных колодок на колесо:

$$\widehat{\vartheta}_D = \frac{A_1 p_{\text{ТЦ}}^3 + B_1 p_{\text{ТЦ}}^2 + C_1 p_{\text{ТЦ}} + D_1}{B'_1 p_{\text{ТЦ}}^2 + C'_1 p_{\text{ТЦ}} + D'_1}, \quad (1)$$

где $A_1, B_1, C_1, D_1, B'_1, C'_1, D'_1$ – коэффициенты, учитывающие параметры тормозных средств электропоезда;

$p_{\text{ТЦ}}$ – давление в тормозном цилиндре.

Действительный тормозной коэффициент $\widehat{\vartheta}_D$ представляется в виде функции $\widehat{\vartheta}_D(p_{\text{ТЦ}})$. Таким образом, для автоматического управления ЭПТ необходима оценка $\widehat{\vartheta}_D$. Его величина, как следует из (1), определяется в зависимости от коэффициентов $A_1, B_1, C_1, D_1, B'_1, C'_1, D'_1$, которые не зависят от V , а зависят от недоступных для прямого измерения величин (нажатие тормозных колодок, коэффициент трения колодки о колесо, масса электропоезда), влияющих на процесс торможения.

Разделив числитель и знаменатель на D'_1 выражение (1) примет вид:

$$\widehat{\vartheta}_D = A_2 p_{\text{ТЦ}}^3 + B_2 p_{\text{ТЦ}}^2 + C_2 p_{\text{ТЦ}} + D_2 - B'_2 p_{\text{ТЦ}}^2 \widehat{\vartheta}_D - C'_2 p_{\text{ТЦ}} \widehat{\vartheta}_D, \quad (2)$$

Для установления явной зависимости $\widehat{\vartheta}_D(p_{\text{ТЦ}})$ необходимо решить обратную задачу, при этом зашумленность сигнала и погрешность квантования переводит её в область некорректных.

При каждом изменении $p_{\text{ТЦ}}$ определяется изменение фактической скорости ΔV и пройденного пути ΔS за заданный промежуток времени. По этим данным

производится оценка $\widehat{\vartheta}_D$, порядок которой будет приведён ниже. Подставляя в (2) определенные значения $(p_{TЦk}, \vartheta_{Dk})$, получим систему линейных уравнений, записанную в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \vartheta_{D1} \\ \vartheta_{D2} \\ \vdots \\ \vartheta_{Dn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{TЦ1}^3 & p_{TЦ1}^2 & p_{TЦ1} & 1 & -p_{TЦ1}^2 \vartheta_{D1} & -p_{TЦ1} \vartheta_{D1} \\ p_{TЦ2}^3 & p_{TЦ2}^2 & p_{TЦ2} & 1 & -p_{TЦ2}^2 \vartheta_{D2} & -p_{TЦ2} \vartheta_{D2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{TЦn}^3 & p_{TЦn}^2 & p_{TЦn} & 1 & -p_{TЦn}^2 \vartheta_{Dn} & -p_{TЦn} \vartheta_{Dn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix}, \quad (3)$$

Система (3) может быть записана в виде:

$$\overline{\vartheta}_D = F \cdot \bar{X}, \quad (4)$$

где F – матрица экспериментальных данных;

\bar{X} – вектор параметров, подлежащих оценке $(A_2, B_2, C_2, D_2, B'_2, C'_2)$.

Система уравнений (3) является переопределенной и для ее решения, методом регуляризации Тихонова, необходимо найти такой вектор \bar{X} , чтобы выполнялись два условия: условие минимизации невязки и условие минимизации нормы решения. Такой подход позволяет получить обоснованное решение при полноценном использовании информации, заключенной во всех уравнениях системы (3). Таким образом, задача решения системы линейных уравнений (3) заменяется задачей отыскания условного минимума функции, которая решается методом неопределенных множителей Лагранжа:

$$\|F \cdot \bar{X} - \overline{\vartheta}_D\|_{L_2}^2 + \alpha \|\bar{X}\|_{L_2}^2 = \min_{\bar{X}}, \quad (5)$$

где α – малый положительный параметр регуляризации.

Параметр регуляризации $\alpha = 10^{-4} \div 10^{-3}$ определен способом подбора, на основе проанализированных расшифровок регистрации поездок при управлении тормозами электропоезда машинистами и проверен в экспериментальных поездках.

Из условия (5) вытекает уравнение Тихонова:

$$F^T \overline{\vartheta}_D = (F^T F + \alpha E) \widehat{\bar{X}}, \quad (6)$$

где E – единичная матрица;

$\widehat{\bar{X}}$ – нормальное псевдорешение.

Регуляризованное решение уравнения (6) дает оценку:

$$\widehat{X} = (F^T F + \alpha E)^{-1} F^T \overline{\vartheta}_D, \quad (7)$$

Получив оценку \widehat{X} , расчет прицельного торможения проводится с учетом полученной явной зависимости (2) для $\widehat{\vartheta}_D(p_{TЦ})$. Тогда, учитывая расчетный коэффициент трения тормозной колодки о колесо $\varphi_{кр}(V)$, удельная тормозная сила b_T будет определяться следующей зависимостью:

$$b_T = \widehat{\vartheta}_D(p_{TЦ}) \varphi_{кр}(V), \quad (8)$$

Основное удельное сопротивление движению электропоезда в режиме торможения $w_{0x}(V)$ во всем скоростном диапазоне $0 \div 130$ км/ч не превышает 6 Н/кН, что много меньше реализуемой удельной тормозной силы b_T . Следовательно, w_{0x} незначительно влияет на процесс торможения, более того с уменьшением скорости, w_{0x} снижается, а b_T значительно увеличивается. Таким образом, в процессе одного торможения принимаем w_{0x} равной рассчитанному значению для начальной скорости торможения. Удельное сопротивление движению поезда от уклона при одном торможении, учитывая спрямление профиля пути, принимаем $w_i = \text{const}$. Решая дифференциальное уравнение движения поезда с учетом (8), рассчитываем зависимость:

$$S = \frac{1}{\zeta} \int_0^V \frac{V dV}{\widehat{\vartheta}_D(p_{TЦ}) \varphi_{кр}(V) + w_{0x} \pm w_i} \approx \frac{V^2}{\beta \zeta \widehat{\vartheta}_D}, \quad (9)$$

где β – коэффициент, получаемый при интегрировании (9), с учетом зависимости $\varphi_{кр}(V)$, при постоянных w_{0x} и w_i .

Управление можно обеспечить, используя стабилизацию величины замедления около некоторого постоянного значения.

$$\widehat{\vartheta}_D = \frac{V^2}{\beta \zeta S}, \quad (10)$$

Устанавливая значения $p_{TЦ}$ из ряда значений давления (выбор очередной ступени торможения) и используя построенную зависимость $\widehat{\vartheta}_D = \widehat{\vartheta}_D(p_{TЦ})$, релейный закон управления давлением в ТЦ будет иметь вид:

$$\begin{cases} p_{\text{ТЦ } k+1} = (p_{\text{ТЦ } k} + \Delta p_{\text{ТЦ}}), \widehat{\vartheta}_D(p_{\text{ТЦ } k}) < \frac{V^2}{\beta \zeta S} \\ p_{\text{ТЦ } k+1} = p_{\text{ТЦ } k}, \widehat{\vartheta}_D(p_{\text{ТЦ } k-1}) \leq \frac{V^2}{\beta \zeta S} \leq \widehat{\vartheta}_D(p_{\text{ТЦ } k}) \\ p_{\text{ТЦ } k+1} = (p_{\text{ТЦ } k} - \Delta p_{\text{ТЦ}}), \frac{V^2}{\beta \zeta S} < \widehat{\vartheta}_D(p_{\text{ТЦ } k} - \Delta p_{\text{ТЦ}}) \end{cases}, \quad (11)$$

Алгоритм управления прицельным электропневматическим торможением электропоезда включает в себя три фазы:

1-я фаза – определение точки начала торможения $V = \sqrt{2a_{\text{з пр}}S}$;

2-я фаза – идентификация ЭПТ $\widehat{\vartheta}_D = \widehat{\vartheta}_D(p_{\text{ТЦ}})$;

3-я фаза – выход на кривую торможения с целью прицельной остановки.

На основе определенной явной зависимости $\widehat{\vartheta}_D = \widehat{\vartheta}_D(p_{\text{ТЦ}})$, решение об изменении давления в ТЦ принимается согласно релейному закону управления (11), с принятым из опытных поездок шагом по давлению $\Delta p_{\text{ТЦ}} = 0,03$ МПа.

Для исследования статики и динамики нелинейной системы САУЭПТ выбран метод имитационного моделирования. В разработанной имитационной модели САУ ЭПТ реализована возможность изменять (в том числе случайным образом) в известных, адекватных эксплуатационным, пределах следующие параметры: загрузка электропоезда ($0 \div 200$ т с шагом 20 т), начальная фактическая скорость ($5 \div 130$ км/ч с шагом 5 км/ч), начальное значение давления в ТЦ ($0 \div 0,38$ МПа с шагом 0,02 МПа), значение расчетного тормозного коэффициента ($0,49 \div 0,65$ с шагом 0,02). Основное и дополнительное сопротивление движению поезда изменялись согласно ПТР. Погрешность измерения скорости варьировалась случайным образом в пределах характеристик штатных измерителей скорости, применяемых на ПС.

При имитационном моделировании для отладки алгоритмов управления в модель закладывались значения $\widehat{\vartheta}_D(p_{\text{ТЦ}})$, определённые из кривых $S(t)$, $V(t)$, $p_{\text{ТЦ}}(t)$ реальных торможений выполняемых машинистами, которые были получены при обработке файлов регистрации параметров движения электропоезда.

В четвертой главе представлено обоснование применения технологии RFID для решения задач позиционирования поезда и организации беспроводного

канала передачи данных с пути на ПС, обосновано применение двухканальной структуры САУЭПТ и доказана возможность реализации высоких показателей функциональной безопасности в интегрированной системе «машинист - САУЭПТ».

Применение технологии RFID заключается в размещении считывающего устройства на ПС, а на пути, в известных точках, RFID – меток (кодовые напольные датчики (КНД)), с уникальными номерами. При этом информация, привязанная к уникальным номерам КНД, хранится в базе данных на ПС. Разрядность уникального номера КНД не менее 30 бит. Для обеспечения требуемого уровня вероятности трансформации кода $P_{тр} \leq 10^{-10}$ минимальное кодовое расстояние должно быть не менее $d_{\min} = 6$. Выбран БЧХ-код (63,50), с учетом того, что его укорочение при уменьшении числа информационных символов не ухудшает показатели помехоустойчивости. При передаче данных манчестерским кодом количество считываний одного КНД увеличено до 18 раз, при скорости до 120 км/ч. Принято, что первая корректно принятая комбинация считается истинной. Отсюда показано, что вероятность отказа декодирования (подавления) при многократной передаче кода не превышает $P_{\text{под}}^{\text{общ}} \cong 10^{-22}$. Вероятность трансформации кода равная $P_{тр} = 0,6 \cdot 10^{-10}$ допустима по условиям функциональной безопасности.

Основным критерием работы САУ, реализующей прицельное торможение, является погрешность остановки поезда в заданной точке, которая существенно зависит от погрешности позиционирования поезда, поэтому в работе проведён анализ погрешности позиционирования при применении технологии RFID. Исследование этого вопроса было проведено экспериментально на действующем прямом двухпутном участке железнодорожного пути длиной 2000 м, на котором каждые 100 м в обоих направлениях были установлены 42 КНД. В качестве эталонного измерителя скорости была выбрана система высокоточного измерителя скорости и пройденного пути на основе СВЧ датчиков (ВИСП). СКО погрешности измерений ВИСП не превышает 0,2%. В ходе эксперимента на всем мерном участке электровоз двигался на выбеге. При этом значения пройденного пути фиксировались при считывании последующего КНД как расстояние от

первого до считанного КНД в последний момент времени. На рельсе на одной линии с КНД были установлены точечные магнитные излучатели, а на электровозе - чувствительный элемент. Сигнал от точечного магнитного излучателя колоколообразной формы, поэтому положение экстремума будет являться отсечкой прохождения точки установки излучателя и КНД.

В результате исследований при гауссовском распределении погрешностей модуль максимальной погрешности с вероятностью 0,997 не превышал 0,1 м, при скорости до 70 км/ч. Учитывая установленную при исследовании линейную зависимость погрешности от скорости, можно утверждать, что при скоростях до 120 км/ч погрешность позиционирования не превысит требуемых значений.

Анализ технологии прицельного торможения на тупиковых путях показал, что опасное событие - столкновение МВПС с тупиковой призмой, может наступить, если на дискретном множестве моментов времени $(t_i, t_{i+1}, \dots, t_{k-1}, t_k)$ машинист совершает ошибку с вероятностями $(q_i, q_{i+1}, \dots, q_{k-1}, q_k)$ (рисунок 3). С учетом параметра потока указанных нарушений безопасности

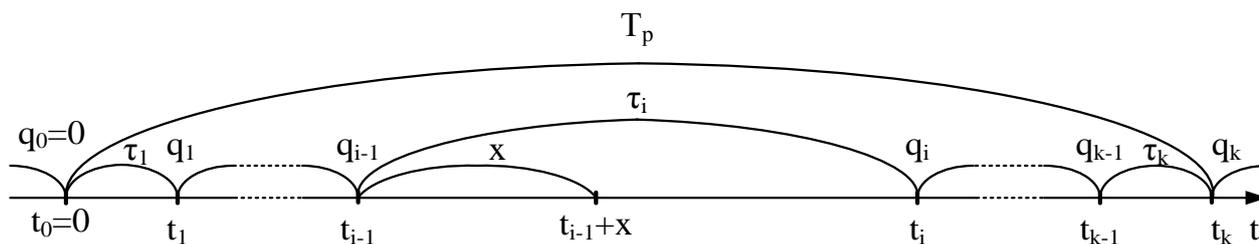


Рисунок 3 Временная диаграмма развития отказа интегрированной системы «машинист – САУЭПТ»

движения, вероятности ошибочных действий машиниста при каждом торможении, при общем числе запросов на эту функцию безопасности за три года $\nu \approx 10^6$ и времени затраченном на одно торможение на тупиковом пути $t_{\text{торм}} \sim 0,1$ ч интенсивность ошибок машиниста составит $\lambda_M = 10^{-5}$ (1/ч), что не отвечает даже первому уровню полноты функциональной безопасности. Это обстоятельство и определило необходимость использования САУЭПТ.

Рассмотрим интегрированную систему «машинист – САУЭПТ» и обозначим ее через S_1 , где САУЭПТ имеет одноканальную структуру, а S_2 – САУЭПТ имеет двухканальную структуру с идентичными каналами, один из которых находится в горячем резерве. Опасная ситуация при работе системы S_1

может возникнуть только тогда, когда последовательно на интервале времени $(t_0; t_k)$ произойдет единичный отказ САУЭПТ и на дискретном множестве моментов времени $(t_i, t_{i+1}, \dots, t_{k-1}, t_k)$ машинист совершит одну или несколько ошибок (см. рисунок 3). Представим процесс, протекающий в системе S_I , как Марковский случайный процесс с непрерывным временем и дискретными состояниями:

S_{I1} – САУЭПТ исправна и работает, машинист не ошибается;

S_{I2} – САУЭПТ неисправна, машинист не ошибается;

S_{I3} – **опасное событие**: САУЭПТ неисправна, машинист ошибается.

Граф состояний системы S_I представлен на рисунке 4, где λ_c – интенсивность потока отказов САУЭПТ, в работе принято $\lambda_c = 10^{-6} \div 10^{-7}$ 1/ч.

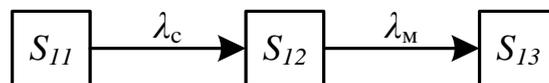


Рисунок 4 Граф состояний интегрированной системы «машинист – САУЭПТ», с системой S_I

Решив систему дифференциальных уравнений Колмогорова, составленную по графу состояний на рисунке 4, при несовместимых событиях $p_{11} + p_{12} + p_{13} = 1$ и начальных условиях: $p_{11}(0) = 1; p_{12}(0) = 0; p_{13}(0) = 0$ получим:

$$p_{13}(t) = 1 - e^{-\lambda_c t} - \frac{\lambda_c (e^{-\lambda_c t} - e^{-\lambda_M t})}{\lambda_M - \lambda_c} \quad (12)$$

Рассмотрим систему S_2 , которая отличается от первой S_I тем, что полный отказ САУЭПТ наступит тогда, когда откажут оба канала. Представим процесс, протекающий в системе S_2 , как Марковский случайный процесс с непрерывным временем и дискретными состояниями:

S_{21} – оба канала исправны, машинист не ошибается;

S_{22} – первый канал неисправен, второй - исправен, машинист не ошибается;

S_{23} – оба канала исправны, машинист ошибается;

S_{24} – второй канал неисправен, первый - исправен, машинист не ошибается;

S_{25} – первый канал неисправен, второй - исправен, машинист ошибается;

S_{26} – оба канала неисправны, машинист не ошибается;

S_{27} – второй канал неисправен, первый - исправен, машинист ошибается;

S_{28} – опасное событие: оба канала неисправны, машинист ошибается;

Граф состояний системы S_2 , с учетом, что каналы САУЭПТ идентичные ($\lambda_{c1} = \lambda_{c2} = \lambda_c$), примет вид, представленный на рисунке 5.

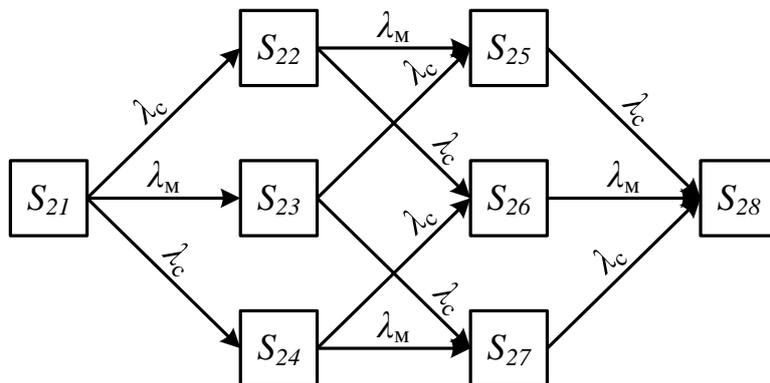


Рисунок 5 Граф состояний интегрированной системы «машинист – СТОП-Э», с системой S_2

Решив систему дифференциальных уравнений Колмогорова, составленную по графу состояний на рисунке 5, при несовместимых событиях $p_{21} + p_{22} + p_{23} + p_{24} + p_{25} + p_{26} + p_{27} + p_{28} = 1$ и начальных условиях: $p_{21}(0) = 1$; $p_{22}(0) = 0$; $p_{23}(0) = 0$; $p_{24}(0) = 0$; $p_{25}(0) = 0$; $p_{26}(0) = 0$; $p_{27}(0) = 0$; $p_{28}(0) = 0$ получим:

$$p_{28}(t) = 1 - e^{-(2\lambda_c + \lambda_M)t} - 2e^{-\lambda_c t} + e^{-2\lambda_c t} + 2e^{-(\lambda_c + \lambda_M)t} - e^{-\lambda_M t} \quad (13)$$

Подставляя в (12) и (13) период регенерации $T_p \sim 200$ ч, $\lambda_M = 10^{-5}$ (1/ч) и $\lambda_c = 10^{-6}$ (1/ч), получим соответственно $p_{13} \cong 10^{-7}$, и $p_{28} \cong 10^{-10}$. Из сравнения полученных результатов видно, что переход от S_1 к S_2 оправдан, при этом достигнут высокий (SIL4) уровень полноты функциональной безопасности.

Учитывая выражение (13) график функции $p_{28} = f(\lambda_M, \lambda_c, t)$ при $T_p = 200$ ч примет вид представленный на рисунке 6, где $L_M = \lambda_M$; $L_c = \lambda_c$; $p = p_{28}$. Плоскость $p = 10^{-9}$ ограничение, выше которого не обеспечивается функциональная безопасность. Таким образом, λ_M и λ_c , при $T_p = 200$ ч, могут принимать значения ниже указанной плоскости.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований качества управления прицельным торможением МВПС в эксплуатационных условиях на Октябрьской железной дороге и приведены результаты приёмочных испытаний СТОП-Э, которые доказывают возможность

технической реализации САУЭПТ, и подтверждают работоспособность и целесообразность массового внедрения СТОП-Э. Дана оценка эффективности внедрения САУЭПТ.

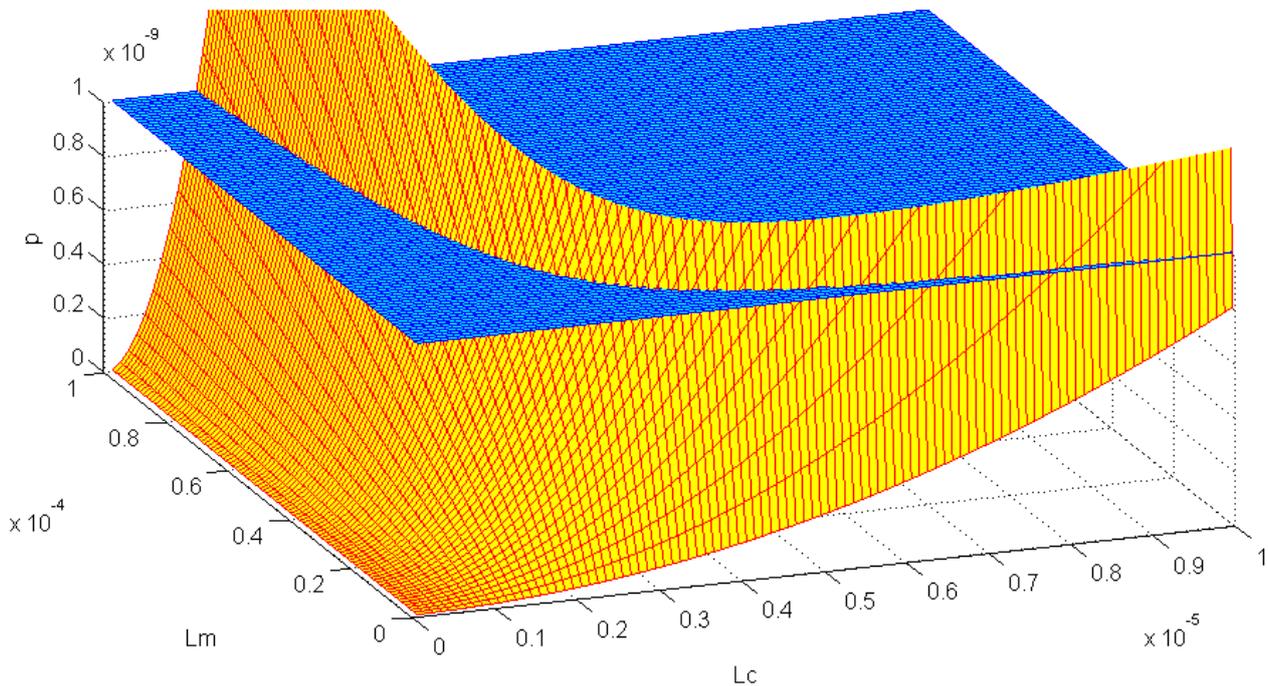


Рисунок 6 График функции $p_{28} = f(\lambda_m, \lambda_c, t)$, при $T_p = 200$ ч, с ограничительной плоскостью $p = 10^{-9}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача автоматизации управления ЭПТ. Разработана, изготовлена и подвергнута испытаниям в реальных условиях эксплуатации СТОП-Э, являющаяся технической реализацией адаптивной САУЭПТ. СТОП-Э обеспечивает заданную погрешность прицельной остановки МВПС, с учетом требований функциональной безопасности. Таким образом, решена актуальная проблема обеспечения безопасности движения при прибытии МВПС на тупиковые пути пассажирских станций и доказана возможность использования САУЭПТ для обеспечения прицельного торможения на станции в составе автоведения. В работе получены следующие основные результаты:

1. Автоматизация процесса прицельного торможения позволяет решить актуальную задачу повышения уровня безопасности движения на тупиковых путях пассажирских станций и у посадочных платформ. Анализ разработанных САУ прицельным торможением поезда показал необходимость использования

адаптивного управления, позволяющего изменять параметры закона управления, после идентификации объекта управления.

2. Определять эффективность тормозов МВПС, идентифицируя объект управления в режиме реального времени при первой и последующих ступенях торможения, стало возможным за счет применения метода регуляризации Тихонова, при решении обратной задачи. Это позволило выбрать релейный закон адаптивного управления ЭПТ, который, при недостатке априорной информации об объекте управления, обеспечивает требования предъявляемые к САУЭПТ.

3. Разработанная имитационная модель позволила провести эксперименты, в результате которых были отлажены алгоритмы управления ЭПТ, установлены значения погрешностей измеряемых и задаваемых параметров:

а) погрешность позиционирования МВПС при $V = 0 \div 60$ км/ч не более $\pm 0,5$ м, при $V = 61 \div 100$ км/ч не более ± 1 м, при $V > 100$ км/ч не более ± 2 м;

б) динамическая погрешность измерения фактической скорости 0,1 км/ч;

в) погрешность измерения давления в ТЦ 0,002 МПа. Установлена периодичность измерений параметров: давления – 50 мс, скорости – 500 мс и определено минимальное время для устойчивого срабатывания реле управления ЭПТ, установленных на МВПС – 0,3 с.

4. Технология RFID полноценно обеспечивает формирование начальной фазовой координаты S_n . Применяемые методы кодирования и передачи данных позволили увеличить количество считываний одного КНД до 18 раз, при скорости до 120 км/ч. Показано, что при многократной передаче кода вероятность отказа декодирования (подавления) снижена до $P_{\text{под}}^{\text{общ}} \cong 10^{-22}$. Вероятность трансформации кода равная $P_{\text{тр}} = 0,6 \cdot 10^{-10}$ допустима по условиям функциональной безопасности. Поставленный натурный эксперимент по оценке погрешности при позиционировании МВПС на основе технологии RFID показал, что при увеличении скорости погрешность возрастает и при скоростях до 70 км/ч с вероятностью 0,997 не превысит 0,1 м.

5. Сравнительный анализ одноканальной и двухканальной структур построения САУЭПТ показал обоснованность применения двухканальной структуры. Рассчитанная вероятность опасного отказа интегрированной системы

«машинист – САУЭПТ», при $\lambda_m = 10^{-5}$ (1/ч), $\lambda_c = 10^{-6}$ (1/ч), $T_p \sim 200$ ч, составляет $p_{28} \cong 10^{-10}$, что показывает возможность обеспечения высоких требований функциональной безопасности.

6. Экспериментальные исследования качества управления прицельным торможением МВПС подтвердили соответствие СТОП-Э выбранным критериям. При автоматическом управлении ЭПТ нарушения действующих инструкций не выявлены. СТОП-Э обеспечивала остановку МВПС с погрешностью не более ± 3 м, при начальных скоростях от 117 км/ч и ниже, на элементах профиля пути с различными уклонами. При имитации подъезда к тупиковой призме, в реальных условиях эксплуатации, погрешность остановки не превышала установленные значения: проезд прицельной точки остановки не более 1,5 м, недоезд – не более 5 м. Приёмочные испытания СТОП-Э подтвердили выполнение ею функции автоматического управления ЭПТ электропоезда. Прицельные торможения у посадочных платформ «Останкино» и «Рижская», а также при прибытии на 4-й тупиковый путь ст. Москва – пасс Октябрьская выполнены в штатном режиме. По результатам контрольной поездки с представителями ОАО «РЖД» СТОП-Э рекомендована к внедрению, в объёме установочной партии.

По отдельным положениям диссертации получены патенты РФ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Абрамов, В.М. Обеспечение надёжности и безопасности прицельного торможения подвижного состава на тупиковых путях станций [Текст] / В.М. Абрамов Б.Д. Никифоров, М.Ю. Капустин, А.Н. Капустин, А.Б. Чегуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 1. – С. 95–100.
2. Космодамианский, А.С. Адаптивная система управления прицельным электропневматическим торможением поезда [Текст] / А.С. Космодамианский, М.Ю. Капустин // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 3. – С. 65-68.
3. Капустин, М.Ю. Модель адаптивной системы прицельного электропневматического торможения электропоезда [Текст] / М.Ю. Капустин, С.И. Краснолобов, П.С. Саркисян // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 4. –

Другие работы, в которых опубликованы результаты диссертации:

4. Капустин, М.Ю. Автоматическая система регулирования давления в пневматической сети локомотива [Текст] / М.Ю. Капустин // Актуальные проблемы естествознания. Фундаментальная наука и транспорт : сборник тезисов докладов XXI Международной студенческой конференции. – М.: МИИТ, 2009. – С. 94–95.
5. Капустин, М.Ю. Обеспечение надёжности и безопасности прицельного торможения моторвагонного подвижного состава на тупиковых путях станций [Текст] / М.Ю. Капустин // Безопасность движения поездов : труды Десятой научно-практической конференции. – М.: МИИТ, 2009. – С. X-22.
6. Капустин, М.Ю. Построение и исследование структурной и функциональной схем интеллектуальной системы управления торможением на базе микропроцессорных устройств [Текст] / М.Ю. Капустин // Современные железные дороги: достижения, проблемы, образование : межвузовский сборник научных статей Выпуск 3 под общей редакцией канд. социол. наук, доц. В.В. Артемьевой. – Волгоград.: Волгоградское научное издательство, 2010. – С. 91-98.
7. Капустин, М.Ю. Проблема обеспечения безопасности движения поездов на тупиковых приёмоотправочных путях станций [Текст] / М.Ю. Капустин // TRANS-MECH-ART-CHEM : труды VII Международной научно-практической конференции. – М.: МИИТ, 2010. – С. 144–146.
8. Капустин, М.Ю. Экономическая и техническая эффективность внедрения интеллектуальной системы управления торможением (ИСУТ) и перспективы её развития [Текст] / М.Ю. Капустин // Безопасность движения поездов : труды Одиннадцатой научно-практической конференции. – М.: МИИТ, 2010. – С. XIV-54–XIV-55.
9. Капустин, М.Ю. Результаты эксплуатационных испытаний системы торможения и прицельной остановки МВПС перед тупиковой призмой и у платформы СТОП-Э [Текст] / М.Ю. Капустин // Безопасность движения поездов : труды Двенадцатой научно-практической конференции. – М.: МИИТ, 2011. – С. IX-7– IX-8.
10. Капустин, М.Ю. Использование технологии радиочастотной идентификации

для позиционирования поезда [Текст] / М.Ю. Капустин, А.С. Космодамианский // Актуальные проблемы транспорта на современном этапе : материалы международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Российской открытой академии транспорта. – М: МИИТ, 2011. – С. 25–30.

11. Капустин, М.Ю. Техническая и экономическая эффективность внедрения системы торможения и прицельной остановки МВПС перед тупиковой призмой и у платформы (СТОП-Э) [Текст] / М.Ю. Капустин // Актуальные проблемы транспорта на современном этапе : материалы международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Российской открытой академии транспорта. – М: МИИТ, 2011. – С. 57–58.

12. Капустин, М.Ю. Определение текущих значений фазовых координат поезда для решения задачи автоматизации процесса прицельного торможения [Текст] / М.Ю. Капустин // Локомотивы. XXI век : материалы II Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию начала отечественного тепловозостроения, 140-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора Я.М. Гаккеля, 205-летию образования Института Корпуса инженеров путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2014. – С. 67–70.

13. Капустин, М.Ю. Применение адаптивных систем управления для автоматизации процесса прицельного торможения электропоезда [Текст] / М.Ю. Капустин, А.С. Космодамианский // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование ИСУЖТ-2014 : труды третьей научно-технической конференции с международным участием. – М.: ОАО "НИИАС", 2014. – С. 127–130.

Патенты:

1. Пат. 95303 Российская Федерация, МПК В 61 L 3/20, Стенд для отладки и технологических испытаний системы прицельного торможения на тупиковых путях станций [Текст] / Абрамов В.М., Гаврилов Л.Б., Капустин М.Ю., Катанкин Р.А., Краснолобов С.И., Малахов С.В., Никифоров Б.Д., Правдолюбов А.Э., Саркисян П.С.; заявитель и патентообладатель ОАО "РЖД". – № 2010105273/22; заявл. 16.02.2010; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18. – 2 с. : ил.

2. Пат. 95850 Российская Федерация, МПК G 01 P 3/64, В 61 L 25/02, Система для определения ускорения и скорости движения местоположения и пройденного

пути подвижного состава [Текст] / Абрамов В.М., Гаврилов Л.Б., Дёжин Ю.И., Капустин М.Ю., Малахов С.В., Никифоров Б.Д., Соколов А.Н.; заявитель и патентообладатель ОАО "РЖД". – № 2010111373/22; заявл. 25.03.2010; опубл. 10.07.2010, Бюл. № 19. – 2 с. : ил.

3. Пат. 128712 Российская Федерация, МПК G 01 L 5/28, В 60 Т 17/08, Устройство определения эффективности тормозов подвижного состава [Текст] / Никифоров Б.Д., Краснолобов С.И., Капустин М.Ю.; заявитель и патентообладатель ОАО "РЖД". – № 2012156360/11; заявл. 25.12.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15. – 2 с. : ил.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве

В работе [1] – предложено техническое решение по предотвращению случаев столкновения ПС с тупиковой призмой, с применением технологии RFID, разработаны структурные схемы системы безопасности, в том числе с учетом требований функциональной безопасности, предложен подход при оценке уровня функциональной безопасности, в котором в совокупности рассматривается система «машинист – устройство безопасности», разработана и проанализирована временная диаграмма функционирования системы «машинист - устройство безопасности» и процесса развития в ней опасного отказа. В работе [2] – разработана функциональная схема адаптивной системы управления прицельным электропневматическим торможением поезда. В работе [3] – предложена математическая модель электропневматического торможения поезда, разработан алгоритм прицельного торможения, предложена методика оценки параметров, определяющих динамику торможения, описаны результаты моделирования адаптивной системы прицельного электропневматического торможения. В работе [10] – предложена классификация КНД, с соответствующим объемом информации и разработана методика размещения КНД на тупиковых станциях и на перегонах. В работе [13] – решена задача позиционирования, т.е. формирования на электропоезде его фазовой координаты, путем применения радиочастотной идентификации, разработана модель электропоезда и процедура идентификации объекта управления, разработана функциональная схема САУЭПТ.

Капустин Михаил Юрьевич

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРИЦЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ
ПОЕЗДА**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (транспорт)

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени

Кандидат технических наук

Подпись в печать

Формат 60x90/16

Тираж 80 экз.

Усл. печ. л. 1,5

Заказ №

127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, УПЦ Ги МИИТ