

Реконструкция параметрической модели лопатки турбины из набора аэродинамических сечений с использованием техники сглаживания

С.Е. Сляднев, В.Е. Турапов

sergey.slyadnev@gmail.com | vadim.turlapov@itmm.unn.ru

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Описан подход к восстановлению параметрической твердотельной модели лопатки турбины из заданного набора аэродинамических сечений. Новизна подхода состоит в применении техники сглаживания при построении поверхности пера лопатки. Промежуточный этап сглаживания позволяет избавиться от геометрических осцилляций, возникающих из-за неточности во входных данных. Предложенный метод находит применение в обратном инжиниринге трехмерных моделей турбомашин.

Ключевые слова: обратный инжиниринг, геометрическое моделирование, турбостроение, сглаживание, параметрическая модель, Analysis Situs, OpenCascade.

Reverse engineering of turbine blades from airfoil sections using curve fairing operator

S.E. Slyadnev, V.E. Turlapov

sergey.slyadnev@gmail.com | vadim.turlapov@itmm.unn.ru

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation

We present an enhanced method for reconstructing parametric solid models of turbine blades from the given set of airfoil sections. The novelty of our approach is using a fairing operator as an intermediate stage of reconstruction. The curve fairing operator eliminates high-frequency geometric oscillations induced by noisy input data. The proposed method can be used for reverse engineering of CAD models in turbomachinery field.

Keywords: reverse engineering, geometric modeling, turbomachinery, fairing, parametric model, Analysis Situs, OpenCascade.

1. Введение

Типовой цикл проектирования лопатки турбомашин состоит в последовательном подборе параметров изделия до тех пор, пока не будут достигнуты целевые эксплуатационные качества при допустимой стоимости изготовления. Как правило, изменение параметров модели происходит сообразно результатам промежуточных аэрогидродинамических расчетов. Поведение потока, предсказанное расчетом, используется для оптимизации формы через посредство имеющихся переменных проектирования. На Рис. 1 показан классический цикл оптимизации [1].

Традиционно, моделирование лопатки начинается с параметризации ее аэродинамического профиля (сечения). «Стопка» сечений формирует перо лопатки, чья эталонная геометрия может быть получена методом скрининга [2]. Альтернативой такому моделированию «снизу-вверх» является восстановление формы лопатки из имеющихся данных о форме реального изделия или потоке вблизи него. Так, информация о потоке используется в задачах обратного (инверсного) проектирования. Цель инверсного проектирования состоит в получении геометрии лопатки исходя из желаемого поведения потока. Как в прямой, так и в обратной задаче, параметрическая модель изделия есть необходимый ингредиент общего процесса проектирования. Параметрическая модель выступает в роли «поставщика» эталонной формы изделия для данного набора переменных проектирования $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^N$ (N – количество переменных). Из эталонной формы, в свою очередь, будет построена расчетная сетка для численного моделирования физики процесса. Настоящая работа направлена на создание геометрического инструментария для эффективной реконструкции трехмерных параметрических моделей турбомашин из облака точек.

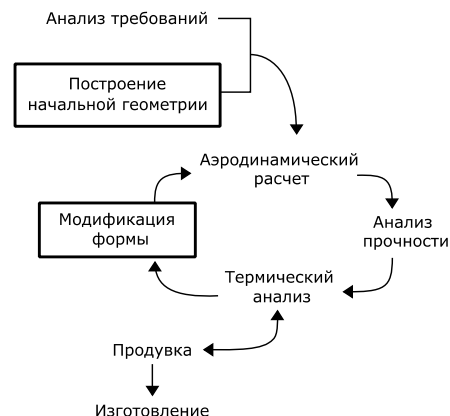


Рис. 1. Традиционный цикл оптимизации модели турбомашин. Жирным обведены подзадачи, имеющие чисто геометрическую подоплеку и, потому, находящиеся в фокусе нашего внимания.

Несмотря на то, что задача геометрического моделирования компонент турбомашин считается многократно решенной, мы видим существенные пробелы в ранее опубликованных работах и доступном программном обеспечении. Во-первых, обратный инжиниринг, хотя и предполагает использование «джентльменского набора» геометрических операторов, но требует специальных подходов для борьбы с неточностью входных данных. Поэтому классические «прямые» операторы моделирования применимы к задачам реконструкции лишь с оговорками. Во-вторых, восстановлению подлежит не конкретная геометрическая модель, но параметрическое семейство таких моделей $S(\mathbf{a})$, сохраняющее в своей структуре замысел проектировщика. Большинство же методов, публикуемых по поводу реконструкции, ограничивается воссозданием «немой» формы изделия. В-

третьих, для эффективной параметрической оптимизации недостаточно иметь только лишь параметрическую модель. При высокой размерности пространства поиска $N \gg 1$ эффективными становятся градиентные методы оптимизации [3], требующие вычисления вектора $\nabla S(\mathbf{a})$. Компоненты вектора ∇S есть частные производные формы по параметрам проектирования. Такие производные называют «чувствительностью» модели, поскольку они отражают вклад каждой переменной проектирования в итоговую форму. В данной работе делаются первые шаги по направлению к созданию геометрического ядра системы, предоставляющей интерфейс, схематично изображенный на Рис. 2. Создание подобных систем геометрического моделирования является актуальной задачей, широко востребованной промышленностью.

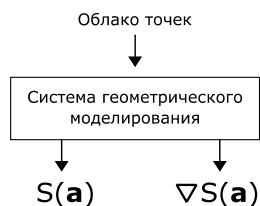


Рис. 2. Интерфейсы целевой системы геометрического моделирования. Для эффективной параметрической оптимизации целевая система должна возвращать не только параметрическую модель, но и ее градиент (в общем случае – производные высших порядков).

Из практики замечено, что в «грамотно» спроектированной модели $S(\mathbf{a})$ варьирование вектора параметров \mathbf{a} сохраняет не только геометрическую, но и концептуальную целостность формы. Говорят, что такая модель отражает *замысел проектировщика*. Автоматическая реконструкция – сложная задача, во многом из-за того, что требуется *алгоритмически* распознать и воссоздать этот замысел.

Как справедливо указано в [4], чтобы обратный инжиниринг вообще имел смысл, необходимо привлечь в процессе реконструкции как можно больше инженерного знания не о форме, но о самой структуре модели. В настоящей работе мы накладываем дополнительные ограничения на входные данные, требуя организации облака точек по продольным сечениям лопатки. Это допущение позволяет зафиксировать структуру параметрической модели, обеспечивая, тем самым, соблюдение наперед заданной конструктивной концепции. Заметим, что указанное ограничение не отменяет общности самих геометрических операторов, реализованных в рамках настоящего исследования.

Мы описываем процесс реконструкции элементов рабочего колеса турбины, состоящего из основания, набора лопаток и обода (Рис. 3).

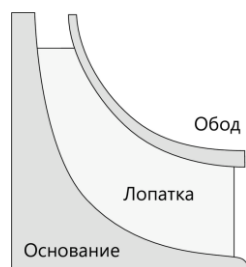


Рис. 3. Меридиональная проекция рабочего колеса турбины с лопаткой и ободом.

Статья организована следующим образом. Раздел 2 содержит обзор текущего положения дел в области реинжиниринга применительно к турбостроению. Формат

исходных данных кратко описан в Разделе 3, где вводятся основные ограничения метода. В Разделе 4 изложены этапы реконструкции модели. Первостепенное внимание уделено оператору скиннинга со сглаживанием. Раздел 5 содержит промежуточные выводы и указывает направление дальнейших исследований.

2. Обзор подходов

Цель реинжиниринга состоит в преобразовании геометрического «артефакта» в инженерную концепцию [4]. Реинжиниринг лопаток турбомашин затруднен тем, что восстановлению подлежат поверхности свободной формы. Как правило, такие поверхности получают оператором скиннинга, то есть путем интерполяции аэродинамических сечений лопатки. В процессе реконструкции требуется принять решение о параметризации сечения и зафиксировать, тем самым, конструктивную концепцию восстанавливаемой модели.

Способов параметризации аэродинамического профиля существует множество. Так, авторы [4] используют последовательность дуг окружностей для представления формы сечений. Другие варианты включают явное использование В-кривых, распределение толщины пера вдоль срединной линии, а также комбинированные приемы [5]. Параметризация с использованием срединной линии предпочтительна в циклах оптимизации, поскольку она позволяет избежать самопересечений сторон лопатки в процессе поиска оптимальных значений параметров. В то же время существуют подходы для реконструкции пера лопатки непосредственно из облака точек, минуя этап восстановления сечений [6]. Мы не рассматриваем такие подходы, поскольку они не позволяют «ухватить» конструктивную концепцию детали, а значит параметрическая оптимизация будет существенно затруднена. По аналогии с тезисом из [4] заметим, что чисто геометрический подход к промышленному реинжинирингу есть всего лишь преобразование одного геометрического «артефакта» в другой.

В работе [7] дается модифицированный вариант оператора скиннинга, в котором вместо интерполяции авторы задействуют аппроксимацию методом наименьших квадратов. Анализ распределения кривизн показывает, что результирующая форма лопатки оказывается более гладкой. Кроме того, авторы предлагают использование скалярных энергетических метрик для оценки качества итоговой геометрии. Наш подход близок к работе [7] с той разницей, что вместо аппроксимации мы используем оператор сглаживания.

Оператор сглаживания как составная часть скиннинга был реализован также в работе [8]. Метод начинается с выбора общего узлового вектора кривых-сечений так, чтобы задача интерполяции оставалась недоопределенной. Затем контрольные точки рассчитываются путем минимизации квадратичного функционала энергии кривых, что позволяет понизить сложность итоговой поверхности в сравнении с традиционными методами скиннинга.

3. Исходные данные

Алгоритм реконструкции принимает упорядоченный набор аэродинамических сечений, распределенных по предполагаемым поверхностям вращения (Рис. 4). Согласно [1], поверхность вращения даст хорошее приближение к реальному поведению потока. В этом смысле, точки, образующие сечения, можно понимать как дискретно заданные линии тока, огибающие перо реконструируемой лопатки. Каждый профиль лопатки определен в меридиональной плоскости $r-z$. Две дополнительные угловые координаты φ_1 и φ_2

«размыкают» меридиональную кривую, формируя обвод лопатки. Мы предполагаем, что точки каждого сечения изначально отсортированы вдоль линии тока. В противном случае, требуется использовать вспомогательные техники сортировки, например, изложенную в [9].

4. Алгоритм реконструкции

4.1 Интерполяция сечений

На первом этапе дискретно заданные сечения лопатки интерполируются для получения трехмерных кривых. Для выбора параметров интерполируемых точек используется широко известная *центростремительная параметризация* [10], позволяющая сгладить незначительные осцилляции формы при «извилистом» распределении исходных точек. Спина и корытце каждого сечения интерполируются по отдельности для повышения точности в зонах со значительным изменением кривизны. После этого кривые стыкуются с порядком гладкости C^2 путем удаления узлов соответствующей объединенной В-кривой.

Как показано в [2], оператор скиннинга на независимо подготовленных сечениях приводит к «взрывному» росту количества контрольных точек в результирующей В-поверхности. Такие поверхности избыточны для моделирования искомой формы, и, кроме того, чрезмерная сложность их представления негативно сказывается на производительности и надежности последующих операторов моделирования (например, построения скруглений). Причиной квадратичного роста сложности поверхности с увеличением количества сечений является алгоритм унификации узловых векторов A5.4, описанный в Книге NURBS [11]. Однако, если сечения интерполировать на одном узловом векторе, выбранном изначально, то унификация не потребует [7].

В результате интерполяции получаем кривые $c_k(u)$, $k = \overline{0, K}$, где $(K + 1)$ – количество сечений лопатки.

4.2 Скиннинг со сглаживанием

Оператор скиннинга широко используется для протягивания поверхности через упорядоченный набор В-кривых $c_k(u)$ степени p , заданных на едином узловом векторе U . Каждая кривая имеет следующий вид:

$$c_k(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_{i,k}$$

Здесь $k = \overline{0, K}$; $N_{i,p}(u)$ – базисные сплайны степени p ; $(m + 1)$ – количество узлов с повторениями; $(n = m + p + 1)$ – индекс последней контрольной точки $P_{i,k}$.

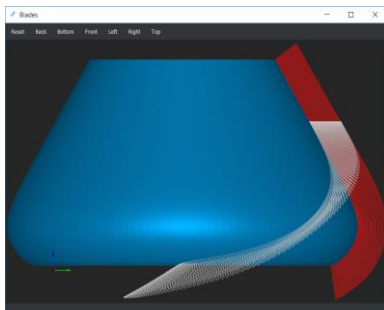


Рис. 4. Исходные данные, содержащие «стопку» сечений, представленных упорядоченными наборами точек. Каждое сечение определено на собственной несущей поверхности вращения (на рисунке показана только нижняя поверхность). Образующие кривые показаны красным цветом.

Из теории [11] известно, что контрольные точки результирующей поверхности скиннинга образуются путем

интерполяции контрольных точек $P_{i,k}$ кривых-сечений по направлению их следования друг за другом. Этот факт вытекает из требования совпадения изолиний поверхности с опорными кривыми, т.е. $s(u, v_k) = c_k(u)$, где $s(u, v)$ – результирующая поверхность.

Исходные данные для реконструкции снимаются с некоторой погрешностью, присущей измерительным приборам. Поскольку оператор скиннинга в своей сути является оператором интерполяции, то результирующая поверхность лопатки неизбежно подвергается воздействию шума. В то же время, в области турбостроения даже незначительная вариация формы изделия приводит к существенному изменению его эксплуатационных качеств. Возникает потребность в сглаживании. Известно, однако, что сглаживание, как таковое, может нанести ущерб замыслу проектировщика, поскольку оно в принципе уничтожает не только шум, но и конструктивные элементы модели. Следовательно, этот инструмент должен применяться локально. Для лопатки турбины эффективное сглаживание без потери конструктивной концепции можно осуществлять на промежуточных кривых-интерполянтах вдоль оси лопатки.

Пусть $g_i(v)$ – набор промежуточных интерполяционных кривых, используемых для получения итоговых контрольных точек $Q_{i,j}$ финальной поверхности $s(u, v)$. По определению, для всех $i = \overline{0, n}$ и $k = \overline{0, K}$ имеем:

$$g_i(v) = \sum_{j=0}^K N_{j,q}(v) Q_{i,j}; g_i(v_k) = P_{i,k}$$

Здесь q – степень поверхности вдоль оси лопатки, задаваемая пользователем (для получения гладкости C^2 требуется $q \geq 3$). Для устранения высокочастотных осцилляций поверхности мы используем оператор сглаживания F (fairing) на промежуточных кривых g_i :

$$h_i = F[g_i]$$

Здесь $h_i \equiv h_i(v)$ – сглаженные кривые, имеющие следующий вид ($i = \overline{0, n}$):

$$h_i(v) = \sum_{j=0}^K N_{j,q}(v) R_{i,j}; R_{i,0} = Q_{i,0}; R_{i,K} = Q_{i,K}$$

Оператор сглаживания F устраняет высокочастотные осцилляции кривой (Рис. 5).

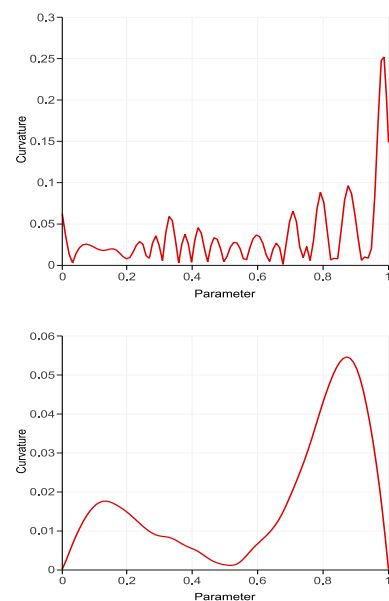


Рис. 5. Графики кривизны g_i (сверху) и h_i (снизу).

Оператор F реализован в соответствии с работой [12] с той разницей, что вместо поверхности сглаживаются кривые. Рассмотрим функционал $J \equiv J[\mathbf{c}]$ следующего вида:

$$J = \int \{ \lambda [\mathbf{c}'']^2 + [\mathbf{c} - \mathbf{c}_0]^2 \} du$$

Здесь $\lambda > 0$ – коэффициент сглаживания; $\mathbf{c}_0 \equiv \mathbf{c}_0(u)$ – исходная кривая; $\mathbf{c} \equiv \mathbf{c}(u)$ – результирующая кривая. Интегрирование осуществляется по всей области определения кривых $[u_0, u_1]$. Функционал J агрегирует геометрическую невязку с членом, аппроксимирующим энергию деформации кривой. В общем виде этот способ восстановления кривых и поверхностей из неупорядоченного набора точек хорошо известен. В частности, работы [13] содержат ценные указания относительно стратегии реализации методов аппроксимации со сглаживанием.

Кривую \mathbf{c} представим как результат возмущения контрольных точек кривой \mathbf{c}_0 :

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_0 + \sum_i \mathbf{D}_i N_i$$

Здесь $N_i \equiv N_{i,q}(u)$ – базисные сплайны степени q. Тогда выражение для J можно переписать в следующем виде:

$$\int \left\{ \lambda [\mathbf{c}'']^2 + \left(\sum_i \mathbf{D}_i N_i \right) \left(\sum_j \mathbf{D}_j N_j \right) \right\} du =$$

$$= \lambda \int [\mathbf{c}_0'']^2 du + 2 \sum_i \lambda \left(\int N_i'' \mathbf{c}_0'' du \right) \mathbf{D}_i$$

$$+ \sum_{i,j} \left(\lambda \int N_i'' N_j'' du + \int N_i N_j du \right) \mathbf{D}_i \mathbf{D}_j$$

Введем обозначения:

$$a_{i,j} = \lambda \int N_i'' N_j'' du + \int N_i N_j du$$

$$b_j = \lambda \int N_j'' \mathbf{c}_0'' du$$

$$c = \lambda \int [\mathbf{c}_0'']^2 du$$

Тогда формула для энергии деформации принимает вид:

$$J = \sum_{i,j} a_{i,j} \mathbf{D}_i \mathbf{D}_j + 2 \sum_i b_i \mathbf{D}_i + c \rightarrow \min$$

Из необходимого условия экстремума имеем систему линейных уравнений:

$$\sum_i a_{i,j} \mathbf{D}_i + b_j = 0; \quad i, j \in \mathbf{K}$$

Здесь \mathbf{K} – множество индексов контрольных точек \mathbf{D}_i , определяющих возмущение исходной кривой. Если $\mathbf{K} = \{0, K\}$, то сглаживание происходит без ограничений. В таком случае кривая $\mathbf{c}(u)$ при достаточно больших значениях коэффициента λ приближается к прямой линии. Для сканинга лопатки со сглаживанием, но без потери конструктивной концепции, мы используем $\mathbf{K} = \{1, K - 1\}$, то есть точки первого и последнего сечений остаются зафиксированными.

Коэффициенты $a_{i,j}$ и b_j находятся методами численного интегрирования. Работа [15] содержит краткие практические сведения о применении некоторых методов численного интегрирования в задаче построения гладких

поверхностей (поверхностей *минимальной вариации кривизны*). Мы использовали квадратурную формулу Гаусса [16], реализация которой доступна в открытой библиотеке геометрического моделирования OpenCascade. Отметим, что интегрирование следует осуществлять независимо на каждом узловом интервале.

4.3 Проверка кривизны

Существует множество способов оценки качества результирующей геометрии. Так, широкое распространение получила техника отраженного света («зебра», Рис. 6) [17].



Рис. 6. Поверхность лопатки, построенная оператором сканинга без сглаживания (сверху) и со сглаживанием при $\lambda = 10^{-5}$ (снизу). Для анализа дефектов формы использовалась «зебра».

Мы оценивали качество поверхности пера лопатки при помощи карты гауссовых и средних кривизн (Рис. 7). Исследование дифференциальных свойств кривых осуществлялось при помощи вспомогательных инструментов, а именно графика и «гребешка» кривизны в соответствии с меморандумом Д. Фарина [18].

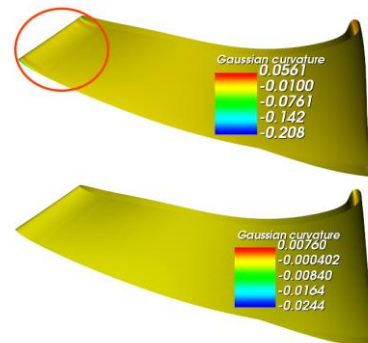


Рис. 7. Поверхность лопатки, построенная оператором сканинга без сглаживания (сверху) и со сглаживанием при $\lambda = 0.001$ (снизу). Разброс гауссовой кривизны для поверхности со сглаживанием меньше примерно в 10 раз. На поверхности без сглаживания видны дефекты формы, которых нет на сглаженной поверхности.

Используемые средства инспекции доступны в разрабатываемой нами исследовательской платформе с открытыми исходными кодами «Анализ Положения» [19].

5. Выводы и планируемые исследования

Наш метод позволяет создавать параметрические модели лопаток турбин из упорядоченных облаков точек (некоторые результаты показаны на Рис. 8). Переменными проектирования здесь являются контрольные точки В-кривых, представляющих сечения пера лопатки. Для задач параметрической оптимизации предпочтительно, однако, использовать срединные линии сечений с заданными на них функциями толщин. Введение такой параметризации мы оставляем на будущее.



Рис. 8. Результаты реконструкции рабочего колеса турбины с одной лопаткой.

Описанный алгоритм строится на двух основных операторах: *интерполяции* и *сглаживания*. Было показано, что оператор сглаживания, примененный на промежуточных кривых оператора скиннинга (интерполяции), позволяет компенсировать осцилляции формы лопатки без потери конструктивного замысла в целом.

Методы обратного инжиниринга, даже для узкого класса задач, предполагают использование богатого набора геометрических операторов. В дальнейших исследованиях мы рассмотрим методы аппроксимации для восстановления кривых-сечений [20], а также введем дополнительные операторы формообразования, такие как построение скруглений с контролем гладкости стыка. Конечной целью исследования является создание геометрической системы, позволяющей эффективно решать задачи параметрической оптимизации с использованием данных о «чувствительности» модели (Рис. 2).

6. Литература

- [1] P. L. Miller, Blade geometry description using B-splines and general surfaces of revolution, Ph.D. thesis, Iowa State University (2000).
- [2] L. Piegl, W. Tiller, Surface skinning revisited, *The Visual Computer* 18 (4) (2002) 273-283.
- [3] M. Banovic, O. Mykhaskiv, S. Auriemma, A. Walther, H. Legrand, J.-D. Muller, Algorithmic differentiation of the Open CASCADE Technology CAD kernel and its coupling with an adjoint CFD solver, *Optimization Methods and Software* (2018) 1-16.
- [4] K. Mohaghegh, M. Sadeghi, A. Abdullah, Reverse engineering of turbine blades based on design intent, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32 (9-10) (2007) 1009-1020.
- [5] I. Sanchez Torreguitart, T. Verstraete, L. Mueller, Optimization of the ls89 axial turbine profile using a CAD and adjoint based approach, in: *Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics and Thermodynamics*, 2017, p. 1-13.
- [6] A. Seiler, D. Grossmann, B. Juttler, Spline surface fitting using normal data and norm-like functions, *Computer Aided Geometric Design* (June).
- [7] S. F. Hosseini, B. Moetakef-Imani, Improved B-spline skinning approach for design of hawt blade mold surfaces, *Journal of Mechanics* 33 (04) (2017) 427-433.

- [8] H. Park, Lofted B-spline surface interpolation by linearly constrained energy minimization, *Computer-Aided Design* 35 (14) (2003) 1261-1268.
- [9] X. Lyu, H. Yu, J. Wu, Surface reconstruction for thin aero engine blade from disorganized contact measured points, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 232 (5) (2018) 746-758.
- [10] E. Lee, Choosing nodes in parametric curve interpolation, *Computer-Aided Design* 21 (6) (1989) 363-370.
- [11] L. Piegl, W. Tiller, *The NURBS Book*, Springer, New York, 1997.
- [12] M. Kallay, Constrained optimization in surface design, in: *Modeling in Computer Graphics*, Springer Berlin Heidelberg, 1993, pp. 85-93.
- [13] T. Varady, R. Martin, Chapter 26 - reverse engineering, in: G. Farin, J. Hoschek, M.-S. Kim (Eds.), *Handbook of Computer Aided Geometric Design*, North-Holland, Amsterdam, 2002, pp. 651-681.
- [14] V. Weiss, L. Andor, G. Renner, T. V'arady, Advanced surface fitting techniques, *Computer Aided Geometric Design* 19 (2002) 19-42.
- [15] H. P. Moreton, C. H. Sequin, Functional optimization for fair surface design, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 26 (2) (1992) 167-176.
- [16] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*, 3rd Edition, Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2007.
- [17] E. Bagci, Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies, *Advances in Engineering Software* 40 (6) (2009) 407-418.
- [18] G. Farin, Curvature combs and curvature plots, *Computer-Aided Design* 80 (2016) 6-8.
- [19] S. Slyadnev, A. Malyshev, V. Turlapov, CAD model inspection utility and prototyping framework based on OpenCascade, in: *GraphiCon'17 proceedings*, 2017, pp. 323-327.
- [20] L. A. Piegl, W. Tiller, Least-squares B-spline curve approximation with arbitrary end derivatives, *Engineering with Computers* 16 (2) (2000) 109-116.

Об авторах

Турлапов Вадим Евгеньевич, д.т.н., профессор кафедры математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий ННГУ им.Н.И.Лобачевского, vadim.turlapov@itmm.unn.ru

Сляднев Сергей Евгеньевич, аспирант 3 года, ИИТММ ННГУ им.Н.И.Лобачевского, email: sergey.slyadnev@gmail.com