

## Содержание

Прикладная САПР моделирования трассы и элементов трассы дороги

Функциональные кривые линии в САПР

Динамика движения материальной точки по криволинейной траектории

Пример формирования клотоидных вставок в программе AutoCAD с помощью Web-приложения FairCurveModeler

Утилита построения виража по первой схеме

Библиографический список к главе

## Прикладная САПР моделирования трассы и элементов трассы дороги

### Функциональные кривые линии в САПР

Основной задачей проектирования линейных объектов (трассы дорог) включает в себя набор органично связанных кривых линий в сочетании с ландшафтом местности, при трассировании. В свою очередь проектирование может выполняться как в ручную, так и с помощью САПР, однако при этом возникает необходимость ручной доработки графической части. В дальнейшем мы рассматриваем модели кривых линий при автоматизированном проектировании линейных объектов.

Модели кривых в САПР рассматриваются как определители кривых  $F(\Gamma O)[A]$  состоящих из геометрической части ( $\Gamma O$ ) и алгоритмической части  $[A]$ .

К методам определения функциональных кривых предъявляются следующие требования:

- устойчивость формообразования – изогеометричность – форма  $\Gamma O$  однозначно определяет форму кривой с точностью до количества точек перегиба;

- способность обеспечения высокого качества определяемых кривых по критериям плавности;
- гибкость – возможность построения кривой с минимизацией потенциальной энергии не ГО в целом, так и возможность локального редактирования без существенных нарушений качества кривой в целом. Возможность построения прямолинейного участка или участка конической кривой на кривой при сохранении общего порядка гладкости;
- инструментальное разнообразие – возможность использования различных типов ГО определителей для построения и редактирования кривой.

Опытом использования САПР в проектировании объектов с функциональными кривыми и поверхностями выработаны основные требования к их качеству. Эти требования инвариантны к специфике объектов проектирования и одинаковы при моделировании обводов самолёта, судна, в дизайне автомобилей и при трассировании дороги и т.д. Основные критерии плавности – порядок гладкости кривой и количество экстремумов кривизны (или вершин кривой). Модели кривых должны обеспечивать высокий порядок гладкости, а именно плавность изменения кривизны, минимальное число вершин, плавность кручения пространственных кривых.

Функциональные кривые и поверхности определяют проектные характеристики трассы дорог и к ним предъявляются высокие требования. Профессор G. Farin, ввёл понятие “кривые класса А”, с целью обозначения кривых высокого качества, применяемых при дизайне поверхностей в системах CAD/CAM [Farin 2006]. Основными критериями качества функциональных кривых являются порядок гладкости и плавность кривой. Синоним понятия “кривая высокого качества” это “плавная кривая” (“faired curve”). Этот термин появился в работах, посвящённых улучшению качества кубических параметрических сплайнов [Kjellander 83, Farin et al 87]. Этим термином в статье [Farin 2006] обозначаются кривые с монотонным изменением кривизны. К настоящему большое количество работ посвящено проблеме улучшения качества моделируемых кривых. Используются различные подходы к “улучшению” кривых: минимизация энергетического функционала [Mehlum 1974, Brunnett & Kiefer 94], применение “электронных лекал” [McConalogue 71], улучшение конических сплайнов [Frey & Field 2000, Yang 2004], кривых Безье [Mineur et al 98, Wang 2003], b-сплайновых кривых [Kjellander 83], NURBS кривых [Seymour & Unsworth], применение клотоидных и спиральных сплайнов [Meek & Walton 91, Walton & Meek 98]. Из анализа пространственной криволинейной траектории движения

материальной точки, можно сформулировать требования, которые рассмотрены выше.

Рассмотрим схему моделирования кривой линии заданной геометрической структуры в САПР для линейного объекта. Первоначально вводится информация о местности, где осуществляется проектирование линейного объекта либо с помощью создания «Цифровой модели местности (ЦММ)», либо путём сканирования топографического плана и использования его как «подоснову». Информация о кривой может быть задана в виде эскиза лекальной кривой или её дискретных точек, множества точек снятых с натуры с помощью измерительной системы (геодезическая съёмка местности). Данная процедура является необходимой частью процесса моделирования кривой. Далее оператор САПРа производит изогеометрическую аппроксимацию геометрического определителя аналитической (кусочно-аналитической) кривой заданного класса или построение алгоритма генерации точек кривой на заданных параметрах геометрического определителя. Переход к другому типу определителя кривой осуществляется путём эквивалентного преобразования или путём изогеометрической аппроксимации определителя кривой для её редактирования с помощью параметров нового геометрического определителя.

В конечном счете любая кривая в САПР приводится к формату NURBS представления. NURBS - Non Uniform Rational Basis Spline (рациональный b-сплайн на неравномерной сетке). Благодаря своим свойствам (минимальности носителя информации геометрической модели, возможности точного представления конических кривых, прямолинейных участков, возможности представления как плоских, так и пространственных кривых, возможности локального редактирования формы кривой с сохранением общего порядка гладкости), NURBS кривые стали стандартом представления кривых в САПР.

Можно выделить два основных формата представления NURBS кривых: рациональная b-сплайновая кривая (NURBS кривая), рациональная сплайновая кривая Безье (NURBzS кривая).

Авторами разработаны методы изогеометрического моделирования кривых линий высокого качества [Муфтеев 80, Osipov&Muftejev, Муфтеев 2006, 2007, 2009]. Разработан программно-методический комплекс (ПМК)

САПР FairCurveModeler. Ранее данная программа изогеометрического моделирования кривых линий высокого качества использовалась в авиастроении для моделирования обводов самолёта в плазово-шаблонном производстве и при изготовлении деталей сложных форм на станках с ЧПУ.

Инновационные методы моделирования функциональных кривых высокого качества по критериям плавности, разработанные первоначально для конкретных САПР, например, для машиностроительных, неизбежно находят применение для других объектов с функциональными кривыми и поверхностями, в данном конкретном случае для проектирования линейных объектов (оси трассы дороги).

Данная работа посвящена адаптации и развитию ПМК FairCurveModeler моделирования кривых высокого качества для применения в САПР линейных объектов (оси трассы дороги). Разработаны методика использования ПМК FairCurveModeler для трассирования и профилирования дороги. На основе методов моделирования кривых линий класса A разработано web-приложение FairCurveModeler [Муфтеев и др. 2012] для САД систем, таких как AutoCAD и КОМПАС 3D. Для которых разработаны быстрые методы обмена NURBS моделями кривых. Другие САД системы могут обмениваться с web-приложением посредством образов DXF-файлов. Далее в параграфе 11.8 приводится пример использования комплекса AutoCAD + Web-приложение FairCurveModeler для формирования клотоидной вставки.

Кривые в FairCurveModeler моделируются на базе виртуальной кривой ( $v$ -кривой) 5-го порядка гладкости с плавным изменением кривизны.  $V$ -кривая аппроксимируется рациональной сплайновой кривой Безье (NURBS кривой) или рациональной  $b$ -сплайновой кривой (NURBS кривой). Конические кривые моделируются и аппроксимируются NURBS кривыми геометрически точно.

Web-приложение FairCurveModeler позволяет оценивать качество пространственных кривых по графикам кривизны, значению потенциальной энергии. Для всесторонней оценки модель NURBS кривой из web-приложения передается в математический пакет MathCAD.

Математический пакет MathCAD может использоваться для моделирования аналитических кривых (например, клотоиды) и передачи аналитических кривых в web-приложение. Аналитические кривые в web-

приложении аппроксимируется рациональной сплайновой кривой Безье с высокой точностью.

Подробно описание web-приложения FairCurveModeler приводится на сайте разработчиков <http://spliner.ru>.

### Динамика движения материальной точки по криволинейной траектории

Если рассматривать автомобиль на трассе, как материальную точку, движущуюся по криволинейной траектории, то для анализа динамики движения можно использовать основное уравнение динамики [Карякин и др. 69], связывающее силу  $F$ , массу  $m$ , скорость  $v$  и ускорение  $a$  по времени  $t$

$$F = ma = m \frac{d\mathbf{v}}{dt}. \quad (11.3.1)$$

При криволинейном движении вектор силы  $F$ , как и ускорение  $a$ , лежит в соприкасающейся плоскости и может быть разложен на составляющие:

– касательную

$$F_t = ma_t = m \frac{dv}{dt}; \quad (11.3.2)$$

– нормальную

$$F_n = ma_n = m \frac{v^2}{\rho}.$$

Для криволинейной траектории движения модуль ускорения  $a = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$  имеет следующее выражение:

$$a = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{\rho}\right)^2}, \quad (11.3.3)$$

где  $\rho$  – радиус кривизны траектории движения.

Если пространственная кривая линия траектории движения задана в параметрической форме:

$$r(s) = [X(s), Y(s), Z(s)], \quad (11.3.4)$$

то кривизна  $\chi(s)$  и радиус кривизны из (3)  $\rho(s)$  определяются выражениями:

$$\chi(s) = \frac{r'(s) \times r''(s)}{|r'(s)|^3}, \quad \rho(s) = \frac{1}{\chi(s)}. \quad (11.3.5)$$

При постоянной линейной скорости  $v = const$  касательная составляющая ускорения  $\left(\frac{dv}{dt}\right) = 0$ . Тогда динамика движения зависит только от параметров (4) и (5) пространственной кривой линии траектории движения

$$a = \frac{v^2}{\rho(s)} = v^2 \cdot \chi(s). \quad (11.3.6)$$

Условием безударного движения материальной точки по криволинейной траектории является непрерывность функции кривизны (5).

Условием действительно плавного движения материальной точки по криволинейной траектории является плавность изменения кривизны. То есть векторная функция кривизны (5) должна быть непрерывной до первых производных. При этом линия траектории должна быть непрерывной до третьих производных.

Для плавного перемещения материальной частицы по пространственной траектории необходимо обеспечить для пространственной траектории движения плавность кручения. Векторная функция кривизны (5) должна быть непрерывной до вторых производных. При этом линия траектории должна быть непрерывной до четвертых производных.

Высокий порядок гладкости линии движения сам по себе не обеспечивает плавности траектории. Порядок гладкости характеризует локальную плавность кривой.

Плавность линии зависит также от формы графика изменения кривизны по длине линии движения. Пульсация кривизны вызовет согласно основному уравнению (1) динамики [Карякин и др. 69] пульсацию центробежных сил, действующих на материальную точку. Поэтому участок линии движения должен иметь минимальное число экстремумов кривизны или минимальное число вершин кривой линии.

Таким образом, для построения действительно плавной траектории движения необходимо обеспечить минимальное количество вершин моделируемой траектории движения и высокий, не ниже 4-го, порядок гладкости.

Плавность кривой оценивается также потенциальной энергией упругой рейки, деформированной без усилий растяжения по контуру кривой [Horn 83, Вајај 98]. Отметим, что контур упругой рейки или “гибкой линейки” используется для построения качественной трасы дороги: “Суть принципа «гибкой линейки» состоит в том, что на крупномасштабном плане либо карте, сообразуясь с рельефом и ситуацией, вписывают плавную линию от руки или с помощью специальной гибкой линейки – сплайна”, “Принцип «гибкой линейки» является фундаментальной основой определения положения клотоидных трасс автомобильных дорог, обеспечивающих их наибольшую зрительную плавность и ясность, уровни удобства и безопасность движения и т.д.” [Справочная энциклопедия дорожника 2007],

Считается, что из двух кривых с одинаковыми параметрами плавности, построенных на одном и том же геометрическом определителе, лучшая кривая имеет меньшую потенциальную энергию.

Потенциальная энергия кривой принимается равной интегральной сумме квадрата кривизны по длине кривой [Вајај, Horn]

$$E = \int_0^L \chi(s)^2 ds \quad (11.3.7)$$

В работе авторов [Муфтеев и др. 2012 Уфа] показывается также влияние данного параметра траектории на энергетические затраты при движении материальной точки.

Согласно формуле (3) при постоянной тангенциальной скорости материальной точки по криволинейной траектории нормальное ускорение пропорционально кривизне (5). Нормальное ускорение вызывает нормальное давление материальной точки на носитель криволинейной траектории, которое в некоторых случаях (вогнутая поверхность плуга, трасса дороги и

т.п.), суммируясь с весом материальной точки, вызывает усиление сил трения в тангенциальном направлении. Работа  $A_{tn}$ , в общем случае, на преодоление данной составляющей силы трения  $F_{tn}$  пропорциональна интегральной сумме произведения массы  $m$ , квадрата тангенциальной скорости  $v^2$ , абсолютного значения кривизны  $|\chi(s)|$  и коэффициента трения  $k_{tn}$  по длине траектории движения

$$F_{tn} = m a_n k_{tn} = m v^2 |\chi(s)| k_{tn} \quad (11.3.8)$$

$$A_{tn} = \int_{L_0}^{L_1} F_{tn} ds = \int_{L_0}^{L_1} m v^2 |\chi(s)| k_{tn} ds \quad (11.3.9)$$

При постоянных значениях тангенциальной скорости, массы, коэффициента трения работа (9) равна произведению тангенциальной скорости, массы, коэффициента трения и интегральной суммы абсолютного значения кривизны по длине кривой.

$$A_{tn} = \int_{L_0}^{L_1} F_{tn} ds = m v^2 k_{tn} \int_{L_0}^{L_1} |\chi(s)| ds \quad (11.3.10)$$

Для оценки качества криволинейной траектории интегральную составляющую в формуле можно выделить в отдельный параметр плавности траектории на участке L0-L1

$$Fair = \int_{L_0}^{L_1} |\chi(s)| ds \quad (11.3.11)$$



Очевидно, что, если кривая обладает минимальной энергией (7), то она обладает и минимальной интегральной суммой абсолютного значения кривизны по длине кривой (11).

Следовательно, чем меньше потенциальная энергия криволинейной траектории (7), тем меньше энергии (10) будет затрачиваться при перемещении материальной точки по криволинейной траектории на преодоление сил трения, возникающих от нормального ускорения материальной точки.

Отметим, что эти выводы корректны только для тех случаев, когда вектор нормального ускорения направлен в сторону поверхности - носителя криволинейной траектории или касательно к поверхности - носителя криволинейной траектории (трасса дороги в плане, вогнутый участок профиля дороги и т.п.).

### **Пример формирования клотоидных вставок в программе AutoCAD с помощью Web-приложения FairCurveModeler**

#### **Сопряжение клотоидной вставкой прямолинейного участка трассы с радиусным участком**

Пусть задан участок клотоидного сопряжения длиной  $L=500\text{м}$  и радиусом закругления в конечной точке  $R=100\text{м}$ . Необходимо построить клотоидную вставку.

**Решение**

# 1) Формируем в web-приложении FairCurve Modeler произвольный NURBzS шаблон клотоиды (рисунок 1).

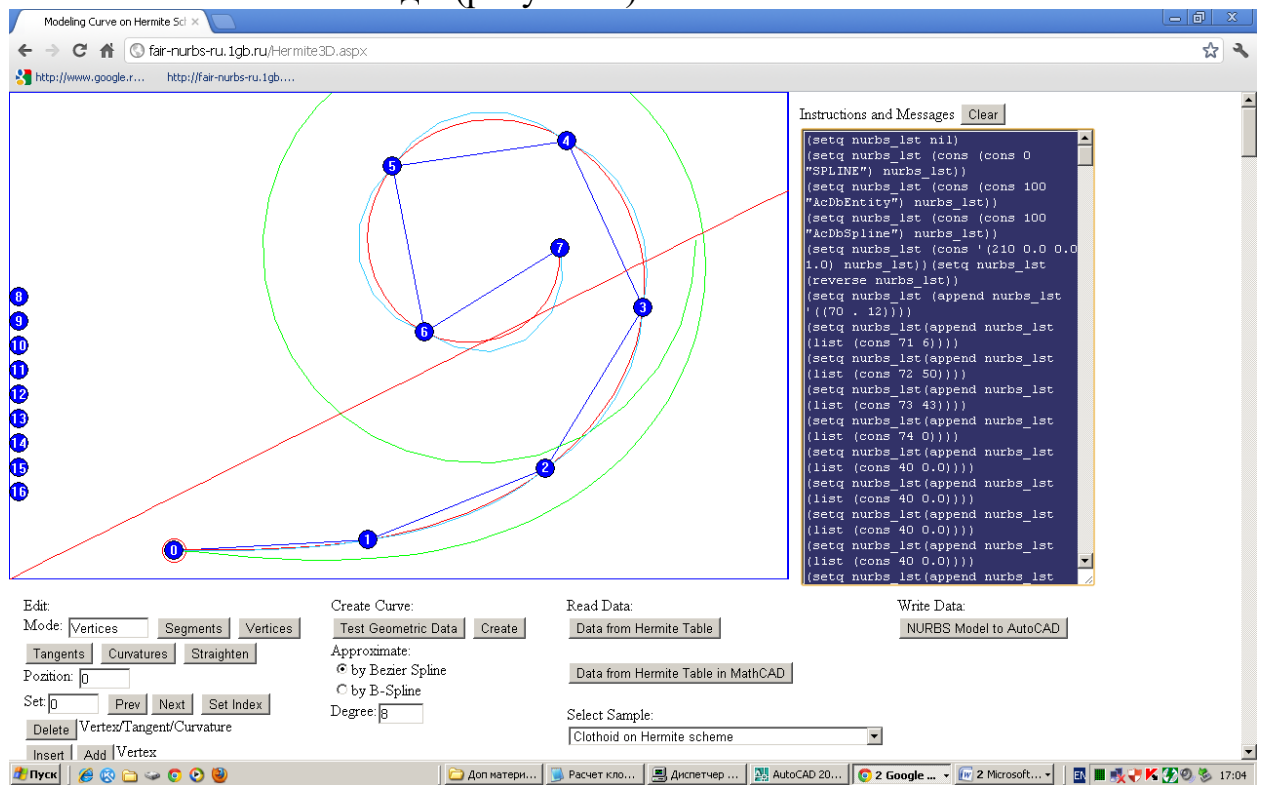


Рисунок 11.8.1. NURBzS шаблон клотоиды. Отображаются графики кривизны (график кривизны построенный на нормалях к кривой (зеленый цвет) и график кривизны как функция  $F(x)$  (красный цвет)).

Переносим из web-приложения NURBzS шаблон клотоиды в AutoCAD (рисунок 2). С помощью утилиты `v_test.fas` приложения FairCurveModeler, предназначенной для обеспечения комплексной работы в AutoCAD + FairCurveModeler, измеряем длину и определяем кривизну в конечной точке. Для этого выполняем команды `v_test` и затем `v_testb` (команда `v_test` отображает графики кривизны, команда `v_testb` выводит параметры и строит окружности кривизны в конечных точках сплайна) (рисунок 3).

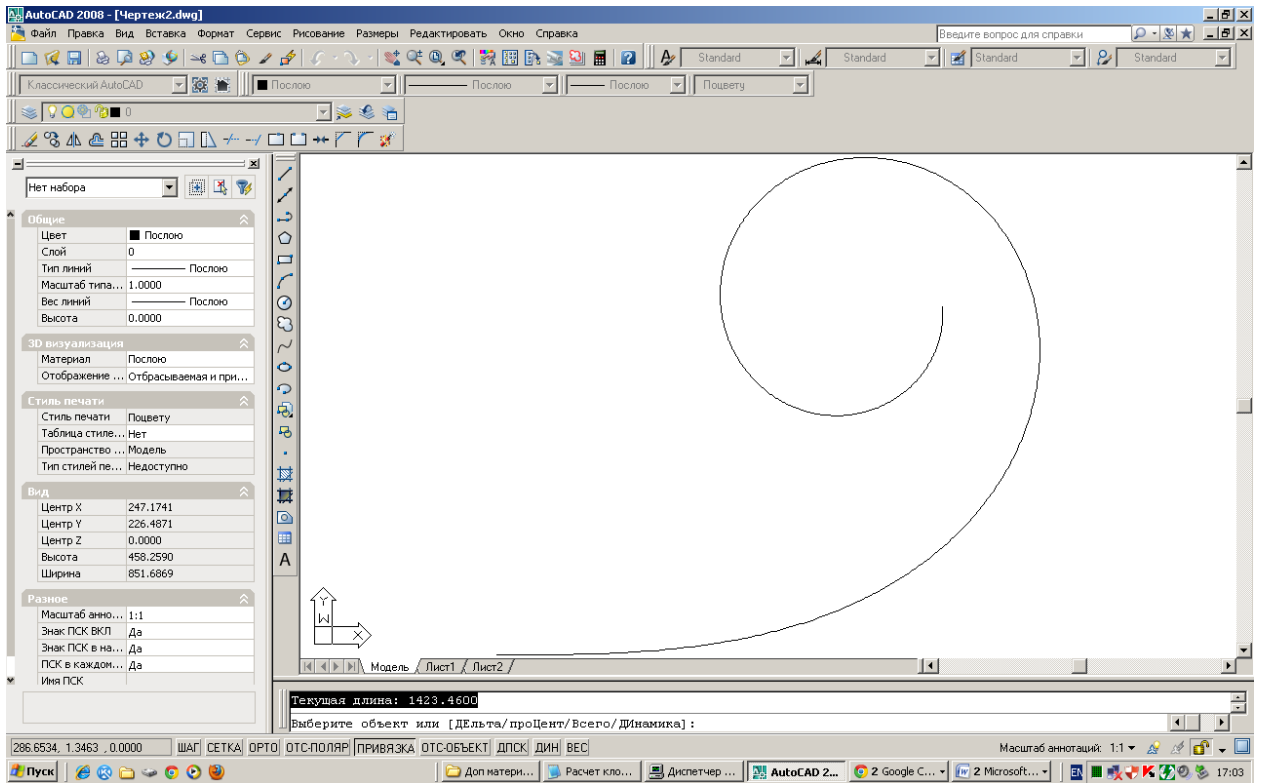


Рисунок 11.8.2. NURBzS шаблон клотоиды переносится в AutoCAD.

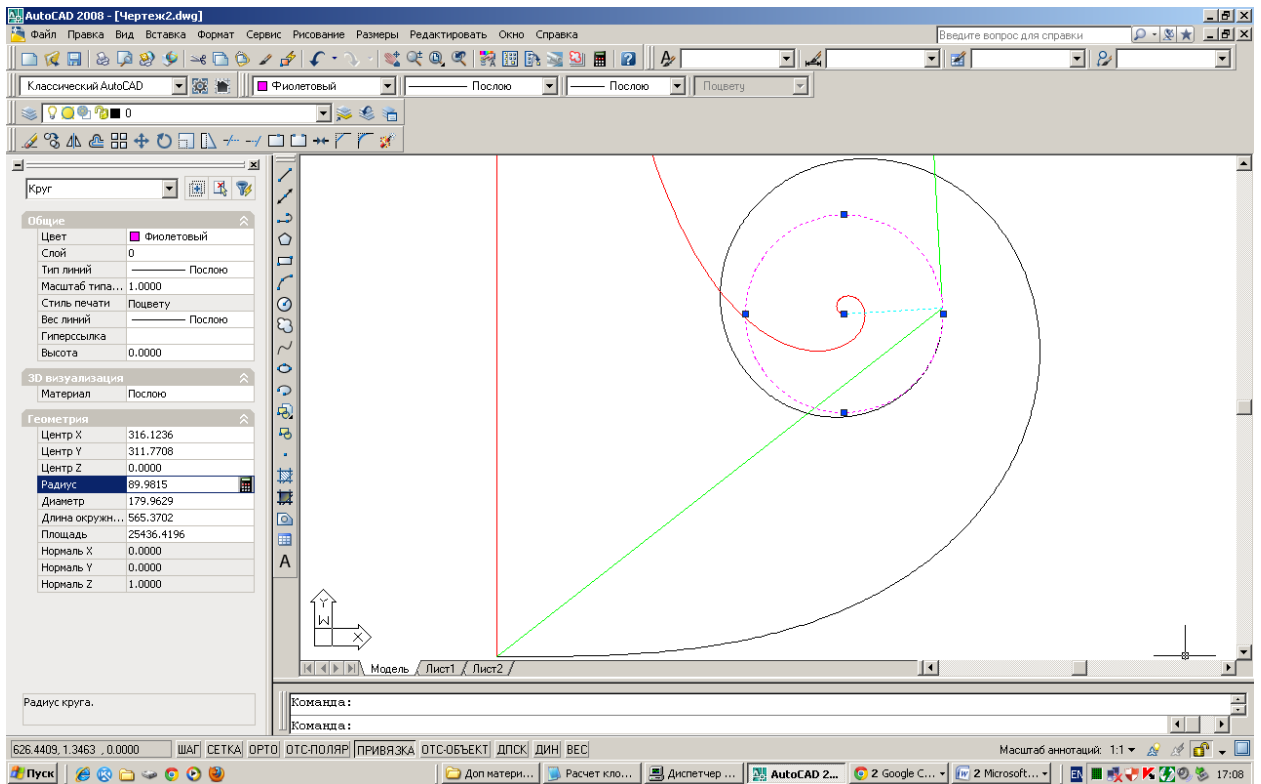


Рисунок 11.8.3. Построение графика кривизны в виде геометрического места центров кривизны и окружности кривизны в конечной точке.

Из палитры свойств определяем длину шаблона клотоиды и радиус окружности кривизны в конечной точке (таблица 1)

Таблица 11.8.1

Параметры	Значения
Длина NURBzS шаблона Lt	1422.87
Радиус кривизны в конечной точке шаблона Rt	89.98

2) Для вычислений будем использовать AutoLISP-выражения в командной строке AutoCAD. Кривизна в конечной точке NURBzS шаблона будет определяться из выражения:

$$K_t = 1/R_t = (1 / 89.98) = 0.01.$$

Из условия линейности кривизны по длине участка клотоиды следует:

$$V = K / L = \text{const}, \quad (11.8.1)$$

где V – постоянная скорость изменения кривизны, K – кривизна в конечной точке участка, L – длина участка.

Данный параметр V однозначно определяет клотоиду.

Тогда из формулы (1) определим коэффициент Vt скорости изменения кривизны для NURBzS шаблона

$$V_t = K_t / L_t = (0.01 / 1422.87) = 7.81057e-006.$$

Коэффициент V скорости изменения кривизны на трассе

$$V = K/L = 1 / (R * L) = (1 / (500 * 100)) = 2.0e-005.$$

Масштабируем NURBzS шаблон на величину m, чтобы получить скорость изменения кривизны V трассы. Масштаб m находим из очевидного уравнения

$$V = 1 / (m * R_t * m * L_t) = [1 / (m * m)] * [1 / (R_t * L_t)] = \quad (11.8.2)$$

$$= [1 / (m * m)] * V_t.$$

Из уравнения (13) выразим коэффициент масштабирования  $m$ :

$$m = \sqrt{Bt / B} = m = \sqrt{Bt / B} = (\sqrt{7.81057e-006 / 2.0e-005}) = 0.624923.$$

Масштабируем NURBzS шаблон на величину  $m = 0.624923$  и получаем клотоидную вставку трассы.

В программе AutoCAD вводим: Сервис → Масштаб → Выбираем шаблон клотоиды → Устанавливаем масштаб 0.624923.

3) Устанавливаем маркер для точек: Формат → Отображение точек → Выбрать маркер точки на панели Отображение точек.

4) Размечаем клотоиду трассы: Рисование → Точка → Разметить → Выберите масштабированную клотоиду → указать длину сегмента  $L=500$  м.

5) Обрезаем масштабированную клотоиду по первой точке, соответствующей участку клотоиды длиной 500 м (рисунок 4)

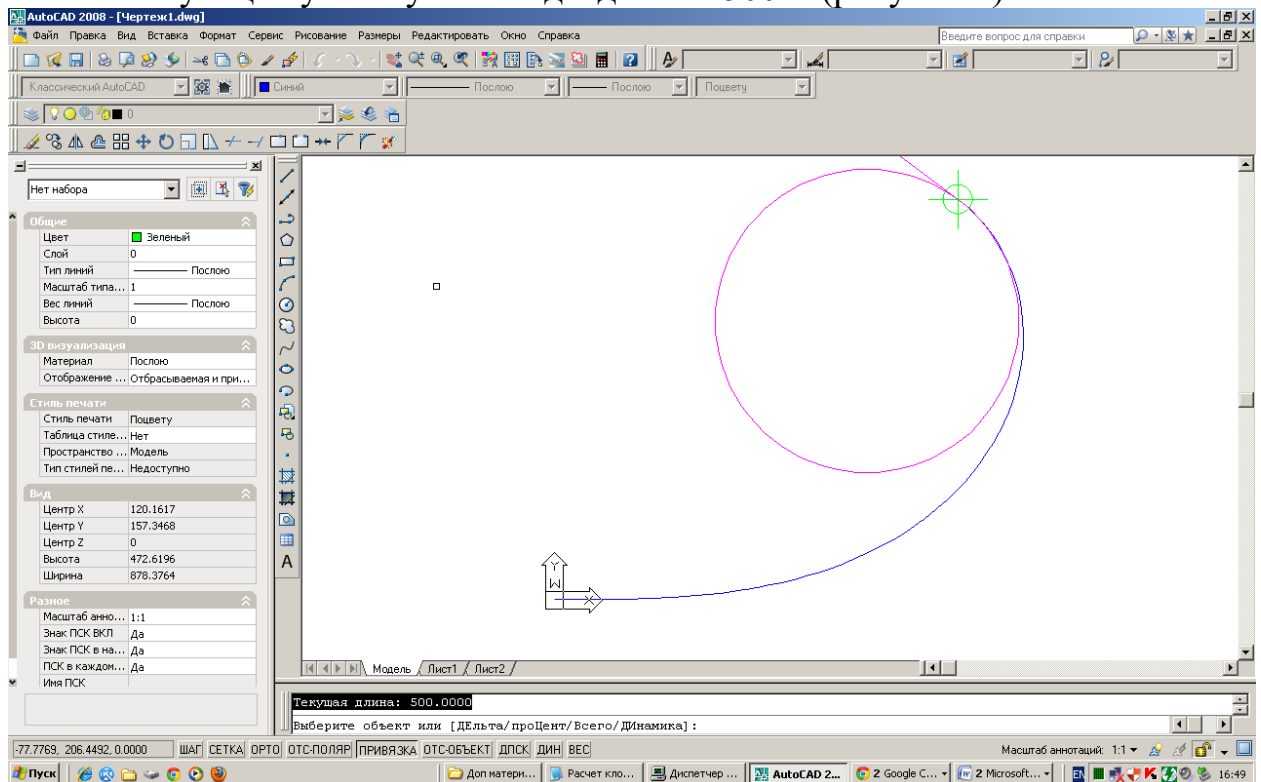


Рисунок 11.8.4. Построенный участок клотоиды длиной 500 и радиусом кривизны 100 в конечной точке.

б) Выделяем окружность кривизны в конечной точке и проверяем точность построения по палитре свойств (рисунок 5)

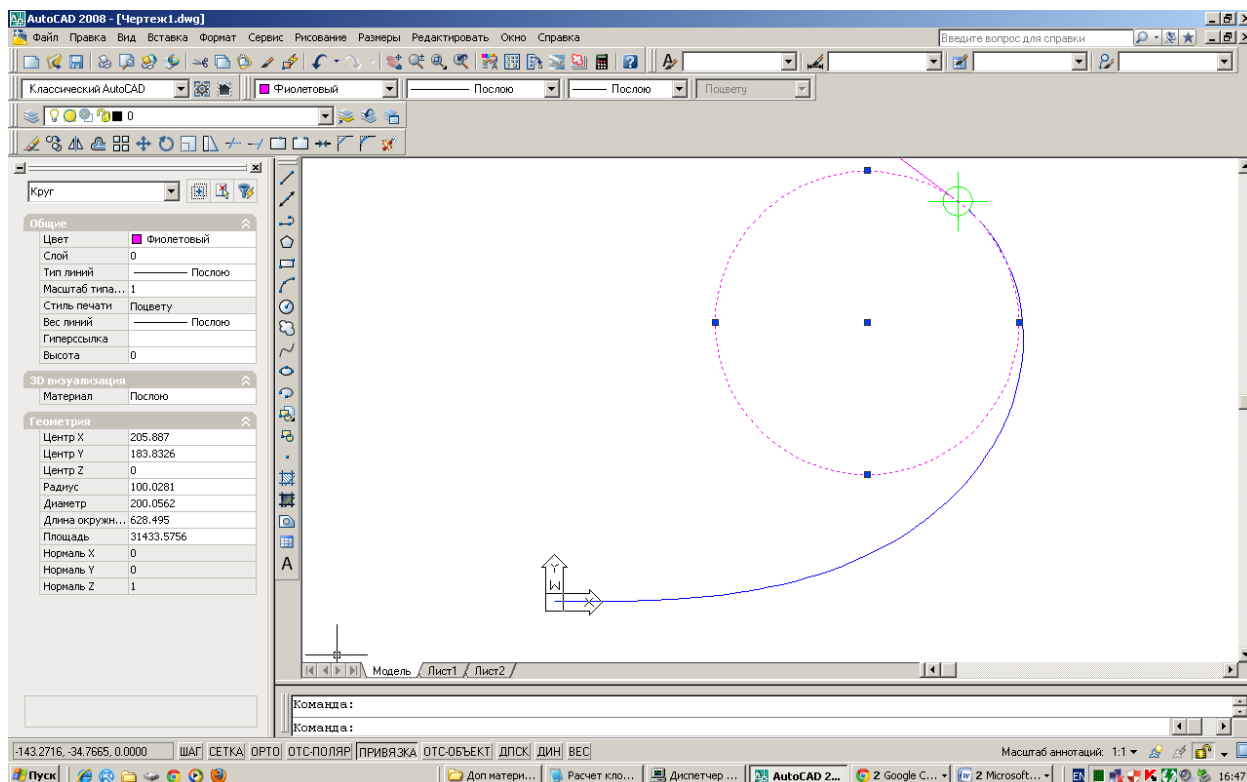


Рисунок 11.8.5. Проверка точности построения. Фактический радиус кривизны в конечной точке вставки 100.0281.

Web-приложение обеспечивает чрезвычайно высокую точность аппроксимации клотоиды NURBzS шаблоном. При нарочито редкой конфигурации точек клотоиды, используемой для аппроксимации NURBzS шаблоном (см. рисунок 1), отклонение значения радиуса равно 0.0281, а относительное отклонение ( $/ 0.028 \cdot 100$ ) = 0.00028. Обратите также внимание на практически линейный график кривизны вида  $F(x)$  NURBzS шаблона (см. рисунок 1).

### Утилита построения виража по первой схеме

Авторы: Муфтеев В.Г., Марданов А.Р., Талыпов М.А.

## Описание

Можно использовать линейный, полуплавный или плавный график подъема на вираж внешней кромки

Переходный участок разбивается на две части строится отдельно:

1) участок вращения только внешней половины (внешней бровки)

Длина участка в доле от общей длины. Величина угла внешней бровки в конце участка.

1) Стартовая подготовка

Rd:Ext\_Start\_Length. Длина участка вращения только внешней половины (внешней бровки)

в доле от общей длины.

Rd:Ext\_Start\_Angle. Величина угла внешней бровки в конце участка (в радианах).

Этот участок достраивается после построения основной части переходного участка.

2) участок совместного вращения полос. Удалите из переходной кривой участок подъема внешней бровки.

Можно реализовать процедуру ввода данных в 2 вариантах:

- ввод по запросам программы;
- подготовить Lisp-программы с параметрами.

Способ задания параметров в Lisp программе

**Заполните параметрами Virage\_Params.lsp**

**Параметры для основного участка**

## 2) Ширина

Rd:Int\_Width. Ширина внутренней стороны проезжей части

Rd:Ext\_Width. Ширина внешней стороны проезжей части

## 3) Углы

Rd:Int\_Start\_Angle. Начальный угол полосы с внутренней стороны (в радианах);

Rd:Ext\_Start\_Angle. Начальный угол полосы с внешней стороны (в радианах). Задавать с учетом удаления участка вращения только ;

Rd:Int\_End\_Angle. Конечный угол полосы с внутренней стороны (в радианах);

Rd:Ext\_End\_Angle. Конечный угол полосы с внешней стороны (в радианах);

## 4) Функции поворота

Функция поворота внешней бровки

(Rd:Ext\_Linear\_Fun = 0/1). - линейная функция;

(Rd:Ext\_Full\_Smooth\_Fun = 0/1). - функция  $(\sin(x) + 1)/2$  на интервале  $\pi/2 < x < (3/2)\pi$  (с плавным началом и плавным завершением);

(Rd:Ext\_End\_Smooth\_Fun = 0/1) - функция  $\sin(x) / 2$  на интервале  $\pi < x < (3/2)\pi$  (с линейным началом и плавным завершением).

Функция поворота внутренней бровки

(Rd:Ext\_Linear\_Fun = 0/1) - линейная функция;

(Rd:Ext\_Full\_Smooth\_Fun = 0/1)- функция  $(\sin(x) + 1)/2$  на интервале  $\pi/2 < x < (3/2)\pi$  (с плавным началом и плавным завершением);



(Rd:Ext\_End\_Smooth\_Fun = 0/1)- функция  $\sin(x) / 2$  на интервале  $\pi < x < (3/2)\pi$  (с линейным началом и плавным завершением).

#### 4) Уширение проезжей части

Ext\_Width\_Delta. Величина со знаком поперечного уширения внешней стороны (изменяется по линейному закону);

Int\_Width\_Delta. Величина со знаком поперечного уширения внутренней стороны (изменяется по линейному закону);

Программа будет выглядеть следующим образом:

```
(defun VirageParams( / a b )
```

```
  ;Specify the parameters Virage_Params.lsp
```

```
  ;Parameters
```

```
  ;1) Start Training
```

```
  ;Rd:Ext_Start_Length. Length of the rotation of only the outer half (outer edge)
```

```
  ;in the proportion of the total length.
```

```
  (setq Rd:Ext_Start_Length 50);
```

```
  (print "Rd:Ext_Start_Length = ")(princ Rd:Ext_Start_Length );
```

```
  ;Rd: Ext_Start_Angle. The value of the angle of the outer edge of the end of the site (in radians).
```

```
  (setq Rd:Ext_Start_Angle (* Pi (/ 1.0 180.0)));
```

```

(print "Rd:Ext_Start_Angle = ")(princ Rd:Ext_Start_Angle) ;

;2) The width of

;Rd: Int_Width. The width of the inner side of the roadway

(setq Rd:Int_Width 10);

(print "Rd:Int_Width = ")(princ Rd:Int_Width)

;Rd:Ext_Width. The width of the outer side of the carriageway

(setq Rd:Ext_Width 10);

(print "Rd:Ext_Width = ")(princ Rd:Ext_Width)

;3) The angles

;Rd:Int_Start_Angle. The initial angle of the strip on the inside (in radians);

;(setq a (/ 1.0 180.0))

;(print "a = ")(princ a)

;(setq b (* Pi a))

;(print "b = ")(princ b)

(setq Rd:Int_Start_Angle (* Pi (/ -1.0 180.0)))

(print "Rd:Int_Start_Angle = ")(princ Rd:Int_Start_Angle)

;Rd:Ext_Start_Angle. The initial angle of the strip on the outside (in radians);

```

```
(setq Rd:Ext_Start_Angle (* Pi (/ -1.0 180.0)))
```

```
(print "Rd:Ext_Start_Angle = ")(princ Rd:Ext_Start_Angle)
```

```
;Rd:Int_End_Angle. The final corner of the strip on the inside (in radians);
```

```
(setq Rd:Int_End_Angle (* Pi (/ 10.0 180.0)))
```

```
(print "Rd:Int_End_Angle = ")(princ Rd:Int_End_Angle)
```

```
;Rd:Ext_End_Angle. The final corner of the strip on the outside (in radians);
```

```
(setq Rd:Ext_End_Angle (* Pi (/ 10.0 180.0)))
```

```
(print "Rd:Ext_End_Angle = ")(princ Rd:Ext_End_Angle)
```

```
;4) The functions of the rotation
```

```
;Rotation of the outer edge of the function
```

```
;(Rd:Ext_Linear_Fun = 0/1). - A linear function;
```

```
(setq Rd:Int_Linear_Fun 1);
```

```
(print "Rd:Int_Linear_Fun = ")(princ Rd:Int_Linear_Fun)
```

```
;(Rd:Ext_Full_Smooth_Fun = 0/1). - Function  $(\sin(x) + 1) / 2$  on the interval  $\pi / 2 < x < (3/2) \pi$  (with a smooth start and smooth completion);
```

```
(setq Rd:Int_Full_Smooth_Fun 0);
```

```
(print "Rd:Int_Full_Smooth_Fun = ")(princ Rd:Int_Full_Smooth_Fun);
```

```
;(Rd:Ext_End_Smooth_Fun = 0/1) - the function  $\sin(x) / 2$  on the interval  $\pi < x < (3/2) \pi$  (starting with a linear and smooth completion.
```

```
(setq Rd:Int_End_Smooth_Fun 0);
```

```
(print "Rd:Int_End_Smooth_Fun")(princ Rd:Int_End_Smooth_Fun);
```

```
;The function of internal rotation of edge
```

```

;(Rd:Ext_Linear_Fun = 0/1) - a linear function;

(setq Rd:Ext_Linear_Fun 0);

(print "Rd:Ext_Linear_Fun = ")(princ Rd:Ext_Linear_Fun);;

;(Rd:Ext_Full_Smooth_Fun = 0/1) - function  $(\sin(x) + 1) / 2$  on the interval  $\pi / 2 < x < (3/2) \pi$  (with a smooth start and smooth completion);

(setq Rd:Ext_Full_Smooth_Fun 0);

(print "Rd:Ext_Full_Smooth_Fun = ")(princ Rd:Ext_Full_Smooth_Fun);

;(Rd:Ext_End_Smooth_Fun = 0/1) - the function  $\sin(x) / 2$  on the interval  $\pi < x < (3/2) \pi$  (starting with a linear and smooth completion.

(setq Rd:Ext_End_Smooth_Fun 0)

(print "Rd:Ext_End_Smooth_Fun = ")(princ Rd:Ext_End_Smooth_Fun)

;4) The broadening of the roadway

;Ext_Width_Delta. The value of the sign of the cross broadening the outside
(varies linearly);

(setq Rd:Ext_Width_Delta 1);

(print "Rd:Ext_Width_Delta = ")(princ Rd:Ext_Width_Delta)

;Int_Width_Delta. The value of the sign of the cross inside the broadening
(varies linearly);

(setq Rd:Int_Width_Delta 1);

(print "Rd:Int_Width_Delta = ")(princ Rd:Int_Width_Delta);

(print "End of Params")(princ)

)

```

Способ ввода данных при исполнении программы

Выделите из траектории переходную часть виража. Начинается с точки окончания поворота внешней бровки. Заканчивается участком выхода на односкатную проезжую часть с максимальным поворотом виража.

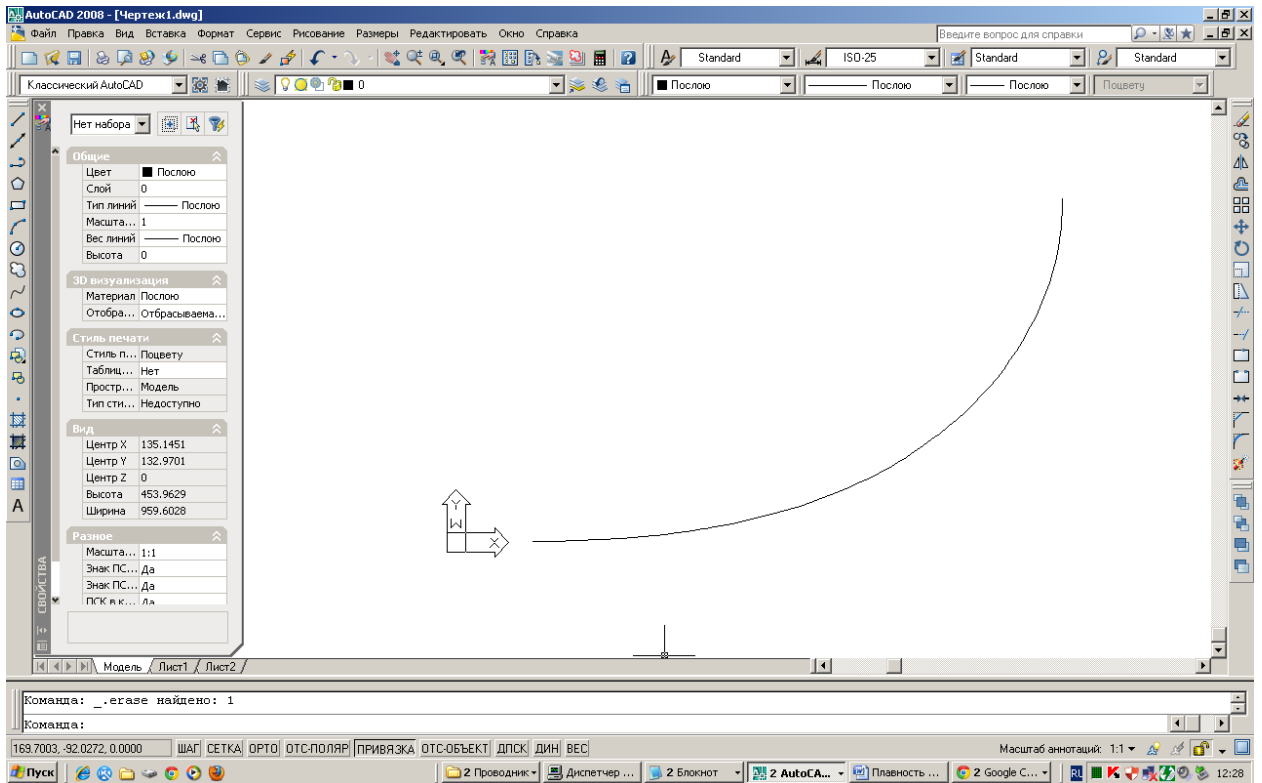


Рис. 1. Переходная часть виража.

Загрузите Virage.fas

Выполните команду

Virage

Выберите 3м сплайновую кривую:

Введите ширину проезжей части в плане < 1.>:50

Введите начальную высоту наружной бровки со знаком (+ вверх, - вниз)  
< 0.>:-5

Введите высоту наружной бровки после поворота вокруг оси дороги со  
знаком (+

вверх, - вниз) < 0.>:20

Введите наружное уширение дороги < 1.>:10

Введите начальную высоту внутренней бровки со знаком (+ вверх, - вниз)  
<

0.>:-10

Введите высоту внутренней бровки после поворота вокруг оси дороги со  
знаком (+

вверх, - вниз) < 0.>:-21

Введите внутреннее уширение дороги < 0.>:10

Введите количество дуг < 10 >:

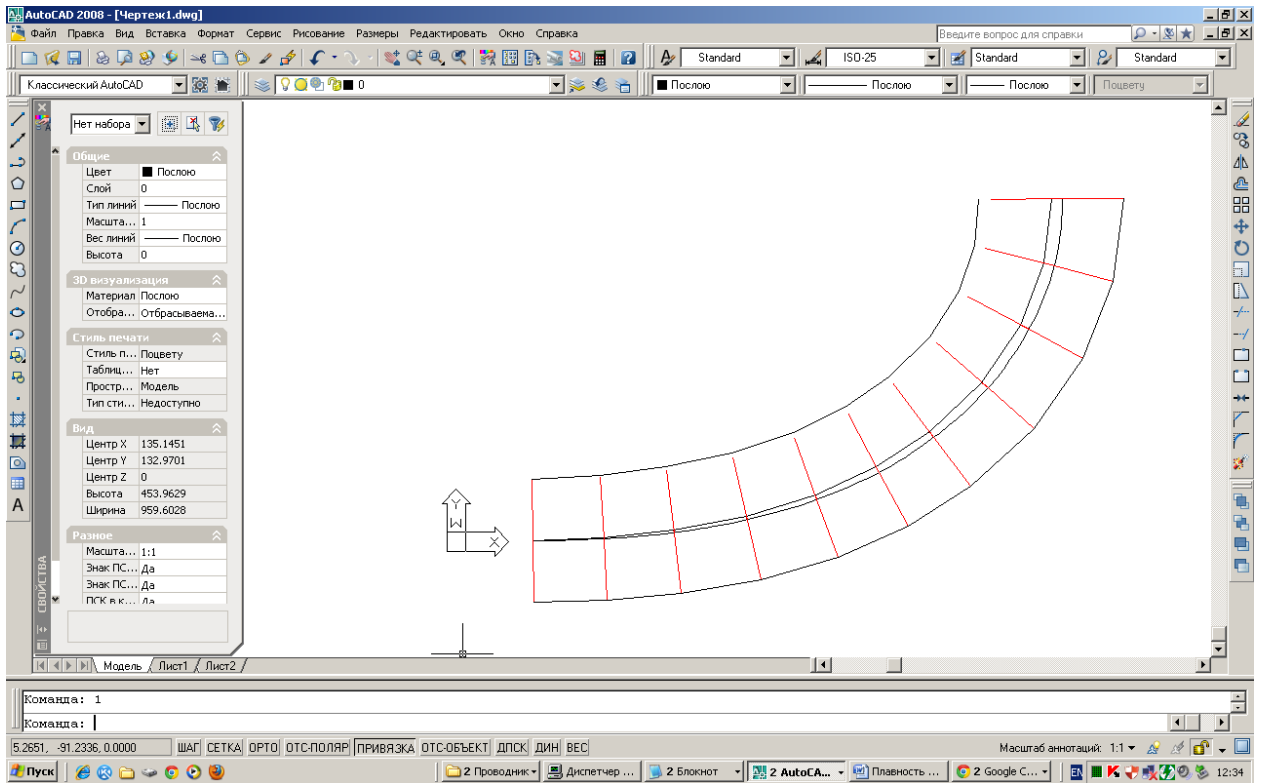


Рис. 2. Построение линий переходного участка виража – внешней бровки, внутренней бровки, осевой линии (вид сверху).

Программа построила три линии – внешнюю бровку, внутреннюю бровку со смещением внутрь на величину внутреннего уширения, смещенную осевую линию на величину уширения внешней части проезжей дороги.

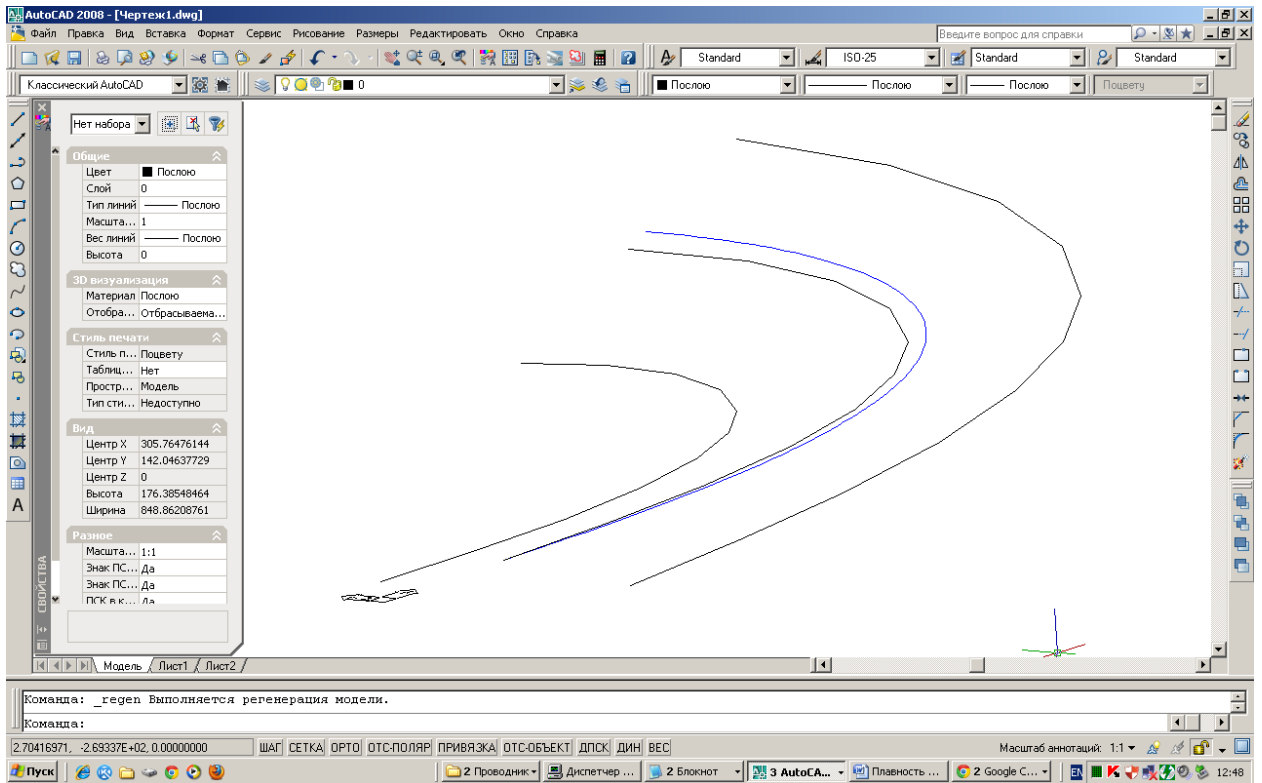


Рис. 3. Построение линий переходного участка виража – внешней бровки, внутренней бровки, осевой линии (аксонометрия).

Построение сплайновых линий на ломаных с помощью web-приложения.



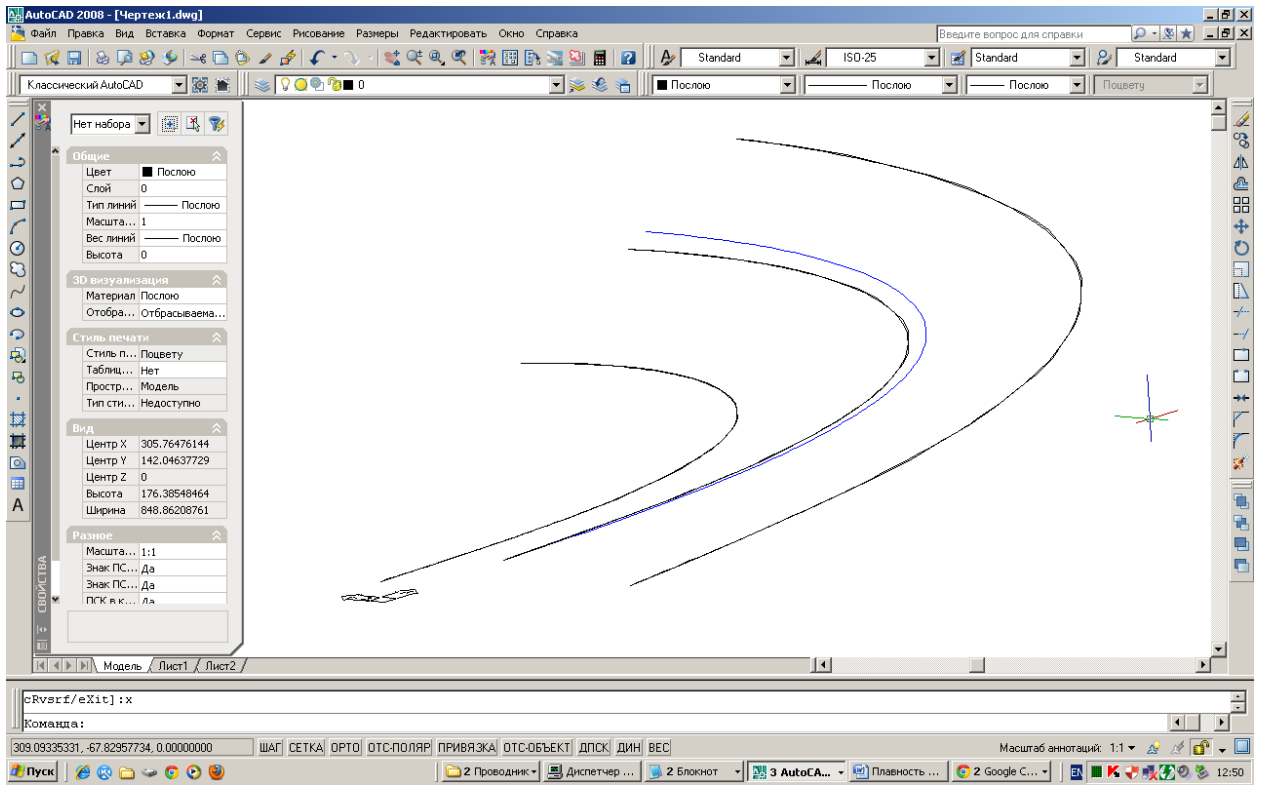


Рис. 3. С помощью ПМК САПР FModel на ломаных построены сплайновые кривые

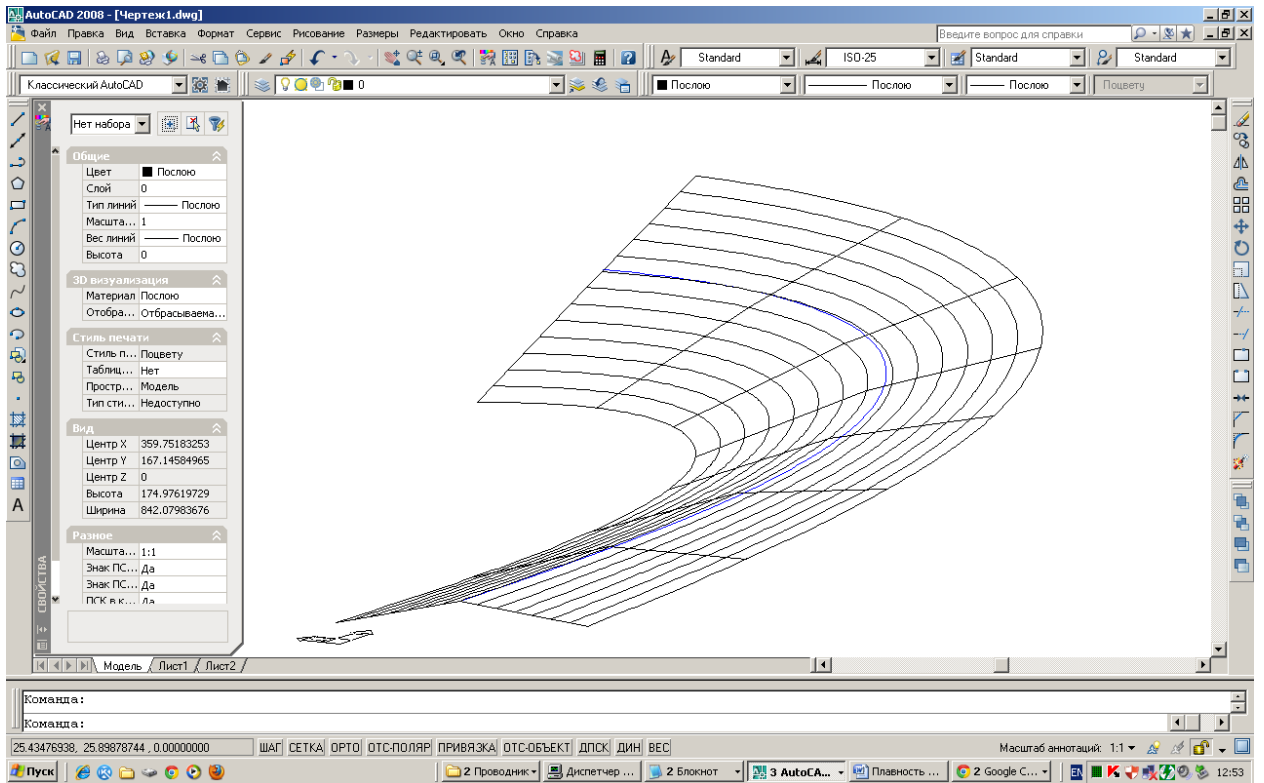


Рис. 4. Построение поверхности по сечениям на каркасе сплайновых кривых (аксонометрия).

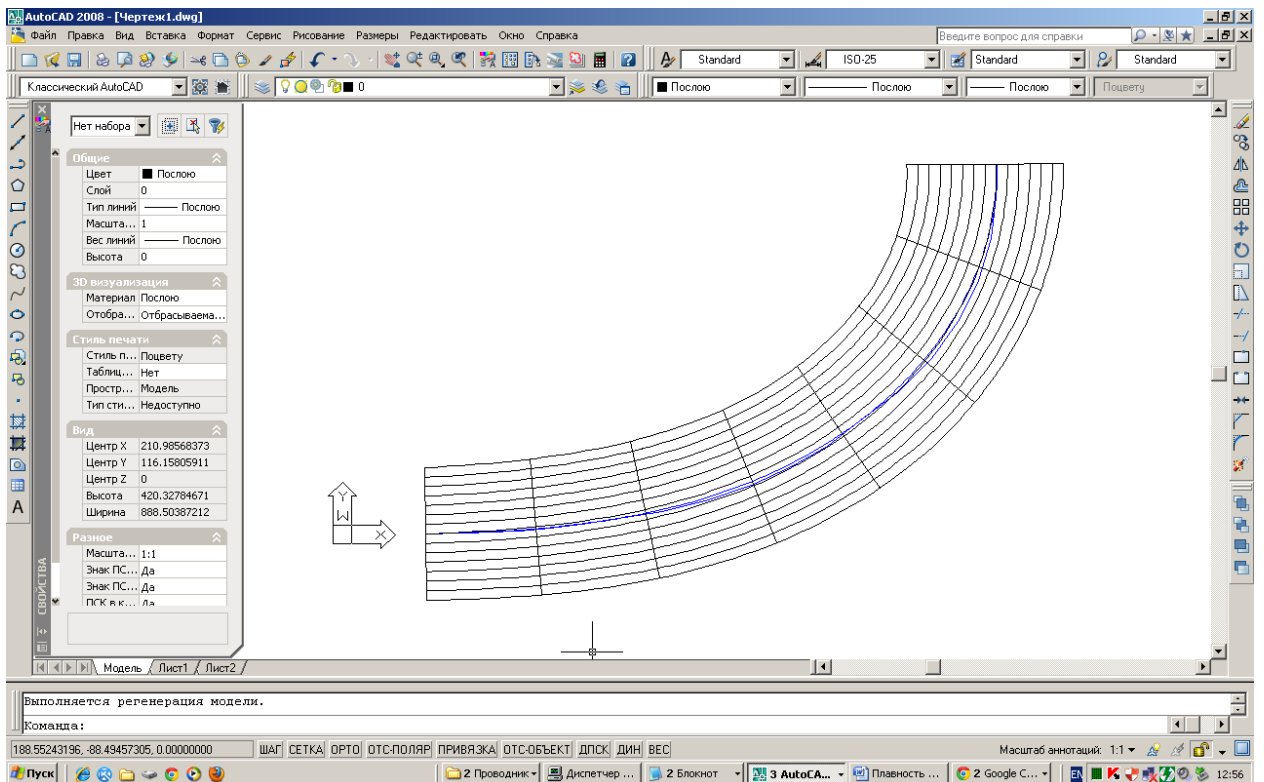


Рис. 5. Построение поверхности по сечениям на каркасе сплайновых кривых (вид сверху).

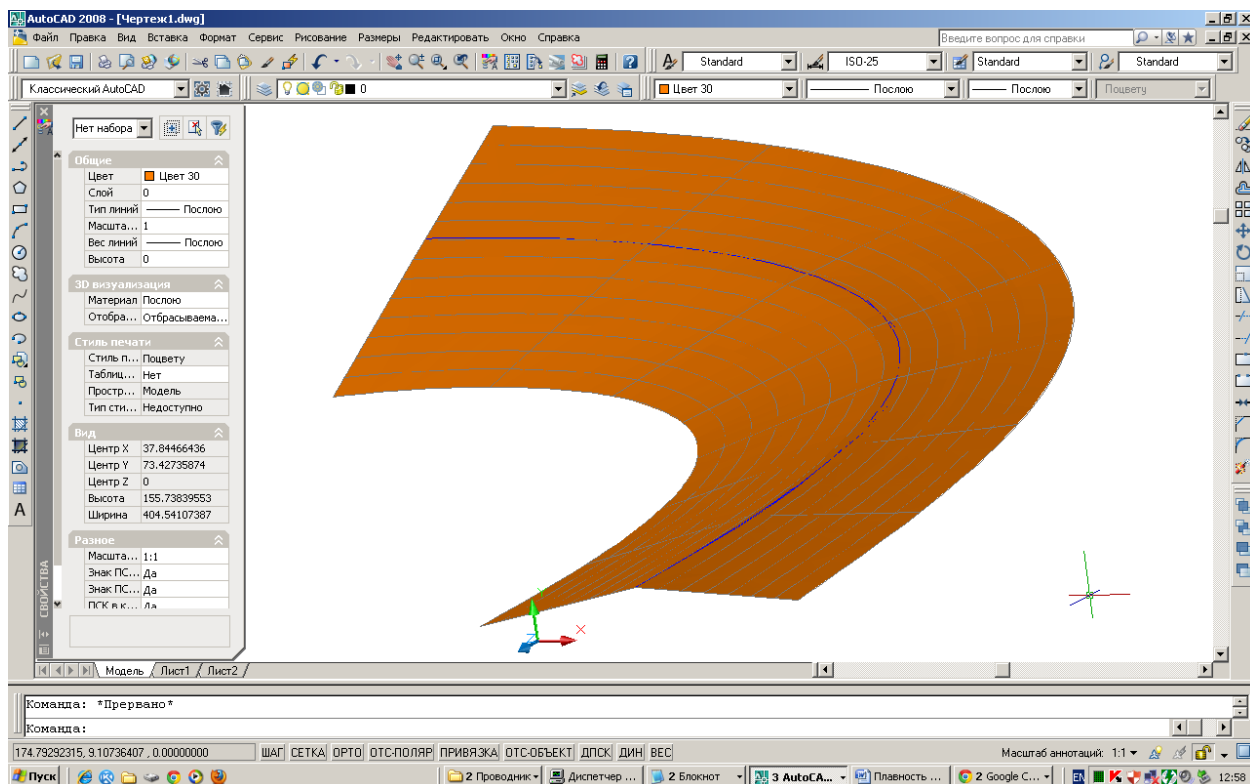


Рис. 6. Построение поверхности по сечениям на каркасе сплайновых кривых (аксонометрия, визуальный стиль – реалистичный).

### Библиографический список к главе

[Farin 2006] Farin, G. Class A Bézier curves // Computer Aided Geometric Design 23 (2006) 573–581

[Kjellander 83]. Kjellander J.A. Smoothing of cubic parametric splines // Computer Aided Design, 15:175–179, 1983.

[Farin et al 87]. Farin G., G. Rein, N. Sapidis, and A. J. Worsey. Fairing cubic B-spline curves // Computer Aided Geometric Design, 4(1-2):91–103, July 1987.

[Mehlum 1974]. Mehlum, E. Nonlinear splines // Computer Aided Geometric Design. Academic Press, London, 173-207, 1974.

[Brunnett & Kiefer 94]. Brunnett G., and J. Kiefer. Interpolation with minimal-energy splines // Computer-Aided Design 26(2) (1994), 137-144.

[McConalogue 71]. D. J. McConalogue. Algorithm 66 - an Automatic French-Curve Procedure for Use with an Incremental Plotter // Computer Journal, v14, 207–209, 1971.

[Frey & Field 2000]. Frey WH, Field DA. Designing Bezier conic segments with monotone Curvature // Computer Aided Geometric Design 2000;17(6):457–83.

[Yang 2004]. Xunnian Yang. Curve fitting and fairing using conic splines // Computer-Aided Design 36 (2004) 461–472

[Mineur et al 98]. Mineur, Y., Lichah, T., Castelain, J.M., Giaume, H., 1998. A shape controlled fitting method for Bézier curves // Computer Aided Geometric Design 15 (9), 879–891.

[Wang 2003]. Wang, Y., Wang, S., Zhang, L., Zhao, B., 2003. Shape control of Bézier surfaces with iso-parametric monotone curvature constraints // ComputerAided Geometric Design 20 (6), 383–394.

[Seymour & Unsworth]. Seymour C, Unsworth K. Interactive shape preserving interpolation by curvature continuous rational cubic splines // Journal of Computer Applied Mathematic, 1999;102(1):87–117.

[Meek & Walton 91]. Meek, D.S., and D.J. Walton, A guided clothoid spline // Computer Aided Geometric Design, 8 (1991), 163-174.

[Walton & Meek 98]. Walton DJ, Meek DS. Planar G2 curve design with spiral segments // Computer Aided Design 1998;30(7):529–38.

[Муфтеев 80] Муфтеев В.Г. Конструирование плоских кривых методом огибающей // Изв. ВУЗов. Авиационная техника, 1980, №4, с.43-47.

[Osipov&Muftejev 89] V.A. Osipov, V.G. Muftejev. Modelling Curvilinear Lines and Surfaces via Modified B-Splines // Computers and Industry 13 (1989) 61-67.

[Муфтеев & Марданов 2006] Муфтеев В.Г., Марданов А.Р. Геометрическое моделирование кривых линий и поверхностей высокого качества // Прикладная геометрия. Applied Geometry [Электронный ресурс]: науч. журн. / Моск. авиационный ин-т (гос.техн.университет) "МАИ". - Электрон. журн. - Москва : МАИ, 2006. - №18; вып.8,–Режим доступа к журн.: <http://www.mai.ru>. – Загл. с титул.-стр. 67-89.

[Муфтеев 2007] Муфтеев В.Г. Моделирование кривых высокого качества на основе метода v-кривых. Прикладная геометрия. Applied Geometry [Электронный ресурс]: науч. журн. / Моск. авиационный ин-т (гос.техн.университет) "МАИ". - Электрон. журн. - Москва : МАИ, 2007. - №19; вып.9, -стр. 25-74. - Режим доступа к журн.: <http://www.mai.ru>. - Загл. с титул. экрана. - №гос.регистрации 019164.

[Муфтеев & Марданов 2009 Донецк] Муфтеев В.Г., Марданов А.Р. Изогеометрическое моделирование кривых линий и поверхностей высокого качества по базовым критериям плавности / Наукові праці ДонНТУ серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка". Випуск 10 (153). Сборник трудов ДонНТУ серии "Информатика, кибернетика и вычислительная техника". - 2009. - Вып. 10(153).

[Муфтеев и др. 2012 Винница]. Муфтеев В.Г., Марданов А.Р., Романюк А.Н., Турта В.Г., Фархутдинов И.М. Программа изогеометрического моделирования кривых линий высокого качества. WEB-приложение САД-систем // Комп'ютерна графіка та розпізнавання зображень / Збірник наукових праць науково-практичної Інтернет-конференції. /Кол.авт./ Виниця: Виницький обласний інститут післядипломної освіт педагогічних працівників, травень 2012 року. – 244 с.

[Карякин и др. 69]. Карякин Н.И., Быстров К.Н., Киреев П.С.. Краткий справочник по физике. -М.: Высшая школа, 1969. – 600с.

[Муфтеев и др. 2012 Уфа]. Муфтеев В.Г., Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Марданов А.Р., Семенов А.С., Талыпов М.А. Обоснование выбора оптимальной формы функциональной кривой динамической поверхности технического изделия // Сборник докладов научно-технической конференции, посвященной памяти Иофинова. ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ (г.Уфа), 2012.

[Horn 83] В.К.Р. Horn. The Curve Of Least Energy (1983). Massachusetts institute of technology. Artificial intelligence laboratory. A.I. Memo No.612. January 1981, revised March 1983.

[Bajaj 98] C.L. Bajaj, J. Chen, R.J. Holt, A.N. Netravali. Energy Formulations of A-splines. February 10, 1998. Supported in part by NSF grant CCR. 92-22467, AFOSR grant F49620-94-1-0080, and ONR grant N00014-94-1-0370.

[Справочная энциклопедия дорожника 2007]. Справочная энциклопедия дорожника V том. Проектирование автомобильных дорог. Под редакцией заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук. проф. Г.А. Федотова и д-ра техн. наук. проф. П.И. Поспелова. МОСКВА 2007]