



**Муфтеев В. Г.**  
**Mufteev V. G.**  
 кандидат  
 технических наук,  
 доцент кафедры  
 «Механика  
 и инженерная  
 графика»,  
 ФГБОУ ВО  
 «Башкирский  
 государственный  
 аграрный  
 университет»,  
 г. Уфа,  
 Российской  
 Федерации



**Зиатдинов Р. А.**  
**Ziatdinov R. A.**  
 кандидат физико-  
 математических  
 наук (PhD),  
 преподаватель  
 кафедры  
 «Промышленная  
 инженерия»,  
 Университет Кемён,  
 г. Тэгу,  
 Южная Корея



**Зелев А. П.**  
**Zelev A. P.**  
 кандидат  
 технических  
 наук, доцент,  
 доцент кафедры  
 «Управление и  
 сервис в технических  
 системах», ФГБОУ  
 ВО «Уфимский  
 государственный  
 нефтяной  
 технический  
 университет»,  
 г. Уфа,  
 Российской  
 Федерации



**Набиев Р. И.**  
**Nabiev R. I.**  
 кандидат  
 педагогических  
 наук, доцент  
 кафедры «Основы  
 конструирования  
 машин  
 и механизмов»,  
 ФГБОУ ВО  
 «Уфимский  
 государственный  
 авиационный  
 технический  
 университет»,  
 г. Уфа, Российской  
 Федерации



**Марданов А. Р.**  
**Mardanov A. R.**  
 инженер кафедры  
 «Основы конструирования  
 машин и механизмов»,  
 ФГБОУ ВО «Уфимский  
 государственный  
 авиационный технический  
 университет»,  
 г. Уфа,  
 Российской Федерации



**Ахметшин Р. И.**  
**Akhmetshin R. I.**  
 старший преподаватель,  
 аспирант кафедры  
 «Основы конструирования  
 машин и механизмов»,  
 ФГБОУ ВО «Уфимский  
 государственный  
 авиационный технический  
 университет»,  
 г. Уфа,  
 Российской Федерации



**Талыров М. А.**  
**Talyrov M. A.**  
 ассистент кафедры  
 «Механика и инженерная  
 графика»,  
 ФГБОУ ВО «Башкирский  
 государственный аграрный  
 университет»,  
 г. Уфа, Российской  
 Федерации

УДК 519.7

## ПРОГРАММА FAIRCURVEMODELER МОДЕЛИРОВАНИЯ КРИВЫХ И ПОВЕРХНОСТЕЙ КЛАССА «F» И РАЗРАБОТКА НА ЕЕ ОСНОВЕ ПРИКЛАДНЫХ САПР

В статье описывается программно-методический комплекс (ПМК) FairCurveModeler для моделирования кривых линий и поверхностей класса F (Functional). Качество кривых и поверхностей класса F превосходит на порядок качество кривых и поверхностей класса A. На основе ПМК FairCurveModeler разрабатываются прикладные системы автоматизированного проектирования (САПР) для проектирования объектов с функциональными кривыми и поверхностями.

Авторы предлагают концепцию применения функциональных кривых высокого качества по критериям плавности и методы моделирования, обеспечивающие эти критерии. Для реализации этого подхода предлагается ПМК FairCurveModeler.

Предложенная концепция и ее реализация посредством ПМК FairCurveModeler — универсальное и дешевое средство улучшения качества проектируемого изделия. Иными словами, вы можете, только следуя требованиям концепции и с помощью ПМК FairCurveModeler, без дизайнерских ухищрений, путем улучшения геометрии предыдущего проекта или хорошо известного проекта получить более качественный проект и продукт.

Этот подход применяется при разработке прикладных САПР и специализированных приложений.

Концепция использования кривых высокого качества при моделировании функциональных поверхностей была использована в стандартной схеме моделирования рабочей поверхности плуга.

На основе функционала ПМК разработаны методы моделирования профиля кулакка, обеспечивающие современные требования к геометрии профиля кулакка: метод геометрического моделирования профиля кулакка высокого качества по параметрам плавности: высокий порядок (до 9-го порядка) гладкости с плавным изменением кривизны и с фиксированными участками, геометрически точно совпадающими с дугами окружностей.

Большое значение для повышения качества трассы имеет функция моделирования кривой высокого качества на касательной ломаной. Данная функция позволяет моделировать трассу дороги по теодолитным ходам. При этом качество трассы не отличается от моделирования по реперным точкам.

Открытый авторами эффект влияния потенциальной энергии кривой линии траектории движения материальной частицы с трением должен, безусловно, учитываться при проектировании трассы дороги.

**Ключевые слова:** NURBS, fair curve, fair surface, кривые высокого качества, поверхности высокого качества, САПР, прикладные САПР.

## THE PROGRAM FAIRCURVEMODELER MODELING OF CURVES AND SURFACES CLASS «F» AND THE DEVELOPMENT ON ITS BASIS OF APPLICATION OF CAD

The article describes the program-methodical complex (PMC) FairCurveModeler for modeling curves and surfaces of class F (Functional). The quality of curves and surfaces of class F exceeds by an order of magnitude the quality of curves and surfaces of class A. On the basis of PMC FairCurveModeler, applied computer-aided design (CAD) systems are developed for the design of objects with functional curves and surfaces.

The authors propose the concept of application of high quality functional curves on the criteria of smoothness and modeling methods that provide these criteria. To implement this approach, a PMC FairCurveModeler.

The proposed concept and its implementation through PMC FairCurveModeler is a universal and cheap means of improving the quality of the designed product. That is, you can only follow

the requirements of the concept and with the help of PMC FairCurveModeler, without design tricks, by improving the geometry of your previous project or a well-known project to get a better project and product.

This approach is used in the development of CAD applications and specialized applications.

The concept of using high-quality curves for functional surface modeling was used in the standard scheme of plow working surface modeling.

On the basis of the functionality of the PMC developed methods for simulation of the Cam profile, which provide modern requirements to the geometry of the Cam profile: a method of geometric modeling of the Cam profile of the high quality and the parameters of smoothness: high order (up to 9th order) smoothness with smooth change of curvature and with fixed plots, geometrically identical to the arcs.

The function of modeling a high-quality curve on a tangent polyline is of great importance for improving the quality of the track. This function allows to model the road route by the traverse. The quality of the route is not different from the simulation by reference points.

The effect of the potential energy of the curve of the trajectory of a material particle with friction, discovered by the authors, should be taken into account in the design of the road route.

**Key words:** NURBS, fair curve, fair surface, high quality curves, high quality surfaces, CAD, applied CAD.

## Введение

Существует обширный класс изделий с функциональными кривыми и поверхностями, определяющими их существенные проектные характеристики. Это внешние обводы летательных аппаратов, судов; осевые линии трассы дорог, трубопроводов; профили крыльев летательных аппаратов, лопасти турбин и компрессоров, профили кулачков, рабочие поверхности почвообрабатывающих агрегатов.

На основе результатов анализа пространственной криволинейной траектории движения материальной точки формулируется список базовых требований к качеству функциональных кривых [1]:

- высокий, не ниже 4-го, порядок гладкости моделируемой кривой;
- минимум вершин кривой при заданной форме;
- ограничение значений кривизны и скорости изменения кривизны;
- плавность кручения пространственной кривой.

В качестве дополнительной оценки качества кривых используется значение потенциальной энергии кривой.

Необходимость выбора функциональной кривой с малым значением потенциальной энергии можно обосновать следующим предположением. При движении объекта с функциональной поверхностью с большой скоростью среда, обтекающая объект, ведет себя

как упругое тело. Очевидно, что для деформации упругой среды по линиям тока с меньшей потенциальной энергией будет затрачиваться меньше работы.

Кривые и поверхности, отвечающие перечисленным требованиям, были названы кривыми и поверхностями класса F (Functional) [2].

В топовых CAD-системах (Catia, NX, Alias Design) и в системах для промдизайна (Rhinoceros) существуют методы моделирования кривых высокого качества (т.н. кривые и поверхности класса A). Но кривые и поверхности класса A не удовлетворяют перечисленным выше требованиям к функциональным кривым и поверхностям. Методы класса A обеспечивают интегральную гладкость кривых и поверхностей не выше G3. И, прежде всего, эти методы не обеспечивают безусловной минимальности вершин кривой (минимальности количества экстремумов кривизны). Это означает, что если исходные точки лежат на окружности, то метод класса A нарисует плавную кривую, но не окружность.

Но такие методы есть.

Эти методы разрабатывались в ходе выполнения с 1974 г. по 1990 г. хоздоговоров по открытой тематике вуза (Уфимского авиационного института, затем Уфимского нефтяного института) с МЗ им. П.О. Сухого, с НПО «Молния», с опытно-конструкторским бюро при УМО и с рядом машиностро-

ительных предприятий. НИР были включены в планы НИР Минвуза РСФСР (секция Авиационная техника, подсекция «САПР и АСТПП поверхностей», председатель подсекции проф. Осипов В.А.).

На основе инновационных геометрически ориентированных методов был разработан программно-методический комплекс (ПМК) FairCurveModeler моделирования кривых линий и поверхностей высокого качества по критериям плавности.

Ключевой инновационный метод — метод огибающей [3], который обобщает методы прикладной геометрии обводов на основе кривых второго порядка (К2П). Моделируемая кривая не имеет аналитического выражения и была названа виртуальной кривой (v-кривой) [4]. Точки v-кривой генерируются на множествах К2П двойного соприкосновения. В пределе итераций генерации точек v-кривая стремится к кривой класса С5.

Важнейшими свойствами метода являются:

- 1) *абсолютная минимизация количества вершин* (экстремумов кривизны) кривой, определяемой на локально выпуклой ломаной;
- 2) *дуальность определителя кривой*, то есть возможность определения одной и той же кривой как на опорной ломаной, так и на касательной ломаной.

#### *Программно-методический комплекс FairCurveModeler*

Существуют две тенденции применения программных продуктов CAD/CAM/CAE систем.

Первый вариант — применение «тяжелой» системы САПР. Этот вариант предпочтителен для крупных предприятий с относительно устоявшейся технологией проектирования.

Второй вариант — *интеграция различных CAD/CAM/CAE систем*. Благодаря стандартам обмена графическими и геометрическими моделями между CAD/CAM/CAE системами можно создавать произвольные конфигурации интегрированной CAD/CAM/CAE системы. Этот вариант дает возможность конфигурирования и развития инте-

грированной системы в соответствии с реальными потребностями и финансовыми возможностями пользователя, а также обеспечивает возможность выбора лучшего в своем классе продукта.

Базовый функционал CAD-системы реализуется набором ПМК, решающих некоторую законченную задачу, например моделирование NURBS кривых и поверхностей [5]. Базовый функционал существующих CAD-систем не всегда удовлетворяет всем требованиям конкретных задач, встающих перед инженерами. Расширение функционала CAD-систем выполняется внешними приложениями. Внешнее приложение может представлять собой *функциональный ПМК*, который расширяет и развивает базовый функционал. Внешнее приложение может решать некоторую специальную инженерную задачу на основе базового функционала CAD-системы. В этом случае внешнее приложение называется *прикладной САПР*.

ПМК FairCurveModeler [2, 6–8] относится к функциональным ПМК. ПМК FairCurveModeler расширяет и развивает базовый функционал CAD-систем до возможности моделирования кривых линий и поверхностей класса F.

Интеграция ПМК FairCurveModeer в CAD/CAM/CAE системы решается 3 способами.

1). Используются API конкретных CAD/CAM/CAE систем. Функции прикладного приложения разрабатываются как приложения конкретных CAD-систем (AutoCAD + вертикальные продукты AutoCAD, nanoCAD, КОМПАС) и математических компьютерных систем (MathCAD, Mathematica). Приложения выполняются в десктопном варианте.

2). Разрабатывается облачный продукт FairCurveModeler как приложение всех CAD-систем [8]. Облачные технологии в настоящее время интенсивно развиваются. Позволяют реализовать принцип «мощный сервер — тонкий клиент». *Обеспечивается доступность и постоянная актуальность продукта*. Связь с CAD-системами реализуется с помощью стандартных файлов обмена (DXF-файлов и IGES файлов) и передачей моделей через буфер памяти.

3). Разрабатывается универсальная открытая платформа на базе Excel + VBA + FairCurveModeler + CAD-системы [7]. Связь с CAD-системами реализуется с помощью стандартных файлов обмена (DXF-файлов), передачей моделей через буфер памяти и через специальный Геометрический Буфер (ГБ).

Последние два способа *независимы от конкретных CAD-систем*.

ПМК FairCurveModeler имеет в своем составе следующие приложения:

- 1). ‘FairCurveModeler app AutoCAD’ приложение AutoCAD и вертикальных продуктов AutoCAD;
- 2). прикладная библиотека ‘FairCurveModeler 2D’ КОМПАС ГРАФИК;
- 3). прикладная библиотека ‘FairCurveModeler 3D’ КОМПАС 3D;
- 4). ‘Web FairCurveModeler’ — облачный продукт;
- 5). ‘FairCurveModeler app Mathematica’ — приложение математического пакета Mathematica;
- 6). FairCurveModeler.xlsм — приложение Excel.

Приложения разрабатываются по технологии СОМ-автоматизации.

Весь геометрический функционал содержится в одной DLL-программе FairCurve.exe. Все приложения (кроме прикладных библиотек КОМПАС 3D) используют один единственный СОМ-компонент FairCurve.exe.

Собственно приложения обеспечивают только интерфейс между системой и пользователем, системой и внешним СОМ-компонентом.

Приложения ПМК для различных систем могут работать согласованно, используя т.н. Геометрический Буфер для обмена NURBS моделями кривых и поверхностей. ГБ представляет собой папку с зарезервированным именем ‘FairCurveModeler\_TEMP’.

Для разработки прикладных САПР и специализированных приложений на основе ПМК FairCurveModeler рекомендуется использовать интегрированную платформу, состоящую из следующих компонентов:

- 1). Компьютерные математические системы (MatchCAD, Mathematica, Wolfram Cloud);

2). CAD-системы для моделирования (AutoCAD / nanoCAD / КОМПАС);

3). CAD-система для конструирования — КОМПАС 3D;

4). CAE-системы для испытаний на аэrodинамику и прочность (Flow Vision, Win Machine).

ПМК FairCurveModeler + интегрированная платформа позволяют:

1) выполнять моделирование кривых линий и криволинейных поверхностей и тестирование их качества с использованием ПМК FairCurveModeler и компонентов интегрированной платформы;

2) выполнять гидродинамическое испытание объектов с функциональными поверхностями в CAE-системе FlowVision, выполнять анализ на прочность в CAE-системе WinMachine;

3) конструировать 3D модели деталей и сборки в КОМПАС 3D, обеспечить законченный цикл проектирования подготовкой чертежной документации и спецификаций по 3D моделям деталей и сборок в КОМПАС 3D.

В ПМК FairCurveModeler v-кривые высокого качества изогеометрически и с сохранением качества аппроксимируются NURBS кривыми, которые являются фактическим стандартом для CAD/CAM/CAE систем. NURBS поверхности высокого качества, моделируемые на каркасах и сетях v-кривых, конвертируются в примитивы CAD-систем путем аппроксимации или, с сохранением точной геометрии, через стандарт IGES.

Чрезвычайно важно в условиях жесткой конкуренции на рынке САПР иметь программные продукты отечественного производства, которые бы не уступали западным в возможности моделирования кривых и поверхностей высокого качества по критериям плавности.

ПМК FairCurveModeler дополняет функционал отечественных программных продуктов до более высокого уровня, чем уровень топовых CAD-систем. Это отечественные CAD-системы, геометрические ядра которых независимы от импортных аналогов. Это nanoCAD и КОМПАС 3D. ПМК FairCurveModeler позволяет в интеграции с nanoCAD и КОМПАС моделировать кривые

и поверхности класса F, качество которых на порядок выше, чем качество кривых и поверхностей класса A.

При разработке ПМК используются API AutoCAD и язык программирования Visual AutoLISP. Развитые средства отладки Visual AutoLISP позволяют в короткие сроки выполнить и отладить функции ПМК.

Отечественный продукт nanoCAD не имеет таких широких возможностей, но приложения на языке AutoLISP адекватно воспринимаются nanoCAD.

ПМК в виде приложения КОМПАС 3D разрабатывается на основе API 'КОМПАС МАСТЕР'.

#### *Прикладные САПР*

Авторы предлагают концепцию применения функциональных кривых высокого качества по критериям плавности и методы моделирования, обеспечивающие эти критерии. Для реализации этого подхода предлагается ПМК FairCurveModeler.

*Концепция и выполнение ПМК FairCurveModeler — универсальное и дешевое средство улучшения качества проектируемого изделия.* Иными словами, вы можете, только следуя требованиям концепции и с помощью ПМК FairCurveModeler, без дизайнерских ухищрений, путем улучшения геометрии вашего предыдущего проекта или хорошо известного проекта получить более качественный проект и продукт.

Этот подход применяется при разработке прикладных САПР и специализированных приложений.

#### *Прикладная САПР плуга общего назначения*

В рамках научного направления «Совершенствование технических средств и технологических приемов сельскохозяйственного производства (госрегистрация № 01201462520)» под руководством проф. С. Г. Мударисова разрабатывается прикладная САПР плугов общего назначения (разработчики: С. Г. Мударисов, В. Г. Муфтеев, И. М. Фархутдинов, А. Р. Марданов).

Концепция использования кривых высокого качества при моделировании функциональных поверхностей была использована в стандартной схеме моделирования рабочей поверхности плуга проф. Н. В. Щучкина [9].

В схеме были отбракованы кривые, приводящие к нерегулярным участкам поверхности, и заменены кривыми высокого качества [10, 11]. Также была радикально решена проблема устранения задира почвы кромкой плуга [12].

Два важных положения были реализованы в конструкции плуга:

1) при больших скоростях пласт почвы ведет себя как упругое тело. Очевидно, что упругая деформация по траектории с наименьшей потенциальной энергией потребует меньше энергетических затрат на деформацию;

2) на основе анализа формулы работы по перемещению материальной точки по вогнутой кривой с трением и формулы потенциальной энергии кривой доказывается, что чем меньше потенциальная энергия криволинейной траектории, тем меньше энергии будет затрачиваться на перемещение материальной точки по криволинейной траектории на преодоление сил трения, возникающих от нормального ускорения материальной точки [13].

Геометрия рабочей поверхности плуга проверена путем тестирования почвенно-динамических характеристик отвала в системе Flow Vision [11].

В прикладной САПР на платформе MathCAD + FairCURveModeler + AutoCAD + КОМПАС 3D выполнено проектирование и изготовление опытного образца плуга по предложенному методу.

Полевые испытания опытного образца показали поразительный результат. Произошло одновременное и улучшение качества вспашки, и снижение энергозатрат [14].

#### *Кулачковые механизмы*

На основе функционала ПМК FairCurveModeler разрабатывается прикладная САПР кулачковых механизмов на кафедре основ конструирования механизмов и машин УГАТУ (разработчики В. Г. Муфтеев, Р. И. Ахметшин).

В общем случае к геометрическим свойствам профилей кулачков и, соответственно, к методам профилярирования и методам геометрического представления профилей предъявляются следующие требования:

1) высокий порядок гладкости (не ниже 5-го порядка). Несоблюдение этого

требования буквально «дорого» обошлось владельцам «жигулей» 70-х годов прошлого века [15];

2) плавность изменения дифференциальных характеристик, влияющих на ускорение (acceleration) и динамический удар (jerk) [16, 17];

3) сохранение постоянства диаметра кулачка на участках «выстоя» толкателя [17].

Существующие методы не обеспечивают одновременно все требования к геометрическим свойствам профилей кулачков.

На основе функционала ПМК разработаны методы моделирования профиля кулачка, обеспечивающие современные требования к геометрии профиля кулачка:

- метод геометрического моделирования профиля кулачка 2-го порядка гладкости и с фиксированными участками, геометрически точно совпадающими с дугами окружностей;

- метод геометрического моделирования профиля кулачка высокого качества по параметрам плавности: высокий порядок (до 9-го порядка) плавности с плавным изменением кривизны и с фиксированными участками, геометрически точно совпадающими с дугами окружностей;

- разработан документ MathCAD для анализа вертикального перемещения толкателя, скоростей, ускорений, третьих производных вертикального перемещения толкателя.

*Приложение для моделирования функциональных эстетических кривых на базе аналитических кривых*

На кафедре основ конструирования механизмов и машин УГАТУ разрабатывается специализированное приложение для моделирования функциональных эстетических кривых и поверхностей (разработчики: В.Г. Муфтеев, Р.А. Зиятдинов, Р.И. Набиев).

Эстетические качества изделия играют важную роль в его продвижении на рынке сбыта. Эстетика внешнего облика и внутреннего дизайна автомобиля является важнейшей характеристикой при оценке автомобиля покупателем. Эстетика внешнего и внутреннего дизайна становится значимой и для множества других объектов промышленного

дизайна. Таким образом, эстетика становится важной составляющей потребительских свойств изделия.

К эстетической оценке кривых и поверхностей предлагается многокритериальный подход [18].

Приоритетным является оценка по критериям плавности. Экспертная оценка с позиций законов технической эстетики правомерна только после оценки на плавность.

#### *Приложение Mathematica*

В приложении используется десктопный вариант Mathematica.

В приложении реализованы методы приближения фиксированных аналитических функциональных и эстетических кривых. Для моделирования эстетических кривых используется универсальная формула Суперспиралей Зиятдинова [19]. С помощью параметров управления формой (a, b, c) можно генерировать любую известную спираль (клоноиду, логарифмическую спираль, эвольвенту) и любую спиралевидную кривую.

NURBS-шаблоны эстетических кривых передаются в CAD-системы в виде DXF файлов или через Геометрический Буфер.

#### *Web-приложение на интегрированной платформе*

Данное приложение обходится без десктопного варианта Mathematica.

В облачном варианте реализованы методы приближения фиксированных аналитических функциональных и эстетических кривых и методы построения плавных участков сопряжения.

В приложении предлагается техника (методика) моделирования эстетических кривых в интегрированной системе Web Fair-CurveModeler + Cloud Wolfram + Excel VBA. Web FairCurveModeler обеспечивает интерфейс между CAD-системой пользователя и реализацией запросов на моделирование функциональных и эстетических кривых. В Cloud Wolfram реализуются расчеты определения функциональных и эстетических на основе сложных аналитических выражений функциональных (цепная линия, клоноид, эвольвента, коническая спираль и т.п.) и эстетических кривых и Суперспиралей Зиятдинова.

### *Прикладная САПР трассирования дороги*

Прикладная САПР трассирования дороги разрабатывается на кафедре автомобильных дорог и технологии строительного производства архитектурно-строительного института УГНТУ (разработчики: В.Г. Муфтеев, М.А. Талыпов, М.М. Фаттахов, М.М. Абдуллин, П.А. Федоров).

Теоретические основы разработки прикладной САПР приведены в [20, 21].

Большое значение для повышения качества трассы имеет уникальная функция моделирования v-кривой высокого качества на касательной ломаной. Данная функция позволяет моделировать трассу дороги по теодолитным ходам. При этом качество трассы не отличается от моделирования по реперным точкам.

Открытый авторами эффект влияния потенциальной энергии кривой линии траектории движения материальной частицы с трением оказывает существенное влияние на способ проектирования трассы дороги.

В перспективных исследованиях авторы планируют обосновать и реализовать высокий порядок гладкости (не ниже 4-го порядка) трассы дороги в плане и в профиле.

Прикладная САПР трассирования дороги разрабатывается на основе релиза программы FairCurveModeler на платформах AutoCAD и AutoCAD Civil [6].

Авторы считают, что прикладная САПР трассирования дороги может найти применение и в трубопроводном транспорте, особенно при проектировании переходных участков трубопроводов на поворотах и пересечениях естественных препятствий вида русла рек.

### *Образование*

На кафедре основ конструирования и машин разрабатывается интерактивное учебное пособие в рамках образовательной системы Moodle УГАТУ (разработчики В.Г. Муфтеев, А.П. Зелев, Р.И. Набиев, Р.И. Ахметшин).

В [22] предложен инновационный подход к обучению графическим дисциплинам и основам САПР. Этот подход реализован в виде учебного курса обучения основам САПР КОМПАС 3D на платформе образовательной системы Moodle в УГАТУ.

В существующих САПР общего машиностроения (КОМПАС, AutoCAD, nanoCAD) отсутствуют специальные команды построения кривых и поверхностей класса А и F.

Будущие инженеры, которые обучаются методам геометрического моделирования с применением функционала обычных машиностроительных САПР, не получают знаний, навыков и умения моделирования кривых и поверхностей высокого качества для изделий с функциональными кривыми и поверхностями. И в будущем они обречены на проектирование изделий с низкими функциональными характеристиками.

Для обучения инновационным методам моделирования кривых линий высокого качества в среде КОМПАС ГРАФИК на основе функционала ПМК FairCurveModeler разработано интерактивное учебное пособие ‘6 Моделирование кривых линий класса F’. Учебное пособие включено в курс обучения основам САПР КОМПАС 3D на платформе образовательной системы Moodle в УГАТУ [23].

В учебном пособии кратко излагается теория кривых линий высокого качества по критериям плавности, описываются способы моделирования кривых с применением программы FairCurveModeler на различных видах исходных данных, показывается преимущество способов моделирования перед существующими способами в CAD-системе КОМПАС 3D. Даются упражнения для освоения способов. Приводятся контрольные вопросы для закрепления изученного материала. Предлагается интерактивный тест с получением оценки.

### **Выводы**

В статье предложен программно-методический комплекс FairCurveModeler для моделирования кривых линий и поверхностей класса F (Functional). Качество кривых и поверхностей класса F превосходит на порядок качество кривых и поверхностей класса А.

На основе ПМК FairCurveModeler разработаны прикладные САПР для проектирования объектов с функциональными кривыми и поверхностями.

Показано, что концепция применения кривых высокого качества по критериям плавности позволяет улучшать качество проектируемых изделий.

## Список литературы

1. 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 // Известия Международной академии аграрного образования. 2013. Вып. 17. С. 90–93.
2. Mufteev V. Modeling class F NURBS curves in the integrated environment — CAD-system + web-app FairCurveModeler + Mathematica / Wolfram Library Archive. MathSource. 2013-07-26. URL: <http://library.wolfram.com/infocenter/MathSource/8465> (дата обращения: 01.07.2017).
3. Муфтеев В.Г. Конструирование плоских кривых методом огибающей // Изв. вузов. Авиационная техника. 1980. № 4. С. 43–47.
4. Муфтеев В.Г., Марданов А.Р. Геометрическое моделирование кривых линий высокого качества // Прикладная геометрия. Applied Geometry [Электронный ресурс]. М.: МАИ, 2006. № 18, Вып. 8. Режим доступа к журн.: <http://www.mai.ru>. Загл. с титул. экрана. С. 37–66.
5. Норенков И.П. Автоматизированное проектирование. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 188 с.
6. URL: [https://apps.autodesk.com/ACD/en/Detail/Index?id=4526969846340104233&appLang=en&os=Win32\\_64&mode=preview&autoStart=True&loginRequired=True](https://apps.autodesk.com/ACD/en/Detail/Index?id=4526969846340104233&appLang=en&os=Win32_64&mode=preview&autoStart=True&loginRequired=True).
7. Муфтеев В.Г., Аминев Р.И., Гизатова Д.Х., Талыпов М.А. Открытая платформа для разработки прикладных САПР изделий с функциональными кривыми и поверхностями // Проблемы строительного комплекса России: матер. XX Междунар. науч.-техн. конф. 2016. С. 115–117.
8. Муфтеев В.Г., Марданов А.Р., Романюк А.Н., Турта В.Г., Фархутдинов И.М. Программа изогеометрического моделирования кривых линий высокого качества. Web-приложение CAD-систем // Компьютерная графика и распознавание изображений: матер. Междунар. науч.-техн. интернет-конф. Винница, 2012. С. 127–139.
9. Щучкин Н.В. Лемешные плуги и лущильники. М.: Машгиз, 1952. 291 с.
10. Патент 111380 РФ, МПК F 01 B 15/08. Корпус плуга / С.Г. Мударисов, В.Г. Муфтеев, И.М. Фархутдинов (РФ). 2011135766/13, Заявл. 26.08.2011; Опубл. 20.12.2011 Бюл. № 35.
11. 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.
12. Свидетельство программы на ЭВМ № 2011614160 Россия. Программа формирования предельной линии задира на отсеке лемешно-отвальной поверхности корпуса плуга / В.Г. Муфтеев, С.Г. Мударисов, А.Р. Марданов, И.М. Фархутдинов. 2010612350; заявл. 05.04.2011; опубл. 27.05.2011. 10 с.
13. 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 // Известия Международной академии аграрного образования. 2013. Вып. 17. С. 90–93.
14. Фархутдинов И.М. Совершенствование лемешно-отвальной поверхности корпуса плуга на основе моделирования технологического процесса вспашки: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2012. 176 с.
15. Интервью с А. Рожковым. Кулачки анфас и в профиль // За рулем. 1997. № 5. С. 162–163.
16. Авторское свидетельство 1237778, МПК F 01 L, 1/08. Кулачок привода клапана / А.П. Рожков, приоритет от 5.09.1983, зарегистрирован 15.02.1986; с 1.07.1991 выдан патент взамен авторского свидетельства.
17. Neamtu M., Pottmann H., Schumaker L.L. Designing NURBS Cam Profiles Using Trigonometric Splines // Journal of Mechanical Design. 1998. No. 120 (2). P. 175–180.
18. Муфтеев В.Г., Зиатдинов Р.А. Функциональность и эстетичность кривых линий в промышленном дизайне: многокритериальный подход к оценке качества форм в CAD-системах будущего // Вестник машиностроения. 2018. № 7. С. 23–27.
19. Ziatdinov R. Family of Superspirals with Completely Monotonic Curvature Given in Terms of Gauss Hypergeometric Function //

- Computer Aided Geometric Design. 2012. No. 29 (7). P. 510-518.
20. Фаттахов М.М., Федоров П.А., Абдулин М.М., Муфтеев В.Г., Марданов А.Р. Моделирование параметров автомобильных дорог в архитектурно-ландшафтном проектировании (с элементами дорожной геометрии). Уфа: Нефтегазовое дело, 2014. 268 с.
  21. Муфтеев В.Г., Талыпов М.А., Абдулин М.М., Федоров П.А., Фаттахов М.М. Проектирование оси трассы с помощью программы Faircurvemodeler // Проблемы строительного комплекса России: матер. XVIII Междунар. науч.-техн. конф. 2014. С. 152–155.
  22. Зелев А.П., Муфтеев В.Г., Талыпов М.А. Концепция информационной системы преподавания графических дисциплин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. № 2. С. 41–47.
  23. URL: [http://fair-nurbs.ru/CONTENT\\_KG/MU\\_KG\\_UAI.htm](http://fair-nurbs.ru/CONTENT_KG/MU_KG_UAI.htm).

### References

1. Mufteev V.G., Mudarisov S.G., Farhutdinov I.M., Mardanov A.R., Semenov A.S., Talypov M.A. Determination of the Optimal Form of Functional Curve of Working Surface of Technical Object. *News of the International Academy of Agrarian Education*, 2013, Issue 17, pp. 90–93. [in Russian].
2. Mufteev V. Modeling Class F NURBS Curves in the Integrated Environment — CAD-system + web-app FairCurveModeler + Mathematica. *Wolfram Library Archive. MathSource*. 2013-07-26. URL: <http://library.wolfram.com/infocenter/MathSource/8465/> (accessed 01.07.2017). [in Russian].
3. Mufteev V.G. The construction of plane curves by the envelope method. *Izv. vuzov. Proceedings of Higher Educational Institutions. Aviation Equipment*, 1980, No. 4, pp. 43–47. [in Russian].
4. Mufteev V.G., Mardanov A.R. Geometric Modeling of High-Quality Curves. *Applied Geometry* [Electronic Resource]. Moscow, MAI, 2006, No. 18, Issue 8, pp. 37–66. Available at: <http://www.mai.ru>. [in Russian].
5. Norenkov I.P. *Computer-Aided Design*. Moscow, MSTU named for N.Je. Bauman, 2000. 188 p. [in Russian].
6. URL: [https://apps.autodesk.com/ACD/en/Detail/Index?id=4526969846340104233&appLang=en&os=Win32\\_64&mode=preview&autoStart=True&loginRequired=True](https://apps.autodesk.com/ACD/en/Detail/Index?id=4526969846340104233&appLang=en&os=Win32_64&mode=preview&autoStart=True&loginRequired=True).
7. Mufteev V.G., Aminev R.I., Gizatova D.H., Talypov M.A. Open Platform for the Development of Applied CAD Products with Functional Curves and Surfaces. *Materials of XX International Scientific and Technical Conference «Problems of the Russian Construction Industry»*, 2016, pp. 115–117. [in Russian].
8. Mufteev V.G., Mardanov A.R., Romanjuk A.N., Turta V.G., Farhutdinov I.M. Program of Isogeometric Modeling of High-Quality Curves. Web-Application of CAD-Systems. *Materials of International Scientific and Technical Internet-Conference «Computer Graphics and Image Recognition»*. Vinnitsa, 2012, pp. 127–139. [in Russian].
9. Shhuchkin N.V. *Reversible Plows and Cultivators*. Moscow, Mashgiz Publ., 1952. 291 p. [in Russian].
10. Mudarisov S.G., Mufteev V.G., Farhutdinov I.M. *Plow Body*. Patent RF, No. 111380, 2011. [in Russian].
11. Mudarisov S.G., Mufteev V.G., Farhutdinov I.M. Optimization of the Geometry of the Plowshare-Plow Surface. *Mechanization and Electrification of Agriculture*, 2009, No. 4, pp. 17–19. [in Russian].
12. Mudarisov S.G., Mufteev V.G., Farhutdinov I.M., Mardanov A.R. *The Program of Formation of the Limiting Line of a Teaser on a Compartment of a Plowshare Leach-And-Dump Surface*. Program for PC, No. 2011614160, 2011. [in Russian].
13. Mufteev V.G., Mudarisov S.G., Farhutdinov I.M., Mardanov A.R., Semenov A.S., Talypov M.A. Substantiation of the Choice of the Optimal Shape of the Functional Curve of the Dynamic Surface of a Technical Product. *Izvestiya International Academy of Agrarian Education*, 2013, Issue 17, pp. 90–93. [in Russian].
14. Farhutdinov I.M. *Improvement of the Plowshare Surface on the Basis of Plowing Process Modeling*. Cand. Engin. Sci. Diss. Ufa, 2012. 176 p. [in Russian].
15. Interview with A. Rozhkov. *Cams in Full Face and in Profile*. Steering, 1997, No. 5, pp. 162–163. [in Russian].

16. Rozhkov A.P. *Cam Valve Actuator*. Certificate of Authorship RF, No. 1237778, 1991. [in Russian].
17. Neamtu M., Pottmann H., Schumaker L.L. Designing NURBS Cam Profiles Using Trigonometric Splines. *Journal of Mechanical Design*, 1998, No. 120 (2), pp. 175–180.
18. Mufteev V.G., Ziatdinov R.A. Functionality and Aesthetics of Curved lines in Industrial Design: a Multi-Criteria Approach to assessing the Quality of Forms in CAD Systems of the Future. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2018, No. 7, pp. 23–27.
19. Ziatdinov R. Family of Superspirals with Completely Monotonic Curvature Given in Terms of Gauss Hypergeometric Function. *Computer Aided Geometric Design*, 2012, No. 29 (7), pp. 510–518. [in Russian].
20. Fattahov M.M., Fedorov P.A., Abdulin M.M., Mufteev V.G., Mardanov A.R. *Modeling Highway Parameters in Architectural and Landscape Design (with Elements of Road Geometry)*. Ufa, Neftegazovoe delo Publ., 2014. 268 p. [in Russian].
21. Mufteev V.G., Talypov M.A., Abdulin M.M., Fedorov P.A., Fattahov M.M. Designing of a Path Axis Using the Faircurvemodeler Program. *Materials of XX International Scientific and Technical Conference «Problems of the Russian Construction Industry»*, 2014, pp. 152–155. [in Russian].
22. Zelev A.P., Mufteev V.G., Talypov M.A. Concept of the Information System for Teaching Graphic Disciplines. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, Vol. 13, No. 2, pp. 41–47. [in Russian].
23. URL: [http://fair-nurbs.ru/CONTENT\\_KG/MU\\_KG\\_UAI.htm](http://fair-nurbs.ru/CONTENT_KG/MU_KG_UAI.htm).