УДК 625.151

С. С. КОЖЕДУБ, П. В. КОВТУН
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

НАПРАВЛЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ЗАМЕНЕ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Рассматривается задача оптимизации проектирования стрелочных переводов в условиях ограниченного пространства, характерного для промышленных предприятий и железнодорожных узлов. Предложена математическая модель, позволяющая находить оптимальные геометрические параметры стрелочного перевода с учётом технических, эксплуатационных и пространственных ограничений. Применение методов оптимизации и цифрового 3D-моделирования способствует снижению трудозатрат, сокращению сроков проектирования и повышению точности укладки. Показаны преимущества интеграции численных, эвристических и безградиентных методов оптимизации, а также перспективы использования моделей машинного обучения и искусственного интеллекта для автоматизации проектирования.

Замена стрелочных переводов в стесненных условиях ограниченного пространства представляет собой сложную инженерную задачу, особенно актуальную для железнодорожных узлов и промышленных предприятий, где плотность и производственной, и непроизводственной инфраструктуры достигает предельных значений. Традиционные методы проектирования зачастую не обеспечивают достаточной точности и эффективности, что приводит к увеличению сроков работ, необходимости корректировок на этапе монтажа и росту эксплуатационных рисков.

Современные требования к безопасности, надёжности и минимизации простоев требуют перехода к более точным и системным подходам. Одним из перспективных направлений является применение математических моделей оптимизации в сочетании с цифровым моделированием. Такой подход позволяет на этапе проектирования находить наилучшие конфигурации путевого развития и стрелочных переводов, минимизируя временные и экономические затраты.

Стрелочный перевод является сложным элементом железнодорожной инфраструктуры, параметры которого определяют его взаимодействие с подвижным составом и соседними путями. К основным геометрическим параметрам относятся:

– длина стрелочного перевода L;

– угол крестовины стрелки α;

– радиус кривизны переводной кривой R;

– положение относительно существующей колеи и смежных путей, и ряд других.

В условиях стеснённого пространства проектирование осложняется рядом факторов:

– ограничения по строительным габаритам;

– близость соседних железнодорожных путей;

– наличие подземных и наземных коммуникаций (кабели, трубопроводы);

– расположение опор контактной сети, сигнальных устройств и других объектов инфраструктуры.

Таким образом, задача проектирования сводится к поиску такой комбинации параметров (R, α, L), при которой стрелочный перевод:

– удовлетворяет нормативным требованиям по плавности движения (на магистральных путях) и безопасности;

– вписывается в выделенное пространство без нарушения габаритов;

– обеспечивает технологичность монтажа и демонтажа.

Обозначим вектор проектных параметров как $x = (R, \alpha, L)$. Целевой функцией является функция затрат $C(x)$, включающая:

– стоимость материалов;

– трудозатраты на демонтаж и монтаж;

– логистические расходы;

– затраты на проектирование и корректировки.

Минимизация $C(x)$ осуществляется при соблюдении системы ограничений:

$$G_i(x) \le 0,\ i = 1, ..., m,\ H_j(x) \le 0,\ j = 1, ..., n,$$

где $G_i(x)$ – неравенства, отражающие геометрические и технические ограничения (например, $R \ge R_{min}$, $L \le L_{max}$, $\alpha \in [\alpha_{min}, \alpha_{max}]$); $H_j(x)$ – равенства, обеспечивающие стыковку с существующей колеей и смежными путями.

Примеры ограничений:

– минимальный радиус кривой $R \ge 180$ м (в зависимости от категории пути);

– длина стрелочного перевода выше доступного расстояния между препятствиями;

– соответствие отклонения возможности путевого развития;

– соблюдение габаритов.

Данная задача относится к классу задач нелинейного программирования с ограничениями. В силу сложной топологии допустимой области и возможной недифференцируемости целевой функции аналитическое решение затруднено, что требует применения численных и итеративных методов.

Выбор метода оптимизации зависит от характера целевой функции и доступности её аналитического описания.

Если функция затрат $C(x)$ дифференцируема и ограничения гладкие, то могут применяться градиентные методы (например, метод сопряжённых градиентов) или метод Ньютона. Однако такие подходы чувствительны к начальному приближению и могут «застревать» в локальных минимумах.

Для многоэкстремальных и дискретизированных задач эффективны эвристические методы:

– генетические алгоритмы – позволяют искать глобальный оптимум,

моделируя процессы естественного отбора. Популяция решений эволюционирует через операции кроссовера и мутации;

– метод роя частиц – моделирует поведение частиц в поисковом пространстве, ориентируясь на личный и глобальный опыт.

Эти методы устойчивы к шуму и хорошо подходят для задач с нелинейными ограничениями. В случаях, когда $C(x)$ задана в виде «чёрного ящика» (например, имитационная модель или база данных), применяются:

– дифференциальная эволюция, которая эффективна при работе с непрерывными параметрами;

– байесовская оптимизация, формирующая вероятностную модель целевой функции (например, гауссовский процесс) и выбирает точки для оценки с максимальным ожидаемым улучшением.

Перспективным направлением является обучение моделей на исторических данных о проектах. Например, нейронные сети или случайные леса могут предсказывать оптимальные значения x на основе входных данных: топология участка, тип пути, габариты и т. д. Это позволяет значительно ускорить процесс проектирования.

Для точной оценки ограничений используется цифровое трёхмерное моделирование (рисунок 1).

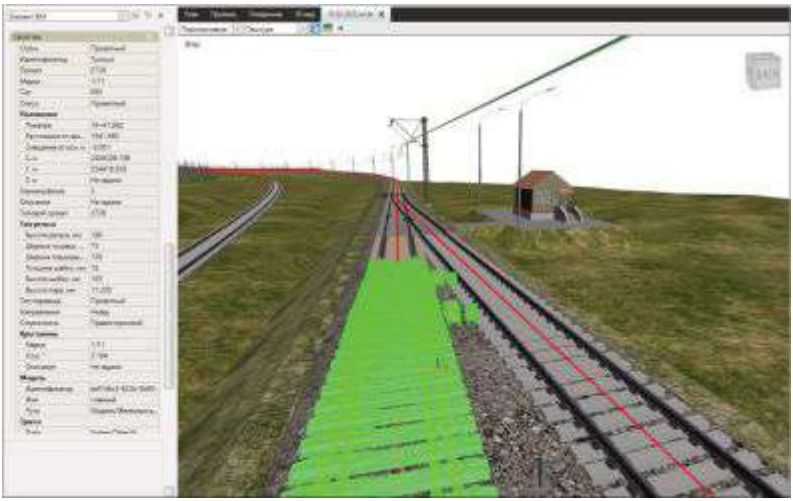


Рисунок 1 – Цифровое трёхмерное моделирование

В качестве исходных данных применяются:

– результаты лазерного сканирования (облака точек);

– данные геоинформационных систем;

– чертежи и паспорта инфраструктуры.

На основе этих данных строится цифровая модель участка, которая включает положение существующих путей, габариты строений, рельеф местности.

В среде BIM (Building Information Modeling) или специализированных CAD-системах (например, Топоматик Robur – Железные дороги, AutoCAD Civil 3D) моделируются возможные конфигурации стрелочных переводов. Система автоматически проверяет пересечения, зазоры и стыковку с колеей.

Кроме того, моделирование позволяет рассчитать траектории укладки (например, при использовании кранов или специальной техники), что особенно важно в условиях ограниченного доступа.

Представленная методика оптимизации проектных решений при замене стрелочных переводов в стеснённых условиях демонстрирует высокую эффективность за счёт интеграции математического моделирования, численных методов оптимизации и цифрового трехмерного моделирования. Подход позволяет находить технически и экономически обоснованные решения, минимизируя многочисленные риски и затраты. Ключевыми преимуществами системы являются:

– повышенная точность проектирования;

– сокращение сроков и стоимости работ;

– возможность анализа множества альтернативных вариантов;

– поддержка принятия решений на основе данных.

В перспективе развитие методики связано с широкой интеграцией искусственного интеллекта в практику. Обучаемые модели смогут рекомендовать оптимальные решения на основе анализа большого массива проектных данных, что сделает процесс проектирования ещё более быстрым и адаптивным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Особенности строительства и эксплуатации железнодорожных путей необщего пользования в стесненных условиях / П. В. Ковтун, О. В. Осипова, С. А. Биндюк, В. А. Мусилович // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2023. – № 2 (47). – С. 38–41.

2 *Ковтун, П. В.* Особенности восстановления объектов путевой инфраструктуры в стесненных условиях / П. В. Ковтун, М. Ю. Никитенко / Строительство и восстановление искусственных сооружений : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 99–101.

S. S. KOZHEDUB, P. V. KOVTUN

AREAS FOR OPTIMIZATION OF DESIGN SOLUTIONS WHEN REPLACING POINT SWITCHES IN CONFINED SPACES

The task of optimizing the design of turnouts in confined spaces, typical for industrial enterprises and railway junctions, is considered. A mathematical model is proposed that allows finding the optimal geometric parameters of a turnout, taking into account technical, operational, and spatial constraints. The use of optimization methods and digital 3D modeling helps to reduce labor costs, shorten design times, and increase the accuracy of installation. The advantages of integrating numerical, heuristic, and gradient-free optimization methods are demonstrated, as well as the prospects for using machine learning and artificial intelligence models for design automation.

Получено 22.10.2025