

Метод интерактивного трассирования новой железной дороги на цифровой модели местности



В. А. Анисимов,
д-р техн. наук, профессор кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),



М. А. Рубцов,
аспирант ПГУПС

Применение современных средств визуализации в автоматизированном трассировании железных дорог позволяет перейти от классических графоаналитических методов определения положения трассы в плоских проекциях к технологичному пространственному проектированию на трехмерных цифровых моделях местности.

Трассирование новых железнодорожных линий относится к числу наиболее сложных и трудоемких процессов инженерной деятельности. Оно основывается на всестороннем анализе инженерно-строительных, технико-эксплуатационных и экономических требований к железнодорожной линии, которые должны учитывать рельеф местности, геологические, гидрологические, климатические и другие природные условия района будущего строительства, а также строгое соблюдение норм проектирования кривых участков трассы дороги и ее продольных уклонов [1].

В современных системах автоматизированного проектирования (САПР) трассирование выполняется на цифровых моделях местности (ЦММ) в проекциях плана и продольного профиля трассы на основе применения классических графо-

аналитических методов [1, 2], которые не позволяют проектировщику в полной мере использовать возможности интерактивного взаимодействия с моделью проектируемой дороги в режиме реального времени.

Например, в широко используемой САПР «Топоматик Robur» на сложных участках напряженного хода проектировщик выполняет трассирование по следующему алгоритму:

- активизация цифровой модели местности;
- укладка вариантов линии нулевых работ по гипсометрической модели рельефа местности;
- активизация варианта модели железной дороги;
- проектирование варианта плана трассы методом визуальной графической аппроксимации линии нулевых работ;
- проектирование продольного профиля трассы;
- проектирование поперечных профилей земляного полотна;
- размещение водопропускных сооружений, выбор их типов и размеров;
- расчет объемов земляных работ, стоимости водопропускных сооружений, строительной стоимости, эксплуатационных расходов.

При этом пункты 3–8 выполняются для каждого варианта линии нулевых работ. Окончательное проектное решение принимается на основе сравнения вариантов модели железной дороги по строительно-эксплуатационным затратам.

На участках трассы, проходящих в сложных условиях местности, где необходимо применять вариативное проектирование, такой алгоритм приводит к существенным непроизводительным затратам



времени на поиск приемлемого проектного решения. При его использовании проектировщик, меняя вручную параметры трассы и анализируя полученные в результате технические, экономические и эксплуатационные показатели, вынужден проводить большое количество итераций. Это существенно увеличивает трудоемкость проектирования и повышает вероятность появления ошибок при оценке пространственного положения трассы.

В связи с изложенным в рамках создания новой технологии автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде [3] поставлена задача разработки метода интерактивного трассирования на ЦММ с помощью инструментов визуальной наглядности для оценки решений по изменению положения трассы в режиме реального времени. Основное назначение данного метода — это укладка конкурентоспособных 3D вариантов трассы железнодорожных участков, используемых в качестве исходных для поиска ее оптимального положения в пространстве [4].

Возможности применения современных средств визуализации в САПР позволяют не только создавать 3D-модели, но и управлять объектом проектирования через API-интерфейсы на основе технологичного сочетания аналитических расчетов с индикацией их результатов на экране монитора в режиме реального времени. При этом визуализация рассматривается как неотъемлемая часть вычислительного процесса.

Для разработки метода интерактивного трассирования железных дорог на ЦММ использованы следующие базовые инструменты визуальной наглядности:

- индикация параметров и показателей трассы дороги, вычисляемых для оценки проектного решения по изменению ее пространственного положения;
- интуитивно понятные формы представления моделей трассы, обеспечивающие в САПР технологичную визуальную обратную связь с проектировщиком в режиме реального времени с целью сокращения количества и времени итераций при инженерном анализе проектных решений.

Математическое описание и алгоритм метода

Предлагаемый метод интерактивного трассирования железных дорог на ЦММ основан:

- на автоматическом вычислении параметров пространственного пересечения вертикальной поверхности, проходящей через трассу железной дороги, с цифровой TIN-моделью рельефа;
- на индикации участков 3D-модели трассы на визуальной трехмерной модели местности (3D ИЦММ) с помощью цветового кодирования зависимости от результатов сравнительного анализа соотношений ограничивающего уклона продольного профиля дороги, проектных уклонов трассы и среднего уклона местности.

В процессе построения 3D-модели трассы применяются два варианта цветовой индикации ее участков: зеленым цветом, если средний уклон местности и уклон трассы не превышают ограничивающий; красным цветом, если средний уклон местности или уклон трассы превышают ограничивающий.

Рассмотрим математическое описание и алгоритм нового метода автоматизированного трассирования с визуальной обратной связью на основе цветовой индикации участков трассы напряженного хода. Математическое описание метода базируется на применении аналитической геометрии, а его реализация — на алгоритме построения вертикальных плоскостей, проходящих через трассу, и вычислении координат и высот то-

чек их пересечения с ребрами триангуляции TIN-модели рельефа. Исходными данными являются 3D-модель трассы участка железной дороги, состоящая из прямых и кривых, и цифровая TIN-модель рельефа.

Алгоритм реализации метода заключается в последовательном решении следующих задач:

1. Построение вертикальных плоскостей, проходящих через точки трассы, и определение точек их пересечения с ребрами триангуляции TIN-модели рельефа.

Исходные данные: точки трассы $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$, являющиеся границами прямого участка или хорды дуги кривой; 3D-отрезок (ребро треугольника триангуляции), ограниченный точками $C(x_3, y_3, z_3)$, $D(x_4, y_4, z_4)$.

Решение. Шаг 1. Получение уравнения вертикальной плоскости.

Плоскость проходит через две точки $A(x_1, y_1, 0)$, $B(x_2, y_2, 0)$ и имеет нормаль, перпендикулярную плоскости XY.

Для получения уравнения плоскости берем третью точку $A' = (x_1, y_1, 1)$ и строим в плоскости два вектора:

$$\vec{u} = B - A = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, 0) \text{ и } \vec{v} = A' - A = (0, 0, 1).$$

По их векторному произведению определим нормаль к плоскости [5, 6]:

$$\vec{n} = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = (y_2 - y_1, -(x_2 - x_1), 0)$$

и получим уравнение плоскости

$$n_x(x - x_1) + n_y(y - y_1) = 0$$

или

$$(y_2 - y_1)(x - x_1) - (x_2 - x_1)(y - y_1) = 0.$$

Шаг 2. Получение параметрического уравнения отрезка CD [7, 8].

Пусть точка на отрезке CD задается параметром $t \in [0, 1]$, тогда:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_3 + t(x_4 - x_3), \\ y(t) &= y_3 + t(y_4 - y_3), \\ z(t) &= z_3 + t(z_4 - z_3). \end{aligned}$$

Шаг 3. Определение точки пересечения плоскости с отрезком CD.

Подставим координаты точки отрезка $x(t), y(t)$ в уравнение вертикальной плоскости [5, 9]:

$$\begin{aligned} (y_2 - y_1)(x(t) - x_1) - (x_2 - x_1)(y(t) - y_1) &= 0 \\ (y_2 - y_1)(x_3 + t(x_4 - x_3) - x_1) - (x_2 - x_1)(y_3 + t(y_4 - y_3) - y_1) &= 0. \end{aligned}$$

Решим уравнение относительно t :

$$\begin{aligned} At + B &= 0 \\ A &= (y_2 - y_1)(x_4 - x_3) - (x_2 - x_1)(y_4 - y_3), \\ B &= (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(y_3 - y_1), \\ t &= -\frac{B}{A}. \end{aligned}$$

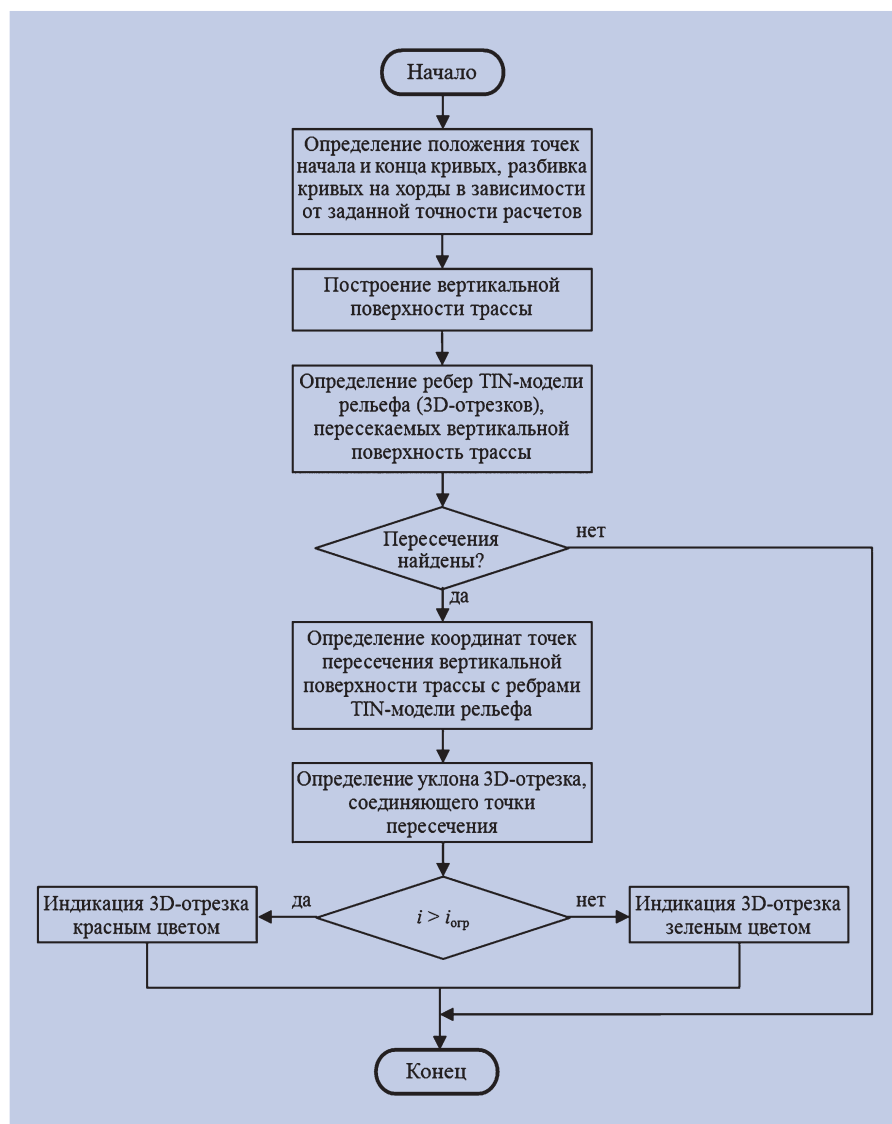
Подставляем найденное значение t в параметрические уравнения отрезка CD:

$$\begin{aligned} x &= x_3 + t(x_4 - x_3), \\ y &= y_3 + t(y_4 - y_3), \\ z &= z_3 + t(z_4 - z_3). \end{aligned}$$

Получаем: если $A \neq 0$, то

$$t = -\frac{(y_2 - y_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(y_3 - y_1)}{(y_2 - y_1)(x_4 - x_3) - (x_2 - x_1)(y_4 - y_3)}$$

точка пересечения



Алгоритм метода интерактивного трассирования железных дорог на цифровых моделях местности

$$\begin{cases} x = x_3 + t(x_4 - x_3) \\ y = y_3 + t(y_4 - y_3) \\ z = z_3 + t(z_4 - z_3) \end{cases}$$

Условия:

- 1) если $t \in [0, 1]$, то пересечение лежит на отрезке CD ;
- 2) если $t < 0$ или $t > 1$, то пересечения с отрезком нет;
- 3) если $A=0$, то плоскость и отрезок параллельны в проекции XU или отрезок лежит в плоскости [5, 9].

2. Построение участка 3D-модели трассы с использованием цветовой индикации.

Исходные данные: при решении задачи 1 определены точки пересечения вертикальной плоскости, проходящей через точки трассы, с ребрами TIN-модели рельефа:

$$\begin{aligned} P_1 &= (x_1, y_1, z_1), \\ P_2 &= (x_2, y_2, z_2). \end{aligned}$$

Решение. Шаг 1. Вычисление длины отрезка:

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}.$$

Шаг 2. Вычисление среднего уклона местности:

$$\begin{aligned} \Delta z &= z_2 - z_1, \\ i &= \Delta z / L, L \neq 0. \end{aligned}$$

Шаг 3. Выбор цвета участка трассы:

$$\text{Цвет} = \begin{cases} \text{красный, если } i > i_{\text{огр}}, \\ \text{зеленый, если } i \leq i_{\text{огр}}, \end{cases}$$

где $i_{\text{огр}}$ — ограничивающий уклон продольного профиля железной дороги.

На рисунке представлен алгоритм реализации метода. Он запускается на выполнение после того, как проектировщик наметит положения вершин углов поворота трассы, укажет радиусы круговых кривых и длины переходных кривых. Затем алгоритм повторяется после каждого перемещения вершин углов поворота.

При его выполнении на прямых участках и хордах кривых в невидимом слое

строится вертикальная поверхность, проходящая через трассу дороги (вертикальная поверхность трассы) и состоящая из вертикальных плоскостей (панелей). Определяются пересекаемые панелями ребра TIN-модели рельефа, вычисляются координаты точек пересечения. Таким образом, находится пересечение вертикальной поверхности трассы с поверхностью земли, т. е. продольный профиль земли вдоль трассы.

Для каждого 3D-отрезка, соединяющего точки пересечения, рассчитывается уклон местности i , который сравнивается с ограничивающим уклоном продольного профиля дороги $i_{\text{огр}}$, по результатам сравнения определяется цвет отрезка для его цветовой индикации на ЦММ.

Интерактивность метода заключается в том, что все операции выполняются в режиме реального времени через COM-интерфейс win32com.client в Python, результат визуализируется автоматически.

Для описания геометрии используются базовые операции над векторами: скалярное и векторное произведения, нормализация, проверка принадлежности точки прямоугольной панели. Пересечение линии и плоскости вычисляется аналитически, что делает метод легким и независимым от ограничений API-функции IntersectWith [10], которые не всегда поддерживают сложные типы объектов.

Все расчеты выполняются непосредственно в 3D-пространстве САПР nanoCAD, что обеспечивает: визуализацию реальных координат и уклонов; использование существующих геометрических элементов ЦММ; совместимость с геодезическими данными, импортированными из форматов Land XML, DXF или DWG.

К основным преимуществам предлагаемого метода интерактивного трассирования железных дорог на ЦММ относятся:

- мгновенная визуальная обратная связь при изменении положения вершин углов поворота трассы;
- отсутствие необходимости в сложных поверхностных операциях;
- простота реализации и интеграции в стандартную среду САПР;
- высокая вычислительная эффективность за счет аналитического решения уравнений;
- наглядная визуализация участков трассы.

Заключение

Разработанный метод интерактивного трассирования железных дорог на ЦММ обеспечивает технологичное сочетание аналитических расчетов показателей трассы с их наглядной визуализацией на экране монитора и позволяет объединить вычислительный анализ с визуальной оценкой проектных решений. Благодаря использованию цветовой индикации инженер получает интуитивно понятное представление о пространственном положении трассы, что ускоряет процесс принятия решений и снижает вероятность ошибок.

Реализация предлагаемого метода в САПР железных дорог позволит также перейти от применения классических графоаналитических методов определения положения трассы в плоских проекциях к интерактивному пространственному проектированию на 3D ИЦММ [3].

Метод может служить базой для создания и применения интеллектуальных модулей трассирования в автоматизиро-

ванном проектировании линейных сооружений. Его реализация на Python с использованием API nanoCAD демонстрирует гибкость и открытость современных САПР для прикладных инженерных задач. **Т**

Литература

1. Горинов А. В., Кантор И. И., Кондратченко А. П., Турбин И. В. Изыскания и проектирование железных дорог: в 2 т. М.: Транспорт, 1979. Т. 1. 320 с.
2. Копыленко В. А. Изыскания и проектирование железных дорог. М.: УМЦ ЖДТ, 2021. 690 с.
3. Анисимов В. А., Булакаева О. С., Шкурников С. В. Функциональная модель системы автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. Вып. 4. С. 117–130.
4. Анисимов В. А., Пренинг Р. Д. Совершенствование математического обеспечения оптимального трассирования железных дорог в условиях пересеченно-

го рельефа местности // Транспорт Российской Федерации. 2025. № 6(121). С. 55–60.

5. Погорелов А. В. Аналитическая геометрия: учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1988. 240 с.
6. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Аналитическая геометрия: учебник для вузов. М.: Физматлит, 2004. 256 с.
7. Кудрявцев Л. Д. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учеб. пособие для вузов. М.: Физматлит, 2005. 656 с.
8. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. 13-е изд., испр. М.: Наука, 1986. 608 с.
9. Журавлев Ю. И. Вычислительная геометрия и компьютерная графика. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 312 с.
10. Нанософт разработка. Платформа nanoCAD. Версия 26.0: руководство пользователя. М.: Нанософт разработка, 2026. 2264 с.



Общероссийская общественная организация

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА

Основные направления деятельности



Разработка концепций, технико-экономических обоснований строительства объектов транспортной инфраструктуры



Проведение комплексных научно-исследовательских работ



Научно-техническая, экспертная и методическая поддержка проектов строительства и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры



Разработка предложений по повышению перерабатывающей способности станций, разработка имитационной модели



Разработка нормативно-технических документов и научно-технических обоснований (СП, ГОСТ, НТО, СТО)



Разработка комплексных схем организации улично-дорожной сети



Разработка схем транспортного планирования и комплексных планов развития транспортной инфраструктуры регионов

www.rosacademtrans.ru

info@rosacademtrans.ru