

УДК 519.68-74:62

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ
И ОПЫТ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В.А.Скороспелов

I. Общее описание системы и принципы, положенные в её основу.

В Институте математики СО АН СССР разработана система, предназначенная для автоматизации геометрических расчетов в различных научно-технических задачах. Она может рассматриваться как соответствующая подсистема САПР или АСТП. Наибольший эффект от ее применения достигается в тех случаях, когда объекты, участвующие в расчетах, имеют сложные пространственные обводы. Это объекты таких отраслей, как судостроение, авиастроение, автомобилестроение, гидротурбостроение, обувная промышленность и т.д. Система универсальна, т.е. применима в различных предметных областях, информационно независима, т.е. способна обрабатывать информацию об изделии, представленную в различных формах и достаточно большого объема, надежна и проста в обращении.

Универсальность системы обеспечивается возможностью адаптировать ее к решению задач конкретной предметной области. С этой целью ее программное обеспечение разделено на три иерархических уровня. Первый - базовый - не зависит от конкретной области применения. Он включает системные блоки, набор обслуживающих программ, набор стандартных модулей. Второй и третий уровни - проблемные, создаются на этапе адаптации системы к конкретной проблеме. Второй уровень объединяет программы, наиболее общие для данной предметной области. Это программные средства моделирования ее объектов и программы, реализующие операции над ними. Третий уровень обеспечивает решение задач предметной области в конкретных условиях. Этот уровень наиболее подвержен изменению. Разработка программ проблемных уровней начинается после того, как выделена область автоматиза-

ции и определены перспективы ее изменения, поставлены задачи, подлежащие решению в рамках системы. Основу этих программ составляют стандартные модули.

Информационная независимость системы обеспечивается тем, что каждому объекту, включенному в систему, ставится в соответствие внутренняя стандартная структура данных. Исходная информация об объекте преобразуется к стандартному виду специальными программными средствами, создаваемыми на этапе адаптации. Математическое обеспечение системы базируется на разработанных в Институте математики СО АН СССР методах и вычислительных алгоритмах приближения кривых и поверхностей сплайн-функциями [1-4].

1.1. Программное обеспечение системы. Структура программного обеспечения представлена на рис.1. В его состав входят: блок управления, транслятор АКИ, стандартные модули, системные(обслуживающие) программы, рабочие (проблемные) программы. Блок управления является резидентной частью системы и во время ее работы постоянно находится в оперативной памяти. Его составные части: диспетчер, блок обмена с пультовой машинкой, пер-

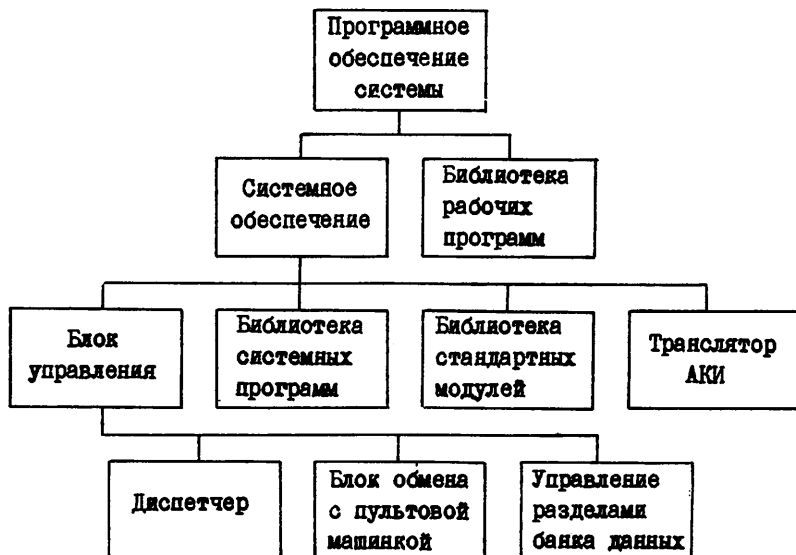


Рис. 1

вый уровень программного обеспечения управления разделами банка данных. Диспетчер осуществляет ввод задания и последовательную загрузку соответствующих программ для его выполнения. Блок обмена с пультовой машинкой обеспечивает связь пользователя с системой. Его функции – ведение протокола и ввод данных при работе с системой в режиме диалога. Транслятор АКИ используется для генерации стандартных модулей и рабочих программ.

Стандартные модули являются основой для создания программ проблемных уровней и предназначены для решения различных задач аналитической и дифференциальной геометрии, обеспечения доступа к разделам банка данных, организации диалога между пользователем и рабочими программами, визуализации геометрической информации на устройствах машинной графики, расчета информации, управляющей станками с ЧПУ. Обслуживающие, или системные, программы осуществляют управление разделами архива системы, а также трансляцией и отладкой проблемных программ.

Рабочие программы составляют проблемное обеспечение системы.

1.2. Архив системы. Он состоит из нескольких разделов, предназначенных для хранения каталогизированных наборов данных; именно: библиотеки исходных текстов, библиотеки стандартных модулей, библиотеки системных программ, библиотеки рабочих программ, банка данных. Наименование разделов указывает на их назначение. Все разделы размещаются на магнитных лентах и могут состоять из нескольких томов. Состав каждого раздела определяется пользователем и в любой момент может быть расширен или изменен по его усмотрению. Набору данных, помещаемому в один из разделов архива, присваивается имя, указанное пользователем, и заводится элемент каталога с параметрами этого набора.

С помощью системных программ можно инициализировать том раздела, внести или исключить набор данных из тома, сделать копию тома с выбором или исключением каких-либо наборов данных, выполнить коррекцию любого набора данных, проверить его сохранность, получить справку о состоянии любого тома раздела.

Банк данных системы предназначен для длительного и временно-го хранения различных данных, обрабатываемых программами системы. Любой набор данных, помещаемый в банк, представляется в виде трехмерного массива с параметрами (m, n, f) , которые в дальнейшем будем называть описанием этого массива. Банк данных имеет собственный раздел – временный, или оперативный, банк данных, который пред-

назначен для хранения промежуточной информации на время работы системы. Программное обеспечение обмена с банком данных реализовано в виде двух уровней: 1-й уровень – системный – осуществляет обмен массивами между оперативной памятью и томом банка (он встроен в блок управления системы); 2-й уровень – проблемный – обеспечивает доступ рабочих программ к банку данных и реализуется набором стандартных модулей.

1.3. Геометрические объекты и соответствующие структуры данных. Список элементарных геометрических объектов и внутренняя стандартная форма их представления приведены в таблице. Этот список расширяет-

Т а б л и ц а

Геометрический объект	Структура данных	Уравнение
Точка	$\vec{r} = \{X, Y, Z\}$	радиус-вектор
Вектор	$\vec{H} = \{H_x, H_y, H_z\}$	координаты
Прямая	$\{\vec{r}_0, \vec{H}\}, \vec{H} = 1$	$[\vec{r} - \vec{r}_0, \vec{H}] = 0$
Плоскость	$\{\vec{r}_0, \vec{N}\}, \vec{N} = 1$	$(\vec{r} - \vec{r}_0, \vec{N}) = 0$
Окружность	$\{\vec{r}_0, \vec{N}, R\}$	$\begin{cases} (\vec{r} - \vec{r}_0, \vec{N}) = 0 \\ \vec{r} - \vec{r}_0 = R \end{cases}$
Эллипс	$\{\vec{r}_0, \vec{A}, \vec{B}\}, \vec{A} = a, \vec{B} = b$	$\vec{r}(\varphi) = \vec{A} \cos \varphi + \vec{B} \sin \varphi + \vec{r}_0$
Дуга кривой	$\{\vec{r}_i, \vec{r}_i', t_i\}, i = \overline{1, n}$	P –сплайн
Сфера	$\{\vec{r}_0, R\}$	$ \vec{r} - \vec{r}_0 = R$
Цилиндр	$\{\vec{r}_0, \vec{H}, R\}, \vec{H} = 1$	$ [\vec{r} - \vec{r}_0, \vec{H}] = R$
Круговой конус	$\{\vec{r}_0, \vec{H}, \alpha\}, \vec{H} = 1$	$(\vec{r} - \vec{r}_0, \vec{H}) = \vec{r} - \vec{r}_0 \cos \alpha$
Поверхность вращения	$\{\vec{r}_0, \vec{H}, \{\vec{r}_i, \vec{r}_i', t_i\}\}, i = \overline{1, n}, \vec{H} = 1$	$\vec{r}(t, \varphi) = [\vec{H}, [\vec{H}, \vec{P}(t) - \vec{r}_0]] \cos \varphi + [\vec{H}, \vec{P}(t) - \vec{r}_0] \sin \varphi + (\vec{P}(t) - \vec{r}_0, \vec{H}) \vec{H} + \vec{r}_0$
Сегмент поверхности	$\{\vec{r}_{ij}, \vec{r}_{ij}^{(a,0)}, \vec{r}_{ij}^{(a,1)}, \vec{r}_{ij}^{(a,2)}, t_i, s_j\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$	PP –сплайн, K –сплайн
Сегмент линейчатой поверхности	$\{\vec{r}_{ij}, \vec{r}_{ij}^{(a,0)}, t_i\}, i = \overline{1, n}, j = (1; 2)$	$\vec{r}(t, v) = \vec{P}_1(t)(1-v) + \vec{P}_2(t)v$

ПРИМЕЧАНИЕ: $(\vec{A}, \vec{B}), [\vec{A}, \vec{B}], |\vec{A}|$ обозначают скалярное, векторное произведение векторов, модуль вектора; $\vec{r}^{(a,t)} = \frac{\partial^{a,t}}{\partial t^a \partial s^t} \vec{r}(t, s)$.

ся объектами той предметной области, к которой адаптируется система. Их стандартная форма определяется с учетом логических связей с другими объектами и алгоритмов решения задач этой предметной области. Основными из перечисленных объектов являются дуга кривой, поверхность вращения, сегмент поверхности. Математически они представляются в виде кубического параметрического сплайна (P -сплайна), бикубического параметрического сплайна (PP -сплайна) и сплайна Кунса (K -сплайна). Как видно из таблицы, дуге кривой соответствует упорядоченная последовательность точек $\vec{t}_i$, в каждой из которых указаны касательный вектор $\vec{t}_i$ и значение параметра t_i . Сегменту поверхности соответствует упорядоченная последовательность узлов $\vec{t}_{ij}$ его каркаса, в каждом из которых заданы касательные векторы $\vec{t}_{ij}^{(i,0)}$, $\vec{t}_{ij}^{(0,i)}$ к каркасным линиям, вектор смешанной производной $\vec{t}_{ij}^{(i,i)}$ и значения параметров t_i, s_j .

1.4. О б щ е н и е с с и с т е м о й. Для формулирования заданий предусмотрен входной язык. Задание есть последовательность указаний (шагов задания), выраженных на входном языке. Словарь языка состоит из имен всех программ, содержащихся в томах библиотек системных и рабочих программ. Основным элементом входного языка системы является оператор. Это языковая конструкция, состоящая из имени оператора и последовательности значений параметров. Имя оператора - слово из словаря входного языка. Параметром оператора может быть текстовая строка, восьмеричная, целая или вещественная константа. В частности, это может быть ссылка на банк данных системы. Один оператор входного языка составляет шаг задания. Выполнить шаг задания - это значит выполнить соответствующую программу из состава библиотек.

Во время работы системы на бумажной ленте пультовой машинки ведется протокол, в котором фиксируются все шаги задания. Для каждого шага печатается имя оператора, список его параметров (мнемонические обозначения параметров), их значения и сообщения об аварийных ситуациях, возникающих в момент выполнения шага.

Предусмотрены два режима работы с системой: диалоговый и пакетный. В режиме диалога шаги задания сообщаются с помощью пультовой машинки. Ввод очередного шага разрешается только после выполнения предыдущего. В пакетном режиме все задания, входящие в пакет, наносятся на перфоленту.

В качестве примера рассмотрим следующее задание. Пусть исходные данные о поверхности представляют собой последовательность уз-

лов некоторого каркаса $\{\vec{r}_{ij}\}$, $i = \overline{1, 50}$, $j = \overline{1, 20}$, и подготовлены на перфоленте в виде массива с описанием (20; 50; 3). Требуется занести их в банк данных, для контроля распечатать в виде таблицы, построить поверхность, сохранив ее в банке данных, изобразить ее каркас на графопостроителе в заданном ракурсе, получить сечение плоскостью и вывести его на графопостроитель, установить поверхность относительно координат станка в положение обработки, подготовить управляющую перфоленту для ее обработки на станке с ЧПУ. Это задание на входном языке системы представляется в виде следующей последовательности шагов.

ПОПЕД 300 20 50 3 - исходные данные заносятся в банк данных под номером 300 в виде массива с описанием (20, 50, 3).

РАМЕД 300 - массив, хранящийся в банке данных под номером 300, распечатывается в виде таблицы.

ПОКАП 300 301 - определяется каркас поверхности в стандартном виде по данным массива 300 и сохраняется в банке данных под номером 301.

ИКПО 0,5 -30 60 301 - каркас поверхности изображается на графопостроителе в поле размером 0,5:600х0,5:600 мм² так, как его видит наблюдатель, положение которого относительно геометрического центра каркаса определяется сферическими угловыми координатами (-30° , 60°).

ВИСЛО 301 1 3 1 4 1 45 0 0 0 10 45 0,7071 0,7071 0 - определяется сечение поверхности, каркас которой расположен в банке данных под номером 301; поверхность состоит из одного сегмента; результат выводится в виде таблицы и изображается на графопостроителе; выбор шага между точками сечения - автоматический; сечение плоскостью общего вида; масштаб рисунка 1:1; рисунок будет развернут относительно координат графопостроителя на угол 45° ; начало рисунка помещается в точку начального положения пера; плоскость имеет параметры (0; 10; 45; 0,7071; 0,7071; 0).

ИСК 301 302 0 - каркас поверхности, хранящийся под номером 301, переводится в новую систему координат в соответствии с заданной матрицей преобразования, которая заранее подготовлена на перфоленте; результат сохраняется под номером 302.

РАСТР 303 100 200 50 25 10

T 3 -5 -5 5 2

ПОВ 302 10,5 40,3 20 1 -1 2 1 50 0,1 0,05 -1 0

T 2 50 2

КОНЕЦ - рассчитывается траектория движения инструмента при обработке поверхности, каркас которой хранится в банке данных под номером 302; траектория в стандартном виде сохраняется под номером 303. Параметры обработки: начальное положение фрезы (100, 200, 50); фреза цилиндрическая радиуса 25 мм с торовым концом радиуса 10 мм; обрабатывается не вся поверхность, а только часть ее $U \in [10, 5; 40, 3]$, $V \in [20; 1]$; обработка ведется со стороны положительного направления оси OZ системы координат заготовки, и обрабатывается отрицательная сторона поверхности; обработка ведется строками вдоль координатных линий $V = \text{const}$, проходимыми в одном направлении: от $U = 0,5$ до $V = 40,3$; переход от строки к строке осуществляется вне заготовки с постоянным значением координаты $Z = 50$; обеспечивается точность воспроизведения поверхности в направлении строки (контурная погрешность) - 0,1 мм, высота гребешков между соседними строками - 0,05 мм и припуск на последующую обработку - 1 мм.

ПУЛ 303 400 50 3 1 - по данным, описывающим траекторию инструмента и хранящимся в банке данных под номером 303, рассчитывается управляющая информация к системе ЧПУ типа Н-33 для рабочей подачи 400 мм/мин и подачи врезания 50 мм/мин, подготавливается управляющая перфолента и печатается таблица.

2. Операторы расчета

Рассмотрим несколько наиболее общих операторов входного языка системы, предназначенных для выполнения расчетов. По назначению они разделены на четыре группы: операторы определения дуги кривой, операторы определения сегмента поверхности, операторы визуализации кривых и поверхностей, операторы расчета управляющей информации для станков с ЧПУ.

2.1. О п р е д е л е н и е д у г и к р и в о й. На проблемном уровне реализовано несколько способов определения дуги кривой как элементарного геометрического объекта. Рассмотрим три из них. Во входном языке системы им соответствуют операторы КРИВ, АПК, ПЕПОП.

О п е р а т о р КРИВ предназначен для описания дуги кривой, заданной упорядоченной последовательностью ее точек $\{\vec{r}_i\}$, $i = 1, n$. Разрешается в любой из них дополнительно задать направление касательного вектора $\vec{H}_j = (H_{xj}, H_{yj}, H_{zj})$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Программа КРИВ, реализующая этот оператор, рассчитывает нап-

равление касательных векторов в тех точках исходной последовательности, где оно не задано, а также значения параметра. С этой целью используется локальная процедура, подробно описанная в [2,4]. В результате исходная информация о кривой преобразуется к стандартному виду $\{\vec{r}_i, \vec{r}'_i, t_i\}, i = \overline{1, n}$, и тем самым определяется P -сплайн, восстанавливающий эту дугу.

О п е р а т о р АПК определяет дугу кривой, сглаживающую последовательность точек $\{\vec{r}_i\}, i = \overline{1, n}$, в виде P -сплайна. Он используется в том случае, если кривая, определенная оператором КРИВ для той же последовательности, ведет себя недостаточно плавно. Постановка задачи сглаживания и алгоритм ее решения изложены в статьях [4, 6, 7]. Основная идея применяемого метода состоит в определении P -сплайна с возможно меньшим число звеньев (это обеспечивает плавность его графика), минимизирующего некоторый функционал, который характеризует степень его отклонения от заданных точек.

Процесс сглаживания состоит из последовательности шагов и осуществляется в интерактивном режиме. После очередного шага результат выводится на печать в виде таблицы, а полученная кривая может быть изображена на графопостроителе, если он работает в режиме "on line". Пользователю предлагается оценить этот вариант и либо закончить сглаживание, либо выполнить очередной шаг, указав новые значения параметров. На каждом шаге он имеет возможность назначить веса исходным точкам, разместить узлы сетки приближающего P -сплайна, задать веса, которые управляют величиной разрыва его вторых производных, разрешить или запретить оптимальный выбор параметризации, заменить любую точку исходной последовательности заданной или ближайшей к ней точкой P -сплайна.

О п е р а т о р ПЕПОП описывает гладкую кривую как плоское сечение заданной поверхности. Поверхность может состоять из нескольких сегментов, каждый из которых стандартно оформлен. Результат выполнения оператора - кривая, представленная в стандартной форме относительно системы координат $(OXYZ)$, координатная плоскость (XOY) которой совпадает с плоскостью сечения.

2.2. О п р е д е л е н и е с е г м е н т а п о в е р х н о с т и. Рассмотрим несколько операторов определения сегмента поверхности, реализованных на втором проблемном уровне: ПОКАП, АПКС, АПСС, ППП, ДПОВ.

О п е р а т о р ПОКАП предназначен для описания сегмента

поверхности, заданного упорядоченной последовательностью узлов его некоторого каркаса $\{\tau_{ij}\}$, $i=\overline{1,n}$, $j=\overline{1,m}$. Программа ПОКАП преобразует эту информацию к стандартному виду, определяя в каждом узле τ_{ij} направления касательных векторов $\vec{H}_{ij}^{(a)}$ и $\vec{H}_{ij}^{(b)}$ к каркасным линиям и значения параметров t_i, s_j , близких к естественным. Результирующий массив $\{\tau_{ij}, \vec{H}_{ij}^{(a)}, \vec{H}_{ij}^{(b)}, t_i, s_j\}$ с описанием $(m, n, 11)$ определяет K -сплайн, который восстанавливает поверхность по исходным точкам.

О п е р а т о р ы АПИС и АПСС определяют сегмент поверхности, ограниченный четырьмя заданными дугами и проходящий в окрестности заданных точек $\{\tau_k\}$, $k=\overline{1,l}$. Постановка задачи об определении такой поверхности и метод ее решения изложены в работах [4, 6]. Решение ищется в виде K -сплайна, минимизирующего сумму квадратов его уклонений от заданных точек. Варьируются коэффициенты K -сплайна и значения параметров в исходных точках. Поиск сегмента есть многошаговый процесс, реализованный в интерактивном режиме. Результат, полученный на очередном шаге, анализируется пользователем, и ему предлагается назначить веса некоторым исходным точкам для последующего шага.

Операторы АПИС и АПСС идентичны. Программы, реализующие их, отличаются только числом варьируемых коэффициентов искомого K -сплайна.

О п е р а т о р ППП предназначен для описания линейчатой поверхности, заданной двумя дугами. Исходная информация о них может быть представлена в виде массивов с описанием $(2, n, 6)$ или $(2, n, 3)$, а также в виде двух массивов, задающих исходные дуги как плоские, каждую - в собственной системе координат. В последнем случае задается связь систем координат.

О п е р а т о р ДПОВ определяет поверхность, эквидистантную заданной. Последняя должна быть представлена в стандартном виде.

2.3. В и з у а л и з а ц и я к р и в ы х и п о в е р х н о с т е й. Программные средства для графического изображения объектов некоторой предметной области или их элементов создаются на этапе адаптации системы. Для этой цели предусмотрены несколько модулей. Основными являются модуль линейного приближения дуги кривой и модуль расчета управляющей информации для графопостроителей ЕС-7054, "Konsberg", "Вектор-1301". Назначение одного из этих устройств осуществляется служебным оператором ГРАФ. Если графопо-

строитель работает в режиме "on line", управляющая информация передается ему непосредственно. В противном случае она выводится на перфоленду.

Отметим два оператора, реализованные на проблемном уровне, не, вообще говоря, не связанные с конкретной предметной областью.

О п е р а т о р И К Р предназначен для получения графического изображения дуги пространственной кривой. Изображение строится в соответствии с заданным масштабом и заданной матрицей преобразования пространственных координат в плоскость рисунка.

О п е р а т о р И К П О описывает графическое изображение каркаса поверхности. Плоскость рисунка выбирается перпендикулярной направлению "наблюдатель - геометрический центр сегмента". Положение наблюдателя задается двумя угловыми сферическими координатами относительно центра сегмента. Изображение строится параллельным проектированием каркаса на плоскость рисунка в соответствии с заданным масштабом.

2.4. Р а с ч е т у п р а в л я ю щ е й и н ф о р м а ц и и для станка с ЧПУ. Рассмотрим несколько операторов входного языка, предназначенных для расчета управляющей информации при фрезеровании на трехкоординатном станке с ЧПУ. Это РАСТР, ПУЛ, РДТР, ТСЕТР. Каждый из них имеет дело с объектом типа "траектория". Этот объект представляет собой последовательность технологических команд и положений инструмента (узлов траектории) относительно заготовки. Для каждого узла указаны координаты расчетной точки инструмента и значение относительной подачи в ней.

Узлы траектории рассчитываются так, чтобы при линейном перемещении инструмента из одного положения в соседние обеспечивалась заданная точность воспроизведения обрабатываемой детали. Геометрия фрезы задается двумя параметрами (R, γ) . На рис. 2 представлены

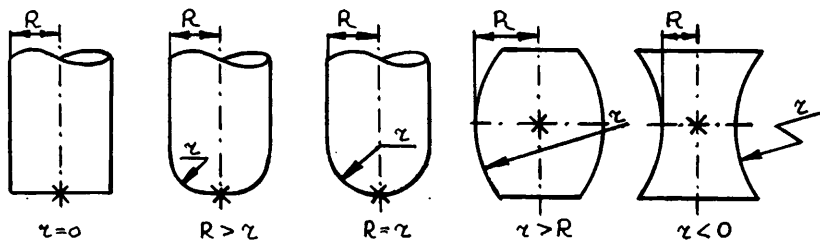


Рис. 2

допустимые формы инструмента. Крестиком помечены расчетные точки.

Точность и чистота воспроизведения детали задается контурной погрешностью и высотой гребешков. Контурная погрешность задает допустимую погрешность воспроизведения в направлении движения инструмента. Высота гребешков характеризует допустимую шероховатость поверхности, которая обусловлена недоработкой между соседними проходами инструмента.

О п е р а т о р РАСТР предназначен для расчета траектории движения инструмента при фрезеровании на 3 - координатном станке с ЧПУ. Он позволяет задать отдельную точку траектории, движение фрезы вдоль кривой, движение фрезы по поверхности, технологические параметры обработки и технологические команды, исполняемые станком. Результат - траектория расчетной точки инструмента, представленная в стандартной форме.

В число параметров оператора входят о п р е д е л и т е л и Т, КОН, ПОВ, УК, ОК, ОВ, СИ, ТК, КИ, КОНЕЦ, каждый из которых имеет свой список параметров.

Т - определитель "перейти в точку" - задает очередную точку траектории $\vec{r}_i$ одним из следующих способов: $\vec{r}_i = \vec{R}$; $\vec{r}_i = \vec{r}_{i-1} + \vec{R}$; $\vec{r}_i = \text{Rep}(\vec{r}_{i-1}, \vec{R})$; $\vec{r}_i = \vec{r}_{i-1} \cdot \vec{R}$; $\vec{r}_i = \text{Rep}(\vec{r}_{i-1}, \vec{R})$, где $\vec{R} = (R_x, R_y, R_z)$ - заданные значения, $\text{Rep}(\vec{r}_i, \vec{R})$ обозначает замену координат радиуса-вектора $\vec{r}_i$ на соответствующие координаты $\vec{R}$, отличные от значения "пусто".

Определитель КОН - "идти вдоль дуги" - описывает движение вдоль пространственной кривой, представленной в стандартной форме. Задаются: обрабатываемый участок кривой и направление движения; матрица преобразования плоскости (XOY) системы координат, относительно которой задана кривая, в плоскость (X'O'Y') станка; положение фрезы (справа, слева, на кривой) относительно проекции дуги на координатную плоскость (XOY); величина припуска, контурная погрешность, значение относительной подачи.

Определитель ПОВ - "обработать поверхность" - назначает движение фрезы по указанному участку поверхности. Участок задается пределами изменения параметров поверхности. Указываются: ее обрабатываемая сторона (положительная, отрицательная), связь системы координат поверхности с системой координат станка, направление строк обработки (вдоль линий $U = \text{const}$ или $V = \text{const}$), схема обработки (зигзаг, строками в одном направлении), допустимая контурная погрешность, допустимая высота гребешков, величина припуска, относительная подача.

Определитель УК - "установить коррекцию" - указывает величину смещения $\overline{DR} = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ последующих точек траектории. Определитель ОК - "отменить коррекцию" - отменяет дальнейшее действие определителя УК.

Определители ОВ, СИ, ТК назначают скорость вращения шпинделя и команду его пуска, смену инструмента, выполнение технологической команды соответственно.

Служебные определители КК, КОНЕЦ используются для фиксации в протоколе общего числа рассчитанных к этому моменту кадров и обозначения конца входной информации к оператору РАСТР.

О п е р а т о р ПУЛ предназначен для преобразования траектории, рассчитанной по оператору РАСТР, в управляющие коды интерполятора Н-33 в соответствии с заданными значениями подачи врезания и рабочей подачи. Результат представляется в виде последовательности кадров на перфоленте и может быть распечатан в виде таблицы.

О п е р а т о р РДТР назначает коррекцию массива, описывающего некоторую траекторию. Коррекция состоит в том, что из указанной части массива удаляются точки траектории, расположенные "слева" от заданной плоскости, и добавляются точки, соответствующие положению фрезы при контакте с ней, а также точки траектории при переходе от строки к строке. Этим реализуется обработка при наличии ограничивающей плоскости.

О п е р а т о р ТСЕТР предназначен для сегментирования траектории на такие части, чтобы время обработки или число кадров для каждой из них (за исключением, может быть, последней) незначительно отличались от заданных. Возможное отличие обусловлено тем, что один сегмент содержит целое число строк. Каждая часть начинается и заканчивается в точке начального положения инструмента и оформляется самостоятельным технологическим переходом. Для нее печатаются число кадров и время обработки.

3. Примеры практического использования системы

Применению системы для той или иной проблемы предшествует вполне определенная последовательность действий. Сначала определяется ее область применения, выделяется круг задач, подлежащих автоматизированному решению, определяются объекты области, структуры входных данных, вводится понятие математических моделей объектов. Далее разрабатываются алгоритмы решения поставленных задач, которые затем реализуются в рамках системы.

Ниже рассматриваются две проблемы, к которым была адаптирована система. Для каждой из них дается краткая характеристика самой проблемы, приводятся задачи, решаемые с помощью системы, и набор соответствующих программных средств, разработанных на этапе адаптации.

3.1. Автоматизация проектирования и изготовления лопастей гидротурбин. Область применения системы в этой проблеме включает подготовку необходимой геометрической информации с лопасти для проведения гидродинамических расчетов, расчет данных для рабочего чертежа лопасти, расчет управляющей информации для изготовления лопастей рабочих колес гидротурбин на станках с ЧПУ.

Объектами рассматриваемой предметной области являются лопасть радиально-осевой гидротурбины, лопасть поворотно-лопастной гидротурбины, их заготовки, штампы для изготовления указанных лопастей методом штампогибки.

В качестве математической модели лопасти принят K -сплайн, приближающий ее поверхность. В качестве математической модели заготовки приняты K -сплайны, описывающие поверхности сторон нагнетания и всасывания. Рабочие поверхности штампов определяются поверхностями заготовки.

Исходными данными для построения математических моделей указанных объектов могут быть:

- а) узлы каркасов поверхностей нагнетания и всасывания, полученные в результате проектных расчетов;
- б) данные рабочего чертежа лопасти;
- в) точки, снятые с поверхности лопасти модельного колеса.

Сначала определяются поверхности заготовки. Для данных типа "а" это выполняется оператором ПОКАП. Для данных других типов — операторами АПК, АППС, АПСС. Затем оператором КАРЛО рассчитывается входная поверхность, гладко сопрягающая поверхности нагнетания и всасывания, и в результате их объединения определяется поверхность лопасти. Этот процесс подробно изложен в [6].

Для оценки полученных поверхностей можно воспользоваться операторами ВИСЛО, ПОТ, АНКАР. Оператор ВИСЛО позволяет рассчитать любые плоские сечения как поверхности лопасти, так и поверхности заготовки, и изобразить их на графопостроителе. По оператору ПОТ определяются расстояния исходных точек до поверхности лопасти. Поле всех отклонений изображается на широкой печати. Оператор АНКАР

рассчитывает в узлах каркаса значения нормальных кривизн и их знаки печатает в виде таблицы.

Для того чтобы получить данные рабочего чертежа лопасти, следует воспользоваться операторами ВИСЛО, СГЛ, СПЛС, РТЛ, РАСВЕТ, ПОЛО. По оператору ВИСЛО рассчитываются семейства плоских сечений. С помощью операторов СГЛ и СПЛС определяются координаты точек поверхностей лопасти и ее границ в соответствии с заданной сеткой. Результат оформляется в виде таблиц, структура которых установлена требованиями к рабочему чертежу. Оператор РТЛ определяет распределение толщин лопасти по ее поверхности. Оператор РАСВЕТ позволяет рассчитать "расстояние в свету" – расстояние некоторых точек выходной кромки одной лопасти до поверхности соседней. С помощью оператора ПОЛО можно поверхность лопасти и ее заготовки развернуть в заданное положение штампогибки и рассчитать необходимую информацию для изготовления штампа.

Для обеспечения и выполнения гидродинамических расчетов предусмотрены операторы РЕЖИМ, РАСПР, ИПРО, РОБ, РСР, РИПОЗ, ЦСК, РФИ. По оператору РЕЖИМ формируется массив исходных данных для заданных режимов обтекания и заданных линий тока. По оператору РАСПР рассчитываются конформные отображения профилей, получаемых пересечением поверхности лопасти с поверхностями тока. Совместно с данными массива о режимах обтекания эта информация является исходной для оператора РОБ, предназначенного для решения прямой задачи об обтекании профиля. Воспользовавшись оператором ИПРО, можно получить стандартно оформленное изображение профилей, рассчитанных по оператору РАСПР. Операторы РСР и РИПОЗ позволяют построить среднюю поверхность лопасти и в узлах ее каркаса определить необходимые величины для решения прямой осесимметричной задачи обтекания. Используя оператор ЦСК и РФИ, можно перевести поверхность лопасти в цилиндрическую систему координат, естественным образом связанную с системой координат колеса гидротурбины, и для заданных значений $\{R_i, Z_i\}$, $i = \overline{1, n}$, на поверхностях всасывания и нагнетания рассчитать угловую координату φ_i и вектор нормали $\vec{N}_i$.

Подготовка управляющих перфолент для изготовления лопастей модельных колес на станке с ЧПУ осуществляется с помощью операторов ПОЗА, РАСТР, ТСЕТР, ПУЛ. По оператору ПОЗА в соответствии с технологическими требованиями на положение лопасти при ее обработке осуществляется преобразование координат колеса, относительно которых она задана, в координаты станка, и определяются оптималь-

ные размеры заготовки (размеры минимального параллелепипеда, содержащего в себе лопасть). Затем с помощью операторов РАСТР, ТСЕТР, ПУЛ подготавливаются перфоленты с управляющей информацией для всех технологических переходов обработки лопасти: черновая обработка поверхностей всасывания и нагнетания, их чистовая обработка, обработка поверхности пересечения лопасти с верхним и нижним ободами.

3.2. Изготовление рабочих колес циркуляционных насосов на многокоординатном станке с ЧПУ. Общий вид рабочего колеса циркуляционного насоса изображен на рис.3. Эту деталь предполагается изготовить на пятикоординатном станке, оснащемном системой числового управления Н-55. Обработке подлежит практически вся поверхность колеса за исключением торцевых поверхностей ступицы и поверхности внешнего цилиндрического сечения каждой его лопасти. Заготовка для этой детали представляет собой отливку.

Математическая сторона проблемы - автоматизация расчета управляющих программ для выполнения всех технологических переходов обработки деталей этого типа.

Адаптация системы к этой проблеме потребовала разработки и программной реализации методов построения математической модели колеса, разработки набора программ для расчета управляющих перфолент.

В качестве математической модели колеса приняты К-сплайны, приближающие поверхность лопасти и поверхность ступицы. Предусмотрены два варианта построения математической модели колеса. В первом из них в качестве исходных данных принимаются данные рабочего чертежа: таблица разверток цилиндрических сечений лопасти. В этом варианте применена та же методика, что и для построения математической модели лопасти гидротурбины. Дополнительно разработаны операторы КИД и ПОД. По оператору КИД осуществляется контроль исходных данных и их анализ. Программа ПОД преобразует данные чертежа в точки лопасти относительно системы координат колеса.

Второй вариант основывается на данных, которые обычно принимаются в качестве исходных при конструировании рабочего колеса. Это теоретический профиль и набор параметров, задающих закон преобразования его в цилиндрические сечения лопасти. Этому варианту соответствует оператор ММК. Для контроля полученной математической модели предусмотрен оператор РСЦ, позволяющий рассчитать цилиндрические сечения лопасти и их развертки.

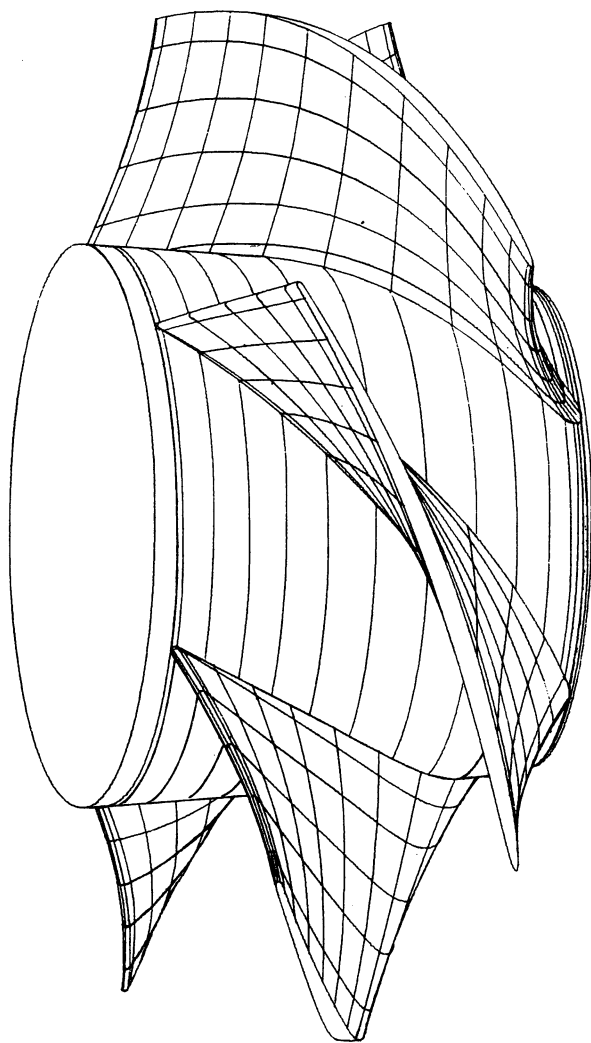


Рис.3. Общий вид колеса.

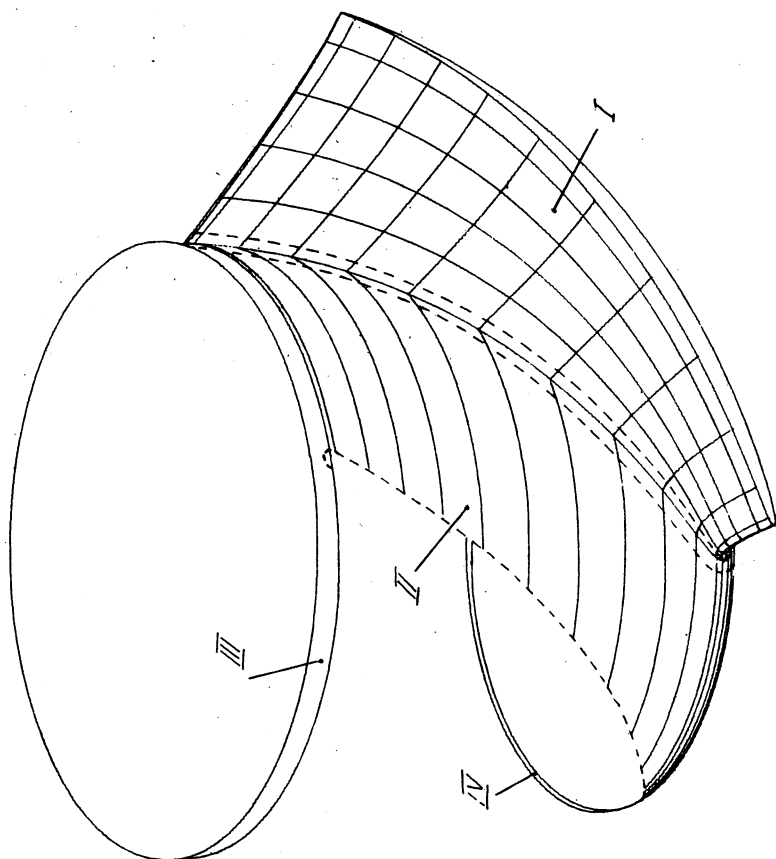


Рис.4. Области обработки на поверхности колеса.

На поверхности колеса выделены области обработки (рис. 4): поверхность лопасти (I), часть поверхности ступицы (II), заключенная между двумя соседними лопастями колеса, верхний (III) и нижний (IV) пояски на поверхности ступицы. Для упрощения расчета траектории инструмента эти области предварительно параметризуются так, чтобы движение инструмента осуществлялось вдоль координатных линий. Подготовка областей обработки осуществляется с помощью оператора ПА.

Учитывая, что колесо имеет осевую симметрию порядка L (L - число лопастей колеса), достаточно предусмотреть следующие технологические переходы его обработки на станке: подрезку кромок лопасти, черновую и чистовую обработку лопасти, обработку части II ступицы, обработку поясков на ступице. Им соответствуют следующие операторы входного языка: ПК, ПОПШ, ООПШ, ОПС, ОСТ. По каждому из них рассчитывается траектория движения фрезы, которая преобразуется в управляющие коды к интерполатору Н-55 и выводится на перфоленту. Одновременно печатается таблица, содержащая номер кадра, координаты точки траектории относительно координат станка, вектор перемещения в эту точку (в импульсах), значение подачи, с которой выполняется это перемещение, суммарное время обработки. В каждом операторе заложена схема движения инструмента, определенная самим технологическим переходом. Варьировать можно точность воспроизведения вдоль строки (контурную погрешность), шероховатость (высоту гребешков), параметры инструмента, рабочую подачу и подачу врезания. Имеется возможность сегментировать программу обработки каждого технологического перехода на самостоятельные части, задавая максимальное время обработки или максимальное количество кадров для одной части.

Эта проблема и вопросы, касающиеся ее реализации в рамках системы, более подробно рассмотрены в статье [5].

Заключение

Кроме проблемных областей, рассмотренных в предыдущем разделе, система применялась для описания и изготовления обувных штампов, для обработки экспериментальных данных в некоторых научных проблемах. В настоящий момент система эксплуатируется на Новосибирском заводе им. В.П.Чкалова и используется для изготовления технологической оснастки. Накопленный опыт позволяет сделать следующие выводы:

- принципы, положенные в основу создания системы, полностью себя оправдали;

- наиболее важным свойством системы является ее универсальность, т.е. применимость в различных предметных областях, что открывает большие возможности для кооперации в развитии ее проблемно-зависимой части;

- наибольший эффект от применения системы достигается в случае, когда предметная область распространяется на проектирование, конструирование, подготовку производства и изготовление;

- примененный в системе метод математического моделирования кривых и поверхностей сплайн-функциями обеспечивает высокое качество, алгоритмичность и надежность расчетов, выполняемых с помощью системы;

- весьма важную роль играет такой компонент системы, как управление данными, вопросам хранения и передачи которых следует уделять особое внимание.

В настоящий момент в Институте математики СО АН СССР ведутся работы по созданию версии системы для ЕС-ЭВМ.

Л и т е р а т у р а

1. ЗАВЬЯЛОВ Ю.С., КВАСОВ Б.И., МИРОШНИЧЕНКО В.Л. Методы сплайн-функций. - М.: Наука, 1980. - 352 с.

2. СКОРОСПЕЛОВ В.А. Интерполяция плоских кривых. - В кн.: Методы сплайн-функций (Вычислительные системы, вып. 68). Новосибирск, 1976, с. 33-44.

3. СКОРОСПЕЛОВ В.А. Кубическая сплайн-интерполяция как средство приближения пространственных кривых. - В кн.: Методы сплайн-функций (Вычислительные системы, вып. 75). Новосибирск, 1978, с. 36-44.

4. ПАВЛОВ Н.Н., СКОРОСПЕЛОВ В.А. Моделирование кривых и поверхностей в системе автоматизации геометрических расчетов. - Настоящий сборник, с. 44-59.

5. ПАВЛОВ Н.Н., СКОРОСПЕЛОВ В.А. Автоматизация расчета управляющих программ для обработки рабочих колес циркуляционных насосов на пятикоординатном станке с ЧПУ. - В кн.: Методы сплайн-функций (Вычислительные системы, вып. 81). Новосибирск, 1979, с. 63-73.

6. ПАВЛОВ Н.Н., СКОРОСПЕЛОВ В.А. Аппроксимация поверхности лопасти гидротурбины. - В кн.: Методы сплайн-функций (Вычислительные системы, вып. 72). Новосибирск, 1977, с. 56-64.

7. ПАВЛОВ Н.Н. К вопросу об аппроксимации пространственных кривых кубическими параметрическими сплайнами. - В кн.: Методы сплайн-функций (Вычислительные системы, вып. 75). Новосибирск, 1978, с. 45-49.

Поступила в ред.-изд. отд.

16 апреля 1981 года