На правах рукописи

003458241

РОМАНЧИКОВ АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ КООРДИНАТНОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

05.22.08 – Управление процессами перевозок

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

22 ДЕК 2008

МОСКВА 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)» на кафедре «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте».

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор П.Ф. Бестемьянов

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Е.Н. Розенберг

кандидат технических наук,
профессор В.Б. Леушин

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения»

Защита диссертации состоится «24» декабря 2008 г. в 13.15 на заседании диссертационного совета Д 218.005.07 при Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ) по адресу 127994, г. Москва, ул. Образцова, д.15, ауд. 1504.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «20» ноября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор В.И. Шелухин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Системы управления движением поездов должны обеспечивать заданную безопасность перевозок, но вместе с тем они накладывают определенные ограничения на параметры перевозочного процесса и тем самым влияют на его эффективность. Совершенствование систем управления позволяет отдалять сроки ввода дополнительных параллельных путей на участках с растущим объемом перевозок.

В настоящее время на ряде направлений сети железных дорог, например в «транспортных коридорах» и в пригородных зонах больших городов, наблюдается стабильный рост объема перевозок. Между тем запас по пропускной способности многих линий фактически исчерпан. Поэтому в новых экономических, технологических и организационных условиях возникает задача определения рациональных в экономическом смысле методов повышения провозной способности железнодорожного транспорта.

На сегодняшний день регулирование движения поездов осуществляется с помощью систем автоблокировки (АБ), автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) и систем централизованного управления стрелками и сигналами на станциях (ЭЦ).

Данные системы, обладая рядом достоинств, имеют и ряд существенных недостатков. Основной недостаток заключается в использовании большого количества напольного оборудования. Оснащение линий системами интервального регулирования (ИР), их эксплуатация приводят к значительным материальным затратам.

Существующие системы ИР осуществляют регулирование сближения поездов едиными для всех категорий поездов показаниями путевых светофоров, расставляемых в соответствии с максимальными тормозными путями пассажирских или грузовых поездов, обеспечивают минимально допустимое расстояние между попутными поездами, значительно превышающее расстояние, необходимое из условий безопасности движения поездов, например пригородных.

Значительного сокращения межпоездных интервалов можно достичь за счет реализации координатного принципа ИР. Минимально возможный межпоездной интервал при использовании систем автоблокировки не может быть меньше 5-7 минут, а при управлении по «хвосту» впереди идущего поезда его минимальное значение составляет 25,3 с при скорости движения поезда метрополитена 62,3 км/ч.

Координатная система интервального регулирования, в отличие от традиционных систем ИР, даст возможность регулировать интервал времени между поездами исходя из фактической скорости каждого из них и скоростей друг относи-

тельно друга, так как координатный принцип ИР основан на регулировании движения поезда на «хвост» впереди идущего поезда в отличие от систем автоблокировки, в которой регулирование осуществляется на границу блок-участка.

Следует отметить, что значительный вклад в развитие теории систем интервального регулирования движения поездов внесли известные ученые Л.А. Баранов, И.В. Беляков, П.Ф. Бестемьянов, А.М. Брылеев, И.Е. Дмитренко, А.А. Волков, Е.В. Ерофеев, И.М. Кокурин, Н.Ф. Котляренко, Ю.А. Кравцов, В.М. Лисенков, Б.Д. Никифоров, Н.Ф. Пенкин, А.С. Переборов, Е.Н. Розенберг, В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, Ю.В. Соболев, Н.М. Фонарёв, Д.В. Шалягин, В.И. Шаманов, В.И. Шелухин, А.П. Шишляков, А.А. Явна и другие.

Реализация координатной системы ИР позволит увеличить пропускную способность железнодорожных линий, сократить количество напольного оборудования, снизить себестоимость перевозок пассажиров и грузов, повысить их безопасность, улучшить качество обслуживания грузоотправителей. Подтверждением этого являются многочисленные проекты, создаваемые в настоящее время во всем мире.

При создании координатной системы ИР необходимо разработать такие алгоритмы и ограничения на их применение, которые исключают столкновение попутно следующих поездов и тем самым обеспечивают безопасность движения. Для этого необходимо определить минимально возможное сближение попутно следующих поездов (интервал времени между поездами – временной интервал между «головой» сзади идущего поезда и «хвостом» впереди идущего).

Исходя из этого, возникает необходимость количественной оценки влияния на безопасность движения динамических характеристик не только поезда, но и тягового двигателя, пневматического тормоза, крана управления пневматическим тормозом, контроллера машиниста.

Для построения координатной системы интервального регулирования необходимо сформулировать требования к системе передачи информации между локомотивами и центром управления для решения задач координатного регулирования.

Целью диссертации является разработка алгоритмических и информационных методов обеспечения безопасности движения поездов при координатном способе ИР.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– выбрать рациональные алгоритмы управления движением поездов, обеспечивающие безопасность движения при координатном способе ИР;

– разработать математическую модель координатной системы ИР движения поездов, учитывающую связь между несколькими попутно следующими поездами;

– выбрать критерии для количественной оценки качества безопасного управления;

– разработать методику определения необходимой скорости передачи информации по каналу связи между поездами для обеспечения безопасности при координатном способе ИР.

Методы исследований. Результаты диссертационной работы получены на основе использования теории управления, теории электрической тяги, теории колебаний, методов имитационного моделирования, теории вероятностей, математической статистики и математического анализа.

Достоверность основных научных положений обусловлена корректностью постановок задач и исходных математических положений, обоснованностью принятых допущений в предложенных алгоритмах и методиках расчета, а также результатами обсуждения материалов работы на научно-практических конференциях.

Научная новизна состоит в том, что выбраны рациональные алгоритмы управления движением поезда при координатном способе ИР движения поездов.

Для обеспечения безопасности движения поездов исследованы ограничения на применение алгоритмов управления движением, исключающие столкновение попутно следующих поездов, с помощью разработанных непрерывной и дискретной математических моделей движения поездов при координатном способе ИР. Данные модели учитывают динамические характеристики тягового двигателя, пневматического тормоза, крана управления пневматическим тормозом, контроллера машиниста, силы демпфирования в автосцепке поезда.

Разработана методика оценки качества управления и безопасности движения при координатном регулировании с помощью определения относительной ошибки управления по скорости и координате.

Сформулированы требования к необходимой скорости передачи информации с впереди идущего на сзади идущий поезд с учетом обеспечения безопасности движения поездов.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработана методика оценки качества управления и безопасности движения при координатном регулировании, основанная на определении относительной ошибки управления по скорости и координате, исходя из которых выбирается минимально возможный интервал времени между поездами.

Произведена оценка объема информации, который необходимо передавать с впереди идущего на сзади идущий поезд и сформулированы требования к необходимой скорости передачи информации при различных вариантах построения координатной системы ИР движения поездов.

Реализация результатов работы. Научные результаты диссертационной работы использованы ОАО «Транс-ИТ» при разработке комплекса систем автоматики, сигнализации, связи и безопасности (АССБ) для метрополитенов Казани и Омска, а также использованы в учебном процессе кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» МИИТа в рамках Инновационной образовательной программы Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ) по кадровому и научному обеспечению Транспортной стратегии России в соответствии с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях и научных секциях кафедры; на V международной научно-практической конференции "TRANS-MECH-ART-CHEM" (г. Москва, 2008 г.); на пятой Международной научно-практической конференции «Транспорт Евразии XXI века» (г. Алматы, 2008 г.); на шестой, седьмой и восьмой научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов» (г. Москва, 2005-2007 гг.); на научно-технической конференции "Наука МИИТа – транспорту" («Неделя науки») (г. Москва, 2005, 2007, 2008 гг.); на "Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи" (г. Москва, 2007, 2008 гг., медаль "За успехи в научно-техническом творчестве").

Публикации. Материалы, отражающие основное содержание диссертационной работы, изложены в 10 печатных работах. Две из них опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Она содержит 191 страницу основного текста, 70 иллюстраций и 16 таблиц. Список литературы включает 150 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, определены цель и задачи исследования.

В первой главе рассмотрены различные варианты построения координатных систем ИР движения поездов и показано, что данные системы целесообразно классифицировать по признакам, отражающим структуру, алгоритмы управления движением, функциональные возможности и аппаратурную реализацию. В зави-

симости от места формирования управляющих воздействий на тяговые двигатели локомотива и тормозные средства поезда предложено классифицировать координатные системы ИР на централизованную, децентрализованную и комбинированную.

Проведён анализ существующих в мире систем, основанных на координатном принципе ИР. Описаны принципы их построения, функциональные и технические особенности.

Перечислены задачи, которые необходимо исследовать в диссертационной работе.

Во второй главе предложена математическая модель для описания движения поездов при координатной системе ИР.

Под безопасным движением поездов предложено понимать такое движение при координатном регулировании, которое исключает столкновение попутно следующих поездов.

Для обеспечения безопасности движения поездов при координатной системе ИР были рассмотрены три терминальных закона управления, в соответствии с которыми поезд проходит заданный участок. В качестве цели управления задаются фазовые координаты впереди идущего поезда. Сзади идущий поезд должен двигаться на постоянном временном интервале ΔT. Предложено использовать понятие – интервал времени между поездами, под которым следует понимать временной интервал между «головой» сзади идущего поезда и «хвостом» впереди идущего.

Первым был рассмотрен закон управления, в котором на сзади идущий поезд передается только координата впереди идущего, управление имеет вид

$$u_{i+1}(t) = 2 \cdot \left(\frac{S_i - S_{i+1}}{\Delta T^2} - \frac{V_{i+1}}{\Delta T} \right), \qquad (1)$$

где $u_{i+1}(t)$ – ускорение сзади идущего поезда; S_{i+1} – координата сзади идущего поезда; S_i – координата впереди идущего поезда; V_{i+1} – скорость сзади идущего поезда; ΔT – интервал времени между поездами.

При передаче на сзади идущий поезд координаты и скорости впереди идущего поезда терминальный закон управления имеет вид

$$u_{i+1}(t) = 6 \cdot \left(\frac{S_i - S_{i+1}}{\Delta T^2} \right) - 2 \cdot \left(\frac{V_i + 2 \cdot V_{i+1}}{\Delta T} \right), \qquad (2)$$

где V_i – скорость впереди идущего поезда.

При дополнительной передаче информации об ускорении впереди идущего поезда закон управления приводится к виду

$$u_{i+1}(t) = 12\left(\frac{S_i - S_{i+1}}{\Delta T^2}\right) - 6\cdot\left(\frac{V_i + V_{i+1}}{\Delta T}\right) + u_i, \qquad (3)$$

где u_i – ускорение впереди идущего поезда.

Были разработаны функциональные схемы управления движением каждого поезда для рассматриваемых законов управления. На рис.1 приведена функциональная схема для закона управления (1).

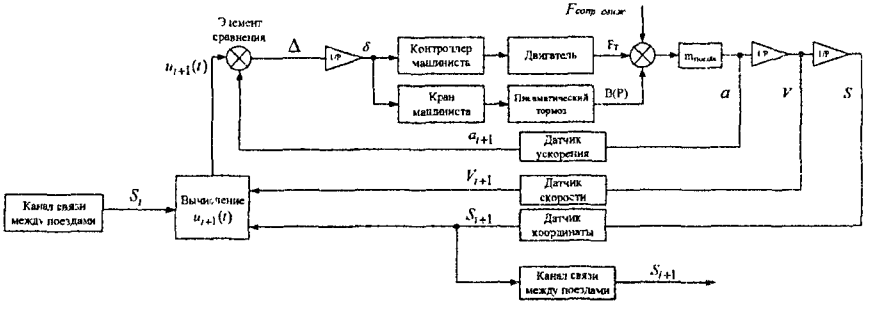

Рис. 1. Функциональная схема управления движением при координатном регулировании движения поездов для закона управления (1)

В представленной на рис. 1 схеме управление поездом осуществляется при помощи аппарата управления тяговыми двигателями, которой представляет собой силовой реостатный контроллер с пневматическим приводом и односторонним вращением. Силовой контроллер в процессе разгона поезда обеспечивает изменение сопротивления пусковых резисторов и ослабление возбуждения тяговых двигателей.

Управление тяговыми двигателями в режиме электрического торможения, а также управление электропневматическим тормозом осуществляет контроллер машиниста, имеющий фиксированное число тормозных положений.

При создании математической модели учитывалось сопротивление движению поезда $F_{сопр\ движ}$.

Два интегратора (1/P) служат для математического представления значений скорости и координаты поезда. На устройство вычисления ускорения $u_{i+1}(t)$ подается информация с датчика скорости и координаты, а также координата впереди идущего поезда S_i. Вычисленное в соответствии с (1) ускорение $u_{i+1}(t)$ передается на элемент сравнения, где оно вычитается из фактического ускорения a_{i+1}, по-

лученного от датчика ускорения. В результате формируется управляющее воздействие $\Delta = a_{i+1} - u_{i+1}(t)$, которое через дополнительно введенное интегрирующие звено (1/P) поступает на органы управления поезда: контроллер или кран машиниста.

При моделировании в качестве впереди идущего выбрана идеальная траектория движения поезда. В течение 100 секунд с постоянным ускорением 0,3 м/с^2 осуществляется разгон до 30 м/с (108 км/час), затем моделируется равномерное движение в течение 200 секунд и за следующие 100 секунд – торможение до полной остановки. В таком режиме впереди идущий поезд движется в течение 400 секунд, после этого сзади идущий поезд догоняет впереди идущий и должен быть принят на другой путь станции.

В идеальном случае движение поезда описывается системой дифференциальных уравнений, полученных на основе второго закона Ньютона. Известно, что реальная система не обладает свойствами идеальной и система дифференциальных уравнений, описывающая движение поезда, является нелинейной. Это обусловлено зависимостью сил сопротивления движению от скорости движения поезда, нелинейностью изменения тяговых характеристик электропоезда, дискретностью управления контроллером машиниста в процессе разгона поезда, дискретностью управления тормозными силами (поскольку в зависимости от положения крана машиниста задается давление воздуха в тормозных цилиндрах), нелинейностью нарастания давления в тормозных цилиндрах, действием сил демпфирования в автосцепке поезда. Учет этих факторов обуславливает необходимость описания движения поезда в виде дифференциальных уравнений выше второго порядка:

$$\begin{cases} \dfrac{d\Phi}{dt} = f(\Phi, V, \delta) \\ \dfrac{dV}{dt} = f(\Phi, V, \delta) \\ \dfrac{dS}{dt} = V \\ \dfrac{d\delta}{dt} = \tau_{из}(u(t) - a_{ф}) \\ \dfrac{dR_p}{dt} = \dfrac{R(t) - R_p}{\tau_c} \\ \dfrac{dp_c}{dt} = \dfrac{P0 - p_c}{\tau(p_c)} \end{cases}, \qquad (4)$$

где Φ – магнитный поток, Вб; V – скорость поезда, м/с; δ – управляющее воздействие; S – координата поезда, м; $\tau_{из}$ – постоянная времени управляющего органа,

с; $a_ф$ – текущее ускорение поезда, м/с^2; $u(t)$ – закон управления, определяемый в соответствии с (1), (2) или (3); $R(t)$ – функция изменения сопротивления пусковых резисторов от времени; R_p – омическое сопротивление пускового реостата, Ом; τ_c – постоянная времени изменения сопротивления пусковых резисторов, с; $P0$ – уставка давления в тормозном цилиндре, соответствующая положению крана машиниста; p_c – давление в тормозном цилиндре, кг/см^2; $\tau(p_c)$ – постоянная времени как функция, зависящая от давления в тормозном цилиндре, с.

Обычно в модели движения поезда не учитывается динамика сцепки. В настоящей диссертационной работе использована модель Жуковского, согласно которой поезд рассматривается как электровоз, соединенный с вагонами упругой растяжимой нитью, и учтены силы демпфирования, действующие в автосцепке поезда, которые совершают отрицательную работу, уменьшая тем самым энергию колебания. Эта сила прямо пропорциональна скорости, и поэтому для модели автосцепки поезда получено дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d^2(z)}{dt^2} = -b\frac{d(z)}{dt} - k\frac{M+m}{M \cdot m}(z - z_0). \qquad (5)$$

где m – масса локомотива; M – масса вагонов; z – амплитуда колебаний вагона; k – коэффициент натяжения; b – коэффициент демпфирования.

Модель разработана в программной среде Borland Delphi 7 для электропоезда ЭР2. Разработанная математическая модель позволяет задавать значение интервала времени между поездами, количество точек интегрирования, точки начала и конца интегрирования и получать следующие временные зависимости:

– изменение магнитного потока в тяговом двигателе;

– изменение скоростей поездов;

– изменение координат поездов;

– управляющее воздействие, в зависимости от которого осуществляется выбор позиции контроллера машиниста;

– изменение подключения пусковых резисторов контролера машиниста;

– давление в тормозном цилиндре.

Система дифференциальных уравнений решалась методом Рунге-Кутта 4-го порядка.

Вначале была рассмотрена непрерывная математическая модель координатной системы ИР. Под ней понимается модель системы, в которой информация о параметрах движения впереди идущего поезда в полном объеме непрерывно пе-

редается на сзади идущий без учета потерь и искажений в канале передачи информации и дискретности опроса впереди идущего поезда.

В этом случае при использовании закона управления (1) для однотипных групп пригородных электропоездов ЭР2 при интервале времени между поездами менее ΔT = 15,6 с сзади идущий поезд догоняет впереди идущий раньше 400 секунд, т.е. динамические переходные процессы приводят к столкновению поездов. Для закона управления (2) этот интервал составляет ΔT = 20,35 с, а для закона управления (3) ΔT = 27 с.

Далее была рассмотрена дискретная модель координатной системы ИР, в которой информация о параметрах движения впереди идущего поезда передаются на сзади идущий через заданные промежутки времени, которые предложено называть временем опроса параметров движения впереди идущего поезда. Для закона управления (1) передается информация только о координате впереди идущего поезда (t_S), для закона управления (2) – о координате и скорости (t_V), для закона управления (3) – о координате, скорости и ускорении (t_a).

Исходя из поставленной задачи и для упрощения моделирования время опроса параметров движения впереди идущего поезда включает в себя время обработки сигналов от первичных датчиков; время кодирования и декодирования информации; время передачи информации с впереди идущего на сзади идущий поезд; время, необходимое для обработки информации и принятия решения об управление поездом.

Для создания дискретной математической модели координатной системы ИР использовалась математическая модель, аналогичная непрерывной модели, но модифицированная с учетом решаемой задачи.

Для оценки эффективности координатной системы ИР определялась степень влияния полноты информации о каком-либо одном или нескольких параметрах движения поезда на эффективность ИР, т.е. на величину минимального интервала времени между поездами. Для этого движение моделировалось при различных значениях этих параметров.

При использовании закона управления (2) на минимальный интервал времени между поездами влияет как время опроса координаты впереди идущего поезда, так и время опроса скорости, а при использовании закона управления (3), еще и время опроса ускорения. В результате моделирования при различных комбинациях значений времени опроса скорости, координаты и ускорения впереди идущего поезда установлено, что при использовании законов управления (2), (3) наибольшее влияние на минимальный интервал времени между поездами оказывает время опроса координаты впереди идущего.

Для сравнения результатов моделирования, полученных для трех законов управления, в одних осях были построены зависимости интервала времени между поездами от времени опроса параметров движения впереди идущего поезда $t_{опр}$: координаты (для закона управления (1)), координаты и скорости (для закона управления (2)) и координаты, скорости и ускорения (для закона управления (3)) впереди идущего поезда (рис. 2).

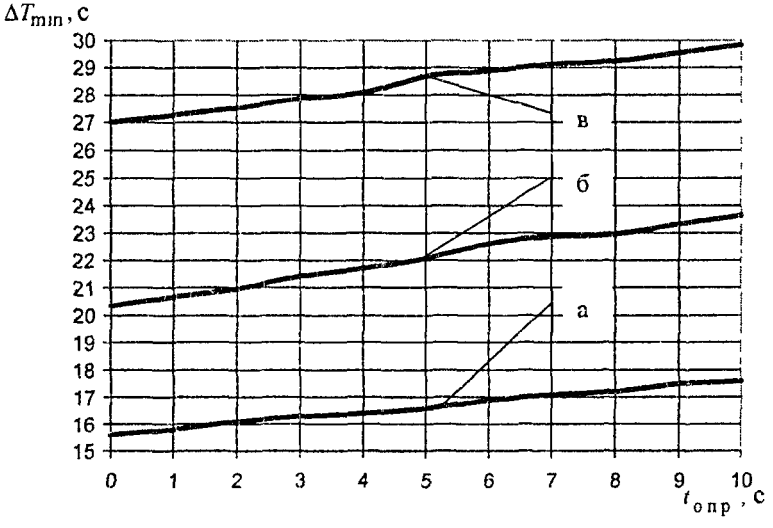

Рис. 2. Зависимость минимального интервала времени между поездами от времени опроса параметров впереди идущего поезда при использовании законов управления: а – (1); б – (2); в – (3)

Из рис. 2 видно, что использование закона управления (1) позволяет обеспечивать наименьший интервал времени между поездами для однотипных групп пригородных электропоездов ЭР2 при одинаковых значениях времени опроса параметров впереди идущего поезда.

Третья глава посвящена разработке методики оценки качества управления и безопасности движения при координатном способе ИР.

Качество работы системы управления поездом и безопасность движения в зависимости от закона управления можно оценить, сопоставив результаты, полученные для непрерывной и для дискретной модели. Для этого предложено использовать функцию относительной ошибки по координате, которая для решаемой задачи формулируется в виде

$$\Delta_{SF}(t) = \frac{S_{непр}(t) - S_{дискр}(t)}{S_{непр}(t)} \cdot 100\%, \qquad (6)$$

где $S_{непр}(t)$ – координата сзади идущего поезда при непрерывной (идеальной) модели передачи информации о параметрах движения впереди идущего поезда на сзади идущий; $S_{дискр}(t)$ – координата сзади идущего поезда при дискретной модели передачи информации с параметрах движения впереди идущего поезда на сзади идущий.

Относительная ошибка по координате является критерием безопасности движения, поскольку она показывает, на сколько поезд опережает заданную законом управления траекторию движения или отстает от неё из-за неполноты информации о параметрах движения впереди идущего поезда. Критическим значением относительной ошибки по координате является такое численное её значение, которое приводит к столкновению попутно следующих поездов.

Аналогично формулируется функция относительной ошибки по скорости:

$$\Delta_{VF}(t) = \frac{V_{непр}(t) - V_{дискр}(t)}{V_{непр}(t)} \cdot 100\%, \qquad (7)$$

где $V_{непр}(t)$ – скорость сзади идущего поезда при непрерывной (идеальной) модели передачи информации о параметрах движения впереди идущего поезда на сзади идущий; $V_{дискр}(t)$ – скорость сзади идущего поезда при дискретной модели передачи информации о параметрах движения впереди идущего поезда на сзади идущий.

Относительная ошибка по скорости является показателем качества управления, поскольку при больших значениях ошибки поезд вынужден постоянно разгоняться или тормозить, что приводит к значительной нагрузке на тяговые двигатели и систему торможения электропоезда и вызывает неудобства пассажиров.

Для численной оценки относительной ошибки по координате и скорости использовались вероятностные характеристики случайных процессов: математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение дискретного распределения. Математическое ожидание относительной ошибки по координате вычислялось по формуле

$$MX\Delta_{SF} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\Delta_{SF}(t_i), \qquad (8)$$

где N – число шагов интегрирования.

Моделирование проводилось для законов управления (1), (2) и (3) при интервале времени между поездами от 20 до 90 секунд и времени опроса параметров

движения впереди идущего поезда 1, 2, 5 и 10 с. Для сравнения значений математического ожидания относительной ошибки по координате при использовании различных законов управления было предложено использовать функцию усредненного значения математического ожидания относительной ошибки по координате $\psi_{MX\Delta_{SF}}$ (рис. 3), которая вычисляется по формуле

$$\psi_{MX\Delta_{SF}} = \frac{\sum_{i}^{n} MX\Delta_{SF}}{N}, \qquad (9)$$

где i, n – начальное и конечное значение интервала времени между поездами ΔT. Отметим, что моделирование производится $N = 10000$ раз внутри интервала $[i, n]$.

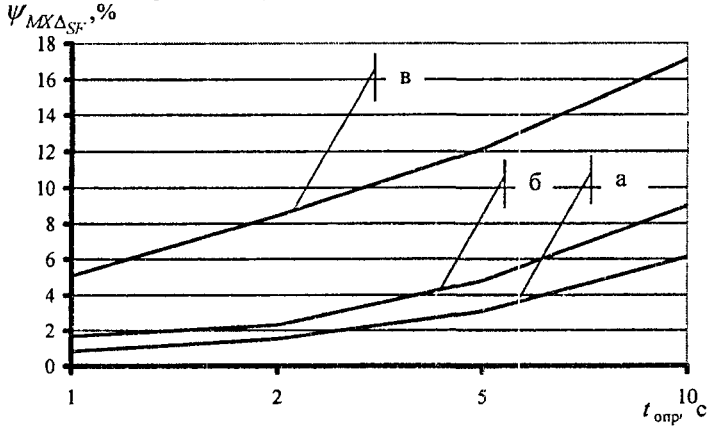

Рис. 3. Зависимость усредненного значения математического ожидания относительной ошибки по координате от времени опроса параметров впереди идущего поезда при использовании законов управления: а – (1); б – (2); в – (3)

Как видно из рис. 3, меньшее значение усредненного значения математического ожидания относительной ошибки по координате получается при использовании закона управления (1).

Аналогичная методика оценки для трех законов управления движением использовалась для математического ожидания относительной ошибки по скорости и среднеквадратического отклонения относительной ошибки по координате и скорости. Установлено, что меньшие значения этих параметров получаются при передаче с впереди идущего поезда на сзади идущий информации только о координате (закон управления (1)) для однотипных групп пригородных электропоез-

дов ЭР2 при одинаковых значениях времени опроса параметров впереди идущего поезда.

Для оценки влияния времени опроса скорости и координаты впереди идущего поезда на значение относительной ошибки по скорости и координате движение поезда моделировалось при различных комбинациях этих параметров. Рассматривался закон управления (2). Сначала исследовалось влияние времени опроса значения скорости впереди идущего поезда, для этого время опроса координаты выбиралось постоянным ($t_S = 10$ с), а время опроса скорости впереди идущего поезда t_V изменялось от 1 до 10 с. После этого исследовалось влияние времени опроса координаты впереди идущего поезда на значение относительной ошибки управления. Для этого время опроса скорости впереди идущего поезда принималось постоянным ($t_V = 5$ с), а время опроса координаты t_S изменялось от 1 до 10 с. Установлено, что изменение времени опроса значения координаты впереди идущего поезда оказывает на качество регулирования и безопасность движения большее влияние, чем изменение времени опроса скорости.

Аналогично в диссертационной работе была выполнена оценка влияния времени опроса скорости, координаты и ускорения (закон управления (3)) впереди идущего поезда на значение относительной ошибки по скорости и координате. Установлено, что изменение времени опроса значения координаты впереди идущего поезда оказывает на качество и безопасность движения большее влияние, чем изменение времени опроса скорости и ускорения. Также показано, что время опроса скорости оказывает большее влияние на значение относительной ошибки по координате, чем время опроса ускорения, которое, в свою очередь, оказывает большее влияние на значение относительной ошибки по скорости.

Полученные при моделировании данные были подвергнуты статистической обработке. Была произведена статистическая оценка плотности распределения вероятности относительной ошибки управления по координате и скорости. Выбор аппроксимирующей плотности вероятности при статистической обработке было предложено производить исходя из условия сохранения первых четырех моментов статистического распределения для семейства кривых Пирсона.

В качестве примера статистической обработки (гистограмма относительных частот и плотность распределения вероятности относительной ошибки по координате) приведем вариант прохождения поездом участка при использовании закона управления (1) с интервалом времени до впереди идущего поезда $\Delta T = 40$ с при времени опроса координаты $t_S = 1$ с. В этом случае выборка значений относительной ошибки по координате описывается распределением Пирсона I типа (бета-распределение).

В этом случае плотность распределения вероятности относительной ошибки по координате с учетом нормировки имеет вид

$$p(x) = \frac{(x - x_1)^g (x_2 - x)^h}{B(g+1, h+1)(x_2 - x_1)^{g+h+1}},$$

$$x_1 \le x \le x_2,$$

$$z = g + 1;\ y = h + 1, \tag{10}$$

$$B(z, y) = \int_0^1 x^{z-1}(1-x)^{y-1}dx - \text{бета} - \text{функция},$$

$$g = \frac{b_1 - x_1}{b_2(x_2 - x_1)} > -1,\ h = \frac{x_2 - b_1}{b_2(x_2 - x_1)} > -1,$$

Гистограмма относительных частот и плотность распределения вероятности относительной ошибки управления по координате приведена на рис. 4.

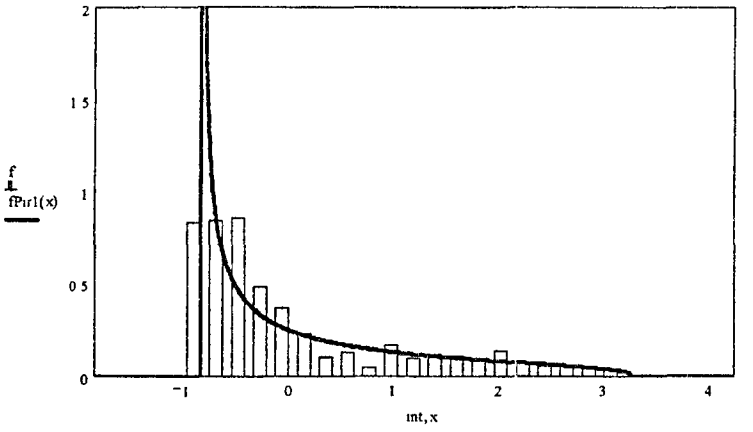

Рис. 4. Гистограмма относительных частот и плотность распределения вероятности относительной ошибки управления по координате

Используя разработанную математическую модель, можно оценить минимально допустимый интервал времени между поездами и допустимое по условиям безопасности время опроса параметров впереди идущего поезда при заданных относительных ошибках по скорости и координате. Под значением относительной ошибки по скорости и координате понимается максимальное значение ошибки, полученное при заданных значениях интервала времени между поездами и времени опроса координаты впереди идущего поезда.

На рис.5 приведена зависимость относительной ошибки по координате от интервала времени между поездами для закона управления (1) при различных значениях времени опроса координаты впереди идущего поезда, полученная на основе математического моделирования.

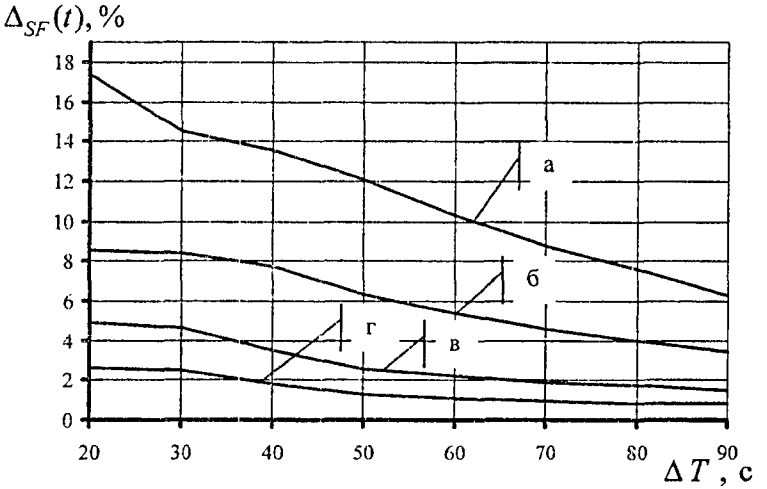

Рис. 5. Зависимость относительной ошибки по координате от интервала времени между поездами для закона управления (1): а – t_S = 10 с; б – t_S = 5 с; в – t_S = 2 с; г – t_S = 1 с

Из рис. 5 видно, что значения относительной ошибки по координате уменьшаются при увеличении интервала времени между поездами ΔT. Значение относительных ошибок также зависит от времени опроса координаты впереди идущего поезда t_S. С уменьшением t_S ошибка уменьшается. Из полученных зависимостей можно определить минимальный интервал времени между поездами и время опроса координаты впереди идущего поезда исходя из заданной относительной ошибки управления по координате, которая является критерием безопасности движения. Скажем, при Δ_{SF} = 2 % допустимый интервал времени между поездами должен быть больше 37 с при t_S = 1 с, а при t_S = 2 с – соответственно больше 65 с. Для Δ_{SF} = 4 % допустимый интервал времени между поездами должен быть больше 20 с при t_S = 1 с, а при t_S = 2 с – соответственно больше 36 с, при t_S = 5 с – больше 80 с.

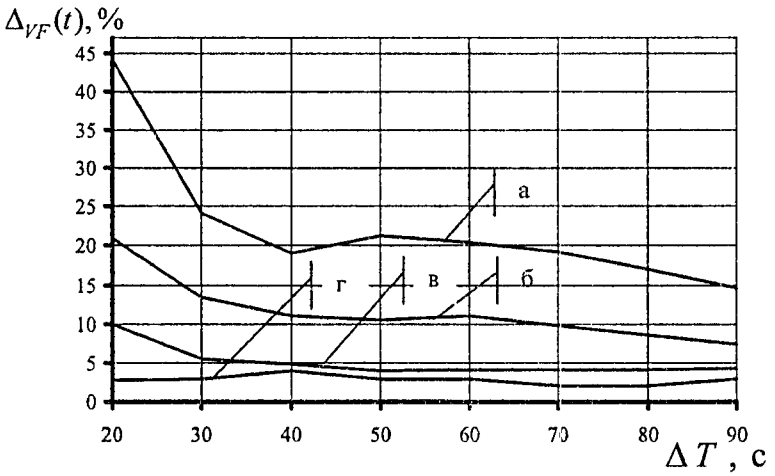

Рис. 6. Зависимость относительной ошибки по скорости от интервала времени между поездами для закона управления (1): а – t_S = 10 с; б – t_S = 5 с; в – t_S = 2 с; г – t_S = 1 с

Зависимости для относительной ошибки по скорости (рис. 6) носят тот же характер, что и для Δ_{SF}, т.е значение ошибки уменьшается с увеличением ΔT и уменьшением t_S. Поскольку относительная ошибка по координате является критерием безопасности движения, то, следовательно, допустимое значение относительной ошибки по скорости выбирается исходя из допустимого интервала времени между поездами, как показано выше, тогда для ΔT = 37 с при t_S = 1 с значение относительной ошибки по скорости обеспечивается не более 4,7%, а для ΔT = 80 с при t_S = 5 с – не более 9,1%.

В четвёртой главе сформулированы требования к каналу связи с учетом обеспечения безопасности движения при координатном способе ИР и рассмотрены варианты технической реализации канала связи между попутно следующими поездами.

При использовании закона управления (1) на сзади идущий поезд передается только координата впереди идущего. Текущую координату поезда с дискретностью 0,06 м можно передать последовательностью из 6 байт при использовании помехоустойчивого кодирования.

Для закона управления (2) на сзади идущий поезд передается координата и скорость впереди идущего поезда. Информация о скорости движения впереди

идущего поезда с дискретностью 0,5 м/с передаётся 2 байтами (помехоустойчивое кодирование) для диапазона от 0 до 128 м/с (от 0 до 460,8 км/ч).

В случае передачи на сзади идущий поезд координаты, скорости и ускорения впереди идущего поезда (закон управления (3)) необходимо дополнительно 2 байта (помехоустойчивое кодирование) для передачи ускорения поезда, при этом обеспечивается дискретность 0,04 м/с^2 для диапазона от -5 м/с^2 до 5 м/с^2.

Помимо этого для обеспечения контроля целостности состава необходим датчик контроля целостности состава, установленный в последнем вагоне поезда (в задней кабине электропоезда). Поэтому для передачи информации о координате хвоста поезда S_{i+1} необходимо еще 6 байт при помехоустойчивом кодировании. Также для контроля изменения расчетного интервала времени между поездами ΔT необходимо передавать 4 байта при использовании помехоустойчивого кодирования.

Исходя из этого определено, что при использовании закона управления (1) с впереди идущего поезда на сзади идущий всего необходимо передавать 16 байт данных; для закона управления (2) – 18 байт; для закона управления (3) – 20 байт.

Требуемая скорость передачи информации C оценивалась как отношение объема передаваемой информации I к времени опроса параметров движения впереди идущего поезда $t_{опр}$

$$C = \frac{I}{t_{опр}} \cdot N_{П}, \tag{11}$$

где $N_{П}$ – количество поездов в пределах участка (считалось, что в пределах участка 20 км одновременно может находиться не более 24 поездов).

Скажем, для закона управления (1) при заданной относительной ошибке по скорости и координате 3% и времени опроса координаты впереди идущего $t_S = 2$ с интервал времени между поездами составляет $\Delta T = 40$ с. В этом случае требуемая скорость передачи информации для обеспечения работы координатной системы ИР с учетом обеспечения безопасности движения должна быть не хуже 1600 бит/с.

Для законов управления (2) и (3) расчеты проводились аналогично. При этом делалось допущение о том, что времена опроса координаты и скорости впереди идущего поезда (закон управления (2)) и координаты, скорости и ускорения (закон управления (3)) равны.

На рис. 7 приведены зависимости требуемой скорости передачи информации от времени опроса параметров впереди идущего поезда, полученные для законов управления (1), (2) и (3).

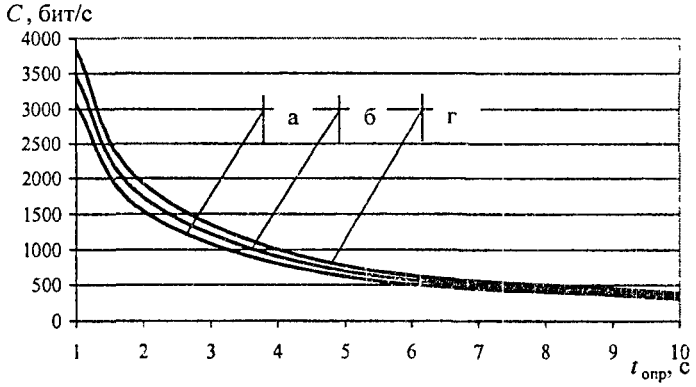

Рис. 7. Зависимость требуемой скорости передачи информации от времени опроса параметров впереди идущего поезда для законов управления:
а – (1); б – (2); в – (3)

Меньшее значение скорости передачи информации необходимо при использовании закона управления (1). Это объясняется тем, что скорость передачи информации пропорциональна объему передаваемой информации. При законе управления (1) объем информации меньше, чем при (2) и (3), следовательно, и скорость передачи получается наименьшей.

На рис. 8 приведены зависимости относительной ошибки по координате от требуемой скорости передачи информации для закона управления (1) при различных значениях интервала времени между поездами.

Значение относительной ошибки по координате уменьшается с увеличением интервала времени между поездами (рис. 8), и наибольшие значения относительной ошибки по координате соответствуют наименьшей требуемой скорости передачи информации с впереди идущего на сзади идущий поезд. Отметим также, что при увеличении времени опроса параметров движения впереди идущего требуемая скорость передачи информации уменьшается, но в то же время увеличивается значение относительных ошибок управления по скорости и координате, что диктует необходимость задавать большие интервалы времени между поездами.

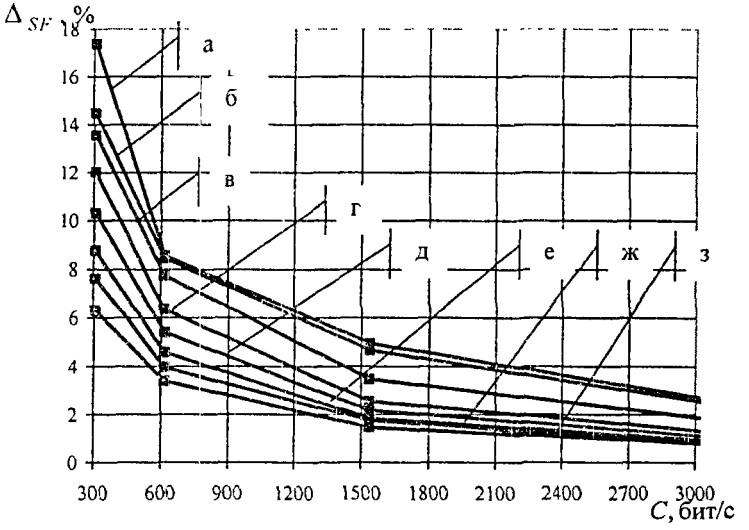

Рис. 8. Зависимость относительной ошибки по координате от требуемой скорости передачи информации для закона управления (1): а – $\Delta T = 20$ с; б – $\Delta T = 30$ с; в – $\Delta T = 40$ с; г – $\Delta T = 50$ с; д – $\Delta T = 60$ с; е – $\Delta T = 70$ с; ж – $\Delta T = 80$ с; з – $\Delta T = 90$ с

Наиболее эффективным средством передачи информации при координатном способе ИР является цифровой радиоканал связи. В диссертационной работе был проведен анализ функционально-технических характеристик систем радиосвязи, апробируемых на сети железных дорог России таких как TETRA, GSM-R и IMT-MC. Установлено, что все рассмотренные стандарты радиосвязи позволяют обеспечить передачу информации между поездами при заданных значениях относительных ошибок и необходимых для обеспечения безопасности движения скоростях передачи данных.

Приложения содержат сравнительный анализ координатных систем интервального регулирования движения поездов, программу решения дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутта четвертого порядка, программы математического моделирования при непрерывной и дискретной модели координатной системы ИР, результаты моделирования по непрерывной и дискретной модели координатной системы ИР, функции относительной ошибки по координате и скорости, значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения, а также значения 3 и 4-го моментов относительных ошибок по скорости и координате, типы распределения плотности вероятности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты:

1. Сформулированы требования к принципам построения и математическому моделированию координатной системы ИР движения поездов, с учетом обеспечения безопасности движения поездов.

2. Предложены алгоритмы управления движением поезда при координатном способе ИР движения поездов для случаев передачи на сзади идущий поезд информации о координате; о координате и скорости; о координате, скорости и ускорении впереди идущего поезда. Разработаны функциональные схемы управления движением поезда при координатном способе ИР движения поездов для различных законов управления.

3. Разработаны непрерывная и дискретная математические модели движения поезда при координатном способе ИР, учитывающие динамические характеристики тягового двигателя, пневматического тормоза, крана управления пневматическим тормозом, контроллера машиниста, силы демпфирования в автосцепке поезда и объём передаваемой информации между поездами.

4. Для обеспечения безопасности движения поездов при координатном способе ИР на математических моделях исследованы ограничения на применение алгоритмов управления движением, исключающие столкновение попутно следующих поездов.

5. Предложена методика оценки качества управления и безопасности движения в зависимости от закона управления путем сопоставления результатов, полученных для непрерывной и дискретной моделей. Для этого предложено использовать функции относительной ошибки управления по скорости и координате, исходя из которых определяется допустимый интервал времени между поездами.

6. Произведена оценка объема информации, который необходимо передавать с впереди идущего поезда на сзади идущий, и сформулированы требования к необходимой скорости передачи информации при различных вариантах построения координатной системы ИР движения поездов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Бестемьянов П.Ф., Романчиков А.М. Контроль движения при координатном регулировании // Мир транспорта, 2008, № 1. – С.104 – 109.

2. Бестемьянов П.Ф., Романчиков А.М. Методика оценки качества управления при координатном способе интервального регулирования // Наука и техника транспорта, 2008, №1. – С.71 – 74.

Публикации в других изданиях

1. Бестемьянов П.Ф., Романчиков А.М. Математическая модель координатной системы управления с учетом сил демпфирования в автосцепке поезда // Безопасность движения поездов / Труды VII Научно-практической конференции. – М.: МИИТ, 2006. – С.VII-3 – VII-4.
2. Бестемьянов П.Ф., Романчиков А.М. Математическая модель поезда при координатном регулировании движения поездов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2007. – №1. – С.15 – 25.
3. Бестемьянов П.Ф., Романчиков А.М. Информационное обеспечение безопасности движения поездов при координатном способе регулирования. Безопасность движения поездов // Труды VIII Научно-практической конференции, в двух частях. Часть 1. - М.: МИИТ, 2007. – С.VII-4 – VII-5.
4. Ваньшин А.Е., Романчиков А.М. Современные системы интервального регулирования движения поездов. // VII Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ-2007. Всероссийский конкурс научно-технического творчества молодежи: Сборник материалов. М.: ОАО «ГАО ВВЦ», 2007. – С.70 – 71.
5. Тенденции развития современных систем управления движением поездов. Безопасность движения поездов / Лисенков В.М., Бестемьянов П.Ф., Малышев И.Н., Романчиков А.М. // Труды VI Научно-практической конференции, в двух томах. Том 1.-М.: МИИТ,2005. – С.I-15 – I-17.
6. Романчиков А.М. Влияние неполноты информации на безопасность движения поездов при координатном способе регулирования. Безопасность движения поездов // Труды VIII Научно-практической конференции, в двух частях. Часть 1. – М.: МИИТ, 2007. – С.VII-16 – VII-17.
7. Романчиков А.М. Оценка влияния полноты информации на эффективность координатной системы интервального регулирования движения поездов // Вестник МИИТа. Вып. 17. – М.: МИИТ, 2007. – С.15 – 17.
8. Романчиков А.М., Мащенко П.Е. Координатная система интервального регулирования движения поездов // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт – 2008», в трёх частях. Часть 1. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2008. – С.8 – 9.

РОМАНЧИКОВ АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ КООРДИНАТНОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

05.22.08 – Управление процессами перевозок

Подписано к печати 14.11.08. Объем 1,5 п.л.

Печать офсетная. Формат 60x90 1/16

Тираж 80 экз. Заказ № 510

Типография МИИТа, 127994, Москва, ул. Образцова, 15