

На правах рукописи

БОРИСЕНКОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ
СКОРОСТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ С МИНИМИЗАЦИЕЙ
ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ЛОКАЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ СКОРОСТИ**

05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

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

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Феоктистов Валерий Павлович

Официальные оппоненты:

Киселев Валентин Иванович, доктор технических наук, профессор, МГУПС (МИИТ), кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство», заведующий кафедрой.

Паршин Андрей Николаевич, кандидат технических наук, топливно-энергетический центр Московской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», начальник.

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (ОАО «НИИАС»).

Защита диссертации состоится " **20** " **декабря** 2013 г. в **15** часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (МГУПС (МИИТ)) по адресу 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 аудитория 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУПС (МИИТ).
Автореферат разослан " **20** " **ноября** 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

Саврухин Андрей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования связана с конкретной задачей по повышению эксплуатационной скорости пассажирских поездов дальнего сообщения. Наиболее эффективно эта задача решается на базе высокоскоростных электропоездов «Сапсан» (*Siemens Velaro Rus*) (конструкционная скорость 250 км/ч). Но большинство тяговых плеч, например, на Московской железной дороге, не позволяют в полной мере использовать возможности скоростных поездов из-за наличия большого числа ограничений скорости по пути. На тяговом плече Санкт-Петербург – Москва среднетехническая скорость составляет от 150 до 160 км/ч при количестве промежуточных остановок до четырех, а на тяговом плече Москва – Нижний Новгород участковая скорость составляет 120 км/ч при количестве промежуточных остановок две и менее.

Поэтому, наряду с расширением полигона эксплуатации высокоскоростных электропоездов «Сапсан», целесообразно использовать традиционный подвижной состав – электровозы серии ЧС и пассажирские вагоны с конструкционной скоростью 160 км/ч. Соответствующий опыт имеется на тяговом плече Москва-Вязьма, где при максимальной разрешенной скорости 140 км/ч техническая скорость поездов составностью до 13 вагонов реализуется на уровне 107 км/ч.

Введение скоростных поездов вызвано необходимостью повышения конкурентоспособности железных дорог с целью привлечения дополнительного пассажиропотока. Повышение скорости движения пассажирских поездов предусмотрено в стратегии развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года. Пополнение парка пассажирских локомотивов новыми электровозами ЭП2К, ЭП1, ЭП10, ЭП20 и новыми вагонами отечественного и зарубежного производства (конструкционная скорость до 200 км/ч) позволяет решать задачу скоростного движения на имеющейся технической базе. Однако, в этом случае лимитирующими являются ограничения скорости, характерные для эксплуатируемых тяговых плеч, что в значительной степени ограничивает возможности повышения технической скорости и ведет к дополнительным энергозатратам.

Степень разработанности темы. Теоретические основы рассматриваемых в диссертации методологических подходов и методов тяговых расчетов изложены в работах известных отечественных и зарубежных специалистов. Однако, вопросы обоснования режимов движения скоростных поездов с электровозной тягой в условиях наличия ограничений скорости, а также методы оценки тягово-энергетической эффективности электровозов в этих условиях разработаны недостаточно.

Цель исследования. Обоснование режима движения пассажирского поезда с электрической тягой в условиях ограничений скорости и разработка методики расчета соответствующих параметров, связанных с энергозатратами и временем хода.

Объект исследования – пассажирский поезд на электротяге и режим его движения с локальными ограничениями скорости.

Предмет исследования:

– электровоз с поездом как электромеханическая система в режимах движения, реостатного торможения, а также соответствующий комплекс оценочных критериев по энергетике и скорости;

– аналитический метод решения уравнения движения поезда, в частности, для режима электрического торможения.

Задачи исследования заключаются:

– в анализе энергетической ситуации и влияющих на нее параметров в дальнейшем пассажирском сообщении при электрической тяге;

– в разработке математической модели, позволяющей обосновать и выполнить расчёт параметров режимов движения на основе учета статистических характеристик тягового плеча;

– в обосновании экономичного управления поездом при проезде точечного или протяженного ограничения скорости за счет наиболее интенсивного режима торможения поезда на подходе к ограничению и интенсивного режима разгона поезда после прохода зоны ограничения;

– в обосновании режима движения скоростного поезда с электровозом в промежутках относительно небольшой протяженности между смежными ограничениями скорости;

– в ускоренном упреждающем решении задачи целевого торможения поезда с применением аналитического метода интегрирования уравнения движения поезда;

– в разработке компьютерной программы для выполнения тягово-энергетических расчетов при проходе ограничения скорости поездом с целью минимизации потерь времени и электроэнергии;

– в разработке критериев для оценки электровозов при учете тенденции к повышению технической скорости;

– в обосновании типа электровоза, наилучшим образом обеспечивающего пассажирские перевозки по конкретному маршруту.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– разработан аналитический метод решения задачи целевого подтормаживания поезда перед входом на участок с ограничением скорости;

– обоснованы критерии выбора варианта движения скоростного поезда в зоне ограничения скорости при минимизации потерь времени и электроэнергии;

– предложено решение задачи по выбору режима движения скоростного поезда в промежутке между смежными ограничениями скорости;

– предложена методика статистического анализа ограничений скорости на тяговом плече с раздельным учетом допускаемой скорости, длины ограничения, протяженности интервалов между смежными ограничениями.

Теоретическая и практическая ценность диссертации заключается:

- в методике корректировки режима движения поезда и его результирующих параметров (время хода, энергозатраты) при повышении участковой скорости на тяговом плече;

- в возможности автоматизации режима проследования ограничения путем использования программ автоведения на всех этапах движения поезда (на подходе, при его проезде и при разгоне поезда после ограничения). Сейчас задача упреждения на подходе к ограничению скорости решается системой автоведения со значительной потерей времени для снижения скорости из-за необходимости гарантированного подхода по условиям безопасности движения. При многочисленных ограничениях скорости это ведет к потерям технической скорости;

- в возможности оценки по предложенной программе выполнения тяговых расчётов типов электровозов, обеспечивающих пассажирские перевозки с минимальными удельными энергозатратами на конкретных маршрутах.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использованы методики обоснования рациональных режимов движения пассажирских поездов, методы тяговых расчетов с численным и аналитическим решением уравнения движения поезда, методы математической статистики.

Положения выносимые защиты:

- на основе анализа энергетической ситуации в электрической тяге и с учетом тенденции к повышению скорости в пассажирском сообщении следует, что энергосбережение может быть обеспечено за счет рациональных режимов движения скоростных поездов в зоне действия ограничений скорости;

- для минимизации потерь электроэнергии и времени при проезде ограничений скорости обоснован режим движения поезда, содержащий этапы целевого торможения с максимальным замедлением, движения с постоянной скоростью и интенсивного разгона поезда. Соответствующие потери рассчитывают по методике, базирующейся на тяговых расчетах и тягово-энергетическом паспорте электровоза;

- сравнение энергетических характеристик электровозов разных типов на тяговом плече с ограничениями скорости следует выполнять по тягово-энергетическому паспорту и по отношению изменения удельного расхода электроэнергии к изменению времени хода при увеличении технической скорости;

- замедление поезда на подходе к ограничению скорости следует выполнять электрическим тормозом электровоза, а режим торможения рассчитывать предложенным аналитическим методом;

- разработанную методику и на ее основе компьютерные программы рекомендуется использовать для расчетов при корректировке графика движения и вводе в эксплуатацию электровозов новых типов.

Личный вклад соискателя заключается:

- в разработке методики и статистическом анализе характеристик тягового плеча с ограничениями скорости и представлении результатов в удобной для практического использования форме;
- в разработке режимов проследования скоростным поездом ограничений скорости с минимальными потерями времени и электроэнергии;
- в разработке комплексной программной системы оперативного контроля движения поезда в зоне ограничения скорости.

Достоверность основных положений и выводов диссертации определяется подтверждением используемых методов численного и аналитического интегрирования уравнения движения поезда для получения значений скорости, времени и пути. Основные положения и выводы подтверждаются совпадением расчетных и реальных данных по кривым скорости движения, времени хода и энергозатратам на тяговом плече Москва-Вязьма для поездов со среднетехнической скоростью в диапазоне от 103 км/ч до 140 км/ч.

Реализация результатов. Результаты исследований переданы Московской Дирекции тяги для организации движения скоростных поездов с ограничениями скорости.

Апробация результатов. Основные результаты работы опубликованы в открытой печати и докладывались на научно-практических конференциях: 11-13 научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов» в 2010-2012 г.г. в МИИТе; научно-практических конференциях «Неделя науки-2011», «Неделя науки-2012» в МИИТе; международной научно-практической конференции «TRANS-MECH-ART-CHEM» в 2010 г. в МИИТе; международной научно-технической конференции «Транспорт 21 века: Исследования. Инновации. Инфраструктура» в 2011 г. в УРГУПСе; международной научно-практической конференции «Проблемы трансферта современных технологий в экономику Забайкалья и железнодорожный транспорт» в 2011 г. в ЗАБИЖТе; XII Всемирном электротехническом конгрессе в 2011 г. в Москве.

Диссертационная работа доложена на расширенных научных семинарах и заседаниях кафедры «Электрическая тяга» МИИТа.

Публикации. По материалам диссертации имеется 21 публикация, в том числе 7 статей по списку ВАК, 10 тезисов конференций и патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, 5 глав, общие выводы и список литературы, включающий 112 наименований. Всего 136 стр. основного текста, проиллюстрированного 56 рис. и 19 табл., 3 приложения.

Автор благодарит профессоров кафедры «Электрическая тяга» д.т.н., профессора Инькова Ю.М., д.т.н. Сидорову Н.Н. и доцента, к.т.н. Литовченко В.В. за методические рекомендации при написании диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, степень её разработанности, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, отражены теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения выносимые на защиту.

В главе 1 «Анализ энергетической и эксплуатационной ситуации в ОАО «РЖД»» проведена оценка энергетической ситуации и влияющих на неё параметров в пассажирском движении при электрической тяге. Затраты ОАО «РЖД» на энергоресурсы превышают 17 % эксплуатационных расходов. Цены на энергоносители и затраты на их приобретение возрастают (примерно на 18-20 % в год).

На удельный расход электроэнергии (УРЭ) влияют ряд существенных факторов, а именно, скорость движения поездов, количество остановок, задержки у запрещающих сигналов, ограничения скорости движения (их доля в энергозатратах на Московской ж.д. составляет около 12 %).

Основными путями энергосбережения являются: внедрение новой энергосберегающей техники (локомотивы, вагоны и путь), оптимизация режимов движения поездов, совершенствование системы нормирования энергозатрат. Задача энергосбережения становится особо актуальной в связи с тенденцией к повышению маршрутной скорости пассажирских поездов на основных магистралях ОАО «РЖД» и, в частности, на Московской железной дороге, что обеспечивает конкурентоспособность пассажирских перевозок и соответствует более полному удовлетворению запросов пассажиров. При повышении скорости движения поездов усиливается негативное влияние её ограничений. Даже на отрезках пути без ограничений скорости имеет место рост УРЭ из-за возрастания основного и удельного сопротивлений движению поезда, конструкции тяговых электроприводов электровозов (с коллекторными или бесколлекторными двигателями). Поэтому далее будут рассмотрены как эксплуатируемые, так и вводимые в эксплуатацию новые электровозы и введены соответствующие оценки их параметров

Совершенствование режимов движения скоростных пассажирских поездов, в том числе в зоне ограничений скорости, выполняется на базе расчетной модели, основой которой являются методы, развитые в работах профессоров Шевалина В.А., Егорченко В.Ф., Бабичкова А.М., Розенфельда В.Е., Исаева И.П., Айзинбуда С.Я., Мугинштейна Л.А., Лисицына А.Л., Баранова Л.А., Ерофеева Е.В., Шевченко В.В., доцентов Медлина Р.Я., Бакланова А.А. и др. Это позволяет оптимизировать режимы движения поездов и выполнять расчеты с использованием микропроцессорной техники. Результаты данной диссертации ориентированы на их использование в практике работы в эксплуатационном локомотивном депо.

В главе 2 «Анализ ограничений скорости и расчет связанных с ними потерь времени и электроэнергии» обоснованы режимы управления поездом при проезде точечного или протяженного ограничения скорости за счет наиболее интенсивного торможения поезда на подходе к ограничению и

наиболее интенсивного разгона поезда после её прохода, обоснованы режимы движения поезда в промежутках разной протяженности.

Проанализирован участок Москва-Вязьма, где доля постоянных ограничений скорости охватывает 42% тягового плеча. Постоянные ограничения ниже 100 км/ч составляют 11 %. Кроме ограничений на реализацию максимальной скорости движения существенно влияют длины промежутков между этими ограничениями. Результаты анализа показаны на рисунке 1, где отдельно представлены данные по промежуткам разной длины.

Варианты движения скоростного поезда в промежутках между ограничениями скорости представлены на рисунке 2. Фактически имеются три варианта движения поезда (вариант А, Б, В). При этом возможности повышения технической скорости в промежутке между ограничениями скорости существенно зависят от числа вагонов и длины промежутков ограничения скорости.

Обоснован подход к анализу факторов удельных энергозатрат и потерь времени, связанный с режимом движения поезда в зоне ограничения. Движение в зоне точечного и протяженного ограничения скорости представлено на рисунке 3. Режим движения при этом состоит из трех этапов: торможение перед входом в ограничение, движение со скоростью ограничения, разгон поезда до разрешенной максимальной скорости.

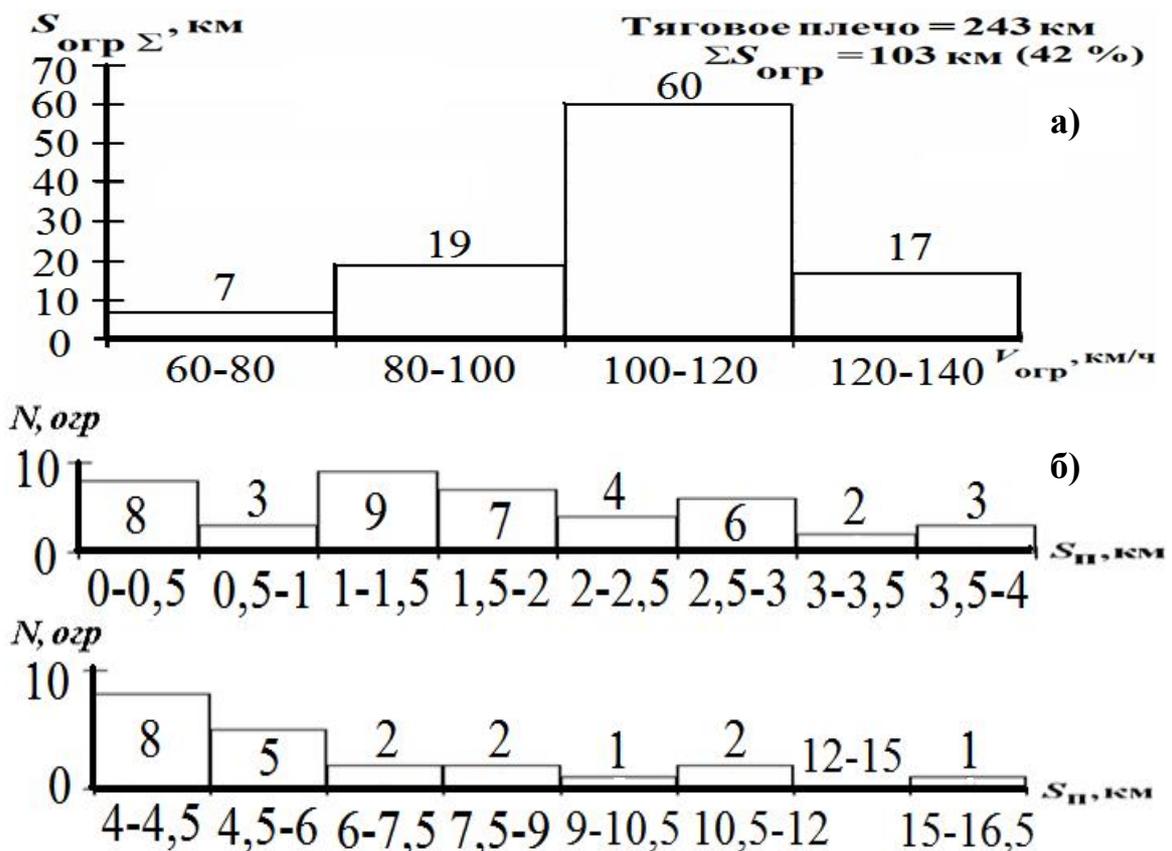


Рисунок 1 – Распределение суммарной протяженности ограничений скорости (а) и протяженности промежутков между ограничениями (б) (тяговое плечо Москва-Вязьма)

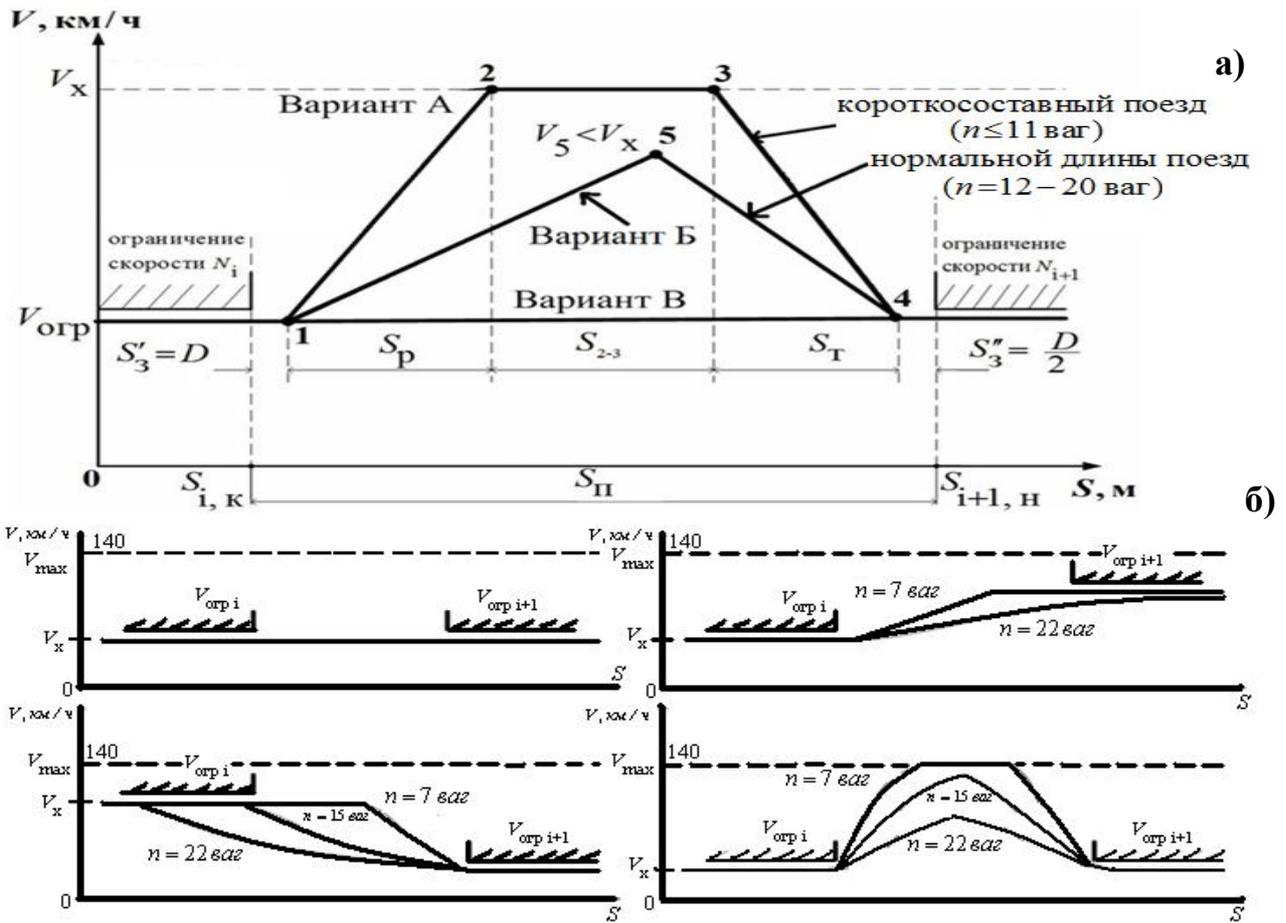


Рисунок 2 – Варианты проследования поездом промежутка между смежными ограничениями (а) и примеры регулирования скорости в этом промежутке (б)

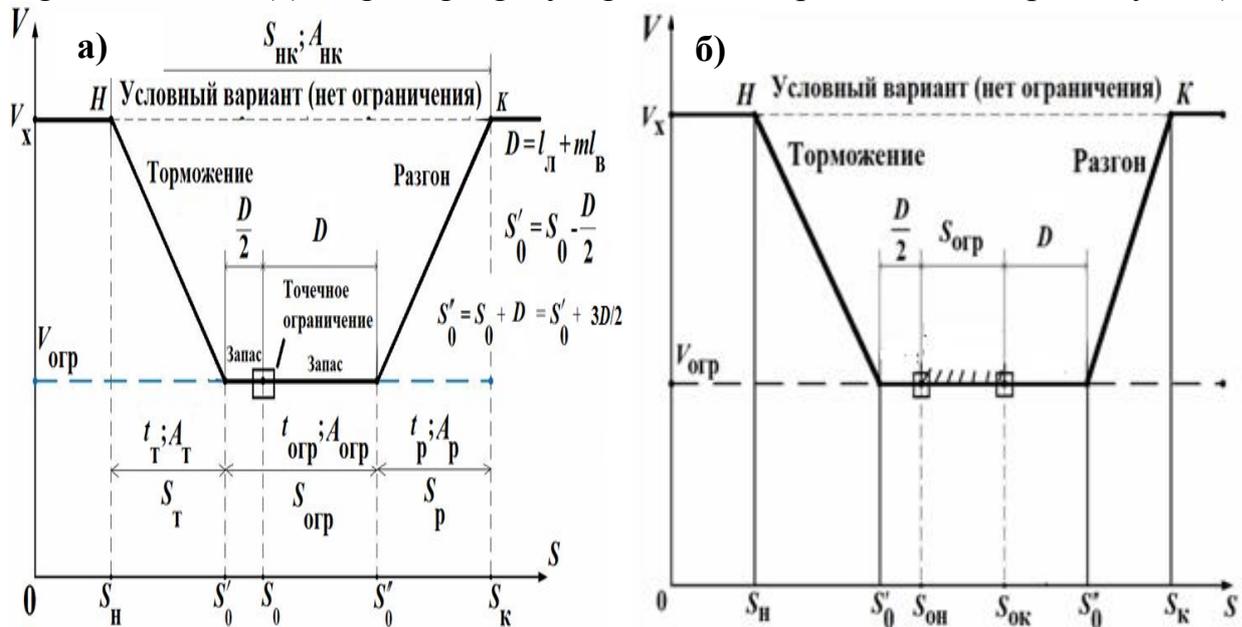


Рисунок 3 – Движение в зоне одиночного ограничения скорости: точечное ограничение (а) и протяженное ограничение (б)

Должны быть требуемые интервалы пути при входе и выходе из ограничения скорости, исходя из безопасности движения. Поэтому фактически длина ограничения скорости увеличивается на $3D/2$, где D –

длина поезда. В диссертации предложена методика расчета потерь времени и электроэнергии при проследовании участков пути с ограничениями скорости.

Потери времени из-за ограничения:

$$\Delta T = (t_T + t_{огр} + t_p) - (S_{нк} / V_x), \quad (1)$$

где t_T – время торможения поезда;

t_p – время разгона поезда до максимальной скорости движения после прохода ограничения;

$t_{огр}$ – время проследования ограничения скорости $t_{огр} = 1,5D / V_{огр}$ для рисунка 3,а и $t_{огр} = (S_{огр} + 1,5D) / V_{огр}$ для рисунка 3,б;

$S_{нк}$ – расстояние, проходимое поездом в условном варианте без ограничения скорости;

V_x – максимальная скорость движения поезда;

$S_{огр}, V_{огр}$ – длина ограничения и разрешенная скорость.

Потери электроэнергии без нагона:

$$\Delta A = (A_{огр} + A_p + A_{сн}) - A_{нк}, \quad (2)$$

где $A_{огр}$ – расход электроэнергии поездом при проследовании ограничения $V_{огр}$;

A_p – расход электроэнергии на разгон до максимальной скорости;

$A_{сн}$ – расход электроэнергии поездом на собственные нужды;

$A_{нк}$ – расход электроэнергии в условном варианте.

Суммарные потери электроэнергии с учетом нагона:

$$\Delta A_{\Sigma} = \Delta A + \Delta A_{н}. \quad (3)$$

Норма $\Delta A_{н}$ на одну минуту нагона условно принята 20 кВт·ч.

В промежутке между смежными ограничениями (рисунок 2,а) повышение технической скорости рассчитывают по формуле:

$$\Delta V_{тех} = S_{\Pi} / \left((2(S'_3 + S''_3) / V_{огр}) + t_p + t_{2-3} + t_T \right), \quad (4)$$

где S_{Π} – длина промежутка между ограничениями скорости;

S'_3, S''_3 – запасы перед входом и после выхода из зоны $V_{огр}$.

Дополнительный расход электроэнергии на проследование промежутка $S_{1,к} \div S_{1+1,н}$ длиной S_{Π} с повышенной технической скоростью (до 140 км/ч):

$$\Delta A = (A_{S'_3} + A_{S''_3} + A_p + A_{2-3}) - A_{S_{\Pi}}, \quad (5)$$

где $A_{S'_3}, A_{S''_3}$ – расход электроэнергии поездом при проследовании участков запаса S'_3, S''_3 ;

$A_{S_{\Pi}}$ – расход электроэнергии поездом в этом же промежутке при отсутствии смежных ограничений.

В главе 3 «Анализ энергоемкости пассажирских электровозов на базе тягово-энергетического паспорта» выполнен расчет УРЭ на базе тягово-энергетического паспорта (ТЭП), оценка параметров электровозов с целью обеспечения минимизации затрат электроэнергии при движении поезда по участкам с ограничениями скорости.

Для ТЭП рассчитывают установившуюся скорость $V_{уст}$ движения при заданном числе вагонов n и уклоне i , как точки пересечения кривых сопротивления движению с тяговой характеристикой электровоза на данной позиции, решая графоаналитическим способом уравнение:

$$W = W_0 + W_i = [P\omega'_0(V_{уст}) + Q\omega''_0(V_{уст})] + (P + Q)i = F(V_{уст}), \quad (6)$$

где W_0 – основное сопротивление движению поезда;

P и ω'_0 – вес локомотива и его удельное основное сопротивление движению;

Q и ω''_0 – вес состава и его удельное основное сопротивление движению.

Удельные энергозатраты составляют:

$$a(i) = U \sum I_{д} / ((P + Q)V_{уст} 10^4), \quad (7)$$

где U – напряжение на токоприемнике электровоза; принимают 3 кВ;

$\sum I_{д}$ – ток, потребляемый электровозом (определяют по характеристике $V(I)$).

На рисунке 4 показаны ТЭП для электровозов ЧС7, ЭП10, ЭП20, где показаны зависимости установившейся скорости $V_{уст}(i)$ и УРЭ $a(i)$.

Аналогично рассчитывают характеристики ТЭП с вариацией по составности поезда. В результате установлено, что энергозатраты для электровозов ЭП10 и ЭП20 выше, чем для ЧС7, но при этом выше и установившиеся скорости на 15 %, то есть энергозатраты увеличиваются с повышением установившейся скорости. Поэтому эксплуатация электровоза ЭП20 особенно эффективна в скоростном движении.

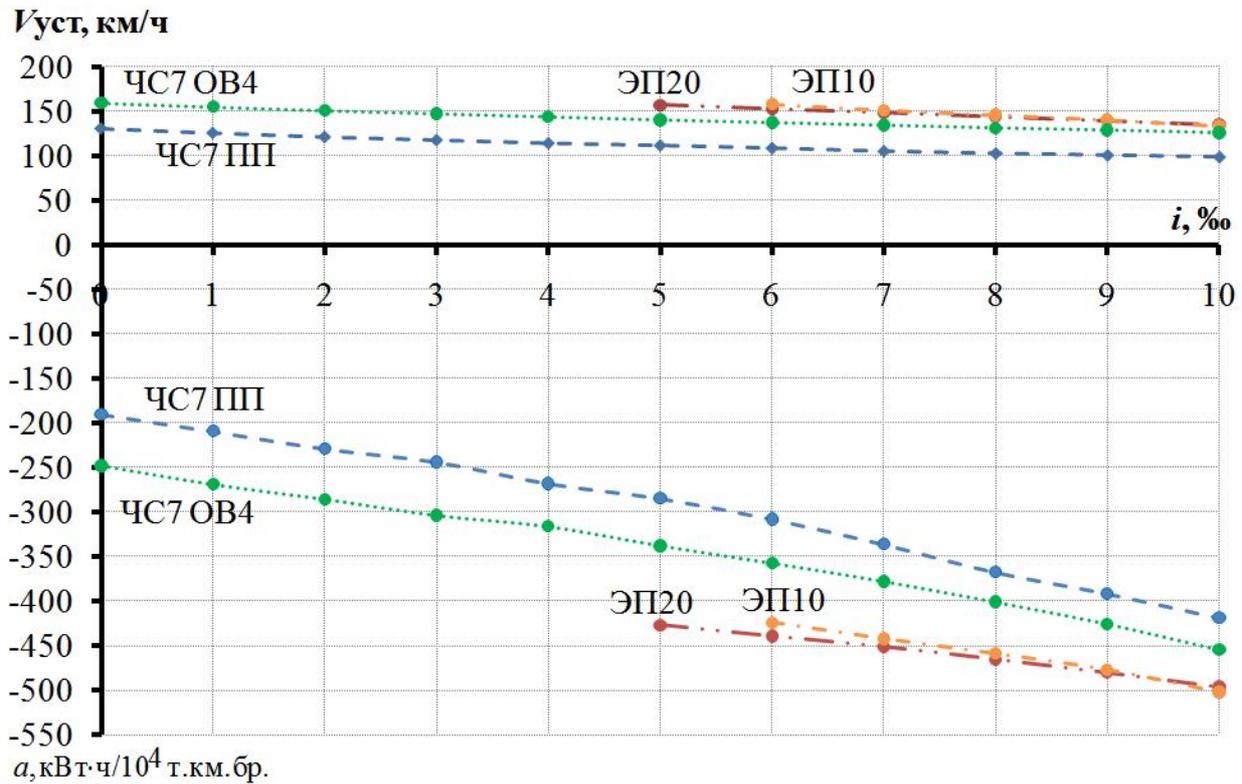


Рисунок 4 – Установившиеся значения скорости движения и УРЭ электровозов в составе пассажирского поезда из 18 вагонов

Для определения фактической энергоёмкости (значение УРЭ, приходящегося на единицу установившейся скорости движения) по полученным данным введен показатель энергетической эффективности электровоза, как отношение a к $V_{уст}$. Из графиков, представленных на рисунке 5, следует, что имеется разница в энергоёмкости между электровозами ЧС7, ЭП10, ЭП20. При работе на позиции ПП электровоз ЧС7 с коллекторными тяговыми двигателями уступает электровозам ЭП10 и ЭП20, оснащённым асинхронными тяговыми двигателями. Однако, при работе на позиции ослабления возбуждения ОВ4 электровоз ЧС7 является самым экономичным при существующем графике движения. Это подтверждается расчетами для тягового плеча Москва-Вязьма. Возможность работы на высоких позициях ОВ определяется техническим состоянием пути и наличием ограничений. Поэтому сравнение по энергетическим показателям работы электровозов должно быть дополнено тяговыми расчетами на конкретных маршрутах движения пассажирских поездов.

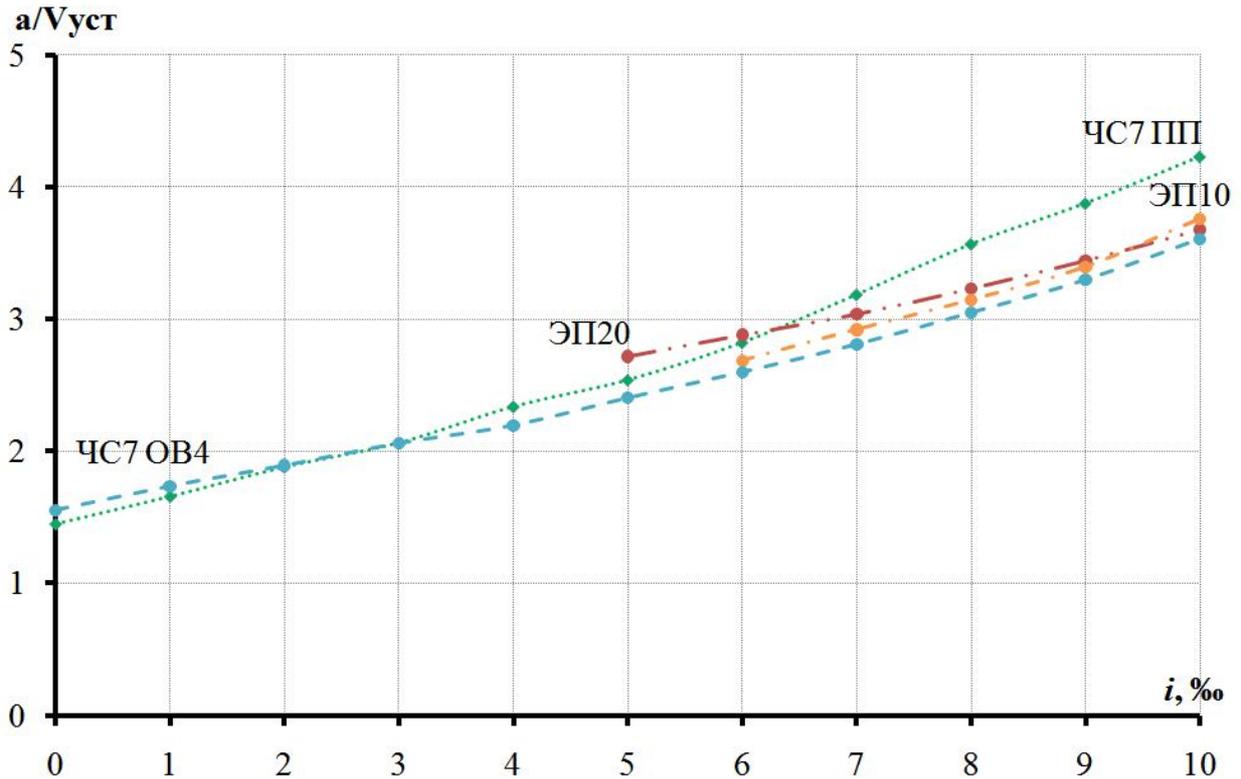


Рисунок 5 – Зависимость УРЭ на единицу установившейся скорости движения электровозов (состав 18 вагонов)

В главе 4 «Математическая модель по расчету потерь времени и электроэнергии пассажирского поезда из-за ограничений скорости движения» обоснована модель расчета потерь времени и электроэнергии из-за ограничений. Показана целесообразность использования реостатного тормоза для замедления поезда при подходе к ограничению, в том числе и совместно с электропневматическим тормозом для поездов с большим числом вагонов. Процесс торможения имеет особое значение по соображениям безопасности движения и сокращения потерь времени и электроэнергии. При реостатном тормозе необходимо рассмотреть три этапа:

Этап I – подготовительный (сразу после включения контроллера реостатного торможения); его длительность $\Delta t=6-8$ с, при этом автоматически собирается схема с подключением реостатов к якорным обмоткам, а обмоток возбуждения – посредством импульсного преобразователя к секциям реостата.

На этом этапе тормозная сила $B=0$ и поезд незначительно замедляется за счет действия только силы сопротивления движению $W = W_0 + W_i \approx const$.

Конечная скорость движения поезда равна:

$$V_{к} = V_{н} - \frac{W_0(V_{н}) + W_i}{m_{п}} \Delta t, \quad (8)$$

где $V_{н}$ – начальная скорость движения поезда на этапе I;

$m_{\Pi} = P(1 + \gamma') + Q(1 + \gamma'')$ – приведенная масса поезда;

γ', γ'' – коэффициенты инерции вращающихся масс локомотива и пассажирских вагонов;

$W_0(V_H)$ – основное сопротивление движению поезда при $V=V_H$.

Расстояние, проходимое поездом на этапе I, определяется по формуле:

$$S = \frac{V_H + V_K}{2} \Delta t. \quad (9)$$

Этап II – постепенное нарастание тормозной силы до B_{\max} по линейному закону $B = \beta t$, где $\beta = B_{\max} / \Delta t$, а $\Delta t = 8$ сек, что заложено в систему автоматики. Тогда уравнение движения поезда принимает вид:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\beta t + W_0(V_H) + W_i}{m_{\Pi}}. \quad (10)$$

Введя, аналогично этапу I, условие $W = W_0 + W_i \approx const$, в уравнение (10) разделяем переменные и интегрируем:

$$\int dV = -\int \frac{\beta t + W_0(V_H) + W_i}{m_{\Pi}} dt. \quad (11)$$

Выражение (11) представляется в виде определенного интеграла:

$$\int_{V_H}^{V_K} dV = -\frac{\beta}{m_{\Pi}} \int_0^{\Delta t} t dt - \frac{1}{m_{\Pi}} \int_0^{\Delta t} (W_0(V_H) + W_i) dt; \quad (12, a)$$

$$V \Big|_{V_H}^{V_K} = -\frac{\beta}{m_{\Pi}} \frac{t^2}{2} \Big|_0^8 - \frac{W_0(V_H) + W_i}{m_{\Pi}} t \Big|_0^8. \quad (12, б)$$

Подставляя пределы $t=0$ и 8 с, получаем:

$$V_K - V_H = -\frac{1}{m_{\Pi}} (32\beta - 8(W_0(V_H) + W_i)), \quad (13)$$

откуда скорость поезда в конце II-го этапа равна:

$$V_K = V_H - \frac{1}{m_{\Pi}} (32\beta - 8(W_0(V_H) + W_i)). \quad (14)$$

Путь, пройденный поездом на этапе II, определяется путем интегрирования выражения (12, б):

$$\begin{aligned} S &= \int_0^{\Delta t} V_K dt = \int_0^{\Delta t} V_H dt - \frac{\beta}{m_{\Pi}} \int_0^{\Delta t} \frac{t^2}{2} dt - \frac{1}{m_{\Pi}} \int_0^{\Delta t} (W_0(V_H) + W_i) t dt = \\ &= V_H t \Big|_0^8 - \frac{\beta t^3}{6m_{\Pi}} \Big|_0^8 - \frac{(W_0(V_H) + W_i) t^2}{2m_{\Pi}} \Big|_0^8 = \\ &= 8V_H - \frac{1}{m_{\Pi}} \left(\frac{256}{3} \beta + 32(W_0(V_H) + W_i) \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Для этапа II необходимо проверить интенсивность нарастания замедления по критерию профессора К. Хорвата (Будапештский технический университет):

$$\left| d^2V / dt^2 \right| < 0,2 \text{ м / с}^3. \quad (16)$$

Расчеты показывают, что абсолютные значения интенсивности не превышают $0,1 \text{ м / с}^3$, что вполне соответствует критерию (16).

Этап III соответствует торможению в диапазоне скорости от конечной на этапе II до $V_{огр}$. При расчетах в уравнении движения учитываем сумму сил сопротивления движению $W(V)$ и силы торможения $B(V)$ (рисунок 6). В тормозной характеристике выделяют два участка в интервале скорости от 140 до 85 км/ч и до 85 км/ч. В каждом из этих участков характеристики $W_0(V)$ и $B(V)$ могут быть представлены линейными и параболическими зависимостями. В диссертации выполнено интегрирование аналитическим способом, т.е. путем сведения исходного уравнения движения поезда к табличным интегралам для обоих способов аппроксимации. Ниже в качестве примера рассмотрено интегрирование для параболической аппроксимации. Исходные уравнения для удельных сил сопротивления движению $\omega(V)$ и тормозной силы $b(V)$ имеют вид:

$$\frac{dV}{dt} = V \frac{dV}{dS} = -[b(V) + \omega(V)]; \quad (17)$$

$$b(V) + \omega(V) = aV^2 - bV + c, \quad (18)$$

где $a = A_0 + C_0$; $b = A_1 + C_1$; $c = A_2 + C_2$.

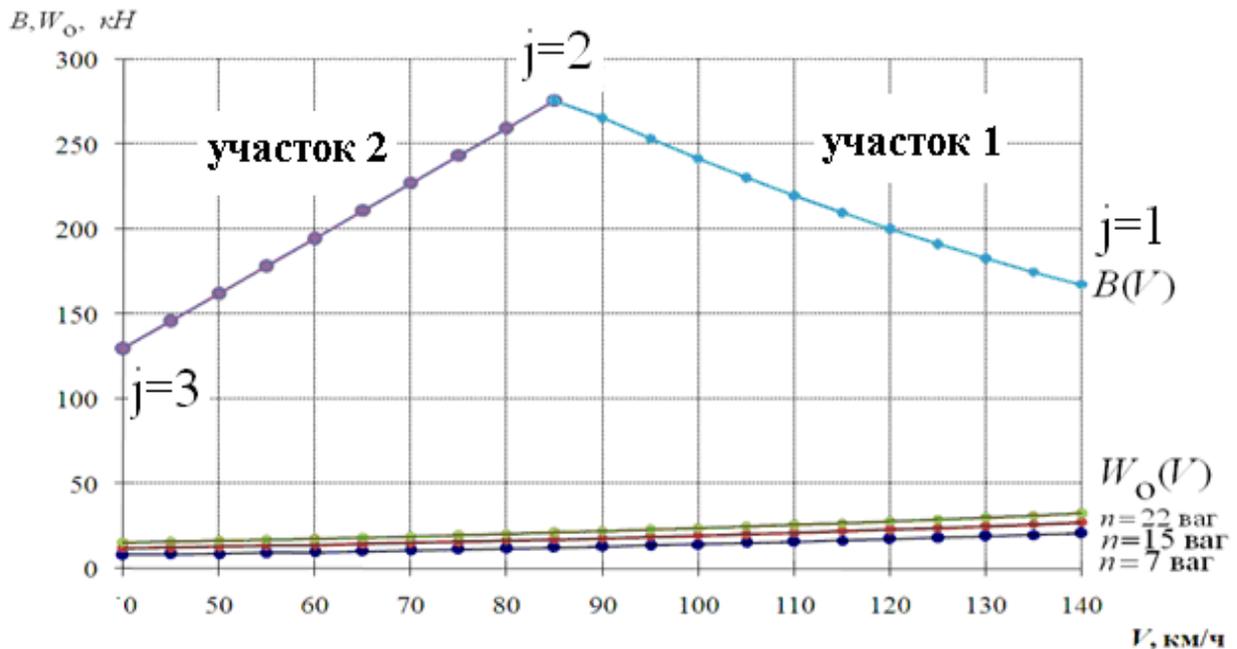


Рисунок 6 – Зависимость основного сопротивления движению и тормозной силы от скорости (участок 1 - ограничение по потенциальным условиям на коллекторе, участок 2 - ограничение по току возбуждения ТЭД)

Их интегрирование выполнено в пределах от V_H до V_K , причем для участка высоких скоростей $V_H \leq 160$ км/ч, $V_K \geq 85$ км/ч, а для участка низких скоростей $V_H \leq 85$ км/ч, $V_K \geq 0$ км/ч (для ЧС7). Необходимо взять интегралы:

$$t = - \int_{V_H}^{V_K} \frac{dV}{aV^2 - bV + c}. \quad (19)$$

$$S = - \int_{V_H}^{V_K} \frac{VdV}{aV^2 - bV + c}. \quad (20)$$

Эти интегралы рассмотрены в интегральном исчислении, но процесс сведения их к табличным достаточно сложен. Вводим обозначение:

$$\frac{c}{a} - \frac{b^2}{4a^2} = k^2. \quad (21)$$

Причем для рассматриваемой задачи $k^2 > 0$.

Это позволяет получить конечный результат в виде:

$$t = \frac{1}{ak} \left[\operatorname{arctg} \frac{V_K - \frac{b}{2a}}{k} - \operatorname{arctg} \frac{V_H - \frac{b}{2a}}{k} \right]. \quad (22)$$

$$S = \frac{1}{2a} \left[\begin{aligned} & \ln \left| aV_K^2 - bV_K + c \right| + \frac{b}{ak} \operatorname{arctg} \frac{V_K - \frac{b}{2a}}{k} - \\ & - \ln \left| aV_H^2 - bV_H + c \right| - \frac{b}{ak} \operatorname{arctg} \frac{V_H - \frac{b}{2a}}{k} \end{aligned} \right]. \quad (23)$$

Расчеты по этим формулам для большего диапазона $V_H \div V_{огр}$, например для $V_H = 140$ км/ч и $V_{огр} = 60$ км/ч выполняют в два этапа: сначала для участка высоких скоростей в диапазоне от 140 до 85 км/ч, а потом для участка низких скоростей до 85 км/ч. Затем суммируют полученные значения отдельно для S и для t .

Полученные формулы для расчёта параметров тормозного режима на этапах I-III целесообразно использовать в стационарном компьютере инженера-теплотехника эксплуатационного локомотивного депо, в бортовой системе автоведения, а также в информационно-вычислительных центрах при выполнении тяговых расчётов для скоростных поездов. Автором разработана программа с использованием языка программирования *Visual Basic* для инженера-теплотехника. Предварительно в компьютер, через окно (рисунок 7), вводят все параметры, задаваемые при наличии ограничения, в том числе $V_x, V_{огр}, S_{огр}, n$, координату начала ограничения. Профиль пути на тяговом плече введен в компьютер заранее. В результате расчета получаем диаграмму, показанную на рисунке 3 и значения потерь времени и

электроэнергии. Такие расчеты необходимы при корректировке графика движения, режимных карт, изменении параметров ограничения и составности поезда. Примеры расчетов приведены в главе 4.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ результатов расчета математической модели и показаний регистратора параметров движения и автоведения (РПДА-П).

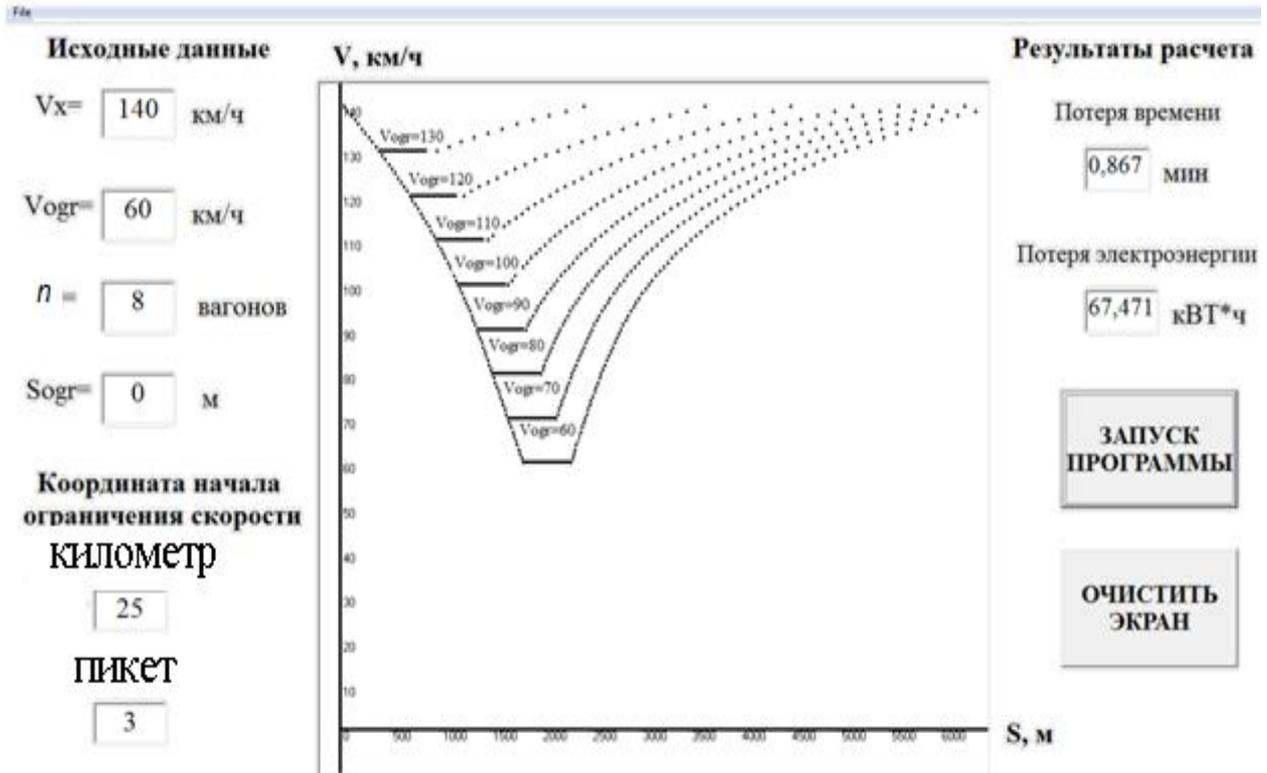


Рисунок 7 – Окно работы программы по расчету потерь времени и электроэнергии пассажирского поезда при ограничении скорости движения

Таблица 1 – Сравнительный анализ результатов расчета математической модели и показаний регистратора параметров движения и автоведения (РПДА-П).

Результаты расчета математической модели		Результаты показаний РПДА-П		Протяженность ограничения скорости S_{ogr} , м	Скорость ограничения V_{ogr} , км/ч
Потери времени ΔT , сек	Расход электроэнергии после прохода ограничения скорости ΔA , кВт·ч	Потери времени ΔT , сек	Расход электроэнергии после прохода ограничения скорости ΔA , кВт·ч		
66	108	72	119	400	60
59	110	65	121	700	70
38	61	42	67	300	80
31	52	34	57	400	90
29	49	32	54	1000	100
19	24	21	27	900	110

В главе 5 «Оценка энергозатрат и времени хода на участке Москва-Можайск для различных максимальных скоростей и типов электровозов» решена конкретная практическая задача, поставленная Московской Дирекцией тяги, по оценке энергозатрат и времени хода на участке Москва-Можайск для различных максимальных скоростей и типов электровозов. При этом варьировались: тип электровоза (ЧС7, ЭП10, ЭП20, ЧС200), количество вагонов в составе $n = 7, 10, 15, 22$, максимальная разрешенная скорость $V_{\max} = 120, 140, 160, 200$ км/ч. Расчеты на указанном участке выполнены для трех вариантов:

- условный вариант отсутствия ограничений; полученные при этом затраты времени и УРЭ приняты за 100 %;
- то же, но с учетом только постоянных ограничений, которые детально рассмотрены в главе 2;
- то же с учетом всех ограничений – постоянных и временных.

Влияние временных ограничений незначительно ввиду того, что их немного. В целом увеличение времени хода Δt для ЧС7 и ЭП10 при максимальной скорости $V_{\max} = 120-160$ км/ч составляет по сравнению с условным вариантом соответственно 10-30 %. Аналогично для ЧС200 и ЧС7 при $V_{\max} = 120-200$ км/ч это увеличение составляет 10-70 %. Разброс времени в зависимости от типа электровоза и числа вагонов находится в пределах до 8 %.

Для каждого из рассмотренных типов электровозов (рисунок 8) с ростом разрешенной максимальной скорости движения наблюдается рост УРЭ при наличии участков с ограничениями по скорости. Это связано с увеличением сопротивления движению, с ростом скорости $w(V)$, имеющим параболическую зависимость. В диапазоне увеличения УРЭ ($\Delta a > 100\%$) электровозы полностью используют возможность двигаться с разрешенной максимальной скоростью после прохождения её ограничений. «Точки перелома», то есть спада УРЭ по отношению к базовому варианту, находятся практически во всех вариантах расчетов в диапазоне 140-150 км/ч.

Фактором, определяющим значение УРЭ, является скорость движения. Однако расчеты показали (рисунок 9), что этот фактор для всех рассматриваемых серий электровозов мало отличается друг от друга.

Разница составляет примерно 2 км/ч при уровне среднетехнических скоростей более 110 км/ч (составность 7 вагонов) и уровне более 100 км/ч (составность 22 вагона).

Во всех рассмотренных вариантах наибольший УРЭ и наихудшее соотношение УРЭ к времени хода наблюдается при неполносоставных поездах с числом вагонов $n=7$. При разрешенной максимальной скорости движения до 160 км/ч, наличии или отсутствии ограничений скорости, величины УРЭ являются наилучшими для электровозов ЧС7 при работе с ослаблением возбуждения на ОВ4. Аналогичные показатели у электровоза ЭП10. Электровоз ЭП20 следует вводить в эксплуатацию на маршрутах, где разрешенная максимальная скорость движения составляет 200 км/ч.

$\Delta\alpha, \%$

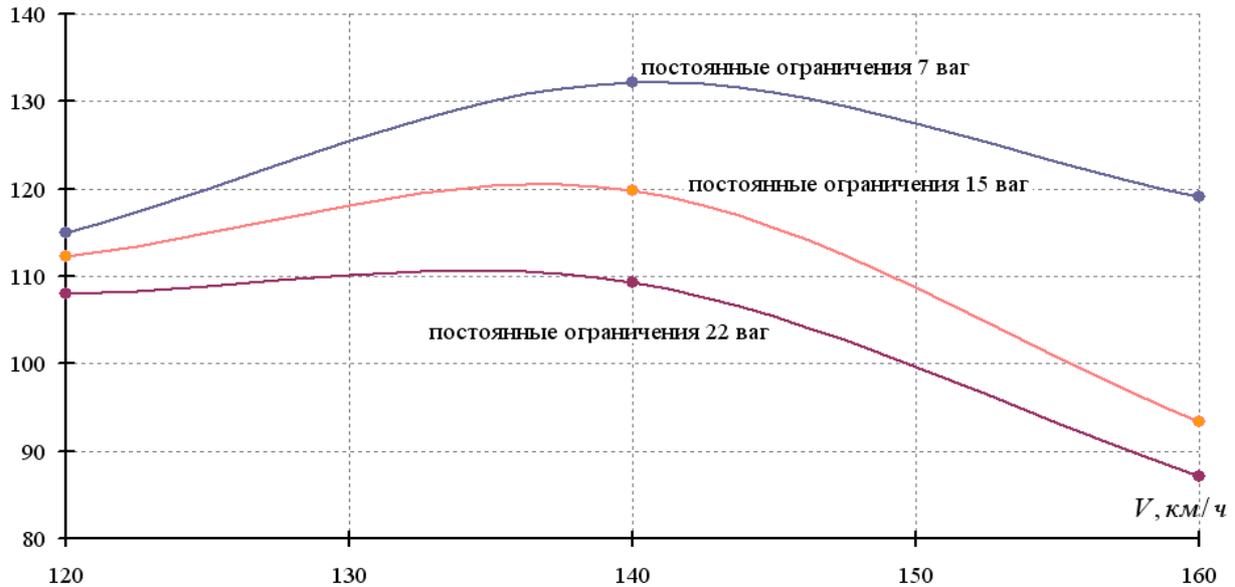


Рисунок 8 – Зависимость изменения УРЭ электровоза ЧС7 от максимальной скорости движения при наличии постоянных ограничений по отношению к базовому варианту

$V_{\text{ср. тех}}, \text{ км/ч}$

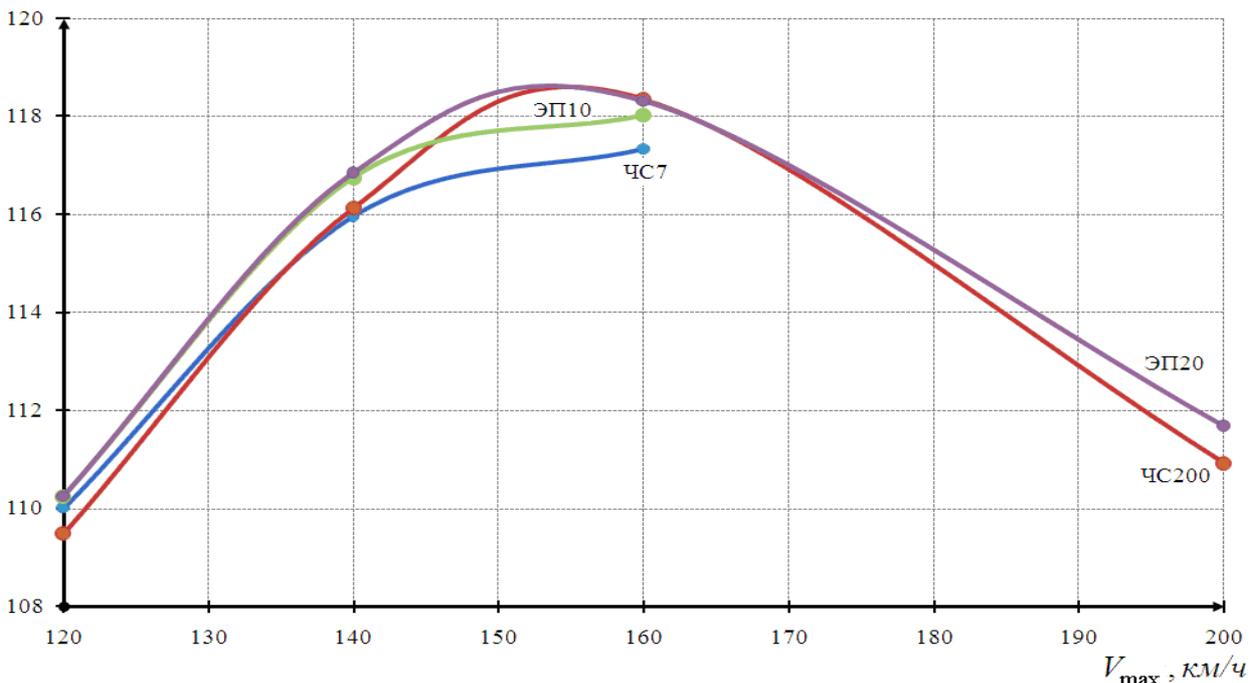


Рисунок 9 – Зависимость изменения среднетехнической скорости от максимальной (7 вагонов) с учетом постоянных ограничений скорости

Тяговые расчеты показали, что применение электрического торможения позволяет сократить затраты на электроэнергию в удельном измерении на 1,5 - 5 % при составности поезда в 7 и 22 вагона. Применение механического торможения во всех просчитанных вариантах даёт увеличение времени хода по участку Москва – Можайск на 3 минуты по сравнению с электрическим торможением независимо от числа вагонов в составе поезда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен аналитический метод интегрирования уравнения движения поезда для тормозных расчетов при входе поезда в ограничение, что ускоряет выполнение расчетов, снижает погрешность и рекомендуется для использования в системе автоведения. При этом, исходный интеграл при решении уравнения движения поезда сводится к табличному, а весь процесс интегрирования разбивается на участки, соответствующие тормозной характеристики электровоза.

2. Предложен алгоритм расчета потерь времени и электроэнергии для любого диапазона ограничения скоростей. Обоснованы требуемые интервалы пути при входе в диапазон ограничения скоростей и выходе из них.

3. Предложена методика статистического анализа ограничений скорости с учетом как величины скорости в зоне ограничения, так и его протяженности. Ограничения при этом разделяются на точечные и протяженные, а кроме самих ограничений необходимо учитывать промежутки между ними. Режим движения поезда в интервале ограничения участков пути включает следующие этапы:

- целевого торможения перед входом в зону ограничения скорости электрическим (реостатным) тормозом, а при длиннооставных поездах – электрическим тормозом совместно с электропневматическим;
- движения с постоянной скоростью равной скорости ограничения;
- разгона поезда до максимально разрешенной скорости.

Установлено, что фактически можно влиять только на режимы целевого торможения и разгона. При этом торможение нужно проводить с максимальным замедлением, разгон с максимальным ускорением.

4. Рекомендовано рассмотрение вариантов движения поезда в промежутке между ограничениями:

- в длинном промежутке: разгон до максимальной скорости, движение с максимальной скоростью, торможение перед следующим ограничением;
- в промежутках средней протяженности: разгон и торможение (без достижения максимальной скорости);
- в коротких промежутках нецелесообразно повышать скорость поезда, т.е. смежные ограничения фактически смыкаются (интервалы промежутков приведены в кандидатской диссертации).

5. Реализован алгоритм расчета всех трех этапов движения поезда в виде компьютерной программы с учетом параметров профиля пути, типа электровоза, составности и заданного режима движения. Эта программа рекомендуется для использования при корректировке режимных карт и норм удельных энергозатрат, например при изменении графика движения. Сравнение результатов расчетов, полученных по этой программе, с данными поездок для скоростных поездов с технической скоростью в диапазоне от 80

до 110 км/ч и с разрешенной скоростью 140 км/ч (электровоз ЧС7, $n=6-13$ вагонов), показало, что расхождение их не превышает 5-7 %.

6. Выполнено сравнение электровозов ЧС7, ЭП10 и ЭП20 по энергозатратам на основе тягово-энергетического паспорта. Электровозы ЭП10 и ЭП20 имеют более высокие удельные энергозатраты, но реализуют высокую максимальную скорость пассажирских поездов. Однако значение УРЭ приходящегося на единицу установившейся скорости движения, минимально при работе электровозов ЧС на высоких позициях ослабления возбуждения.

7. Наибольший удельный расход электроэнергии наблюдается при неполносоставных поездах с числом вагонов в 7 единиц.

8. Установлено, что наличие большого числа участков с ограничениями скорости движения приводит к неэффективному использованию скоростных электровозов, рассчитанных на движение до 200 км/ч. При разрешенной максимальной скорости движения более 140 км/ч происходит снижение среднетехнической скорости движения при составности более 10 вагонов.

9. Существующие постоянные и временные ограничения скорости движения поездов приводят к тому что время движения поездов по участку по отношению к постоянной разрешенной скорости движения может увеличиваться в 1,5 раза, а удельный расход электроэнергии при максимальной скорости 140 км/ч возрастает на 40 %.

10. Установлено, что для участка Москва – Можайск оптимальным вариантом для тяги пассажирских поездов является электровоз ЧС7.

11. Анализ потребления электроэнергии в электрической тяге в том числе в дальнем пассажирском сообщении, позволил установить, что в действующей системе нормирования энергозатрат учтены основные влияющие факторы. Но с повышением скоростей движения усиливается негативное влияние ограничений скорости на удельный расход электроэнергии, что требует уточнения алгоритма их учета.

12. По результатам исследования разработано (на уровне полезной модели) и защищено патентом устройство для реостатного торможения электровозов постоянного тока, которое позволяет ускорить процесс включения тяговых двигателей в генераторном режиме.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. Тельпов, Б.В. Универсальная система автоматизированного ведения пассажирского поезда [Текст] / Б.В. Тельпов, С.С. Борисенков // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 3. – С. 48-53.
2. Борисенков, С.С. Электрическое торможение рельсового электроподвижного состава постоянного тока [Текст] / С.С. Борисенков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 5-6. – С. 28-29.
3. Борисенков, С.С. Расчет потерь энергии при ограничении скорости [Текст] / С.С. Борисенков // Мир транспорта. – 2012. – т. 39. – № 1. – С. 72-76.
4. Феоктистов, В.П. Обобщенные энергетические характеристики электрического подвижного состава в условиях скоростного движения [Текст] / В.П. Феоктистов, С.С. Борисенков // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 3. – С. 75-80.
5. Феоктистов, В.П. Тяговый электродвигатель постоянного тока как звено системы автоматического регулирования электропоезда [Текст] / В.П. Феоктистов, С.С. Борисенков, Ко Ко Хтет // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 4. – С. 27-29.
6. Феоктистов, В.П. Инфраструктурный резерв повышения скоростей пассажирских поездов [Текст] / В.П. Феоктистов, С.С. Борисенков // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 6. – С. 40-41.
7. Феоктистов, В.П. Резервы технической скорости при наличии ее ограничений [Текст] / В.П. Феоктистов, С.С. Борисенков // Мир транспорта. – 2013. – т. 45. – № 1. – С. 64-68.
8. Пат. 117118 Российская Федерация, МПК7 Н В60L 11/04. Устройство для реостатного торможения электровоза постоянного тока [Текст] / Феоктистов В.П., Борисенков С.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет путей сообщения". № 2011148975/11; заявл. 02.12.11; опубл. 20.06.12, Бюл. № 17. – 2 с.: ил.

Прочие публикации

9. Борисенков, С.С. Повышение безопасности движения поездов на основе совершенствования и развития станционной техники [Текст] / С.С. Борисенков // Безопасность движения поездов: труды X научн.-практ. конф.; М.: МГУПС (МИИТ). – 2009. – С. X 18-X 19.
10. Борисенков, С.С. Анализ критериев надежности, экономичности и безопасности в дальнем пассажирском сообщении [Текст] / С.С.

Борисенков, А.В. Мирнов // Безопасность движения поездов: труды XI научн.-практ. конф.; М.: МГУПС (МИИТ). – 2010. – С. X 1-X 5.

11. Борисенков, С.С. Теория реостатного торможения в пассажирском скоростном сообщении [Текст] / С.С. Борисенков, В.Ю. Бушкин // "TRANS-MECH-ART-CHEM": труды VII международной научн.-практ. конф.; М.: МГУПС (МИИТ). – 2010. – С. 424.

12. Борисенков, С.С. Статистическая оценка эффективности нормирования энергозатрат в электрической тяге [Текст] / С.С. Борисенков // Неделя науки-2011 «Наука МИИТа-транспорту»: труды научн.-практ. конф.; М.: МГУПС (МИИТ). – 2010. – С. III 1-III 2.

13. Борисенков, С.С. Безопасность движения скоростных пассажирских поездов при наличии локальных ограничений скорости [Текст] / С.С. Борисенков // Безопасность движения поездов: труды XII научн.-практ. конф.; М.: МГУПС (МИИТ). – 2011. – С. IX 4-IX 5.

14. Борисенков, С.С. Пожаробезопасность силовых полупроводниковых преобразователей электроэнергии перспективного электровоза [Текст] / С.С. Борисенков, Я.А. Бредихина // Безопасность движения поездов: труды XII научн.-практ. конф.; М.: МГУПС (МИИТ). – 2011. – С. V 7-V 8.

15. Борисенков, С.С. Влияние ограничений скорости на организацию скоростного движения пассажирских поездов [Текст] / С.С. Борисенков // Вестник МИИТа. – 2011. – № 24. – С. 7-13.

16. Борисенков, С.С. Обеспечение стимулирующего эффекта технологических норм [Текст] / С.С. Борисенков // "Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура": труды научн.-техн. конф.; В. 97 (180), т. 2. – УРГУПС. – 2011. – С. 90-94.

17. Борисенков, С.С. Организация скоростного пассажирского движения на участке Москва–Вязьма [Текст] / С.С. Борисенков, А.Х. Раюмов // "Проблемы трансферта современных технологий в экономику Забайкалья и железнодорожный транспорт": труды международной научн.-практ. конф.; т. 2. – ЗАБИЖТ. – 2011. – С. 37-42.

18. Борисенков, С.С. Электродинамическое торможение транспортных средств [Текст] / С.С. Борисенков, Я.А. Бредихина // "XII Всемирный Электротехнический конгресс": труды.; Москва. – 2011. – С. 44-45.

19. Борисенков, С.С. Нормообразующие факторы и их учет при расчете технологических норм для дальнего пассажирского [Текст] / С.С. Борисенков // Неделя науки-2012 «Наука МИИТа-транспорту»: труды научн.-практ. конф.; М.: МГУПС (МИИТ). – 2012. – С. III 93-III 94.

20. Борисенков, С.С. Обзор научных и научно-технических работ по нормированию энергозатрат, их учету и по энергосбережению [Текст] / С.С. Борисенков // Неделя науки-2012 «Наука МИИТа-транспорту»: труды научн.-практ. конф.; М.: МГУПС (МИИТ). – 2012. – С. III 94-III 95.

21. Борисенков, С.С. Динамика торможения скоростного поезда перед ограничением скорости [Текст] / С.С. Борисенков // Безопасность

движения поездов: труды XIII научн.-практ. конф.; М.: МГУПС (МИИТ). – 2012. – С. VI 13-VI 14.

22. Борисенков, С.С. Влияние ограничений скорости движения на потребление электроэнергии в тяге поездов [Текст] / С.С. Борисенков, Я.А. Бредихина // Безопасность движения поездов: труды XIII научн.-практ. конф.; М.: МГУПС (МИИТ). – 2012. – С. VI 12.

БОРИСЕНКОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ СКОРОСТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ЛОКАЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ СКОРОСТИ

05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2013 г.

Объем 1, 5 п.л.

Формат бумаги: 60x84 1/16

Заказ -

Тираж 80 экз.

УПЦ ГИ МГУПС (МИИТ) 127994, Москва, ул. Образцова, д.9, стр.9.