

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.

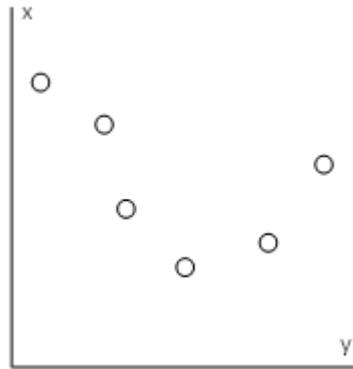


Рисунок 1 – Графическая интерпретация цифровой модели трассы

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.

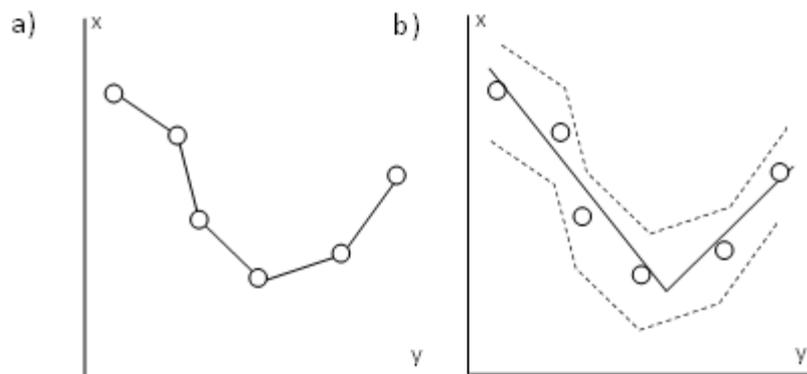


Рисунок 2 – Графические интерпретации математических моделей трассы железнодорожного пути: а) интерполяционной; б) аппроксимационной.

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].

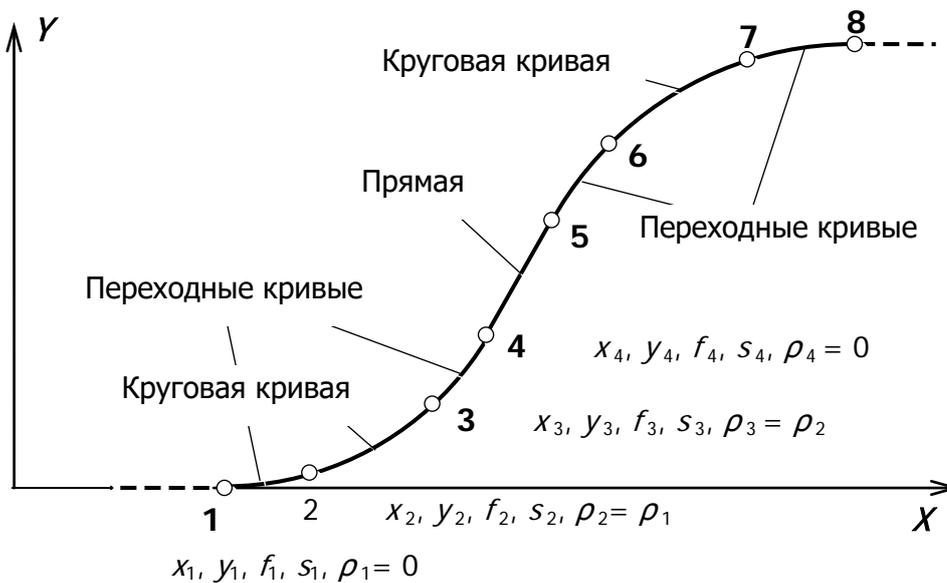


Рисунок 3 – Координатно-параметрическая модель плана (**R**-модель)

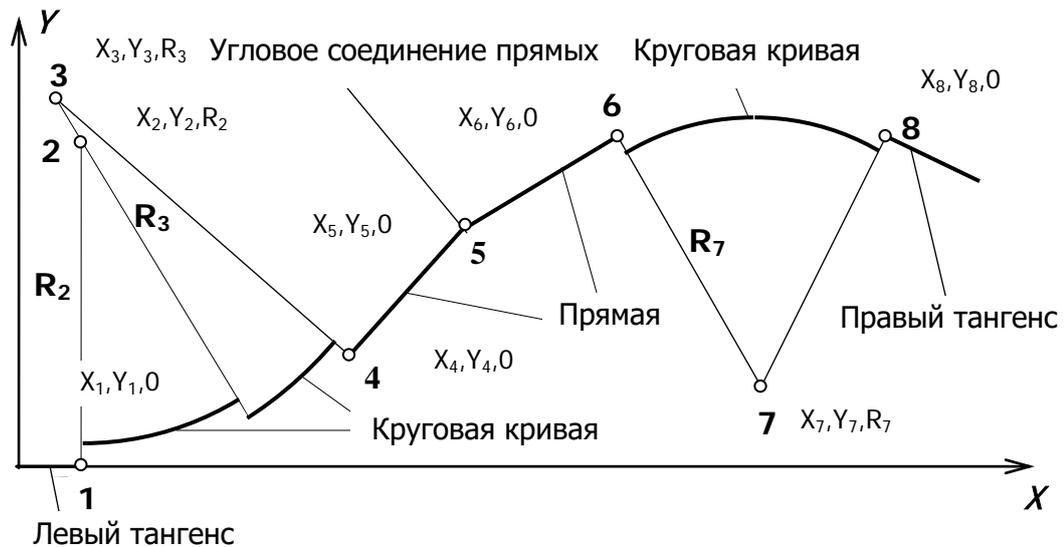


Рисунок 4 - Координатная модель плана (*T*-модель)

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).

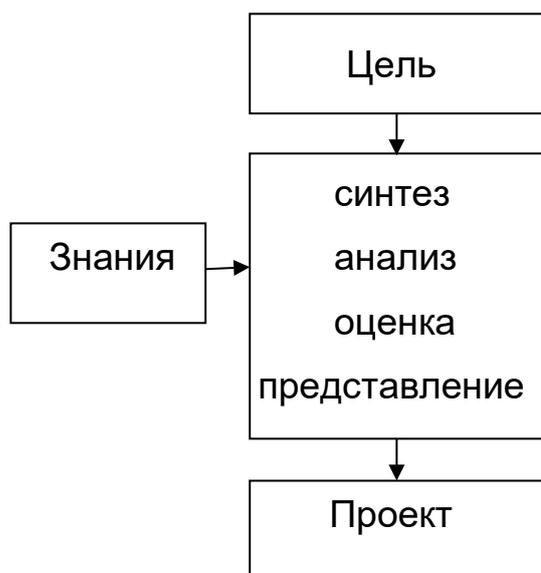


Рисунок 5 – Простейшая модель процесса проектирования

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.

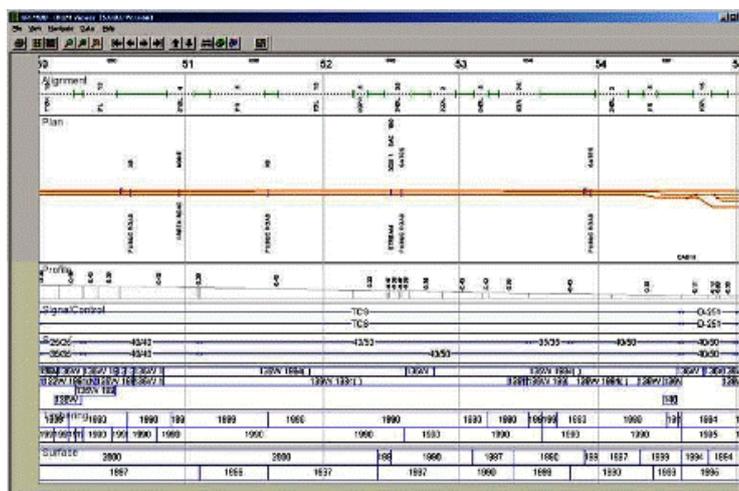


Рисунок 6 - Инфраструктура железнодорожного пути в **BentleyOptram**

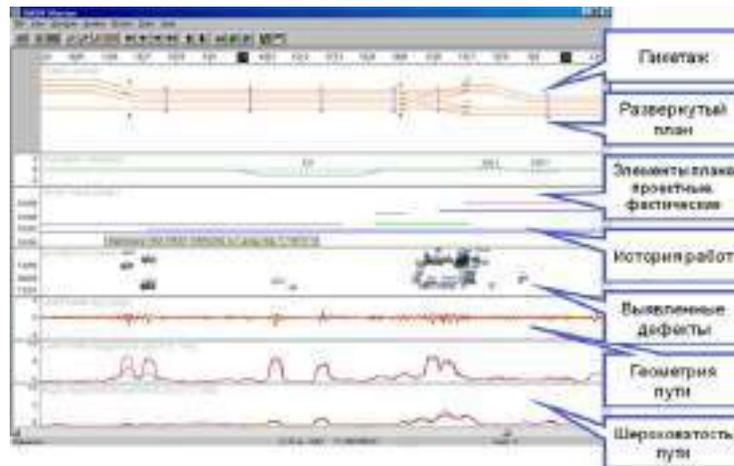


Рисунок 7 - Анализ состояния железнодорожного пути в **BentleyOptram**

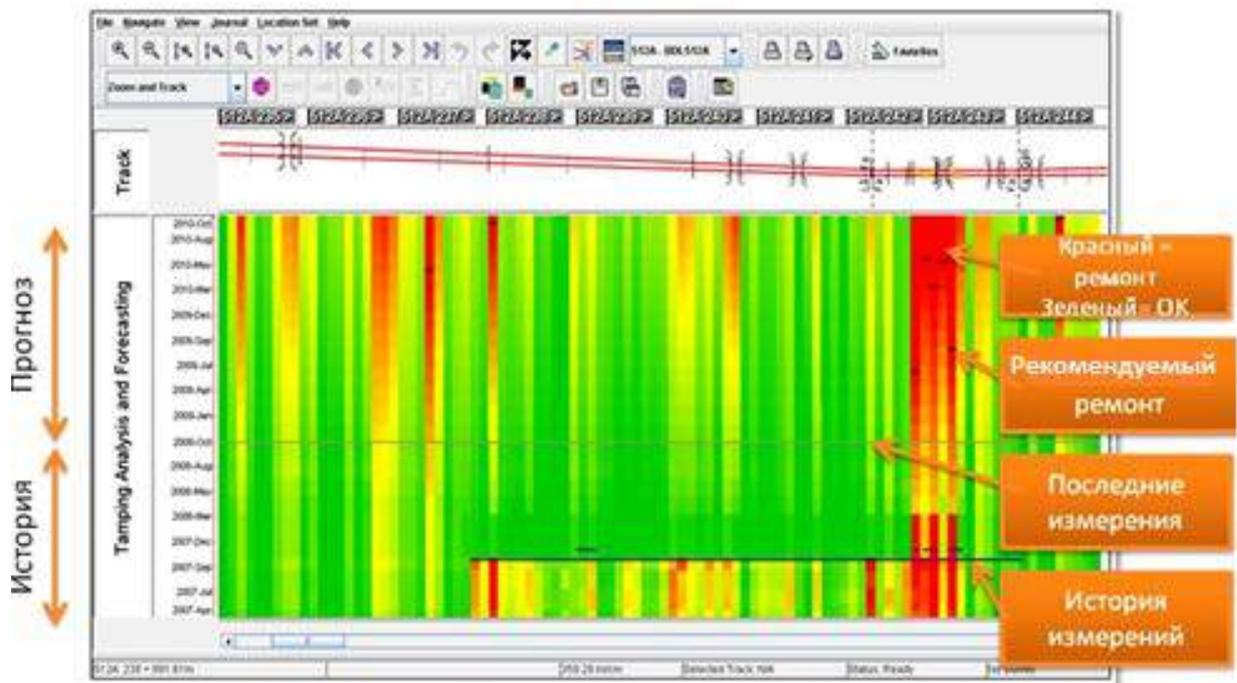


Рисунок 8 - Планирование ремонтов пути в **BentleyOptram**

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).

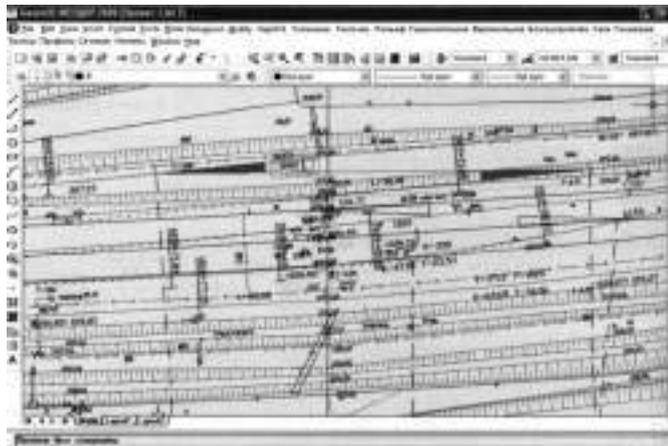


Рисунок 10 - Проектирование плана станции в **GeonICS** ЖЕЛДОР

- 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.

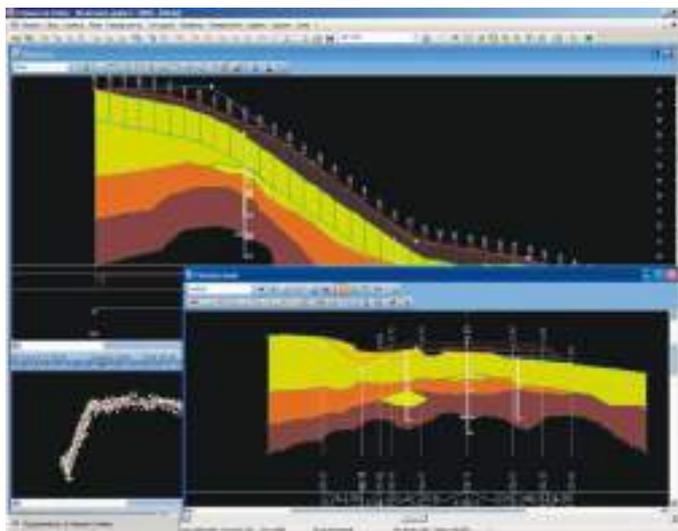


Рисунок 11 - Трехоконный интерфейс **Robur** – Железные дороги

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.

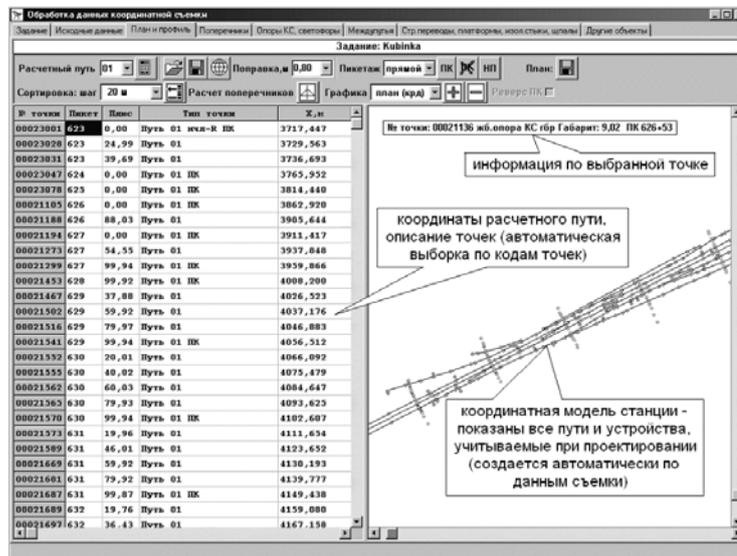


Рисунок 12 - **3D**-модель существующих железнодорожных путей

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).

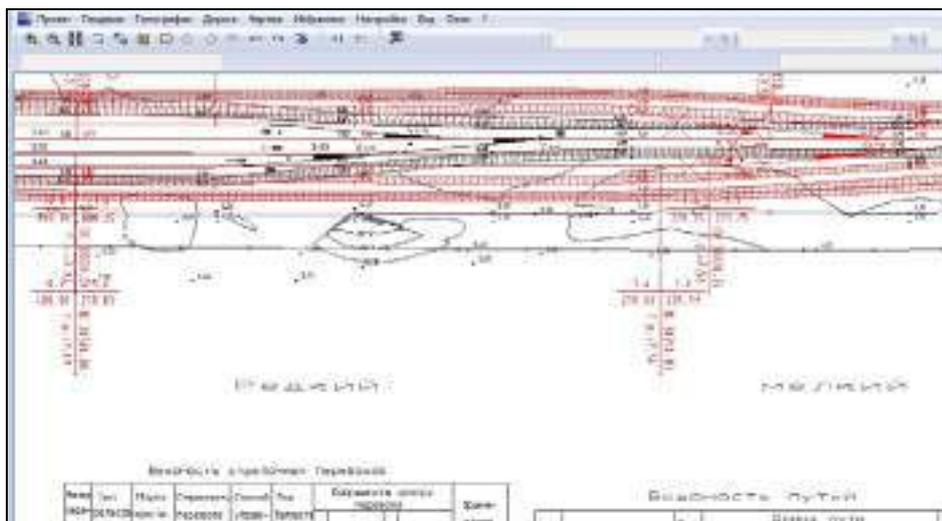


Рисунок 13 - План станции с заполненными ведомостями (**CARD/1**)

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).

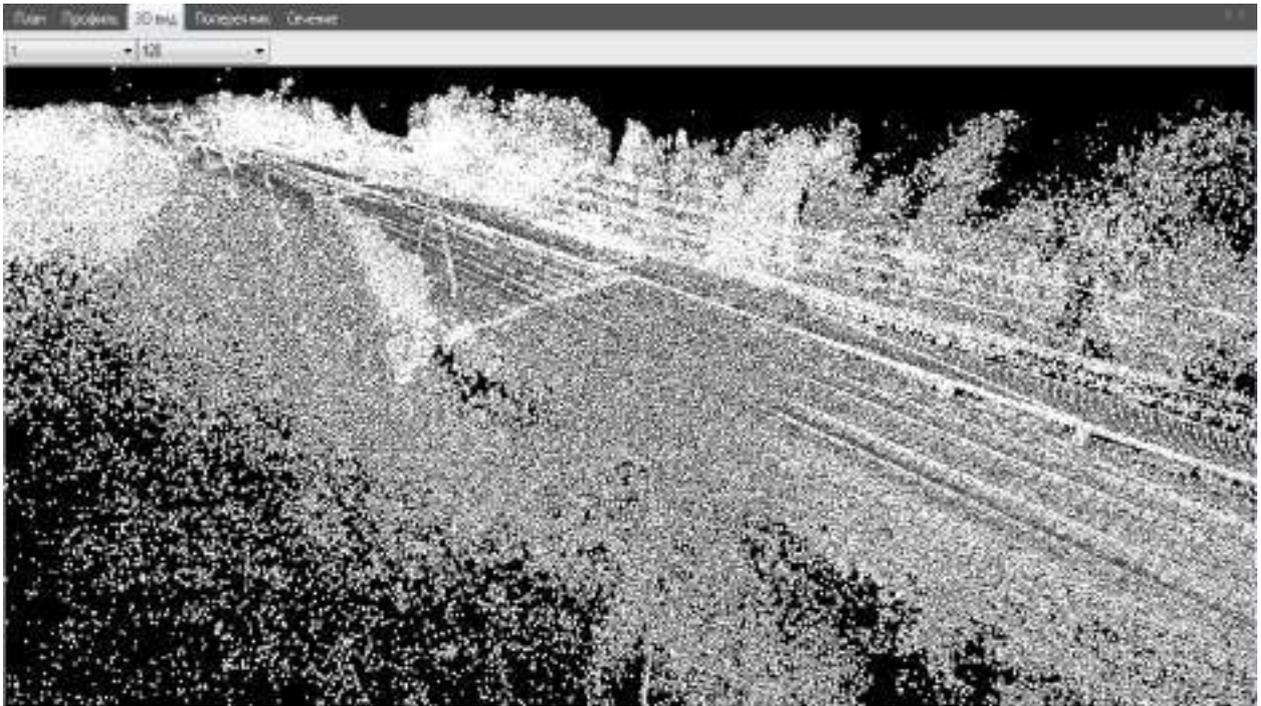


Рисунок 15 – Результаты МЛС после первичной обработки

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 $i + 1$).

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

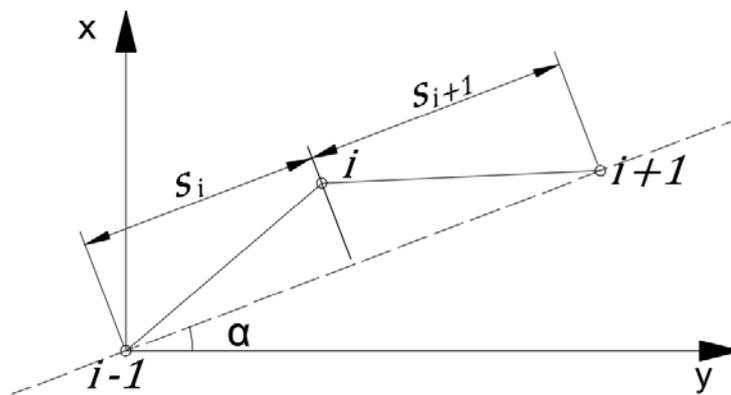


Рисунок 20 – Схема проверки упорядоченности точек исходных данных

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).

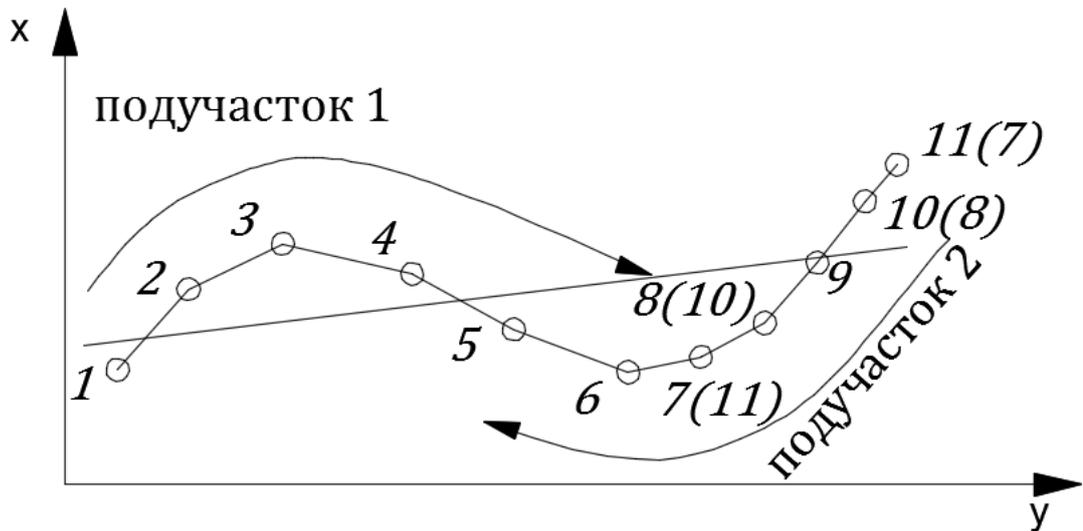


Рисунок 21 – Схема восстановления очередности следования точек при помощи линейной аппроксимации

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

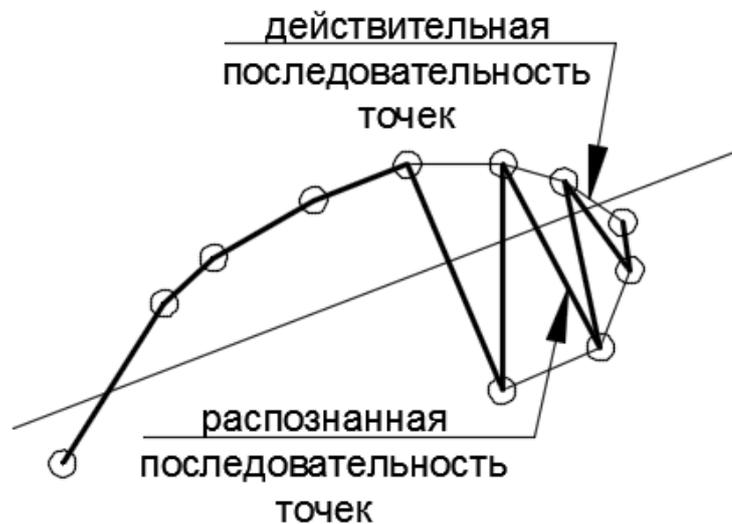


Рисунок 22 – Схема частного случая ошибочной работы метода

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.

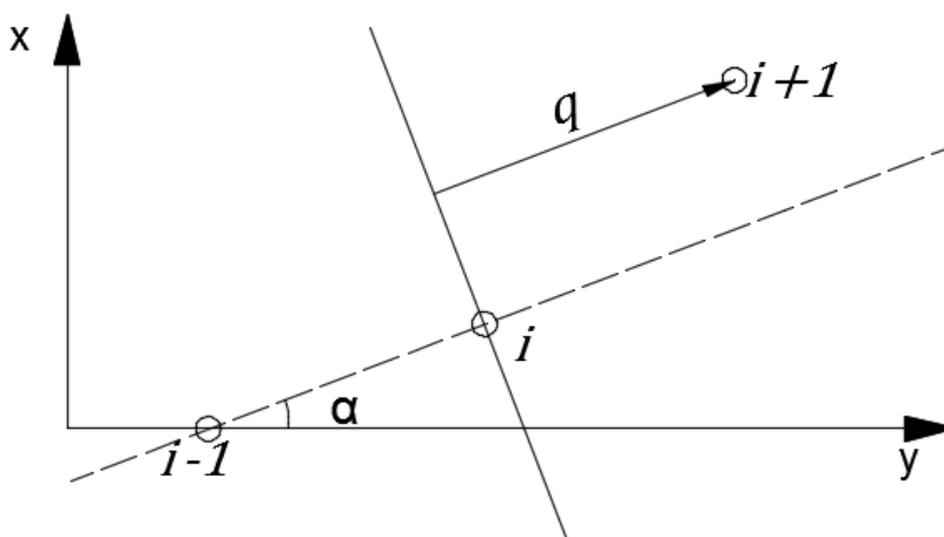


Рисунок 23 – Схема определения сторонности ближайшей к паре ($i-1$ -ой и i -ой) точки $i+1$

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 непревышения 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 непроизводственного 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.

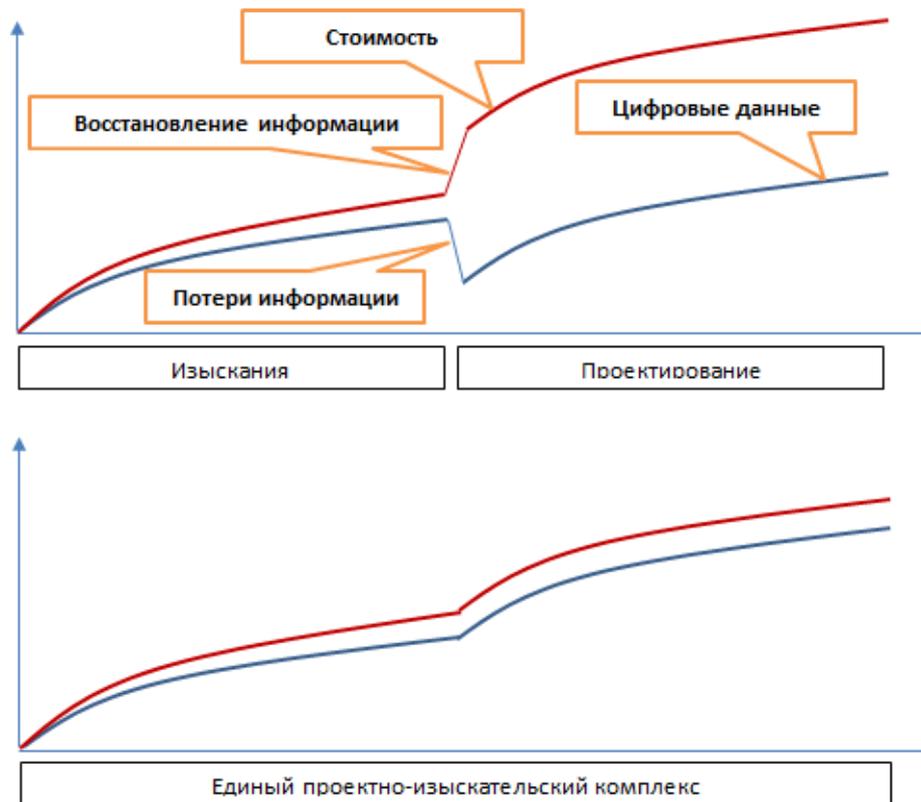


Рисунок 24 – Жизненный цикл проекта

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).

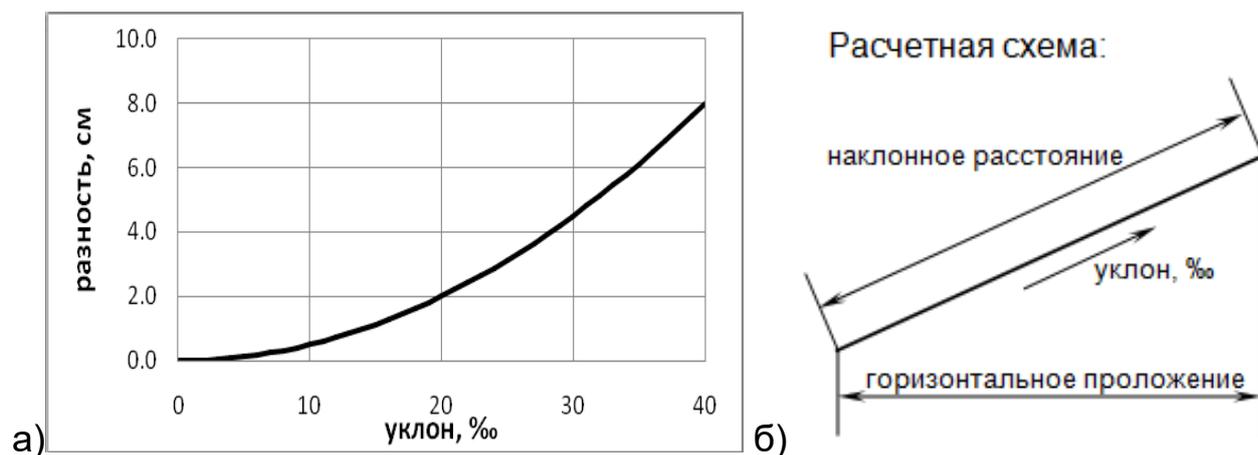


Рисунок 25 – а) график зависимости величины погрешности, возникающей при определении длины трассы по ее горизонтальной проекции, от продольного уклона для участка трассы протяженностью в один пикет (100м); б) расчётная схема.

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

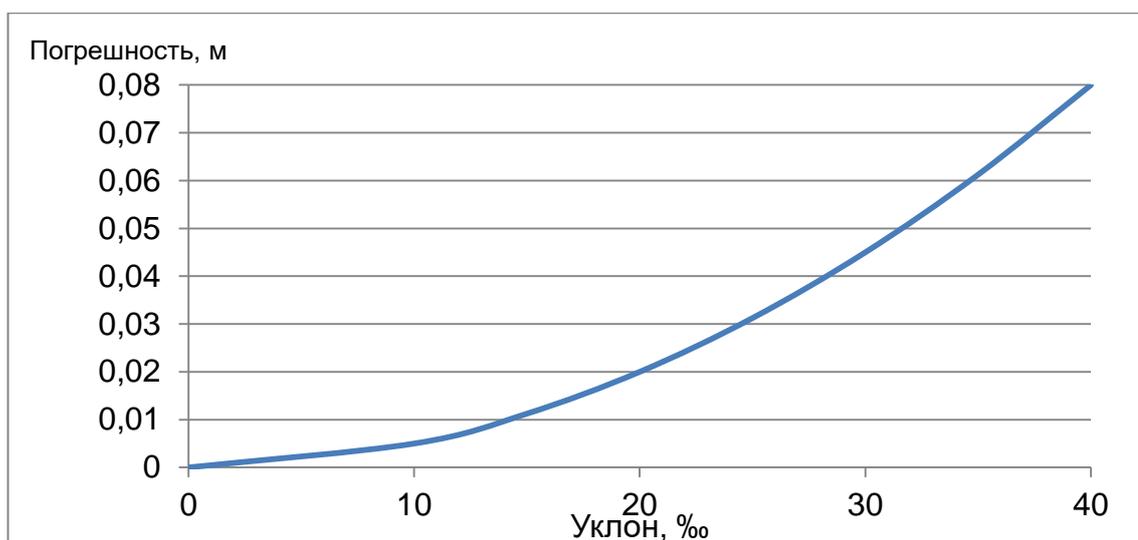


Рисунок 27 – Зависимость погрешности определения длины элемента по его проекции от продольного уклона данного элемента

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.

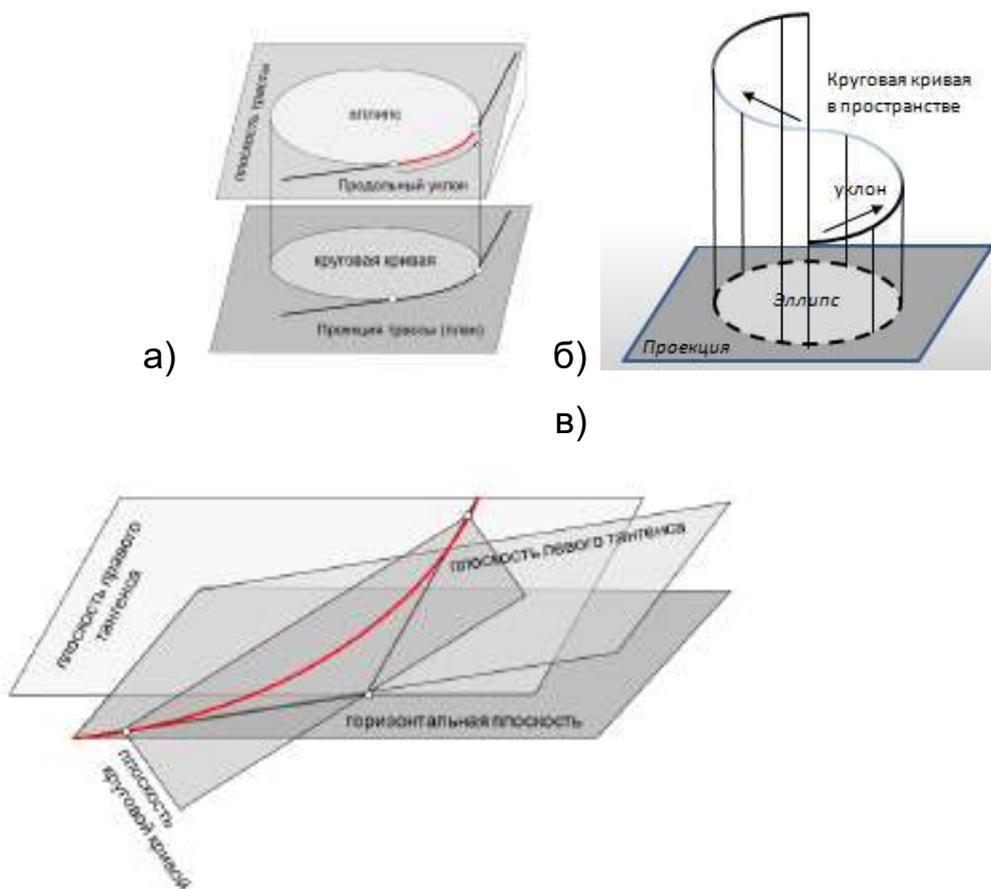


Рисунок 28 – Сравнение пространственного положения участка трассы и его проекции:

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.

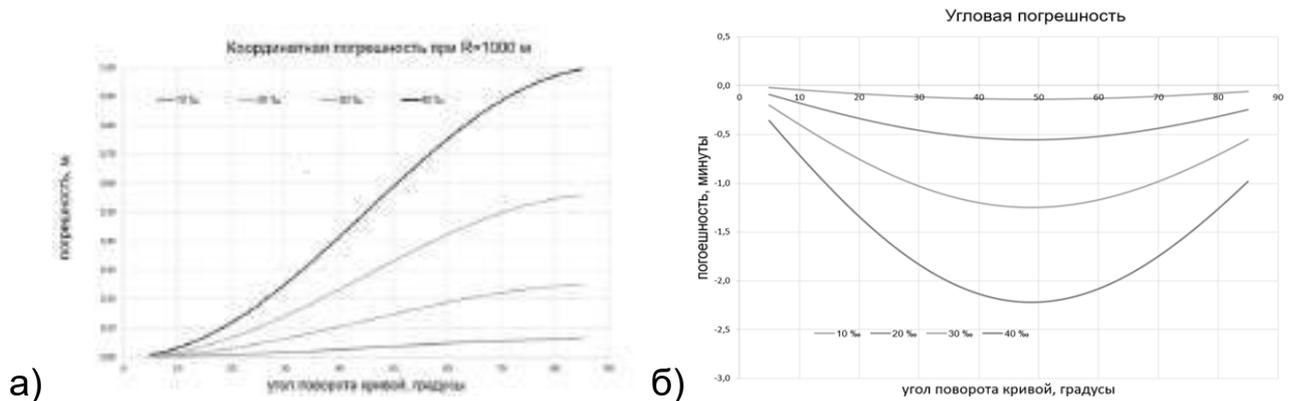


Рисунок 29 – Графики зависимости а) координатной погрешности, м б) угловой погрешности, градусы от угла поворота кривой для участков трассы различного продольного уклона, ‰

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).

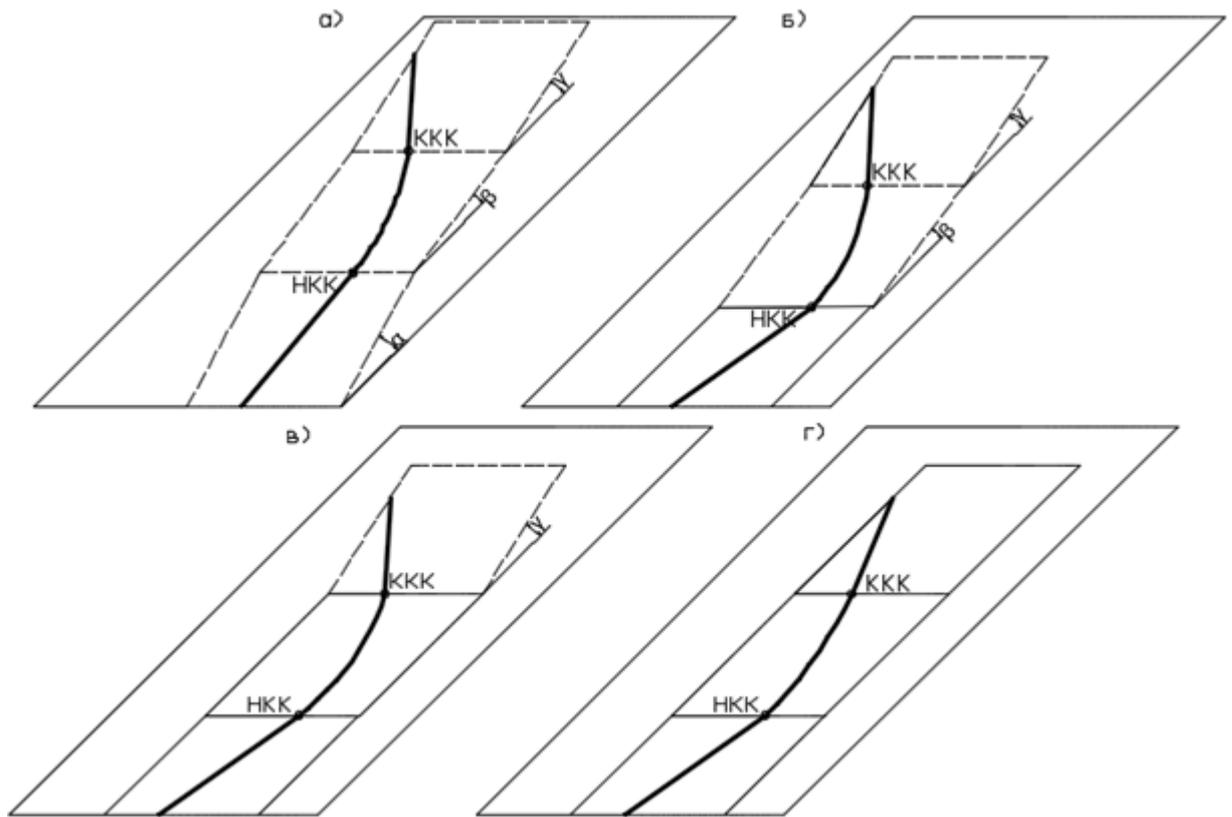


Рисунок 30 – Развёртка трассы на горизонтальную плоскость

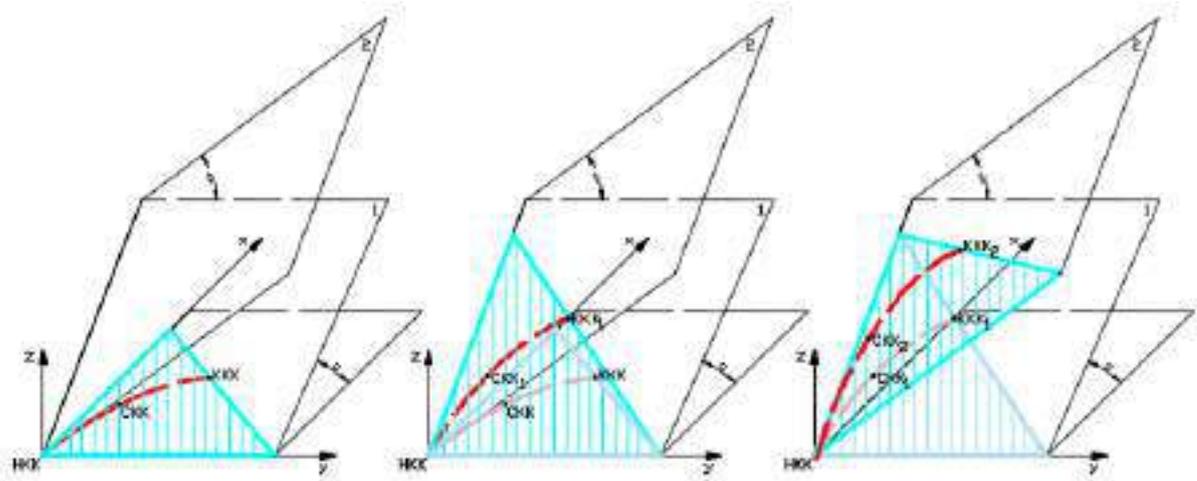


Рисунок 31 – Элементарная операция получения развёртки трассы

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.

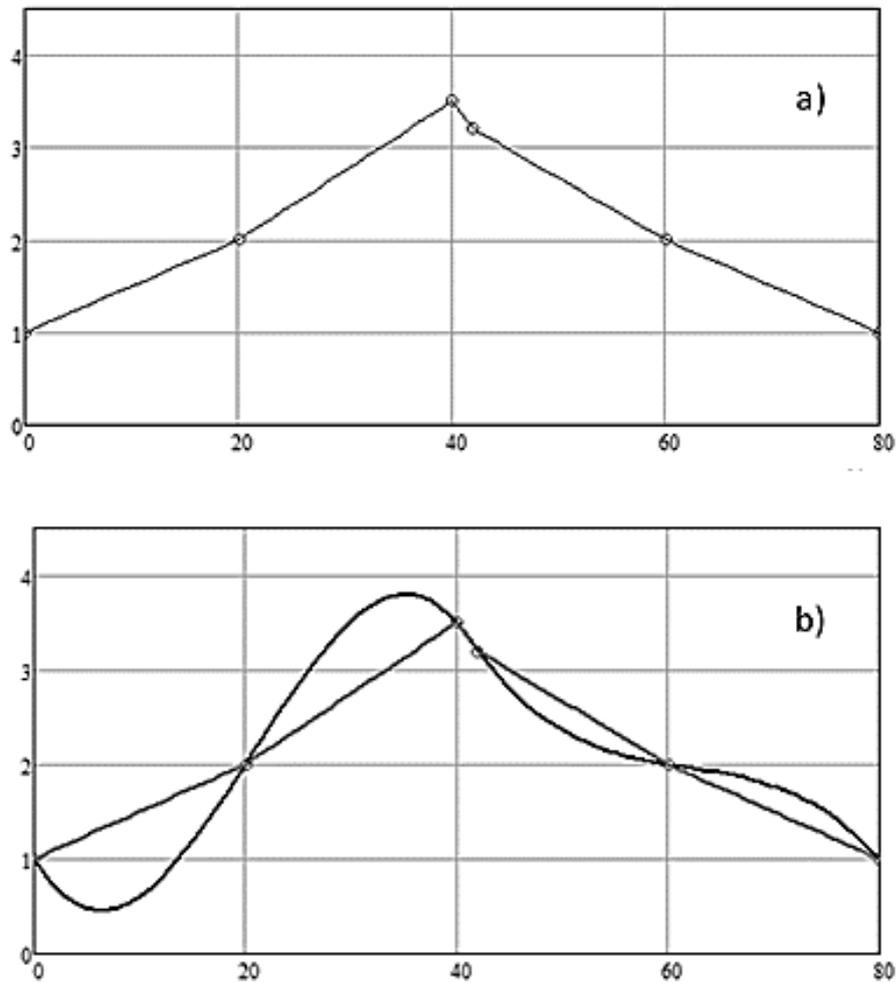


Рисунок 13 Линейная (а) и полиномиальная (b) интерполяция

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.

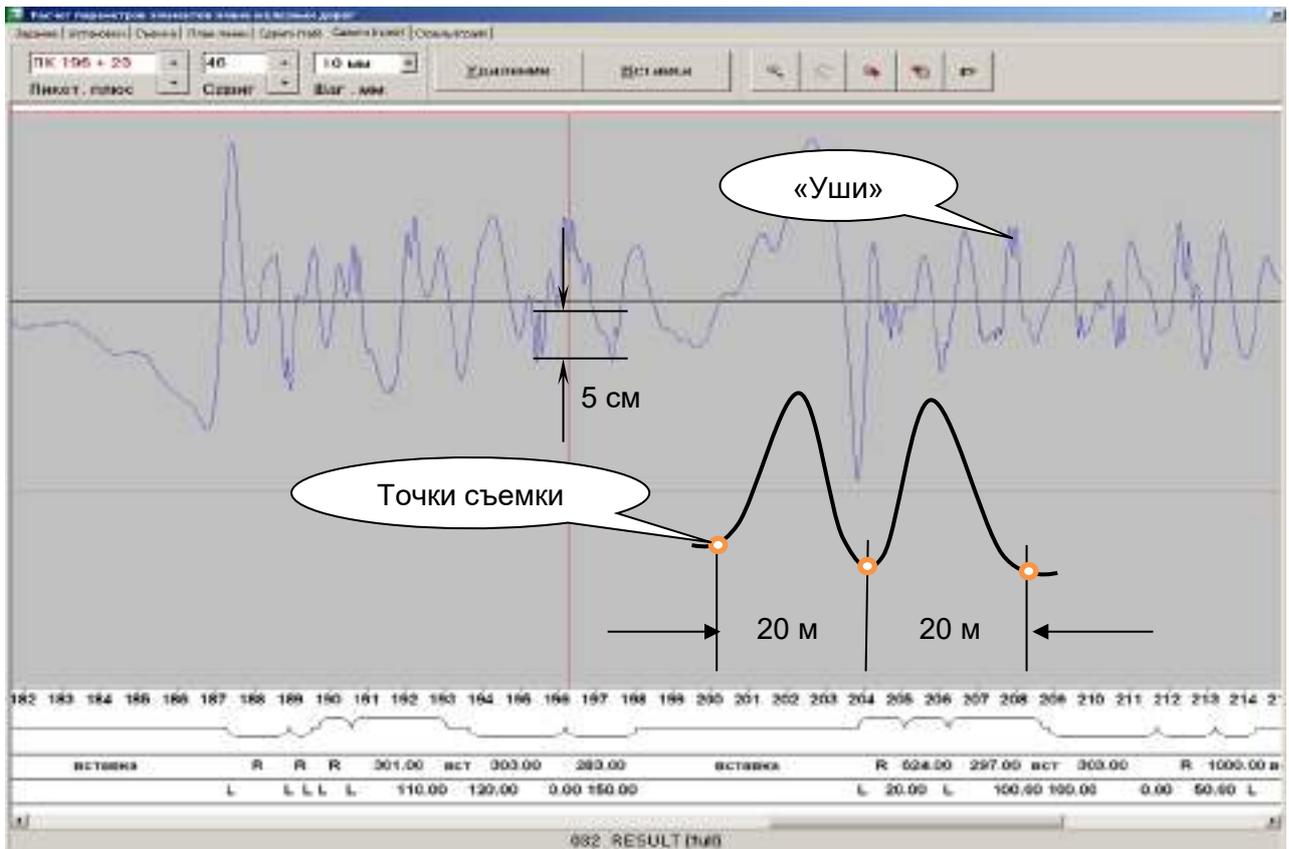


Рисунок 34 – Погрешности при использовании полиномиальных сплайнов для моделирования плана трассы

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:

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