Муфтеев В.Г., Михалкина Г.И.,
Романюк А.Н., Марданов А.Р.,
Семенов А.С., Muftejev V.,
Mihalkina N., Romanuk A.,
Mardanov A., Semenov A.

МОДЕЛИРОВАНИЕ NURBS КРИВЫХ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА

Аннотация

Формулируются требования к функциональным кривым (кривым класса F). Показываются ограничения функционалов CAD-систем при моделировании сплайновых кривых высокого качества. Предлагается технология моделирования кривых класса F в интегрированной системе, состоящей из CAD-систем, программы FairCurveModeler моделирования функциональных кривых класса F и документов математического пакета Mathematica. Показываются возможности предложенной технологии на примерах улучшения качества кривых, построенных в CAD-системах в первой версии компонента FairCurveModeler + Mathematica.

Abstract

Formulated the demands to the functional curves (curves class F). Showing limitations of functionality of CAD- systems for modeling high quality spline curves. Technology is proposed for modeling curves class F in an integrated system consisting of CAD- systems, program FairCurveModeler for modeling the functional curves of class F and documents of mathematical package Mathematica. Examples show the possibility of the proposed technology to improve the quality of the curves constructed in CAD- systems in the first version of the component FairCurveModeler + Mathematica.

Введение

Если геометрические параметры криволинейных поверхностей определяют функциональность проектируемого объекта, то такие поверхности называются функциональными поверхностями. Проектные, функциональные характеристики проектируемого объекта напрямую

определяются геометрическими параметрами функциональных криволинейных поверхностей, образующих форму объекта.

Важный частный случай функциональных поверхностей - динамические поверхности. Динамические поверхности это поверхности, активно взаимодействующие со средой. Обводы самолетов, судов, рабочие поверхности органов почвообрабатывающих машин, лопаток насосов, турбин и т.п. относятся к динамическим поверхностям.

К функциональным поверхностям также относятся поверхности кулачков в кулачковых механизмах, поверхности дорог.

Если красота дизайна проектируемого объекта определяет потребительские характеристики объекта, то к функциональным поверхностям можно также отнести поверхности, определяющие ”эстетическую функциональность” проектируемого объекта. Это криволинейные поверхности архитектурных объектов, внешний дизайн автомобилей, бытовых приборов и т.п.

В автомобильном дизайне (Automotive design) такие поверхности называются поверхностями класса А.

Требования к методам моделирования кривых в САПР. Базовые критерии оценки качества кривых

В работах [1, 2] эффективность методов оценивается такими критериями как устойчивость формообразования, наглядность и графоаналитичность, гибкость управления формой и высоким качеством моделируемой кривой. Сформулированы базовые критерии оценки качества кривой. Важнейший из них – порядок гладкости. При моделировании профилей лопаток ГТД порядок гладкости должен быть не менее 2-го порядка для снижения энергетических потерь при скачках кривизны. Отметим также, что профилирование кулачка для высокооборотистых распредвалов с целью снижения динамических нагрузок начинается с функции производной 3-го и выше порядка. Порядок гладкости характеризует локальную плавность кривой. Плавность

кривой в целом является интегральной характеристикой кривой и оценивается такими параметрами как: а) количество точек перегиба и прямолинейных участков, б) максимальный градиент изменения кривизны на кривой, в) количество вершин кривой, г) функционал вида интегральной суммы квадрата кривизны по длине кривой.

В работе [3] кривая высокого эстетического качества (класса А) характеризуется минимальным количеством участков с монотонным изменением кривизны (с минимальным количеством вершин или экстремумов кривизны).

В работах [4, 5] базовые требования к качеству функциональных кривых обосновываются на основе анализа движения материальной точки по траектории пространственной кривой. Показывается, что для плавного безударного плавного движения материальной точки по пространственной траектории необходим высокий порядок гладкости (не ниже 4-его порядка) с плавным (без пульсации) изменением кривизны и кручения. Рассматривается материальная точка, движущаяся по криволинейной траектории. На основе анализа формулируются базовые критерии оценки качества кривых.

Первый необходимый критерий - высокий, не ниже 4-го, порядок гладкости моделируемой кривой.

Второй по важности критерий качества кривой - минимум вершин кривой при заданной форме.

Третий критерий для оценки качества пространственных кривых - плавность кручения кривой.

Перечисленные критерии легко контролируются по графикам кривизны и центров кривизны.

В качестве дополнительного критерия принимается потенциальная энергия кривой. Потенциальная энергия упругой рейки, деформированной без усилий растяжения по контуру кривой считается важным параметром качества кривой.

В работе авторов [4] было дано обоснование минимизации потенциальной энергии профильной кривой плуга. В более общем плане обоснование минимизации потенциальной энергии функциональной кривой можно сформулировать следующим образом.

При высоких скоростях взаимодействия изделия со средой среда ведет себя как упругое тело (при обработке почвы на высоких скоростях, при движении скоростного судна, при полете самолета, при движении гоночного автомобиля). Очевидно, что энергетические затраты на деформацию среды как упругого тела по траектории с минимальной потенциальной энергией (проще говоря, по контуру деформированной упругой рейки) будут меньше, чем по любому контуру с большей потенциальной энергией при одинаковых геометрических макропараметрах.

Кривые класса F

Функциональные кривые высокого качества (удовлетворяющие перечисленным критериям плавности) назовем ”кривыми класса F (Functional)”. В отличие от термина ”кривые класса A (Aussenhaut) ”, который был позаимствован проф.Farin'ым из описания CAD/CAM системы SYRKO фирмы «Daimler-Benz AG» для моделирования внешних (“outside surface”, “Aussenhaut” – внешний на немецком языке) поверхностей автомобиля [3].

Плавность функциональных кривых и поверхностей является определяющей для эксплуатационных характеристик технических изделий:

1) плавные рабочие поверхности почвообрабатывающих агрегатов с функциональными кривыми с малой потенциальной энергией обеспечивают снижение энергетических затрат на обработку почвы при повышении качества обработки;

2) плавные трассы дороги обеспечивают комфортность вождения и безопасность движения транспортного средства, а также при малой

потенциальной энергии траектории обеспечивают уменьшение энергетических затрат;

3) плавные пространственные траектории движения механических манипуляторов уменьшают динамические нагрузки на механику манипулятора;

4) плавный профиль кулачков в кулачковых механизмах – основа уменьшения вибрации, увеличение долговечности, уменьшение веса кулачкового механизма.

Недостатки базовых функций моделирования кривых в CAD-системах рассмотрены в работе авторов [6]. Базовые функции не обеспечивают надлежащего качества функциональных кривых по критериям плавности.

Разработка методов и программ моделирования кривых и поверхностей высокого качеств с учетом требований к методам моделирования функциональных кривых и поверхностей, сформулированных выше.

Разработка технологии моделирования кривых и поверхностей высокого качества,

1) независимой от конкретной CAD-системы;

2) реализующей все вычислительные аспекты контроля качества кривых по критериям плавности;

3) обеспечивающей возможность интерактивного редактирования кривых;

4) допускающей возможность инженерного анализа проектных характеристик изделия с функциональными кривыми и поверхностями.

Предыдущие разработки авторов

В научном направлении моделирования функциональных кривых и поверхностей высокого качества авторами наработан определенный научный и программный задел.

Теоретические разработки выполнены авторами в следующих направлениях:

1) Разработан метод построения виртуальной кривой (v-кривой) высокого качества и исследованы свойства метода;

2) Исследована геометрическая устойчивость формообразования NURBS кривых и поверхностей и выработаны ограничения на форму геометрического определителя (ГО), регламентирующие форму NURBS кривых и поверхностей.

3) Предложены методы изогеометрического построения кубической b-сплайновой кривой на опорной ломаной, b-сплайновой кривой высокой степени на опорной ломаной, изогеометрической аппроксимации v-кривой посредством NURBzS кривой (NURBS кривой в формате рациональной сплайновой кривой Безье) и b-сплайновой кривой высоких степеней m (m = 6 / 7 / 10) с сохранением высокого качества v-кривой

Обзорная статья по перечисленным методам со сводной библиографией дана в работе [7].

Программа FairCurveModeler

На основе теоретических результатов авторов и разработанных методов моделирования NURBS кривых высокого качества разработана программа FairCurveModeler. Функции программы удовлетворяют требованиям к методам моделирования функциональных кривых в САПР.

Программа FairCurveModeler имеет различные варианты исполнения: FairCurveModeler как приложение CAD-систем (AutoCAD, КОМПАС 3D) и FairCurveModeler как облачный продукт – web-приложение всех CAD-систем.

В качестве решения поставленной задачи предлагается технология моделирования NURBS кривых высокого качества в интегрированной среде CAD-система + FairCurveModeler + Mathematica:

1) В CAD-системе в комфортной графической среде подготавливаются геометрические определители или рисуются

сплайновые кривые с использованием широкого набора средств редактирования в 2D и 3D графической среде (с использованием привязок, функций манипулирования с геометрическим объектом, функций визуализации объекта). В интегрированной среде эти кривые рассматриваются как NURBS-эскизы.

2) В компоненте FairCurveModeler + Mathematica по подготовленным NURBS-эскизам строятся и редактируются NURBS кривые высокого качества или улучшаются NURBS кривые, построенные в CAD-системах;

3) В компоненте FairCurveModeler + Mathematica подготавливаются NURBS-шаблоны аналитических кривых двух форматов: фиксированные NURBzS шаблоны и редактируемые b-сплайновые кривые высокой степени m (m = 6 / 7 / 10).

4) Построенные NURBS кривые высокого качества передаются в CAD-системы.

5) Для обмена NURBS моделями между CAD-системой и компонентом FairCurveModeler + Mathematica используются DXF-файлы.

Mathematica – платформа для прикладной САПР

Mathematica является идеальной платформой для разработки прикладных САПР:

1) Mathematica обеспечивает непосредственный доступ к базовым математическим функциям (дифференцирования, интегрирования и решения минимаксных задач на сплайновых кривых и поверхностях).

2) Предоставляет достаточно развитые средства построения графического интерфейса для реализации интерактивного редактирования сплайновых кривых и поверхностей.

3) Обеспечивает возможность обмена информацией с другими приложениями (например, с Excel);

4) Обеспечивает возможность разработки приложений (пакетов) с использованием очень удобного встроенного Си-подобного языка программирования.

5) Предоставляет компонент SystemModeler для инженерного анализа и оптимизации проектных характеристик изделий с функциональными кривыми и поверхностями.

Первая версия компонента FairCurveModeler + Mathematica

Авторами была подготовлена 1-ая версия компонента FairCurveModeler + Mathematica “Modeling class F NURBS curves in the integrated environment - CAD-system + web-app FairCurveModeler + Mathematica”. Компонент включен в библиотеку Wolfram Library Archive (http://library.wolfram.com/infocenter/MathSource/8465/).

Именно в описании компонента первой был впервые введен термин “кривые класса F” . В описании работы компонента приводятся примеры существенного улучшения качества сплайновых кривых, подготовленных в CAD-системах.

Улучшения кубической b-сплайновой кривой, построенной по определяющим точкам в AutoCAD

В среде AutoCAD рисуется кубическая сплайновая кривая по определяющим точкам (рисунок 1). Модель передается в компонент FairCurveModeler + Mathematica, где выполняется анализ качества NURBS-эскиза и построение рафинированной кривой. Выполняется сравнение качества кривых (рисунок 2).

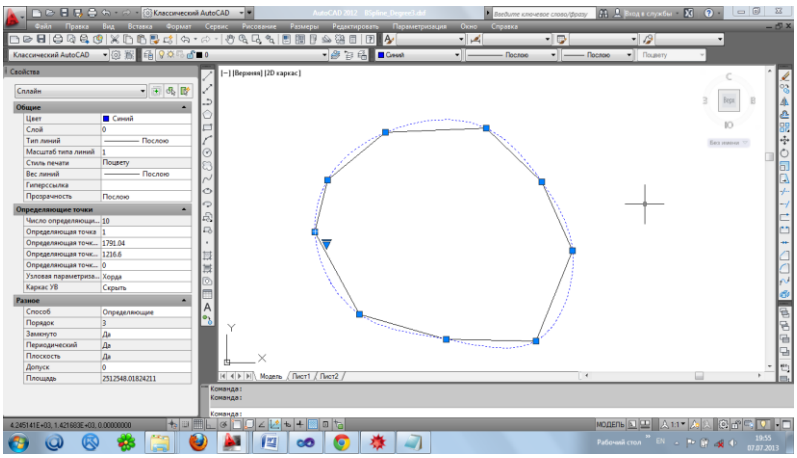

Рисунок 1. Кубический NURBS-эскиз, построенный по определяющим точка.

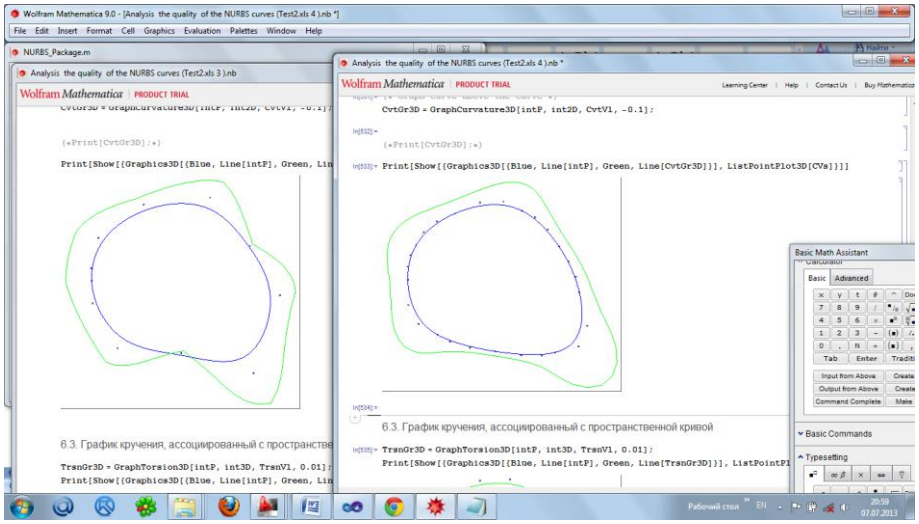

Рисунок 2. Сравнение графиков кривизны над кривой NURBS-эскиза и рафинированной NURBS кривой.

Сравнение макропараметров показывает, что количество вершин кривой снижено от 13 до 7! То есть радикально устраняется пульсация кривизны. Количество вершин минимально и соответствует структуре кривой, заданной опорными точками.

Сравнение остальных параметров не имеет смысла, так как структура исходной кривой вообще не соответствует структуре кривой, заданной ГО вида опорной ломаной.

Улучшение b-сплайновой кривой 7-ой степени, построенной по определяющим точкам в Alias Design

В Alias Design имеется технология моделирования с помощью управляющих вершин s-полигона b-сплайновой кривой довольно высоких степеней. При редактировании можно установить контроль графика кривизны и в интерактивном режиме добиться визуально хорошего графика кривизны.

Однако при реальном проектировании может возникнуть задача построения кривой на заданном эскизе или на линии измеренных точек. В этом случае подгонка кривой к эскизу или к измеренным точкам может представлять довольно трудоемкий процесс.

В Alias Design имеется процедура построения на ломаной узловых точек (Edit Points) b-сплайновой кривой степени 5 или 7. Недостатком

данной процедуры аппроксимации является низкое качество аппроксимирующей кривой.

В предложенной технологии кривая, построенная в Alias Design по определяющим точкам (рисунок 3), существенно улучшается (рисунок 4).

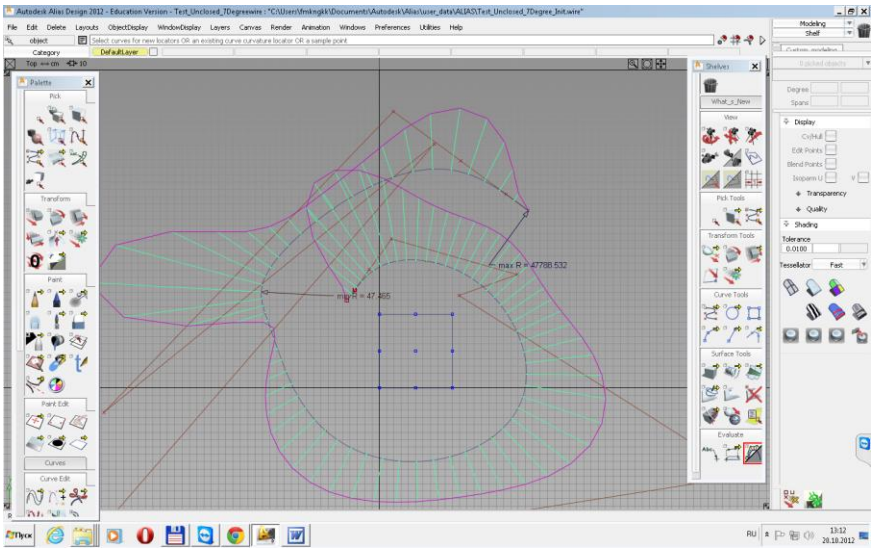

Рисунок 3. NURBS-эскиз 7-ой степени, построенный по определяющим точкам с отображением графика кривизны.

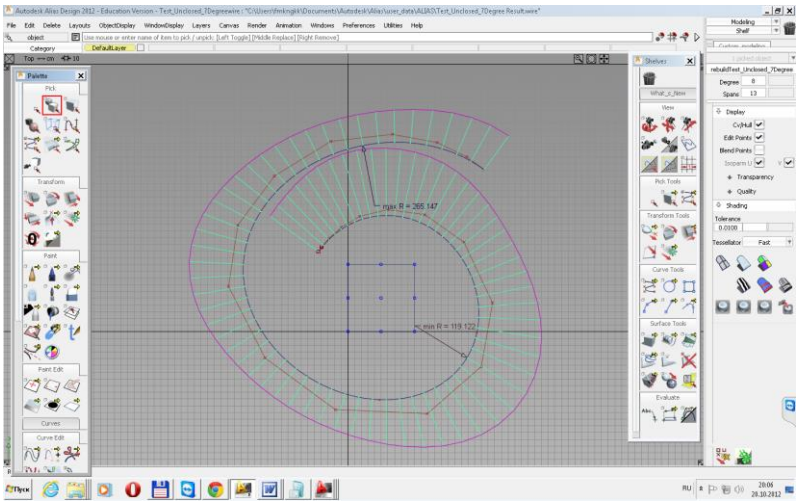

Рисунок 4. Сравнение графиков кривизны над кривой NURBS-эскиза и рафинированной NURBS кривой.

FairCurveModeler улучшает качество кривых, построенных в AutoCAD или в Alias Design, не только путем устранения пульсации кривизны на сегментах кубической b-сплайновой кривой, но и путем уменьшения вариаций кривизны на кривой в целом, уменьшения количества вершин кривой, уменьшения потенциальной энергии b-

сплайновой кривой произвольной степени. Сравнение макропараметров показывает, что устранена осцилляция кривой, количество вершин кривой снижено от 11 до 6! То есть радикально устраняется пульсация кривизны. Количество вершин минимально и соответствует структуре кривой, заданной опорными точками.

Улучшение b-сплайновой кривой 10-ой степени, построенной s-полигоном в AutoCAD

Базовый метод построения кривых высокого качества в CAD-системах – это метод прямого задания s-полигона NURBS кривой (рисунок 5). И в этом случае предложенная технология позволяет улучшить качество и повысить скорость построения кривой (рисунок 6).

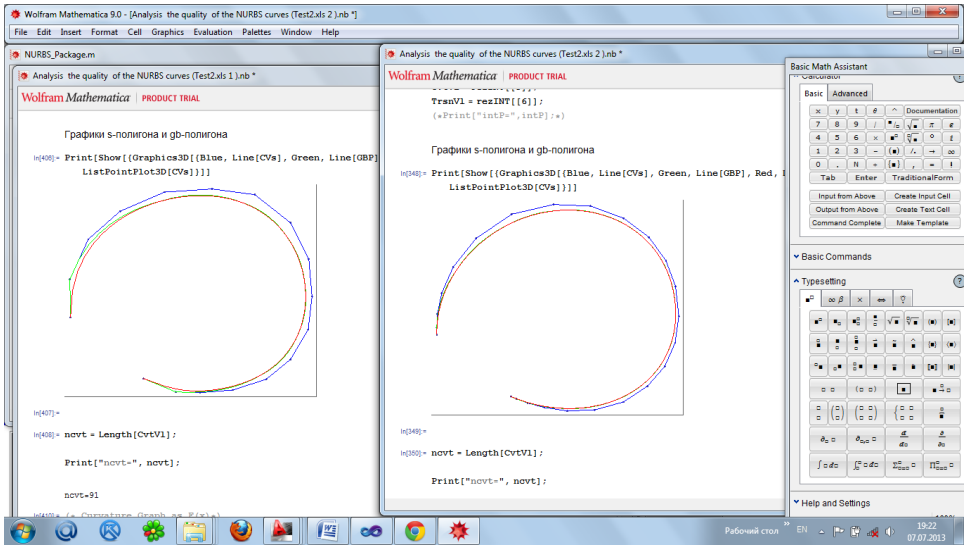

Рисунок 5. Сравнение кривых в Mathematica.

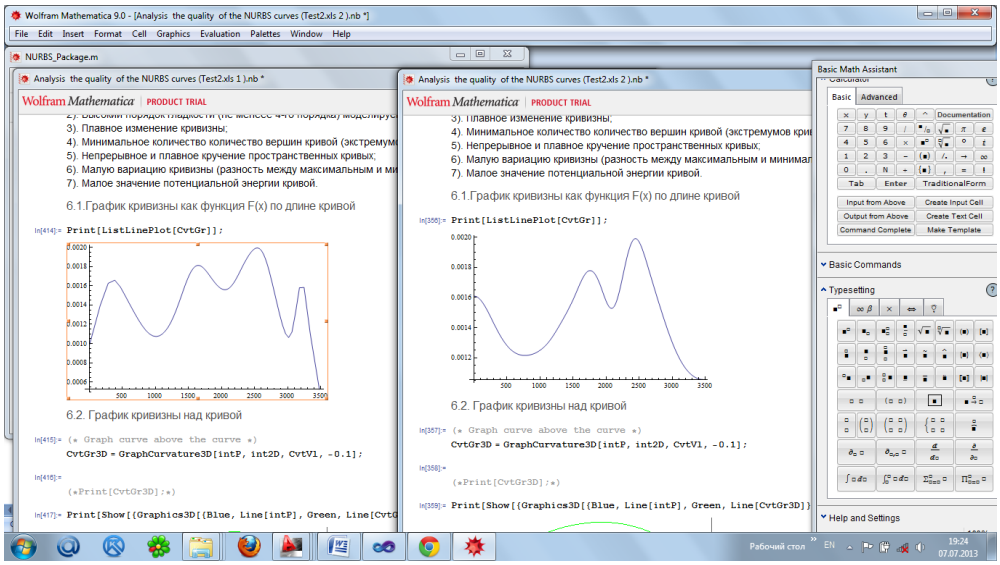

Рисунок 6. Сравнение графиков кривизны вида F(x).

Сравнение макропараметров кривых показывает уменьшение количества вершин кривой от 6 до 4. Значение потенциальной энергии уменьшилось с 0.00782128 до 0.00777411. Вариация кривизны уменьшилась с 0.00100825 до 0.0009308

Вторая версия компонента FairCurveModeler + Mathematica

К настоящему времени подготовлена 2-ая версия компонента. Во 2-ой версии программа FairCurveModeler реализована как внешняя программа (FairCurveModeler.exe) для документов Mathematica. Разработаны документы Mathematica с использованием внешней программы FairCurveModeler для моделирования / улучшения кривых линий на основе NURBS-эскизов, подготовленных в CAD-системах.

Выводы

1) Обоснован и выработан перечень базовых требований к качеству функциональных кривых. Введено понятие “кривые класса F” для обозначения функциональных кривых высокого качества.

2) Предложена технология моделирования функциональных кривых класса F в интегрированной системе “CAD-система + приложение FairCurveModeler + документы Mathematica”

3) Разработаны документы Mathematica всестороннего анализа качества и редактирования NURBS кривых, моделирования / улучшения кривых линий на основе NURBS-эскизов, подготовленных в CAD-системах.

Библиография

1. Муфтеев В.Г. Конструирование криволинейных поверхностей на основе метода огибающей и параметрических b-сплайнов. Диссертация на соиск. ученой степени канд. техн. наук.-Киев, 1986.

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

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

4. Мударисов С.Г., Муфтеев В.Г., Фархутдинов И.М. Оптимизация геометрии лемешно-отвальной поверхности плуга. Механизация и электрификация сельского хозяйства. -2009, №4, - С.17-19.

5. Муфтеев В.Г. и др. Обоснование выбора оптимальной формы функциональной кривой динамической поверхности технического изделия / В.Г.Муфтеев, С.Г.Мударисов, И.М.Фархутдинов, А.Р.Марданов, А.С.Семенов,М.А.Талыпов // Известия международной академии аграрного образования. Выпуск 17 (2013), с.90-93.

6]. Муфтеев и др. Программа изогеометрического моделирования кривых линий высокого качества. Web-приложение CAD-систем / В.Г.Муфтеев, А.Р.Марданов, А.Н.Романюк, В.Г.Турта, И.М.Фархутдинов // Компьютерная графика и распознавание изображений. Материалы международной научно-технической интернет конференции. Винница, 2012, с.127-139.

7. Муфтеев В.Г., Марданов А.Р. Изогеометрическое моделирование кривых линий и поверхностей высокого качества по базовым критериям плавности / Сборник трудов ДонНТУ серии "Информатика, кибернетика и вычислительная техника". - 2009. - Вып. 10(153).

8. Muftejev V. Modeling class F NURBS curves in the integrated environment - CAD-system + web-app FairCurveModeler + Mathematica / Wolfram Library Archive. MathSource. http://library.wolfram.com/infocenter/MathSource/8465/