

Ленченкова

На правах рукописи

Ленченкова Елена Павловна

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАССЫ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЛАНА**

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и
проектирование железных дорог

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» (МГУПС (МИИТ)) на кафедре «Проектирование и строительство железных дорог»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Бучкин Виталий Алексеевич

Официальные оппоненты:

1. Аккерман Геннадий Львович, доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», кафедра «Путь и железнодорожное строительство», профессор;
2. Сидорова Елена Анатольевна, кандидат технических наук
АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»,
отделение Аппарат Объединенного ученого совета АО «ВНИИЖТ»,
научный сотрудник.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения».

Защита состоится «28» февраля 2019 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.15 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д.9, стр.9, ауд.7618.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.miit.ru

Автореферат разослан «__» января 2019г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Королев Вадим Вадимович



Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования определяется необходимостью перехода к цифровым технологиям проектирования трассы железнодорожного пути.

Распоряжения ОАО «РЖД» от 03 декабря 2010г. №2511р «О создании комплексной системы пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта» и от 20 апреля 2012г. № 802р определяют обязательный порядок создания высокоточной координатной системы (ВКС) при комплексной реконструкции объектов железнодорожного транспорта; при новом строительстве – необходимость ее создания устанавливается заданием на проектирование. При проектировании высокоскоростных магистралей создание высокоточной координатной системы является технической необходимостью.

Анализ проблем создания ВКС показал, что использование модели трассы пути, состоящей из двух плоских проекций – плана и профиля – принятых в классической теории проектирования новых и реконструкции существующих железных дорог и ее преобразование в трехмерную линию неизбежно приводит к возникновению ошибок и коллизий, искажающих фактическое положение трассы в пространстве. Это связано с тем, что изначально не учитывается пространственное начертание трассы железной дороги, и план линии как проекция существует только в виде виртуального объекта в составе проектной документации. Проекцией *круговой кривой*, расположенной на продольном уклоне, является *отрезок эллипса* (а не окружности) и по мере увеличения крутизны уклона расхождение параметров и координат кривой и ее проекции (эллипса) увеличивается.

Решением возникшей проблемы для проектирования реконструкции железных дорог является использование единой модели трассы на всех этапах жизненного цикла железной дороги. Особенностью такой модели является понимание плана линии как *развертки* трассы, определяющей траекторию движения поезда в пространстве. Именно на развертке (а не на проекции) план линии должен представлять собой последовательность правильных круговых кривых, переходных кривых (клотоид) и прямых, с углами поворота (кривые) и

направления (прямые), которые соответствуют измеряемым в реальности, а не на виртуальном объекте проектной документации.

Исходными данными для проектирования плана сейчас являются только плановые координаты точек съемки, высотная же координата игнорируется, что и приводит к конфликту моделей плана, проектной (проекции) и эксплуатационной (развертки). Переход при проектировании от модели-проекции к модели-развертке обеспечит получение проектного решения по плану линии, которое может быть воспроизведено в натуре без деформаций. Однако, для закрепления проектных координат, например, в ВКС, требуется обратный переход – проектная модель-развертка должна быть конвертирована в проектную модель-проекцию.

Такой подход, сводящийся к разработке методики моделирования плана линии, единого для всех этапов жизненного цикла железной дороги, и затрагивающей прежде всего этап проектирования с включением в его состав двух новых нетрадиционных операций – конвертацию исходных данных из проекции в развертку и конвертацию проектных данных из развертки в проекцию для их закрепления в ВКС позволяет повысить качество работ и сократить временные затраты на их производство.

Степень разработанности темы

Большой вклад в области моделирования плана пути внесли отечественные ученые: В.Б. Бредюк, А.В. Гавриленков, К.Б. Ершова, А.С. Матвеев, А.С. Понарин, И.В. Турбин, Шварцфельд В.С. и др.

Среди трудов, посвященных проблематике проектирования плана пути, выбора его геометрических параметров, следует выделить научные работы Г.Л. Аккермана, В.И. Ангелейко, В.А. Бучкина, И.В. Гоникберга, А.К. Дюнина, И.П. Корженевича, А.А. Лебедева, А.А. Мамитко, А.И. Проценко, А.С. Романовского, Е.А. Сидоровой, И.Я. Туровского, Ю.М. Щелокова, R.V. Schattke, S.C. Citko и др.

Наиболее полное описание методов проектирования продольного профиля можно найти в исследованиях В.А. Бучкина, В.И. Струченкова, И.В. Турбина, Д.М.

Шейдвассера и др.

Вычислительные методы выбора оптимальных решений в сфере транспортного проектирования наиболее подробно изложены в трудах Ю.К. Полосина, Ж. Энкарначчо, Э. Шлехтендаля и ученых Киевского национального университета имени Тараса Шевченко (КНУ им. Т. Шевченко) В.С. Михалевича, Н.З. Шора и др.

Цель исследования: разработка методики применения математических моделей и методов, позволяющих преобразовывать цифровую информацию о пространственном положении трассы железнодорожного пути в единую прецизионную математическую модель для реконструкции плана.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи:**

1. Оценка существующего состояния средств математического моделирования трассы железнодорожного пути на основе анализа:
 - существующих математических моделей и методов моделирования трассы железнодорожного пути в фактическом и проектном положениях;
 - существующих программных комплексов, используемых для проектирования железных дорог в настоящее время, и их функционала, как в целом, так и в части моделирования трассы железнодорожного пути;
 - существующих способов получения исходных данных для проектирования реконструкции плана трассы железнодорожной линии.
2. Разработка, понимаемая как создание теоретических и методических положений, технологических и практических рекомендаций по применению единой математической модели трассы железной дороги, равно применимой на этапах изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации линии; а также использованию модели в автоматизированном проектировании реконструкции плана трассы;
3. Разработка методики моделирования плана трассы существующего железнодорожного пути по исходным данным мобильной лазерной съемки;
4. Создание алгоритмов, позволяющих практическое применение разработанной модели и оценку достоверности результатов исследования.

Объект исследования – процесс проектирования реконструкции (модернизации) железных дорог, ремонтов пути, выправочных работ в части работы с трассой железнодорожного пути.

Предмет исследования – моделирование трассы железнодорожного пути для проектирования ее реконструкции.

Научная новизна работы состоит в том, что в ходе исследования впервые реализовано математическое моделирование трассы железной дороги как *пространственного* объекта (каковым она и является по определению) в отличие от ее традиционного представления двумя плоскими проекциями – планом и продольным профилем. При таком подходе планом трассы является ее *развертка*, а не проекция, как это и принято на всех этапах жизненного цикла дороги, кроме проектного, на котором в процесс проектирования требуется включение двух *новых* операций (детально разработанных) – конвертации данных съемки из проекции в развертку и конвертации проектных данных из развертки в проекцию с последующим закреплением полученных пространственных проектных координат плана линии в ВКС.

В составе исследования разработан комплекс *новых* математических моделей и методов постобработки (глобализация, регуляризация, аппроксимация, конвертация) данных мобильной лазерной съемки (МЛС), включая и детальные алгоритмы их реализации. Разработка этих моделей и методов обуславливается растущим потенциалом МЛС как основы для моделирования трассы железной дороги и особой спецификой таких данных: точность, шаг съемки и т.п.

Элемент научной новизны присутствует в унификации модели трассы железнодорожного пути, служащей для проектирования реконструкции плана трассы с возможностью использования этой единой модели на всех этапах жизненного цикла проекта.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что

- доказано максимальное правдоподобие моделирования трассы как пространственного объекта;

- применительно к проблематике диссертации результативно использован метод наименьших квадратов;
- изложены основные возможности функционала современных систем автоматизированного проектирования, используемых в России для проектирования реконструкции железных дорог
- раскрыты проблемы применения методов моделирования классической теории проектирования железных дорог
- изучены методы моделирования трассы железнодорожного пути;
- проведена модернизация алгоритма «спрямления с возвратами» для моделирования пространственной составляющей трассы.

Практическая значимость подтверждается тем, что:

- разработана и внедрена методика пространственного моделирования трассы железнодорожного пути в рамках разработки проектной документации по титулу «Реконструкция верхнего строения пути и дренажно-транспортной штольни Северомуйского тоннеля» и при расчете технико-экономического обоснования повышения скоростей движения на участке Чертково-Краснодар Северо-Кавказской железной дороги;
- определены перспективы использования разработанного алгоритма с учётом распоряжений ОАО «РЖД», диктующих направление развития отрасли;
- создана система практических рекомендаций по применению разработанной модели;
- представлены предложения по дальнейшему совершенствованию составляющих процесса проектирования.

Методология и методы исследования включает в себя:

- теоретический анализ и систематизацию математических моделей, применяемых в течение жизненного цикла железнодорожной линии;
- анализ и систематизацию способов получения исходных данных для проектирования реконструкции трассы железнодорожной линии и управления ее геометрией в процессе эксплуатации;
- регрессионный анализ для создания аппроксимационных моделей трассы;

- принцип максимального правдоподобия для моделирования криволинейных участков пути;
- методы теории оптимального управления для решения оптимизационной задачи положения трассы участка железнодорожного пути.

Положения, выносимые на защиту

1. Единая математическая модель трассы железнодорожного пути, применимая на всех этапах жизненного цикла железнодорожной линии.
2. Методика моделирования трассы для исходных данных мобильной роботизированной съемки, в том числе лазерного сканирования.
3. Методики и алгоритмы для программной реализации разработанного метода на уровне концепта программного комплекса.

Степень достоверности и апробация результатов

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- для экспериментальных работ было установлено соответствие результатов, полученных в ходе исследования фактическим данным;
- теория построена на факте трехмерности трассы, а значит, большей степенью достоверности моделирования пространственного объекта трехмерной линией, чем ее плоскими проекциями;
- идея базируется на анализе мировых прогрессивных технологий в сфере проектирования в целом, в том числе линейных объектов (BIM-проектирование);
- использованы нормативные требования, применяемые к проектированию, строительству и эксплуатации железных дорог;
- установлено соответствие результатов исследования нормативным требованиям и фактическим данным;
- использованы современные методики сбора исходных данных – лазерное сканирование и обработки исходных данных – прикладное ПО и реализованные программным путем алгоритмы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедр «Путь и путевое хозяйство» и «Проектирование

и строительство железных дорог» МИИТ (2012-2015гг.); на девятой ежегодной Конференции молодых специалистов (Москва, ОАО «ПНИИС», 2013г.), на четвёртой международной научно-практической конференции «Безопасность регионов – основа устойчивого развития» (Иркутск, ИРГУПС, 2014), на двенадцатой международной научно-технической конференции «Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца» (Москва, МИИТ, 2015).

Методика пространственного моделирования трассы железнодорожного пути программно реализована в концепте *Sterna*, который использовался для разработки проектной документации по титулу «Реконструкция верхнего строения пути и дренажно-транспортной штольни Северомуйского тоннеля» и при расчете технико-экономического обоснования повышения скоростей движения на участке Чертково-Краснодар Северо-Кавказской железной дороги.

Общий объем опытных проектных работ позволяет утверждать, что методика разработана до мельчайших деталей и многократно опробована.

Публикации: основные положения диссертационной работы опубликованы в восьми печатных работах, в том числе четыре – в изданиях, рекомендованных действующим перечнем ВАК России.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников. Диссертация представлена на 135 страницах, включает в себя 2 таблицы, 78 рисунков. В библиографии насчитывается 51 наименование.

Основное содержание работы

Введение содержит обоснование актуальности темы исследования, постановку его целей и задач, рассмотрение степени разработанности задачи, определение научной новизны, теоретической и практической значимости работы, положений, выносимых на защиту, методов и методологии исследования, степени достоверности и апробации результатов.

В первой главе проведен анализ и дана оценка существующего состояния средств математического моделирования трассы железнодорожного пути современным и перспективным потребностям. Рассмотрены существующие

математических модели и методы моделирования трассы железнодорожного пути в фактическом и проектном положениях.

Рассмотрены основные программные комплексы (ПК) (из представленных на рынке), используемые для проектирования железных дорог и их функционал, как в целом, так и в части моделирования трассы железнодорожного пути.

Рассмотрены существующие способы получения исходных данных для проектирования реконструкции плана трассы железнодорожной линии: тахеометрическая съемка, мобильное лазерное сканирование (МЛС), съёмка при помощи технологии *Amberg Tamping*.

Во второй главе разработан математический метод пространственного моделирования трассы железнодорожного пути и ее элементов.

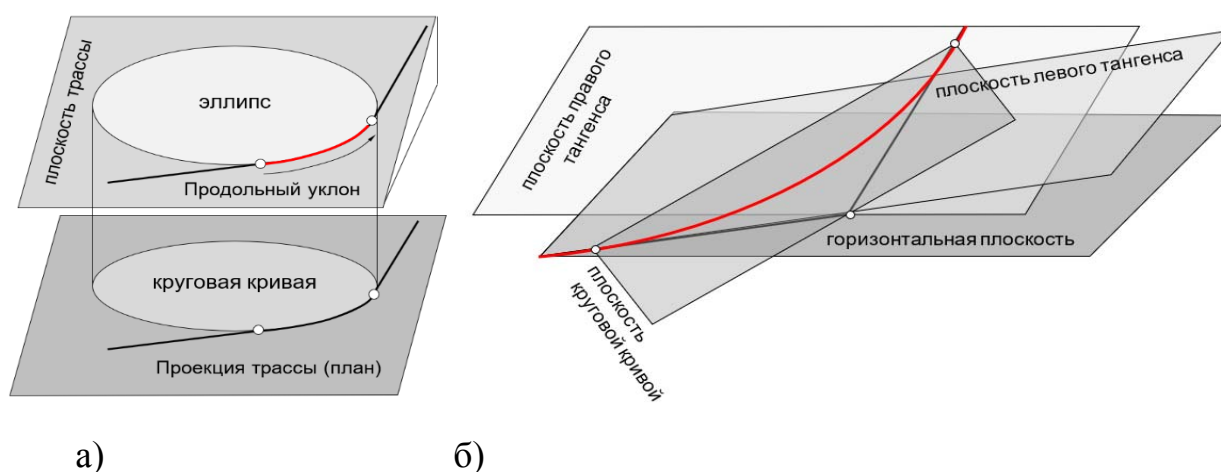


Рисунок 1 – Сравнение пространственного положения участка трассы и его проекции: а) ситуационная схема; б) расчетная схема

Современные потребности проектирования предполагают неразрывность проектирования реконструкции плана и профиля. При классическом подходе длина проекции всегда будет меньше фактической длины трассы. При работе с горизонтальной проекцией трассы, планом, будут возникать погрешности углов поворота (рисунок 1б), очертания (рисунок 1а) и длины элементов плана трассы. Получаемые при работе с горизонтальной и вертикальной плоскими проекциями трассы погрешности и искажения достаточно велики (рисунок 2).

Моделирование трассы существующего пути сопровождается рядом проблем. Основная проблема состоит в моделировании очертания оси пути (рельсовой нити) между точками съемки или опорными точками (при

аппроксимации), а также и в определении расстояния между ними.

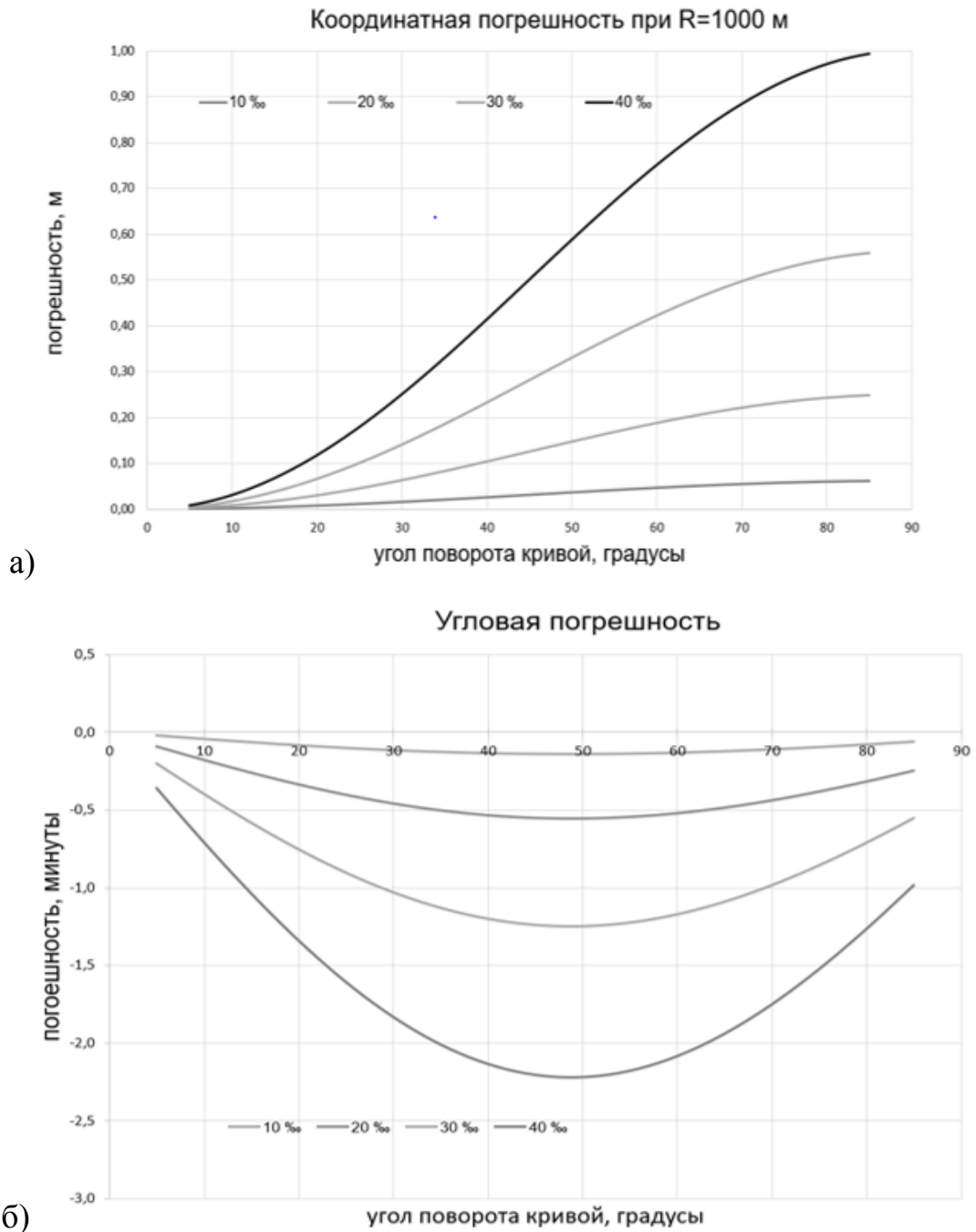


Рисунок 2 – Погрешности использования плоскостных моделей кривой радиусом 1000м, расположенной на элементах различного уклона в зависимости от угла поворота этой кривой: а) координатная погрешность, м, б) угловая погрешность, мин

Для оценки длины трассы между точками съемки нужно сделать предположение о величине угла поворота трассы между ними. Наиболее правдоподобная расчетная схема показана на рисунке 3.

Радиусы круговых кривых:

$$R_1 = S \cdot \frac{1 - \cos \beta_2}{\sin \beta_1 \cdot (1 - \cos \beta_2) + \sin \beta_2 \cdot (1 - \cos \beta_1)} \quad R_2 = S \cdot \frac{1 - \cos \beta_1}{\sin \beta_1 \cdot (1 - \cos \beta_2) + \sin \beta_2 \cdot (1 - \cos \beta_1)}$$

S – длина хорды, соединяющей опорные точки.

Длина трассы между опорными точками: $d = R_1 \cdot \beta_1 + R_2 \cdot \beta_2$.

Достоинством этого решения является то, что при равенстве углов β_1 и β_2 равны будут и радиусы кривых R_1 и R_2 , то есть смоделирована именно круговая кривая, чего нельзя сделать при использовании стандартных сплайнов.

Таким образом, модель плана трассы железнодорожного пути (переход к пространственной модели) формализуется в виде массива данных $M = (S, P)$, где

$S = (s_1, s_2, s_3 \dots s_N)$ – длина элементов сплайна;

$P = (p_1, p_2, p_3 \dots p_N)$ – кривизна элементов сплайна. Для левых кривых кривизна считается положительной, для правых – отрицательной;

$j = 1, 2, 3 \dots N$, где N – число элементов сплайна.

Данная модель соответствует графику кривизны с разрывами первого рода.

Для привязки модели к расчетной системе координат должны быть заданы начальные условия: X_0, Y_0, F_0 – начальные координаты и дирекционный угол. Для удобства использования модели при решении проектных задач желательно дополнить ее расчетными данными, а также добавить в конце элемент сплайна нулевой длины (для описания конца участка):

$D = (d_1, d_2, d_3 \dots d_{N+1})$ – расстояние от начала участка;

$$d_1 = 0; d_j = \sum_2^j d_{j-1} + s_{j-1}; j = 2, 3 \dots N + 1;$$

$F = (f_1, f_2, f_3 \dots f_{N+1})$ – угол поворота трассы в начале элемента сплайна;

$$f_1 = F_0; f_j = \sum_2^j f_{j-1} + s_{j-1} \cdot p_{j-1}; j = 2, 3 \dots N + 1;$$

$X = (x_1, x_2, x_3 \dots x_{N+1}), Y = (y_1, y_2, y_3 \dots y_{N+1})$ – геодезические координаты точки начала элемента сплайна.

$$x_1 = X_0; x_j = x_{j-1} + x_e \cdot \cos \alpha_e - y_e \cdot \sin \alpha_e; j = 2, 3 \dots N + 1;$$

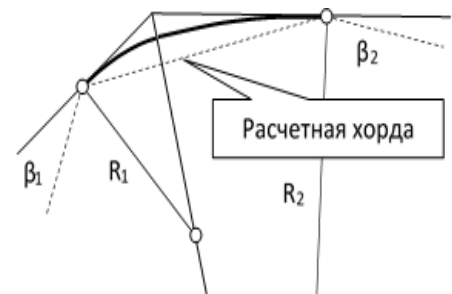


Рисунок 3 - Основная расчетная схема

$$y_1 = Y_0; y_j = y_{j-1} + x_e \cdot \sin \alpha_e + y_e \cdot \cos \alpha_e; j = 2, 3 \dots N + 1;$$

$$\text{где } \alpha_e = s_{j-1} \cdot p_{j-1},$$

$$\text{если } |p_{j-1}| > 0, \text{ то } x_e = \sin \alpha_e / p_{j-1}, y_e = (1 - \cos \alpha_e) / p_{j-1},$$

$$\text{иначе } x_e = s_{j-1}, y_e = 0.$$

С использованием данной модели можно предельно просто и быстро, решить все проектные задачи, в которых фигурируют координаты трассы существующего пути. Длина трассы: $DT = \sum_{j=1}^N s_j$.

Плановые координаты точки трассы (x_t, y_t) , лежащей на оси пути на расстоянии st от начала участка:

$$m = 1, \text{ до тех пор, пока } st < d_m, m = m + 1;$$

$$\text{если } |p_m| = 0 \text{ (прямая), то } x_t = x_m + (st - d_m) \cdot \cos(f_m),$$

$$y_t = y_m + (st - d_m) \cdot \sin(f_m),$$

$$\text{иначе (круговая кривая) } x_t = x_m + \frac{\sin \alpha \cdot \cos(f_m) + (1 - \cos \alpha) \cdot \sin(f_m)}{p_m},$$

$$y_t = x_m + (\sin \alpha \cdot \sin(f_m) - (1 - \cos \alpha) \cdot \cos(f_m)) / p_m,$$

$$\text{где } \alpha = (st - d_m) \cdot p_m.$$

Спрямление продольного профиля осуществляется в некотором «коридоре» допустимости отклонений проектного положения от существующего. Данный «коридор» формируется, исходя из регламентируемых нормативами ограничений на траекторию и ограничений на пространство. В ходе исследования разработан алгоритм, включающий операциями оптимизации положения переломов проектной линии продольного профиля (рисунок 4).

Цифровая модель продольного профиля существующего пути представляет собой двумерный массив: $M = (SS, HS)$, где

$SS = (ss_1, ss_2, ss_3, \dots, ss_N)$ – расстояние от начала расчетного участка до съемочной точки;

$HS = (hs_1, hs_2, hs_3, \dots, hs_N)$ – отметка существующей головки рельса;

N – число съемочных точек.

Расчетные случаи. Первоначально элемент профиля привязывается к группе точек цифровой модели, лежащих в его пределах: sp_n и dp – расстояния от начала

участка до начала расчетного элемента профиля и его длина;

$jn = 1$, до тех пор, пока $ss_{jn} > sp_n, jn = jn + 1$;

$jk = jn$, до тех пор, пока $ss_{jk} > sp_n + dp, jk = jk + 1$;

1 расчетный случай – оптимизация параметров элемента профиля заданной длины (соответствует начальному шагу оптимизационного процесса в целом, выполняется только для первого элемента профиля).

Задача оптимизации:

$$\sum_{j=1}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j)^2 \rightarrow \min,$$

где hp_1 – начальная проектная отметка,

i_1 – уклон элемента профиля.

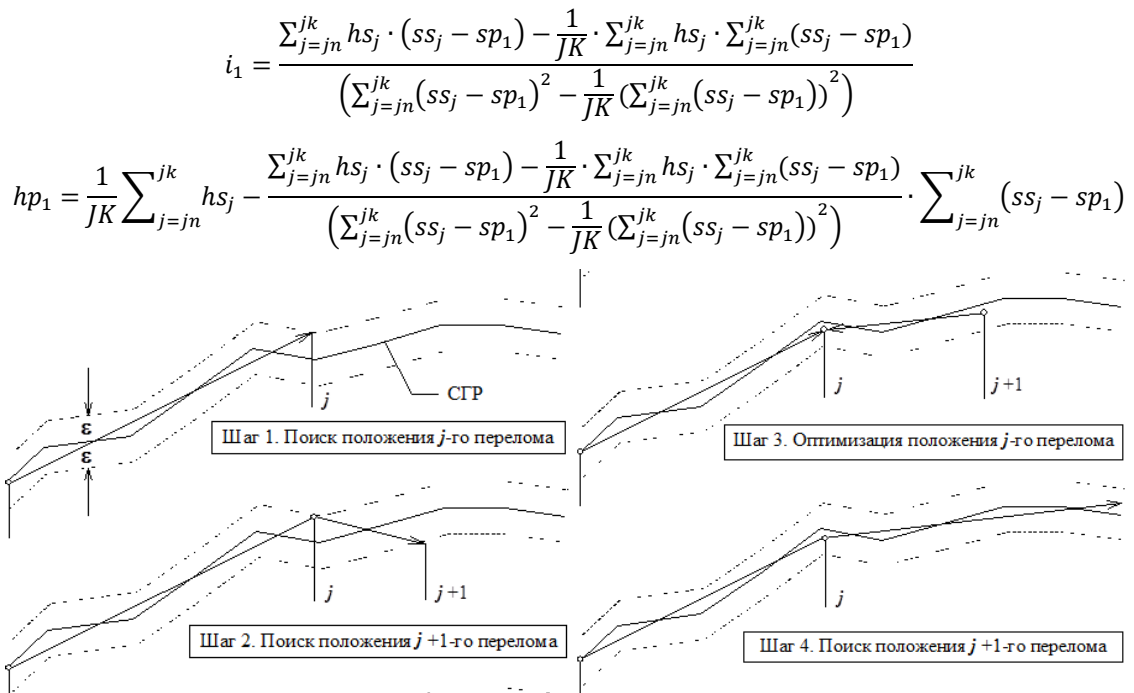


Рисунок 4 - Спрямление продольного профиля с возвратами: ε – допустимое отклонение.

2 расчетный случай – оптимизировать уклон элемента профиля при заданной начальной отметке – решается аналогично первому, но управляемой переменной является только уклон (1,2,4 шага цикла):

$$F = \sum_{j=jn}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j)^2.$$

$$i_1 = \frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) - hp_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2}$$

3 расчетный случай – оптимизировать положение двух элементов профиля при

известных длинах и начальной отметке первого элемента (3 шаг цикла).

Оптимизационная задача:

$$\sum_{j=jn1}^{jk1} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j)^2 + \sum_{j=jn2}^{jk2} (hp_1 + i_1 \cdot dp_1 + i_2 \cdot (ss_j - sp_1 - dp_1) - hs_j)^2 \rightarrow \min$$

$$i_1 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j}{\sum_{j=jn1}^{jk1} a} - \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1}{\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2} \quad \sum_{j=jn1}^{jk1} a \neq 0;$$

$$i_2 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b}, \quad \sum_{j=jn2}^{jk2} b \neq 0;$$

$$i_1 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j}{\sum_{j=jn1}^{jk1} (ss_j - sp_1)} - \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1}{\sum_{j=jn1}^{jk1} (ss_j - sp_1)^2} \quad \sum_{j=jn1}^{jk1} (ss_j - sp_1) \neq 0;$$

$$i_2 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1}{\sum_{j=jn2}^{jk2} (ss_j - sp_1 - dp_1)}, \quad \sum_{j=jn2}^{jk2} (ss_j - sp_1 - dp_1) \neq 0;$$

В третьей главе разработана методика создания пространственной модели плана существующего железнодорожного пути на основе исходных данных мобильной роботизированной съемки. При использовании данных мобильной лазерной съемки основная проблема состоит в недостаточной точности данных. Например, при использовании измерительных тележек типа *Amberg* определились следующие проблемы:

- в массиве данных наличествуют так называемые «вихри» - облака избыточных и ошибочных точек. Причина их появления – потеря видимости отражателя роботом-тахеометром, остановка тележки и т.п. и, возникающая в связи с этим фиксация ложных или избыточных точек.
- максимальное расстояние между точками съемки может достигать нескольких метров при среднем расстоянии порядка 0,1 м, что связано с длительной потерей видимости отражателя;
- координаты точек оси пути определяются как усредненное между отметками рельсовых нитей, что ошибочно в кривых, так как отметка оси пути определяется по нижней головке рельса.

Таким образом, определились следующие положения методики моделирования плана существующего пути на основе исходных данных этого типа:

- данные, полученные посредством *Amberg* нуждаются в предобработке - удалении ложных (рисунок 5), ошибочных и избыточных точек;

- используемая для проектирования реконструкции плана трассы модель должна быть аппроксимационной с целью сглаживания аппаратных погрешностей съемки и получения математического ожидания очертания оси пути, которое точнее исходных данных (рисунок 6).

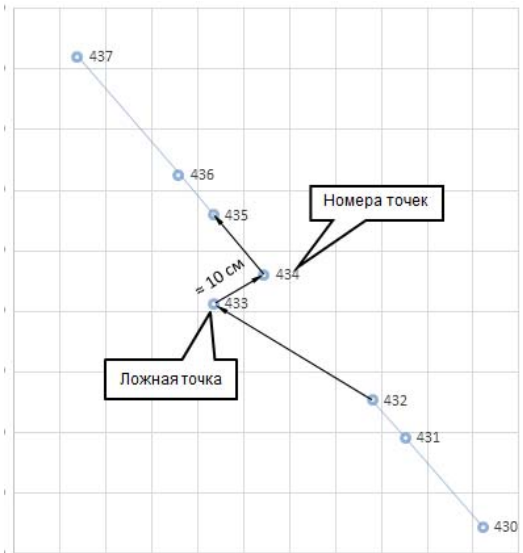


Рисунок 5 – Поиск ложных точек съемки

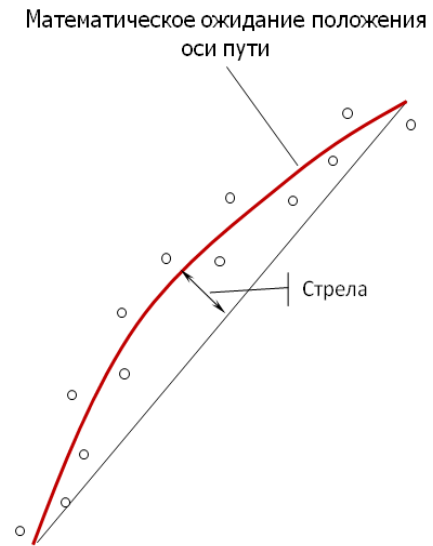


Рисунок 6 – Пример аппроксимационной модели

Удаление точек осуществляется описанными в третьей главе диссертации методами упорядочивания данных, их усреднения и поиска математического ожидания. В основе аппроксимационного моделирования лежит метод наименьших квадратов (регрессионный анализ).

В четвертой главе дано описание прикладных математических моделей и методов, доведенных до уровня блок-схем и алгоритмов, использованных для реализации на уровне концепта математического метода моделирования плана железнодорожного пути в фактическом и проектном положениях, в целях использования в АПР реконструкции плана трассы в программе *Sterna*.

Представленная на рисунке 7 блок-схема *Sterna* иллюстрирует работу концепта. Исходные данные проверяются на корректность, затем в зависимости от их типа, либо пересчитываются в координаты оси пути (в случае если заданы координаты рельсовых нитей), либо сразу фильтруются с удалением ложных и ошибочных точек. Затем создается регуляризованная и глобализованная математические модели плана линии и продольного профиля и окончательная

пространственная модель трассы железнодорожного пути.

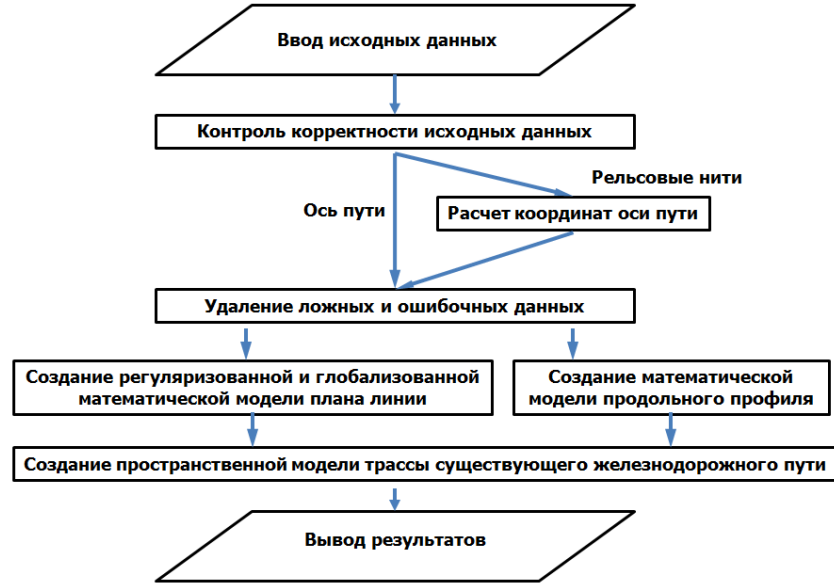
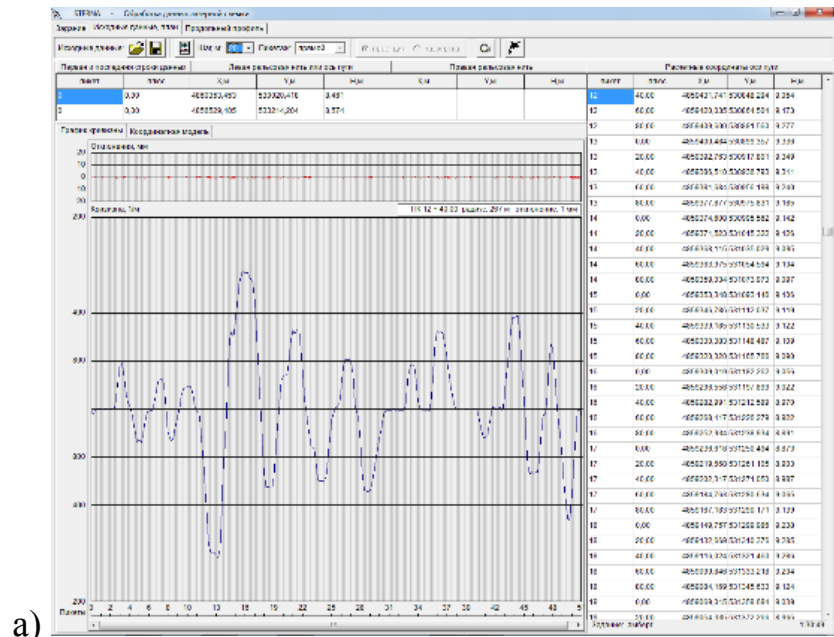


Рисунок 7 – Блок-схема концепта Sterna

Полученные экспериментально результаты моделирования, позволяющие оценить точность и достоверность результатов исследования представлены графически на рисунке 8.



а)

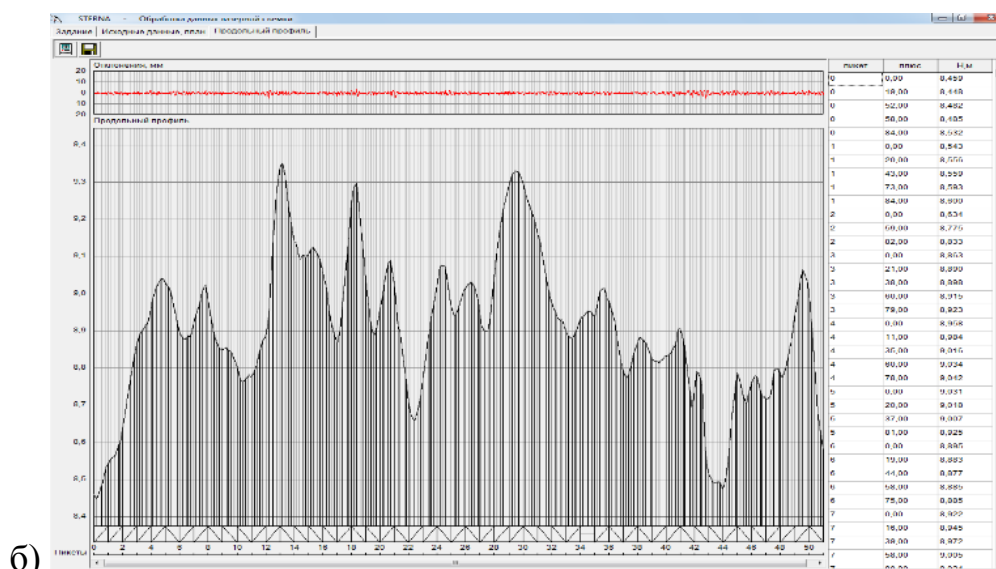


Рисунок 8 – Моделирование трассы существующего пути с использованием Sterna а) план; б) продольный профиль.

Заключение

1. В результате исследования *впервые* получена единая пространственная математическая модель трассы железной дороги – трёхмерная линия, - потенциально применимая на всех этапах ее жизненного цикла.

2. Разработанная модель основана на базовом определении, отличном от традиционного: план трассы железной дороги – развёртка (не проекция) трассы на горизонтальную плоскость, что обеспечивает:

- наиболее правдоподобное моделирование положения трассы в трёхмерном пространстве за счёт совпадения его представления на проектном и эксплуатационном этапах и, соответственно, ликвидацию проблемы несогласованности параметров элементов плана по очертанию, плановым координатам, углам поворота и длинам в проекции и в пространстве;
- высокую точность моделирования. Экспериментально установлено, что при шаге узлов регулярной модели плана трассы равном 10м, погрешность модели не превышает 1мм, достигая 1,5мм при моделировании переходной кривой длиной 20м при радиусе круговой кривой 200 м;

3. Применение разработанного метода моделирования для исходных данных мобильной лазерной съёмки позволило дополнить модель алгоритмами удаления ложных точек (экспериментально установлена доля таких точек - около

5%) и впервые, по крайней мере в российской практике, реализовать процесс генерации регулярной математической модели трассы железнодорожного пути (с наглядным для проектировщика шагом в 10 или 20м) из избыточного количества точек лазерного сканирования. Разработанная модель позволяет точно судить о положении любой точки трассы пути.

4. Программная реализация разработанной методики и алгоритмов работы с пространственной математической моделью плана трассы использовалась в проектах реконструкции ряда объектов, что позволило обеспечить содержание пути по проектным координатам с сохранением правильной геометрии очертания элементов плана при отклонениях фактического положения оси пути от проектного в пределах установленных допусков, составляющих ± 2 см.

5. Перспективные направления исследования включают применение разработанной в ходе диссертационного исследования методики моделирования трассы для проектирования реконструкции продольного профиля и доработка метода распознавания структуры плана.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Ленченкова, Е.П. Графические методы расчета параметров существующей кривой - «Современные тенденции в образовании и науке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 28 декабря 2012г.: в 10 частях. Часть 7 / Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С.84-85.
2. Ленченкова, Е.П. Сравнительный анализ программных комплексов / В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова, Е.А. Рыжик /: М. Мир транспорта, №2 (46), 2013. С.112-121.
3. Ленченкова, Е.П. Базовый функционал САПР железных дорог / В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова, Е.А. Рыжик / г. Екатеринбург: Транспорт Урала, УрГУПС, №2(37), 2013г. С.59-63.
4. Ленченкова, Е.П. Применение мобильного лазерного сканирования в проектировании железных дорог - «Европейская наука XXI века: Материалы

Международной научно-практической конференции. Сборник 31. Технические науки» / г. Пшемысль: Наука и образование, 2014. С.50-52.

5. Ленченкова, Е.П. Математическое моделирование продольного профиля существующего железнодорожного пути / В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова / ИРГУПС «Безопасность регионов – основа устойчивого развития»: материалы 4-ой международной научно-практической конференции 22-26 сентября 2014, 2014. – С.264-270.

6. Ленченкова, Е.П. Параметрическая пространственная модель трассы железнодорожного пути / В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова / Ростов-на-Дону: Вестник РГУПС, №1(57), 2015. С. 99-103.

7. Ленченкова, Е.П. Моделирование трассы пути как пространственного объекта / В.А. Бучкин, А.А. Воронков, Е.П. Ленченкова/ – М.: Путь и путевое хозяйство, №7, 2015. С.31-34.

8. Ленченкова, Е.П. Моделирование плана трассы железнодорожного пути с учётом её пространственного положения - Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: XII международная научно-техническая конференция. Труды. (г. Москва, 1-2 апреля 2015г.) / РЖД, МГУПС (МИИТ), 2015. С. 193-195.

Ленченкова Елена Павловна

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАССЫ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЛАНА**

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать

Заказ №

Формат 60*90/16

Усл.-печ.л. – 1,5

Тираж 80 экз.

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