

На правах рукописи

Хзам Ахмад Заидан Мохамед

**РЕШЕНИЕ ПЛОСКОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ
ПРОФИЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.03.01-Технологии и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт – Петербург
2002

Работа выполнена в Санкт – Петербургском государственном
политехническом университете.

Научный руководитель-	доктор технических наук, профессор Панкратов Ю.М.
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Алексеев Г. А. кандидат технических наук доцент Розовский Б. Я.
Ведущее предприятие:	ЗАО “Научно- производственная фирма СИСТЕМА”

Защита состоится _____ , 2002 года в _____ часов на
заседании диссертационного совета Д 212.229.26 в Санкт-Петербургском
государственном политехническом университете, по адресу: 195251, Санкт-
Петербург, Политехническая улица, 29, 1 учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского
государственного политехнического университета.

Автореферат разослан _____ , _____ 2002 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В. Н. Тисенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Профилирование инструментов, работающих методом обкатки, является наиболее сложным этапом проектирования таких инструментов. Практиковавшиеся в недавнем прошлом графические и графоаналитические методы профилирования сейчас почти не используются из-за их низкой точности. В литературных источниках достаточно подробно излагается решение прямой плоской задачи профилирования инструментов реечного типа (червячных фрез, реек, долбяков).

Плоскую обратную задачу профилирования можно представить в виде следующей схемы: известен профиль инструмента - требуется найти профиль детали. Чаще всего исходный профиль инструментов произвольного профиля (или, как их часто называют в литературе, - неэвольвентных) задают в виде комбинации прямых линий, дуговых участков или еще каких-либо кривых. Типичные примеры таких профилей - стружечные канавки сверл, зенкеров, концевых фрез, зубчатые колеса и различные звездочки для неэвольвентных зацеплений и цепных передач, храповики и т. п.

В производственной деятельности достаточно часто возникает необходимость в решении обратной задачи профилирования инструментами с произвольным исходным профилем, когда требуется при уже спроектированном и изготовленном в металле инструменте определить профиль зубчатого изделия при измененных станочных наладках (радиусе начальной окружности, смещении исходного контура). Решение таких задач является актуальной научной проблемой.

При решении плоской обратной задачи профилирования также возникает задача по определению подрезания профиля детали, т.е. требуется определить минимальный радиус начальной окружности, при котором не будет подрезания профиля детали. Литературные источники не рассматривают проблему подрезания профиля детали при решении плоской обратной задачи профилирования, поэтому решение этого вопроса также является актуальной научной проблемой.

Цель работы

Цель работы можно сформулировать в виде двух направлений:

1. Определение профиля детали при известном профиле инструмента.
2. Определение подрезания детали при решении плоской обратной задачи профилирования.

По первому направлению цель достигается путем разработки алгоритма решения плоской обратной задачи профилирования. Этот алгоритм позволяет решить обратную задачу при любой форме описания исходного профиля, в том числе и точечной.

Достижение поставленной цели в рамках второго направления может быть достигнуто путем разработки математической модели для определения

минимально необходимого радиуса начальной окружности, при котором не будет подрезания профиля детали.

Методы исследования

В работе использовались основные фундаментальные положения теории зубчатых зацеплений и дифференциальной геометрии, векторное и матричное исчисления, теории сплайн-аппроксимации. Моделирование процессов профилирования выполнялось с использованием современных вычислительных средств и программного обеспечения.

Научная новизна работы

1. Решена плоская обратная задача профилирования при использовании сплайн-аппроксимационного описания исходного профиля.
2. Выполнен вывод общей формулы, позволяющей определять подрезание детали при решении плоской обратной задачи профилирования при любой форме профиля инструмента.

Автор защищает:

1. Теоретические исследования в области решения плоской обратной задачи профилирования и разработанный на основе этих исследований единый алгоритм решения данной задачи при любом описании исходного профиля инструмента, в том числе и точечной.
2. Результаты исследования вопросов о подрезании детали при любой форме профиля инструмента.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Определяется математической корректностью постановки задачи, подтверждается выводом уравнения зацепления при решении плоской обратной задачи профилирования различными методами, при этом получены идентичные формулы этого уравнения. Достоверность формул подрезания профиля была проверена на различных по форме исходных контурах инструмента.

Практическая значимость полученных результатов

Теоретические разработки, направленные на снижение трудоемкости профилирования обкатных инструментов, реализованы в виде алгоритмов и программ решения плоской обратной задачи профилирования при использовании сплайн-аппроксимационного описания исходного профиля и могут быть использованы непосредственно инженерами-инструментальщиками в технобюро инструментальных цехов машиностроительных предприятий, а также в учебном процессе вузов.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы:

1. Изложены в 4 печатных публикациях;

2. Докладывались на научно-технических конференциях и семинарах, в том числе на Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах», г. Санкт-Петербург 2001г.
3. Докладывались на заседании кафедры ГАК.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 печатные работы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы (90 наименований) и приложения. Общий объем работы-150 страниц, в том числе 52 рисунка и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обоснована актуальность темы, ее практическая значимость, определены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Прогресс в области профилирования инструмента для обработки зубчатых изделий тесно связан с развитием теории зубчатых зацеплений. Успешное развитие теории зубчатых зацеплений и ее применение к профилированию инструментов достигнуто благодаря усилиям коллектива русских ученых: Воробьева В.М., Грановского Г.И., Гречишников В.А., Грубина А.Н., Давыдова Я.С., Дихтяря Ф.С., Иноземцева Г.Г., Кирсанова Г.Н., Климова В.И., Колчина Н.И., Кудевицкого Я.В., Кудрявцева В.Н., Лашнева С.И., Литвина Ф.Л., Люкшина В.С., Петрухина С.С., Родина П.Р., Романова В.Ф., Сахарова Г.Н., Семенченко И.И., Таратынова О.В., Фрайфельда И.А., Цвиса Ю.В., Цепкова А.В., Шевченко Н.А., Шишкова В.А., Юликова М.И. и других.

В настоящее время существуют три метода профилирования: метод огибающих кривых, кинематический метод и метод профильных нормалей. Все они требуют аналитического описания исходного профиля детали (инструмента) в неявной, явной или параметрической форме. Основные этапы, которые необходимо выполнить при решении задач профилирования в каждом методе, и требуемые формы описания исходного профиля схематично представлены на рис.1 для плоской задачи профилирования.

Совсем недавно была разработана новая теория, позволяющая устранить вышеперечисленные недостатки – теория двух аппроксимационных методов профилирования – минимаксного и метода сопряжения, которые позволяют решать обкатные задачи без вычисления нормалей, скоростей относительного движения и составления уравнения зацепления по единому алгоритму для любых схем обкаточного движения.

П л о с к а я з а д а ч а				
Этапы профилирования	Форма описания исходного профиля	Методы профилирования		
		теория огибающих	кинематический	профильных нормалей
нормаль n или орт нормали e	неявная $F_1=(x_1, y_1)$	–	$n_{x1} = \frac{\partial F_1}{\partial x_1}$ $n_{y1} = \frac{\partial F_1}{\partial y_1}$	$n_{x1} = \frac{\partial F_1}{\partial x_1}$ $n_{y1} = \frac{\partial F_1}{\partial y_1}$
	явная $y_1=f(x_1)$	–	$tg\gamma = \frac{dy_1}{dx_1}$ $e_{x1} = \sin\gamma$ $e_{y1} = -\cos\gamma$	$tg\gamma = \frac{dy_1}{dx_1}$ $e_{x1} = \sin\gamma$ $e_{y1} = -\cos\gamma$
	параметрическая $x_1=f(u),$ $y_1=\psi(u),$	–	$n_{x1} = \frac{\partial y_1}{\partial u}$ $n_{y1} = -\frac{\partial x_1}{\partial u}$	$n_{x1} = \frac{\partial y_1}{\partial u}$ $n_{y1} = -\frac{\partial x_1}{\partial u}$
скорость относительного движения v		–	Векторный; $v^{(10)}=v^{(1)}-v^{(0)}$ Матричный $v_0=M_{01} \frac{dM_{10}}{d\varphi} r_0$	–
уравнение связи	неявная $F_1=(x_1, y_1)$ явная $y_1=f(x_1)$	$\left. \begin{aligned} F_0(x_0, y_0, \varphi) &= 0 \\ \frac{\partial F_0(x_0, y_0, \varphi)}{\partial \varphi} &= 0 \end{aligned} \right\}$	–	–
	параметрическая $x_1=f(u),$ $y_1=\psi(u),$	$\left. \begin{aligned} r_0 &= r_0(u, \varphi) \\ \frac{\partial r_0}{\partial u} \times \frac{\partial r_0}{\partial \varphi} &= 0 \end{aligned} \right\}$	$n \cdot v = 0;$	$\frac{X - x}{n_x} = \frac{Y - y}{n_y}$

Рис.1 Схема сочетаний этапов, форм описания исходного профиля и методов профилирования для плоской задачи

Анализ существующих методов профилирования и литературных источников позволяет сделать следующих выводы:

- Литературные источники не рассматривают решение плоской обратной задачи профилирования.
- В литературных источниках отсутствуют какие-либо указания по выбору радиуса начальной окружности при решении плоской обратной задачи профилирования, обеспечивающие отсутствие подрезания профиля детали при любом профиле инструмента.

Глава 2 ФОРМА ОПИСАНИЯ ИСХОДНОГО ПРОФИЛЯ

В этой главе излагается форма описания исходного профиля с помощью сплайн-аппроксимационного подхода, который позволяет все известные формы задания профиля свести к такой форме, которая допускает вычисление нормали к нему по одному и тому же алгоритму. Это, в свою очередь, позволяет решать обкатную задачу для каждой схемы обкатки по единому алгоритму и одной программе при разных формах описания исходного профиля, в том числе и точечной. Выполнен анализ форм описания исходного профиля с точки зрения удобства для практического использования, в том числе и для программирования. Показано, что наиболее удобной формой описания исходного профиля являются линейная, дуговая и точечная, позволяющие вводить информацию в диалоговом режиме в уже единожды отлаженную программу. Нелинейная и явная формы требуют функции и их частные производные, вычисленные предварительно аналитически «вручную», вводить в программу на уровне входного языка, на котором она составлена. Такие ситуации справедливо считаются нежелательными. В этом состоит их основной недостаток.

Все параметрические формы (линейную, дуговую, нелинейную) и явную удалось представить в форме сплайна первой степени с независимым безразмерным параметром $u = \frac{i-1}{N-1}$, который при изменении номера текущей точки i от 1 до заданного общего количества точек N всегда будет принимать значения от 0 до 1, что очень удобно также и при программировании. Использование параметра u в качестве независимой переменной предоставляет и еще одну очень полезную и удобную в практических расчетах возможность, а именно – легко описывать профиль с напуском, который обычно необходимо учитывать при проектировании инструментов, обрабатывающих изделия, заготовки для которых обычно включают в себя технологический припуск, оставляемый на финишные операции. Другая возможная причина включения в профиль напуска – переточки инструмента. На рис.2 представлена общая схема алгоритма. Вычислены углы γ наклона касательной в каждой текущей точке для всех форм описания профиля, при этом угол γ всегда будет находиться в пределах $-\frac{\pi}{2} \leq \gamma \leq \frac{\pi}{2}$. Зная этот угол, можно легко найти проекции орта нормали e для всех форм описания исходного профиля по одним и тем же формулам: $e_x = \sin \gamma$; $e_y = -\cos \gamma$.

Рис.2 Схема алгоритма описания исходного профиля.

При точечном задании профиля определение нормалей становится проблематичным, если отсутствует какая-либо информация, например, об угле давления или профильном угле. В этом состоит главная причина того, что в настоящее время отсутствуют методы профилирования при точечном задании профиля. В настоящей работе предлагается решение задачи для расчета нормалей к профилю с помощью сплайн-аппроксимации.

Анализ форм описания исходного профиля позволяет:

- независимые переменные с различной размерностью для разных форм описания исходного профиля заменить на безразмерный параметр u , всегда изменяющийся в пределах $0 \leq u \leq 1$, что позволяет ограничиться одним алгоритмом решения обратных задач для профилей, состоящих из комбинации участков с различными формами описания исходного профиля и с различной размерностью;
- создать единый алгоритм и подпрограмму для описания исходного профиля и вычисления ортов нормалей при всех формах его задания, в том числе и точечной;
- сделать решение обратных задач профилирования инвариантным ко всем формам описания исходного профиля;
- при точечной форме задания исходного профиля использовать разностные варианты сплайн-аппроксимации, которые не уступают прогоночным методам по точности, но являются более удобными для практической реализации.

Глава 3 РЕШЕНИЕ ПЛОСКОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ

В этой главе излагается решение основной задачи работы, сформулированной в качестве первого направления - определение профиля детали при известном профиле инструмента путем разработки алгоритма решения плоской обратной задачи профилирования. Этот алгоритм позволяет решить обратную задачу при любой форме описания исходного профиля, в том числе и точечной. Плоскую обратную задачу профилирования можно представить в виде следующей схемы: известен профиль инструмента режущего типа (червячных фрез, реек) - требуется найти профиль детали. Поскольку в плоской задаче обкатка происходит в торцевой плоскости, будем искать профиль детали именно там. Пусть профиль инструмента r_0 известен в системе координат S_0 (см. рис.3). Запишем профиль инструмента r_0 в систему детали S_1 :

$$r_1 = M_{10} r_0 \quad (1)$$

где M_{10} - матрица перехода от системы S_0 к системе S_1 . После преобразования получим формулы перехода от системы координат инструмента S_0 к системе координат детали S_1 :

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= (y_0 + r_{w1}) \sin \varphi - (r_{w1} \varphi - x_0) \cos \varphi \\ y_1 &= (y_0 + r_{w1}) \cos \varphi + (r_{w1} \varphi - x_0) \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При фиксированном значении угла обката φ выражение (2) есть не что иное, как координаты инструмента, записанные в торцевую плоскость детали, поскольку для данной обкатной задачи эта плоскость совпадает с системой детали S_1 . Очевидно, что для использования формул перехода надо знать не только координаты исходного профиля (в данном случае профиля зубчатой рейки)

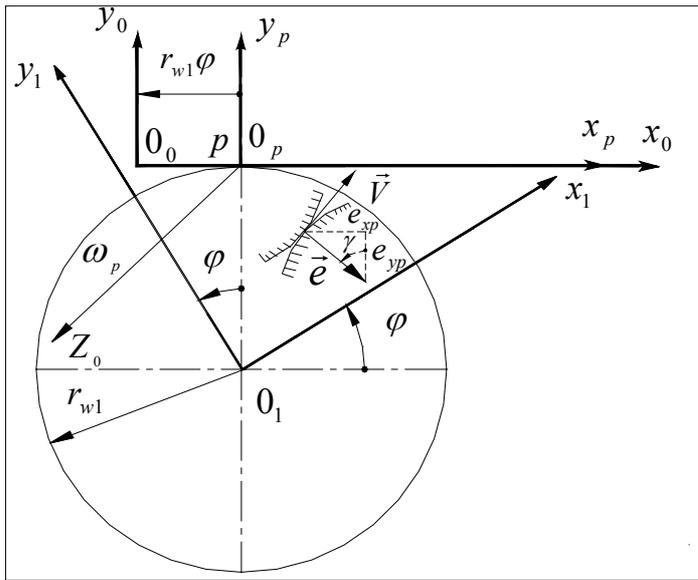


Рис.3 Системы координат для инструмента реечного типа.

но и значение угла обката φ , который должен быть известен для любой точки профиля инструмента. Для определения уравнения зацепления кинематическим методом будем исходить из следующего положения: в точке касания взаимноогibaемых профилей вектор скорости относительного движения должен быть перпендикулярен вектору нормали. Следовательно:

$$\vec{n} \cdot \vec{V} = 0 \quad (3)$$

где \vec{n} -вектор нормали, \vec{V} -вектор скорости относительного движения. Уравнение зацепления будем отыскивать в системе S_p . Запишем уравнение зацепления в неподвижной системе координат полюса S_p в виде:

$$\vec{e}_p * \vec{V}_p = 0 \quad (4)$$

или в проекциях на координатные оси (см. рис. 3):

$$e_{xp} V_{xp} + e_{yp} V_{yp} = 0 \quad (5)$$

Проекции орта нормали e в системе S_p полюса можно определить непосредственно из рисунка 3.

$$\left. \begin{aligned} e_{xp} &= \sin \gamma \\ e_{yp} &= -\cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Определим скорость относительного движения \vec{V}_p :

$$\vec{V}_p = \vec{\omega}_p \vec{r}_p$$

или

$$\vec{V}_p = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \varpi_{xp} & \varpi_{yp} & \varpi_{zp} \\ x_p & y_p & z_p \end{vmatrix}.$$

Положив $\varpi_p = 1 \frac{rad}{c}$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \vec{V}_{xp} &= y_0 \\ V_{yp} &= r_{w1} \varphi - x_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Подставляя уравнения (6) и (7) в (5), после преобразований получим уравнение зацепления:

$$\varphi = \frac{x_0 + y_0 \operatorname{tg} \gamma}{r_{w1}} \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что при угле наклона касательной к исходному профилю в 90° , угол φ становится бесконечно большим. Однако в реальной практике инструменты с такими углами не изготавливают, так как они не смогут обрабатывать детали, поэтому, рассмотрение данного случая исключено из работы. Для определения уравнения линии профилирования в неподвижной системе s_p , находим формулы перехода от системы S_0 к системе координат s_p .

$$r_p = M_{p0} r_0 \quad (9)$$

где M_{p0} - матрица перехода от системы S_0 к системе s_p .

После преобразований получим формулы перехода от системы координат инструмента S_0 к системе координат S_p :

$$\left. \begin{aligned} x_p &= x_0 - r_{w1} \varphi \\ y_p &= y_0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Из уравнения (10) видно, что формула линии профилирования зависит только от формы исходного профиля и радиуса начальной окружности детали r_{w1} .

Алгоритм решения плоской обратной задачи профилирования

Разработан единый алгоритм для решения плоской обратной задачи профилирования следующим образом:

1. Форма описания исходного профиля: сплайн-аппроксимационный подход к описанию исходного профиля. Это позволяет создать единый алгоритм для его описания и вычисления нормалей при всех формах его задания.
2. Уравнение зацепления (связи): с помощью уравнения (8) можно найти угол обкатки φ для каждой точки заданного профиля инструмента.

3. Уравнение профиля инструмента в системе координат детали S_1 : по формулам (2) вычисляем координаты каждой точки в торцевом сечении.
4. Уравнение линии профилирования: для определения уравнения линии профилирования в неподвижной системе S_p можно использовать уравнение (10).

Данный алгоритм упрощает и унифицирует решение плоской обратной задачи (см. рис.4). На основании алгоритма разработана программа на языке Turbo Pascal 7.0, позволяющая выводить на экран дисплея профиль инструмента, детали и минимальную начальную окружность, что позволяет упростить отладку программы и достаточно быстро выявить возможные ошибки. На рис. 4 представлена блок-схема данной программы.

Программа работает в диалоговом режиме и сначала вводится вид исходного профиля. Если исходный профиль линейно-дуговой, то необходимо ввести количество N_y участков, из которых будет сформирован профиль. Затем указывается форма описания участка, в зависимости от которой программа предлагает вопросы для ввода исходных данных для указанной формы участков. Как следует из рис.4, для нелинейной и явной форм необходимо предварительно ввести функции и производные в саму программу, все остальные исходные данные вводятся в режиме диалога. Если исходный профиль точечный, то необходимо ввести координаты каждой точки. Затем вводится количество точек N , необходимое на каждом участке. При каждом участке вводятся исходные данные, необходимые для данной формы описания исходного профиля. Затем все вычисления производятся в цикле по i для всех N точек для данного участка.

Для всех форм профиля, за исключением точечной, определяется безразмерный параметр u , который позволяет вычислять координаты всех N точек. Далее вычисляются углы γ_i касательных в этих точках. Зная эти углы, по формуле (6) вычисляются орты нормалей для всех форм описания профиля. Таким образом, удалось разработать единый алгоритм описания профиля и вычисления ортов нормалей для всех форм описания исходного профиля. Затем программа позволяет находить угол обката φ для каждой точки профиля детали x_1, y_1 с помощью уравнения зацепления (8).

Наконец, после вычисления координаты профиля детали и координат линии профилирования, программа выводит на экран дисплея профиль детали и линии профилирования.

Рис. 4 Блок-схема алгоритма решения плоской обратной задачи профилирования (начало)

Рис. 4 Блок-схема алгоритма решения плоской обратной задачи профилирования (окончание)

Реализация решения плоской обратной задачи профилирования.

В качестве примера приведены примеры решения наиболее распространенных обратных задач (для инструментов с произвольным исходным профилем) с

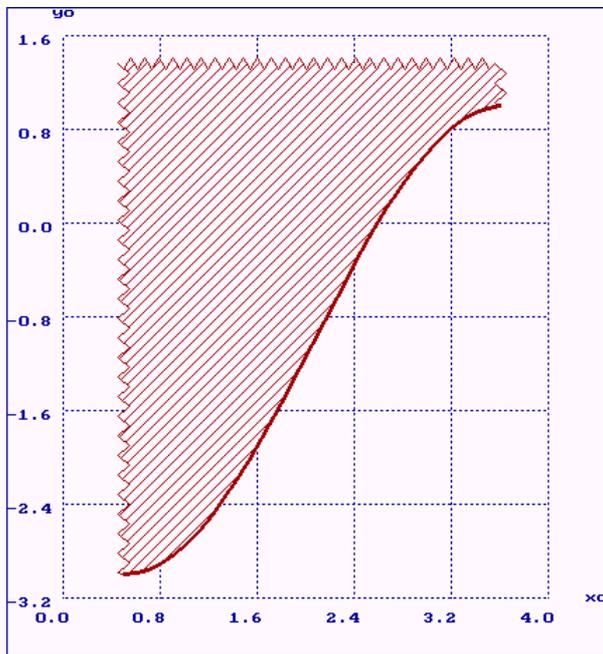


Рис.5 Исходный профиль инструмента

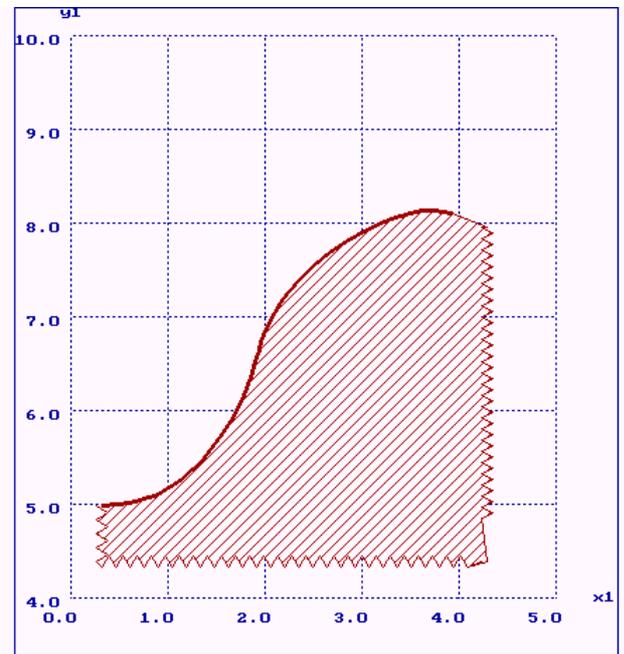


Рис.6 Профиль детали в торцевом сечении

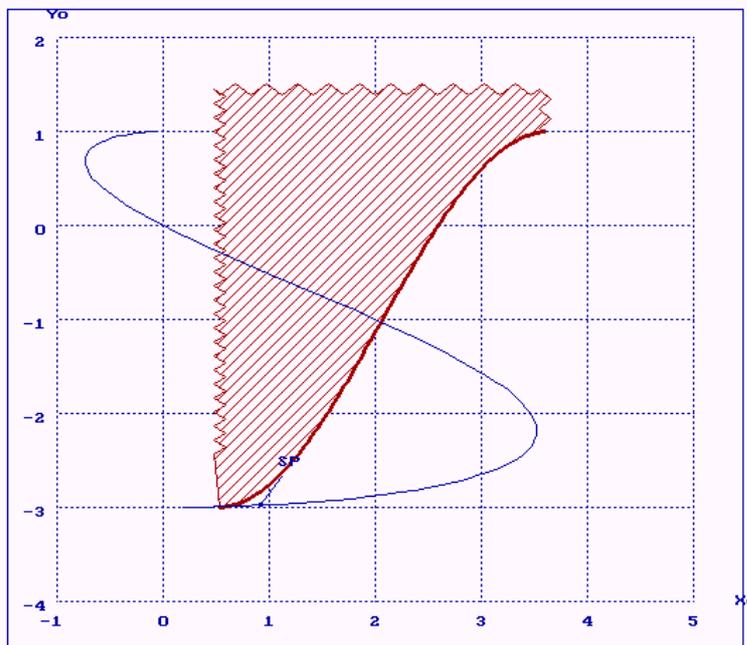


Рис.7 Профиль инструмента с изображением линии профилирования

рис.5. С помощью алгоритма и программы решения плоской обратной задачи профилирования при заданном радиусе начальной окружности $r_{w1}=8$ мм находим профиль детали в торцевом сечении. На рис.6 представлен профиль детали

использованием алгоритма и программы решения плоской обратной задачи профилирования.

Пример 1: Пусть исходный профиль инструмента задан в виде синусоиды в форме $y_0=2*\sin(x_0)-1$, где $x_0=[0,5 \div 3,5]$. Требуется найти профиль детали в торцевом сечении. После описания исходного профиля в параметрической форме, получим исходный профиль в системе инструмента S_0 на

в торцевом сечении S_1 . На рис.7 представлен профиль инструмента в системе S_0 с изображением линии профилирования (указан сноской sp).

Пример 2: В качестве еще одного примера в таблице 1 представлен комбинированный исходный профиль инструмента, состоящий из трех участков. Первый и третий участок представлен в виде дуги окружности, второй – прямолинейный. После описания исходного профиля в параметрической

Исходные данные профиля инструмента с тремя участками

Таблица 1

Координаты центра		Начальный угол	Конечный угол	Радиус	Начальная точка		Конечная точка	
X_{c1} мм	Y_{c1} мм	V_H Рад.	V_K Рад.	R мм	X_H мм	Y_H мм	X_K мм	Y_K мм
2	-2	-24	-90	10				
					11,135	6,06	13	-1,85
22,135	-5,92	-204	-270	10				

форме, получим исходный профиль в системе инструмента S_0 (рис.8). С помощью алгоритма и программы решения плоской обратной задачи профилирования при заданном радиусе начальной окружности $r_{w1}=150$ мм находим профиль детали в торцевом сечении (рис.9).

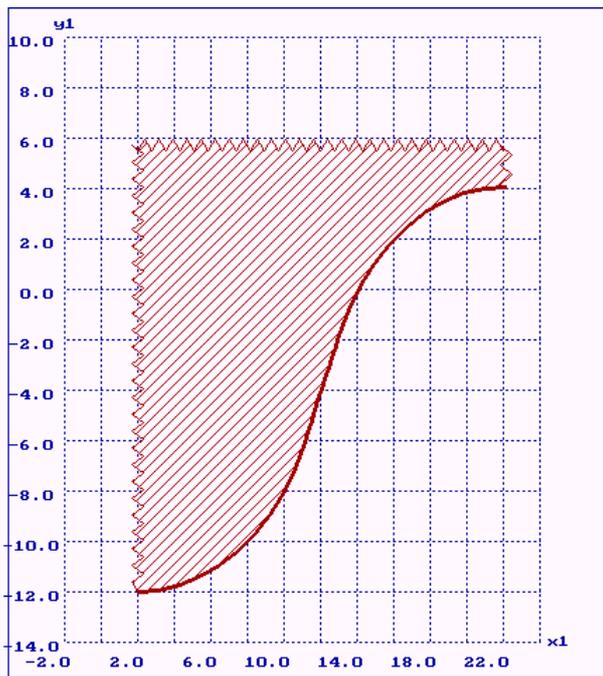


Рис.8 Исходный профиль инструмента из сечения трех участков

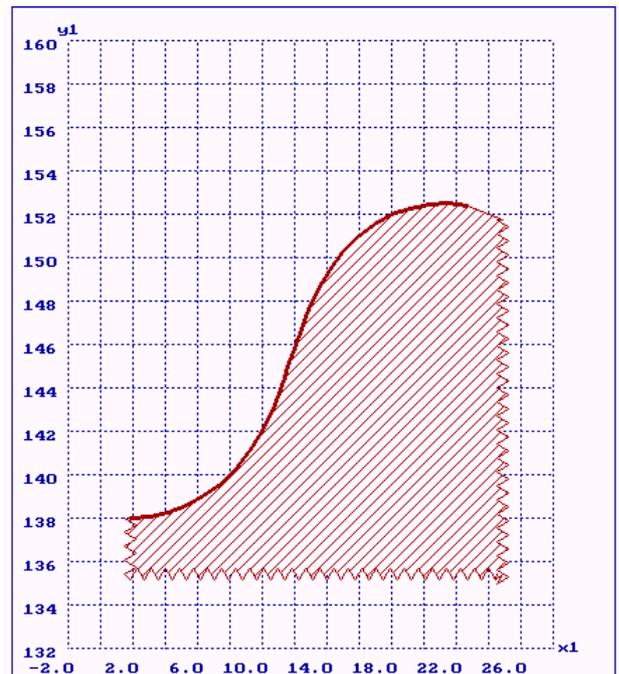


Рис.9 Профиль детали в торцевом сечении

Глава 4. ПОДРЕЗАНИЕ ПРОФИЛЯ ДЕТАЛИ ПРИ РЕШЕНИИ ПЛОСКОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ

В этой главе излагается решение вопроса о подрезании детали, сформулированный в качестве второго направления работы, т.е. определение мини-

мального радиуса начальной окружности $r_{w1 \min}$, при котором не будет подрезания профиля детали. От правильного выбора $r_{w1 \min}$ зависит:

- форма профиля инструмента;
- размеры переходных закруглений на зубчатом изделии;
- возможность подрезания зуба изделия;
- возможность нарезания данного профиля методом обкатки вообще.

Для определения условий, при которых радиус начальной окружности является минимально допустимым, следует сначала отыскать координаты особых точек. Для определения координат особых точек кривой, заданной в параметрической форме, достаточно найти производные от координат по параметру кривой φ и приравнять их к нулю, т.е.

$$\frac{dx_0}{d\varphi} = 0 \quad ; \quad \frac{dy_0}{d\varphi} = 0 \quad ; \quad (11)$$

Можно определить уравнение профиля детали в полярной системе

$$\rho_1^2 = x_1^2 + y_1^2 ; \quad (12)$$

Считаем известным профиль инструмента r_0 в системе S_0 (см. рис.2). Подставим формулы (2) перехода от системы координат инструмента S_0 к системе координат детали S_1 в уравнение (12) и после преобразований получим:

$$\rho_1^2 = (r_{w1}\varphi - x_0)^2 + (y_0 + r_{w1})^2 ; \quad (13)$$

Решая совместно уравнения (11), (13) и (8) относительно x_0 и y_0 получим

$$r_{w1 \min} = \frac{-y_0}{\cos^2 \gamma} \quad (14)$$

где $r_{w1 \min}$ - минимальной необходимый радиус начальной окружности; y_0 - ордината точки инструмента в системе режущего инструмента; γ - профильный угол в этой точке.

Применение выражения (14) для определения минимально необходимого радиуса начальной окружности позволяет решить плоскую обратную задачу профилирования при любой заданной форме описания исходного профиля, в том числе и точечной.

Разработана подпрограмма на языке Turbo Pascal 7.0 для проверки подрезания детали. Если заданный радиус начальной окружности r_{w1} меньше, чем радиус минимальной начальной окружности $r_{w1 \min}$, то подпрограмма автоматически проверяет все точки детали и сообщает о координате точки, в которой будет подрезание. В случае задания радиуса $r_{w1} \geq r_{w1 \min}$ на экран дисплея выводится профиль детали и радиус минимальной начальной окружности. На рис.10 представлена блок-схема подпрограммы подрезания профиля детали.

В качестве примера рассмотрим исходный профиль инструмента прямолинейной формы, требуется найти минимальный необходимый

радиус начальной окружности. В таблице 2 приведены исходные данные профиля инструмента. Профиль инструмента в системе S_0 приведен на рис.11.

Координаты исходного профиля инструмента крайних точек *Таблица 2*

<i>Начальная точка</i>		<i>Конечная точка</i>	
$X_H, \text{ мм}$	$Y_H, \text{ мм}$	$X_K, \text{ мм}$	$Y_K, \text{ мм}$
4	-12	9	4

С помощью подпрограммы вычислим минимальный необходимый радиус начальной окружности, который в нашем случае будет равен $r_{w1 \min} = 135 \text{ мм}$.

Если ввести $r_{wl}=110$ мм, то подпрограмма сообщает о подрезании и выводит координаты точки профиля детали, в которой будет подрезание: $x_l=4,2$ $y_l=57,1$ (рис.12). Если ввести $r_{wl} \geq 135$ мм, то подпрограмма не сообщает о подрезании и выводит профиль детали с изображением минимально необходимого радиуса начальной окружности (рис.13) .

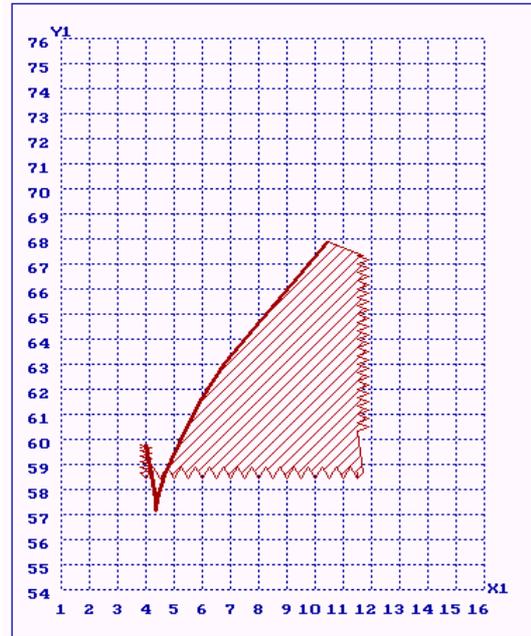
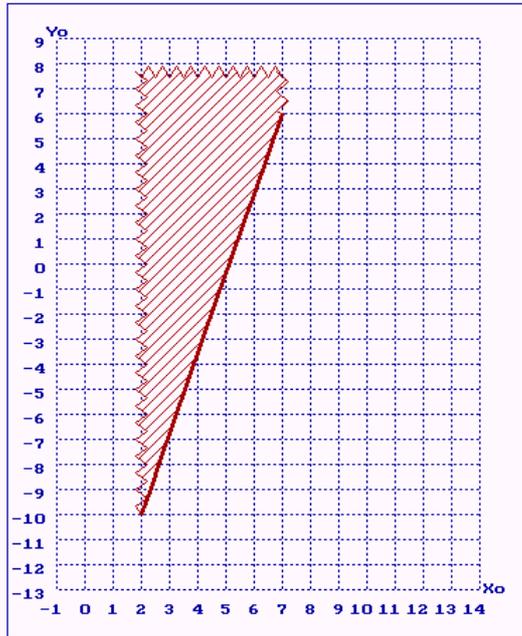
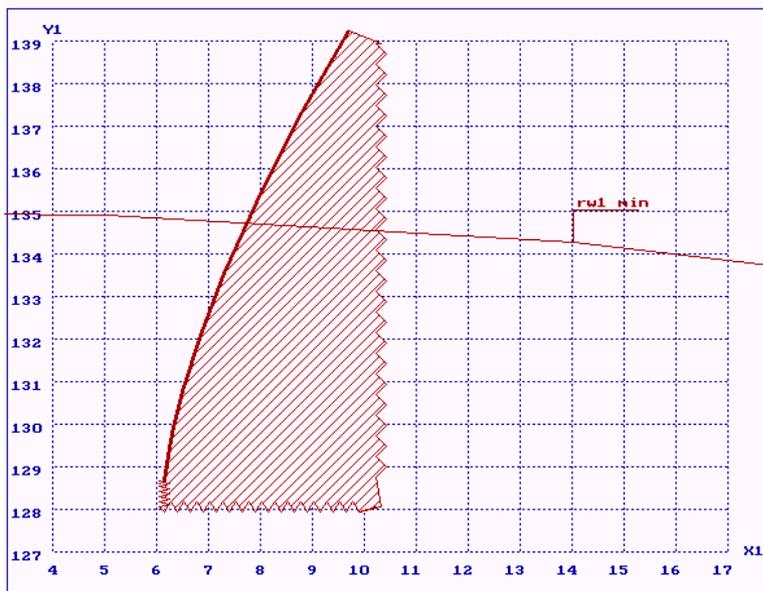


Рис.11 Исходный профиль инструмента Рис. 12 Подрезание профиля детали



В качестве еще одного примера снова рассмотрим исходный профиль инструмента в виде синусоиды (см.рис.5. Требуется найти минимально необходимый радиус начальной окружности. С помощью подпрограммы (см. рис.10) будем вычислять минимально необходимый радиус начальной окружности, который в нашем случае $r_{wl \min} = 8$ мм.

Рис.13 Профиль детали с изображением минимальной радиуса начальной окружности

Если ввести $r_{wl} = 6$ мм, то подпрограмма сообщает о подрезании и выводит координаты точки профиля детали, в которой будет подрезание $x_l=2,18$ $y_l=3,4$ (рис.14). Если ввести $r_{wl} \geq 8$ мм, то подпрограмма не сообщает о под-

резании и выводит профиль детали с изображением минимально необходимого радиуса начальной окружности (рис.15).

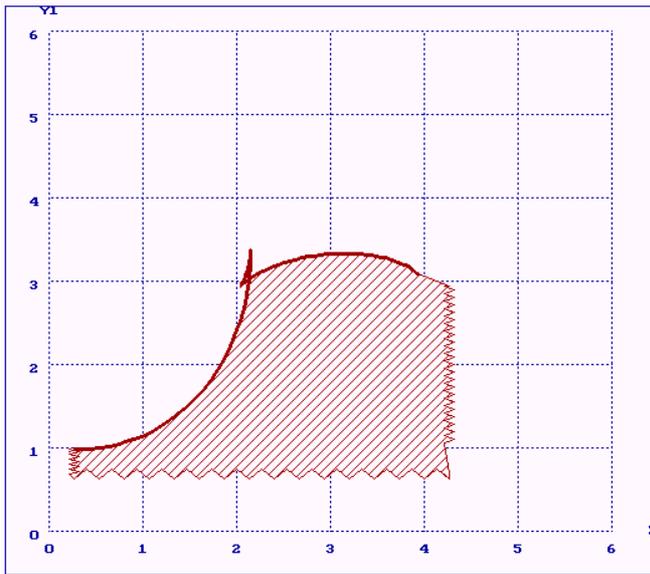


Рис.14 Подрезание профиля детали



Рис.15 Профиль детали с изображением минимально необходимого радиуса начальной окружности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. В литературных источниках отсутствуют какие-либо указания по выбору радиуса начальной окружности при решении плоской обратной задачи профилирования, обеспечивающие отсутствие подрезания профиля детали при любом профиле инструмента.
2. Различные формы описания исходного профиля с различной размерностью параметров приводят к различной форме уравнения зацепления, а это, в свою очередь, к различным алгоритмам и программам решения задач профилирования.
3. Необходимость аналитического описания исходного профиля, аналитического вычисления частных производных, скоростей относительного движения и составление уравнения зацепления приводит к громоздким выражениям, необходимости выполнения всей этой процедуры для каждой формы описания исходного профиля.
4. Сплайн-аппроксимационный подход к описанию исходного профиля позволяет независимые переменные с различной размерностью для разных форм описания исходного профиля заменить на безразмерный параметр u , всегда изменяющийся в пределах $0 \leq u \leq 1$, что позволяет ограничиться одним алгоритмом решения обратных задач для профилей, состоящих из комбинации участков с различными формами описания исходного профиля, что существенно упрощает решение обратных задач и программирование.

5. Сплайн-аппроксимационный подход к описанию исходного профиля позволяет, создать единый алгоритм и подпрограмму для описания исходного профиля и вычисления ортов нормалей при всех формах его задания, в том числе и точечной.
6. Сплайн-аппроксимационный подход к описанию исходного профиля позволяет сделать решение обратной задачи профилирования инвариантным ко всем формам описания исходного профиля.
7. Сплайн-аппроксимационный подход позволяет при точечной форме задания исходного профиля использовать разностные варианты сплайн-аппроксимации, которые не уступают прогоночным методам по точности, но являются более удобными для практической реализации.
8. Вывод уравнения зацепления различными методами (кинематическим методом, методом профильных нормалей и методом Фрайфельда) показывает правильность выведенного уравнения зацепления.
9. Угол обкатки φ зависит только от координаты инструмента, радиуса начальной окружности и профильного угла γ .
10. Разработан единый алгоритм для решения плоской обратной задачи профилирования, этот алгоритм упрощает и унифицирует решение плоской обратной задачи.
11. Алгоритм решения плоской обратной задачи профилирования позволяет вычислять нормали к профилю при любой форме описания исходного профиля, в том числе точечной.
12. Выполнен вывод общей формулы, позволяющей определять подрезание детали при решении плоской обратной задачи профилирования при любой форме профиля инструмента.
13. Разработана подпрограмма для проверки подрезания детали при решении плоской обратной задачи профилирования.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Хзам Ахмад Заидан М., Панкратов Ю.М. Решение плоской обратной задачи профилирования // Тезисы материалов V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. «Фундаментальные исследования в технических университетах». – СПб.: СПбГТУ., 2001г.- С. 193.
2. Хзам Ахмад Заидан М., Панкратов Ю.М. Применение матричного метода для определения скоростей относительного движения в обратной задаче профилирования // Тезисы материалов VI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. «Фундаментальные исследования в технических университетах». – СПб.: СПбГПУ., 2002г.- С. 99.
3. Хзам Ахмад Заидан М., Панкратов Ю.М. Применение сплайн - аппроксимационных подхода при решении плоской обратной задаче профилирования// Тезисы материалов VI Всероссийской конференции

по проблемам науки и высшей школы. «Фундаментальные исследования в технических университетах». – СПб.: СПбГПУ., 2002г.- С. 100.

4. Хзам А. З., Панкратов Ю.М. Подрезание профиля при решении обратной задачи профилирования. - В сб.: XXX юбилейная неделя науки СПбГПУ. – СПб.: СПбГПУ, 2002г., 1с. (статья принята к публикации).