

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет путей сообщения
Императора Николая II» (МГУПС (МИИТ))

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Бучкин Виталий Алексеевич

Москва – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 5 |
| 1 Оценка существующего состояния средств математического моделирования трассы железнодорожного пути | 13 |
| 1.1 Методы моделирования трассы железнодорожного пути | 13 |
| 1.1.1 Общее понятие о математическом моделировании трассы железнодорожной линии | 13 |
| 1.1.2 Интерполяционные и аппроксимационные математические модели трассы железнодорожного пути ... | 15 |
| 1.1.3 Линейная интерполяция прямых участков пути | 16 |
| 1.1.4 Моделирование криволинейных участков круговыми кривыми | 16 |
| 1.1.5 Интерполяция полиномиальными сплайнами.. | 18 |
| 1.2 Современное состояние и перспективы развития автоматизированного проектирования железных дорог | 19 |
| 1.2.1 Информация и информационные технологии.. | 19 |
| 1.2.2 Общее понятие о проектировании. Автоматизированное проектирование | 22 |
| 1.2.3 Сравнительный анализ существующих программных комплексов для проектирования железных дорог | 26 |
| 1.2.3.1 Программный комплекс CREDO | 26 |
| 1.2.3.2 Программный комплекс MXRAIL (Bentley Rail Track) | 28 |
| 1.2.3.3 Программный комплекс <i>GeoniCS</i> ЖЕЛДОР | 31 |
| 1.2.3.4 Программный комплекс ROBUR – Железные дороги..... | 33 |
| 1.2.3.5 Программный комплекс САПР КРП | 34 |
| 1.2.3.6 Программный комплекс <i>CARD/1</i> | 36 |
| 1.2.3.7 Программный комплекс <i>AutoCAD Civil 3D</i> | 37 |

| | | |
|---------|---|----|
| 1.3 | Методы получения исходных данных для реконструкции плана трассы железнодорожного пути и их обработка..... | 37 |
| 1.3.1 | Традиционная тахеометрическая съемка..... | 37 |
| 1.3.2 | Лазерное сканирование..... | 38 |
| 1.3.2.1 | Наземное лазерное сканирование | 39 |
| 1.3.2.2 | Воздушное лазерное сканирование | 40 |
| 1.3.2.3 | Мобильное лазерное сканирование | 40 |
| 1.3.3 | Применение измерительных систем <i>Amberg</i> для получения исходных данных о существующей железнодорожной линии..... | 43 |
| 1.4 | Выводы по первой главе | 47 |
| 2 | Разработка математического метода моделирования трассы пути ... | 49 |
| 2.1 | Предобработка исходных данных | 49 |
| 2.2 | Унифицированный подход к моделированию трассы | 53 |
| 2.3 | Использование пространственной модели существующего пути для реконструкции плана трассы | 54 |
| 2.4 | Применение интерполяционных и аппроксимационных методов для моделирования трассы пути в фактическом и проектном положениях | 64 |
| 2.5 | Выбор типа сплайна | 64 |
| 2.6 | Моделирование профиля существующего пути методом «спрямления с возвратами» | 79 |
| 2.7 | Выводы по второй главе | 87 |
| 3 | Разработка методики применения метода для исходных данных лазерной съёмки | 89 |
| 3.1 | Проблемы исходных данных..... | 89 |
| 3.2 | Предобработка исходных данных для моделирования трассы железнодорожного пути | 99 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 3.3 | Проектирование реконструкции железных дорог | 100 |
| 3.4 | Регуляризация модели трассы пути | 106 |
| 3.5 | Выводы по третьей главе | 109 |
| 4 | Разработка алгоритмов для программной реализации и практического применения разработанного метода | 110 |
| 4.1 | Описание концепта программного комплекса <i>Sterna</i> | 110 |
| 4.2 | Алгоритм разработанного метода | 113 |
| 4.3 | Программная реализация | 114 |
| 4.4 | Сравнение с существующими программными комплексами | 123 |
| 4.5 | Практическое применение | 123 |
| 4.6 | Выводы по четвертой главе | 125 |
| 5 | Заключение | 126 |
| | Список сокращений и условных обозначений | 128 |
| | Список литературы | 129 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования определяется целесообразностью перехода к цифровым технологиям управления геометрией трассы железнодорожного пути на всех этапах жизненного цикла (изыскания, проектирование, строительство, эксплуатация, ремонты, текущее содержание и т.д.) Распоряжение старшего президента ОАО «РЖД» В.А. Гапановича от 20 апреля 2012г. № 802р определяет обязательный порядок создания высокоточной координатной системы при комплексной реконструкции объектов железнодорожного транспорта; при новом строительстве же необходимость ее создания устанавливается заданием на проектирование.

При проектировании высокоскоростных магистралей создание высокоточной координатной системы (ВКС) является технической необходимостью. Распоряжение президента ОАО «РЖД» В.И. Якунина от 03 декабря 2010г. №2511р «О создании комплексной системы пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта» [33] также подтверждает актуальность исследования.

Опыт соблюдения распоряжений показал, что использование модели трассы пути, состоящей из двух плоских проекций – плана и профиля – принятых в классической теории проектирования реконструкции железных дорог и ее преобразование в трехмерную линию неизбежно приводит к возникновению ошибок и коллизий, искаженному изображению фактического положения трассы в пространстве. Это связано с тем, что 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 за счёт ликвидации переходов от одного типа модели к другому.

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 и его геометрических параметров, следует выделить научные работы В.И. Ангелейко, Г.Л. Аккермана, 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.

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.

Цели и задачи

Цель исследования: разработка методики применения математических моделей и методов, позволяющих преобразовывать цифровую информацию о пространственном положении трассы железнодорожного пути в прецизионную математическую модель трассы 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 для исходных данных 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 реализован переход к математическому моделированию 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. Геодезические данные, полученные с использованием подобных технологий, характеризуются определенной точностью, шагом съемки, имеют свою специфику.

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 и практическая значимость работы состоит в:

- переходе от традиционных определений плана и профиля трассы классической теории проектирования к новым определениям, базирующимся на моделировании трассы как пространственной линии;
- правдоподобном моделировании конфигурации элементов трассы и трассы в целом;
- точности моделирования, обеспечивающей проектирование высокоскоростных магистралей;
- исключении потерь точности, связанных с переходом от одной модели трассы к другой на различных этапах жизненного цикла трассы/проекта, конфликтных по параметрам и координатам;
- методике пространственного (трехмерного) моделирования трассы железнодорожного пути.

Методология и методы исследования включает в себя:

- теоретический анализ и систематизацию современных систем автоматизированного проектирования, применяемых для проектирования и реконструкции железных дорог;
- 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 (метод наименьших квадратов);
- принцип максимального правдоподобия для моделирования криволинейных участков пути;
- метод минимальных перепроектировок для решения оптимизационной задачи;
- метод «спрямления с возвратами» для проектирования продольного профиля существующего пути.

Положения, выносимые на защиту

1. Единая математическая модель трассы железнодорожного пути, применяемая 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

Достоверность результатов исследования:

1. Целью работы является создание пространственной математической модели трассы железной дороги (впервые) – единой и достоверной для всех этапов ее жизненного цикла и, применительно к теоретической части работы, достоверность в относительных степенях не может быть

определена: трасса железной дороги – пространственный объект и достоверно моделируется только таким образом.

2. В прикладной части исследования оценка степени достоверности моделей проводилась на основе вычислительных экспериментов (истинное положение оси пути известно приближенно, с точностью геодезического оборудования, так что данные съемки не могут быть эталоном). В экспериментах по моделированию проектного плана установлено, что при шаге узлов регулярной модели равном 10м, погрешность модели не превышает 1мм, достигая 1,5мм при моделировании переходной кривой длиной 20м при радиусе круговой кривой 200м. Эта точность вполне достаточна. В экспериментах по моделированию плана существующего пути, снятого роботизированными мобильными системами, достоверность модели определяется точностью съемки, однако в условиях очень большого объема данных (тележка **Amberg** снимает ось пути с шагом 0,1м) предложенные в работе аппроксимационные модели могут повысить достоверность результатов в смысле приближения модели к истинному положению оси пути.

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 **три** – в изданиях, рекомендованных действующим перечнем ВАК России.

1 ОЦЕНКА СУЩЕСТВУЮЩЕГО СОСТОЯНИЯ СРЕДСТВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАССЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Проектирование реконструкции трассы железнодорожного пути – трудоемкий и нелёгкий процесс, состоящий из нескольких последовательных тесно связанных между собой этапов. На современном этапе большая часть процесса автоматизирована, но добиться полной автоматизации пока не удалось.

Можно выделить следующие этапы проектирования реконструкции трассы пути:

1. Получение исходных данных (традиционная геодезическая съемка, лазерное сканирование, видеопаспортизация и т.д.);
2. Обработка исходных данных: создание модели оси пути, цифровой модели рельефа;
3. Проектирование реконструкции плана и продольного профиля трассы (совместное или же последовательное).

В данной работе речь пойдет о составной части второго этапа – моделировании оси пути, его месте в процессе проектирования, а также будут предложены и рассмотрены способы автоматизации. Современные подходы к реализации проектов основываются на восприятии модели как главной составляющей проекта, единой на всех этапах работ.

1.1 Методы моделирования трассы железнодорожного пути

1.1.1 Общее понятие о математическом моделировании трассы железнодорожной линии

Цифровая модель трассы железнодорожного пути представляет собой упорядоченную по длине (пикетажу) последовательность точек, положение каждой из которых задано тремя пространственными

координатами в некоторой системе координат (рисунок 1). Точки получены по результатам инженерно-геодезических изысканий.

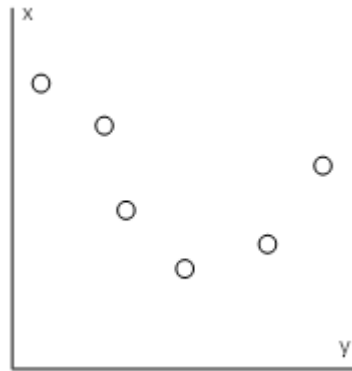


Рисунок 1 – Графическая интерпретация цифровой модели трассы

Математическая модель трассы расширяет понятие цифровой модели алгоритмами интерполяции. Применение математических моделей позволяет определить пространственные координаты любой точки трассы, другими словами, моделирование заключается в определении закона изменения положения трассы между съемочными точками.

Модели плана трассы железнодорожного пути по используемой системе координат можно разделить на две группы: модели, использующие **прямоугольную систему координат** (ось абсцисс – север, ось ординат – восток) и использующие **криволинейную систему координат** (ось абсцисс – ось пути, по оси ординат откладывается либо угол поворота касательной – угловые диаграммы, либо кривизна – графики кривизны).

В современной практике проектирования используются преимущественно модели, использующие прямоугольную систему, как наиболее точные и удобные. Переход к использованию исключительно таких моделей осуществляется в проектировании повсеместно. Модели, использующие криволинейную систему координат, в настоящее время используются на этапе эксплуатации железнодорожной линии – в путевой практике.

1.1.2 Интерполяционные и аппроксимационные математические модели трассы железнодорожного пути

Интерполяция – способ нахождения промежуточных значений по известным дискретным значениям.

Аппроксимация – метод обработки данных, заключающийся в представлении их совокупности в виде некоторой функции $f(x)$ [1, с.21].

Математические модели трассы подразделяются на интерполяционные и аппроксимационные (рисунок 2). Интерполяционная модель трассы железнодорожной линии подразумевает, что исходные данные – точки съемки - истинны, эти точки являются узлами модели, а между этими точками положение трассы изменяется по некоторому закону.

В аппроксимационной модели трасса линейного сооружения – железнодорожного пути – аппроксимируется: ее положение оптимизируется в некотором коридоре, построенном на основе съемочных точек, при этом положение съемочных точек не принимается истинным по умолчанию и может корректироваться.

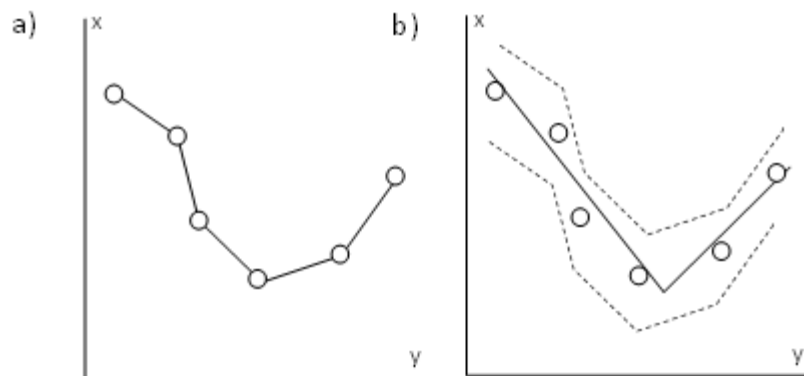


Рисунок 2 – Графические интерпретации математических моделей трассы железнодорожного пути: а) интерполяционной; б) аппроксимационной.

Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) для проектирования железных дорог функционируют на основе как интерполяционных, так и аппроксимационных моделей. Примером применения интерполяционной модели является сплайн-интерполяция, реализованная в программном комплексе (ПК) Credo; аппроксимационной –

аппроксимация криволинейных участков дугой окружности методом наименьших квадратов, реализованная в ПК САПР КРП.

Принципиальной разницы между этими моделями нет. В каждом случае между опорными точками трасса представляет собой сплайн определенного типа (отрезки прямых, парабол, кривых Безье и т.п.) Опорными же точками в первом случае являются съемочные точки, во втором – узлы наиболее приближенного к очертанию трассы сплайна.

1.1.3 Линейная интерполяция прямых участков пути

Самый простой вид интерполяции – линейная интерполяция – осуществляется в соответствии с предположением, что между двумя соседними узлами модели трасса ведет себя как прямая (положение трассы изменяется по линейному закону). Графическая интерпретация: узлы модели соединяются отрезками прямых. Формула линейной зависимости $y = y(x)$ между двумя точками $K(x_k; y_k)$ и $K_1(x_{k+1}; y_{k+1})$ [1]:

$$y = y_k + \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} \cdot (x - x_k) \quad (1)$$

Этот метод моделирования характеризуется тем, что длина элемента, соединяющего каждую пару точек будет минимальной (определяется кратчайшее расстояние), что всегда будет противоречить истинному положению трассы. Длина реального элемента трассы никогда не будет меньше кратчайшего расстояния, а значит погрешность вычисления – систематическая ошибка, накапливающаяся с увеличением длины трассы.

1.1.4 Моделирование криволинейных участков круговыми кривыми

Примером аппроксимационной модели трассы железнодорожного пути может служить модель, предложенная Андреем Александровичем Мамитко [2]. Эта модель состоит из прямых и кривых участков пути. Определение кривизны не прямых участков оси пути сводится к аппроксимированию их пространственной дугой окружности, осуществляемому методом наименьших квадратов (МНК).

Аппроксимирование производится по последовательности съемочных точек, находящихся на оси пути (количество точек больше трех). Таким образом, полученная дуга окружности равноудалена от всех точек съемки (суть МНК в минимизации суммы квадратов отклонений), а значит, с требуемой точностью описывает кривизну участка пути. Кроме того, при расчете кривизны определяется положение центра дуги окружности, необходимое для расчета выправки пути (по положению нормали и касательной в каждой точке линии).

Такая модель трассы железнодорожного пути используется в программном модуле «Наноплан», входящем в состав ПК САПР КРП.

Существуют также два типа моделей (рисунки 3 и 4), применяемые в настоящее время : координатно-параметрическая **R**-модель, используемая для расчёта проектных сдвигов и координатная **T**-модель – для вариации проектных сдвигов при оптимизации проектных элементов плана [1].

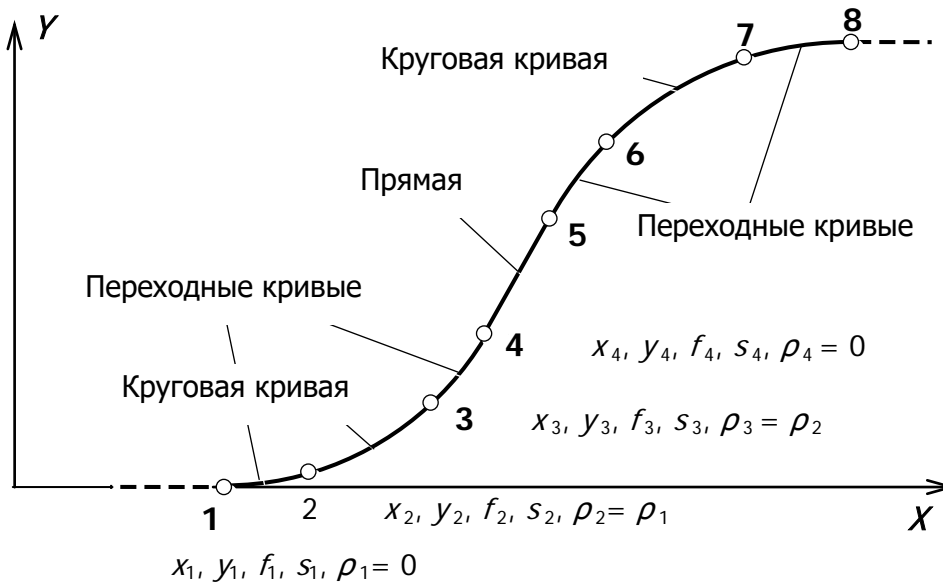


Рисунок 3 – Координатно-параметрическая модель плана (**R**-модель)

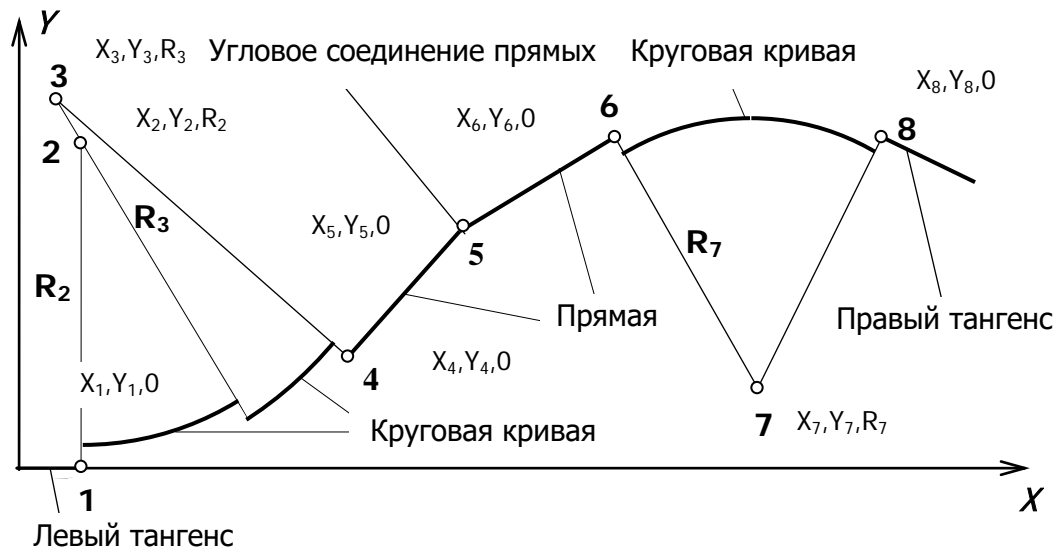


Рисунок 4 - Координатная модель плана (*T*-модель)

Модели взаимнопреобразуемы, используются в САПР КРП – отраслевом решении ОАО Росжелдорпроект.

R-модель использует такие данные, как переходные и круговые кривые и прямые вставки. *T*-модель же использует только круговые кривые и прямые.

1.1.5 Интерполяция полиномиальными сплайнами

Среди интерполяционных моделей трассы железнодорожного пути можно отметить сплайновую модель, предложенную Иваном Петровичем Корженевичем [3]. Модель пути представляется в виде кубического параметрического сплайна специального вида. Уравнение сплайна определяется из условия равенства координат, а также первой и второй производной в точках пути. В первой и последней точке вторая производная принимается равной нулю.

Такая модель железнодорожного пути реализована в модуле **RWPLAN1.2**, входившем в состав ПК **Credo**.

Сплайн - агрегатная функция, совпадающая с функциями более простой природы на каждом элементе разбиения своей области определения. Как правило, для моделирования применяются кубические полиномиальные сплайны. Интерполяция сплайнами заключается в

разбиении области интерполяции на участки, на каждом из которых функция задается полиномом третьей степени. Наибольшее применение именно кубических сплайнов обусловлено гладкостью по первой и второй производной.

1.2 Современное состояние и перспективы развития автоматизированного проектирования железных дорог

1.2.1 Информация и информационные технологии

В XX веке становится очевидна ценность информации. Она является объектом исследования многих наук. Информация является компонентом научной картины мира наряду с веществом, материей, энергией, пространством и временем, поэтому дать определение этому термину достаточно непросто. На уровне обыденного сознания информация – это сведения, которые сообщают о каких-либо явлениях или событиях. Норберт Винер в труде «Кибернетика и общество» толкует понятие «информация» как «обозначение содержания, полученного из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему и приспособабливания к нему наших чувств» и «информация - это не материя и не энергия, информация - это информация» [4, с.31]. Если рассматривать понятие «информация» с точки зрения информатики и информационных технологий, то дать его определение через другие не представляется возможным, поскольку это понятие является базовым.

Феномен появления персонального компьютера - одно из важнейших явлений в развитии человечества в XX веке. Четвертая информационная революция, произошедшая в 1970-е гг. [5, с.262] вследствие изобретения микропроцессорной техники и появления персонального компьютера, привела к появлению информационного общества, а также кардинально изменила существовавшие методы получения, воспроизведения, передачи и хранения информации.

Информация и знания в информационном обществе сменяют основу индустриального общества – капитал и труд. В новейшей истории информация рассматривается в качестве ресурса наряду с материальными, такими, как газ, нефть и полезные ископаемые. Таким образом, существует некий процесс, который позволяет перерабатывать информацию, как и любой материальный ресурс. Этот процесс называется технологией. Следует отметить уникальное свойство информации, которое выделяет ее из всех видов ресурсов: в процессе взаимодействия двух объектов (передачи информации от одного объекта другому) информация не теряется ни одним из объектов.

Технология (от греч. искусство, мастерство, умение и греч. изучение) – совокупность методов и инструментов для достижения желаемого результата; метод преобразования данного в необходимое; способ производства. [6, с.207]. Задача технологии - создать сверхсложную техническую систему, организовать многие виды деятельности. Современные технологии ориентированы на получение готового продукта. Таким образом, цель информационной технологии – получение информационного продукта.

Согласно определению, принятому ЮНЕСКО, информационная технология (ИТ) — это «комплекс взаимосвязанных, научных, технологических, инженерных дисциплин, изучающих методы эффективной организации труда людей, занятых обработкой и хранением информации; вычислительную технику и методы организации и взаимодействия с людьми и производственным оборудованием, их практические приложения, а также связанные со всем этим социальные, экономические и культурные проблемы». Информационные технологии требуют сложной подготовки, больших первоначальных затрат и наукоемкой техники.

Информационная технология – это широкий класс дисциплин и областей деятельности, относящихся к технологиям управления, накопления, обработки и передачи информации. Информационная

технология – процесс, использующий совокупность средств и методов сбора, накопления, обработки и передачи данных (первичной информации) для получения информации нового качества о состоянии объекта, процесса или явления (информационного продукта) [6, с.270]. Этот процесс проходит по специальному алгоритму, состоящему из череды операций, действий, этапов разной степени сложности над какими-либо данными. Информационные технологии выступают в качестве преобразователя экономической социальной и других видов деятельности.

Цель информационной технологии - снижение трудоёмкости процессов производства и использования информационных ресурсов, повышение их надёжности и оперативности.

Информационные процессы всегда протекают в определенных информационных системах (технических, социальных, биологических). Информационная система - совокупность содержащейся в базах данных информации и обеспечивающих ее обработку информационных технологий и технических средств [7, статья 2]. Информационная система – инструментарий информационной технологии.

Процесс обработки данных в информационных системах сопровождается применением технических и программных средств. Технические средства включают в себя компьютер, оргтехнику, устройства ввода-вывода, линии связи, оборудование сетей. Программные средства обеспечивают функционирование, диагностику и тестирование своих аппаратных средств, а также разработку, отладку и выполнение любых задач пользователя и состоят из общего и прикладного программного обеспечения (ПО, **software**).

Общее ПО - это совокупность управляющих и обрабатывающих программ, предназначенных для планирования и организации вычислительного процесса, автоматизации программирования и отладки программ, а также для решения прикладных задач. Общее ПО состоит из операционной системы (ОС), системы программирования и программы

технического обслуживания.

Прикладное ПО (*Application software*) – вспомогательные программы, которые позволяют решать определенный комплекс задач, возникающих в какой-либо сфере деятельности.

Прикладное ПО может функционировать как автономно, так и входить в состав программных комплексов.

Классифицировать прикладное ПО можно различными способами по ряду признаков. Одним из примеров прикладного ПО служат системы автоматизированного проектирования (САПР).

1.2.2 Общее понятие о проектировании. Автоматизированное проектирование

Проектирование – последовательность действий, приводящая к созданию аналитического воплощения несуществующего объекта проектирования при выраженной потребности в этом объекте. Проектирование бывает:

- ручным – без применения компьютерных технологий;
- автоматизированным – «человеко-машинная» система – взаимодействие интеллектуальных возможностей человека с вычислительными возможностями компьютера;
- автоматическим – без вмешательства пользователя в процесс проектирования.

Автоматизация процесса проектирования сводится к формализации, созданию адекватного шаблона – математической модели этого объекта. Для описания и создания математической модели объекта пользуются математическими методами.

Математические методы подразумевают разработку сложного последовательного алгоритма действий, каждый шаг которого должен быть определен однозначно.

Математическая модель проектируемого объекта – это его формализация, описание при помощи абстрактных понятий математики: чисел, векторов, закономерностей.

Процесс проектирования в большинстве случаев сопровождается поиском оптимального решения, выбором из некоторого количества вариантов. В зависимости от объекта проектирования количество вариантов изменяется, использование математических методов позволяет его снизить, но тем не менее оно, как правило, велико для ручного счета – требуется использование вычислительных машин.

Применение математических методов подразумевает выбор подхода к решению конкретной задачи - способа, которым осуществляется поиск оптимального решения. Предпочтительность способа обычно определяется из соображений минимальности затрат машинного времени на получение желаемого результата.

Процесс проектирования можно представить состоящим из нескольких общих последовательных этапов:

1. формирование идеи;
2. определение путей, позволяющих воплотить замысел;
3. конструктивные решения;
4. расчёты;
5. создание опытного образца;
6. технология массового производства.

Приведенное деление на этапы условно и может меняться в зависимости от целей проектирования и сложности объекта проектирования.

В простейшем виде процесс проектирования с момента замысла до конечного результата показан на схеме (рисунок 5).

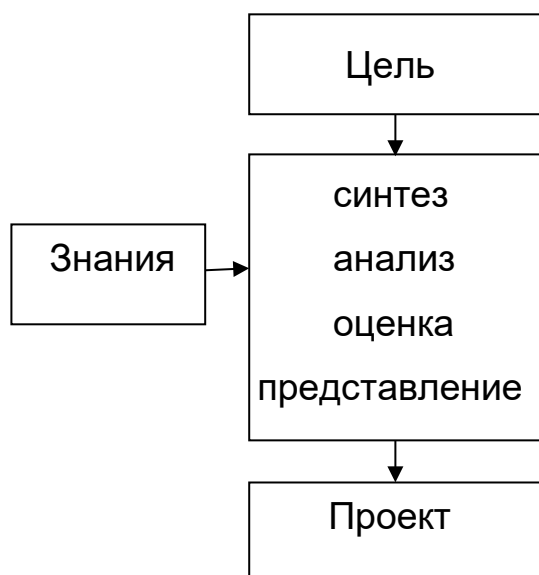


Рисунок 5 – Простейшая модель процесса проектирования

Синтез подразумевает распознавание ситуации и выбор из множества известных правил подмножества приложимых, подходящих к проектированию конкретного объекта; *анализ* – соответствие подмножества приложимых правил текущему случаю создания модели объекта; *оценка* – завершение процесса проектирования и переход к представлению результатов при соответствии правил и исключение несоответствующих правил и повторный поиск подходящих в множестве известных в противном случае; *представление* завершает процесс формированием результатов в удобной форме, например, проектной документации.

Следует отметить, что на этапе синтеза при формировании идеи только человеком может быть определено решается ли возникшая задача в свете доступных в современном мире знаний, или замысел останется не реализован – автоматизировать этот процесс не представляется возможным. Наиболее эффективным процесс проектирования будет при взаимодействии интеллектуального потенциала человека с функциональными возможностями вычислительных машин на этапе синтеза и анализа, поскольку именно на этих этапах осуществляется распознавание ситуации и формализация исходной информации – непосильные для вычислительных машин задачи. Анализ и представление

же могут осуществляться преимущественно при помощи компьютерных технологий. На этих принципах основано функционирование всех современных систем автоматизированного проектирования железных дорог.

Системы автоматизированного проектирования (САПР, CAD¹-системы) предназначены для автоматизации проектно-конструкторских работ. Основная задача САПР – автоматизация процесса проектирования или отдельных его стадий. Применяются в машиностроении, приборостроении, архитектуре. Кроме чертежно-графических работ эти системы позволяют проводить простейшие расчеты и выбор готовых конструктивных элементов из обширных баз данных.

Отличительная особенность **CAD**-систем состоит в автоматическом обеспечении на всех этапах проектирования технических условий, норм и правил, что освобождает проектировщика от работ нетворческого характера. Например, в машиностроении **CAD**-системы способны на базе сборочного чертежа изделия автоматически выполнить рабочие чертежи деталей, подготовить необходимую технологическую документацию с указанием последовательности переходов механической обработки, назначить необходимые инструменты, станочные и контрольные приспособления, а также подготовить управляющие программы для станков с числовым программным управлением, промышленных роботов и гибких автоматизированных линий.

По специализации различают следующие виды САПР:

- специализированные (область применения которых ограничена);
- универсальные.

¹ **CAD** (от англ. **Computer Aided Design** – в буквальном переводе: полуавтоматическое компьютерное проектирование) - система автоматизированного проектирования (САПР) – наиболее распространенный русскоязычный эквивалент, хотя по ГОСТ 15971-90 свойства САПР **CAD**-системы приобретают лишь в последнее время и далеко не во всех предметных областях.

1.2.3 Сравнительный анализ существующих программных комплексов для проектирования железных дорог

Существуют четыре основных программных комплекса (ПК) для проектирования новых железных дорог (из представленных на российском рынке и функционирующих в соответствии с российскими стандартами) [8]:

- **Credo** (Беларусь, Минск, НПО «Кредо-Диалог») [9,10];
- **Robur – Железные дороги** (ТОПОМАТИК, Россия, Санкт-Петербург) [11];
- **MXRAIL (Bentley Systems, Inc, США)** [12];
- **GeoniCS ЖЕЛДОР (CSoft Development, Россия, Москва)** [13, 14, 15].

Все эти ПК позиционируются подходящими и для разработки проектов реконструкции (модернизации) железных дорог и ремонтов пути.

Помимо вышеуказанных стоит отметить специализированный программно-технологический комплекс для разработки проектов реконструкции (модернизации) железных дорог и ремонтов пути - **САПР КРП** («Иркутскжелдорпроект», региональный филиал ОАО «Росжелдорпроект», Иркутск) [16]; а также ПК **CARD/1** (Германия) [17], располагающий функционалом для проектирования новых и реконструкции существующих железных дорог, но не поддерживающий национальные стандарты, и ПК **AutoCAD Civil 3D** (США) [18], не имеющий указанного функционала.

В ходе исследования были проанализированы возможности программных комплексов, выявлены их преимущества и недостатки.

1.2.3.1 Программный комплекс CREDO

Система **Credo** (Беларусь, Минск, НПО «Кредо-Диалог») предназначена для проектирования автомобильных дорог, но в современной практике применяется и для проектирования железных дорог.

Система **Credo** включает ряд программных комплексов, в том числе:

- **Credo ТОПОПЛАН** – создание цифровой модели местности (ЦММ) и выпуск топографических планов;
- **Credo DAT** – камеральная обработка наземных и спутниковых геодезических данных;
- **Credo ДОРОГИ** – проектирование нового строительства и реконструкции загородных автомобильных дорог всех технических категорий, транспортных развязок, городских улиц и магистралей;

а также программные средства для решения ряда смежных задач:

- **МОСТ** – проектирование мостовых сооружений;
- **ОТКОС** – устойчивость откосов земляного полотна;
- **ОСАДКА** – расчет осадки насыпи на болотных грунтах;
- **ГИДРО** – расчет водоотводных устройств;
- **ГРИС** – гидравлический расчет малых искусственных сооружений;
- **ТРУБЫ** – конструирование водопропускных труб;
- **РАДОН** – расчет дорожной одежды;
- **МОРФОСТВОР** – расчет морфоствора;
- **ZНАК** – проектирование индивидуальных дорожных знаков;
- **РАБС** – расчет асфальтобетонной смеси – программа автоматизированного расчета состава асфальтобетонной смеси;
- **ЖЕЛДОРПЛАН** – расчеты переустройства плана железнодорожного пути;
- **Credo ДИСЛОКАЦИЯ** – размещение технических средств организации движения автомобильного транспорта.

Credo – единственный ПК, достаточно полно укомплектованный программными средствами для решения проектных задач, выходящих за рамки работы только с конструкцией земляного полотна и подсчета объема земляных работ.

Система **Credo** по-прежнему сохраняет определенные позиции на российском рынке в области проектирования генпланов – составных частей

проекта, используется в нескольких проектных институтах для обработки данных съемки и создания ЦММ, однако, как средство разработки проектов в железнодорожной отрасли ПК **Credo** практически вытеснена более специализированными разработками.

1.2.3.2 Программный комплекс MXRAIL (Bentley Rail Track)

Программный комплекс **MXRAIL** (разработчик **Bentley Systems, Inc**, США) входит в состав семейства продуктов **MX**, работает и в среде базовых платформ САПР - **AutoCAD** и **MicroStation**, и как самостоятельное приложение для **Windows**. ПК **MXRAIL** предназначен для проектирования и реконструкции сооружений всех видов рельсового транспорта, выполняются проектные работы от создания 3-хмерной модели местности (ЦММ) и проектируемого объекта до формирования проектной документации – чертежей и ведомостей.

Возможности **MXRAIL** при проектировании новых железных дорог:

- проектирование пути в плане;
- проектирование продольного профиля;
- проектирование конструкции земляного полотна;
- проектирование возвышения наружного рельса;
- автоматизированное проектирование стрелочных переводов и пересечений (стрелочный перевод устанавливается автоматически в указанную точку; библиотека стрелочных переводов создается на основании нормативных документов и используется при проектировании).

При проектировании реконструкции и ремонтов пути исходные данные получают из съемки: по оси пути, по одному рельсу, по двум рельсам. Подбор параметров элементов плана и продольного профиля существующего пути осуществляется посредством регрессивного анализа (метод наименьших квадратов). Восстановление (подбор) геометрических параметров элементов плана и продольного профиля с учетом заданной

погрешности производится в интерактивном режиме. Производится анализ деформаций пути в плане и продольном профиле.

По проектному решению можно получить отчет об относительных деформациях существующей колеи.

Проектная документация формируется автоматически из законченной **3D**-модели в виде таблиц **EXCEL** и включает ведомости и отчеты: объемы работ по верхнему строению пути, объемы земляных работ (с учетом вырезки растительного слоя), ведомость разбивки кривых для выноса в натуру и др. Чертежи для планов, профилей, совмещенных планов и профилей, для поперечных сечений оформляются и выводятся с помощью модуля **MXDRAW** автоматически.

Включенный в ПК **MXRail BentleyOptram** (рисунки 6-8) - первый полноценный выход ПК за пределы функционала, связанного исключительно с разработкой проектной документации. Жизненный цикл объекта здесь прослеживается и управляется как на стадии разработки проекта, так и на стадии его последующей эксплуатации. **BentleyOptram** предусматривает:

- управление инфраструктурой,
- общую базу данных по всем работам на линии,
- анализ тенденций состояния пути для ремонта.

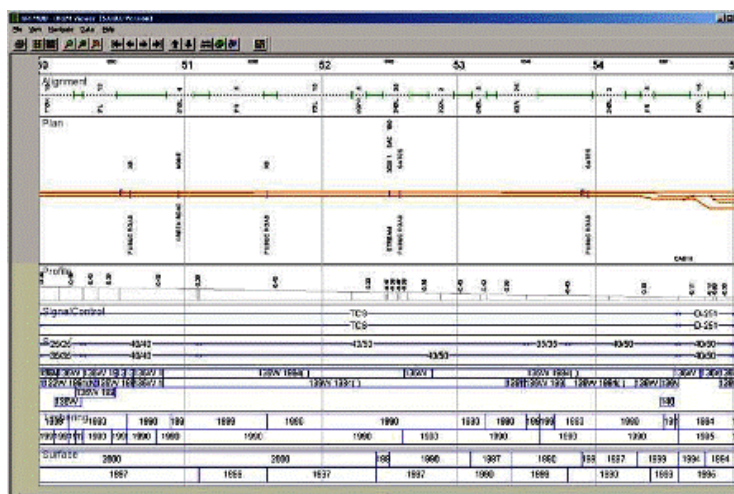


Рисунок 6 - Инфраструктура железнодорожного пути в **BentleyOptram**



Рисунок 7 - Анализ состояния железнодорожного пути в **BentleyOptram**

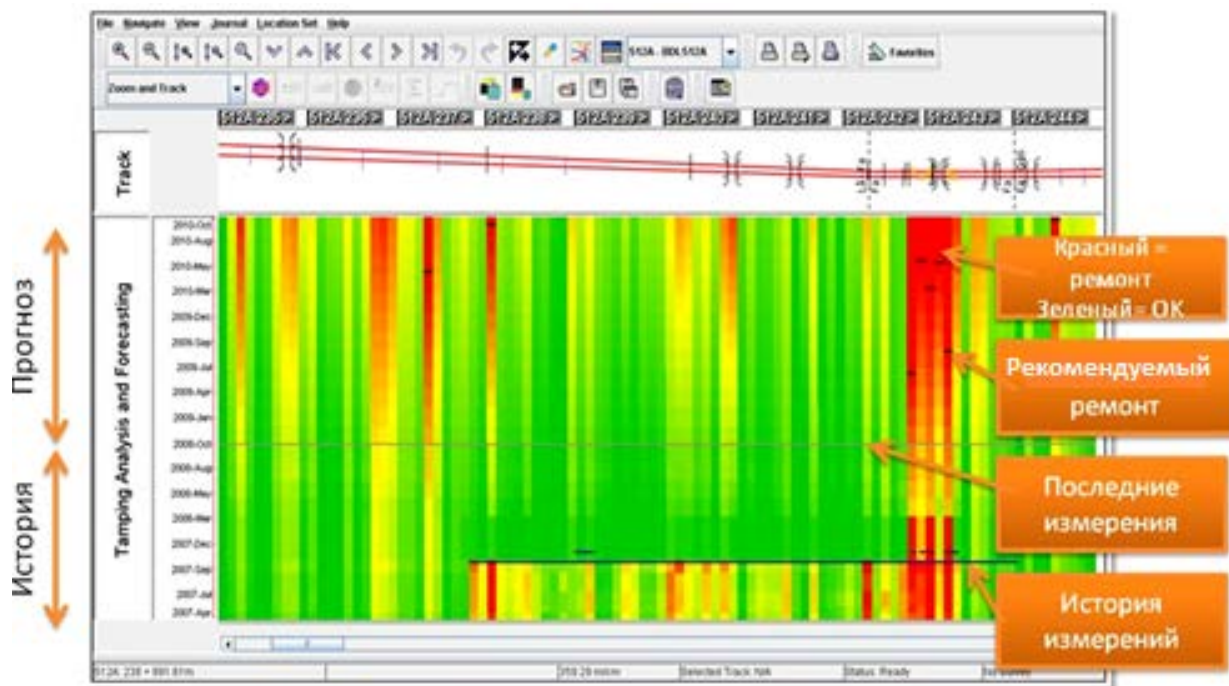


Рисунок 8 - Планирование ремонтов пути в **BentleyOptram**

В **MXRAIL** включены ПК **BentleyRailOverheadLine** и **BentleySubstation**, предназначенные, в интеграции с ПК **BentleyRailTrack**, для проектирования электрификации железных дорог (рисунок 9).

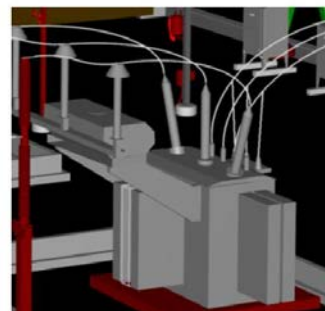
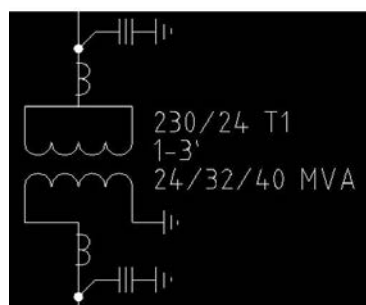


Рисунок 9 - Проектирование тяговых подстанций в ПК **Bentley**

Зарубежный опыт применения ПК **MXRAIL** для проектирования железнодорожных линий богат такими крупными объектами, как один из терминалов тоннеля под проливом Ла-Манш, высокоскоростные железнодорожные магистрали в Южной Корее и на острове Тайвань и др. Большинство публикаций и примеров его использования в презентациях связаны с проектированием станций, узлов, терминалов из чего следует, что в **MXRAIL** удачно организована работа по плановой компоновке проектных решений при проектировании данных объектов.

1.2.3.3 Программный комплекс **GeoniCS ЖЕЛДОР**

ПК **GeoniCS ЖЕЛДОР** (**Csoft Development**, Россия, Москва) предназначен для проектирования железных дорог, ориентирован на отечественные технологии и традиции проектирования. В качестве платформы используются продукты **AutoCAD** и **AutoCAD Civil 3D** от компании **Autodesk**. Функциональные возможности **GeoniCS ЖЕЛДОР** включают поддержку принятия проектных решений при проектировании новых путей, реконструкции и капитальном ремонте существующих железных дорог.

GeoniCS ЖЕЛДОР состоит из нескольких взаимодействующих и взаимосвязанных модулей и подсистем:

- **Съемка** – модуль, предназначенный для ввода и обработки данных инженерно-геодезических и инженерно-геологических изысканий железных дорог. Выходная информация: данные для построения цифровой модели местности (ЦММ), план существующих путей с подписями междупутий и габаритов, передаваемые в проектные подсистемы **GeoniCS ЖЕЛДОР**, а также отчетные графические и текстовые документы.

- **План** – подсистема для создания и редактирования элементов плана: прямой, круговой и переходной кривых, в том числе с возможностью сопряжения клотоидами в комбинациях «отрезок-дуга», «две дуги», поддерживаются специализированные объекты такие, как излом, стрелка.

Имеется встроенная библиотека типовых стрелочных переводов (рисунок 10).

- **Оптимизация (выправка) трасс:** интеграция в систему, выполнение всех операций под контролем пользователя, графический интерфейс, любая геометрия ограничений (контурные ограничения).

- **Профиль** – подсистема, позволяющая создать профиль трассы вручную, по плану, по **3D**-полилинии, по поверхности, либо из текстового файла, а также редактировать этот профиль. Редактирование может осуществляться с помощью «ручек», редактора элементов, табличного редактора, редактора пикетажных данных (семантической информации, привязанной к пикетам или диапазонам пикетов).

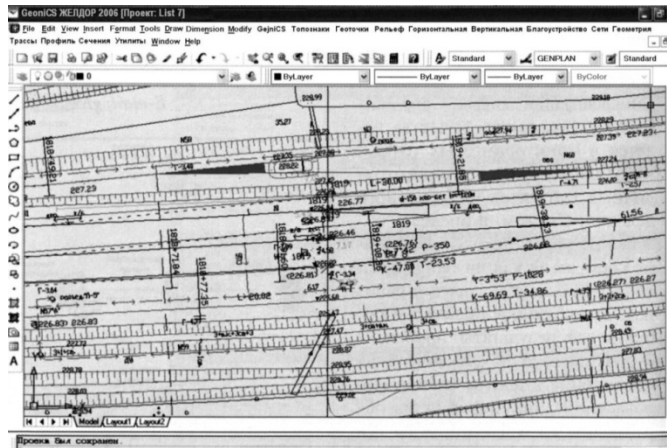


Рисунок 10 - Проектирование плана станции в **GeonICS** ЖЕЛДОР

- В подсистеме **Поперечные сечения** реализовано создание линий сечения на конкретном заданном пикете, по диапазону пикетов, по полилиниям, по координатам точки, указанной пользователем. Возможна поддержка «косых» поперечников (сечений под любым углом к оси трассы).

3D-модель трассы (коридор) – подсистема, в которой осуществляется построение динамической **3D**-модели трассы на основе разного вида характерных линий. Данными для построения **3D**-модели трассы могут служить план, профили трассы, шаблоны проектных поперечников и поверхность. Проектирование ведется на основании шаблона проектного поперечника и внесенных проектировщиком дополнений. Используется готовая библиотека типовых решений. Имеются

удобные средства создания собственных и изменения существующих шаблонов. Расчет объемов – как для всего участка, так и для ограниченного диапазона выполняется в автоматическом режиме.

1.2.3.4 Программный комплекс ROBUR – Железные дороги

Robur – Железные дороги - первая отечественная САПР для проектирования железных дорог и станций, создана на основе пространственной цифровой модели, разработанной компанией «ТОПОМАТИК» (Россия, Санкт-Петербург).

Отличительной особенностью ПК **Robur – Железные дороги** является интерфейс. Он представлен тремя окнами (План, Профиль, Поперечник), существенно облегчает принятие комплексных проектных решений по всем элементам трассы линейного сооружения – плану, продольному и поперечным профилям (рисунок 11). В версиях «Топоматик **Robur – железные дороги**», начиная с 4.0, к интерфейсу добавлено четвертое окно «**3D Вид**».

Robur – Железные дороги состоит из ряда модулей. **Модуль динамического трассирования**, представляющий наибольший интерес, характерен автоматическим появлением изменений (пересчетом проектных параметров) во всех окнах при корректировке положения трассы (подобъекта). При изменении плана трассы автоматически изменяется черный продольный профиль, соответственно по определенному закону изменяется красный продольный профиль, перепроектируются поперечники. Пользователь может выбрать те элементы, которые будут пересчитываться автоматически и задать правила, по которым они будут модифицироваться. Данная функция удобна на стадии обоснования инвестиций и при вариантном проектировании.

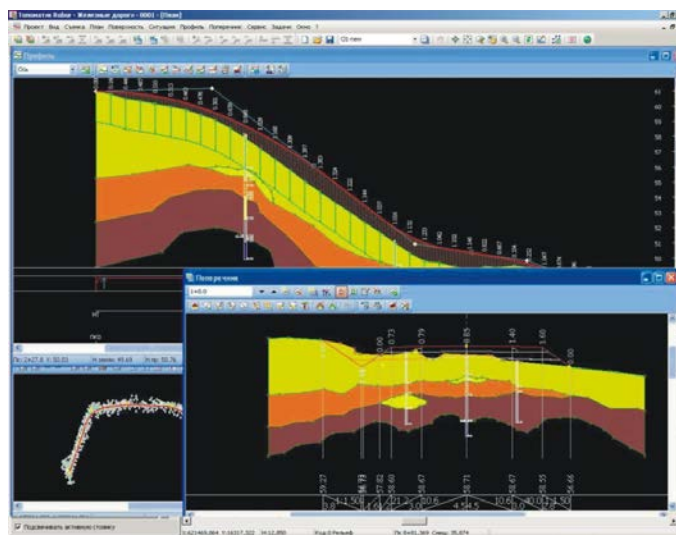


Рисунок 11 - Трехоконный интерфейс **Robur** – Железные дороги

Программный комплекс **Robur** – **Железные дороги**, являясь изначально российским продуктом, создавался с учетом требований проектирования железных дорог России, это и определило высокую степень соответствия стандартам указанной отрасли.

1.2.3.5 Программный комплекс САПР КРП

Программно-технологический комплекс **САПР КРП** применяется для автоматизированного проектирования как реконструкции (модернизации) железных дорог, так и ремонтов железнодорожного пути. Разработчик - проектно-изыскательский институт «Иркутскжелдорпроект» – региональный филиал ОАО «Росжелдорпроект».

Комплекс состоит из нескольких программных продуктов и модулей, охватывающих весь цикл проектных работ от обработки данных инженерно-геодезических изысканий до составления выходной проектной документации, соответствующей действующим стандартам.

Основные задачи, решаемые ПК САПР КРП:

- обработка данных полевой топографической съемки;
- проектирование плана пути;
- проектирование продольного профиля пути;
- проектирование поперечных профилей;
- проектирование раскладки плетей бесстыкового пути;

- формирование геологических разрезов.

Программный продукт **САПР КРП Съёмка** преобразует данные съемки в координатную модель объекта проектирования (рисунок 12) с автоматическим формированием исходных данных для проектирующих программ.

Программный продукт для проектирования реконструкции плана линии, входящий в состав ПК, позволяет формировать в автоматическом режиме модель плана проектируемого пути, состоящую из прямых, кривых, переходных кривых на основе информации о существующем положении пути. Протяженность расчетного участка не ограничена.

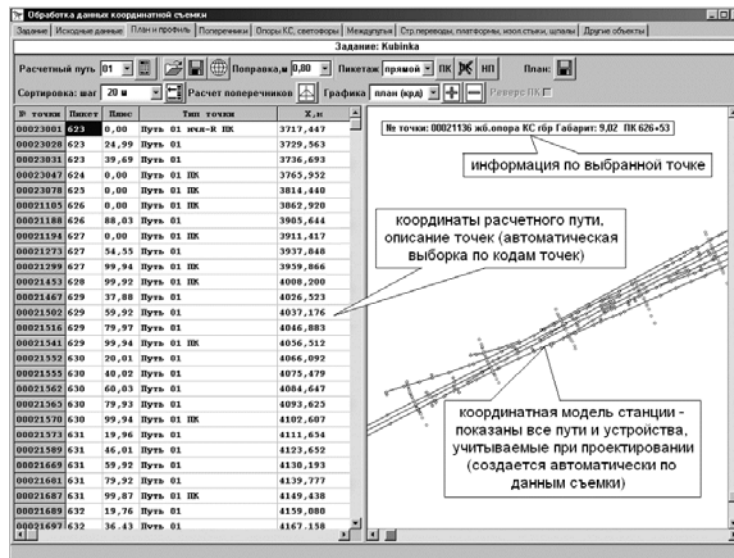


Рисунок 12 - **3D**-модель существующих железнодорожных путей

Программный продукт для проектирования реконструкции продольного профиля позволяет формировать в автоматическом режиме модель продольного профиля железнодорожного пути с учетом ряда требований, включая минимизацию объемов перемещаемого балласта.

Модуль проектирования поперечных профилей дает возможность автоматизированного проектирования и расчета основных параметров элементов земляного полотна, балластной призмы, кюветов, нагорных канав.

В качестве исходных данных могут использоваться данные, полученные традиционными методами, или результаты лазерного сканирования.

Модуль проектирования раскладки плетей бесстыкового пути позволяет провести полностью автоматическое проектирование и расчет положения рельсовых плетей в различных условиях.

Проектная документация, формируемая комплексом в автоматическом режиме, имеет высокий уровень готовности и полностью соответствует действующим отраслевым стандартам. В то же время обеспечена возможность гибкой настройки состава и содержания формируемых чертежей и ведомостей.

Комплекс **САПР КРП** характеризуется высоким уровнем привлечения наукоемких вычислительных технологий для генерации исходных проектных решений по всем элементам трассы реконструируемого пути (план, продольный и поперечные профили), располагает самым необходимо мощным функционалом для решения поставленных задач.

1.2.3.6 Программный комплекс *CARD/1*

CARD/1 (Германия) определяется представителями *CARD/1* в России (компания «**A+C Консалт**», Санкт-Петербург) как ведущее немецкое программное обеспечение для обработки данных изысканий, проектирования автомобильных и железных дорог, аэродромов и других объектов [17].

Опыт проектирования железных дорог с использованием *CARD/1* в России отсутствует. Есть примеры применения данного ПК в Республике Беларусь. Для проектирования автодорог *CARD/1* с 2005 г. используется в ГП «Белгипродор» (Беларусь) было выполнено около 20 проектов: развязки, небольшие фрагменты магистральных автомобильных дорог длиной до 8 км, лесовозные автомобильные дороги, проект аэропорта в г. Браслав Витебской области.

В **CARD/1** реализована работа с планом отдельных пунктов, включая врезку стрелочных переводов, расчет съездов и т.п. (рисунок 13).

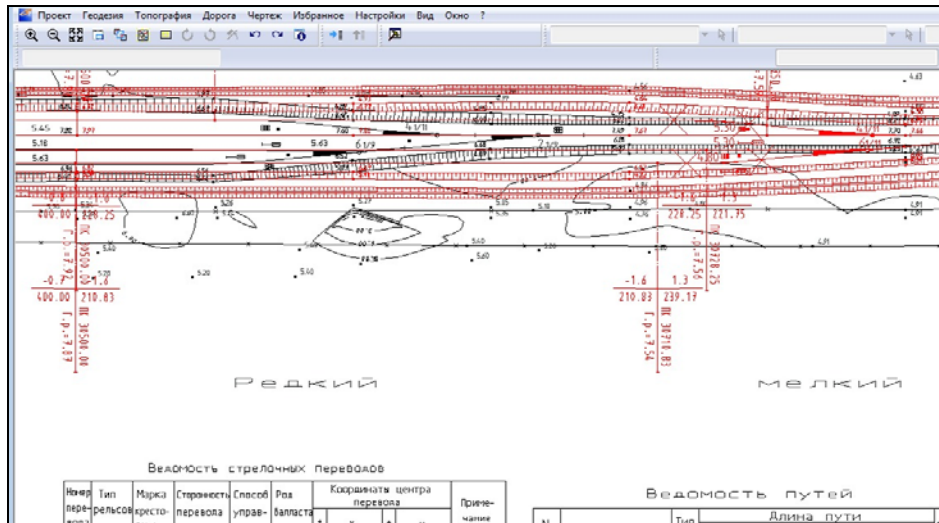


Рисунок 13 - План станции с заполненными ведомостями (**CARD/1**)

Междупутья, горизонтальные и вертикальные габариты в ПК **CARD/1** рассчитываются и контролируются в автоматическом режиме.

Характерной особенностью **CARD/1** является возможность привлечения к обоснованию норм проектирования, параметров элементов плана и продольного профиля, данных о динамике движения подвижного состава. Кривая скорости может быть введена в табличной форме и внесена в базу исходных данных.

1.2.3.7 Программный комплекс **AutoCAD Civil 3D**

ПК **AutoCAD Civil 3D** в настоящее время не располагает функционалом для проектирования железных дорог, но может использоваться для обработки данных инженерно-геодезических изысканий, для создания **3D**-модели местности.

1.3 Методы получения исходных данных для реконструкции плана трассы железнодорожного пути и их обработка

1.3.1 Традиционная тахеометрическая съемка

Традиционная тахеометрическая съемка существующего пути для проектирования его реконструкции представляет собой последовательное

перемещение точек стояния прибора с фиксацией всех необходимых точек съемки в памяти тахеометра. Необходимыми точками съемки являются точки оси пути (через каждые 20 (10) м на кривых и через каждые 100м (попикетно) на прямых участках пути), характерные точки: центры стрелочных переводов, изостыки и т.п., а также места промера габаритов: светофоры, опоры ЛЭП, опоры контактной сети и др. Съёмка пути может осуществляться по одной рельсовой нити или по каждой из нитей. Съёмка рельефа осуществляется по характерным местам: бровка балластной призмы, подошва балластной призмы, бровка земляного полотна, бровки насыпей и выемок, бровка и дно кюветов, резервов, водоотводов, характерные точки по рельефу земли и т.п.

Преимуществом традиционной тахеометрической съёмки является легкость камеральной обработки, поскольку точки закодированы соответствующим образом в зависимости от их принадлежности тому или иному объекту железнодорожной инфраструктуры; а также количество съёмочных точек, которое необходимо и достаточно для подготовки выходной информации – съёмка точки осуществляется геодезистом осмысленно, фиксируются только точки, определяющие характер изменения местности.

Одной из современных разновидностей традиционной тахеометрической съёмки является съёмка роботизированным тахеометром, который позволяет автоматизировать большую часть привычных операций, совершаемых геодезистом. Роботизированный тахеометр способен сам наводиться на активный отражатель, управлять им можно даже дистанционно.

1.3.2 Лазерное сканирование

Во второй половине XX века с изобретением лазерного сканера наука сделала огромный шаг вперед. В настоящее время лазерные сканеры постепенно вытесняют тахеометры поскольку являются более

совершенными приборами в техническом и функциональном оснащении. Лазерный сканер - геодезический прибор для сканирования пространства лазерным пучком. Принципиальные отличия от электронного тахеометра в том, что лазерный сканер не требует поиска и визирования цели, а полученная информация записывается в специальном накопителе автоматически, в результате скорость получения результатов (производительность) посредством лазерного сканера ощутимо выше. Сканирующий прибор создает модель пространства, представляющую собой множество точек, каждая из которых имеет три координаты.

1.3.2.1 Наземное лазерное сканирование

Наземный лазерный сканер (НЛС) - это съёмочная система, которая с высокой скоростью производит измерение расстояний от сканера до точек объекта и регистрирует соответствующие направления (вертикальные и горизонтальные углы) с последующим формированием трёхмерного изображения в виде облака точек.

Разработкой лазерных сканеров занимается множество фирм, самыми широко известными являются *Trimble* (США) и *Leica Geosystems* (Швейцария), *Riegl* (Австрия), *I-Site* (Австралия), *Zoller+Fröhlich* (Германия) и другие [19, с.18]. Для удобства в использовании современные сканеры могут быть оснащены цифровыми видеокамерами (*Mensi* под маркой *Trimble S10, S25, Soisic, ScanStation Leica, I-Site 4400*) или есть возможность установки видеокамеры на сканирующую головку (*Riegl LMS-Z210*); инклинометрами – датчиками угла наклона сканера к горизонту, электронным компасом (*Trimble Callidus 3D Laser Scanner*); встроенными дисплеями, клавиатурой для управления НЛС и жестким диском (*Leica HDS 6000* и *Z+F Imager 5006*). Каждый прибор производится для определенных целей. Задачи, решаемые конкретной моделью НЛС, определяются его техническими характеристиками.

В процессе наземного лазерного сканирования одного объекта места стоянки сканирующего прибора выбирают таким образом, чтобы их число

было минимальным. Другими словами, прибор устанавливают в точки, с которых обеспечивается наилучшая видимость сканируемого объекта. В результате сканирования в накопителе прибора записывается по одному файлу с облаком точек лазерного отражения (ТЛО) с каждой точки стоянки сканера. При камеральной обработке результатов облака ТЛО «сшиваются» в единый массив точек объекта для последующей его векторизации или создания модели.

Существуют альтернативные методы лазерного сканирования: воздушное лазерное сканирование и мобильное лазерное сканирование, в которых сканирующий прибор находится в движении в течение всего времени съемки. Такие методы наилучшим образом подходят для съемки протяженных объектов.

1.3.2.2 Воздушное лазерное сканирование

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) предполагает, что сканер базируется на воздушном судне (пилотируемом или беспилотном), применение этого метода наиболее оправдано для обширных площадей съемки. Среди минусов использования ВЛС дороговизна авиационного топлива и аренды летательных аппаратов, также могут возникнуть сложности с получением разрешения на использование воздушного пространства летательным аппаратом.

Еще одним минусом ВЛС является низкая плотность отражений, а значит, и невысокая детальность съемки. Посредством этого метода получить топографический план масштаба 1:500 на застроенных территориях не всегда представляется возможным. Зачастую, планы именно такого масштаба необходимы проектировщикам. Следовательно, применение ВЛС на застроенной территории нецелесообразно.

1.3.2.3 Мобильное лазерное сканирование

Мобильное лазерное сканирование (МЛС), подразумевающее установку сканирующего прибора на крышу транспортного средства,

передвигающегося по автомобильным или железным дорогам, объединяет точность, характерную для наземного лазерного сканирования с производительностью воздушного лазерного сканирования. Этот метод наилучшим образом подходит для сканирования линейно-протяженных объектов, каким является трасса железнодорожной линии.

Для проектирования реконструкции железнодорожных линий, как правило, необходимы топографические планы в пределах полосы отвода железной дороги. Очевидно, что для таких случаев уместнее применять метод МЛС, при котором траектория движения сканирующего прибора совпадает с осью этой линии (рисунок 14): сканирование осуществляется прибором, установленным на железнодорожном самоходном транспортном средстве. Основное применение мобильного лазерного сканирования - съемка автомобильных и железных дорог, мостов, путепроводов, городских улиц, береговой линии.

Мобильное лазерное сканирование – находящаяся на стадии становления высокопроизводительная технология, которая сочетает использование лазерного сканера, спутниковой системы ГЛОНАСС/**GPS** и инерциальной системы **IMU** (корректирующей перемещения и колебания) на движущемся транспортном средстве и позволяет получить достаточно точные геопространственные данные объекта со скоростью до 1,1 млн. точек в секунду [20]. МЛС осуществляется лазерным 2D-сканером, за счет перемещения которого по траектории движения сканируемое пространство получается трехмерным.



Рисунок 14 – Установка для выполнения мобильного лазерного сканирования

Транспортное средство (например, железнодорожная моториса) с установленным лазерным сканером следует по участку пути в прямом и обратном направлении, что позволяет снизить количество «слепых» зон, но не ликвидирует их полностью. Недостающие геопространственные данные объекта в областях «слепых» зон получают посредством традиционной тахеометрической съемки. Количество полученных точек на 1 км участка пути около 66 млн.

МЛС уступает воздушному сканированию по количеству точек, находящихся в зоне видимости объектов, однако, его преимуществом при этом является значительно большая плотность отражений, а значит и детальность облаков точек. Также среди недостатков по сравнению с ВЛС близость **GPS**-приемника к земной поверхности и возникающая при этом затененность сигналов спутника, которые ведут к снижению точности результатов.

После производства МЛС необходимо выполнить первичную обработку данных: облака ТЛО, полученные при сканировании в прямом и обратном направлениях необходимо увязать и калибровать; наложить на траекторию движения и пересчитать координаты полученного массива ТЛО в используемую систему координат (рисунок 15).

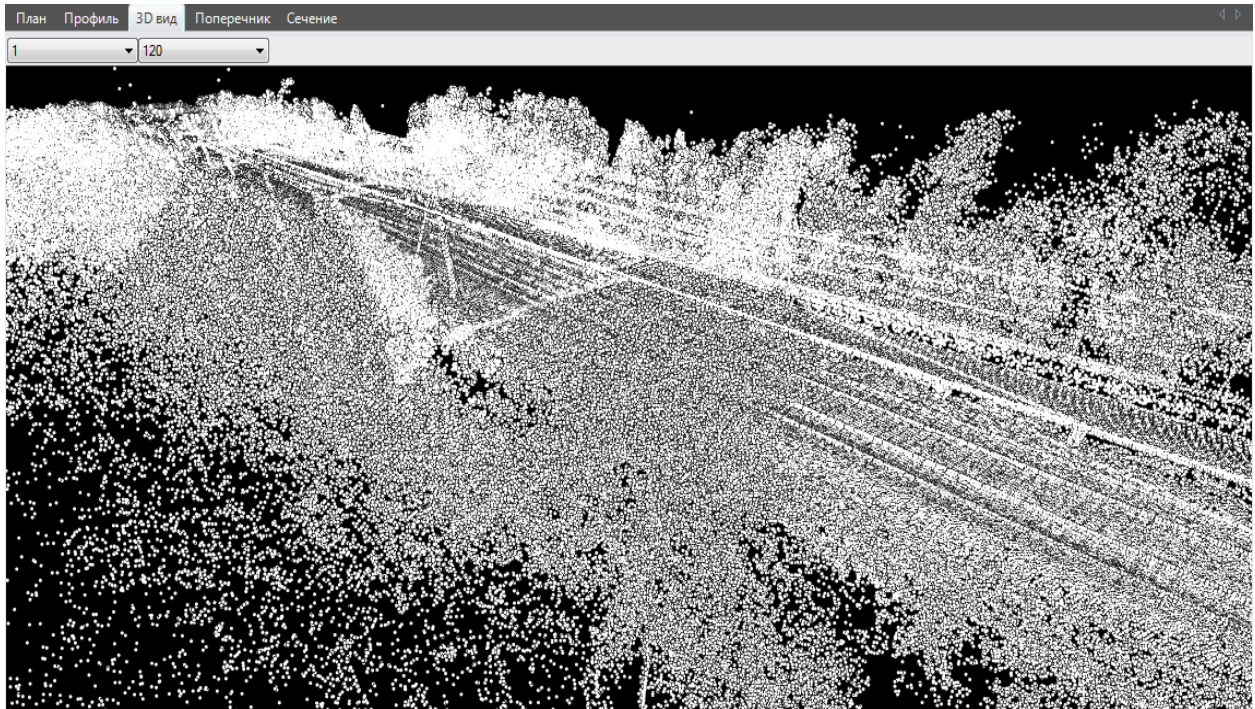


Рисунок 15 – Результаты МЛС после первичной обработки

1.3.3 Применение измерительных систем *Amberg* для получения исходных данных о существующей железнодорожной линии

Компания *Amberg Technologies*, входящая в состав *Amberg Gruppe*, Швейцария, является одним из поставщиков практических решений для сбора и обработки геопространственной информации об объектах железнодорожной инфраструктуры. Основное предназначение продукции компании – съемочные и измерительные работы [21].

Требования комфорта и безопасности пассажиров при высокоскоростном движении заставляют заботиться о полном соответствии текущего состояния железнодорожного пути нормативным стандартам. Необходимо применение измерительных технологий, гарантирующих миллиметровую точность и обеспечивающих контроль за соблюдением нормативных параметров при строительстве линии и в течение срока ее эксплуатации.

Amberg Slab Track – это подходящая система для всего проекта. Она включает программные комплексы и модули, позволяющие удовлетворять индивидуальные требования любого проекта. Измерения с использованием

этой системы могут осуществляться без предоставления «окон» в ходе непосредственной эксплуатации железнодорожной линии. Измерительный процесс автоматизирован, а значит, исключается влияние человеческого фактора и снижаются временные затраты на получение результатов. Модуль **Amberg GRP Fidelity** проверяет исправное состояние системы и проводит при необходимости ее юстировку на месте проведения работ.

Amberg Slab Track определяет пространственное положение рельсовых нитей с точностью в 1 миллиметр, во время укладки пути система оповещает об отклонениях от проектного положения (рисунок 16), по результатам измерений в автоматическом режиме составляются отчёты. Такая непрерывная система протоколирования позволяет обладать доступом в любой момент времени к требуемой информации.



Рисунок 16 – Применение **Amberg Slab Track** при укладке пути

Amberg Tamping (рисунок 17) – это мобильная портативная измерительная система, которая позволяет производить измерения на участке пути с минимальными «окнами» или без их предоставления и незамедлительно устранять выявленные нарушения. Кинематический метод измерения позволяет производить измерения со скоростью до 1200 м в час.

Данные, получаемые измерительной системой **Amberg Tamping** готовы для увязки с работой шпалоподбивочной машины. При

несоблюдении требуемых величин, система уведомляет пользователя сообщением. Система имеет два режима работы: статический и кинематический и два типа датчиков: **GPS-** и **TPS-**; выбор зависит от требуемой точности и объема получаемых результатов.



Рисунок 17 – Измерительная система **Amberg Tamping**

Геодезический комплекс **Amberg Clearance** (рисунок 18) позволяет собирать информацию одновременно о пространственном положении пути и всех объектов железнодорожной инфраструктуры. Комплекс оснащен лазерным сканером, который представляет результаты в виде легко воспринимаемого, обладающего максимальной степенью наглядности облака точек лазерного отражения (ТЛО).



Рисунок 18 – Геодезический комплекс **Amberg Clearance**

Измерительный комплекс **Amberg GRP System FX** (рисунок 19) обладает модульной конструкцией, что позволяет варьировать его

функционал в соответствии с индивидуальными требованиями проектировщика. Система мобильна, ее легко транспортировать за счет облегченности конструкции и компактности.



Рисунок 19 – Измерительная система **Amberg GRP System FX**

- 1 – лазерный сканер **Amberg Profiler 5002** (дальность действия 1м–79м, частота вращения – 100Гц, объем сканирования до 20 000 точек за оборот);
- 2 – моторизированный безотражательный лазерный дальномер **Amberg Profiler 5002** (диапазон от 0,3м до 30м, точность $\pm 1,5$ мм);
- 3 – кронштейн **GPC 100** для поднятия отражателя с целью снижения рефракции;
- 4 – датчик ширины колеи (точность ± 3 мм; измерение ширины колеи производится на 14мм ниже уровня верха головки рельсов; при необходимости измерения могут производиться в другом уровне; диапазон измерений -25мм - +65мм от номинального значения ширины колеи);
- 5 – изолирующие колеса, исключаящие прохождение электрического тока между левым и правым рельсом;

6 – настройщик ширины колеи, устанавливает номинальное значение ширины колеи любым из существующих в диапазоне 1000мм – 1676мм. Другие значения устанавливаются при необходимости.

Помимо вышеперечисленного система оснащена датчиком возвышения, измеряющим возвышение наружного рельса с точностью $\pm 0,5$ мм при ширине колеи 1435мм, и одомером, измеряющим пройденное системой расстояние с точностью менее 0,5%.

Amberg Rail 2.0 – программное обеспечение, предназначенное для комплексного решения задач.

Центральным вопросом **Amberg Rail 2.0** является последовательное и эффективное управление данными о пути, полученными посредством измерений. Пользователь может настраивать последовательность операций измерений в зависимости от поставленных целей. А также к системе может быть подключена российская нормативная база с целью выявления нарушения принятых стандартов. Программный комплекс управляет и систематизирует работу следующих модулей:

- **Amberg Slab Track Plus** – анализирование и протоколирование текущего пространственного положения участка безбалластной конструкции железнодорожного пути;
- **Amberg Tamping Plus** - протоколирование текущего пространственного положения конструкции пути на балластном основании, расчет необходимых величин, передача данных в шпалоподбивочную машину;
- **Amberg Clearance Basic and Plus** – протоколирование и обработка результатов лазерного сканирования.

1.4 Выводы по первой главе

В первой главе был проведен анализ существующих методов моделирования трассы железнодорожной линии, было установлено, что каждый из рассматриваемых методов на сегодняшний день является

жизнеспособным и применяется в определенных условиях для решения прикладных задач.

Анализ применяемых для проектирования железных дорог в России систем автоматизированного проектирования позволил сделать вывод о необходимости доработки существующего программного обеспечения или, как альтернативе, создании нового программного обеспечения с целью наибольшей автоматизации процесса проектирования, контроля соответствия выходных данных российской нормативной базе и повышения точности результатов проектирования.

Рассмотренные существующие методы получения исходных данных для проектирования железных дорог так же были определены как в равной степени пригодные для процесса проектирования и соответствующие современным и перспективным потребностям проектирования.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАССЫ ПУТИ

2.1 Предобработка исходных данных

В ходе диссертационного исследования рассматривается получение математической модели трассы пути из исходных данных различных типов. Основными типами данных являются результаты традиционной тахеометрической съёмки и данные, полученные в результате лазерного сканирования.

Исходные данные традиционной геодезической съёмки представляют собой информацию о точках рельсовых нитей (левой, правой или обеих), а также путевого обустройства, элементов железнодорожной инфраструктуры и др. Выделить же из такого массива информации только точки, характеризующие пространственное положение железнодорожного пути, удобно, если при производстве работ точки были закодированы.

Если же съёмка оси пути выделена в отдельную технологическую операцию, то данные представляют собой последовательность координат точек съёмки. Однако четкая упорядоченность их расположения по ходу съёмки вдоль рельсовой нити не только не гарантируется, но и вовсе является нехарактерной особенностью. Представление исходных данных съёмки роботизированным тахеометром, как правило, заявляется упорядоченным, но в итоге сбоя в работе, вызываемых поиском тахеометром потерянного отражателя или ограничением видимости, может не являться в результате таковым.

Для успешного и точного моделирования исходные данные необходимо упорядочить. Методы, используемые для расположения исходных точек в порядке следования (по/против хода пикетажа), аналогичны описанным в [1] и [22].

Первый метод (рисунок 20) проверяет каждые три точки съемки ($i - 1$ -ую, i -ую, $i + 1$ -ую) на последовательное расположение, исходя из выполнения условия:

$$s_i \cdot s_{i+1} > 0, \quad (2)$$

где i – порядковый номер точки $i = 2 \dots N - 1$;

N – число точек;

s_i – проекция расстояния между соседними точками ($i - 1$ и i) на прямую, проходящую через крайние из трех точек ($i - 1$ и $i + 1$).

$$s_i = (y_{i+1} - y_i) \cdot \cos \alpha + (x_{i+1} - x_i) \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

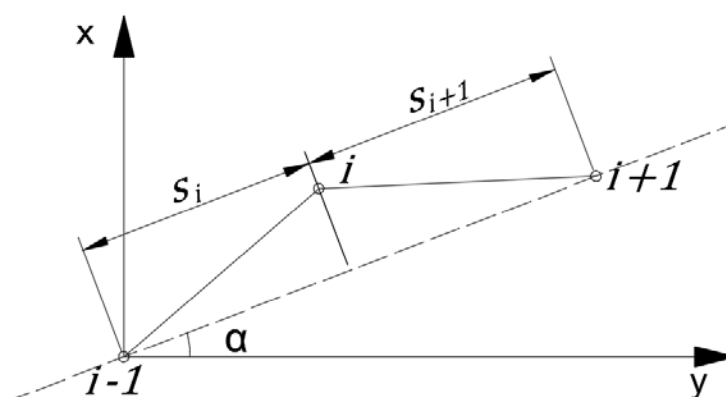


Рисунок 20 – Схема проверки упорядоченности точек исходных данных

В случае невыполнения условия (2) очевидно, что при $s_i \cdot s_{i+1} = 0$, как минимум две из трех точек совпадают, либо положение как минимум одной точки ошибочно; при $s_i \cdot s_{i+1} < 0$, последовательность точек нарушена, либо положение как минимум одной точки ошибочно.

Рассмотренный метод определяет условие (2) как необходимое, но не достаточное для заключения об упорядоченности точек. Практика использования показывает применимость метода для реальных шагов съемки и радиусов кривых.

Второй метод базируется на восстановлении последовательности точек, характеризующих положение оси пути, вдоль аппроксимирующей эти точки прямой (рисунок 21).

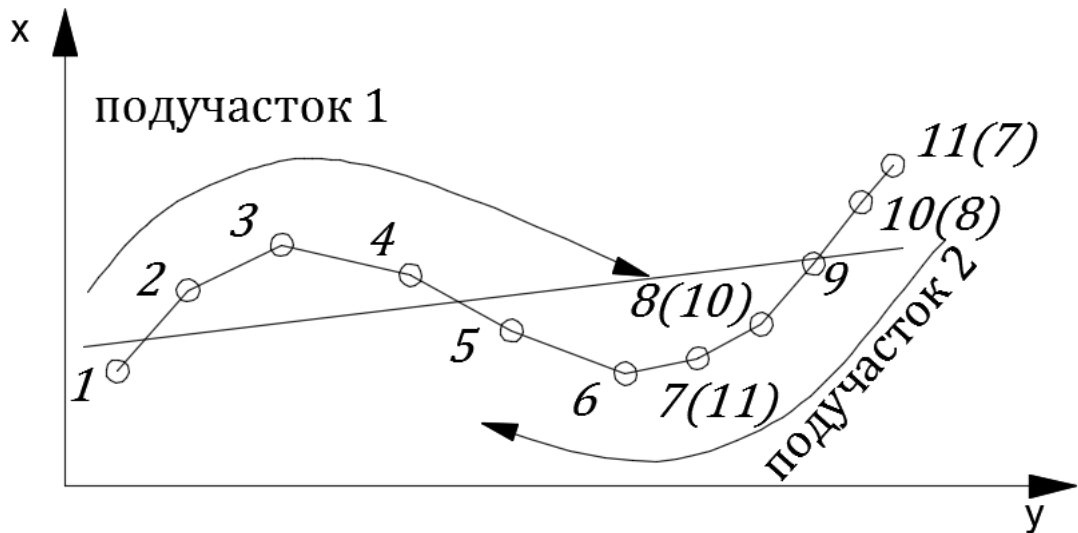


Рисунок 21 – Схема восстановления очередности следования точек при помощи линейной аппроксимации

Частные случаи сложных участков плана демонстрируют, что рассмотренный метод не является универсальным. Например, в ситуации, иллюстрируемой рисунком 22, применение метода приведет к неверным результатам.

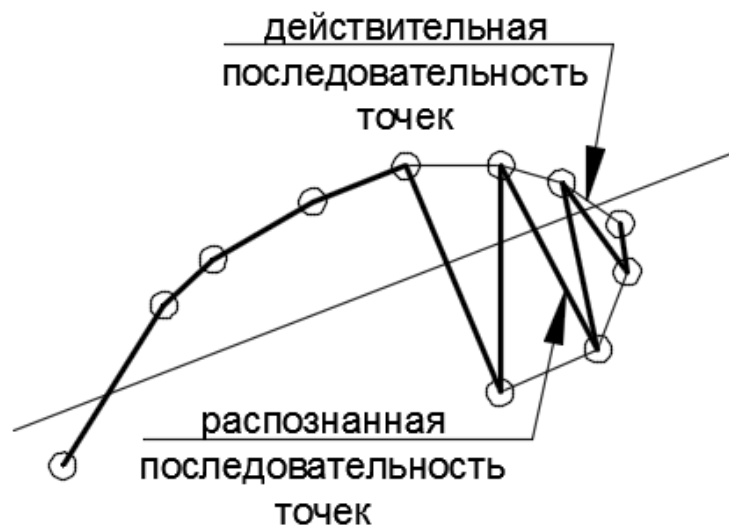


Рисунок 22 – Схема частного случая ошибочной работы метода

Решением возникшей проблемы может быть использование алгоритма, основанного на последовательном поиске соседних (ближайших справа и слева) паре (пара представляет собой исходную точку и ближайшую к ней) точек. Если в качестве исходной точки будет принята начальная или конечная точка рассматриваемого участка, то работа

алгоритма сведется к поиску ближайшей соседней единственной (правой или левой) точки. При этом для поиска исходной точки может применяться рассмотренный ранее алгоритм восстановления последовательности точек вдоль аппроксимирующей прямой.

Сторонность найденной ближайшей к паре точек определяется следующим образом по схеме (рисунок 23):

$$q = (x_{i+1} - x_i) \cdot \sin \alpha + (y_{i+1} - y_i) \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

$q > 0$ точка расположена справа от рассматриваемой пары;

$q < 0$ точка расположена слева от рассматриваемой пары;

$q = 0$ точка совпадает с одной из точек пары или ошибочна, точка исключается.

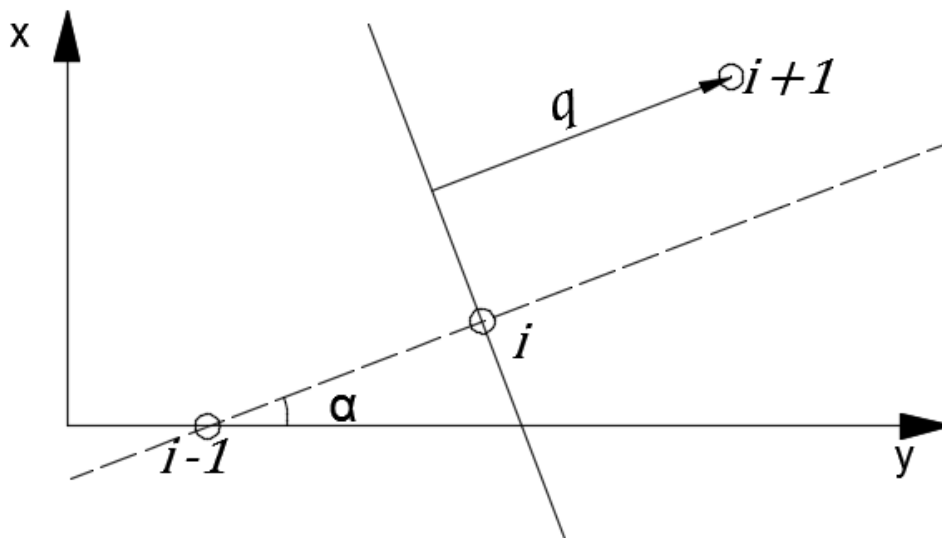


Рисунок 23 – Схема определения сторонности ближайшей к паре ($i-1$ -ой и i -ой) точки $i+1$

Заслуживающим отдельного внимания частным случаем является участок линии, на плане которого есть петля. Известно, что применение такой конфигурации плана связано с искусственным развитием трассы на участках напряженного хода и пересечение путей происходит в разных уровнях. Для того чтобы выявить такие участки достаточно рассчитать предельное значение разности отметок соседних точек для рассматриваемого участка и вписать в алгоритм проверку ближайшей точки

на истинность путем контроля неперевышения разностью отметок этого предельного значения.

2.2 Унифицированный подход к моделированию трассы

В настоящее время **BIM**-технологии (**Building Information Modelling**) [23] позиционируются как передовые и широко обсуждаются в среде проектирования как объектов производственного и непромышленного значения, так и линейных объектов. Такие технологии базируются на единственности – унификации модели объекта на всех этапах ее проектирования. Данный подход позволяет вносить исправления в динамическом режиме, экономить время, затрачиваемое на проектирование, избегать ошибок и потерь точности при переходе от одного типа модели к другому и работать с наглядной и удобной моделью.

В ходе диссертационного исследования возникли трудности при выборе модели плана трассы железнодорожного пути. Как было описано в главе 1, п. 1.1.1, на этапе эксплуатации используются модели в криволинейной системе координат, на этапе проектирования - в прямоугольной системе координат. Несогласованность подходов к моделированию плана трассы гарантированно приводит к потерям времени и информации (рисунок 24), возникновению погрешностей при распознавании элементов плана.

Взаимно однозначное соответствие моделей проектного и существующего планов трассы является решением вышеупомянутой проблемы. Введение единой, используемой на всех этапах жизненного цикла, пространственной модели трассы с момента изысканий на участке пути до реализации проекта является примером такого соответствия.

Преимущества применения координатных моделей заключаются в простоте решения конкретных проектных задач, таких, как разбивка пикетажа, определение габаритов, междупутий, длины участка трассы между точками. Использование координатной модели в эксплуатации

вполне может заменить применение моделей в криволинейной системе координат.

Использование унифицированной пространственной модели привлекательно тем, что современные технологии позволяют получать, хранить и использовать информацию о **3D**-модели трассы, мгновенно извлекая данные ее плоских проекциях при необходимости.

Абсолютно точными результаты автоматических расчетов назвать нельзя, но можно говорить об их правдоподобии и приближении такого правдоподобия к максимальному.

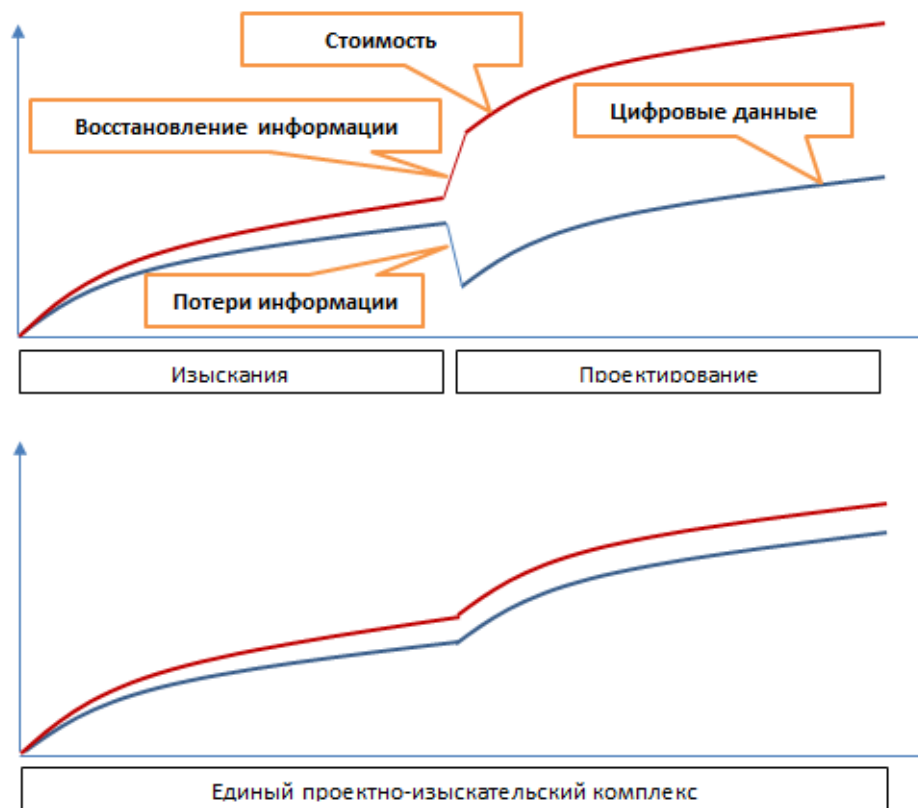


Рисунок 24 – Жизненный цикл проекта

2.3 Использование пространственной модели существующего пути для реконструкции плана трассы

При реконструкции, а также всех видах ремонтов железнодорожного пути целью моделирования трассы в конечном итоге становится постановка пути в геометрически правильное положение. Геометрически правильным

является наиболее благоприятное с точки зрения динамики движения поезда положение пути. При этом задача поиска такого положения сопровождается прогнозированием появления неровностей пути и возможное отдаление времени их возникновения. Криволинейные и прямолинейные участки рассчитываются совместно, это неотъемлемая часть их геометрически правильного сопряжения.

Рассматривая линейно-протяженные объекты в целом (железные и автомобильные дороги, магистральные трубопроводы), следует заметить, что моделирование магистральных трубопроводов осуществляется с учетом их пространственного характера [24]. Выбор подобного подхода к проектированию обусловлен крутизной продольных уклонов (до 333‰, угол наклона до 19°). Пренебрежение продольным уклоном магистрального трубопровода при расчете длины отдельных элементов неизбежно приводит к возникновению недопустимых по величине погрешностей. В теории проектирования автомобильных дорог также известны способы определения пространственной длины трассы автодороги [25], которая всегда больше длины, определенной по полилинии плана или профиля. При этом отмечается, что относительная погрешность неучёта пространственного характера трассы в случае автомобильных дорог существенно больше ошибок полевых геодезических измерений.

Классическая теория проектирования железных дорог в качестве модели трассы подразумевает не саму пространственную линию, а рассматриваемые в отдельности две ее плоские проекции: план и профиль. Такой подход к проектированию заложен в базовых определениях теории [26, с.61]: «трасса железной дороги – это продольная ось железнодорожного пути на уровне профильной бровки основной площадки земляного полотна. На многопутных железных дорогах трасса каждого из путей определяется отдельно. План трассы – это ее проекция на горизонтальную плоскость» и «продольный профиль железной дороги представляет собой развернутую на плоскость вертикальную цилиндрическую поверхность, проходящую

через трассу. Изображение трассы на этой поверхности называется проектной линией продольного профиля». Таким образом, рассматриваются две частности трассы пути. При работе с планом и профилем трассы пренебрегают ее продольным уклоном: проекция трассы на горизонтальную плоскость (горизонтальное проложение) всегда короче наклонного расстояния (рисунок 25 а) и вертикальная цилиндрическая поверхность продольного профиля – поверхность, образующей которой является проекция трассы на горизонтальную плоскость, то есть план трассы. Образованная погрешность длины является систематической ошибкой, она накапливается с увеличением длины рассматриваемого участка пути (рисунок 25 б).

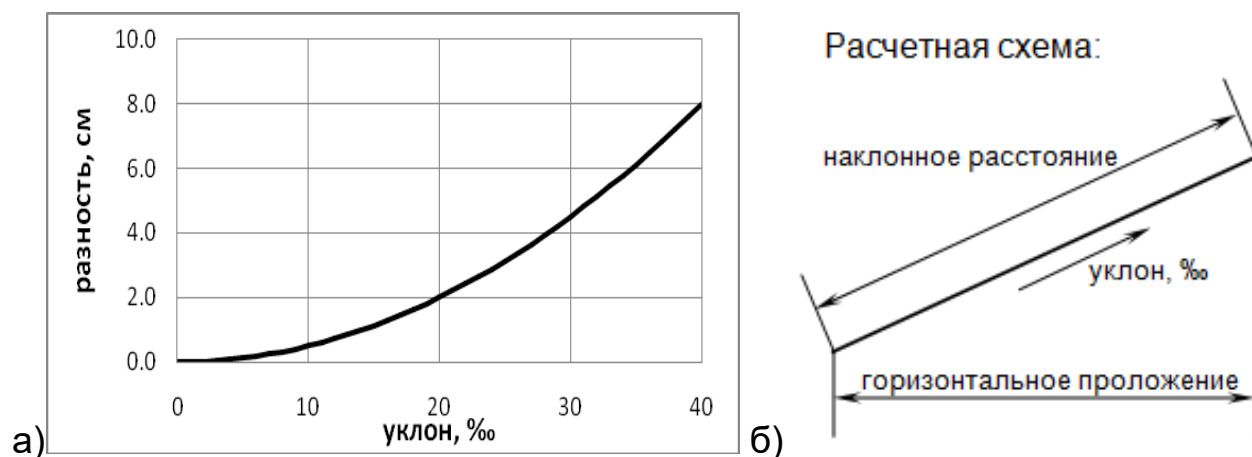


Рисунок 25 – а) график зависимости величины погрешности, возникающей при определении длины трассы по ее горизонтальной проекции, от продольного уклона для участка трассы протяженностью в один пикет (100м); б) расчётная схема.

Вплоть до 1979 года изложение теории проектирования железных дорог в учебниках сопровождалось фразой-замечанием: «Длину элементов профиля при относительно малой крутизне уклонов, применяемых на железных дорогах, отождествляют с горизонтальной проекцией длины. Ошибка при таком допущении весьма незначительна. Даже при столь крутом уклоне, как 30‰, угол α <условный угол наклона плоскости трассы к горизонтальной (прим.автора)> составляет всего $1^{\circ}43'$, при этом разница в длине элемента профиля и его горизонтальной

проекция составляет 4 см на каждые 100 м» [27, с.170]. В учебниках, опубликованных позднее, это замечание отсутствует.

В первом учебнике по дисциплине «Изыскания и проектирование железных дорог» под редакцией К.А. Оппенгейма продольный профиль железной дороги определяется как «продольный разрез по оси железнодорожного пути, вычерченный в установленном масштабе, при принятых обозначениях» [28, с.344]. Другими словами, существующий подход к моделированию плана трассы был определен на этапе становления дисциплины.

С переходом к координатным методам разработки ремонтов пути в конце 90-х годов прошлого века в проектных институтах, занимающихся данным видом деятельности, «желдорпроектах» (ныне филиалах ОАО «Росжелдорпроект») столкнулись с проблемой несоответствия проектного (аналитического) пикетажа эксплуатационному. Данные, полученные посредством инженерно-геодезических изысканий обрабатывались с использованием программных средств (первоначально использовался программный комплекс Кредо), расстояния между точками съемки определялись по плану (по горизонтальной проекции) трассы существующего пути. По данным расстояниям и рассчитывался аналитический, опережающий эксплуатационный, пикетаж. Примером такого несоответствия является перевальный участок Восточно-Сибирской железной дороги длиной 32 км (рисунок 26) [29].

По обнаружении вышеупомянутого несоответствия, объяснить его пытались погрешностью проведения измерений, однако прогрессивный характер накопления несоответствия противоречит такому объяснению. Причина возникновения отмеченной погрешности – определение длины элемента по его горизонтальной проекции, пренебрежение продольным уклоном трассы железнодорожного пути. На каждом отдельном элементе трассы отклонение длины элемента от фактического значения будет тем больше, чем больше его уклон и длина. Данное отклонение является

систематической ошибкой, его величина накапливается по всей длине участка пути. Зависимость величины погрешности от продольного уклона на трассы на участке протяженностью 100м (один пикет) представлена на рисунке 27. Величина погрешности максимальна при максимальном рассматриваемом уклоне 40‰ – 0,08м.

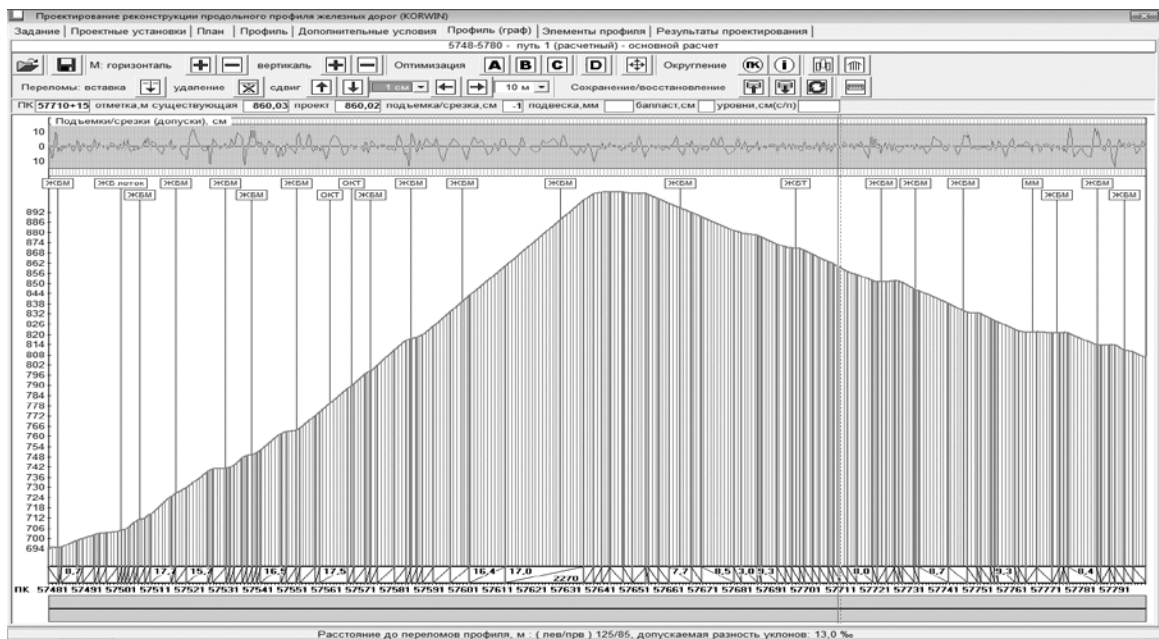


Рисунок 26 – Несоответствие аналитического (проектного) пикетажа эксплуатационному на перевальном участке Восточно-Сибирской железной дороги

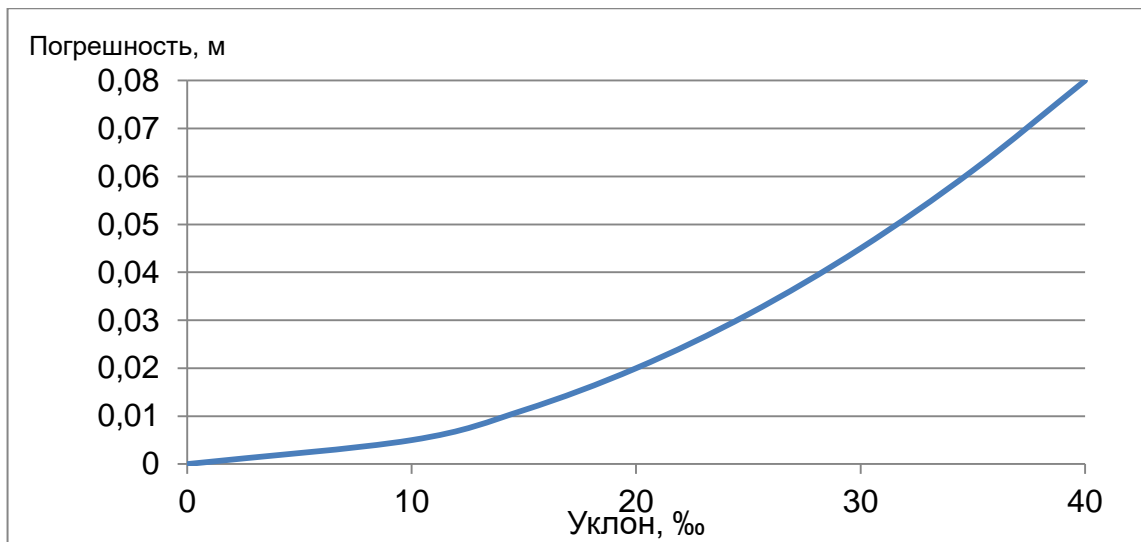


Рисунок 27 – Зависимость погрешности определения длины элемента по его проекции от продольного уклона данного элемента

Для синхронизации пикетажных привязок в базу данных проекта искусственно вводили фиктивные неправильные пикеты (укороченные пикеты, отсутствующие в эксплуатационном пикетаже). Размещали эти фиктивные пикеты перед искусственными сооружениями или путевым устройством, чья пикетажная привязка должна была совпадать с пикетажем соответствующего объекта, указанного в материалах прошлых лет. Это решение носит формальный характер, поскольку несмотря на совпадение пикетажных привязок сооружений и устройств, проектная длина трассы была и остается меньше фактической.

Стоит также рассмотреть искажение очертания элементов трассы и углов поворота кривых, неотъемлемо присутствующее при использовании плоских моделей [29]. Как известно, проекцией дуги окружности на наклонную плоскость является дуга эллипса (и наоборот) (рисунок 28а, 28б), которая имеет меньший угол поворота и смещена по отношению к проектному положению кривой (рисунок 28в).

Величина угловой погрешности рассчитывается следующим образом:

$$\Delta_{\alpha} = \alpha - \frac{2\alpha + \left(1 - \frac{1}{\cos(\arctg i)}\right)^2}{1 + \cos(\arctg i)}, \quad (5)$$

где α – угол поворота кривой, градусы;

i – уклон плоскости кривой, ‰

При продольных уклонах круче 15‰ и углах поворота кривой более 25° погрешность соизмерима с точностью отображения углов поворота кривых в проектной документации (0,5'). При бóльших уклонах и бóльших углах поворота результат можно рассматривать как ошибочный. Указанная погрешность всегда отрицательная (угол поворота эллипса меньше, чем окружности), но может учитываться с разными знаками, поскольку на протяжении трассы железнодорожной линии встречаются кривые разного направления. Следовательно, угловая погрешность не накапливается (в отличие от линейной погрешности в продольном профиле и плане линии), а уравнивается в той или иной степени с возрастанием длины участка трассы, и ее величина в итоге не привлекает внимания и вполне укладывается в представление о погрешностях измерений, технологий и т.п.

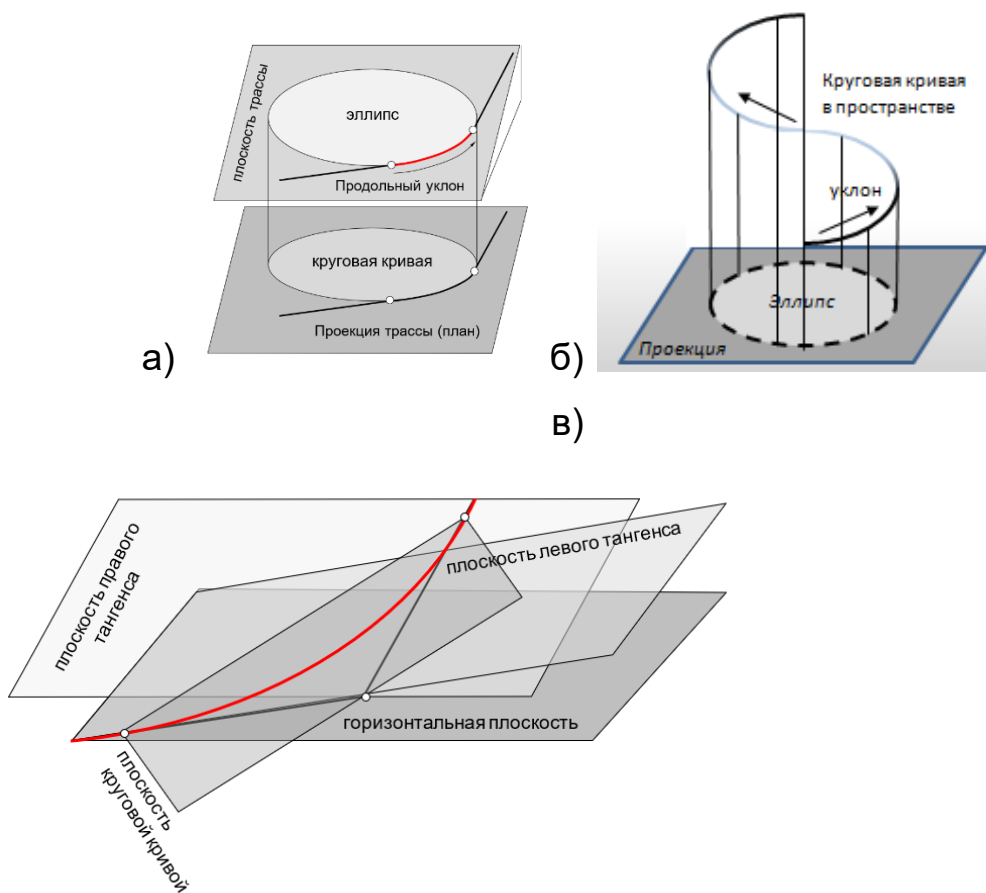


Рисунок 28 – Сравнение пространственного положения участка трассы и его проекции:

а) ситуационная схема; б) принципиальная схема; в) расчётная схема.

Разница длины эллиптической дуги и круговой кривой определяется из выражения:

$$\Delta = R \cdot \Delta_{\alpha} \quad (6)$$

Графики зависимости координатной и угловой погрешностей от угла поворота кривой для участков трассы различного продольного уклона представлены на рисунке 29.

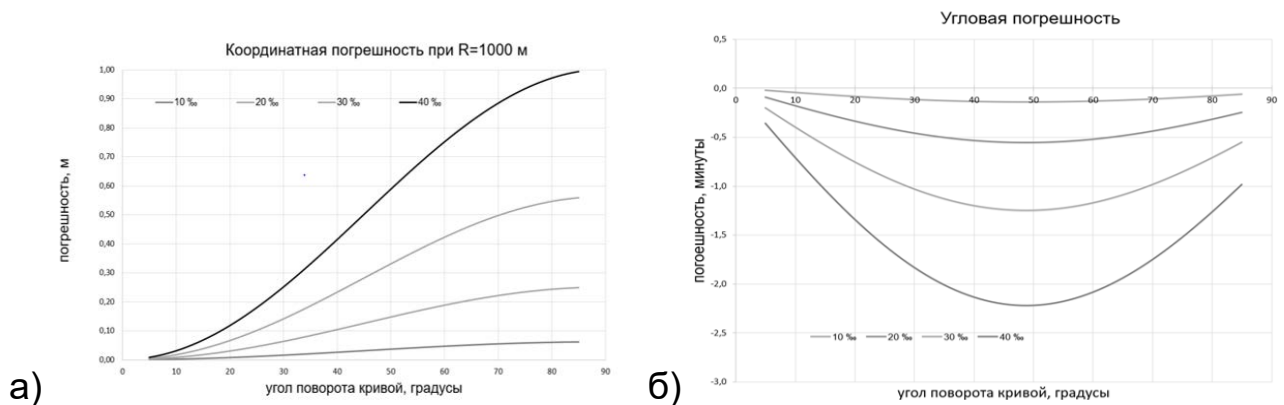


Рисунок 29 – Графики зависимости а) координатной погрешности, м б) угловой погрешности, градусы от угла поворота кривой для участков трассы различного продольного уклона, ‰

Современные потребности проектирования, связанные с применением высокоточных технологий, диктуют необходимость использования прецизионных методов моделирования пространственного очертания пути. Ликвидация очевидных погрешностей, связанных с пренебрежением продольным уклоном трассы железнодорожного пути является первым шагом к созданию такой модели [29].

Существующим примером желаемой модели может служить модель, используемая участниками эксплуатационного этапа жизненного цикла железнодорожной линии - путейцами. План трассы представляет собой не проекцию, а развертку пути на горизонтальную плоскость; продольный профиль – развёрнутую на плоскость не вертикальную, а пространственную поверхность, проходящую через трассу. Данный подход к моделированию трассы железнодорожного пути характерен возникновением погрешности, связанной с определением уклона. Уклон – частное от деления разности отметок на концах элемента на горизонтальную проекцию его длины. Таким

образом, при делении разности отметок на фактическую длину элемента значение уклона будет заниженным (величина погрешности чуть более 0,001‰ при продольном уклоне в 40‰). Однако при расчете отметок данная погрешность может самоликвидироваться: завышенная длина элемента умножается на заниженное значение уклона. Эта модель использует криволинейную систему координат: ось абсцисс – ось пути, в связи с чем затрудняется совместная с проектировщиками работа: переход к прямоугольной системе координат (ось абсцисс – север, ось ординат – восток) и обратно осуществляется с обязательными потерями точности.

В диссертационном исследовании предполагается в качестве модели трассы использовать единую на всех этапах жизненного цикла пространственную модель, основанную на двух допущениях [29]:

1. План трассы участка железнодорожного пути – развёртка трассы на горизонтальную плоскость (не проекция).
2. Продольный профиль участка железнодорожного пути – развёртка пространственной цилиндрической поверхности, проходящей через трассу, на вертикальную плоскость.

Проекты реконструкции (модернизации) и ремонтов железнодорожного пути разрабатываются и реализуются с помощью систем автоматизированного проектирования. Использование единой пространственной модели трассы железнодорожного пути в этом случае упростит взаимодействие и синхронизацию аналитической (проектной) и эксплуатационной моделей трассы.

Процесс преобразования проекции трассы в развёртку иллюстрирует рисунок 30. Элементарная операция преобразования - наложение развертки пространственного треугольника на горизонтальную плоскость и последовательный его поворот (рисунок 31) в двух плоскостях. Сопутствующим образом пересчитываются плановые координаты съемочных точек (отметки точек не пересчитываются).

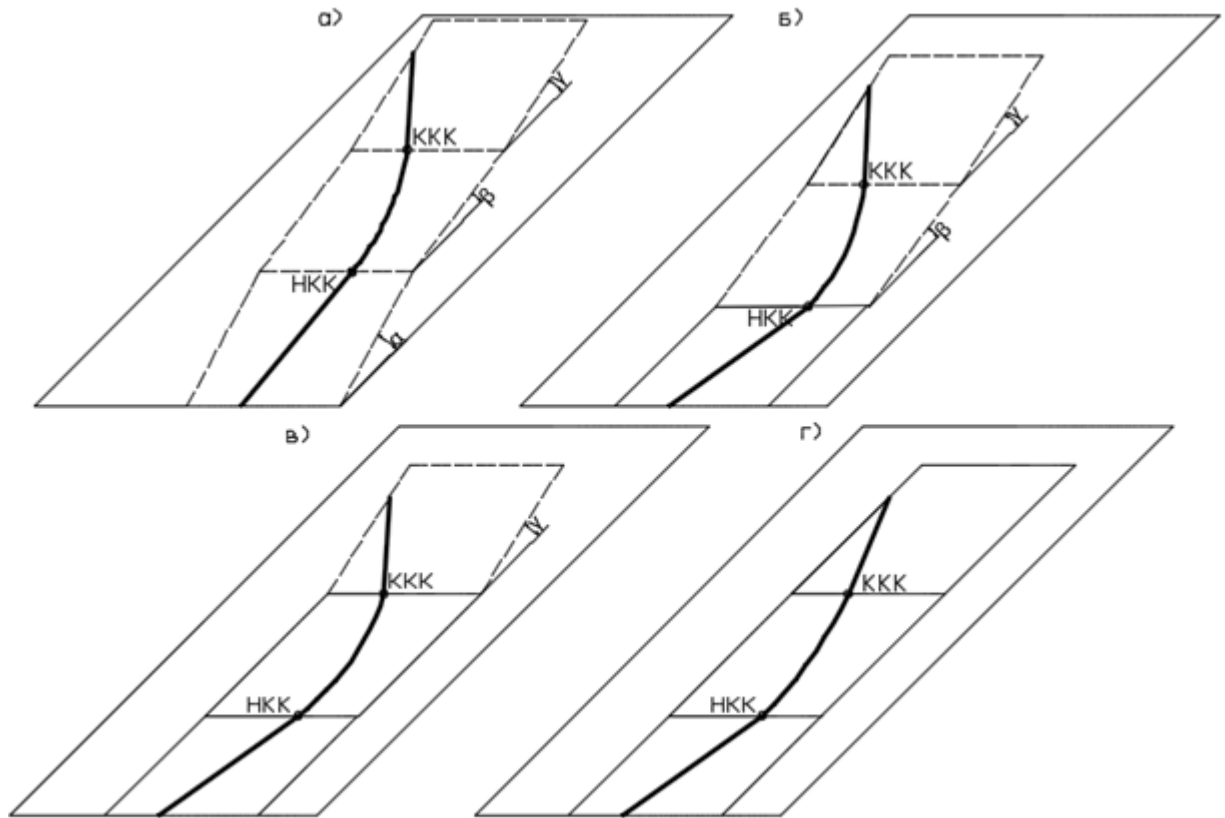


Рисунок 30 – Развёртка трассы на горизонтальную плоскость

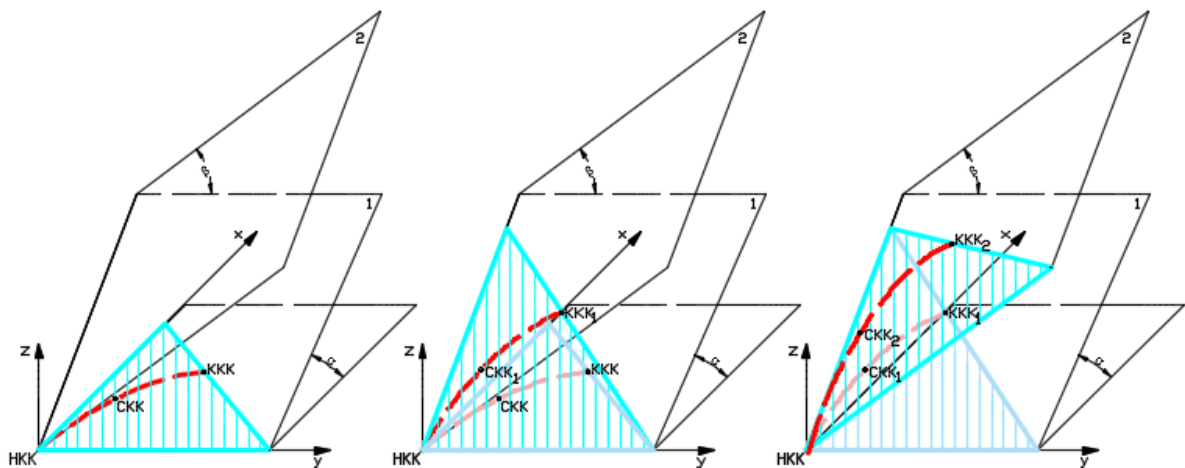


Рисунок 31 – Элементарная операция получения развёртки трассы

Проект, разработанный на основании развёртки трассы, полностью готов к реализации, в то время, как проект, базирующийся на проекции трассы, требует доработки в процессе реализации проекта.

2.4 Применение интерполяционных и аппроксимационных методов для моделирования трассы пути в фактическом и проектном положениях

Модель трассы пути используется в качестве точной характеристики фактического положения пути. Опираясь на вышеизложенное (глава 1, п.1.1.2), вид такой модели зависит от типа исходных данных – метода съёмки, с помощью которого они были получены.

Исходя из того, что применение аппроксимационных моделей подразумевает сглаживание данных, заведомо исключающее их истинность, удалось сделать вывод, что при использовании таких методов съёмки, как лазерное сканирование, спутниковое зондирование и видеопаспортизация следует применять **аппроксимационные модели** (глава 1, п.1.1.2), обеспечивающие сглаживание аппаратных погрешностей геодезических измерений данными методами.

При использовании традиционных методов съёмки, например, электронными тахеометрами, сглаживание данных нежелательно – проблема аппаратных погрешностей геодезических приборов решается в ходе самих измерений и камеральных работ и процесс сглаживания может распространиться и на истинные данные. Здесь следует применять **интерполяционные модели** (глава 1, п.1.1.2).

Таким образом, вид модели, используемой в разрабатываемой методике, определяется характером исходных данных. Тип элементов сплайна между опорными точками выбран в соответствии с принципом максимального правдоподобия для моделирования криволинейных участков пути.

2.5 Выбор типа сплайна

Как было сказано выше (глава 1, п.1.1.2), интерполяционные и аппроксимационные модели трассы различаются тем, какие точки рассматриваются в качестве опорных, при этом выбор модели в данном

случае не влияет на тип линий, соединяющих опорные точки. Эти линии – сплайны - могут быть отрезками прямых, парабол, кубических парабол, круговых кривых, кривых Безье и т.п. В ходе диссертационного исследования при выборе типа сплайнов осуществлялось их сравнение, были выявлены их основные преимущества и недостатки.

Исходные данные – точки трассы пути - характеризуются выраженной нерегулярностью вне зависимости от способа съёмки, подтверждающая это гистограмма распределения расстояний между этими точками на одном из участков работ изображена на рисунке 32. Кубические сплайны, как и все полиномиальные сплайны неправдоподобно описывают положение линии при нерегулярном расположении опорных точек [30].



Рисунок 32 - Распределение расстояний между точками съёмки

Причины нерегулярности кроются в особенностях производства съёмки и стремлении к наибольшей правдоподобности получаемой ЦММ за счёт фиксации характерных точек. В соответствии с нормативными требованиями [31] съёмка плана должна производиться с регулярным шагом – 100 м на прямых и 20 (10) м на кривых. Но геодезические работы на существующих железнодорожных путях в настоящее время не являются выборочно-последовательными.

Съёмка плана линии не выделяется в отдельную технологическую

операцию. Положение железнодорожных путей, как и всех других сооружений и устройств, фиксируется с каждой стоянки инструмента в произвольной последовательности, исходя из соображений минимизации дистанций переноса отражателей.

Кроме точек, действительно определяющих положение оси и отстоящих друг от друга на 20 (10) м, в состав данных включаются и точки характеризующие положение всех путевых устройств (границы рельсовых плетей, стрелочные переводы, изолирующие стыки и т.п.), а также все точки, расположенные в местах определения габаритов (светофоры, опоры ЛЭП, контактной сети, платформы и т.п.). При этом расстояния между отдельными точками съемки могут измеряться десятками сантиметров, а иногда и сантиметрами.

Рисунок 33б иллюстрирует пример этой неправдоподобной интерпретации очертания пути, возникающее при моделировании полиномиальными сплайнами нерегулярной выборки точек. Изображенная на рисунке 33а линейная интерполяция этой же выборки позволяет сделать вывод об ошибочности интерпретации при описании положения оси пути полиномиальными сплайнами. Линейная интерполяция дает общее представление об очертании трассы, однако, не учитывает кривизну оси пути между опорными точками. Полиномиальная интерполяция дает, в данном случае, явно ошибочное представление, как об очертании трассы в целом, так и о ее очертании на отрезках между опорными точками.

В современных платформенных решениях поддерживается создание сплайнов различных типов, зачастую, гладких полиномиальных кубических сплайнов. Применение готовых решений с использованием функционала графической платформы (а также копирование данного функционала) типично в настоящее время для практически всех САПР железных дорог.

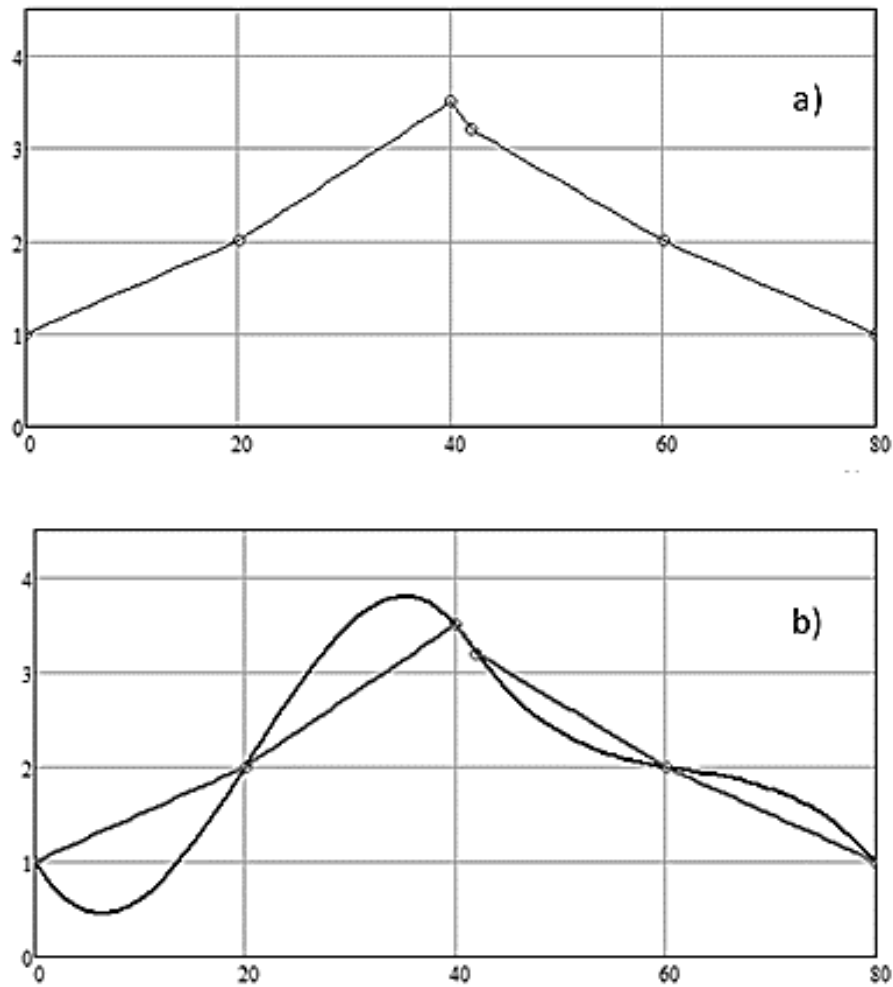


Рисунок 13 Линейная (а) и полиномиальная (b) интерполяция

Кубические параболы, как и все параболы, недостаточно точно описывают круговые кривые - типичные для трассы всех линейных сооружений геометрические объекты. При использовании для моделирования плана трассы полиномиальных сплайнов вероятно возникновение ошибок, иллюстрируемых рисунком 34. Такое явление обусловлено поведением параболических функций: поскольку фрагменты функций вне экстремумов являются либо возрастающими, либо убывающими, положение трех точек, близких к лежащим на одной прямой, трактуются как экстремумы.

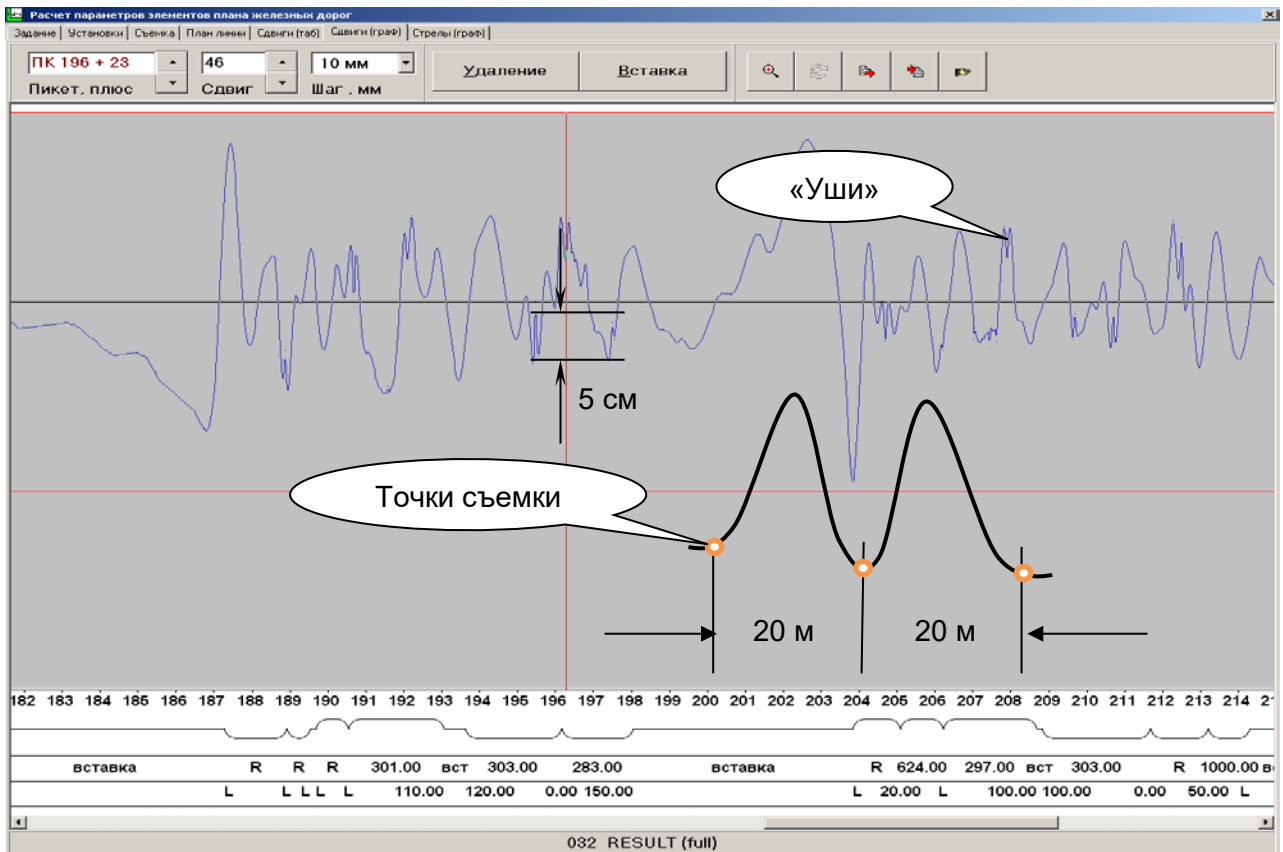


Рисунок 34 – Погрешности при использовании полиномиальных сплайнов для моделирования плана трассы

Расчетная схема для определения погрешности описания правильной круговой кривой полиномиальным сплайном 3-й степени и результаты расчёта приведены на рисунке 35. На хорде 20 м величина погрешности равна:

$$\Delta = R \cdot (1 - \cos(\beta)) - 10 \cdot \tan(\beta)/3, \quad \text{где } \beta = \arcsin(10/R) \quad (7)$$

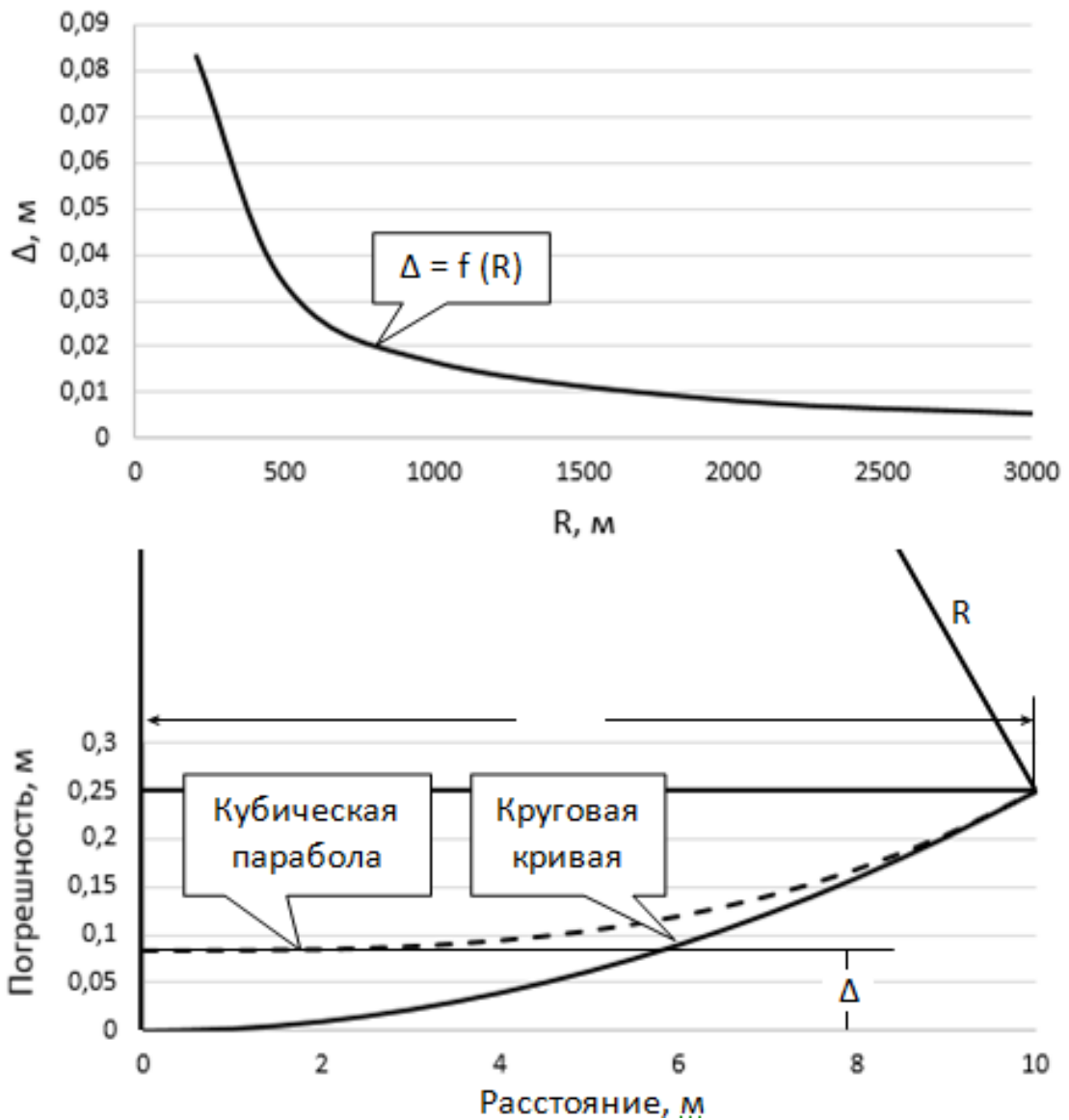


Рисунок 35 – Круговая кривая и кубическая парабола

Таким образом, в кривых малых радиусов погрешность может достигать 8 см.

Практическая проектная проблема здесь возникнет при построении поперечных профилей, расчете габаритов и междупутий в точках пути, лежащих в пикетаже между точками съемки.

Одно из свойств стандартного полиномиального сплайна – связность так же может оказать «медвежью услугу» при моделировании прямых на участке пути. Связность сплайна строго учитывает как предысторию, так и постисторию изменения второй производной (кривизны модели) и приводит к изображенному на рисунке 36 возникновению «гармонических колебаний»

очертания модели, распространяющихся и на прямолинейный участок трассы.

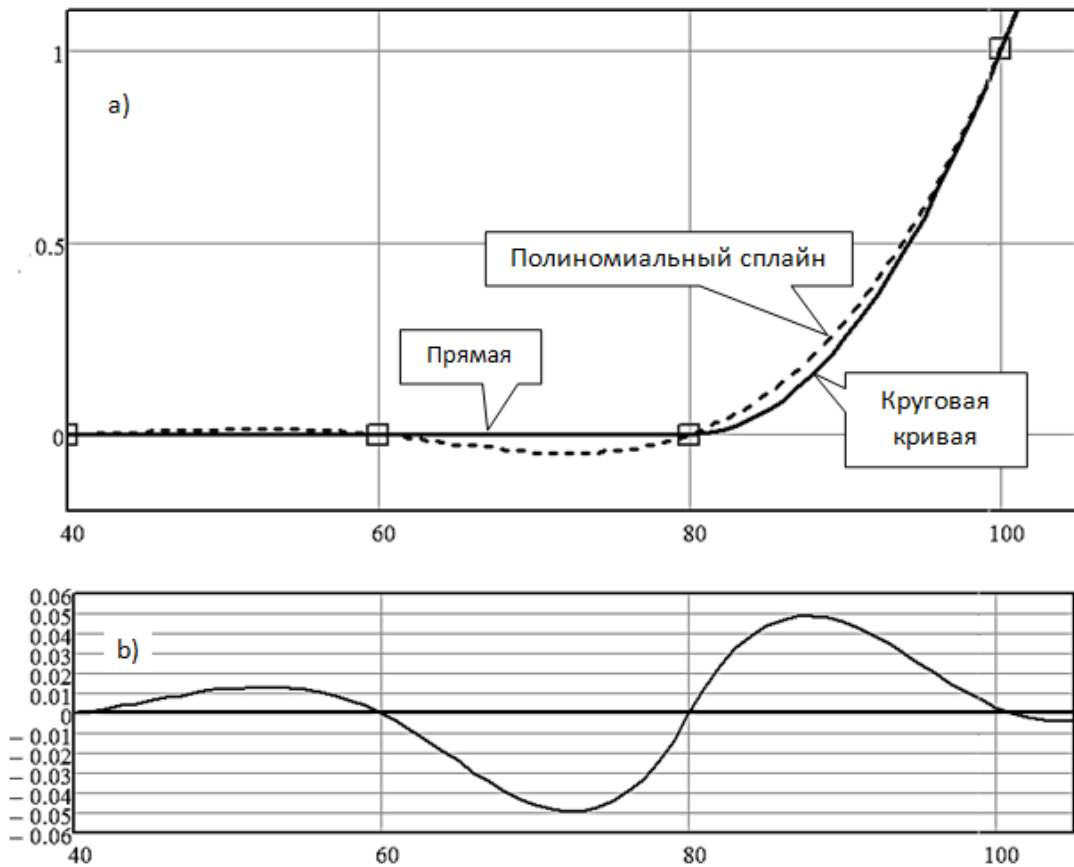


Рисунок 36 – Точная координатная модель плана (а) и отклонения сплайна от этой модели (b)

Несмотря на то, что обычно, между точками съемки конфигурация трассы точно не известна, но тем не менее предсказуема и ожидаема. Результат применения сплайнов в данном случае противоречит этому ожиданию.

Абсолютная гладкость полиномиальных сплайнов (дефекты сплайна равны нулю) является основной проблемой погрешностей моделирования. Резко повысить качество модели можно, отказавшись от гладкости сплайна по второй производной.

От гладкости сплайна по первой производной (тангенс угла наклона касательной) отказаться не представляется возможным в силу специфики моделируемого объекта. Во-первых, положение оси пути определяется по положению рельсовых нитей – упругих стальных полос – чья конфигурация

абсолютно точно не деформируется с образованием точечных углов. Во-вторых, сохранение гладкости сплайна по первой производной упрощает решения смежных задач проектирования – определение междупутий и габаритов.

Формально задача расчёта габарита сводится к определению «кратчайшего расстояния» - отрезка нормали, построенной от оси пути до внешней точки. Рисунок 37 иллюстрирует возможные проблемы, возникающие при отказе от гладкости сплайна по первой производной: в местах стыковки элементов сплайна внешняя точка может оказаться как в области, до которой от оси пути не может быть восстановлена нормаль, так и в области, где нормаль может быть проведена не единственным образом.

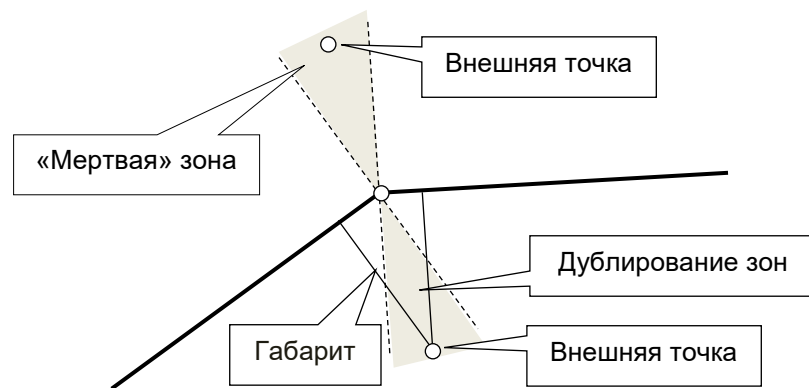


Рисунок 37 – Проблемы расчёта габарита

Для правдоподобной оценки длины трассы между точками съемки нужно сделать предположение о величине угла поворота трассы между ними [30]. Расчётная схема такой модели проиллюстрирована рисунком 38.

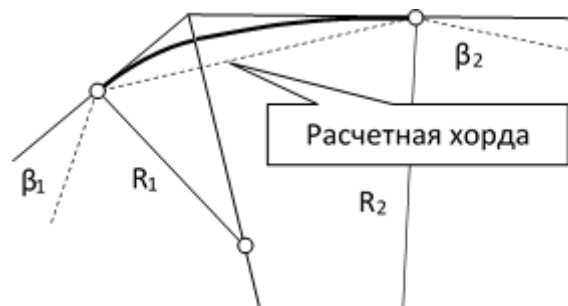


Рисунок 38 – Основная расчётная схема

Радиусы сопрягаемых круговых кривых, описывающих конфигурацию

криволинейного участка трассы:

$$R_1 = S \cdot \frac{1 - \cos \beta_2}{\sin \beta_1 \cdot (1 - \cos \beta_2) + \sin \beta_2 \cdot (1 - \cos \beta_1)}, \quad (8)$$

$$R_2 = S \cdot \frac{1 - \cos \beta_1}{\sin \beta_1 \cdot (1 - \cos \beta_2) + \sin \beta_2 \cdot (1 - \cos \beta_1)}, \quad (9)$$

где S – длина хорды, соединяющей опорные точки.

Длина трассы между опорными точками, следовательно, определяется по формуле (10):

$$d = R_1 \cdot \beta_1 + R_2 \cdot \beta_2 \quad (10)$$

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.

Углы β_1 и β_2 отсчитываются от среднего направления сопряженных хорд в начале и конце расчетной хорды.

Здесь нужно выделить частные случаи.

Если разность углов одной из пар сопряженных хорд мала, можно предположить, что в данной точке происходит переход с кривой на прямую (или наоборот). Распространение расчетной схемы, показанной на рисунке 39, и на подобную композицию данных приведет, так же как при использовании полиномиального сплайна, к возникновению «гармонических колебаний» очертания модели, распространенных на прямолинейный участок трассы.

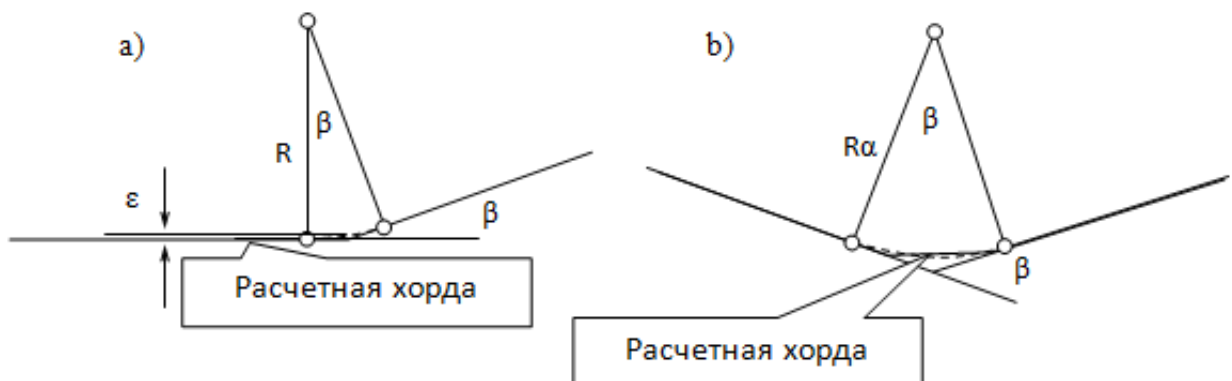


Рисунок 39 - Вставка элемента сплайна типа «круговая кривая» при достаточной (а) и недостаточной (b) длине расчетной хорды

В этом случае за направление для отсчета углов β_1 или β_2 принимается направление соответствующей сопряженной хорды.

Если обе разности углов поворота сопряженных хорд малы, можно предположить, что данный и следующий за ним элементы сплайна описывают прямую. В этом случае в состав сплайна вводится круговая кривая большого радиуса с вершиной угла поворота в точке сопряжения хорд, рисунок 39а. Расчет радиуса производится из условия неперевышения биссектрисой кривой некоторой малой величины ε (например, 0,5 мм). При этом длины тангенсов кривых не должны превышать половины длины соответствующих сопряженных хорд. Если последнее условие не может быть обеспечено, что вполне возможно при использовании данных традиционной съемки, расчетная хорда описывается в составе сплайна как круговая кривая, радиус которой рассчитывается из условия неперевышения отклонений кривой от опорных точек величины ε , рисунок 39 б.

Если разности углов поворота сопряженных хорд имеют разную сторонность, можно предположить, что данный отрезок трассы – локальная «неровность плана пути» [30] S-образного очертания. В этом случае в состав сплайна также вводятся круговая кривая большого радиуса, однако, если длина расчетной хорды недостаточна для размещения тангенса кривой, – она заменяется двумя обратными кривыми, рисунок 40.

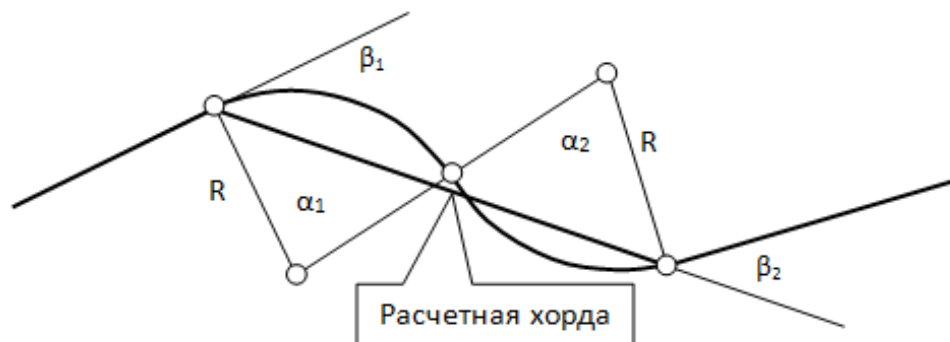


Рисунок 40 - Вставка S-образных элементов сплайна

Если разность углов поворота сопряженных хорд очень мала (близка

к нулю или равна нулю), соответствующая опорная точка удаляется. Признаком малости угла здесь является непревышение отклонения данной опорной точки от прямой, соединяющей смежные опорные точки, величины ε . Эта операция производится в первую очередь – до начала формирования модели.

Перебор пар опорных точек производится последовательно от начала к концу расчетного участка.

Полученная модель трассы состоит только из прямых и круговых кривых. При этом фрагменты модели, потенциально соответствующие фрагментам переходных кривых, заменяются «коробовыми» кривыми [32] – описываются как две сопряженные круговые кривые с уменьшающимся (или увеличивающимся) радиусом.

На рисунке 41 проведен анализ точности моделирования фрагментов переходных кривых (отрезков клотоид) «коробовыми» кривыми. Критическим для точности является моделирование фрагмента короткой переходной кривой при малом радиусе круговой кривой (быстрое изменение кривизны).

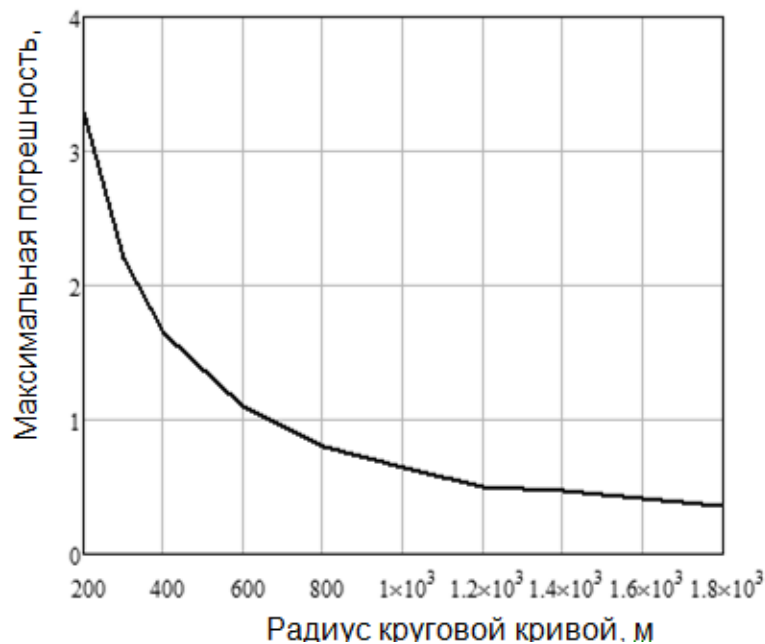


Рисунок 41 - Погрешность моделирования переходных кривых – клотоид «коробовыми кривыми» при шаге точек 10 м ($L = 20$ м)

При шаге опорных точек равном 10 м субмиллиметровая точность достигается для круговой кривой радиуса более 300 м (длина переходной кривой 20 м), что можно считать достаточным. При этом предельная простота и единообразие элементов сплайна обеспечит максимальное быстродействие алгоритма расчета координат при решении различных проектных задач, в том числе, что наиболее существенно, при оптимизации проектных решений.

Для повышения точности моделирования возможны два решения:

1) включить в состав элементов сплайна отрезки клотоид или кубических парабол для описания фрагментов трассы с интенсивным изменением кривизны. Это приведет к усложнению и снижению быстродействия алгоритмов обработки данных (расчету координат трассы существующего пути по модели) – отрезки клотоид и парабола, в отличие от отрезков прямых и круговых кривых, не обладают свойством центральной симметрии, что потребует анализа их направления и его учета при расчете координат по более сложным, чем для прямых и круговых кривых, формулам;

2) произвести искусственное сгущение опорных точек в зонах интенсивного изменения кривизны трассы. При создании модели по данным мобильной лазерной съемки это приведет лишь к небольшому усложнению алгоритма их предобработки. При использовании данных традиционной съемки, в условиях полного отсутствия информации об очертании трассы между съемочными точками, требуется более существенное усложнение алгоритма – элемент сплайна со значительным изменением кривизны сначала моделируется как отрезок клотоиды или кубической параболы, а затем делится пополам с вводом в состав исходных данных фиктивной съемочной точки. Ее координаты равны координатам середины отрезка клотоиды или параболы.

Второе решение предпочтительнее. Предельная простота и единообразие элементов сплайна обеспечит максимальное

быстродействие алгоритма расчета координат при решении различных проектных задач, в том числе, что наиболее существенно, при оптимизации проектных решений.

Таким образом, модель плана трассы железнодорожного пути (переход к пространственной модели см. ниже) 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.

По существу 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.

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

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

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

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

$m = 1$, до тех пор пока $st < d_m$, $m = m + 1$;

если $|p_m| = 0$ (прямая), то $x_t = x_m + (st - d_m) \cdot \cos(f_m)$, $y_t = y_m + (st - d_m) \cdot \sin(f_m)$,

иначе (круговая кривая) $x_t = x_m + (\sin \alpha \cdot \cos(f_m) + (1 - \cos \alpha) \cdot \sin(f_m)) / p_m$
 $y_t = y_m + (\sin \alpha \cdot \sin(f_m) - (1 - \cos \alpha) \cdot \cos(f_m)) / p_m$,

где $\alpha = (st - d_m) \cdot p_m$.

Используется вспомогательная система координат.

Методика формирования пространственной модели трассы данного типа реализована в программе **Sterna**. Выполнены тестовые расчеты.

Результат моделирования для одного из расчетных участков, преобразованный в график кривизны, показан на рисунке 42.

Координатные отклонения очертания модели от съемочных точек не превышают 1-2 мм, причем в данном случае можно сказать, что модель более точно, чем данные съемки, отображает положение оси пути в плане – представляет собой по существу «математическое ожидание» данного положения в облаке съемочных точек.

Для перехода от плоской модели к пространственной необходимо дополнение описания элементов сплайна данными о продольном уклоне трассы в его пределах. При этом число элементов сплайна в общем случае увеличится, так как между опорными точками может располагаться перелом профиля.

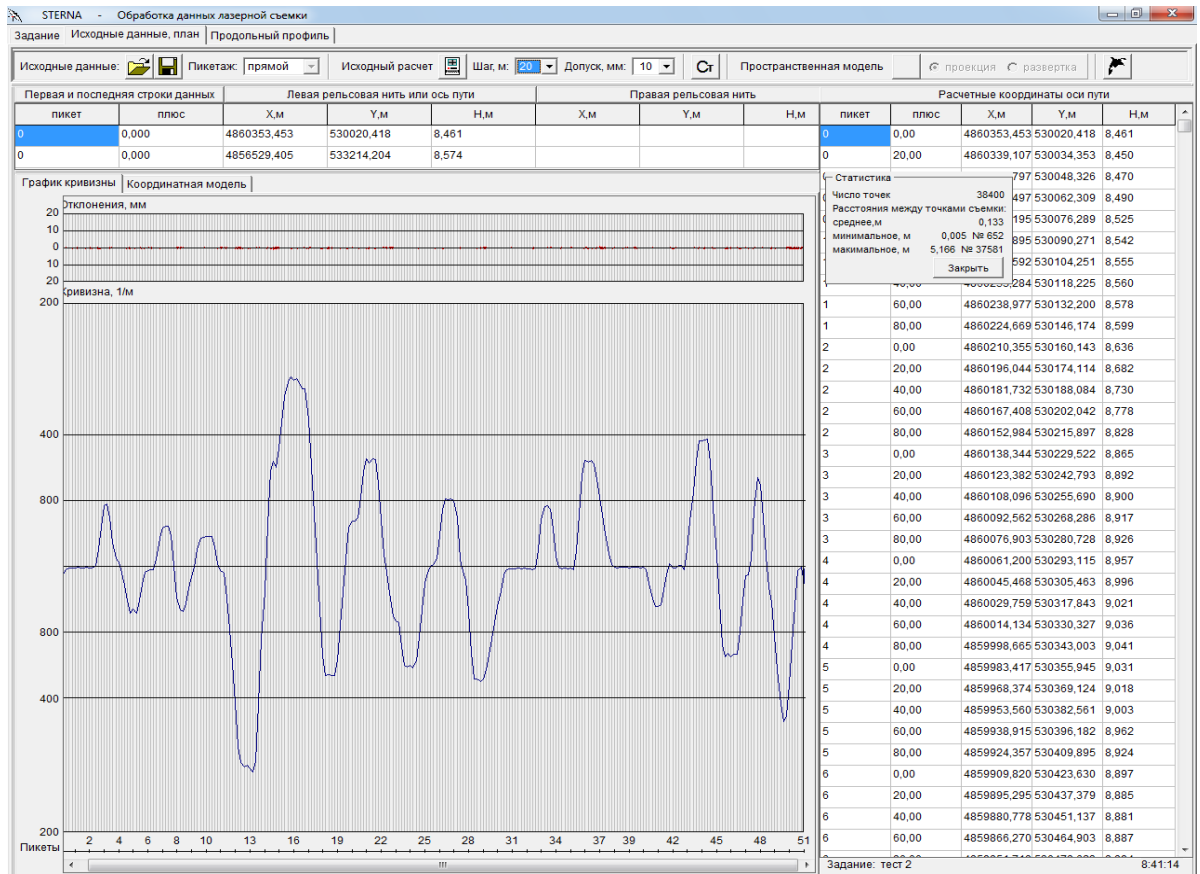


Рисунок 42 - Результаты расчета, длина участка 5.1 км

Для размещения переломов профиля в программе **Sterna** используется алгоритм спрямления с возвратами [33].

В окончательном виде пространственная модель трассы существующего железнодорожного пути имеет вид:

$M = (S, P, I)$, 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;

$I = (i_1, i_2, i_3, \dots, i_N)$ – продольные уклоны элементов сплайна;

$j = 1, 2, 3, \dots, N$;

N – число элементов сплайна.

Кривизна и продольный уклон в пределах каждого элемента сплайна постоянны.

В описанной модели трассы существующего железнодорожного пути возникновение выявленных в ходе исследования погрешностей исключено, ее предполагается использовать при разработке модуля «Параметрическая

модель фактического положения пути» в составе проекта «Комплексная система пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта (КСПД ИЖТ)». Программа **Sterna** рассматривается как прототип (действующая модель) промышленной программы.

2.6 Моделирование профиля существующего пути методом «спрямления с возвратами»

Проектирование реконструкции продольного профиля заключается в максимальном спрямлении его элементов. Спрямление осуществляется в некотором «коридоре» (подъемок и срезок) допустимого проектного положения ломаной линии продольного профиля максимально близко к текущему положению. Данный «коридор» формируется, исходя из регламентируемых нормативами [31] ограничений на траекторию (минимальная длина элементов профиля, уклон и разность уклонов) и ограничений на пространство (высотные ограничения – разность существующего и проектного положений линии продольного профиля). Целеполагающим ограничением спрямления является следующее ограничение на траекторию: длина элемента проектной линии должна быть не меньше существующей. Автоматизация спрямления продольного профиля осуществляется посредством различных алгоритмов [32]. Процесс моделирования продольного профиля существующего пути аналогичен проектированию реконструкции продольного профиля, разница в существенно меньшей величине коридора. Далее по тексту моделируемый профиль будет называться проектным.

Алгоритм последовательной укладки проектной линии продольного профиля состоит из элементарных операций укладки элементов профиля максимальной длины, расположенных в коридоре допустимых отклонений. Конец каждого такого элемента является началом следующего за ним элемента и так до конца расчётного участка. На первый взгляд, результатом работы этого алгоритма является ломаная линия, состоящая из отрезков

наибольшей протяженности, расположенная в установленном коридоре. Но анализ алгоритма показывает, что при определенном наборе ограничений может произойти «потеря управления» и начертание полученной таким образом проектной линии продольного профиля не будет соответствовать цели спрямления (рисунок 43).

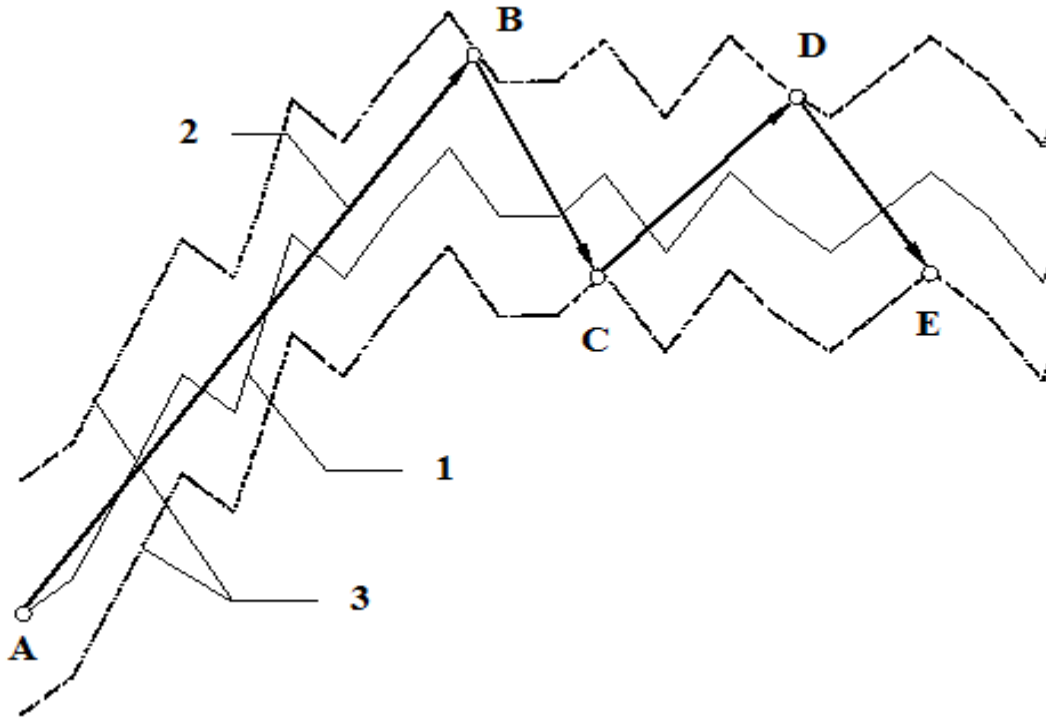


Рисунок 43 - Спрявление профиля: исходная (1) и результирующая (2) ломаные, границы коридора допустимых отклонений (3)

Только уложенный элемент АВ удовлетворяет условиям задачи спрямления, переломы существующего профиля же расположены таким образом, что последовательная укладка следующего элемента ВС по заданному алгоритму приведет к его неизбежному расположению, показанному на рис.35. Элемент достигает границы коридора ранее, чем обеспечивается необходимая протяженность этого элемента, происходит так называемая «челночная» циклическая укладка элементов между границами коридора, что в лучшем случае приведет лишь к неоправданному занижению длин элементов и завышению их количества.

Решением возникающей проблемы [32] при условии сохранения всех очевидных достоинств метода может служить алгоритм, доработанный

операциями оптимизации положения переломов проектной линии продольного профиля (рисунок 44).

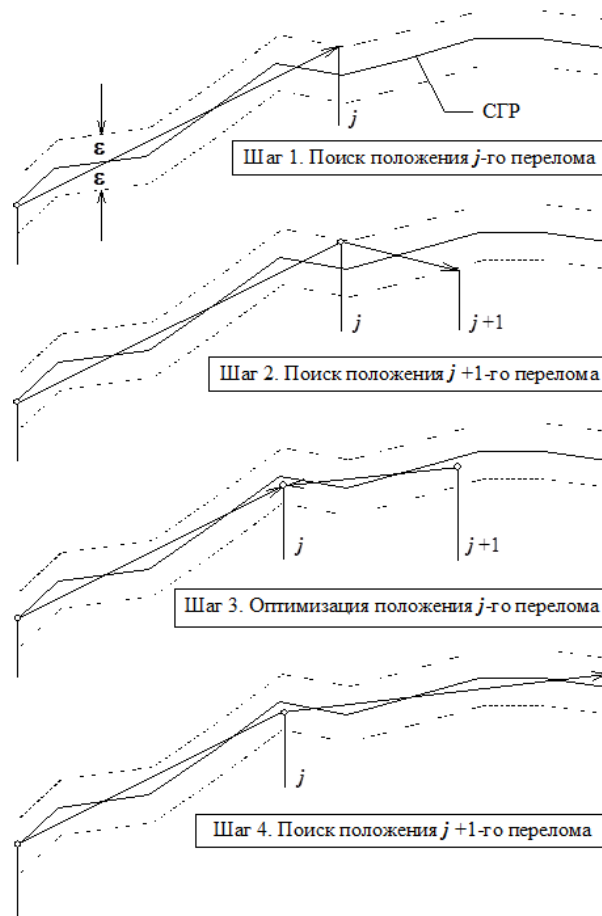


Рисунок 44 - Спрямление продольного профиля с возвратами: ε – допустимое отклонение

Пусть задано существующее положение линии продольного профиля (линии существующих отметок головки рельса - СГР) и определен некоторый коридор $(-\varepsilon; \varepsilon)$ допустимых вертикальных отклонений проектной линии. Тогда доработанный алгоритм будет представлять собой цикл следующих шагов:

1. Производится укладка j -го элемента профиля из условий максимального приближения проектного положения к существующему (например, аппроксимация методом наименьших квадратов), максимизации протяженности и расположения элемента в допустимом коридоре.

2. Начиная с конца j -го элемента, аналогично укладывается следующий $j+1$ -й элемент. Как показывает шаг 2 рисунок 44, данный элемент явно не соответствует конкретной профильной ситуации и его

фиксация таким образом приведёт к ошибочному распознаванию структуры элементов продольного профиля на расчетном участке.

3. Производится оптимизация взаимного расположения j -го и $j+1$ -го элементов за счет смещения границы j -го $j+1$ -го элементов влево.

4. длина $j+1$ -го элемента максимизируется. Следующим шагом является переход к рассмотрению следующей пары элементов, $j+1$ -го и $j+2$ -го.

Сопутствующей операцией алгоритма является контроль за минимальной длиной элемента.

Оптимизация положения элементов проектного продольного профиля при подборе длин элементов и/или пар элементов может осуществляться как аналитически (например, методом наименьших квадратов), так и численно посредством итераций. Первый подход является более быстрым в реализации, а значит, и более предпочтительным.

Цифровая модель продольного профиля существующей линии представляет двумерный массив M :

$$M = (SS, HS), \text{ где}$$

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

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

N – число съемочных точек.

Расчетные случаи.

Сначала 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;

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

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

1 расчетный случай – оптимизация параметров элемента профиля заданной длины (соответствует первому шагу оптимизационного процесса,

цикла, 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.

Метод наименьших квадратов [34] заключается в приравнении нулю частных производных аппроксимируемой функции, в описываемом случае функции $F = \sum_{j=jn}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j)^2$.

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial hp_1} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial i_1} = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2 \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j) = 0, \\ 2 \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j) \cdot (ss_j - sp_1) = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{j=jn}^{jk} hp_1 + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) - \sum_{j=jn}^{jk} hs_j = 0, \\ hp_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 - \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} JK \cdot hp_1 + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j, \\ hp_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1); \end{cases}$$

$$\begin{cases} hp_1 = \frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j - i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{JK}, \\ \frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j - i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{JK} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1); \end{cases}$$

Решаем второе уравнение системы:

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

$$\frac{1}{JK} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) - \frac{i_1}{JK} (\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1))^2 + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1);$$

$$i_1 \left(\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 - \frac{1}{JK} (\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1))^2 \right) = \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) - \frac{1}{JK} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1);$$

| | |
|--|------|
| $i_1 = \frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) - \frac{1}{JK} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{\left(\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 - \frac{1}{JK} (\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1))^2 \right)}$ | (11) |
| $hp_1 = \frac{1}{JK} \sum_{j=jn}^{jk} hs_j - \frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) - \frac{1}{JK} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{\left(\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 - \frac{1}{JK} (\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1))^2 \right)} \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)$ | (12) |

2 расчетный случай – оптимизация уклона элемента профиля при

заданной начальной отметке – решается аналогично первому, но управляемой переменной является только уклон (операция выполняется на первом, втором и четвертом шагах цикла):

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

$$\frac{\partial F}{\partial i_1} = 0,$$

$$2 \cdot \sum_{j=jn}^{jk} (hp_1 + i_1 \cdot (ss_j - sp_1) - hs_j) \cdot (ss_j - sp_1) = 0,$$

$$hp_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1) + i_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2 - \sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) = 0,$$

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

| | |
|--|------|
| $i_1 = \frac{\sum_{j=jn}^{jk} hs_j \cdot (ss_j - sp_1) - hp_1 \sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)}{\sum_{j=jn}^{jk} (ss_j - sp_1)^2}$ | (13) |
|--|------|

3 расчетный случай – оптимизация взаимного расположения двух элементов профиля при известных начальной отметке первого элемента и длинах элементов (операция выполняется на третьем шаге цикла).

Оптимизационная задача:

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

Пусть $a = ss_j - sp_1$, $b = ss_j - sp_1 - dp_1$.

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial i_1} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial i_2} = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2 \cdot \sum_{j=jn1}^{jk1} (hp_1 + i_1 \cdot a - hs_j) \cdot a + 2 \cdot \sum_{j=jn2}^{jk2} (hp_1 + i_1 \cdot dp_1 + i_2 \cdot b - hs_j) \cdot dp_1 = 0, \\ 2 \cdot \sum_{j=jn2}^{jk2} (hp_1 + i_1 \cdot dp_1 + i_2 \cdot b - hs_j) \cdot b = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + i_1 \sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a + \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 + i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 - \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1 = 0, \\ \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b + i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1, \\ i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b^2 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b; \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) + \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 \\ i_2 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2}; \end{array} \right.$$

Решим первое уравнение системы:

$$\begin{aligned} & i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) + \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 \\ & = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 \\ & i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 - \frac{(\sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b)^2}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \right) = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \\ & - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 - \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 \\ & i_1 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 - \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1}{\left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 - \frac{(\sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b)^2}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \right)} \\ & i_2 = \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a + \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 - \frac{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1}{\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b - \frac{\left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 - \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 - \frac{(\sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b)^2}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2} \right)}{\sum_{j=jn2}^{jk2} b^2}}; \end{aligned}$$

$$i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b^2 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b;$$

$$i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \cdot b + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b^2 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot b - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot b,$$

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

Подставим решение в первое уравнение системы:

$$i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 + \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) + i_2 \sum_{j=jn2}^{jk2} b \cdot dp_1 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1,$$

$$\begin{aligned} & i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 + \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) + \left(\sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1 \right) \cdot dp_1 = \\ & = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & i_1 \left(\sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 + \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \right) - i_1 \sum_{j=jn2}^{jk2} dp_1^2 \\ & = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 - \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1 \\ & + \sum_{j=jn2}^{jk2} hp_1 \cdot dp_1 \end{aligned}$$

$$i_1 \cdot \sum_{j=jn1}^{jk1} a^2 = \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j dp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hp_1 \cdot a - \sum_{j=jn1}^{jk1} hs_j \cdot a - \sum_{j=jn2}^{jk2} hs_j \cdot dp_1,$$

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

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

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

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

Реализация разработанного алгоритма была осуществлена в концепте ПК **Sterna**. Рисунок 45 иллюстрирует результат спрямления профиля данным методом на одном из участков, выбранных для расчета.

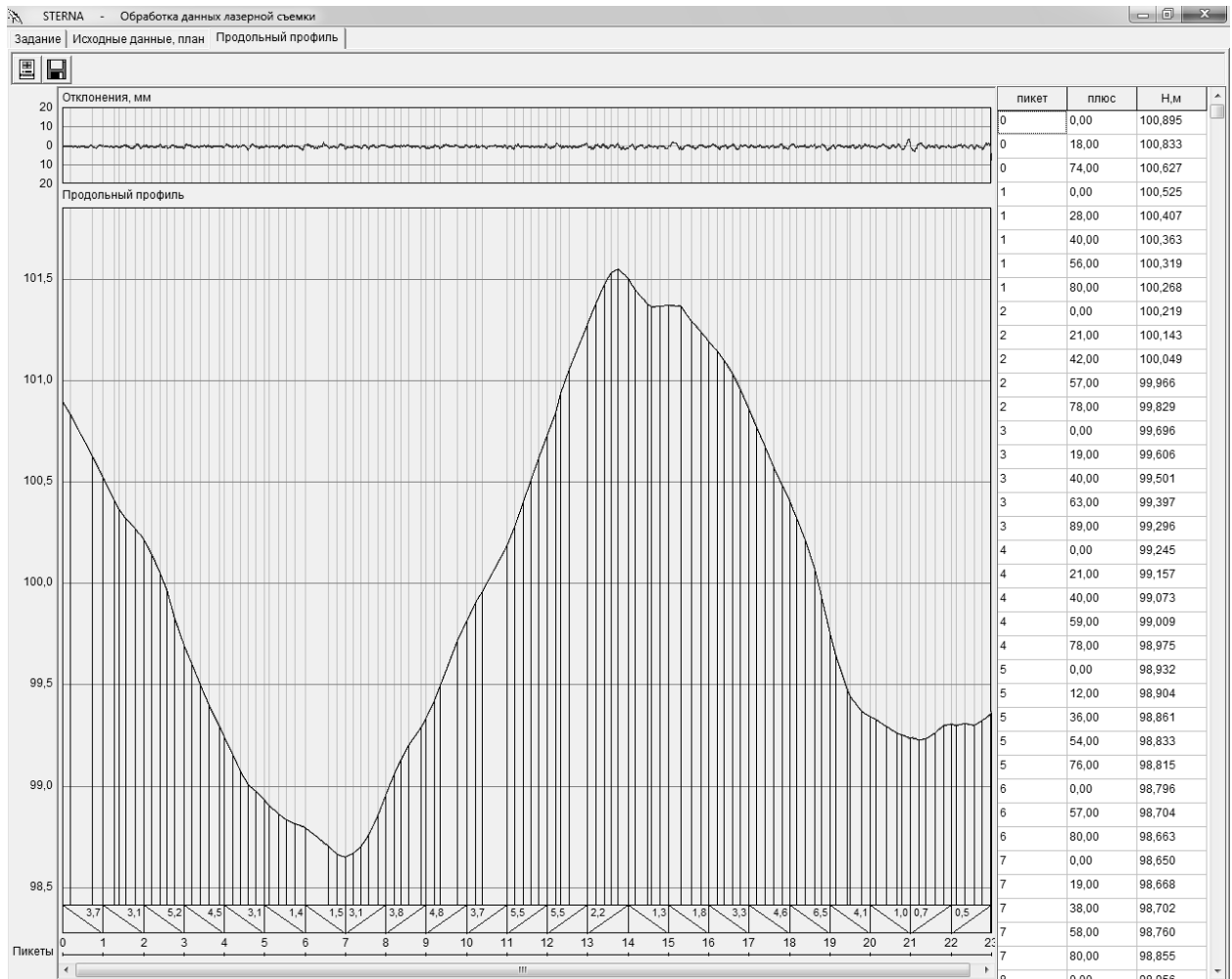


Рисунок 45 – Спрявление профиля в программе **Sterna**

Для выбранного участка исходные данные получены с использованием тележки *Amberg* [21], средствами МЛС.

В результате работы алгоритма пространственная математическая модель трассы существующей железнодорожной линии представляет

сплайн:

$M = (S, P, I)$, где

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

$P = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_N)$ – кривизна элементов сплайна;

$I = (i_1, i_2, i_3, \dots, i_N)$ – продольные уклоны элементов сплайна;

$j = 1, 2, 3, \dots, N$;

N – число элементов сплайна.

Продольный уклон и кривизна в пределах каждого элемента сплайна постоянны. Между опорными точками интерполяция отметок осуществляется по линейному закону. Для привязки к проектной системе координат задаются: геодезические координаты первой точки, X_1 , Y_1 , H_1 , и начальный дирекционный угол.

Продольный профиль существующей линии спрямляется не только для определения уклонов и длин элементов профиля, но и для уточнения границ и числа элементов сплайна, так как перелом профиля, в общем случае, может не совпадать с границей элементов сплайна, полученных при обработке данных по плану линии. В этом случае в точке перелома профиля образуется дополнительная граница сплайна, соединяющая два элемента однообразной крутизны в профиле и однообразной кривизны в плане.

2.7 Выводы по второй главе

В ходе исследования были разработаны методы обработки исходных данных: определены способы упорядочивания входной информации, поиска и удаления ложных и ошибочных точек.

Единая модель трассы железнодорожного пути, используемая на всех этапах жизненного цикла линии была признана оптимальной. Пространственный характер этой модели предполагается учитывать за счет внесения уточнений в термины классической теории проектирования железных дорог.

Изложены теоретические основы, методика и технология создания аппроксимационных моделей, применяемых для проектирования реконструкции плана трассы железнодорожного пути. Аппроксимационные модели обеспечивают сглаживание аппаратных погрешностей геодезических измерений при использовании таких методов съемки как лазерное сканирование, спутниковое зондирование и видеопаспортизация.

В качестве типа сплайна предлагается использовать отрезки круговых кривых, поскольку установлены их преимущества по сравнению с другими типами, моделирование очертания трассы пути с помощью таких сплайнов определено как наиболее правдоподобное.

Моделирование продольного профиля железнодорожной линии предлагается осуществлять доработанным методом «спрямления с возвратами».

Разработаны алгоритмы, описывающие методику, и частично (на уровне концепта) программно реализованы.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ДЛЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СЪЁМКИ

3.1 Проблемы исходных данных

Как и у любой, находящейся на стадии становления технологии, у лазерного сканирования есть ряд недостатков, однако, его высокий потенциал очевиден. Преимущества и недостатки разновидностей ЛС сведены в таблицы 1 и 2. Оптимизировать метод можно путем нейтрализации его недостатков.

Таблица 1 - Преимущества мобильного лазерного сканирования перед традиционной тахеометрической съемкой

| Преимущества | Недостатки |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • скорость сбора исходных данных; • мгновенная трехмерная визуализация; • информативность результатов; • безопасность при съемке труднодоступных и опасных мест; • точность. | <ul style="list-style-type: none"> • дороговизна метода; • трудоемкость обработки результатов ЛС. |

Таблица 2 - Преимущества мобильного лазерного сканирования перед воздушным лазерным сканированием

| Преимущества | Недостатки |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • детальность облаков ТЛО | <ul style="list-style-type: none"> • снижение точности за счет затенения сигналов спутника |

Снизить дороговизну возможно, увеличив объемы работ, выполняемых одной установкой лазерного сканирования, либо, применяя высокопроизводительные лазерные сканеры.

Снизить трудоемкость обработки результатов лазерного сканирования представляется возможным за счет создания специализированного программного модуля, снижающего необходимость человеческого вмешательства в процесс создания ЦМР: из огромного количества точек, принадлежащих земной поверхности, модуль создает укрупненную выборку достаточных точек и генерирует по ним цифровую модель.

Ликвидировать затенение сигналов спутника на данный момент не представляется возможным.

При традиционной геодезической съемке обычными тахеометрами проблемы связаны с выделением конкретных объектов (для этого используется семантика - коды точек) и распознаванием последовательности точек линейных объектов (в исходном облаке точек их последовательность может быть нарушена). Эти проблемы были успешно решены в программе **Slavia**, которая в модифицированном виде вошла в состав САПР КРП [16], типового решения ОАО Росжелдорпроект, (**KapremSurvey** или Капрем Съемка), а также в **GeoniCS** ЖЕЛДОР (**GeoniCS** Съемка) [15].

Методы, используемые для решения данных проблем, описаны в главе 2, п.2.1.

При лазерной съемке (см. глава 1, п.1.3.2) одной из проблем является большая мощность облака точек (сотни миллионов и миллиарды точек), не несущих семантической информации. В этом случае, выделение в данном облаке, например, точек, определяющих положение оси пути, само по себе представляет собой самостоятельную задачу, решаемую с использованием специализированных программных средств.

Обработка результатов мобильного лазерного сканирования

Обработка результатов МЛС для дальнейшей их передачи в проектный отдел – задача, требующая значительных временных и трудовых затрат. Первым шагом обработки результатов МЛС для проектирования железных дорог является назначение осей путей. В

современном программном обеспечении для обработки результатов сканирования может наличествовать функционал, позволяющий распознать конфигурацию рельса (рисунок 46) и векторизовать рельсовую нить в уровне верха головки рельса (рисунок 47).

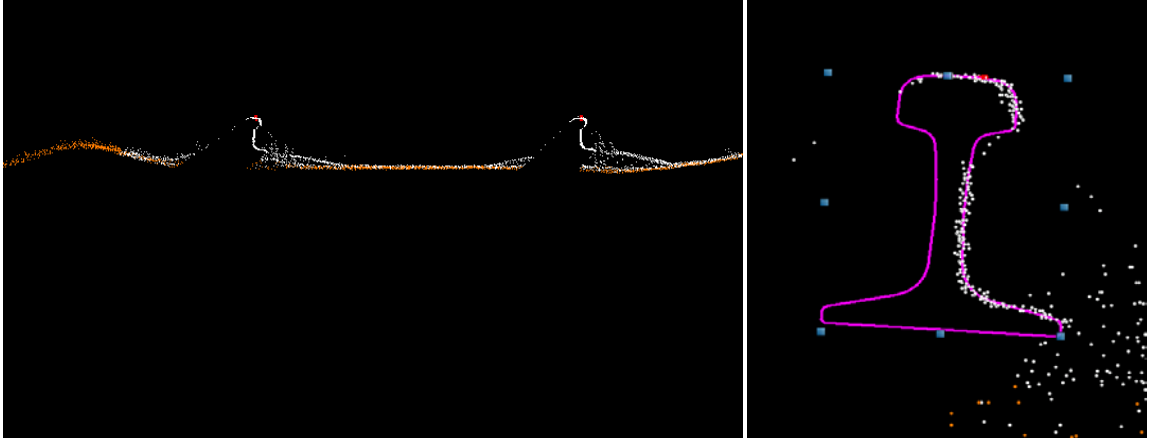


Рисунок 46 – Распознавание конфигурации рельса в сечении

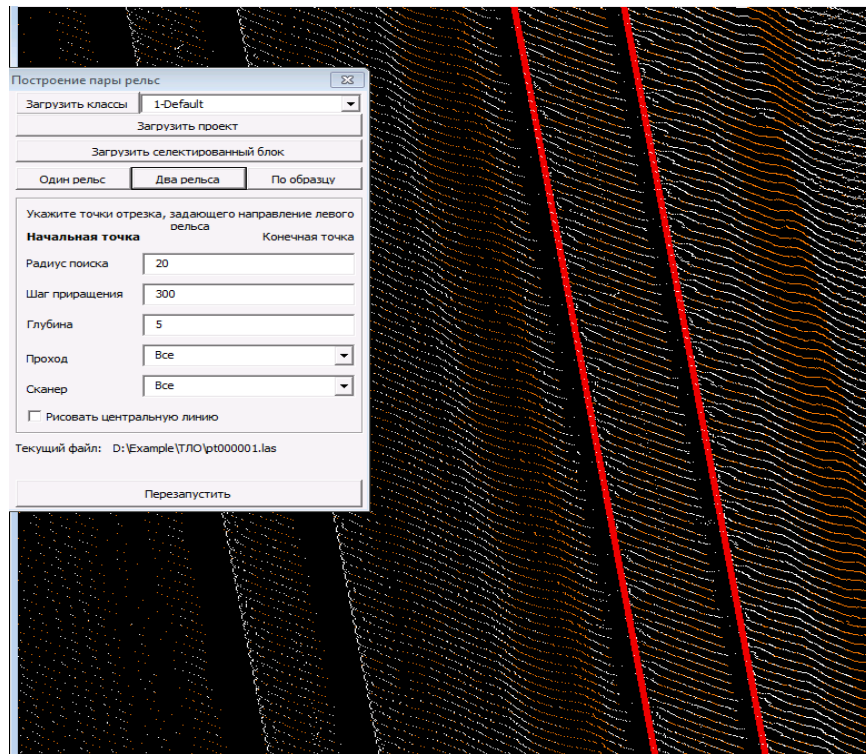


Рисунок 47 – Векторизация рельсовых нитей

Сместив рельсовые нити внутрь на половину величины колеи, получают пространственное положение оси железнодорожного пути, тем самым план и продольный профиль существующей линии в уровне существующей головки рельса.

Вторым необходимым компонентом проектирования железных дорог является цифровая модель рельефа (ЦМР). Для создания ЦМР достаточно выделить из массива результатов лазерного сканирования точки, принадлежащие земной поверхности и сгенерировать любую доступную ЦМР, например, триангулятивную. С ее помощью поперечные профили, а также продольные профили по отметкам земли и бровки земляного полотна создаются в автоматическом режиме.

Программное обеспечение позволяет выполнять заливку облаков точек по высоте (рисунок 48), такой режим отображения облаков ТЛО более нагляден, облегчает восприятие картины обработчиком. Кроме того, в случае использования сканеров, оснащенных камерами, множество точек пространства можно совместить с ортофотопланами.

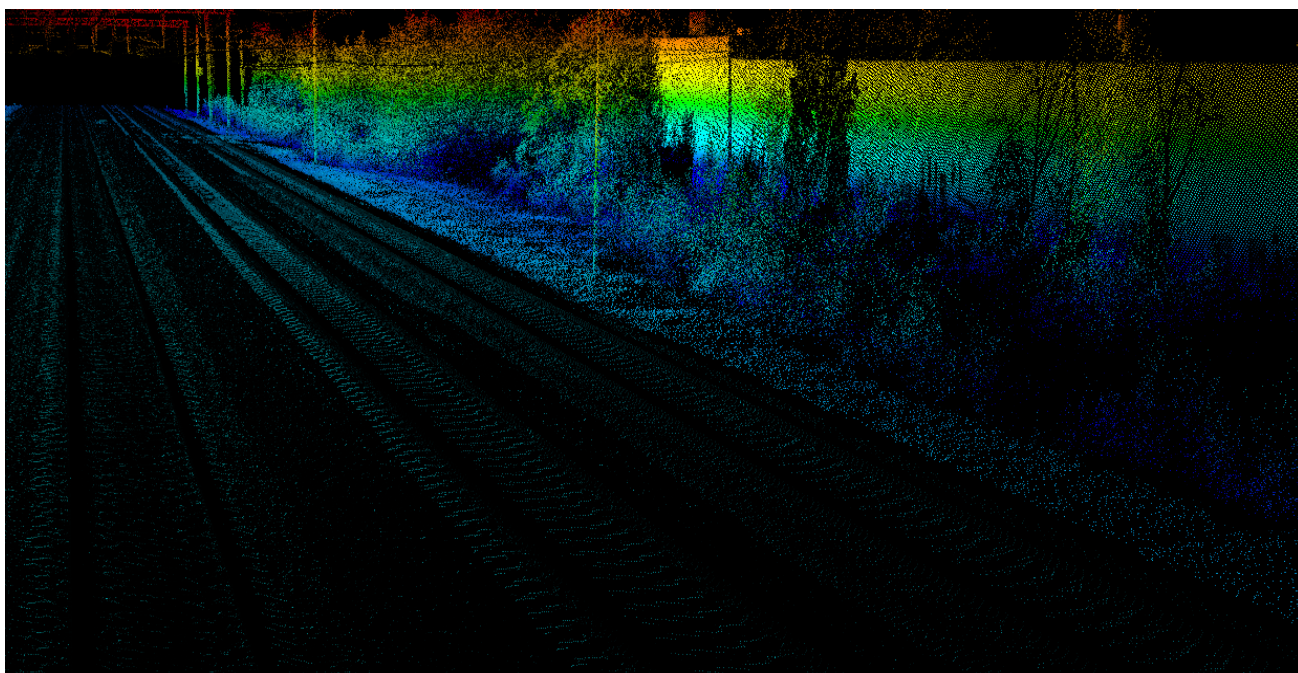


Рисунок 48 – Режим отображения ТЛО «Заливка по высоте»

Данные, полученные посредством МЛС, обладают высшей степенью информативности: есть возможность отображения на созданном в автоматическом режиме поперечном профиле всех ТЛО, принадлежащих секущей плоскости (рисунок 49), что поможет при определении габаритов, границ площадных объектов (болот, лесов, лугов).

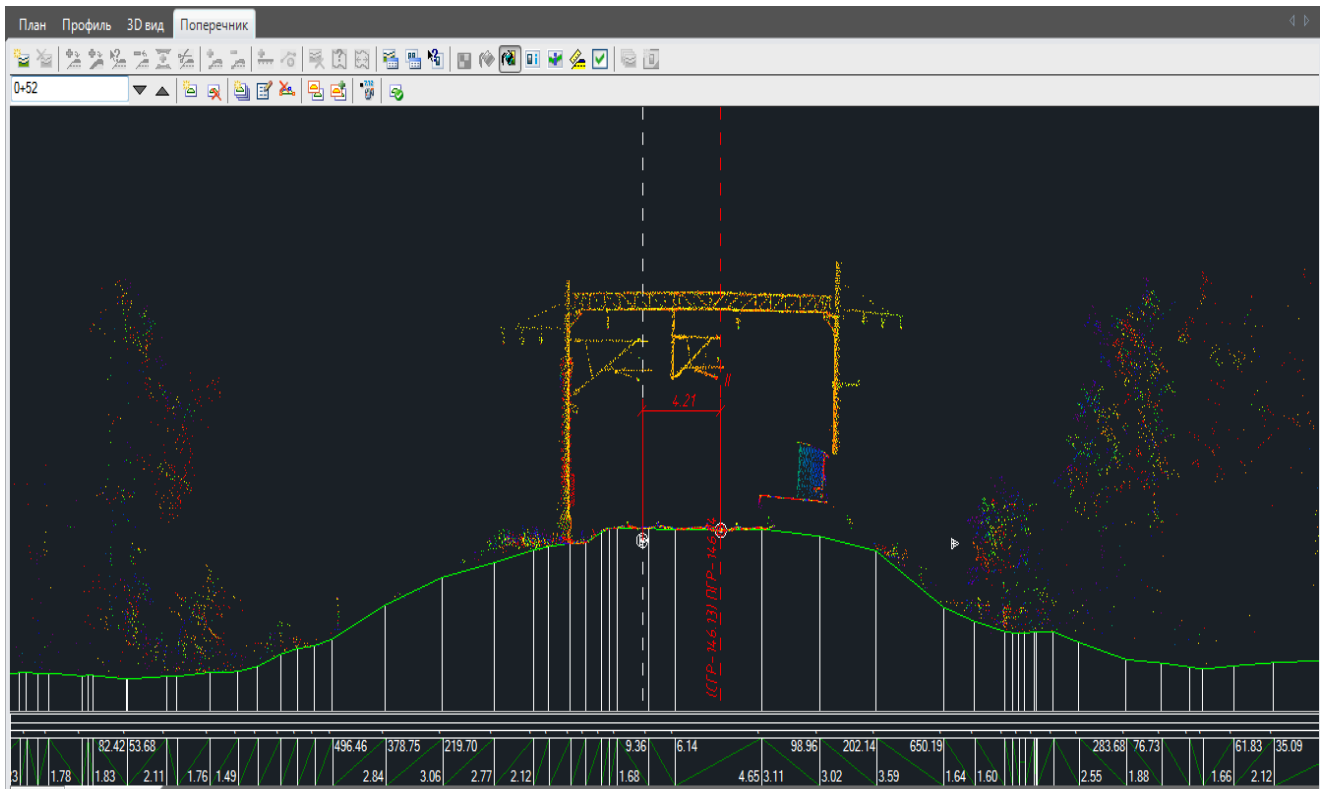


Рисунок 49 – Отображение ТЛО и ЦМР на поперечном профиле

При обработке массива ТЛО также можно назначить семантику: сделать выборку характерных точек объектов, присвоив им определенные коды. Например, распознав визуально в облаке ТЛО опоры контактной сети (рисунок 50), необходимо выбрать и построить такое поперечное сечение массива, в которое попадут характерные точки этих опор, другими словами, те точки, которые отмечаются вешкой при традиционной тахеометрической съемке и в полученном поперечном сечении назначить закодированную точку опоры контактной сети (рисунок 51). В случае назначения семантических кодов габариты и границы площадных объектов сгенерируются в автоматическом режиме. Выбор того или иного варианта развития событий продиктован потребностью объемов выходных данных. Процесс назначения кодов характерным точкам объектов очень трудоемкий и трудозатратный.

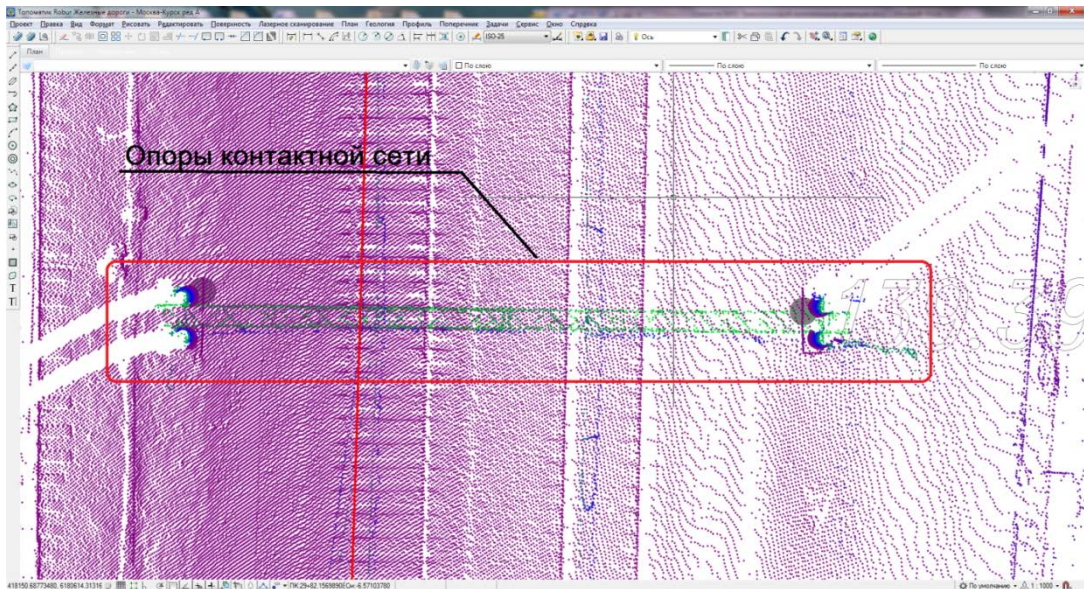


Рисунок 50 – Выбор сечения из облака ТЛО

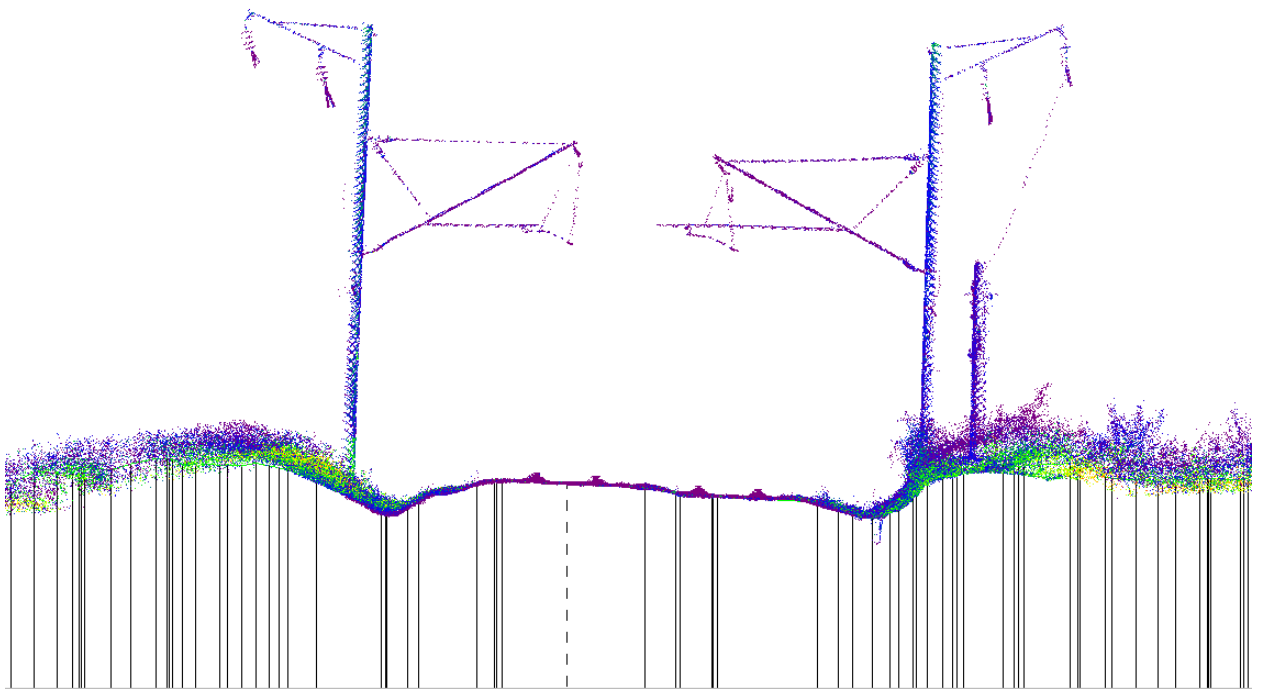


Рисунок 51 – Поперечное сечение массива ТЛО

Во многих современных системах автоматизированного проектирования кодирование точек позволяет предусмотреть соблюдение габаритов в автоматическом режиме. Прокладывая новое положение оси реконструируемого пути, проектировщик будет видеть предупреждения, появляющиеся при несоблюдении установленного габарита (рисунок 52).

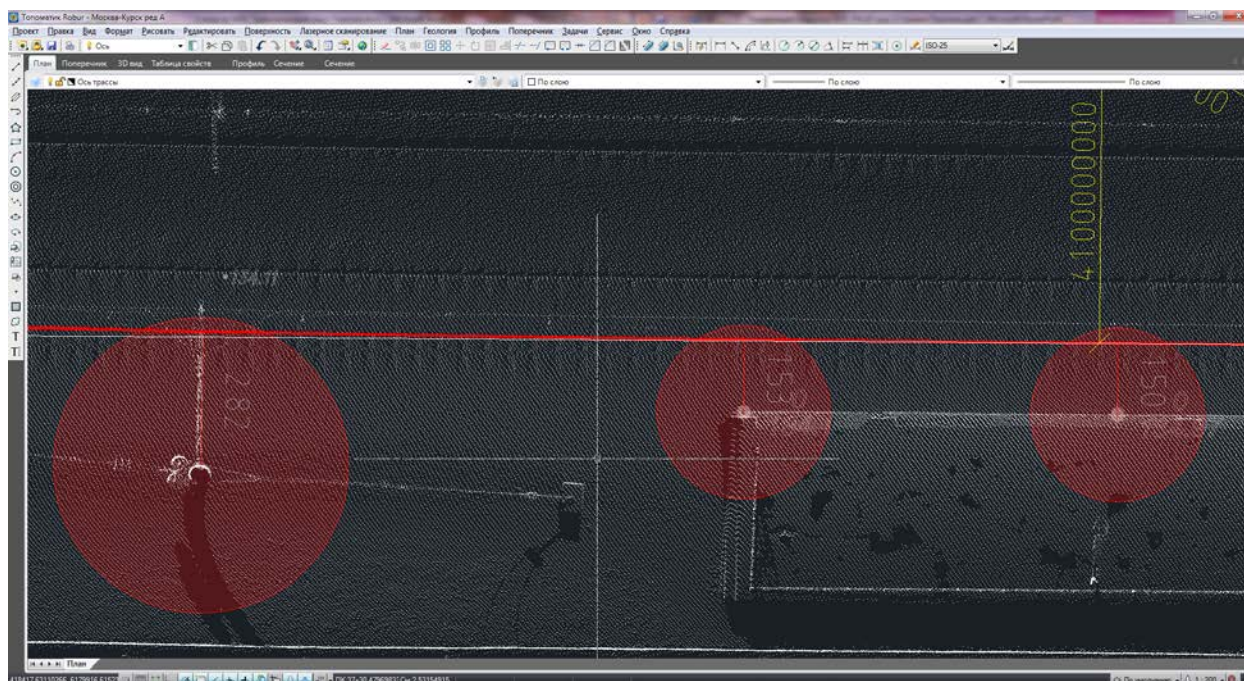


Рисунок 52 – Предупреждения о несоблюдении габаритного расстояния

При использовании измерительных тележек и роботизированных тахеометров для геодезической съемки непременно возникают проблемы, связанные с потерей видимости роботом-тахеометром отражателя, препятствием может служить любой элемент путевого обустройства, например, опора контактной сети. При потере отражателя из виду тахеометр начинает искать его, создавая при этом ложные точки (рисунок 53), при этом истинные и нужные точки остаются неучтенными – образуются пропуски в исходных данных съёмки. Анализируя опыт таких съемок, удалось установить максимальную длину таких пропусков – 5,5м (средний шаг съёмки точек – 0,1м). Наличие пропусков исходных данных практически не снижает точность координирования оси пути, однако, должно приниматься во внимание.

При остановке тележки также возникает облако ложных, практически дублирующихся точек. В данном случае такие точки должны быть исключены из исходных данных, алгоритмы распознавания последовательности точек описаны в главе 2, п.2.1. Решается установленная проблема в рамках разработанного метода благодаря использованию аппроксимационной модели трассы пути (глава 1, п.1.1.2).

Положение ложных точек резко отличается от положения линии оси пути, полученного в результате регрессивного анализа (МНК).

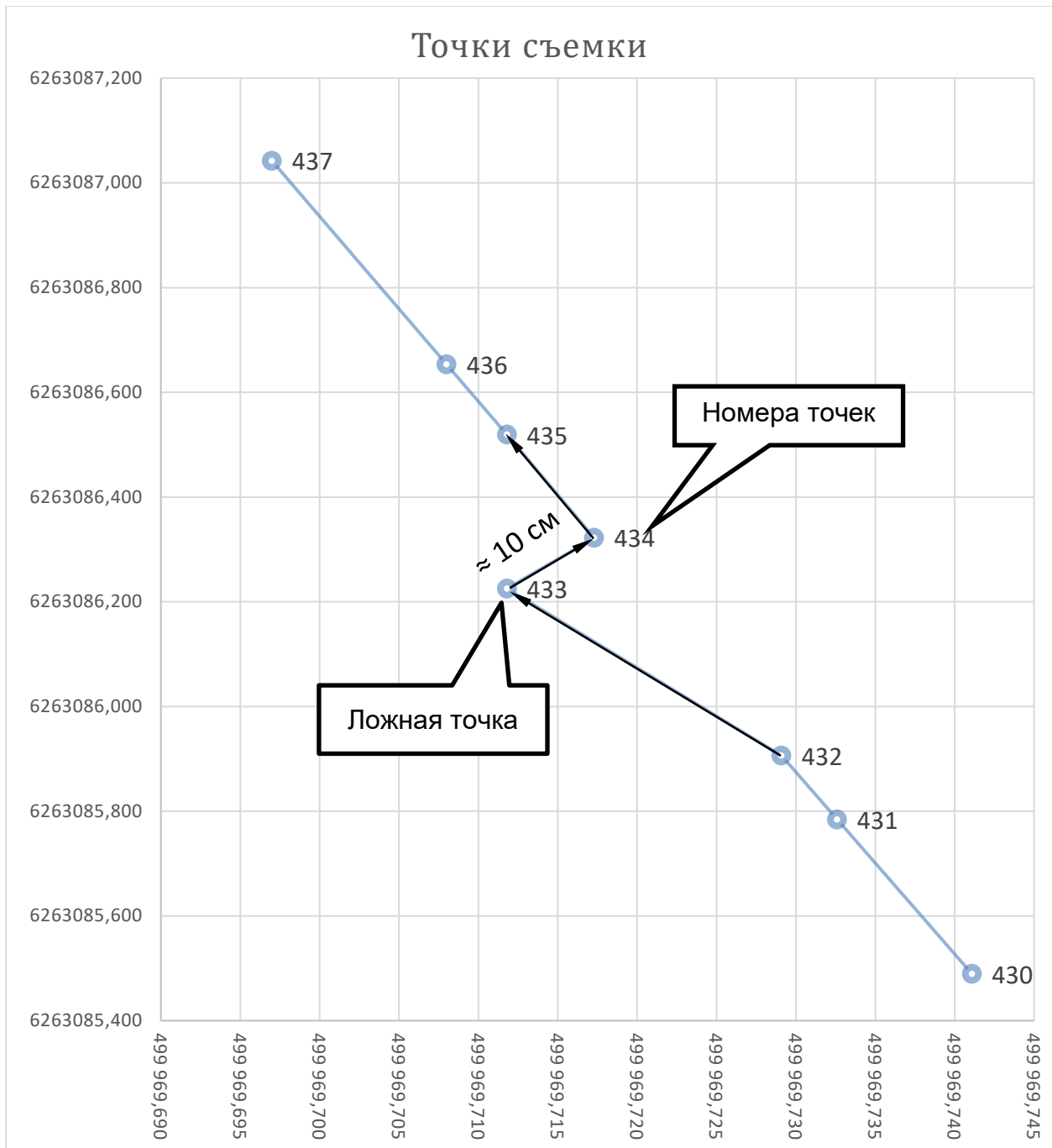


Рисунок 53 - Последовательность точек съёмки тележкой Amberg, точка с номером 433– ложная

Помимо вышеупомянутых проблем исходных данных именно съёмки посредством лазерного сканирования следует отметить также искажение исходных данных и появления в результате ошибочных точек. Примером такого искажения может служить солнечный блик на рельсе или помеха/ограничение видимости, которые помешают сканеру зафиксировать

часть точек очертания рельса. Неполные данные о конфигурации сечения рельса с большой вероятностью приведут к ошибочным значениям координат точки существующей головки рельса.

Существующие методы расчётов параметров кривых, как правило, используют в качестве модели плана модель в криволинейной системе координат, где осью абсцисс является ось пути. Расчёт осуществляется графоаналитически с помощью угловой диаграммы или графика кривизны (стрел). Переход от данных о положении точки съёмки в формате прямоугольной системы координат осуществляется с неотъемлемой погрешностью, которая тем не менее допустима, но лишь в том случае, если координаты точки истинны. Если же положение съёмочной точки окажется ошибочным или ложным (издержки методов лазерного сканирования), то погрешность может превысить нормируемое значение (рисунок 54).

Установленные проблемы решаются также за счёт использования аппроксимационной модели трассы пути – математического ожидания положения оси пути.

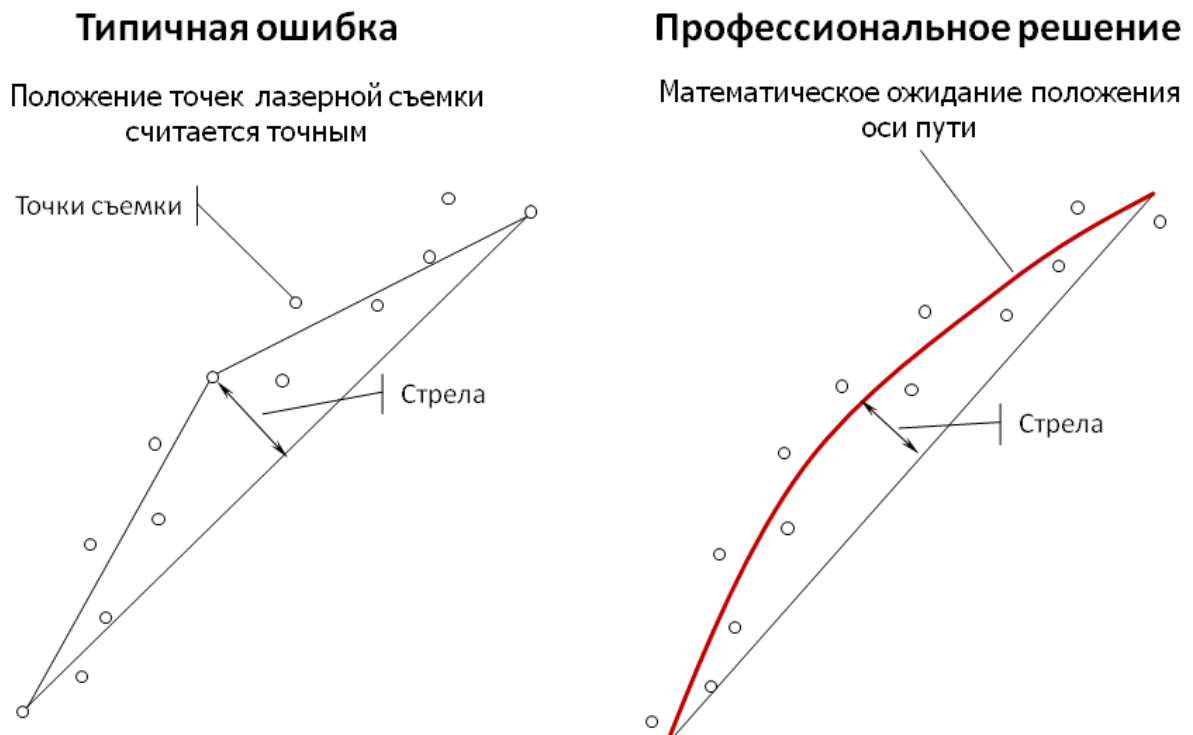


Рисунок 54 – Определение стрелы изгиба в произвольной точке съёмки

Рассматривая исходные данные, полученные с помощью тележки **Amberg** можно столкнуться с проблемой трактовки уширения колеи в кривых (рисунок 55). В случае, когда ось пути смещается на половину расстояния между головками правой и левой рельсовых нитей, получаем верное положение линии оси пути. В случае, если данные по одной нити отсутствуют, или линия оси пути получается смещением головки одной из рельсовых нитей на величину половины стандартной колеи, получаем неверное положение линии оси пути.

Положение трассы пути в кривых определяется посередине между правой и левой нитью и в среднем по высоте (рисунок 55), в то время как нормы проектирования предписывают отметку оси пути в кривых принимать по **нижней** головке рельса. Применение аппроксимационной модели трассы пути поможет решить обозначенную проблему.

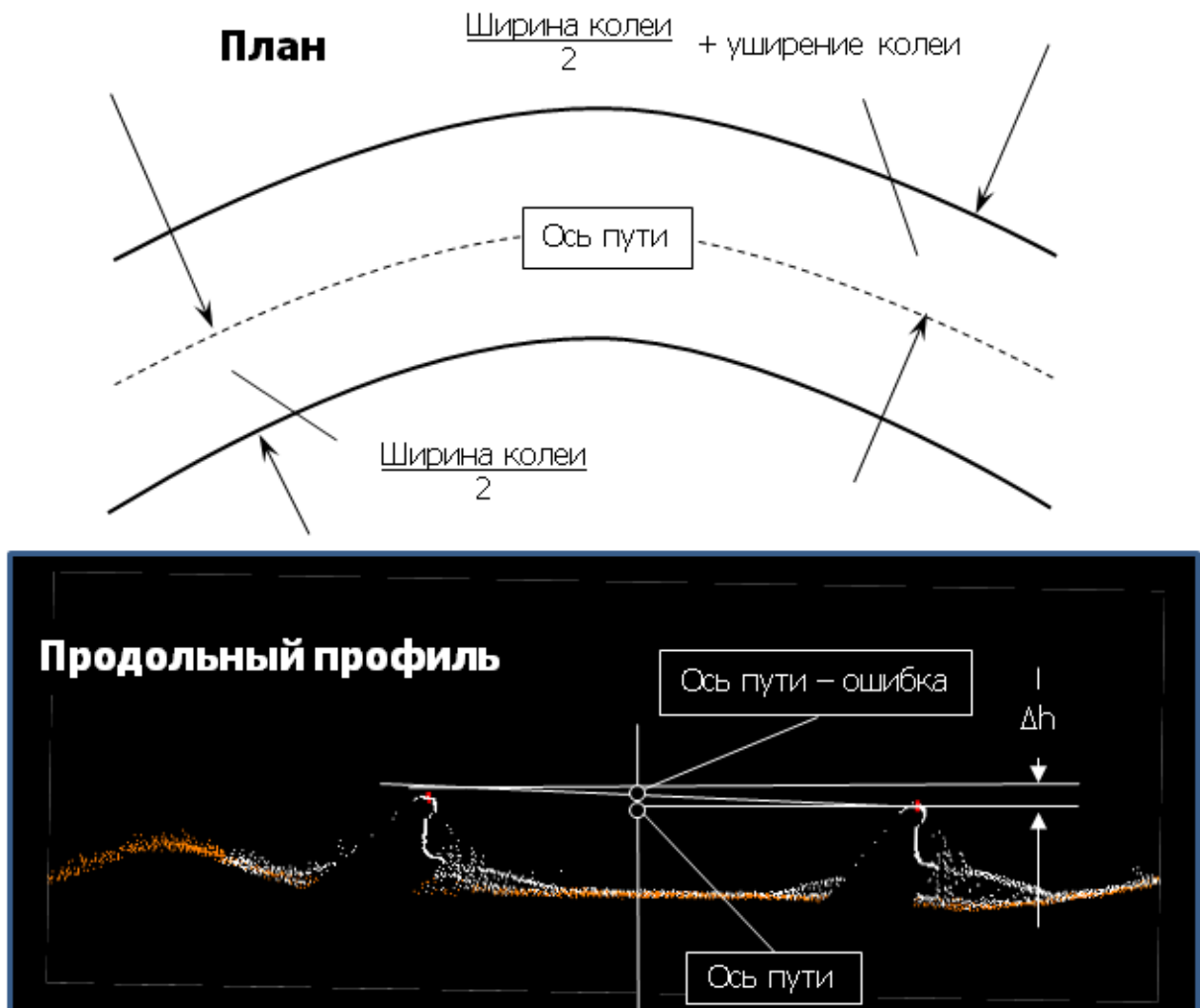


Рисунок 55 – Определение положения оси пути в кривых

3.2 Предобработка исходных данных для моделирования трассы железнодорожного пути

Исходные данные для **Sterna** представляют множество точек оси пути, каждая из которых задается тремя пространственными координатами. В привязке к пикетажу шаг точек в пикетаже составляет обычно от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров. Предобработка исходных данных заключается в обнаружении и удалении ложных и избыточных точек (см. п.3.1) – точек, расстояния от которых до ближайших менее половины среднего шага съемки, составляющего обычно 0,1 м. При вводе данных ведется протокол удаления ложных и избыточных точек, рисунок 56.

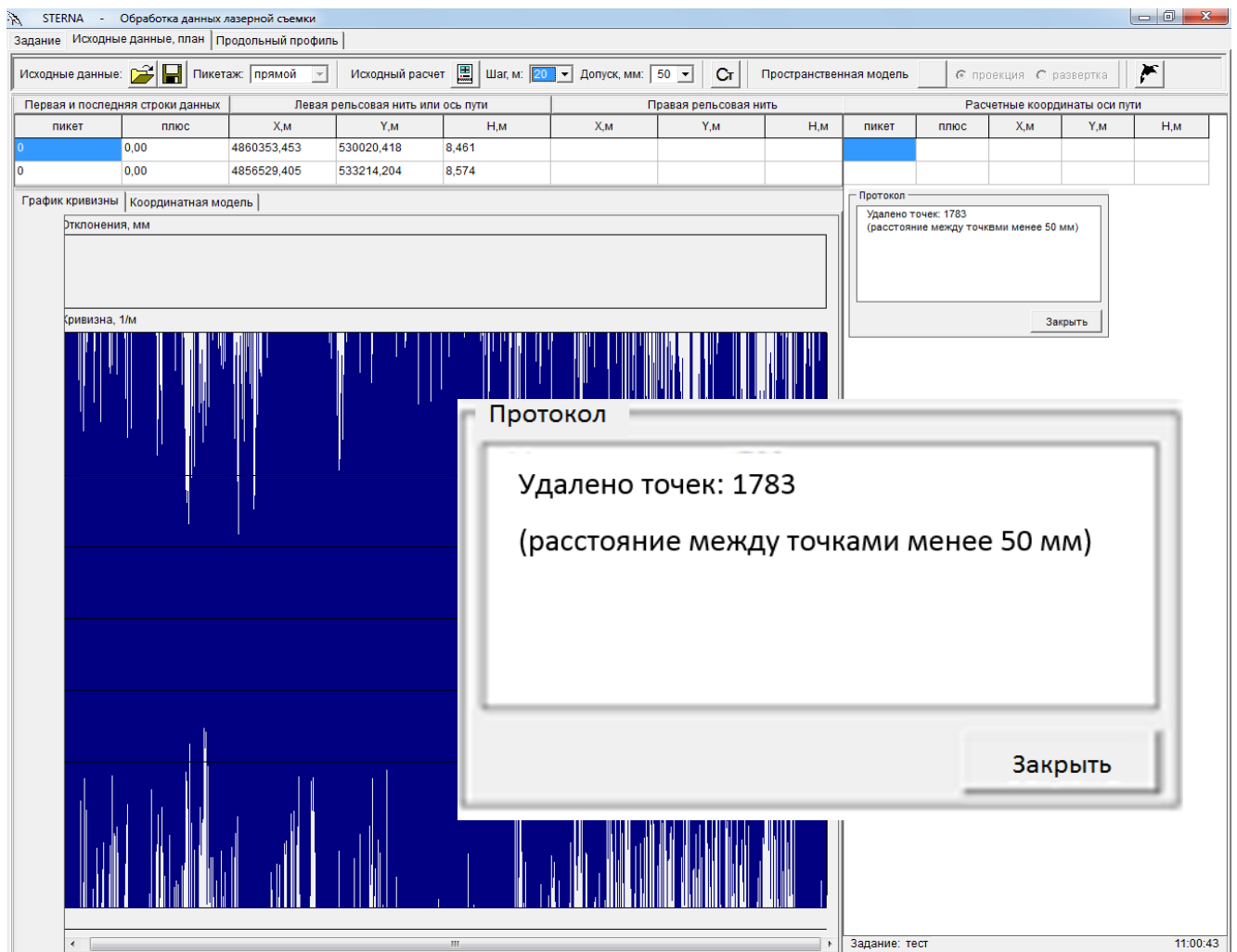


Рисунок 56 - Протокол ввода и контроля исходных данных (**Amberg**), длина участка 5.1 км, 40000 точек

Первостепенной задачей концепта **Sterna** является преобразование обширного количества трехмерных точек в удобную выборку опорных точек оси пути, другими словами, регуляризация и глобализация исходных данных.

Сначала ведется расчёт расстояний между точками съёмки, в первую очередь попарно, а затем нарастающим итогом. Последовательно выделяются участки регуляризации и точки, им принадлежащие, в соответствии с заданным интервалом расположения точек трассы железнодорожного пути. На каждом участке регуляризации массив данных аппроксимируется полиномом третьей степени. В **Sterna** аппроксимация осуществляется методом наименьших квадратов.

Считается, что опорные точки принадлежат этим полиномам. Начиная со второй группы точек, на стыках отрезков регуляризации опорным точкам присваиваются средние значения координат для парных полиномов, рисунок 57.



Рисунок 57 – Регуляризация исходных данных (предобработка)

3.3 Проектирование реконструкции железных дорог

Проектирование реконструкции плана железнодорожного пути – процесс, состоящий из двух этапов: распознавания структуры плана и оптимизации проектного решения. В ходе исследования были разработаны алгоритмы распознавания структуры плана, доработан метод спрямления с возвратами (глава 2, п.2.6) согласно исходным данным в виде модели пути

осуществлен переход от итерационной оценки вариантного решения к аналитической.

Структура плана - последовательность элементов плана по типам и длине. Распознавание структуры плана – выявление участков однообразной кривизны (прямых, круговых кривых), в результате которого формируется первое приближение управляемых переменных с целью получения оптимальных окончательных сдвигов. Полученное проектное решение должно удовлетворять всем ограничениям по сдвигам.

Распознавание структуры плана производится по графику стрел изгиба. В случае если исходными данными служат точки оси участка пути в координатах, необходимо осуществить переход и построить график стрел изгиба, так как его использование для распознавания структуры плана в настоящее время является наилучшим методом. Задача распознавания не только в минимизации количества участков однообразной кривизны, но и в максимальном приближении проектного решения к существующему очертанию плана трассы пути. Выявление мест изломов на прямых осуществляется посредством координатных моделей.

Полученные проектные сдвиги оптимизируются, затем выполняется оптимизация структуры плана путем последовательного попарного объединения смежных участков однообразной кривизны. Цикл оптимизационной процедуры состоит из череды типовых операций для каждой из пар смежных элементов на протяжении всего расчетного участка. Черода операций складывается из:

1. оптимизации проектных сдвигов для выбранной структуры плана;
2. проверка оптимизированных сдвигов на их допустимость;
3. сохранение лучшего по критерию варианта.

В том случае если в круге цикла появляется решение лучше исходного по критерию, оно запоминается как исходное, и цикл повторяется с меньшим числом элементов, в противном случае процедура завершается.

Первым шагом распознавания структуры плана является формирование исходного графика кривизны проектного пути из графика кривизны существующего пути – спрямление ломаной. Начальным и конечным элементом результирующей ломаной являются прямые, промежуточные элементы представляют собой строгое чередование наклонных (переходные кривые) и горизонтальных участков (круговые кривые и прямые). Аппроксимация для формирования исходного для расчёта графика кривизны может осуществляться любым из двух известных методов. Первый заключается в укладке элемента минимальной, с точки зрения норм проектирования длины, оптимизация его положения методом наименьших квадратов и в случае ненарушения допустимости сдвигов постепенное увеличение его длины до максимальной. Второй подразумевает укладку элемента однообразной кривизны максимальной длины, с точки зрения допускаемых сдвигов, и дальнейшие вариации сопряжения таких элементов переходными кривыми.

Полоса аппроксимации дифференцирована: ее ширина изменяется в зависимости от кривизны предшествующего участка. Если предшествующим участком является прямая, то полоса аппроксимации устанавливается узкой для распознавания кривых участков больших радиусов; если же предшествующий участок – кривая, то полоса аппроксимации устанавливается шире для исключения излишнего дробления круговой кривой на участки разного радиуса. Тем не менее полоса аппроксимации является узкой и полученная однорадиусная кривая может являться результатом оптимизации кривой с изначально большим числом элементов.

Типовую операцию процесса распознавания структуры планы схематично иллюстрирует рисунок 58. Она заключается в оптимизации положения границы смежных элементов ломаной. Укладывается i -ый элемент плана максимальной длины в некотором коридоре отклонений по кривизне, затем аналогично $i+1$ -ый элемент максимальной длины, после

чего методом наименьших квадратов производится оптимизация положения этих элементов по отношению к существующему и устанавливается оптимальное положение i -ой границы между отрезками ломаной (элементами плана).

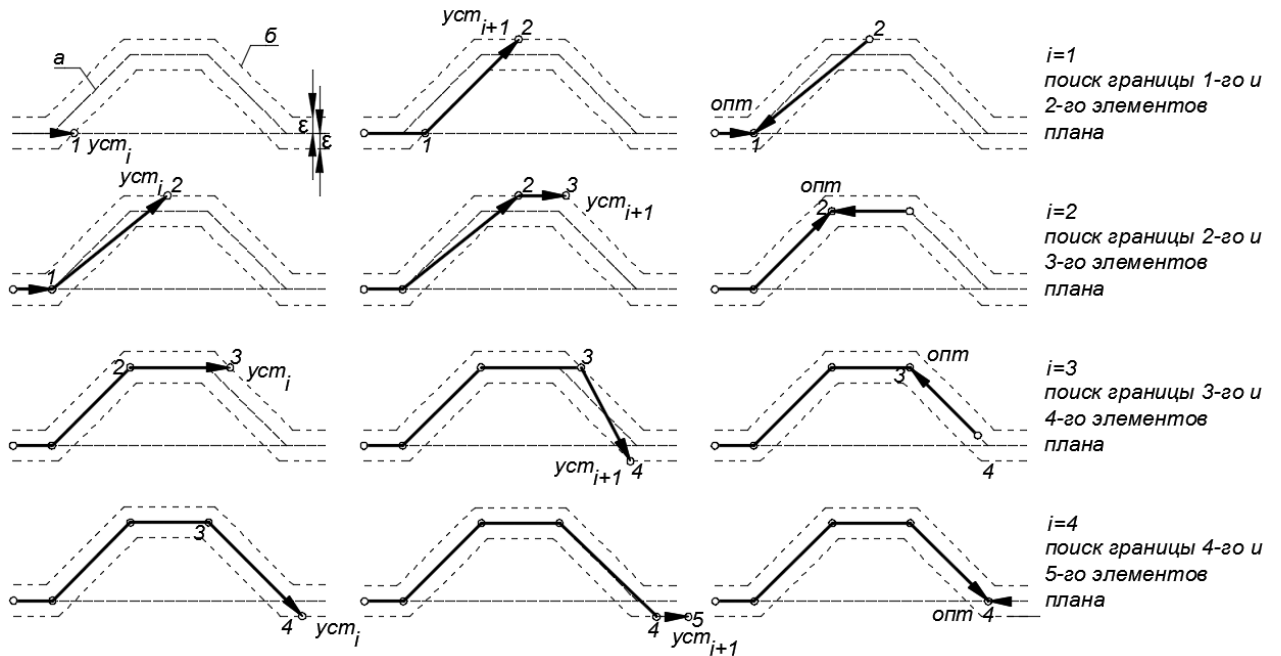


Рисунок 58 – Распознавание структуры плана: а - график кривизны существующего участка пути; б - граница допустимой области по кривизне; ε - допуск на отклонения по кривизне; уст - установка границы элемента плана; опт - оптимизация положения границы между элементами плана

Оптимизация полученного графика сдвигов осуществляется за счет изменения длины его элементов. Изменение длины одного из отрезков ломаной возможно путём смещения одной или каждой из его границ на некоторую величину $\pm\delta$. Вариантов такого смещения границ 8. Один из вариантов, при котором обе границы смещаются на величину $+\delta$ показан на рисунке 59. Производя последовательно оптимизацию положения каждого из отрезков ломаной, затронутых каждым из вариантов смещением границ, можно выделить наилучший по критерию вариант.

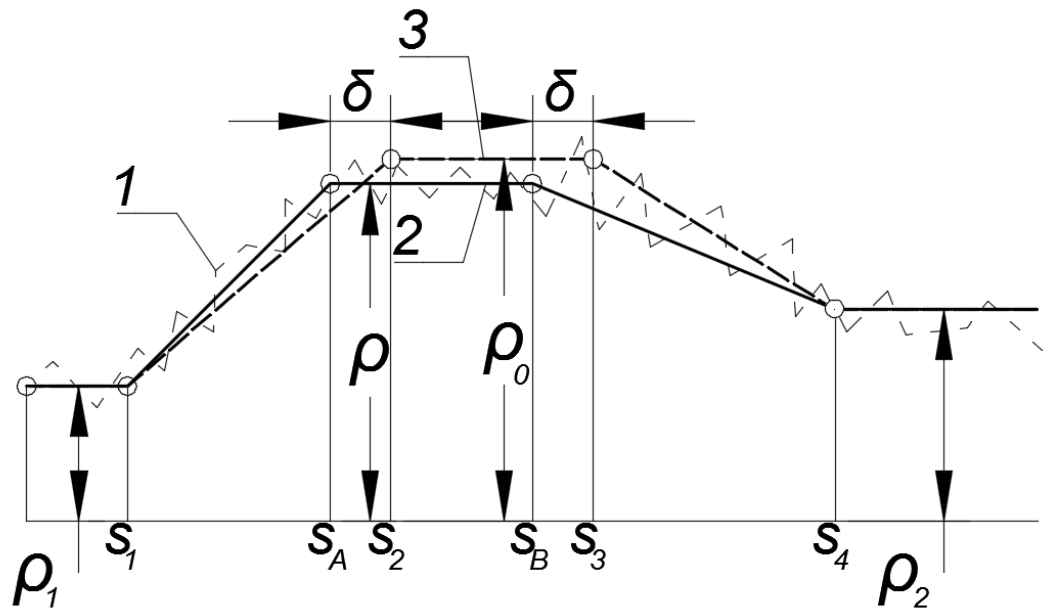


Рисунок 59 – Расчётная схема оптимизации путем смещения границ элементов: 1 – график кривизны существующего пути; 2 – исходный график кривизны проектного пути; 3 – вариантный график кривизны.

Характеристика элемента ρ – кривизна определяется методом наименьших квадратов.

После такой оптимизации осуществляется сглаживание графика проектной кривизны путём уменьшения числа участков много радиусных кривых за счет ликвидации участков малого протяжения или объединения их с соседними.

Рассмотренный метод был реализован программно в концепте **Orca** (рисунок 60), наглядное изображение результатов позволяет убедиться в правильности работы метода. Распознанная структура плана представляется собой совмещенный график существующих и проектных стрел.

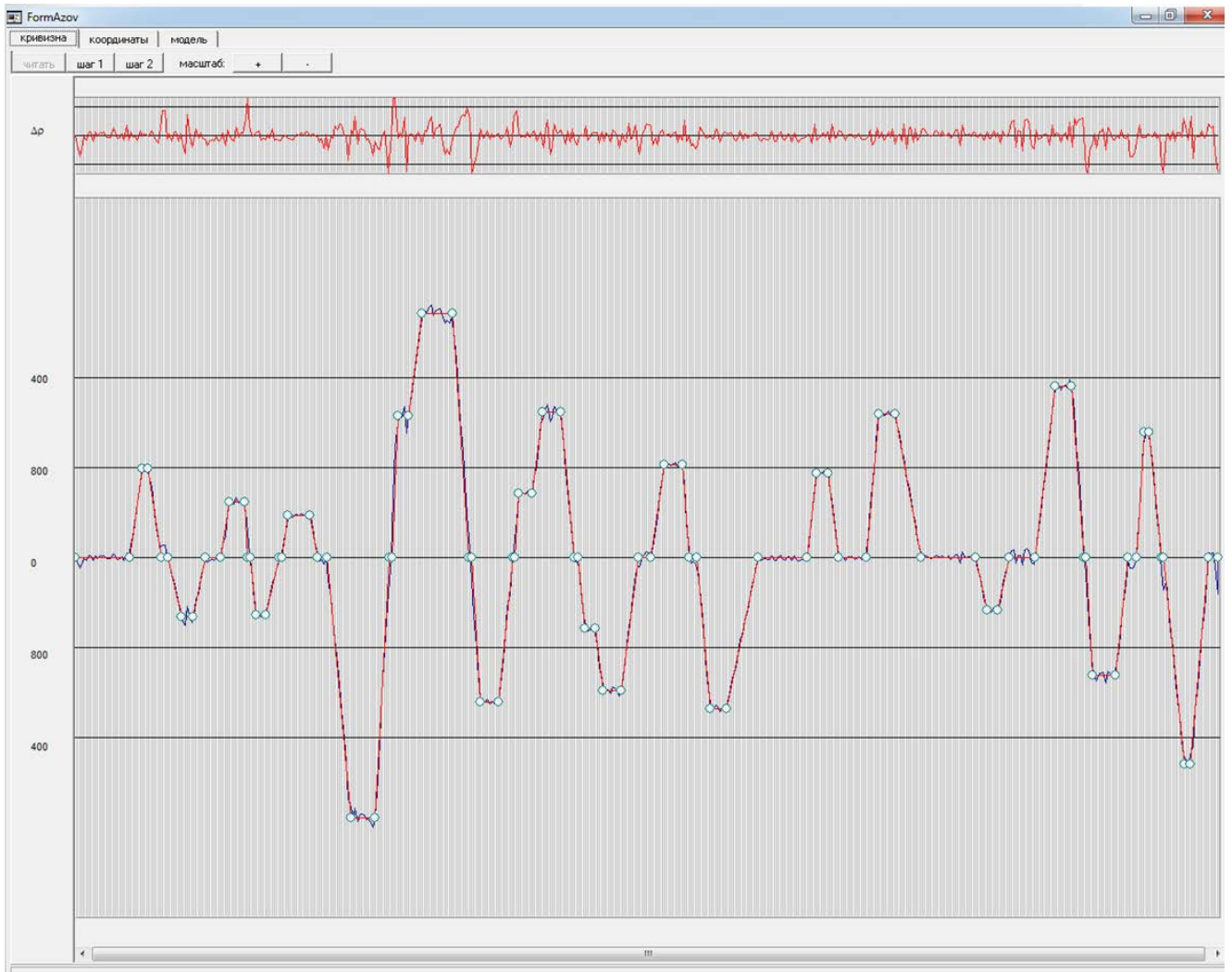


Рисунок 60 - Распознавание структуры плана в концепте Orca

Дальнейшие исследования предполагают разработку алгоритмов оптимизации проектного решения, таким образом, с помощью концепта **Orca** станет возможным проектирование реконструкции плана трассы (рисунок 61). Функционал задач, решаемых с помощью **Orca** реализован за счёт применения координатной (**T**-модель) и координатно-параметрической (**R**-модель) моделей плана, описанных в главе 1, п.1.1.4.



Рисунок 61 – Реконструкция плана трассы железнодорожного пути в концепте Orca

3.4 Регуляризация модели трассы пути

Обширное количество точек исходных данных (~1000 точек/км), а также их хаотичность, превращает любую элементарную процедуру в вереницу громоздких и многоэтапных вычислений. Например, в рамках контроля ширины междупутий или определения габаритов осуществляется решение типичных для процесса проектирования задач, таких как определение координат точки по ее аналитическому пикетажу и обратной. Простое определение координат точки трассы по известному пикетажному положению подразумевает первоначальный поиск порядкового номера одного из N участков трассы, на котором располагается искомая точка, с

целью определения закона, по которому изменяются координаты точек трассы на этом участке, для чего выполняется следующий ряд операций:

1. По пикетажным значениям вычисляется расстояние от начала первого участка до искомой точки; $L_{PK} = PK_x - PK_0$
2. Последовательно нарастающим итогом суммируется длина первого и последующих участков $L = \sum_{i=1}^{i+1} (L_i + L_{i+1})$ до тех пор, пока длина не превышает расстояние от начала первого участка до искомой точки $L \leq L_{PK}$;
3. Если выполняется равенство $L = L_{PK}$, то координаты точки x – координаты точки $i + 1$;
4. В противном случае точка x находится на $i + 1$ -ом участке
5. Координаты точки x определяются в соответствии с законом, по которому изменяется положение трассы на $i + 1$ -ом участке.

Использование регулярной модели трассы пути, под регулярностью понимается по аналогии с понятием регулярной цифровой модели рельефа [35] равенство шагов – расстояний, на котором расположены точки модели. В случае, когда для хранения информации о положении трассы используется регулярная выборка точек, достаточно лишь найти номер десяти-(двадцати-)метрового фрагмента, на котором располагается искомая точка, разделив расстояние от начала рассматриваемого участка на размер регулярного шага (**10 или 20м соответственно**). Номер фрагмента укажет на коэффициенты аппроксимируемого уравнения, таким образом, и на координаты искомой точки.

При решении обратной задачи (определение пикетажного положения точки по ее известным координатам) объём вычислений при использовании нерегулярной и регулярной моделей трассы соответственно пропорционален.

Таким образом, одним из преимуществ регулярных моделей является быстрое действие работающих с ними алгоритмов.

Другим преимуществом является наглядность представления выходных данных – точек трассы. Представление данных в виде чертежа – плана трассы - неоспоримо нагляднее табличного представления в виде массива координат точек. Отобразить на плане все существующие точки, во-первых, не представляется возможным физически. Во-вторых, отрисовка большого количества точек не только не способствует однозначному пониманию очертания плана трассы, но и также может привести к ошибочному представлению о положении оси пути (глава 3, п.3.1).

Следует отметить, что, несмотря на прогрессивное стремление к «безбумажным» технологиям, процесс перехода к такого вида технологиям в сфере проектирования железнодорожных линий на данный момент не близок к завершению. Поэтому представление результатов проектирования по-прежнему осуществляется в виде плана линии с указанием характерных точек. Классические подходы к проектированию подразумевают съемку точек с регулярным шагом как на кривых, так и на прямых участках и соответственно отображение их на плане из соображений наглядности, понятности и информативности. Учитывая, что на некоторых этапах проектирования уже осуществлен переход к «безбумажной» работе, информация обо всех имеющихся точках, может быть доступна пользователю (точки могут быть отображены на невидимых слоях, файл с координатами точек может прилагаться к проектной документации), но из вышеупомянутых соображений рациональнее пользоваться все же регулярной моделью. Обращение к исходным данным может осуществляться по необходимости.

Помимо наглядности преимуществом регулярной модели трассы является информативность. Располагая данными о координатах регулярных узлов трассы, можно с некоторой вероятностью судить о положении любой из точек трассы.

3.5 Выводы по третьей главе

Разработанные в ходе исследования алгоритмы для прикладного метода моделирования исходных данных лазерной съемки позволяют упорядочить эти точки, исключить ошибочные, ложные и избыточные точки.

Специфика исходных данных лазерной съёмки подразумевает наличие случайных, близких к истинному положению, точек, исходя из чего в качестве истинного положения точек модели, было решено принимать математическое ожидание положения точек.

Для решения первоочередной задачи реконструкции плана линии - распознавания структуры плана - решено использовать аналогичный разработанному для проектирования продольного профиля метод «спрямления с возвратами». Реализовать программно этот метод планируется в концепте ПК «**Orca**».

Из соображений быстродействия концепта «**Sterna**», а также информативности, наглядности и удобства проектирования разработанная модель трассы железнодорожной линии является регулярной и представляется в виде точек с регулярным шагом 10 или 20м.

4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Для демонстрации полученных результатов исследования и их практического применения были разработаны алгоритмы, реализованные в концепте **Sterna**. Концепт программного комплекса **Sterna** представляет собой демонстрационное программное воплощение разработанного концептуального решения, сочетающее и реализующее практически для отдельно взятой задачи теоретические основы и методы ее решения (рисунок 62). Демонстрационная форма позволяет сделать выводы о действенности и результативности разработанных в ходе исследования теоретических положений и методики их применения.

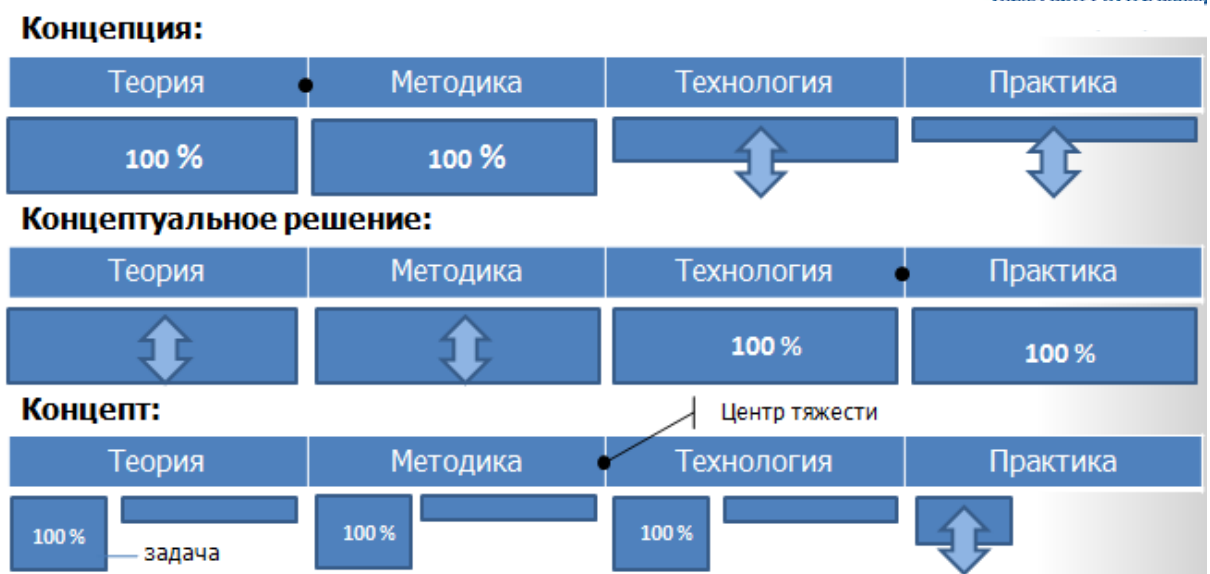


Рисунок 62 – Место концептуального решения среди теории, методики, технологии и практики

4.1 Описание концепта программного комплекса **Sterna**

Функциональная схема работы программного комплекса **Sterna** представлена на рисунке 63. Входная информация через блок импорта исходных данных поступает в блок преобразования данных в математическую модель, в котором удаляются ошибочные и ложные точки, после чего представляется статистика исходных данных; откорректированные данные в следующем блоке преобразуются в

окончательную математическую модель: представляются в виде точек модели с регулярным шагом и графически в виде плана и профиля. Блок экспорта результатов является внутренним, поскольку на сегодняшний день концепт рассматривается как самостоятельный продукт, а не в рамках интеграции с другими ПК.

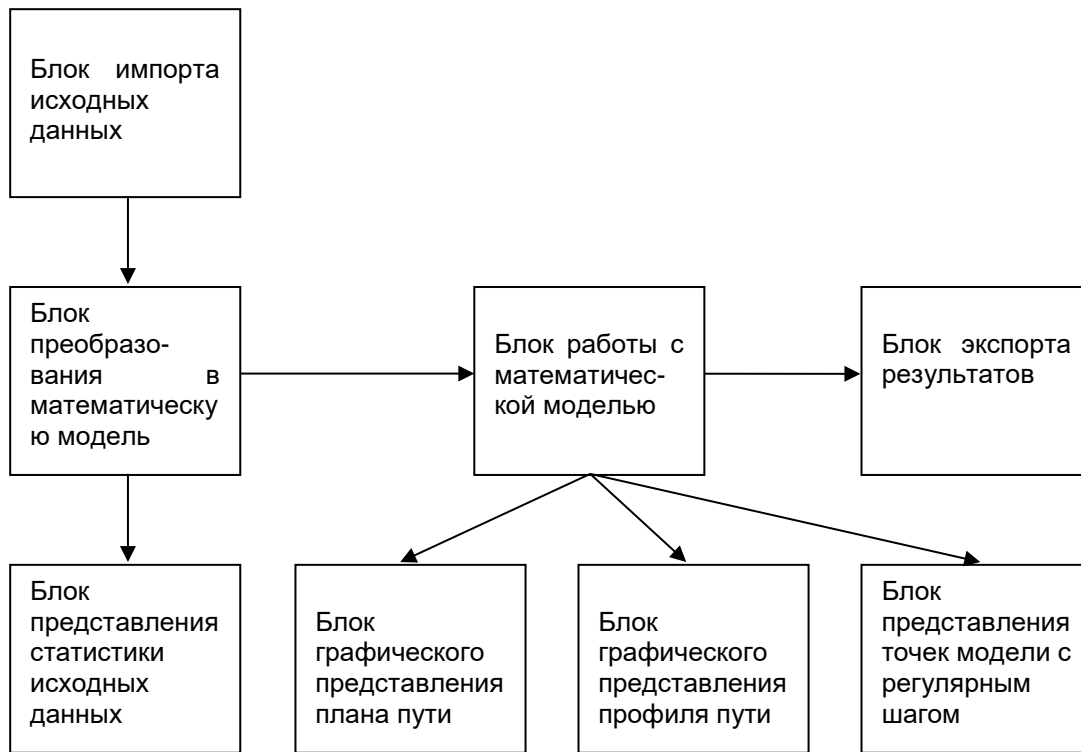


Рисунок 63 – Функциональная схема Sterna

Исходные данные для **Sterna** представляют множество точек оси пути, каждая из которых задается тремя пространственными координатами. Количество трехмерных точек, получаемых в результате съемки методом лазерного сканирования, очень велико и, как правило, избыточно. (При данном виде съемки расстояние между точками может составлять всего несколько сантиметров). Первостепенной задачей концепта **Sterna** является преобразование обширного количества трехмерных точек в удобную выборку опорных точек оси пути, другими словами, регуляризация и глобализация исходных данных.

Начинается работа со **Sterna** с импорта исходных данных – последовательности упорядоченных по пикетажу точек с тремя

пространственными координатами, определяющими положение трассы линейного сооружения (железнодорожного пути). Предшествующей данному этапу служит процедура выделения из облака точек лазерного отражения вышеупомянутых исходных данных (см. глава 3, п.п. 3.1, 3.2). Выполняется такая предобработка может, например, с помощью специализированного программного обеспечения, прилагающегося к лазерному сканеру. В случае получения исходных данных с помощью измерительных тележек (например, **Amberg**, см. глава 1, п.1.3.3) результаты съёмки импортируются в **Sterna** без дополнительных преобразований. При использовании исходных данных традиционной тахеометрической съёмки координаты точек оси пути могут быть выделены фильтрацией по принятым семантическим кодам.

После выбора пользователем желаемого интервала между точками в выборке: 10 или 20м (рис. 29) и допуска отклонений: 5, 10, 50 или 100мм (оптимальными можно считать 10м [30] и 10мм соответственно) формируется регулярная глобализованная выборка опорных точек.

Выходной информацией служит массив опорных точек с регулярным шагом 10 (20)м. Массив генерируется аппроксимацией результатов роботизированной съёмки полиномом третьей степени. Таким образом, опорные точки соответствуют полиному, но могут иметь расхождения с истинными данными съёмки. Причиной этому служит сглаживание, присущее аппроксимационным моделям (см. глава 1, п. 1.1.2).

При получении исходных данных посредством традиционной тахеометрической съёмки предпочтительнее применять для проектирования интерполяционные математические модели трассы железной дороги, а аппроксимационные модели использовать при работе с данными лазерной съёмки (см. глава 2, п.2.4).

Если рассматривать область задач, решаемую посредством **Sterna**, в рамках проектно-изыскательского комплекса работ (рисунок 64), то эта область охватывает следующий за съёмкой предшествующий

проектированию этап создания модели трассы железнодорожного пути с последующим графическим представлением модели плана.



Рисунок 64 – Схема проектно-изыскательского комплекса работ по реконструкции плана

4.2 Алгоритм разработанного метода

Представленная на рисунке 65 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 точек рельсовых нитей), либо сразу фильтруются с удалением ложных и ошибочных точек. Затем создается регуляризованная и глобализованная модель плана линии и математическая модель продольного профиля и окончательная пространственная модель трассы железнодорожного пути. Результаты моделирования представляются в виде табличного массива координат точек с выбранным регулярным шагом, схематичного изображения плана и профиля трассы пути.

Рисунок 65 – Блок-схема *Sterna*

4.3 Программная реализация

Работа с концептом программного комплекса *Sterna* начинается с выбора задания из существующих (вкладка «Задание» главной формы *Sterna*) или выбора в директории места размещения нового задания (рисунок 66). Вкладка «Исходные данные, план» (рисунок 66) содержит компоненты, позволяющие осуществить импорт данных в концепт ПК и выбрать желаемые характеристики результатов, а также наглядно изображает плановое положение модели трассы. Вкладка «Продольный профиль» (рисунок 66) содержит графическую интерпретацию профильного положения трассы пути.

При назначении нового задания требуется ввести его имя (рисунок 67), которое может, например, совпадать с именем перегона. При повторном обращении сохраненное задание отображается в списке заданий под выбранным именем.

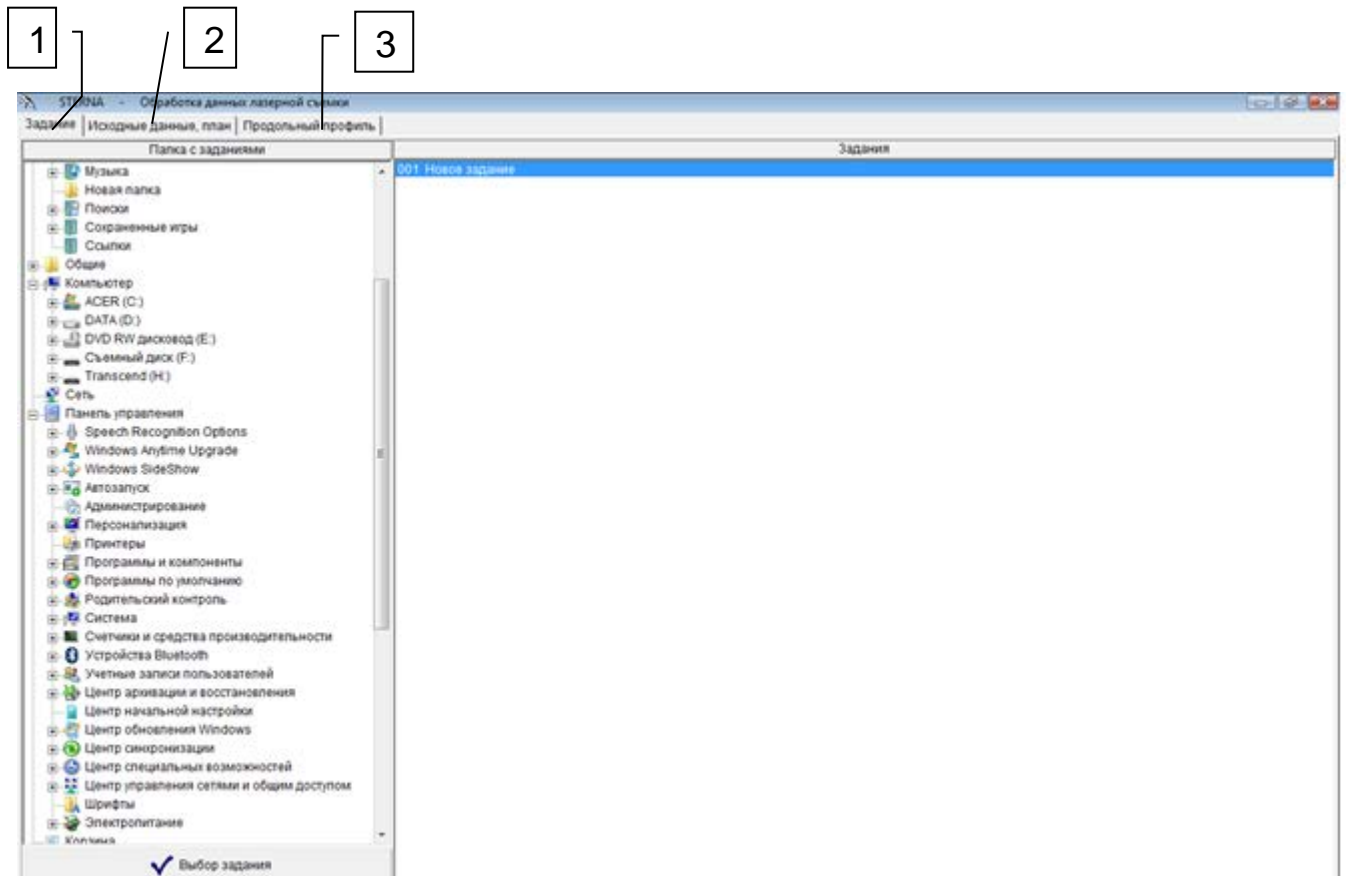


Рисунок 66 – Вкладка «Задание» главного окна **Sterna**

1 - Вкладка «Задание»;

2 - Вкладка «Исходные данные, план»;

3 – Вкладка «Продольный профиль».

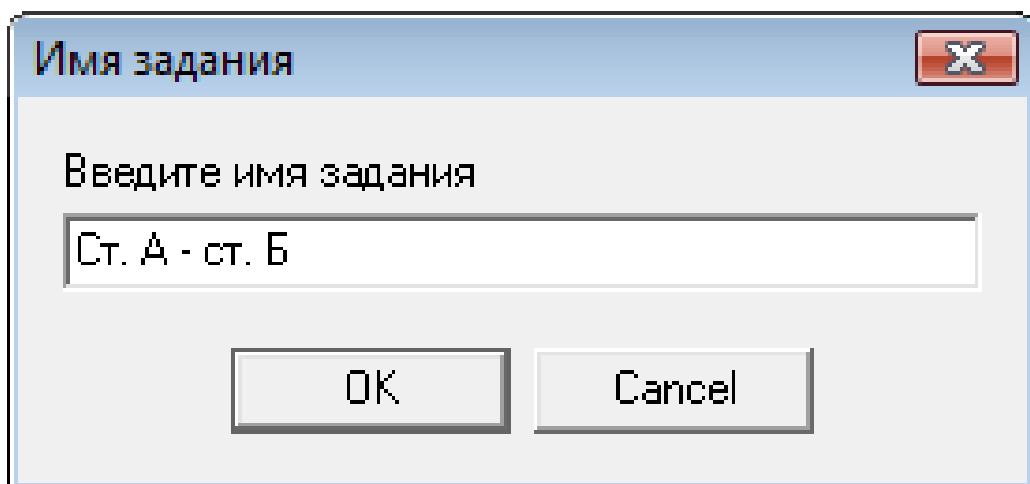


Рисунок 67 – Назначение имени задания

При выборе задания из списка существующих или создания нового задания пользователь автоматически переходит на вкладку «Исходные данные, план» (рисунок 68), которая содержит панель компонентов (рисунок

68 4 – 10, 15), панель вывода первой и последней строки исходных данных (рисунок 68, 11), панель вывода результатов (рисунок 68, 12) и поле вывода графической информации о плановом положении трассы, содержащее две вкладки: «График кривизны» (рисунок 68, 13) и «Координатная модель» (рисунок 68, 14). При вводе исходных данных о положении точек каждой рельсовой нити панель вывода первой и последней строки исходных данных заполнена полностью, если же вводятся точки оси пути, данные отображаются в колонке «Левая рельсовая нить или ось пути», соседняя колонка «Правая рельсовая нить» остается пустой. Панель «Расчётные координаты оси пути» остается пустой, а вкладка «Координатная модель» - неактивной вплоть до проведения расчета. На вкладке «График кривизны» отображается графическая интерпретация соответствующей зависимости, построенная по исходным данным.

Ввод исходных данных в задание осуществляется нажатием кнопки 4 (рисунок 68), предварительно распахивающееся боковое меню позволяет выбрать формат исходных данных (стандарт, формат тележки **Amberg** или другой) (рисунок 68а) и вызывает диалоговое окно «Чтение данных лазерного сканирования» (рисунок 68), в котором осуществляется выбор файла исходных данных.

Боковое вертикальное меню «Пикетаж:» (рисунок 68, 6, б) предлагает задать направление расчета пикетажа модели: по или против хода съемки соответственно. Распахивающийся список «Шаг, м» (рисунок 68, 8, в) предлагает выбрать регулярный шаг глобализации расчётных точек. При нажатии на стрелочку рядом с компонентом «Допуск, мм» (рисунок 68, 15, г) можно назначить предельный коридор отклонений координат расчётных точек от исходных.

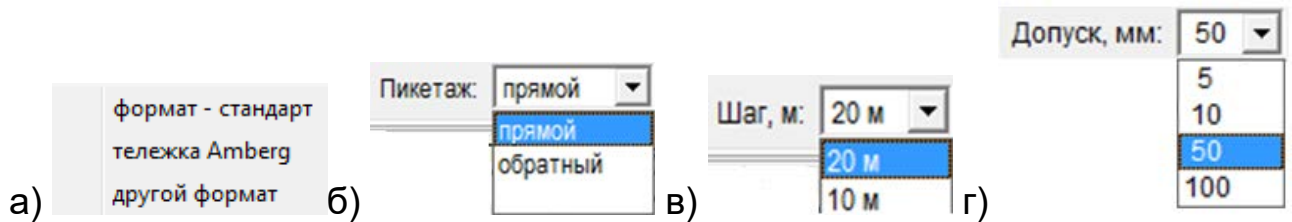
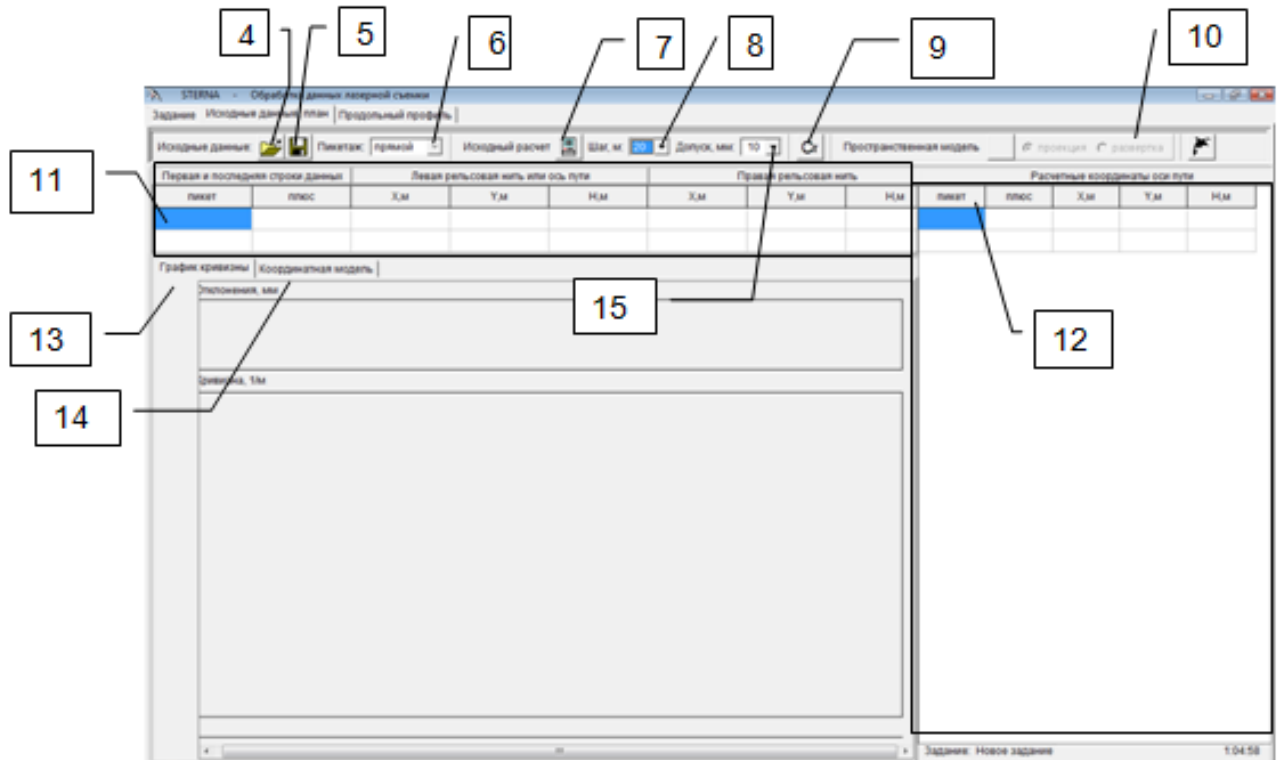


Рисунок 68 – Вкладка «Исходные данные, план» главного окна **Sterna**

- а) вертикальное меню кнопки 4;
- б) вертикальное меню кнопки 6;
- в) вертикальное меню кнопки 8;
- г) вертикальное меню кнопки 15;
- 4 – кнопка ввода исходных данных в задание;
- 5 – кнопка сохранения в задании произведенных изменений;
- 6 – кнопка выбора направления ведения пикетажа;
- 7 – кнопка расчёта задания;
- 8 – кнопка выбора шага регуляризации опорных точек модели оси пути;
- 9 – кнопка вывода на экран статистики обработки исходных данных;
- 10 – неактивная в данной версии панель выбора характера работы с исходными данными (по проекции или по развёртке трассы);
- 11 – панель вывода первой и последней строки исходных данных;
- 12 – панель вывода информации об опорных точках модели пути;
- 13 – панель отображения графика кривизны оси пути;

- 14 – панель отображения оси пути в координатах с разбитым пикетажем;
 15 – кнопка выбора допуска на отклонение точек модели от исходных данных.

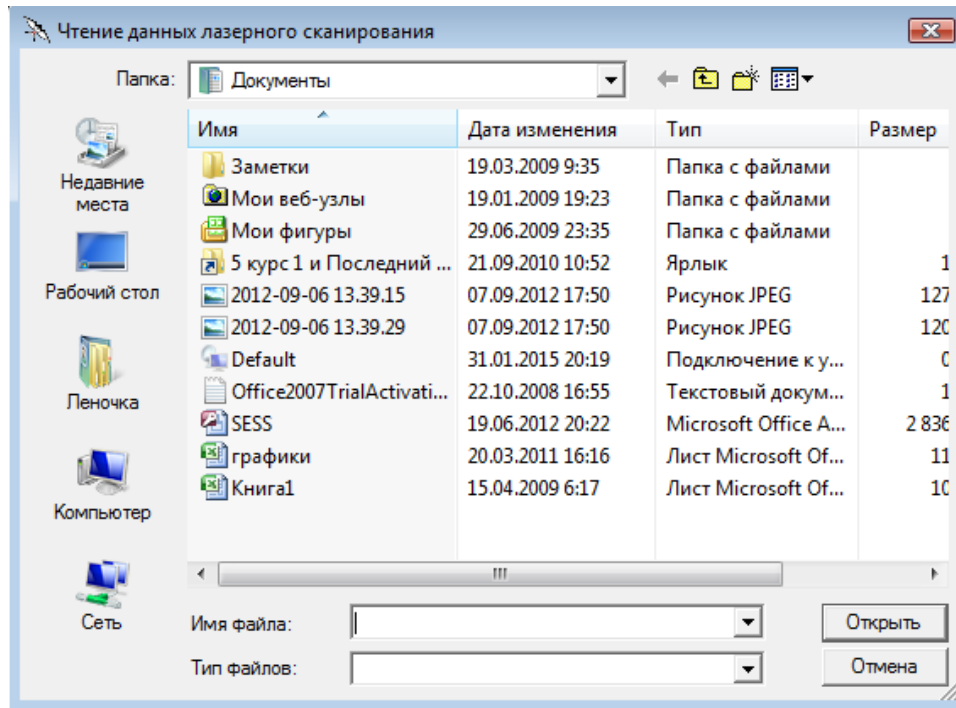


Рисунок 69 – Диалоговое окно «Чтение данных лазерного сканирования»

При чтении исходных данных возможно их попутное форматирование (рисунок 70) с целью установления границ столбцов данных, а также определение формата считываемых данных: ось пути или рельсовые нити; левая или правая рельсовая нить. В случае, проиллюстрированном рисунком 70, в качестве исходных данных задаются точки оси пути, запись их только в столбцах поля ввода «Левая рельсовая нить или ось пути» и нажатая радиокнопка «Заданы координаты оси пути» указывает на это.

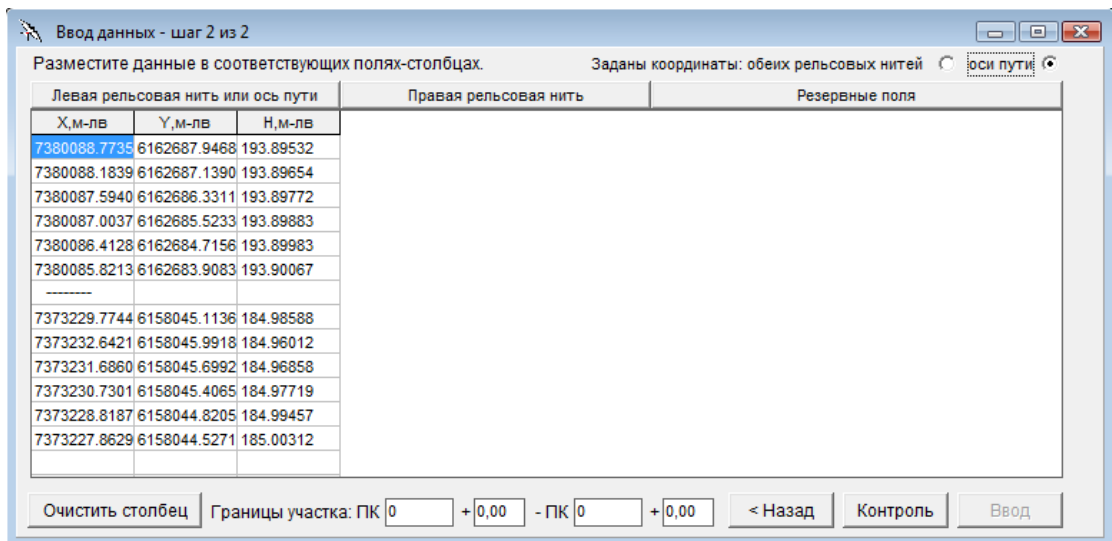



Рисунок 70 – Ввод исходных данных в задание

При нажатии кнопки «Ввод» окна «Ввод данных» на экран выводится вкладка «Исходные данные, план» главного окна формы **Sterna** с заполненной панелью 11 и отрисовывается график кривизны (рисунок 71). При нажатии кнопки вывода на экран статистики обработки исходных данных с пиктограммой  на панели расчетных координат оси пути появится информация о количестве введенных точек, среднем, минимальном и максимальном расстоянии между ними (рисунок 72).

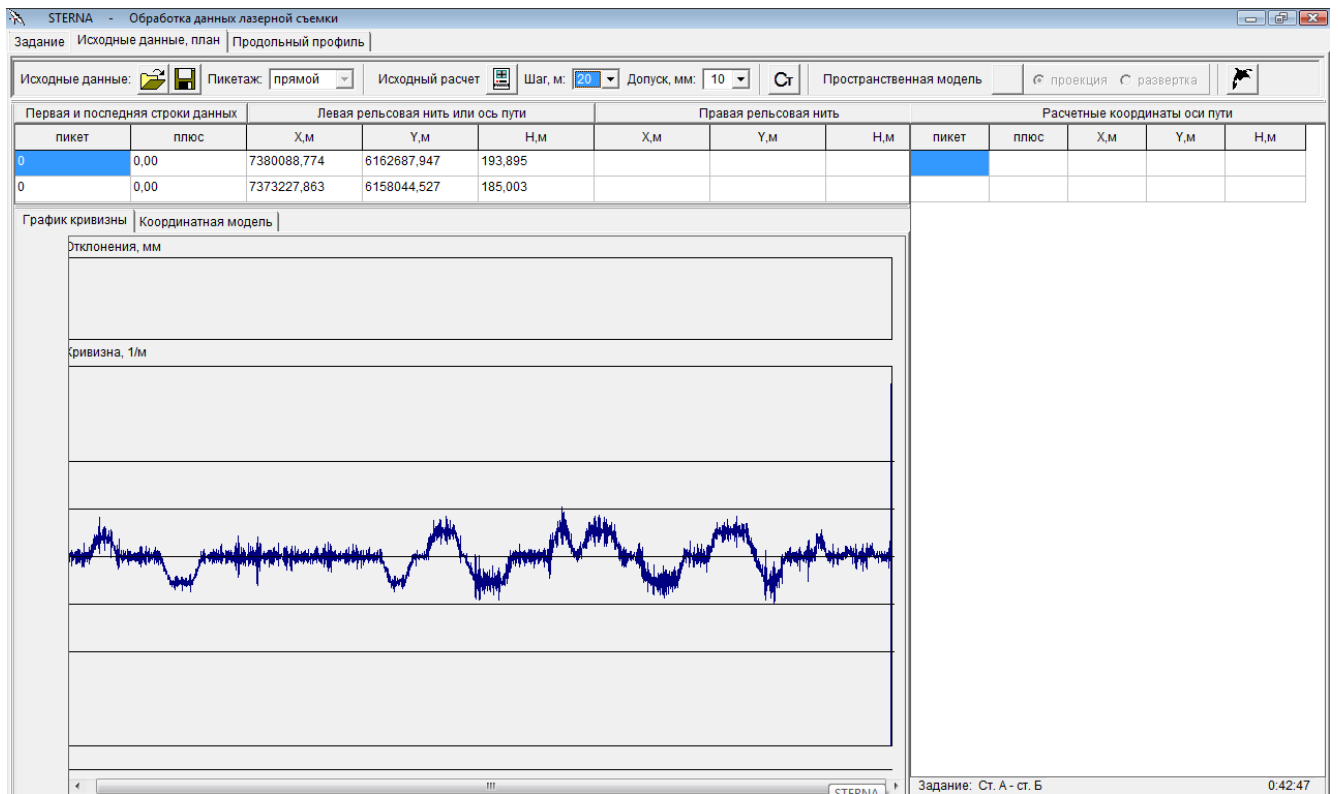



Рисунок 71 – График кривизны исходных данных

| Статистика | |
|---|---------------|
| Число точек | 11388 |
| Расстояния между точками съемки: | |
| среднее, м | 1,000 |
| минимальное, м | 0,959 № 11387 |
| максимальное, м | 6,999 № 8769 |
| <input type="button" value="Заккрыть"/> | |

Рисунок 72 – Панель статистики обработки исходных данных

Нажатие кнопки «Исходный расчет» с пиктограммой  приведет к вызову процедуры формирования модели оси пути, в результате чего на

экране появится график отклонений (отклонения рассчитываются в выбранном коридоре) и график кривизны, а также будет заполнена панель «Расчётные координаты оси пути» (рисунок 73). Для удобства пользователя по оси ординат графика кривизны указаны значения не кривизны, а радиуса кривой в метрах. При клике курсором по панели отображения графика кривизны появляется вертикальная красная линия и появляется всплывающая подсказка (рисунок 74) с указанием пикетажа рассматриваемой точки, радиусом кривой или пометкой «прямая» и величиной отклонения; на панели «Расчётные координаты оси пути» список координат точек оси пути пролистывается до рассматриваемой точки.

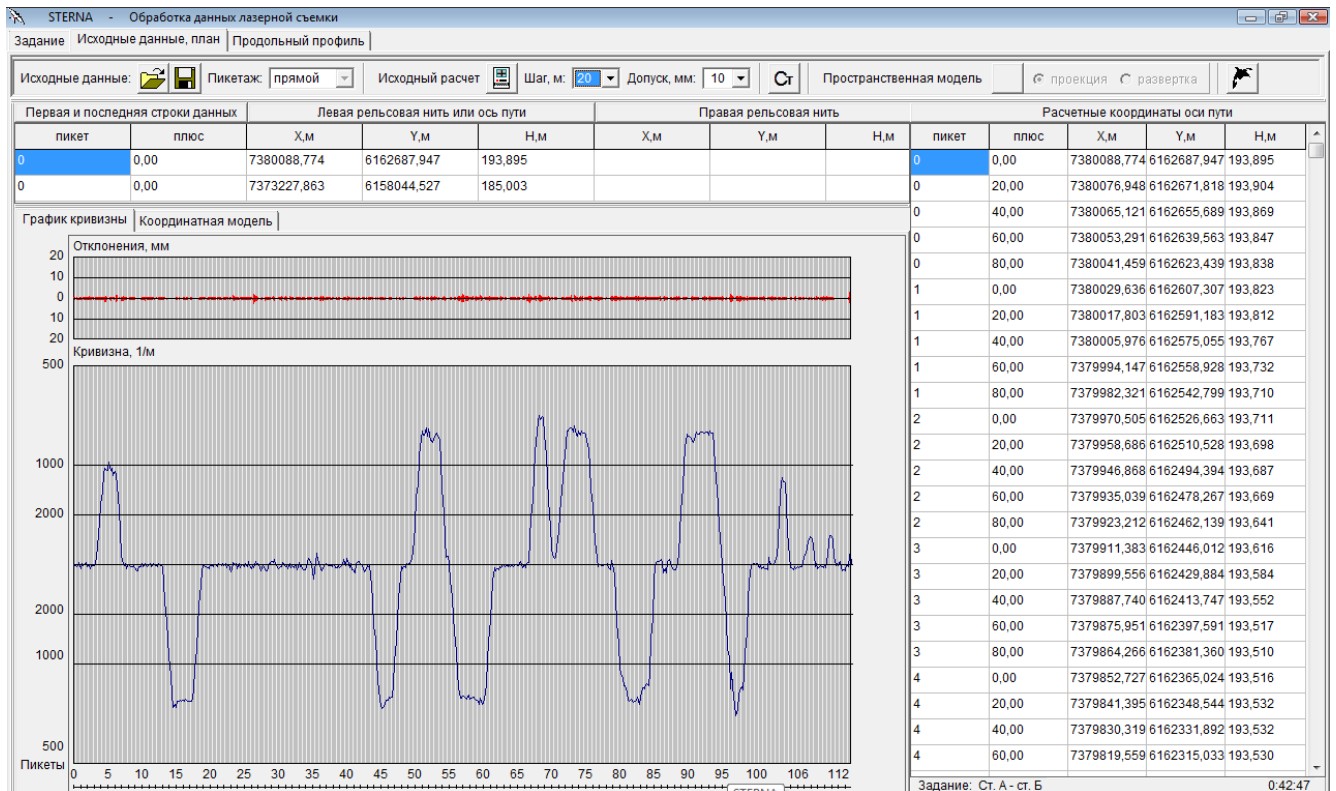


Рисунок 73 – Формирование модели оси пути

ПК 66 + 80,00 радиус: 2069 м отклонение: 1 мм

Рисунок 74 – Всплывающая подсказка

На вкладке «Координатная модель» отрисован план трассы пути с разбитым в выбранном направлении от выбранной точки пикетажем (рисунок 75).

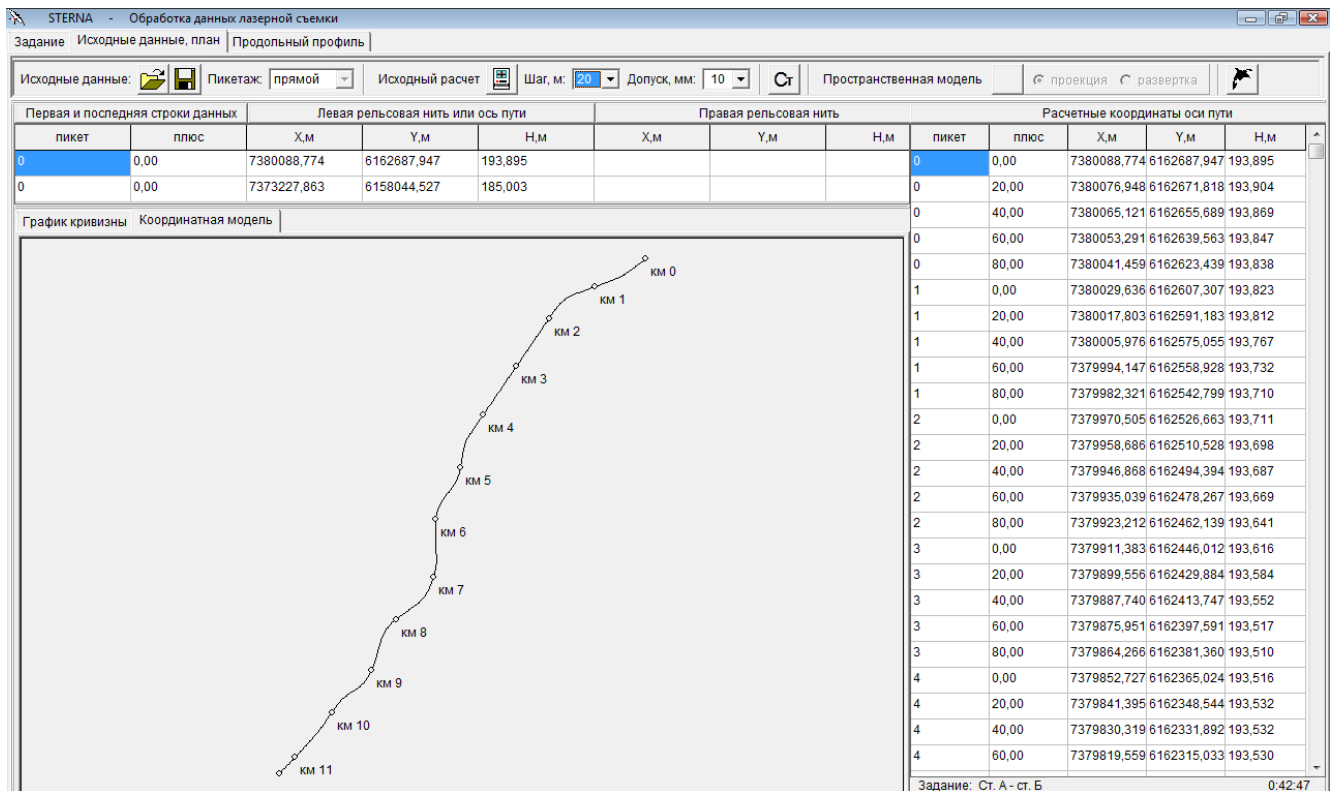



Рисунок 75 – Координатная модель оси пути

Вкладка «Продольный профиль» главного окна формы **Sterna** иллюстрирует продольный профиль, составленный по точкам съемки (рисунок 76). Нажатие кнопки  вызывает процедуру формирования продольного профиля модели оси пути (рисунок 77). При клике курсором по панели отображения продольного профиля появляется вертикальная красная линия и список координат точек оси пути пролистывается до рассматриваемой точки.

Расположенная в правом верхнем углу панели компонентов вкладки «Исходные данные, план» панель «Пространственная модель» в данной версии **Sterna** является неактивной. Планируется программная реализация процедуры, позволяющей учитывать пространственный характер трассы и разрабатывать ее модель в соответствии с выбранным подходом: план и профиль – это проекции или же развёртки на плоскости. Указанные типы моделей являются взаимно преобразуемыми.

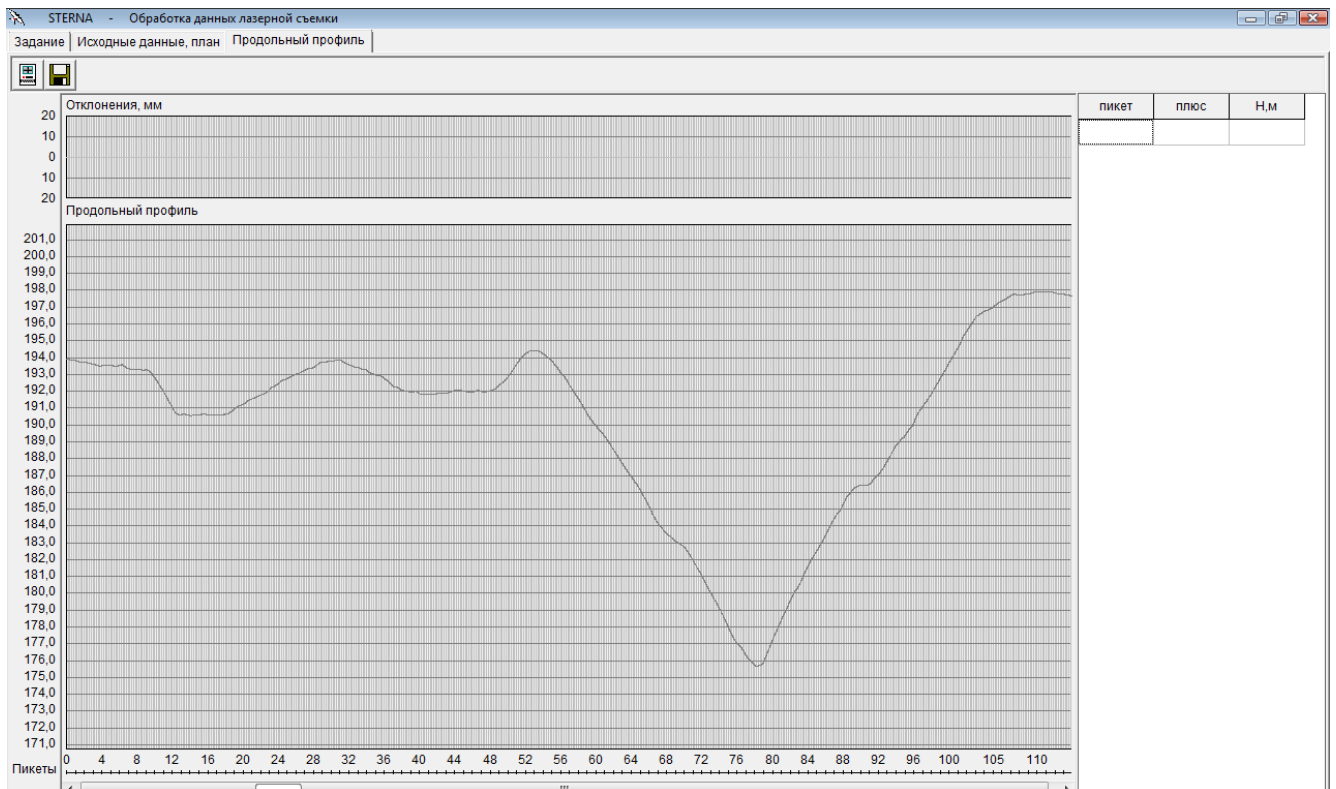


Рисунок 76 – Продольный профиль фактического положения оси пути

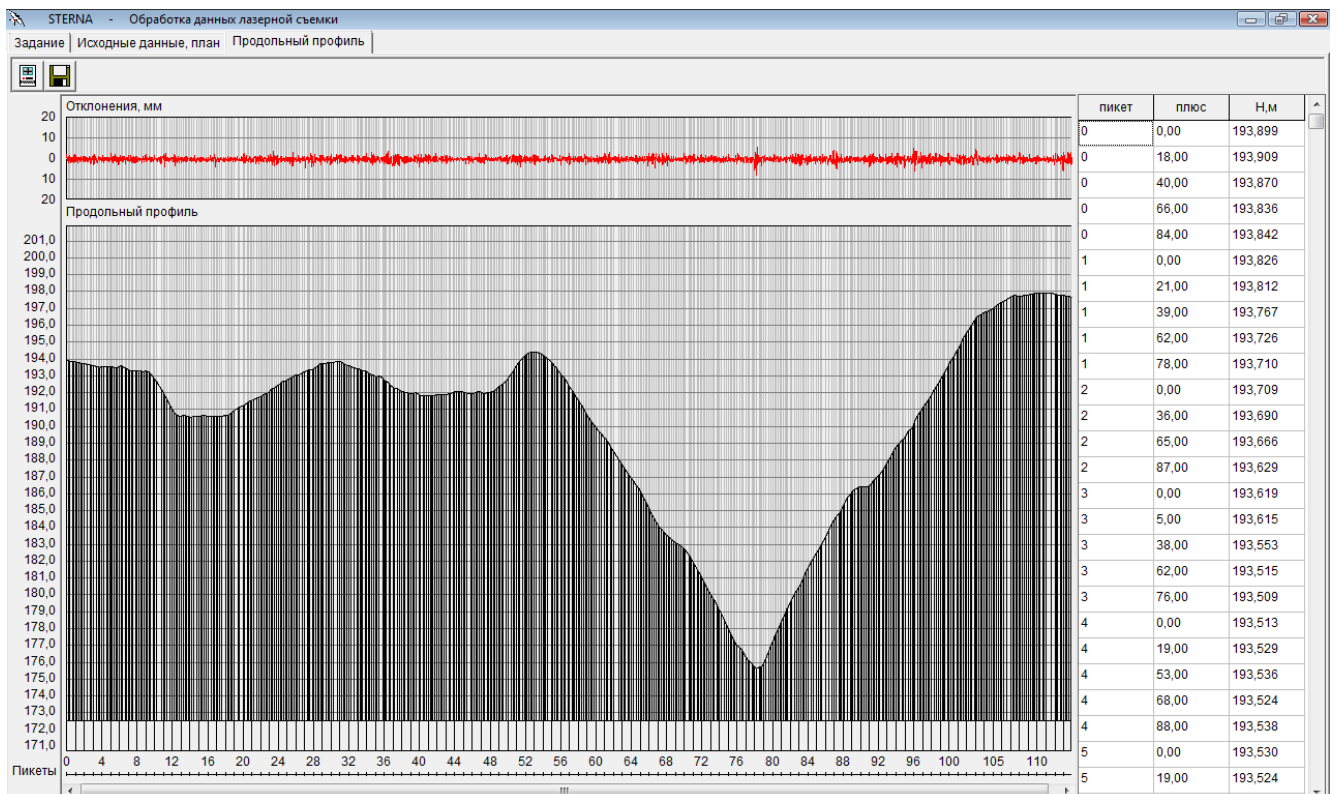


Рисунок 77 – Продольный профиль модели оси пути

Методика разработки таких моделей изложена в главе 2, п.2.3. Справа от панели «Пространственная модель» находится кнопка с пиктограммой



в данной версии концепта является неактивной. Планируется при нажатии кнопки вызов концепта **Orca**, функционал которого предполагает распознавание структуры плана. Методика этой составной части процесса проектирования реконструкции плана, реализованная в **Orca**, описана в главе 3, п.3.3.

4.4 Сравнение с существующими программными комплексами

Разработанные в ходе диссертационного исследования алгоритмы, послужившие основой концепта ПК **Sterna**, дают возможность вести речь о пространственном понимании трассы железнодорожного пути. Присутствующий в **Sterna** функционал позволяет рассматривать трассу в целом как пространственную линию, неотъемлемо работая с двумя ее плоскими проекциями: планом и профилем. Изложенный в диссертации материал предусматривает дальнейшую работу в направлении программной реализации методики высокоточного проектирования по развёрткам, а не искажающим реальное очертание проекциям трассы.

Аппарат регуляризации и глобализации исходных данных, реализованный в концепте ПК **Sterna**, позволяет из исходных данных различных типов генерировать регулярную модель с выбранным шагом, каждая точка которой является математическим ожиданием и по принципу наибольшего правдоподобия моделирует трассу пути.

Реализация вышеупомянутого функционала концепта ПК **Sterna** не может быть представлена к сравнению, поскольку на настоящий момент времени в известных ПК схожий функционал отсутствует.

4.5 Практическое применение

Sterna – единственное программное средство для создания регулярной модели плана существующего пути по данным мобильной роботизированной съемки, пригодной по составу и формату для расчета

параметров элементов плана имеющимися программными средствами. Максимальная длина участка была 500 км (500 000 точек).

Процесс работы с АСУ же иллюстрирует следующая схема: исходные данные роботизированной съемки (мобильного лазерного сканирования или полученные измерительными системами Amberg) подвергаются первичной обработке с помощью софта, прилегающего к прибору, далее они обрабатываются в Sterna и преобразуются в математическую модель трассы пути. Полученные результаты (фактические данные) сравнивают с проектными данными и в ходе сравнения преобразуют в средство управления путевыми машинами в режиме реального времени.

Для сравнения фактического (полученной посредством Sterna модели) и проектного плана предполагается реализовать концепт Archer (рисунок 78).

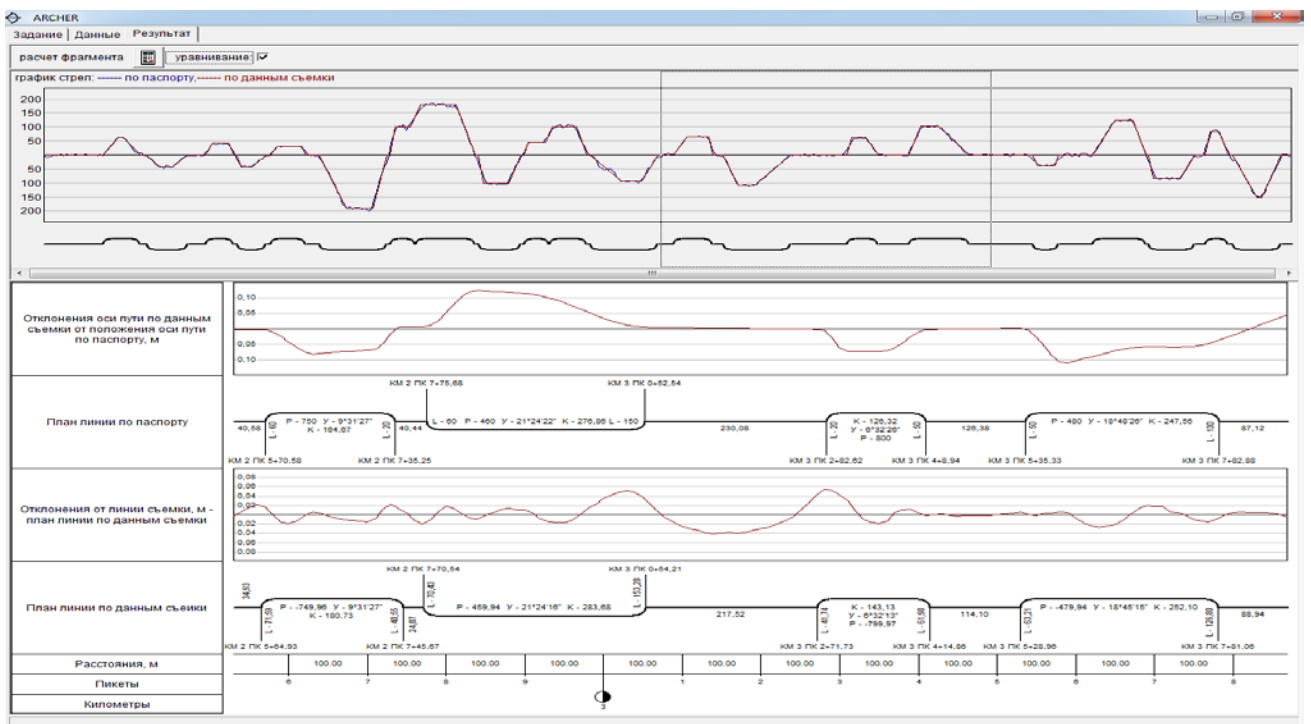


Рисунок 78 - Сравнение фактического и проектного плана – концепт Archer

На практике концепт **Sterna** 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.

Основной целью использования **Sterna** в данном случае являлось уменьшение количества расчётных точек, не приводящее к снижению точности модели и компенсация погрешностей съёмки.

4.6 Выводы по четвертой главе

Для наглядности и достоверности разработанных в ходе диссертационного исследования методов был программно реализован демонстрационный концепт программного комплекса «**Sterna**». Концепт служит для преобразования исходных данных положения трассы железнодорожного пути, полученных в результате любого типа геодезической съёмки, в регулярную унифицированную пространственную модель трассы. Задачей исследования было дальнейшее применение этой модели для реконструкции плана, однако, возможности модели не ограничиваются этой задачей.

Схожего функционала в существующих программных комплексах, по крайней мере отечественных, на настоящий момент нет, поэтому сравнение осуществлялось только с фактическими данными, из чего удалось сделать вывод о достаточной правдоподобности моделирования.

Практическое применение результатов исследования осуществлялось для разработки проектной документации по ряду объектов, что позволило судить о состоятельности методики.

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 трассы железной дороги, основана на двух базовых определениях, отличных от традиционных: план трассы железной дороги- это развёртка (не проекция) трассы на горизонтальную плоскость. Такой подход обеспечивает:

- наиболее правдоподобное моделирование положения трассы в трёхмерном пространстве за счёт совпадения его представления на проектном и эксплуатационном этапах;
- 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.

В качестве перспективных направлений исследования планируется рассмотреть применение разработанной в ходе диссертационного исследования методики моделирования трассы для проектирования реконструкции продольного профиля и доработать метод распознавания структуры плана. Для проверки достоверности методов предполагается реализовать их программным путем и применить на практике, после чего сравнить результаты с фактическими данными.

Список сокращений и условных обозначений

| | |
|-------------------|--|
| <i>GPS</i> | <i>Global Positioning System</i> |
| <i>IMU</i> | <i>Inertial Measurement Unit</i> (инерциальный измерительный блок) |
| АВР | Автоматизация выправочных работ |
| АПР | Автоматизированное проектирование |
| АСУ | Автоматизированные системы управления |
| ВЛС | Воздушное лазерное сканирование |
| ГЛОНАСС | Глобальная Навигационная Спутниковая Система |
| ГОСТ | Государственный стандарт |
| ИТ | Информационная технология |
| КСПД ИЖТ | Комплексная система пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта |
| ЛЭП | Линии электропередач |
| МЛС | Мобильное лазерное сканирование |
| МНК | Метод наименьших квадратов |
| НЛС | Наземный лазерный сканер |
| ОАО «РЖД» | Открытое акционерное общество «Российские железные дороги» |
| ОС | Операционная система |
| ПК | Программный комплекс |
| ПО | Программное обеспечение |
| САПР | Системы автоматизированного проектирования |
| СГР | Отметка существующей головки рельса |
| ТЛО | Точки лазерного отражения |
| ЦММ | Цифровая модель местности |
| ЦМР | Цифровая модель рельефа |
| ЭВМ | Электронные вычислительные машины |

Список литературы

1. Бучкин, В.А. Математические модели и методы в инженерных расчётах. Конспект лекций: учебное пособие /В.А. Бучкин, Е.А. Рыжик – М.: МИИТ, 2004.–76с.
2. Мамитко, А.А. Модель линии плана существующего железнодорожного пути, «Безопасность регионов – основа устойчивого развития», Материалы третьей международной научно-практической конференции, 12 сентября – 15 сентября 2012г. Иркутск: изд-во ИрГУПС, 2012.–С.264-270.
3. Корженевич, И.П. Математическая модель плана существующего железнодорожного пути / Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 15. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007.–271 с.
4. Винер, Н. Кибернетика и общество /Под.ред. Э.Я.Кольмана. - М.: Издательство иностранной литературы,1958.–196 с.
5. История и философия науки / Под ред. Ю.В. Крянева, Л.Е. Моториной. – М.: Альфа-М, 2011.–414 с.
6. Некрасов, С.И. Философия науки и техники: тематический словарь-справочник. Учебное пособие / С.И. Некрасов, Н.А. Некрасова. – Орёл: ОГУ, 2010–289 с.
7. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: федер. закон Рос. Федерации от 27 июля 2006г. N 149-ФЗ: принят Гос. Думой 8 июля 2006г.: одобр. Советом Федерации 14 июля 2006г. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Бучкин, В.А. Сравнительный анализ программных комплексов / В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова, Е.А. Рыжик /: М. Мир транспорта, №2, 2013.– С.112-121.

9. Проектирование автомобильной дороги городского типа в системе Credo ДОРОГИ. Практическое пособие, Минск: АНО ЦДО "КРЕДО-образование", 2010.–96 с.
10. Credo дороги 1.1 [Электронный ресурс], Кредо-Диалог. RU, 2012. – URL:http://www.credo-dialogue.com/software/list_programs/credo_dorogi.aspx, свободный, - Загл. с экрана (дата обращения: 23.03.2013).
11. Robur Топоматик. Железные дороги. Версия 3.0 [Электронный ресурс], С.Пб.: НПФ Топоматик. RU, 2009. – URL: <http://www.topomatic.ru/download/brochures/robur-rail>, свободный, – Загл. с экрана (дата обращения: 03.03.2013).
12. Bentley© Rail Track. Программа для проектирования и обслуживания инфраструктуры железнодорожного транспорта [Электронный ресурс], Bentley Systems, Inc., RU, 2012 – URL: http://ftp2.bentley.com/ist/collateral/docs/bentley_rail_track/bentley-rail-track_product-data-sheet_RU.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 17.12.2012).
13. Чешева, В.И. GeoniCS Желдор. Предложение компании CSoft для проектирования железных дорог / В.И. Чешева, С.В. Пархолуп /, – М.: CADmaster, №4, 2006.–С. 72-75.
14. Чешева, В.И. GeoniCS Piprofile – программа для эффективного и быстрого линейного проектирования / В.И. Чешева, Д.Н. Пожидаев /, – М.: CADmaster, №1, 2012.–С. 74-75.
15. GeoniCS Желдор [Электронный ресурс], Группа компаний CSoft, RU, 2013 – URL: <http://cad.elecran.com.ua/sapr/gis/geonics-jeldor>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 18.01.2013).
16. САПР КРП [Электронный ресурс], Росжелдорпроект-Иркутскжелдорпроект, RU, 2013 – URL: <http://www.kaprem.com>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2013).

17. CARD/1. Проектирование железных дорог [Электронный ресурс], A+C Консалт, RU, 2013 – URL: <http://www.card-1.ru/xslt.php?xml=card1&language=ru>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 30.03.2013).
18. Проектирование объектов инфраструктуры и дорог: AutoCAD Civil 3D. Официальный учебный курс [Электронный ресурс] / Autodesk, Inc. — М. : ДМК-Пресс, 2010 .— 561 с. : ил. — (САПР: от А до Я) .— ISBN 978-5-94074-614-0 .— URL: <https://rucont.ru/efd/199544> (дата обращения: 02.04.2013).
19. Середович, В.А. Н19 Наземное лазерное сканирование: монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009.–261 с.
20. Mendenhall, S. Mobile laser scanning / S.Mendenhall // Civil+structural engineer [электронный ресурс] – URL: <http://www.cenews.com/article/8332/mobile-laser-scanning> (дата обращения 15.04.2014).
21. Фирма ООО «Г.Ф.К.»: официальный сайт//Каталог// Брошюра. URL: http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/railway/amberg_rail_ru_lowres.pdf (дата обращения: 20.07.2014).
22. Amberg technologies: official site / URL: <http://www.ambergtechnologies.ch/en/products/rail-surveying/amberg-survey/> (дата обращения 21.11.2015).
23. Бучкин, В.А. Упорядочение данных координатной съемки железнодорожных путей. / В.А. Бучкин, К.И. Благоразумов / г. Ростов-на-Дону: Вестник РГУПС, №1, 2008.–С. 136-140.
24. Бучкин, В.А., Лисицын И.М. «Перспективы развития технологий укрупненного проектирования объектов строительства» - Материалы IX Международной научно-практической конференции / В.А. Бучкин, И.М. Лисицын/ *Vedecky Prumysl Evropskeho Kontinentu* – 2013; *Praha, Publishing House «Education and Science» s.r.o.*, 2013–С.47-51.

25. СТО Газпром 2-3.5-051-2006 Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов: дата введения 03 марта 2007г / г. Челябинск: Центр безопасности труда, 2006.
26. Карпик, А.П. Теория моделирования пространственной длины трассы / А.П. Карпик, А.В. Никитин / Интерэкспо Геосибирь, №1 / Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2013– С.49-53.
27. Турбин, И.В. Изыскания и проектирование железных дорог. Учебник для вузов ж.-д. трансп. / И.В. Турбин, А.В. Гавриленков, И.И. Кантор и др. Под ред. И.В. Турбина. – М.: Транспорт, 1989.–479 с.
28. Горинов, А.В. Изыскания и проектирование железных дорог [Текст] : Учебник для высш. учеб. заведений ж.-д. транспорта / А.В. Горинов, И.И. Кантор, Кондраченко, И.В. Турбин. - 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Транспорт, 1979. – Т.2.–343 с.
29. Изыскания и проектирование железных дорог. 1 [Текст] / [Под ред. проф.-орденоносца К. А. Оппенгейма, заслуж. деятеля науки и техники]. – М.: Трансжелдориздат, 1938. - 1 т.; 26 см. - (Изыскания, проектирование и постройка железных дорог/ СССР - НКПС. Центр. упр. учеб. заведениями; Т. 1–291с.
30. Бучкин, В.А. 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.
31. Бучкин, В.А. Параметрическая пространственная модель трассы железнодорожного пути / В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова /: Ростов-на-Дону Вестник РГУПС, №1(57), 2015. С. 99-103.
32. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути / М.: ОАО РЖД, утверждены 02.05.2012. – 309 с.
33. Бучкин, В.А. Пространственная модель трассы железнодорожного пути / В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова / Безопасность регионов – основа

- устойчивого развития: Материалы четвертой международной научно-практической конференции, 22 – 26 сентября 2014 г. Иркутск: Изд-во Иркутск: ИрГУПС, 2014. – С.264-270.
34. Эконометрика. Учебник / Под ред. Елисейевой И. И. — 2-е изд. — М.: Финансы и статистика, 2006. — 576 с. — ISBN 5-279-02786-3
35. Bullock, R. Least-squares circle fit / Developmental testbed center – С. 1-3 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://dtcenter.org/met/users/docs/write_ups/circle_fit.pdf
36. Левчук, Г.П. Прикладная геодезия: основные методы и принципы инженерно-геодезических работ. Учебник для вузов. – М.: Недра 1981– С.131-132.
37. Распоряжение старшего вице-президента ОАО «РЖД» В.А. Гапановича от 20 апреля 2012г. № 802р «О создании и эксплуатации высокоточной координатной системы ОАО «РЖД».
38. Распоряжение президента ОАО «РЖД» В.И. Якунина от 03 декабря 2010г. №2511р «О создании комплексной системы пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта».
39. Техничко-экономические изыскания при проектировании железных дорог [Текст] : учебное пособие / [С. В. Шкурников и др.] ; Федеральное агентство ж.-д. трансп., Федеральное агентство ж.-д. трансп., Федеральное бюджетное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Петербургский гос. ун-т путей сообщ.". - Санкт-Петербург : ПГУПС, 2013. - 62, [1] с. : ил.; 20 см.;
40. Кантор, И.И. Изыскания и проектирование железных дорог. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003.–288с.
41. Свод правил СП 119.13330.2012. Железные дороги колеи 1520мм / М.: Минстрой России, 2015. – 161 с.
42. Рыжик, Е.А. Компьютерное моделирование: Конспект лекций. – М.: МИИТ, 2015.–148 с.

43. Дюнин, А.К. Вопросы теории проектирования железнодорожных кривых / Дюнин А.К., Д.Г. Ковтун, В.И Ангелейко. / Новосибирск: Издательство Сибирского отделения АН СССР, 1960.–175 с.
44. План поэтапного внедрения технологий информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства и проектирования : приказ министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 29.12.2014 г. № 926 / пр. – 3 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/383/prikaz-926pr.pdf> (дата обращения 21.01.2015).
45. Положение по оценке параметров устройства кривых участков пути вагонами путеизмерителями, расчету параметров устройства кривых для их паспортизации. ЦПТ-46/2 / М.: ОАО РЖД, утверждено 19.03.2009. - 43 с.
46. Аккерман, Г.Л. Биклотоидное проектирование криволинейных участков железной дороги./ Г.Л. Аккерман , С.Г. Аккерман , О.А. Кравченко / Путь и путевое хозяйство: научно -популярный, производственно - технический журнал. - 2010. -№10.–С.28 -30.
47. Ревва, П.С. Технология наземного лазерного сканирования для реконструкции объекта транспортной инфраструктуры / П.С. Ревва, А.В. Соколов, Ю.А. Ткаченко, В.С. Шварцфельд / Проектирование развития региональной сети железных дорог: сборник научных трудов. – Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения. - №1 – 2013.–С. 88-94.
48. Дюнин, А.К. Аналитический метод проектирования переустройства железнодорожного пути в плане/ А.К. Дюнин, А.И. Проценко - Новосибирск: Транспорт, 1967, - 225 с.
49. Бучкин, В.А. Методология автоматизированного проектирования реконструкции плана и профиля железных дорог/ Диссертация на

соискание ученой степени доктора технических наук, М.: МИИТ, 2001.

50. Бучкин, В.А. Цифровые технологии инженерных изысканий: конспект лекций / В.А. Бучкин, Е.А. Рыжик. – М.: МИИТ, 2014. – 56 с.
51. ГОСТ 15971-90 Системы обработки информации. Термины и определения, М.: Издательство стандартов / Утвержден Постановлением Государственного комитета ССр по управлению качеством продукции и стандартам от 26.10.1990 №2698. – 1990.–14 с.