

# Особенности моделирования трассы автомобильной дороги с использованием единой пространственной «B-сплайновой» кривой высокой степени

М.М. Абдуллин<sup>1</sup>, А.О. Глазычев<sup>1</sup>, В.Г. Муфтеев<sup>1</sup>, М.А. Талыпов<sup>2</sup>, М.М. Фаттахов<sup>1</sup>, П.А. Федоров<sup>1</sup>  
ingenernaya\_grafika@mail.ru|ikafedraig@mail.ru| muftejev@mail.ru  
|marih999@gmail.com|adtsp@yandex.ru|fpa\_idpo@mail.ru

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», Уфа, Россия.

*Система автомобильных дорог России является важной частью транспортной структуры. Высокий износ, затрудненность движения, снижение безопасности дорог приводит к уменьшению количества транспортных перевозок в стране. Кроме того, несовершенная дорожная геометрия не позволяет увеличивать скоростной режим на трассе. В данной статье приведены особенности моделирования трассы с учетом выше указанных недостатков. Рассматриваются геометрические аспекты проектирования трассы дороги в плане. Показываются недостатки и ограничения существующих методов трассирования. Ставится задача выбора и адаптации программы геометрического моделирования для решения задач высококачественного трассирования дороги в плане. Предлагается программа «FairCurveModeler» геометрического моделирования кривых высокого качества по критериям плавности. Проводится сравнительное тестирование методов программы «FairCurveModeler» с методами топовой САД-системы «NX12». Полученные результаты позволяют обеспечить более гладкое построение кривых при проектировании автомобильных и других трасс.*

**Ключевые слова:** дорога, трасса, кривая, компьютерное моделирование, плавность, трассирование

## Features of Modelling the Highway Route Using a Single Spatial “B-spline” Curve of a High Degree

М.М. Abdullin<sup>1</sup>, A.O. Glazychev<sup>1</sup>, V.G. Mufteev<sup>2</sup>, M.A. Talypov<sup>2</sup>, M.M. Fattakhov<sup>1</sup>, P.A. Fedorov<sup>1</sup>  
ingenernaya\_grafika@mail.ru|ikafedraig@mail.ru| muftejev@mail.ru  
|marih999@gmail.com|adtsp@yandex.ru|fpa\_idpo@mail.ru

<sup>1</sup>Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia;

<sup>2</sup>Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia.

*The Russian road system is an important part of the transport structure. High wear, difficulty in driving, and a decrease in road safety lead to a decrease in the number of transportation in the country. In addition, imperfect road geometry does not allow increasing the speed mode on the highway. This article presents the features of the route simulation, taking into account the above disadvantages. The geometric aspects of the design of the road route in the plan are considered. Disadvantages and limitations of existing tracing methods are shown. The task is to select and adapt a geometric modeling program to solve the problems of high-quality road tracing in the plan. The «FairCurveModeler» program is proposed for geometric modelling of high quality curves according to smoothness criteria. A comparative testing of the methods of the «FairCurveModeler» program with the methods of the top CAD system «NX12» is carried out. The results obtained allow for a smoother construction of curves in the design of automobile and other routes.*

**Keywords:** road, track, curve, computer simulation, smoothness, tracing.

### 1. Введение

Создание безопасных и комфортных условий эксплуатации являются ключевыми задачами при проектировании линейных сооружений. Одним из факторов, влияющих на решение этих задач, является моделирование плавности оси трассы, путем выделения рациональных опорных точек для ее построения [5, 3]. В настоящее время эта задача решается с помощью компьютерного моделирования, в основу которых заложены методы трассирования.

В традиционном методе трассирования оси, применяемые общеизвестные геометрические элементы (прямые, круговые кривые, клотоиды и квадратные параболы) оказываются недостаточно гибкими для выработки приемлемых проектных решений при проектировании реконструкций и ремонтов автомобильных дорог. Наиболее "слабым" местом этой технологии оказываются собственно принципы и методы "склейки" геометрических элементов в кусочно-непрерывную линию в плане и продольном профиле, которую мы называем трассой автомобильной дороги. В первую очередь, это повсеместно

применяемые принцип «тангенциального трассирования» и «пикетный» метод изысканий. Основным следствием их применения являются «жесткие» трассы с многочисленными отрезками прямых и кривых малого радиуса, не обеспечивающие зрительной плавности, ясности и гармоничности проектируемых автомобильных дорог. В свою очередь феномен «живучести» этого принципа можно объяснить тем, что для проектировщиков этот принцип более понятен, прост в инженерных расчетах и обеспечивает предельную технико-экономическую привлекательность для инженерно-изыскательских работ.

Одним из оснований перехода к сплайновым кривым является неудобство применения основной схемы в тангенциальной схеме трассирования. «Применение закруглений дороги в плане по классической схеме «клотоида – круговая кривая клотоида» достаточно обосновано с теоретических позиций, но на практике такая схема имеет множество изъянов и неудобств. Если применить какую-либо функцию, которая могла бы одна в какой-то мере классическую схему (составную кривую), то с позиций алгоритмизации и организации диалога «инженер – компьютер» это было бы достаточно эффективно» [1,2].

Практически все программные комплексы проектирования автомобильных дорог, не имеют соответствующих алгоритмов, реализующих методы построения сплайновых кривых высокого качества на касательной ломаной. Об отсутствии надлежащего инструмента построения сплайновыми кривыми протяженных участков, говорит тот факт, что нежелательная прямая вставка длиной  $L < 300$  м, как правило, встречается около 36% случаев [2].

Сплайновые кривые высоких степеней могут обеспечить не только единое представление протяженного участка трассы с удобным геометрическим объектом для редактирования, но и высокое качество трассы по критериям плавности.

При моделировании кривых в CAD-системах используются два вида сплайновых кривых:

- локальные сплайны или геометрические сплайны. Исходные данные представляют собой ГО Эрмита в виде опорной ломаной с фиксированными направлениями касательных и значениями кривизны в вершинах опорной ломаной. Каждый сегмент определяется независимо от других сегментов по заданным параметрам ГО Эрмита.

- NURBS кривые высоких степеней. Для моделирования кривых высокого качества (класса А) используются NURBS кривые высоких степеней. NURBS кривые степени  $m$  обеспечивают порядок гладкости  $(m-1)$ -го порядка гладкости. Применяются два основных метода – метод построения глобального сплайна на опорной ломаной (в топовых CAD-системах) и прямой метод непосредственного задания ГО NURBS кривой в виде S-полигона (применяется во всех CAD-системах).

Глобальные сплайны строятся на ломаной линии с использованием опорных точек. При определении параметров сегмента сплайна используются не только координаты вершин опорной ломаной, но и равенство производных различных порядков смежных сегментов в точках стыка сегментов. Эти условия приводят к необходимости решения системы уравнений. При этом опорные точки принимаются за узловые точки сплайна. В общем случае, изменение положения любой точки влияет на форму сплайна в целом. Считается, что построение глобального сплайна минимизирует некоторый энергетический функционал и обеспечивает плавность кривой в целом [6].

При прямом методе построения сплайна непосредственно задается управляющая ломаная сплайна (S-полигон), конфигурация которой достаточно точно определяет форму сплайновой кривой. Но прямой метод является трудоемким, так как для хорошего приближения эскиза кривой необходимо достаточно долго и кропотливо корректировать форму S-полигона.

Обычно построение выполняют в два этапа: автоматическое построение глобального сплайна; редактирование сплайна посредством S-полигона для достижения хорошего качества кривой на критических участках.

## 2. Программа моделирования

Авторами для моделирования трассы высокого качества предлагается программа «FairCurveModeler». В ней используется метод построения виртуальной кривой (B-сплайновой кривой или V-кривой) высокого качества (класса C5), которая затем аппроксимируется посредством рациональной кубической сплайновой кривой или B-сплайновой кривой высокой четной степени  $m$ , ( $m = 4/6/8/10$ ). В работе [4] была показана возможность применения программы «FairCurveModeler» для трассирования осевой линии дороги высокого качества по

критериям плавности в системе «IndorCAD/Road». Возможность определения «V-кривой» на дуальном геометрическом определителе позволяет строить и редактировать трассу одинаково высокого качества, как по пикетам, так и на ломаной тангенциального хода. Способ «V-кривой» с аппроксимацией B-сплайновой кривой высокой степени обеспечивает высокое качество трассы с участками перегиба и пространственной формы с обеспечением высокого порядка гладкости с плавным изменением кривизны и кручения во всех точках кривой.

Преимущество «FairCurveModeler» перед топовыми CAD-системами при моделировании трассы дороги показывается путем тестирования с использованием релиза «FairCurveModeler app AutoCAD» [6]. В качестве топовой CAD-системы принята система «NX 12» фирмы Siemens.

Среди систем автоматизированного проектирования автомобильных дорог «IndorCAD/Road» (разработчик ООО «ИндорСофт») является наиболее подходящей для интеграции с программой «FairCurveModeler».

Отличительной особенностью метода трассирования в этой системе является возможность применения NURBS кривой 5-ой степени непосредственно при формировании и редактировании трассы. NURBS 5-ой степени, в потенциале, позволяет сохранить высокий порядок гладкости (4-ый порядок). Высокий порядок гладкости NURBS кривой 5-ой степени позволяет конструировать трассы с пространственной осевой линией с непрерывным и плавным кручением. Это важно при проектировании спортивных трасс и выражей дроз.

NURBS кривая 5-ой степени используется в «IndorCAD/Road» в формате составной кривой Безье 5-ой степени.

Для оценки эффективности системы «IndorCAD/Road» с программой «FairCurveModeler» рассмотрим одну из наиболее распространенных систем применяемых для моделирования трасс систему «NX», разработчиком которой является «Siemens PLM Software».

## 3. Результаты

Рассмотрим построение кривой класса F принадлежащей окружности. Основное требование к качеству функциональных кривых – это минимизация вершин кривой и плавное изменение кривизны. Очевидно, что единственная кривая с минимальным количеством вершин – это окружность. Наиболее показательный тест для отбраковки методов, не удовлетворяющих требованиям к методам моделирования кривых класса F – это тест на ломаной, принадлежащей окружности. Проверим, относится ли метод построения кривых линий, реализованные в системе «NX» для построения глобального сплайна к методам класса F.

Построим на точках окружности сплайн 8-ой степени в системе «NX» и проверим качество сплайна. Как видно из рисунка 1, а полученная кривая имеет ярко выраженные скругленные вершины и визуально не совпадает с окружностью.

Определим макропараметры сплайна системы «NX»:  
"Real Length = " 628.301; "Approximated Length = " 613.968;  
"Potential Energy = " 0.0661325; "Min Curvature = " 0.00740515; "Max Curvature = " 0.0136768. Макропараметры:  
"Real Length = " 905.272; "Approximated Length = " 627.298;  
"Potential Energy = " 0.0627298; "Min Curvature = " 0.01; "Max Curvature = " 0.01.

Пульсация кривизны (-0.0136768 0.00740515) = 0.00627165, что в процентах составляет 62.7165% от номинального значения кривизны.

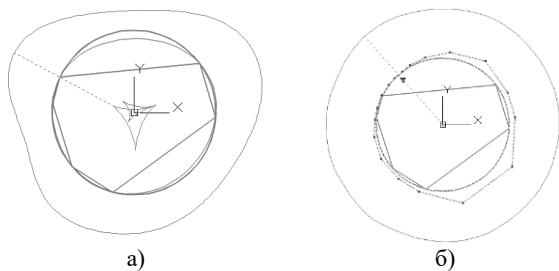


Рис. 1. Результат моделирования окружности

Построим в «FairCurveModeler» V-кривую, аппроксимированную B-сплайновой кривой 8-ой степени (рисунок 26).

Макропараметры: "Real Length = " 769.591; "Approximated Length = " 628.644; "Potential Energy = " 0.0627792; "Min Curvature = " 0.00974056; "Max Curvature = " 0.01025.

Построенная кривая визуально совпадает с окружностью. Значение кривизны находится в пределах [0.00974056, 0.01025].

Пульсация кривизны не превышает значения  $(-0.01025 - 0.00974056) = 0.00050944$ , что составляет 5.0944 % от номинального значения кривизны.

Очевидно, что тест показывает, что метод моделирования кривых класса F в системе «NX» не обеспечивает требуемого качества.

Случай построения трассы с участком перегиба в программе «FairCurveModeler» приведен на рисунке 2, где на опорной ломаной с участком перегиба построена B-сплайновая кривая 8-ой степени. Концевые сегменты ломаной используются для задания направлений касательных в концевых точках сплайна.

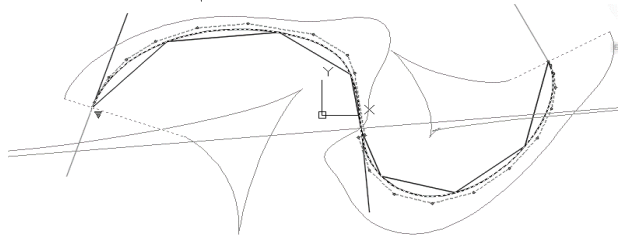


Рис. 2. Результат моделирования B-сплайновой кривой

Аппроксимация с помощью B-сплайновой кривой сохраняет направление касательной в точке перегиба и сохраняет фиксированные значения кривизны в концевых точках V-кривой.

#### 4. Заключение

По результатам проведенной работы получены следующие выводы:

- рекомендован способ моделирования трассы автомобильной дороги, заключающийся в совместном использовании программы «FairCurveModeler» в системе «IndorCAD/Road»;
- результат сравнительного тестирования, установил, что при моделировании трассы автомобильной дороги высоко качества, рекомендованный способ, реализуемый с помощью программы «FairCurveModeler» в системе «IndorCAD/Road» показал наименьшую пульсацию кривизны от номинального значения, перед методами топовой CAD-системы «NX12».

#### 5. Литература

- [1] Бойков, В.Н. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог (на примере IndorCAD Road) /

В.Н. Бойков, Г.А. Федотов, В.И. Пуркин. – М: Изд-во МАДИ (ГТУ), 2005. – 224 с.

- [2] Бойков В.Н. Методология и практические методы автоматизированного трассирования реконструируемых автомобильных дорог: Автореф. дисс...д-р техн. наук, 05.23.11 /МАДИ. – М., 2002.– 47 с.
- [3] Ma, G. C., Wu, F. J., and Zhang, S. S. (2008). Research on Modeling Free-form Curved Surface Technology. In Global Design to Gain a Competitive Edge (pp. 51-60). Springer, London. DOI[https://doi.org/10.1007/978-1-84800-239-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-84800-239-5_6)
- [4] Муфтеев, В.Г. Моделирование плавности оси автомобильной дороги с использованием программы FairCurveModeler / В.Г. Муфтеев, М.А. Тальпов, М.М. Абдуллин, П.А. Федоров, М.М. Фаттахов // Сборник: Проблемы строительного комплекса России XVIII Международная научно-техническая конференция. – Уфа: ...2014. С. 152-155.
- [5] Фаттахов, М.М. Моделирование параметров автомобильных дорог в архитектурно-ландшафтном проектировании (с элементами дорожной геометрии) / М.М. Фаттахов, П.А. Федоров, М.М. Абдуллин, В.Г. Муфтеев, А.Р. Марданов. – Уфа: Изд-во "Нефтегазовое дело", 2014. – 268 с.
- [6] Фокс, А. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / А. Фокс А., М. Пратт. Пер.с англ. – М.: Мир, 1982. – 304 с

#### Об авторах

Абдуллин Марат Мансурович, к.т.н., профессор кафедры комплексного инжиниринга и компьютерной графики Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: [ingenernaya\\_grafika@mail.ru](mailto:ingenernaya_grafika@mail.ru)

Глазьев Антон Олегович, к.т.н., доцент кафедры комплексного инжиниринга и компьютерной графики Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: [ikafedraig@mail.ru](mailto:ikafedraig@mail.ru)

Муфтеев Валериян Гайнизаманович, к.т.н., доцент кафедры автомобильные дороги и технология строительного производства Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: [muftejev@mail.ru](mailto:muftejev@mail.ru)

Тальпов Марат Артурович, аспирант кафедры доцент кафедры механики и инженерной графики Башкирского государственного аграрного университета. E-mail: [marih999@gmail.com](mailto:marih999@gmail.com)

Фаттахов Мухарям Миниярович, д.т.н., профессор кафедры автомобильные дороги и технология строительного производства Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: [adtsp@yandex.ru](mailto:adtsp@yandex.ru)

Федоров Павел Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: [fpa\\_idpo@mail.ru](mailto:fpa_idpo@mail.ru)