

М 484443
Государственный комитет по народному образованию СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи
УДК 62.135-253.5.226.1

Степанов Михаил Викторович

ПРИМЕНЕНИЕ САПР ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОИЗВОДСТВА ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН

Специальность 05.04.12 - турбомашин

05.13.12 - системы автоматизированного
проектирования и автоматизации
технологической подготовки
производства (машиностроение)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1989

Работа выполнена в научно-исследовательском институте
технологии и организации производства двигателей.

Научный руководитель - доктор технических наук
профессор Манушин Э.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, С.Н.С.,
Венедиктов В.Д.
доктор технических наук, профессор
Митрофанов В.Г.

Ведущая организация - НИО "Сатурн"

Защита состоится " 29 " мая 1989 г. в 14 часов на
заседании специализированного совета К.053.15.05 "Тепловые
машины и теоретические основы теплотехники" при Московском
высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005,
г.Москва, Лефортовская наб., дом I, корпус "Энергомашино-
строение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
высше

Отзыв
проси
МВТУ

ные печатью,
я ул., 5,
53.15.05.

89 г.

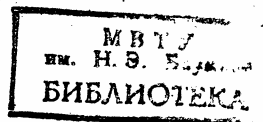
И.Ефимов

М 484743

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современном турбомашиностроении наиболее сложной по форме деталью, требующей применения специальных технологических методов для изготовления, является лопатка турбомшины, а также соответствующая формообразующая оснастка. Получение стабильных размеров, определяющих геометрию пера лопатки турбомшины и формообразующей оснастки, снижение трудоемкости производства возможны при условии применения для обработки лопаток станков с числовым программным управлением. Для числового программного управления обработкой необходимо представить геометрию обрабатываемого изделия в аналитическом виде, то есть по сути получить математическую модель обрабатываемого участка. Таким образом, для автоматизированного производства лопаток турбомашин и формообразующей оснастки требуется преобразовать исходную информацию о геометрии, содержащуюся в чертеже, в управляющие программы для станка с ЧПУ. Такая задача может быть решена в рамках САПР.

В настоящее время в работах, посвященных применению САПР в турбомашиностроении, отсутствуют научное обобщение и рекомендации по разработке структуры САПР для автоматизированного производства лопаток турбомашин и формообразующей оснастки, использованию математического, программного и информационного обеспечения такой системы. Кроме того, структура и обеспечение такой САПР должны позволять использовать ее как самостоятельно, так и в качестве подсистемы в сквозных САПР конструкции и технологии. В отечественных и зарубежных разработках САПР ввод информации осуществляется с помощью языков высокого уровня, специально разработанных для программирования обработки на станках с ЧПУ. При этом от пользователя требуется квалификация программиста, что затрудняет эксплуатацию таких систем в условиях производства. Для современного турбомашиностроительного производства требуются системы автоматизированного проектирования, которые позволяют в диалоговом режиме осуществлять преобразование информации о геометрии лопатки турбомшины и формообразующей оснастки, содержащейся в их чертежах, в управляющие программы для станков с ЧПУ. Поэтому разработка



структуры и обеспечения таких САПР, способных работать и как самостоятельная система, и как подсистема сквозных САПР конструкции и технологии является актуальной задачей.

Цель работы. Снижение трудоемкости производства и обеспечение стабильности размеров профильных частей лопаток турбомашин и формообразующей оснастки путем применения САПР, преобразующей информацию чертежа в управляющие программы для станка с ЧПУ. Указанная цель достигается решением следующих задач.

1. Разработка структуры САПР для преобразования геометрической информации чертежа лопатки турбомашин и формообразующей оснастки в управляющие программы для станка с ЧПУ. Такая САПР способна работать как самостоятельно, так и в качестве подсистемы в сквозной САПР.

2. Создание математических моделей геометрических элементов пера лопатки турбомашин и формообразующей оснастки.

3. Разработка информационного и программного обеспечения как для самостоятельной работы системы, так и при использовании ее в качестве подсистемы в сквозных САПР.

4. Осуществление анализа свойств поверхности обрабатываемого участка с целью выявления оптимального направления движения режущего инструмента по обрабатываемой поверхности.

Научная новизна работы состоит в разработке комплексного подхода к созданию САПР для автоматизированного производства лопаток турбомашин и формообразующей оснастки. В результате такого подхода:

- разработана структура построения автоматизированной системы и ее обеспечения, позволяющая эксплуатировать ее как самостоятельную САПР в диалоговом режиме, а также включать в качестве подсистемы в сквозные САПР конструкции и технологии;

- обосновано применение бикубического сплайна для математической модели поверхностей пера лопатки турбомашин и формообразующей оснастки;

- использован аппарат дифференциальной геометрии для анализа свойств поверхностей лопаток турбомашин и формообразующей оснастки с целью обоснования выбора направления обработки на станке с ЧПУ.

Практическую ценность работы составляют:

- разработанная структура САПР для автоматизированного производства лопаток турбомашин и формообразующей оснастки;
- алгоритм построения математической модели поверхности пера лопатки турбомашин и формообразующей оснастки;
- алгоритм задания контура участка обработки;
- алгоритм анализа свойств поверхности для выбора направления обработки на станке с ЧПУ;
- алгоритм расчета траектории движения инструмента по обрабатываемой поверхности;
- разработанное программное обеспечение.

Реализация. На основе разработанной структуры САПР, математического, информационного и программного обеспечения создана автоматизированная система, которая позволяет осуществлять высокоэффективное производство лопаток турбомашин и формообразующей оснастки. Часть исследований и разработок, описанных в диссертации, используется в различных системах автоматизированного проектирования, таких как проектирование оснастки для электрохимической обработки лопаток турбомашин и формообразующей оснастки.

Апробация. Основные результаты исследований докладывались на конференциях: "САПР в гибких автоматизированных производствах лопаток турбомашин", "Комплексная программа создания сквозных САПР" (1985-1987 гг.).

На защиту выносятся следующие вопросы:

1. Комплексный подход к разработке структуры САПР для автоматизированного производства лопаток турбомашин и формообразующей оснастки.
2. Математическая модель пера лопатки турбомашин и формообразующей оснастки.
3. Структура построения информационного и программного обеспечения САПР для автоматизированного производства лопаток турбомашин и формообразующей оснастки.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 работы.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и приложения с материалами о внедрении результатов разработок.

Основная часть работы содержит 141 страниц, 30 рисунков, 1 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой главе дан краткий анализ результатов по теме диссертации, опубликованных в открытой печати. Формулируются актуальные проблемы теории и методов исследования структуры системы автоматизированного проектирования и ее обеспечения. Ставятся задачи, которые должна решать САПР, применяемая для автоматизированного производства лопаток турбомашин и формообразующей оснастки и входящая в качестве подсистемы в сквозную САПР конструкции и технологии лопаток турбомашин.

Особенностям построения структуры САПР и ее обеспечения посвящены работы И.П.Норенкова, В.А.Мартынюк, Л.Г.Ковалевой, Н.Н.Павлова, В.А.Скороспелова, П.А.Турук, В.А.Вайсбурга, Г.Б.Евгеньева, В.А.Трудоношина, Н.В.Пивоваровой, П.К.Кузьмика, В.Б.Маничева, Н.Н.Капустина, Г.Н.Васильева, Р.А.Аллик, Ю.М.Сокоменцева, В.В.Губанова, Н.И.Феофанова, С.В.Абламейко, В.П.Васильева, А.Б.Шабарова, М.Т.Константинова, А.А.Маталина, Б.И.Френкеля, Ф.С.Панова, Л.М.Балдина, Г.В.Вайсберг.

Требования, предъявляемые к структуре и обеспечению турбомашиностроительной САПР конкретного назначения, пока еще четко не сформулированы; отсутствуют рекомендации, позволяющие при разработке системы учесть возможность включения ее в качестве подсистемы в сквозную САПР. Что касается вопроса об автоматизированном производстве лопаток турбомашин и формообразующей оснастки путем применения САПР, которая осуществляла бы связь между результатами конструирования и технологией производства, то он остается практически открытым. Не является исключением и зарубежный опыт. Так, в работах М.Гувера и Э.Зиммерса, крупных специалистов в области САПР из Лихайского университета (США) также отсутствует освещение этого вопроса. Назначение САПР заключается в преобразовании информации, которая является

результатом проектирования лопатки турбомашин или формообразующей оснастки, применяемой для ее изготовления (штампы, валцы, прессформы), в информацию управления обработкой данного участка поверхности на станке с ЧПУ. Перед разработкой структуры системы автоматизированного проектирования, предназначенной для какой-либо конкретной задачи, следует рассмотреть различные аспекты автоматизации проектирования, проанализировать целесообразность самого процесса проектирования.

Проектирование структуры САПР (по Шигли) представляется как итеративная процедура, состоящая из шести этапов (рис.1):

1. Выявление потребности данной разработки.
2. Постановка задачи.
3. Синтез решения задачи.
4. Анализ и оптимизация.
5. Оценка результатов решения.
6. Вид представления результатов.

Этапы 2-6 итеративно связаны между собой. Итеративный цикл повторяется до тех пор, пока не будет получено оптимальное решение. В структуре САПР на верхнем уровне решается общая задача, стоящая перед данной системой; на подуровнях с помощью разделов системы решаются подзадачи. С применением метода декомпозиции производится расчленение основной задачи на подзадачи и, как следствие, расчленение структуры системы на подуровни. Учитывая специфику конкретной задачи, структуру САПР можно представить в виде, показанном на рис.2. На основе рассмотрения основной задачи и составляющих ее подзадач построена структура САПР для автоматизированного производства лопаток турбомашин и формообразующей оснастки. Разработанная структура САПР состоит из 6 разделов, каждый из которых имеет свое функциональное назначение и представляет независимый программный комплекс, что позволяет использовать ее и как независимую автоматизированную систему в производстве, и как подсистему, входящую в сквозную САПР конструкции и технологии турбомашин. Обеспечение разработанной системы состоит из математического, программного и информационного. Исходя из подзадач, решаемых в системе автоматизированного проектирования, математическое обеспечение использует аппарат линейной алгеб-

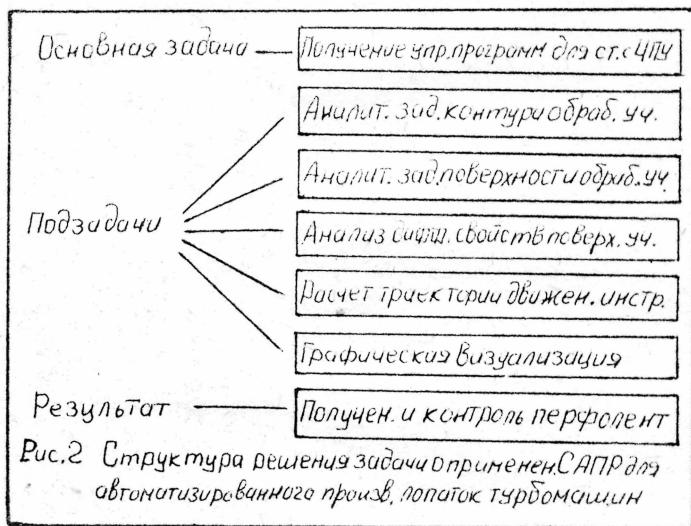
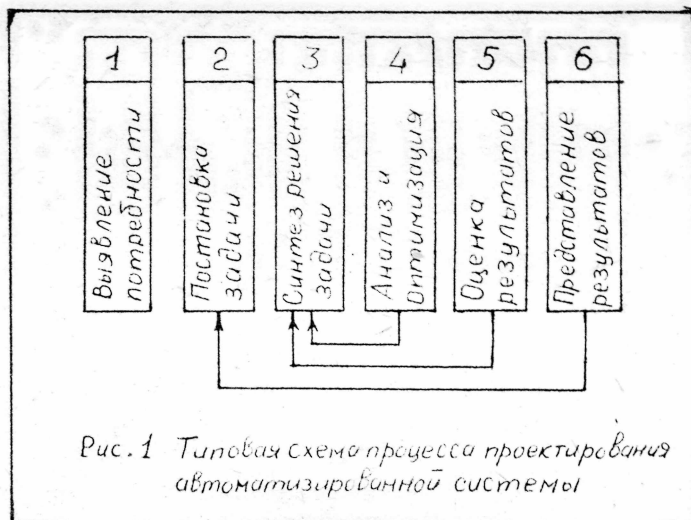
ры, аналитической геометрии, векторной алгебры, теории сплайнов, матричного исчисления и дифференциальной геометрии. В качестве языков программирования для программного обеспечения системы используются языки высокого уровня.

Таким образом, в первой главе диссертации для обеспечения автоматизации процесса производства лопаток турбомашин и формообразующей оснастки решены следующие задачи.

1. Разработана структура САПР для автоматизированного производства лопаток турбомашин.
2. Разработано назначение функциональных разделов системы и круг решаемых задач в разделах.
3. Обосновано построение обеспечения системы.

Вторая глава посвящена исследованию математических моделей, применяемых в САПР для автоматизированного производства лопаток турбомашин и формообразующей оснастки. Система автоматизированного проектирования, которая предназначена для получения управляющих программ для станков с ЧПУ, обязательно содержит этап, на котором решаются вопросы аналитического представления формы поверхности и границ обрабатываемого участка. Аналитическое представление геометрии формы поверхности пера лопатки турбомашин и формообразующей оснастки является стыкующим звеном между автоматизированным проектированием конструкции и автоматизированным производством. Объектами плоской геометрии в лопатке турбомашин и формообразующей оснастки являются сечения пера лопатки, заданные на чертеже массивами закордированных точек, и контур проекции пера лопатки на координатную плоскость. Объектами с пространственной геометрией являются поверхности пера лопатки турбомашин и соответствующие поверхности на формообразующей оснастке. В зависимости от специфики объекта для построения математической модели используется либо аппарат аналитической геометрии, либо аппарат сплайн-функций.

Для аналитического задания контура проекции пера лопатки на координатную плоскость используется аппарат аналитической геометрии на плоскости и кубического сплайна. Участки контура могут быть образованы прямыми, дугами окружностей и сплайнами (рис.3). Контур считается заданным, если все его элементы



(координаты опорных точек, углы наклона участков, центры окружностей и коэффициенты сплайнов) определены. Во избежание "за-резов" инструментом соседних участков при обработке на станке с ЧПУ необходимо перестраивать контур или отдельные его участки как с положительной, так и с отрицательной эквидистантой. Для аналитического задания плоского сечения (как и для контура) используется кубический сплайн. Математическая модель плоского сечения и участков контура получается с помощью сплайна вида:

$$S(x(i)) = C1(i) + C2(i)(x - x(i)) + \frac{1}{2} C3(i)(x - x(i))^2 + \frac{1}{6} C4(i)(x - x(i))^3.$$

Для построения интерполяционного кубического сплайна возможно применение различного вида граничных условий. По изменению первой производной можно судить о гладкости сечения. Более общее представление о геометрии сечения можно получить из изменения кривизны по сечению.

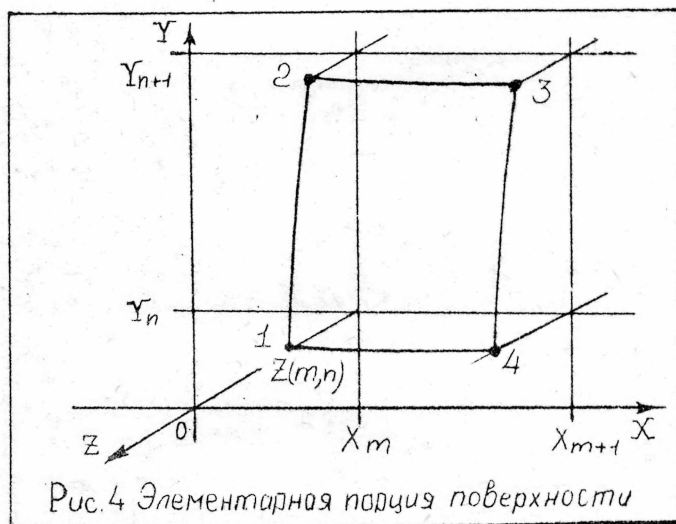
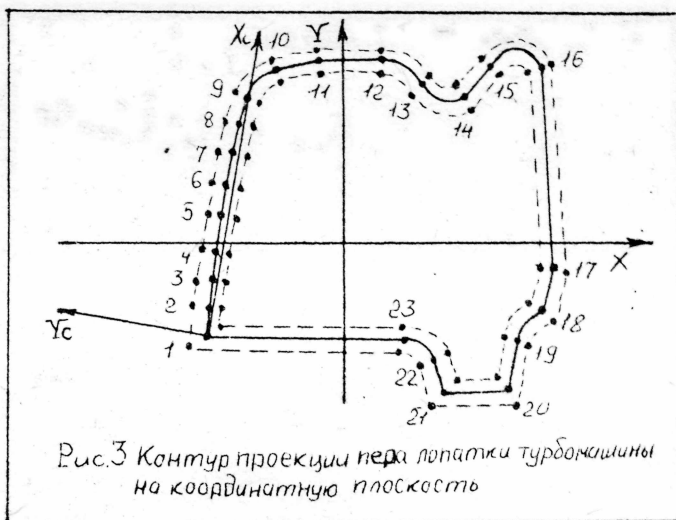
$$K = \frac{|S''(x - x(i))|}{(1 + S'(x - x(i))^2)^{3/2}}.$$

Для получения поверхности пера лопатки турбомашин в аналитическом виде прежде всего требуется построить линейный каркас поверхности из горизонтальных и вертикальных сечений. Для построения элемента поверхности в каждом опорном прямоугольнике (рис.4) используется бикубическая функция

$$Z(x, Y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 A_{ij} \left(\frac{x - x_m}{h_m} \right)^i \left(\frac{Y - Y_n}{K_n} \right)^j,$$

$$\text{где } h_m = x_{m+1} - x_m, \quad K_n = Y_{n+1} - Y_n,$$

$$Z(m, n) = Z(x_m, Y_n).$$



ния является невыгодным. Оптимальным направлением обработки будет такое, при котором кривизна будет минимальной; следовательно, обработку надо вести по одному из главных направлений, где кривизна минимальна. Таким образом, выбрав из технологических соображений на плоскости XOY начальную точку обработки, следует определить главные направления в этой точке поверхности, затем выбрать из них то, при котором главная кривизна будет минимальной. Решение этой задачи состоит из следующих этапов.

1. Определяется координата Z точки обработки. Для определения координаты Z выявляется элемент поверхности, в котором находится точка, и определяются три матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ x^3 \end{bmatrix}, \quad Y = \|1 \quad y \quad y^2 \quad y^3\|.$$

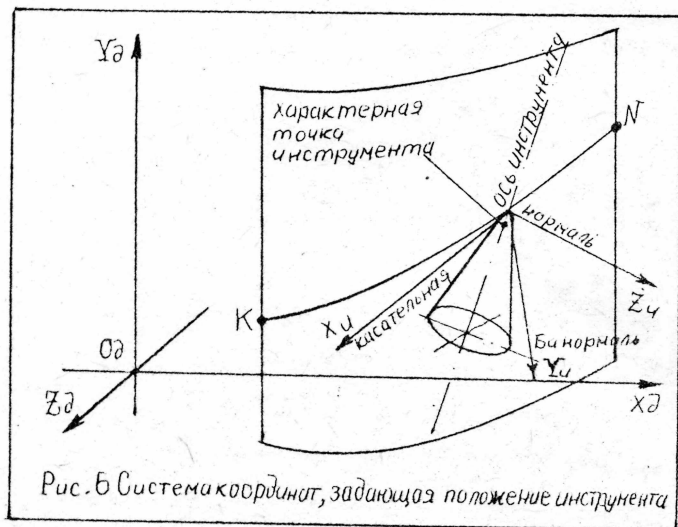
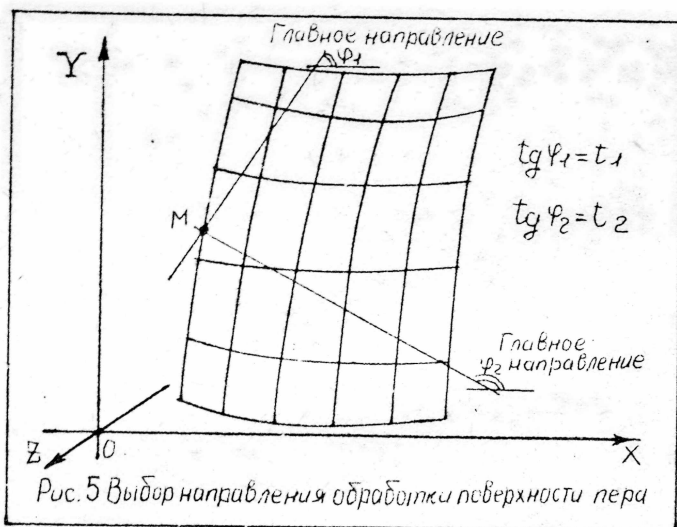
Тогда координата $Z = Y \cdot (A \cdot X)$.

2. Для исследования поверхности используются Гауссовы коэффициенты первого и второго порядка в форме Эйлера-Монжа:

$$\begin{cases} E = 1 + (F'_x)^2 \\ G = 1 + (F'_y)^2 \\ F = 1 + F'_x \cdot F'_y \end{cases} \quad \begin{cases} L = \frac{F''_{xx}}{\sqrt{1 + (F'_x)^2 + (F'_y)^2}} \\ M = \frac{F''_{xy}}{\sqrt{1 + (F'_x)^2 + (F'_y)^2}} \\ N = \frac{F''_{yy}}{\sqrt{1 + (F'_x)^2 + (F'_y)^2}} \end{cases}$$

3. Вычисляются важные характеристики поверхности в точке — направляющие косинусы нормального вектора, так как обычно инструмент в опорной точке траектории располагается по нормали к поверхности во избежание "зареза".

4. Определяются два главных направления в проекции на



плоскость XOY (рис.5): $t_{1,2} = dy/dx$ - из квадратного уравнения

$$(LF - ME) + (LG - NE)t + (MG - NF)t^2 = 0,$$

известного из теории поверхностей.

5. Вычисляются значения кривизны по главным направлениям по известному из дифференциальной геометрии уравнению

$$(EG - F^2)K^2 + (2MF - EN - LG)K + (LN - M^2) = 0.$$

Таким образом, определяется направление движения инструмента из данной точки, в которой кривизна будет наименьшей. Иногда из-за технологических ограничений приходится вести обработку поверхности пера лопатки турбомшины или технологической оснастки в произвольном направлении, не совпадающим ни с одним из главных направлений, а ось инструмента располагается не по нормали к поверхности обработки. При этом кривизна нормального сечения определяется как

$$K_c = K_1 \cos^2 \varphi + K_2 \sin^2 \varphi,$$

где K_1 и K_2 значения кривизны по главным направлениям, а φ - угол, образованный касательной этого нормального сечения с первым главным направлением. Кривизна произвольного плоского сечения поверхности пера лопатки турбомшины или формообразующей оснастки может быть определена из теоремы Менье $K_{\alpha c} = K_c / \cos^2 \alpha$, где α - угол между плоскостями сечений.

После определения траектории движения инструмента и граничных точек траектории осуществляется линейная аппроксимация траектории. При программном числовом управлении обработкой широко используется аппроксимация с постоянным шагом, которая при большой кривизне участка траектории не обеспечивает надлежащую точность и приводит к необходимости производить необоснованно большой объем шагов на участке с малой кривизной. В данной системе используется аппроксимация с заданной точностью.

Перед получением управляющей программы для станка с ЧПУ, на котором обрабатывается поверхность пера лопатки турбомшины или формообразующей оснастки, система координат, в которой задано положение инструмента, должна быть соотнесена с систе-

мой координат станка (рис.6). В качестве системы координат, для задания положения инструмента используется система координат, построенная на сопровождающем трехграннике (нормаль, бинормаль, касательная) к траектории движения инструмента.

Таким образом, подготовка данных для числового программного управления обработкой поверхности пера лопатки турбомашин и соответствующей формообразующей оснастки осуществляется с высокой степенью автоматизации. Применение аппарата дифференциальной геометрии позволяет оптимально решить задачу о выборе направления обработки, координации положения инструмента и аппроксимации траектории движения инструмента по обрабатываемой поверхности.

В четвертой главе описано информационное и программное обеспечение САПР для автоматизированного производства лопаток турбомашин и формообразующей оснастки.

Результатом работы САПР является преобразование информации. Входной информацией для данной системы автоматизированного проектирования являются первоначальные сведения о геометрии участка обработки пера лопатки турбомашин или формообразующей оснастки, которые содержатся в чертеже, и данные о технологии обработки этого участка (такие, как направление движения инструмента по обрабатываемой поверхности, начальная точка обработки, точность аппроксимации, инструмент, число оборотов шпинделя станка и т.д.). Таким образом, вся входная информация состоит из трех частей:

1. Исходные данные о контуре участка обработки.
2. Исходные данные для построения поверхности обрабатываемого участка пера лопатки.
3. Данные о технологии обработки.

Выходной информацией является управляющая перфолента, закодированная в виде, принятом для конкретной системы числового программного управления обработкой.

При работе системы ее разделы из исходной информации создают промежуточную информацию, которая является результатом работы какого-либо раздела системы, т.е. решение какой-либо подзадачи на подуровне системы представлено своей информацией.

При работе данной САПР в качестве независимой автоматизированной системы для хранения информации используется система файлов с прямой и последовательной организацией. Объем памяти для файловой системы на магнитных носителях зависит от числа участков обработки.

При использовании данной САПР в качестве подсистемы в сквозной САПР конструкции и технологии, когда требуется собрать воедино всю информацию о лопатках, применяемых в турбомашине, о технологической оснастке, применяемой для их изготовления, о конструкторской и технологической документации, в качестве хранилища информации используется база данных.

Специализированное программное обеспечение, построенное по модульному принципу, позволяет легко проводить модификацию системы и включать ее в качестве подсистемы в сквозные САПР конструкции и технологии. При эксплуатации данной САПР в качестве самостоятельной системы представляется целесообразным использовать файловую систему хранения информации. Такая система может быть создана самим пользователем-технологом средствами раздела сервисного обеспечения системы автоматизированного проектирования. Работа с базой данных представляется оправданной при использовании разработанной САПР в качестве подсистемы в сквозных САПР конструкции и технологии турбомашин.

ВЫВОДЫ

Основным содержанием диссертации является разработка способов снижения трудоемкости производства и получения стабильности размеров аэродинамических поверхностей лопаток турбомашин и соответствующей формообразующей оснастки путем применения САПР, создающей управляющие программы для станков с ЧПУ. Решение указанной актуальной проблемы опирается на следующие научные результаты, полученные в процессе исследовательских работ.

1. Разработана структура САПР, позволяющая эксплуатировать ее как самостоятельную систему и как подсистему, включающую в сквозную САПР конструкции и технологии.

2. Исследовано применение бикубического сплайна в качестве математической модели пера лопатки турбомашин и формообразующей оснастки.

3. Предложен и реализован способ выбора направления обработки поверхности пера лопатки турбомашин и формообразующей оснастки путем применения аппарата дифференциальной геометрии.

4. Разработаны способы хранения информации в системе при ее самостоятельной работе и работе в качестве подсистемы в сквозных САПР.

5. Разработано построение программного обеспечения системы, позволяющее легко проводить модификацию системы и эксплуатировать ее в диалоговом режиме.

Основные положения диссертации получили отражение в следующих работах:

1. Манушин Э.А., Степанов М.В. Аналитическое представление точно заданных поверхностей с нерегулярной геометрией для использования в САПР лопаток турбомашин // Изв. ВУЗов. Машиностроение. - 1987. - № 2. - С.70-76.

2. Манушин Э.А., Степанов М.В. Определение элементов контура проекции лопатки турбомашин на координатную плоскость // Изв. ВУЗов. Машиностроение. - 1987. - № 6. - С.81-85.

3. Манушин Э.А., Степанов М.В., Степанова Г.И. Хранение информации аналитического задания поверхностей с нерегулярной геометрией в САПР лопаток турбомашин // Изв. ВУЗов. Машиностроение. - 1988. - № 2. - С.86-93.

Типография МВТУ. Заказ № 462. Тираж 100 экз. Л-18242 Объем 1п.л.
Дата разрешения к печати 30.03.89г.

