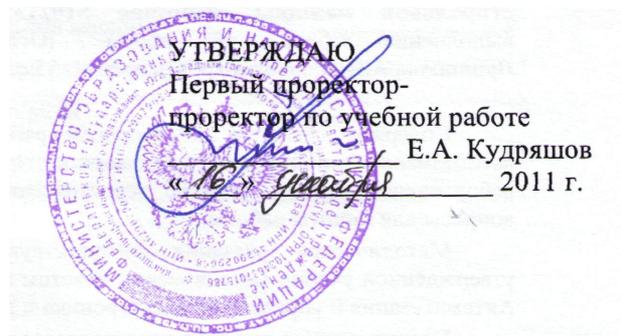


Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 17.12.2021 13:17:01  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Юго-Западный государственный университет»

Кафедра управления качеством, метрологии и сертификации



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Компьютерное моделирование производственных  
и технологических процессов»  
для обучающихся по направлению  
552200 (200500.68) «Метрология, стандартизация и сертификация»  
магистерской программы  
552215 «Всеобщее управление качеством»

УДК 621.9.01

Составители: О.В. Аникеева, А.Г. Ивахненко

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры  
«Машиностроительные технологии и оборудование» А.И. Ремнев

**Моделирование формообразующих систем:** методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Компьютерное моделирование производственных и технологических процессов» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: О.В. Аникеева, А.Г. Ивахненко. Курск, 2011. 28 с. Библиогр.: с. 28.

Излагаются краткие теоретические сведения по формообразующим системам металлорежущих станков. Приводятся варианты задания для выполнения на ЭВМ, а также примеры их выполнения.

Методические указания соответствуют требованиям программы, утвержденной учебно-методическим объединением по направлению «Метрология, стандартизация и сертификация».

Предназначены для обучающихся по направлению 552200 (200500.68) «Метрология, стандартизация и сертификация» магистерской программы 552215 «Всеобщее управление качеством» очной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. . Уч. - изд. л. . Тираж 20 экз. Заказ .  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## **1 Цель работы**

Изучение метода моделирования формообразующих систем металлорежущих станков для построения системы обрабатываемых поверхностей и диагностики станков по результатам обработки.

При выполнении индивидуального задания рекомендуется обратить особое внимание на соответствие функции формообразования и координатного кода формообразующей системы.

## **2 Задание**

По указанным преподавателем вариантам:

### **1) составить:**

- модель формообразующей системы металлорежущего станка;
- балансы точности металлорежущего станка;

### **2) проанализировать:**

- балансы точности металлорежущего станка;

### **3) провести диагностику металлорежущего станка.**

## **3 Краткие теоретические положения**

### *Модели формообразующих систем токарных и фрезерных станков*

Точность является одним из важнейших показателей качества технологического оборудования, влияющим на его выходные показатели (надежность, долговечность, быстроходность и пр.). Точность технологического оборудования в большей степени определяет точность изготавливаемых изделий. Требования к точности станков регламентированы государственными стандартами на нормы точности станков и техническими условиями на станки отдельных типов. Регламентируются требования к геометрическим параметрам точности станков и требования к точности обработанных на них образцов изделий. На рисунке 3.1 изображены образцы-изделия для проверки точности обработки металлорежущих станков (МРС): токарных и фрезерных [1,2].

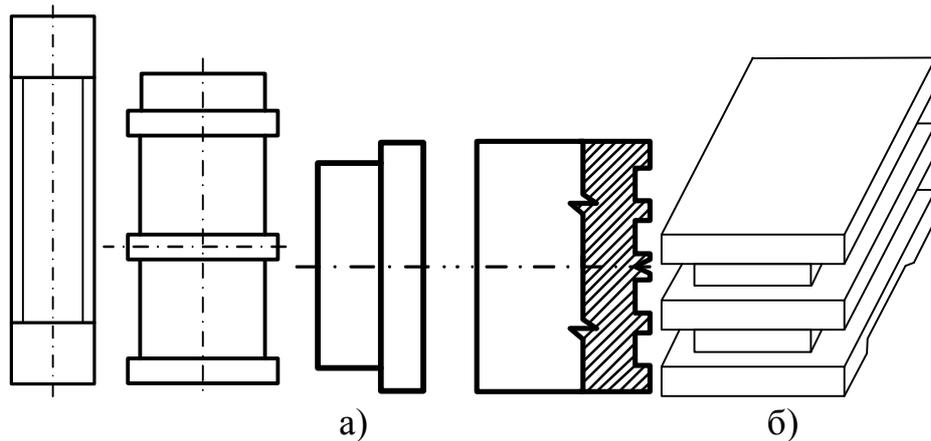


Рис. 3.1 – Образцы изделия для проверки точности МРС:  
а) токарных; б) фрезерных

Система расчетов точности МРС позволяет построить баланс точности станка, определить влияние отдельных факторов на точность обработанной поверхности, определить погрешность схемы формообразования, диагностировать источник погрешности по результатам измерений обработанных на МРС поверхностей деталей и т.д.

Система расчетов точности станков базируется на пересмотре традиционной математической модели основной количественной характеристики точности – погрешности механического устройства, которая может быть представлена как полная вариация функции, описывающей основное служебное назначение устройства (поэтому предлагаемый метод расчета точности назван вариационным). Для МРС такой функцией является функция формообразования [3].

Формообразующая система (ФС) станка – это совокупность механических элементов системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь), взаимное положение и перемещение которых обеспечивает заданную траекторию движения режущего инструмента относительно обрабатываемой детали. В ее состав входят: станина, исполнительные органы (суппорты, столы), обрабатываемая деталь, режущий инструмент. ФС станка выполняет его основную функцию, является конструктивно наиболее важной его частью, определяющей служебное назначение.

Звено ФС – это совокупность узлов станка или других элементов системы СПИД, смещения которых относительно друг друга в процессе функционирования станка номинально отсутствуют (т.е. в звено входят элементы, остающиеся относительно неподвижными во время работы МРС), например, шпиндель токарного станка вместе с патроном и зажатой в нем обрабатываемой деталью.

Существует несколько видов ФС станков: параллельного действия, многоинструментальная, многопозиционная одноинструментальная, и др.

В качестве примера будем рассматривать наиболее простую и самую распространенную ФС станка – цепную (с одним режущим инструментом и одной обрабатываемой деталью).

Структура и ряд важных свойств ФС компактно и однозначно записываются в виде наборов целых чисел – характеристических кодов ФС. С помощью них фиксируются количество и последовательность расположения звеньев, их относительное движение, скорости движения. Главное значение имеет координатный код ФС, по которому однозначно воспроизводится функция формообразования станка.

Как известно, твердое тело может иметь 6 степеней свободы. Поскольку звенья ФС обладают лишь одной степенью свободы в относительном движении, то с каждым звеном связывается один из приведенных ниже символов:

Движение звена относительно предыдущего:

поступательное вдоль оси:

X.....	1
Y.....	2
Z.....	3

вращательное вокруг оси:

X.....	4
Y.....	5
Z.....	6

Относительное движение звеньев ФС может быть представлено в виде числа  $k$  – упорядоченного перечня символов – координатный код системы (цепи):

$$k = k_1 k_2 \dots k_i, \quad (3.1)$$

где  $k_i$  ( $i = 1, \dots, l$ ) – обозначение движения  $i$ -го звена ФС относительно  $(i - 1)$ -го;  $k_i = 1, \dots, 6$ ;  $l$  – число подвижных узлов системы.

Составим координатный код ФС токарно-винторезного станка (рис. 3.2).

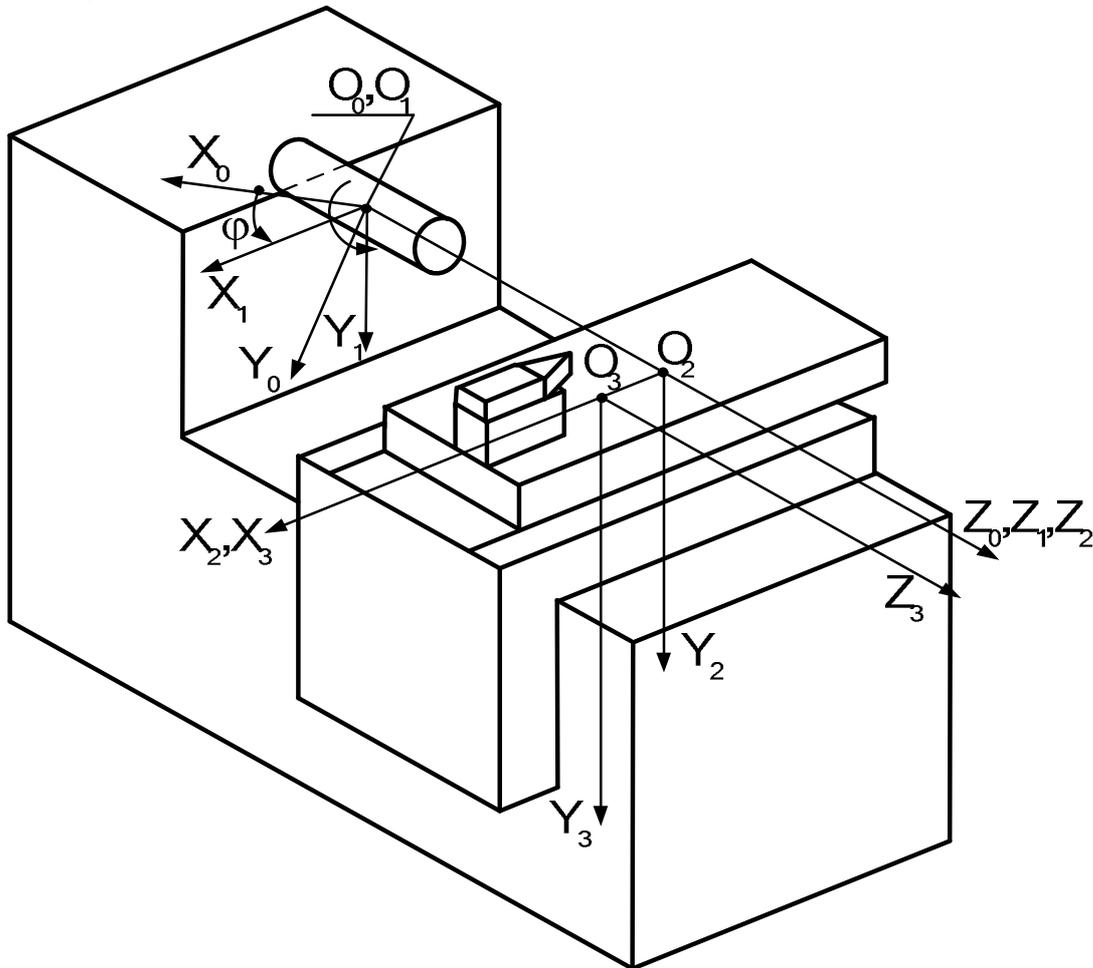


Рис. 3.2 – ФС токарно-винторезного станка:  $S_0$  – система координат обрабатываемой детали со шпинделем;  $S_1$  – система координат станины;  $S_2$  – система координат продольного суппорта;  $S_3$  – система координат поперечного суппорта

Нулевым звеном ( $i = 0$ ) является обрабатываемая деталь со шпинделем. Следующее звено ( $i = 1$ ) – станина. Так как нулевое звено всегда считается неподвижным, то в относительном движении станина вращается вокруг оси  $Z_0$  в направлении, обратном направлению вращения шпинделя:  $k_1 = 6$ . Аналогично, поступательное движение продольного суппорта относительно станины совершается вдоль оси  $Z_1$ , т.е.  $k_2 = 3$ . Поперечный суппорт

поступательно движется вдоль оси  $X_2$ , т.е.  $k_3 = 1$ . Таким образом, для токарно-винторезного станка координатный код ФС представляет собой трехзначное число  $k_m = 631$ .

Аналогично, координатный код ФС вертикально-фрезерного станка (рис. 3.3) будет равен  $k_\phi = 126$ .

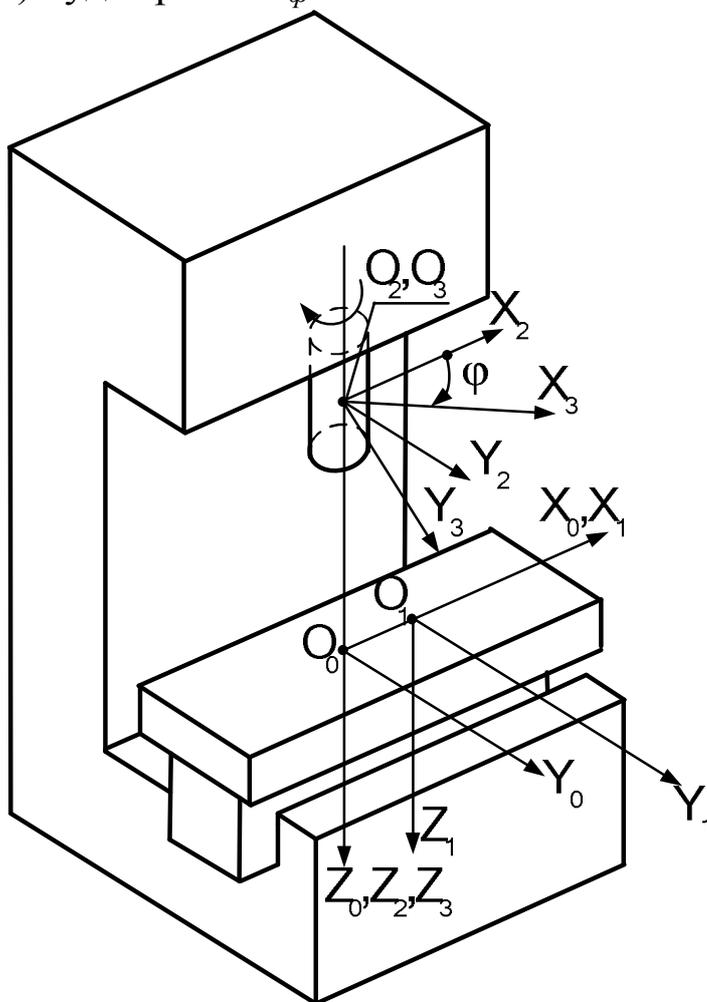


Рис. 3.3 – ФС вертикально-фрезерного станка:  $S_0$  – система координат обрабатываемой детали со столом;  $S_1$  – система координат продольных салазок;  $S_2$  – система координат станины;  $S_3$  – система координат шпинделя

Аналитическая зависимость, связывающая перемещение звеньев ФС с траекторией движения точек инструмента относительно обрабатываемой детали, называется функцией формообразования.

Для построения функции формообразования наиболее удобен математический аппарат преобразования координат. Основная особенность этого аппарата заключается в том, что любые

преобразования координат могут быть выражены с помощью одной математической операции умножения матриц.

В таблице 3.1 представлены матрицы обобщенных перемещений, моделирующие движения относительно осей.

Таблица 3.1

**Матрицы обобщенных перемещений**

Вид движения	Матрицы, моделирующие движение относительно оси		
	X	Y	Z
Поступательное вдоль оси	$A^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Вращение вокруг оси	$A^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^5 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^6 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Примечание. $\varphi$ – угол поворота шпинделя относительно оси; $x, y, z$ – линейные смещения вдоль осей.			

Функция формообразования в общем виде [3]:

$$r_0 = A_{0,i+m} r^3, \quad (3.2)$$

где  $A_{0,i+m}$  – произведение  $i+m$  матриц  $A$  преобразований, из которых  $i$  входят в функцию формообразования,  $m$  – в модель инструмента;  $r^3$  – радиус-вектор формообразующих точек инструмента.

При обработке детали инструментом единственной точкой (например, резец на токарном станке)  $r^3$  является радиус-вектором начала координат:

$$r^3 = e^4 = (0, 0, 0, 1)^T,$$

где  $T$  – знак транспонирования.

При обработке детали на фрезерном станке концевой цилиндрической фрезой с прямолинейными зубьями:

$$r^3 = \begin{pmatrix} R \cos \varphi_j \\ R \sin \varphi_j \\ z \\ 1 \end{pmatrix},$$

где  $j = (1, \dots, n)$  – номер лезвия фрезы;  $n$  – число лезвий фрезы;  $\varphi_j$  – угол, определяющий положение лезвия на поверхности цилиндра фрезы и равный полярному углу точки  $A_j$   $j$ -го лезвия, лежащей в плоскости переднего торца фрезы, т.е. при  $z = 0$ :  $\varphi_j = \frac{2\pi j}{n}$ ;  $R$  – радиус фрезы;  $z$  – независимая переменная, имеющая смысл линейного смещения по оси  $OZ$  ( $0 \leq z \leq K$ ,  $K$  – длина фрезы).

Составленная модель ФС МРС позволяет получить наглядное представление положений номинальных и реальных поверхностей обрабатываемой детали. Например, результаты моделирования положений номинальной и реальной винтовых поверхностей, обработанных на токарном станке, при условиях:  $H = 2 \cdot 10^3$  мкм,  $\alpha = \pi/6$ ,  $R = 7917,5$  мкм,  $\rho = 8 \cdot 10^3 \dots 8,9 \cdot 10^3$  мкм ( $u = 165 \dots 1965$  мкм),  $\varphi = 0 \dots 5\pi$ , все малые углы поворотов вокруг осей равны  $30''$ , все малые абсолютные смещения вдоль осей равны  $0,1$  мкм, представлены на рисунке 3.4 (моделирование выполнено с помощью системы аналитических вычислений Maple).

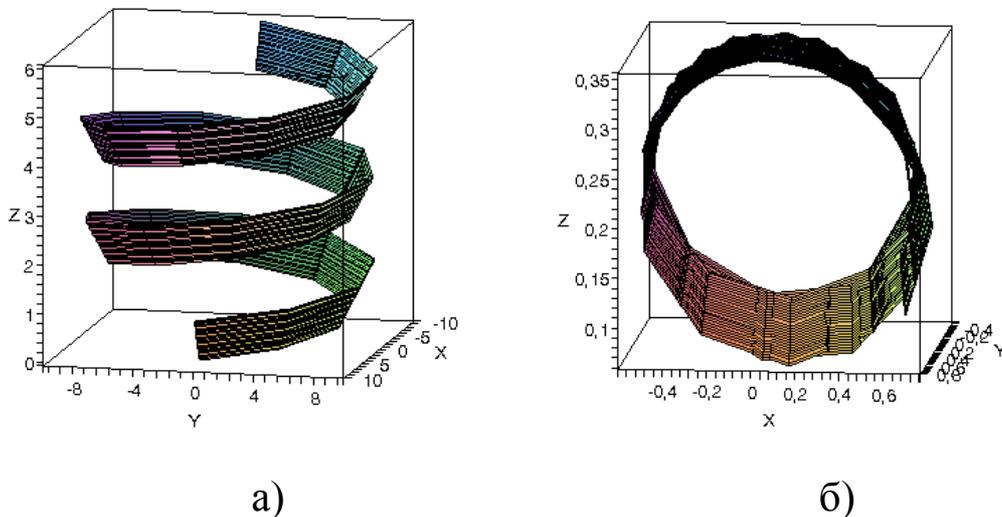


Рисунок 3.4 – Положения номинальной (а) и реальной (б) винтовых поверхностей

Таким образом, составление математических моделей формообразующих систем МРС позволяет не только наглядно представить положение поверхностей, но и дает возможность дальнейшего их изучения для диагностики МРС.

### ***Анализ возможностей формообразования поверхностей***

Для оценки точности станка необходимо иметь уравнения не только всех поверхностей, для обработки которых предназначен станок, но и всех технологических схем обработки, реализуемых на этом станке. Известно, что многие поверхности могут быть обработаны разными способами. Например, наружный прямой круговой цилиндр на токарном станке можно обработать точечным резцом с продольной подачей или линейным профильным резцом с поперечной подачей. Разнообразие схем обработки зависит от возможности варьирования типа режущего инструмента и комбинирования различных движений.

В правую часть уравнения (3.2) кроме произведения матриц преобразований входит радиус-вектор  $r^3$  точек режущего инструмента. Возможны 3 вида выражений для этого вектора, в зависимости от количества формообразующих точек инструмента: модель точечного инструмента, модель линейного инструмента и модель поверхностного инструмента.

В наиболее простом случае обработка ведется одной точкой инструмента (точечное формообразование) – вершиной острозаточенного резца (как рассматривалось выше, резец на токарном станке).

Для лезвийного инструмента  $r^3$  представляет собой векторную функцию независимой переменной  $u$ :

$$r^3 = r^3(u), \quad (3.3)$$

при этом независимая переменная  $u$  имеет свои граничные значения  $u_1, u_2$ .

Если инструмент многолезвийный, то уравнение (3.3) принимает вид:

$$r^3 = r^3(u, a_i), u_1 \leq u \leq u_2, i = 1, \dots, n, \quad (3.4)$$

где  $n$  – число режущих лезвий;  $a_i$  – параметр, определяющий одно из лезвий.

Пример многолезвийного инструмента – фреза на фрезерном станке (рассмотренная выше).

Модель поверхностного инструмента описывается векторно-параметрическим уравнением:

$$r^3 = r^3(u, v), u_1 \leq u \leq u_2, v_1 \leq v \leq v_2, \quad (3.5)$$

где  $u, v$  – криволинейные координаты точек поверхности инструмента. Обычно при проектировании инструмента (абразивного, накатного) стараются использовать простые поверхности (цилиндры, плоскости, конусы). Однако встречаются и более сложные поверхности – винтовые, фасонные, составные и т.д.

Функция формообразования (3.2) представляет собой уравнение обрабатываемой поверхности в том случае, когда оно содержит в правой части две независимые переменные и выполнено условие: произведение частных производных вектор-функции  $r(u, v)$  по обоим параметрам не равно нулю (т.е. к точке  $(u, v)$  обрабатываемой поверхности всегда можно провести нормаль). Так как обычно переменных в правой части уравнения (3.2) больше двух, то на них налагают связи различного вида.

Физическая природа связей может быть различна. Все  $L$  связей, имеющиеся в станке при обработке определенной поверхности, складываются из связей огибания  $L_{ог}$ , скрытых связей  $L_{ск}$  и функциональных связей  $L_{ф}$ .

**Связи огибания  $L_{ог}$ .** При обработке на МРС распространены случаи, когда обрабатываемая поверхность получается как огибающая семейства мгновенных положений режущих точек инструмента. Возникающие при этом связи между переменными называются связями огибания. Они органически свойственны схеме обработки и не требуют для своей реализации каких-либо настроечных узлов (пример – обработка фрезерным инструментом).

**Скрытые связи  $L_{ск}$ .** При дублировании одинаковых движений разными узлами станка или при совпадении огибающей семейства мгновенных положений поверхности инструмента с самой поверхностью образуются скрытые связи между обобщенными координатами ФС. Физически такая связь соответствует наличию «лишнего» движения, без которого процесс формообразования все равно был бы возможен (пример – обработка на плоскошлифовальном станке).

**Функциональные связи  $L_{ф}$ .** Эта группа связей позволяет изменять скорости или соотношение между скоростями узлов ФС, так как они реализуются либо с помощью аппаратных устройств, либо с помощью программных модулей в станках с ЧПУ.

Функциональные связи всегда могут быть представлены как в виде уравнения, включающего скорости движения звеньев, так и в виде уравнения связи между координатами этих движений.

Таким образом, анализ системы связей позволяет получить перечень всех обрабатываемых поверхностей, оценив, таким образом, спектр формообразующих возможностей ФС станка.

### **Составление и анализ балансов точности технологического оборудования**

Баланс точности станка в общем виде может быть представлен в виде [3]:

$$\Delta r_0 = \sum_{i=0}^l A_{0,i} \varepsilon_i r^3, \quad (3.6)$$

где  $\varepsilon_i$  – матрицы поворотов и переносов (смещений) по осям координат, имеют вид:

$$\varepsilon_i = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_i & \beta_i & \delta x_i \\ \gamma_i & 0 & -\alpha_i & \delta y_i \\ -\beta_i & \alpha_i & 0 & \delta z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, i = 0 \dots n, ,$$

где  $n$  – количество узлов ФС;  $\alpha_i$  – малые углы поворота вокруг оси  $OX$  узлов ФС;  $\beta_i$  – то же, вокруг оси  $OY$ ;  $\gamma_i$  – то же, вокруг оси  $OZ$ ;  $\delta x_i$  – малые абсолютные смещения по оси  $OX$  узлов ФС;  $\delta y_i$  – то же, по оси  $OY$ ;  $\delta z_i$  – то же, по оси  $OZ$ .

Задача расчета баланса точности станка решается при наличии полной информации обо всех значениях входных погрешностей. Но обратная ей задача дает лучшую оценку параметров геометрической точности станка с целью выбора вида входного параметра и его величины, обеспечивающей компенсацию известной выходной погрешности.

Пусть требуется оценить параметры геометрической точности станка  $\delta q_i$ , если известен результат  $n$ -кратного измерения величины  $\Delta(u,v)$  поверхности не менее чем в  $m$  точках:

$$\Delta_n = \Delta(u_n, v_n) = a_{n1} \delta q_1 + a_{n2} \delta q_2 + \dots + a_{nm} \delta q_m, \quad (3.7)$$

где  $a_{ki} = a_{ki}(u_k, v_k)$  – передаточные коэффициенты погрешностей.

Решение системы уравнений (3.7) осуществляется с помощью метода наименьших квадратов (МНК):

$$\delta = (A^T A)^{-1} A^T \Delta, \quad (3.8)$$

где  $\delta$  – вектор оцениваемых параметров геометрической точности станка  $\delta q_i$ ;  $A$  – конструкционная матрица порядка  $n \times m$ , составленная из коэффициентов системы (3.7);  $\Delta$  – вектор порядка  $n$ , составленный из результатов измерений величин  $\Delta(u, v)$  поверхности детали.

Любое уравнение баланса  $\Delta r_n = \Delta(u, v)$  нормальных погрешностей содержит 4 вида составляющих:

- 1) сумма погрешностей  $\sum \text{погр}$ ;
- 2) произведение  $\sum \text{погр} \times f(u)$ ;
- 3) произведение  $\sum \text{погр} \times f(v)$ ;
- 4) произведение  $\sum \text{погр} \times f(u) \times f(v)$ .

Задача нахождения значения каждого из  $b \cdot k$  параметров полного вектора геометрических погрешностей ФС станка  $r_{\text{пол}} = \{\alpha_0, \beta_0, \gamma_0, \delta x_0, \delta y_0, \delta z_0, \dots, \delta z_k\}$ , где  $k$  – количество узлов ФС является сложной технической задачей.

Известные балансы геометрических погрешностей станков при обработке ими поверхностей позволяют сделать вывод о влиянии каждой из погрешностей формообразующего узла станка на геометрические погрешности обработанных поверхностей. Определив общее число параметров геометрической точности станка, появляется возможность выявления всех обрабатываемых на станке поверхностей, необходимых для установления значений всех параметров геометрической точности станка.

### ***Диагностика технологических комплексов по результатам обработки деталей***

Одним из результатов технической диагностики станков является определение величины каждой из составляющих геометрической точности станка.

Программное обеспечение (ПО), разработанное в системе аналитических вычислений Maple (работы [4,5]), предназначено для автоматизации процесса диагностики МРС при обработке ими

различных видов поверхностей и позволяет рассчитывать балансы точности, выходную точность станков и погрешности их узлов при известных выходных погрешностях обрабатываемых поверхностей.

После анализа уравнений балансов точности МРС, появляется возможность восстановления геометрической точности МРС: при ремонте или регулировке узлов станка – шпиндельного узла, направляющих продольного и поперечного суппортов (возможно, будет достаточно выполнить переустановку и закрепление заготовки или поднастройку на размер). Например, если величина погрешности обработки торцевой поверхности на токарном станке превышает значение допуска, то восстановление первоначальной геометрической точности токарного станка возможно посредством ремонта узлов станка – шпиндельного, продольного и поперечного суппортов.

#### **4 Варианты заданий**

По данным таблиц 4.1 и 4.2 с помощью программной среды Maple:

##### **1) составить:**

– модель формообразующей системы металлорежущего станка;

– балансы точности металлорежущего станка при обработке им указанной поверхности;

##### **2) изобразить** положения номинальной и реальной поверхностей;

##### **3) проанализировать:**

– возможности формообразования поверхностей на металлорежущем станке;

– балансы точности металлорежущего станка;

##### **4) провести диагностику металлорежущего станка.**

Измерения значений отклонений поверхностей от номинального размера производятся в двух сечениях по 8 равноудаленных точек в каждом для плоского торца и цилиндра; в 16 точках поверхностей шпоночного паза. Движение фрезы происходит по (П) и против (ПР) часовой стрелке.

Таблица 4.1

**Варианты заданий**

№ вар.	Станок	Обрабатываемая поверхность	Функциональные связи	Условия
1	Токарный	Плоский торец	$z=c$	$c = 10^4$ мкм, $x = 0..2 \cdot 10^4$ мкм, $\varphi = 0..2\pi$
2	Фрезерный (П)	Поверхность дна шпоночного паза	$y=0$	$R=10^4$ мкм, $z=10^5$ мкм, $i=1$ , $n=9$ , $x=0..10^5$ мкм, $y_j=-10^4..10^4$ мкм
3	Токарный	Цилиндр прямой круговой	$x=R$	$R=5 \cdot 10^4$ мкм, $z = 0..10^5$ мкм, $\varphi = 0..2\pi$
4	Фрезерный (ПР)	Поверхность дна шпоночного паза	$y=0$	$R=10^4$ мкм, $z=10^5$ мкм, $i=1$ , $n=9$ , $x=0..10^5$ мкм, $y_j=-10^4..10^4$ мкм
5	Токарный	Плоский торец	$z=c$	$c = 10^6$ мкм, $x = 0..2 \cdot 10^6$ мкм, $\varphi = 0..2\pi$
6	Фрезерный (П)	Поверхность дна шпоночного паза	$x=y$	$R=10^5$ мкм, $z=10^6$ мкм, $i=1$ , $n=6$ , $x=0..10^6$ мкм, $y=0..10^6$ мкм, $x_j=-10^5..10^5$ мкм, $y_j=-10^5..10^5$ мкм
7	Токарный	Цилиндр прямой круговой	$x=R$	$R=7 \cdot 10^4$ мкм, $z = 0..10^6$ мкм, $\varphi = 0..2\pi$
8	Фрезерный (ПР)	Поверхность дна шпоночного паза	$x=0$	$R=10^4$ мкм, $z=10^6$ мкм, $i=1$ , $n=6$ , $y=0..10^6$ мкм, $x_j=-10^4..10^4$ мкм
9	Токарный	Плоский торец	$z=c$	$c = 10^5$ мкм, $x = 0..2 \cdot 10^5$ мкм, $\varphi = 0..2\pi$
10	Фрезерный (П)	Поверхность дна шпоночного паза	$x=0$	$R=10^4$ мкм, $z=10^5$ мкм, $i=1$ , $n=9$ , $y=0..10^5$ мкм, $x_j=-10^4..10^4$ мкм

Примечание.  $c$  – расстояние от начала координат до плоского торца;  $R$  – радиус фрезы (цилиндра);  $i$  – номер лезвия фрезы;  $n$  – количество лезвий фрезы; движение фрезы происходит по часовой стрелке.

Таблица 4.2

**Измеренные значения для диагностики**

№ вар.	Обрабатываемая поверхность	Измеренные значения
1	Плоский торец	(0.1, 0.4, 0.3, 0.1, 0.2, 0.1, 0.2, 0.2) – 1-ое сечение; (0.2, 0.1, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.5, 0.5) – 2-ое сечение
2	Поверхность дна шпоночного паза	(0.3, 0.4, 0.2, 0.5, 0.1, 0.5, 0.6, 0.4, 0.4, 0.4, 0.3, 0.5, 0.2, 0.1, 0.3, 0.2)
3	Цилиндр прямой круговой	(0.2, 0.2, 0.5, 0.3, 0.4, 0.1, 0.3, 0.4) – 1-ое сечение; (0.5, 0.1, 0.3, 0.5, 0.6, 0.5, 0.5, 0.4) – 2-ое сечение
4	Плоская боковая поверхность шпоночного паза	(0.2, 0.1, 0.2, 0.1, 0.3, 0.5, 0.2, 0.4, 0.2, 0.5, 0.3, 0.3, 0.5, 0.1, 0.5, 0.3)
5	Плоский торец	(0.3, 0.3, 0.4, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.2) – 1-ое сечение; (0.6, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.5, 0.1, 0.3) – 2-ое сечение
6	Поверхность дна шпоночного паза	(0.1, 0.2, 0.1, 0.3, 0.1, 0.2, 0.1, 0.4, 0.1, 0.2, 0.1, 0.3, 0.1, 0.4, 0.1, 0.2)
7	Цилиндр прямой круговой	(0.1, 0.2, 0.4, 0.3, 0.5, 0.6, 0.4, 0.1) – 1-ое сечение; (0.4, 0.3, 0.1, 0.2, 0.5, 0.5, 0.5, 0.6) – 2-ое сечение
8	Поверхность дна шпоночного паза	(0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.2, 0.5, 0.1, 0.3, 0.5, 0.2, 0.1, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.1)
9	Плоский торец	(0.1, 0.2, 0.2, 0.3, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2) – 1-ое сечение; (0.1, 0.1, 0.4, 0.3, 0.1, 0.6, 0.2, 0.3) – 2-ое сечение
10	Плоская боковая поверхность шпоночного паза	(0.2, 0.1, 0.3, 0.4, 0.2, 0.1, 0.5, 0.3, 0.2, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.1, 0.2, 0.4)

**5 Пример решения варианта задания**

По приведенным данным таблицы 5.1 с помощью программной среды Maple:

**1) составить:**

– модель формообразующей системы металлорежущего станка;

– баланс точности металлорежущего станка при обработке им указанной поверхности;

**2) изобразить** положения номинальной и реальной поверхностей;

**3) проанализировать** баланс точности металлорежущего станка;

**4) провести диагностику металлорежущего станка.**

Измерения значений отклонений поверхностей от номинального размера производятся в двух сечениях по 8 равноудаленных точек в каждом для плоского торца и цилиндра; в 16 точках поверхностей шпоночного паза.

Таблица 5.1

**Варианты заданий**

№	Станок	Обрабатываемая поверхность	Связи	Условия	Измеренные значения
1	Токарный	Плоский торец	$z=c$	$c = 10^6$ мкм, $x = 0..3 \cdot 10^6$ мкм, $\varphi = 0..2\pi$	(0.2, 0.3, 0.4, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.1) – 1-ое сечение; (0.1, 0.2, 0.4, 0.3, 0.1, 0.1, 0.3, 0.4) – 2-ое сечение
2	Фрезерный (П)	Поверхность дна шпоночного паза	$y=0$	$R=10^7$ мкм, $z=10^8$ мкм, $i=1$ , $n=10$ , $x=0..10^8$ мкм, $y_j=-20^7..20^7$ мкм	(0.1, 0.3, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.3, 0.3, 0.2, 0.1, 0.3, 0.4, 0.2, 0.3, 0.4)

**Вариант 1.** Фрагмент текста программы, моделирующей ФС токарного станка при обработке им поверхности плоского торца, составленную по (3.2) с помощью программной среды Maple, представлен в таблице 5.2.

Таблица 5.2

**Фрагмент текста программы моделирования ФС  
токарного станка**

Строки программы	Пояснения
<code>&gt; restart: with (linalg): with (plots):with(plottools):</code>	Очистка рабочей памяти; добавление графических пакетов и пакета «Линейная алгебра»
<code>&gt; A1:=matrix(4,4,[1,0,0,x,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1]);</code> <code>&gt; A3:=matrix(4,4,[1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,z,0,0,0,1]);</code> <code>&gt; A6:=matrix(4,4,[cos(f),-</code> <code>sin(f),0,0,sin(f),cos(f),0,0,0,0,1,0,0,0,0,1]);</code> <code>&gt; e4:=matrix(4,1,[0,0,0,1]);</code> <code>eps0:=matrix(4,4,[0,-gamma0,beta0,deltax0, gamma0, 0,</code> <code>-alpha0,deltay0,-beta0, alpha0,0,deltaz0,0,0,0,0]);</code> <code>eps1:=matrix(4,4,[0,-gamma1,beta1,deltax1,gamma1,0,</code> <code>-alpha1, deltay1,-beta1, alpha1,0,deltaz1,0,0,0, 0]);</code> <code>eps2:=matrix(4,4,[0,-gamma2,beta2, deltax2,gamma2, 0,</code> <code>-alpha2,deltay2,-beta2, alpha2, 0,deltaz2,0,0,0,0]);</code> <code>eps3:=matrix(4,4, [0,-gamma3,beta3,deltax3,gamma3, 0,</code> <code>-alpha3,deltay3, -beta3, alpha3,0,deltaz3, 0, 0, 0, 0]);</code>	Задание матриц обобщенных перемещений узлов ФС станка, матриц поворотов и переносов (смещений) по осям координат

## Продолжение табл.5.2

Строки программы	Пояснения
<code>&gt; r011:=multiply(A6,A3,A1,e4);</code>	Перемножение матриц, ФС станка
<code>&gt; r02:=eval(r011,z=c);</code>	Налагаем функциональную связь $z=c$ для получения уравнения торцевой поверхности
<code>&gt; r002:=eval(r02,c=10^6);</code> <code>plot3d([r002[1,1],r002[2,1],r002[3,1]], f=0..2*Pi, x=0..3*10^6);</code>	В полученный результат подставляем габаритные параметры детали с торцевой поверхностью: $c = 10^6$ мкм. Строим номинальную поверхность плоского торца при условиях: $x = 0..3 \cdot 10^6$ мкм, $\varphi = 0..2\pi$ .
<code>&gt; Deltar02:=evalm(multiply(eps0,A6,A3,A1,e4)+</code> <code>multiply(A6,eps1,A3,A1,e4) + multiply(A6,A3,eps2,A1,e4)+</code> <code>multiply(A6,A3,A1,eps3,e4));</code>	Строим векторный баланс точности торцевой поверхности
<code>&gt; Deltar002:=eval(Deltar02,[z=10^6,gamma0=Pi/10800,</code> <code>beta0=Pi/10800,deltax0=5,gamma1=Pi/10800,</code> <code>beta1=Pi/10800,alpha1=Pi/10800,deltax1=5,deltay1=5,</code> <code>gamma2=Pi/10800,deltax2=5,deltay2=5,deltax3=5,deltay3=5,</code> <code>alpha0=Pi/10800,deltay0=5,deltaz0=5,deltaz1=5,deltaz2=5,</code> <code>deltaz3=5,beta2=Pi/10800]);</code> <code>plot3d([Deltar002[1,1],Deltar002[2,1],Deltar002[3,1]],</code> <code>f=0..2*Pi,x=0..3*10^6);</code>	В полученный результат подставляем габаритные параметры детали с торцевой поверхностью, а также все погрешности (малые углы поворотов = 0,0003 рад, малые смещения = 5 мкм). Строим реальную поверхность плоского торца
<code>&gt; drt1:=diff(r02[1,1],x); drt2:=diff(r02[2,1],x);</code> <code>drt3:=diff(r02[3,1],x); drtr0:=vector([drt1,drt2,drt3]);</code> <code>drt4:=diff(r02[1,1],f); drt5:=diff(r02[2,1],f); drt6:=diff(r02[3,1],f);</code> <code>drtf:=vector([drt4,drt5,drt6]);</code> <code>&gt;Nt:=crossprod(drtr0,drtf);</code> <code>modNt:=simplify(sqrt(Nt[1]^2+Nt[2]^2+Nt[3]^2));</code> <code>nt1:=Nt[1]/modNt; nt2:=Nt[2]/modNt;</code> <code>nt3:=simplify(Nt[3]/modNt);</code> <code>&gt; nt:=vector([nt1,nt2,nt3]);</code>	Находим уравнение нормали к торцевой поверхности

## Продолжение табл.5.2

Строки программы	Пояснения
<pre>&gt; bt1:=Deltar02[1,1]*nt[1];bt2:=Deltar02[2,1]*nt[2]; bt3:=Deltar02[3,1]*nt[3]; &gt; balanst:=evalf(bt1+bt2+bt3);</pre>	Находим баланс погрешностей станка при обработке торцовой поверхности
<pre>&gt; Deltat:=matrix(16,1,[ 0.2, 0.3, 0.4, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.1, 0.1, 0.2, 0.4, 0.3, 0.1, 0.1, 0.3, 0.4]);</pre>	Строим матрицу результатов измерений торцовой поверхности Deltait
<pre>&gt; At:=matrix(16,4,[x1*sin(f1), -x1*cos(f1), -x1, 1, x2*sin(f2), -x2*cos(f2), -x2, 1, x3*sin(f3), -x3*cos(f3), -x3, 1, x4*sin(f4), -x4*cos(f4), -x4, 1, x5*sin(f5), -x5*cos(f5), -x5, 1, x6*sin(f6), -x6*cos(f6), -x6, 1, x7*sin(f7), -x7*cos(f7), -x7, 1, x8*sin(f8), -x8*cos(f8), -x8, 1, x9*sin(f9), -x9*cos(f9), -x9, 1, x10*sin(f10), -x10*cos(f10), -x10, 1, x11*sin(f11), -x11*cos(f11), -x11, 1, x12*sin(f12), -x12*cos(f12), -x12, 1, x13*sin(f13), -x13*cos(f13), -x13, 1, x14*sin(f14), -x14*cos(f14), -x14, 1, x15*sin(f15), -x15*cos(f15), -x15, 1, x16*sin(f16), -x16*cos(f16), -x16, 1]);</pre>	Строим конструкционную матрицу для баланса погрешностей станка при обработке торцовой поверхности
<pre>&gt; ATt:=transpose(At); &gt; ATtAt:=multiply(ATt,At); &gt; ATtV:=eval(ATt,[f1=0, f2=Pi/4, f3=Pi/2, f4=3*Pi/4, f5=Pi, f6=5*Pi/4, f7=3*Pi/2, f8=7*Pi/4, f9=0, f10=Pi/4, f11=Pi/2, f12=3*Pi/4, f13=Pi, f14=5*Pi/4, f15=3*Pi/2, f16=7*Pi/4, x1=x1, x2=x1, x3=x1, x4=x1, x5=x1, x6=x1, x7=x1, x8=x1, x9=x2, x10=x2, x11=x2, x12=x2, x13=x2, x14=x2, x15=x2, x16=x2]);</pre>	Преобразование матрицы At. Подстановка значений переменных $f_i$ и $x_i$ , при которых производятся измерения величин Deltait. Значения $x_1$ и $x_2$ задаются студентами, причем $0 < x_1 < x_2 < R$

## Окончание табл.5.2

Строки программы	Пояснения
<pre>&gt; ATtAtV:=eval(ATtAt,[ f1=0, f2=Pi/4, f3=Pi/2, f4=3*Pi/4, f5=Pi, f6=5*Pi/4, f7=3*Pi/2, f8=7*Pi/4, f9=0, f10=Pi/4, f11=Pi/2, f12=3*Pi/4, f13=Pi, f14=5*Pi/4, f15=3*Pi/2, f16=7*Pi/4, x1=x1, x2=x1, x3=x1, x4=x1, x5=x1, x6=x1, x7=x1, x8=x1, x9=x2, x10=x2, x11=x2, x12=x2, x13=x2, x14=x2, x15=x2, x16=x2]); &gt; INVt:=inverse(ATtAtV); &gt; INVtATV:=multiply(INVt,ATtAtV); &gt; deltAt:=multiply(INVtATV,DeltAt);</pre>	<p>Преобразование матриц, определение параметров геометрической точности токарного станка: 1 строка – значение отклонения станка <math>\alpha_0</math>, 2 строка – значение отклонения станка <math>\beta_0</math>, 3 строка – значение отклонения станка <math>\beta_1 + \beta_2</math>, 4 строка – значение отклонения станка <math>\delta z = \delta z_0 + \delta z_1 + \delta z_2 + \delta z_3</math></p>

1) Модель формообразующей системы токарного станка имеет вид:

$$r_{011} := \begin{bmatrix} \cos(f) x \\ \sin(f) x \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Баланс точности токарного станка при обработке им поверхности плоского торца имеет вид:

$$\text{balanst} := ((-1 \cdot \beta_0 \cos(f) + \alpha_0 \sin(f)) x + \text{deltaz}_0 - 1 \cdot \beta_1 x + \text{deltaz}_1 - 1 \cdot \beta_2 x + \text{deltaz}_2 + \text{deltaz}_3) \text{csgn}(x)$$

2) Положения номинальной и реальной поверхностей представлены на рисунке 5.1.

3) Полученное уравнение баланса точности токарного станка при обработке на нем поверхности плоского торца позволяет определить параметры геометрической точности станка, влияющие на обработку торцевой поверхности:  $\{\alpha_0, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \delta z_0, \delta z_1, \delta z_2, \delta z_3\}$ , т.е. 8 параметров из 24-х.

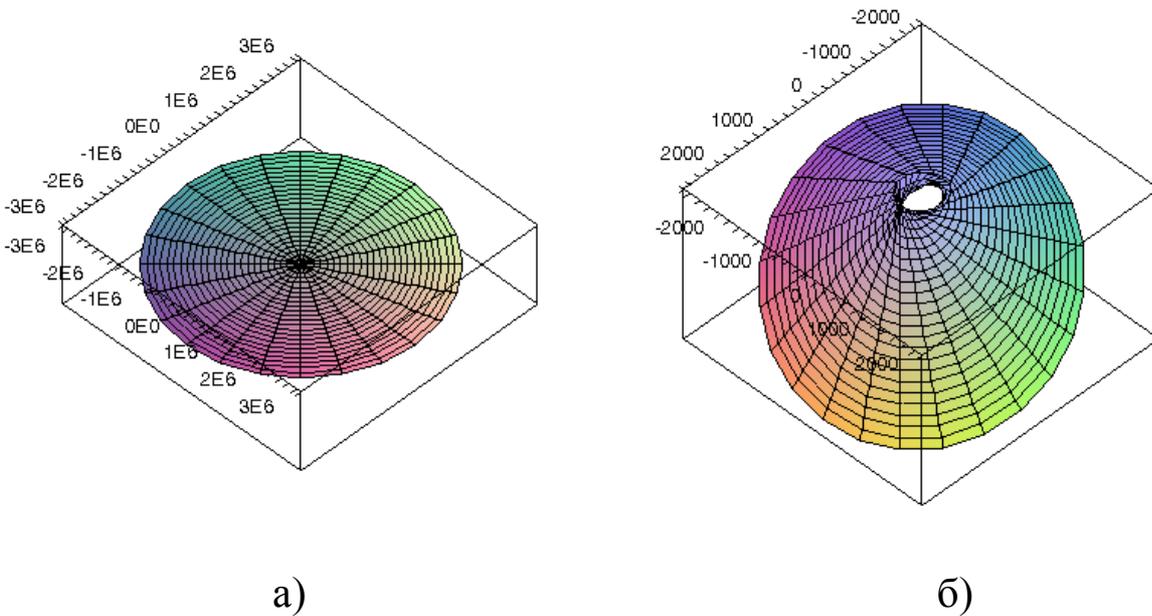


Рисунок 5.1 – Положения номинальной (а) и реальной (б) поверхностей плоского торца (при заданных условиях, малые углы поворотов = 0,0003 рад, малые смещения = 5 мкм)

При этом в ходе определения всех составляющих геометрической точности возникают трудности с однозначным определением значений каждого из отклонений в сумме  $\sum_{i=0}^3 \delta_{zi}$ .

Таким образом, для их определения рекомендуется построить баланс точности токарного станка при обработке на нем поверхностей других видов (например, цилиндрической, конической и т.д.).

4) Полученные значения параметров геометрической точности токарного станка при обработке на нем поверхности плоского торца позволяют сделать вывод: геометрическую точность токарного станка можно восстановить при ремонте или регулировке соответствующих узлов станка:

- регулировка или замена подшипников шпиндельного узла для уменьшения величины углового биения шпинделя для уменьшения величин  $\alpha_0$  и  $\beta_0$  на ... и ... радиан соответственно;
- ремонт направляющих продольного суппорта для уменьшения величины  $\beta_1$  на ... радиан;

– ремонт направляющих поперечного суппорта для уменьшения величины  $\beta_2$  на ... радиан.

Погрешность  $\sum_{i=0}^3 \delta_{zi}$  можно компенсировать путем настройки или поднастройки на размер на ... мкм.

**Вариант 2.** Фрагмент текста программы, моделирующей ФС вертикально-фрезерного станка при обработке им поверхности дна шпоночного паза, составленную по (3.2) с помощью программной среды Maple, представлен в таблице 5.3.

Таблица 5.3

**Фрагмент текста программы моделирования ФС  
фрезерного станка**

Строки программы	Пояснения
> restart: with (linalg): with (plots):with(plottools):	Очистка рабочей памяти; добавление графических пакетов и пакета «Линейная алгебра»
> A1:=matrix(4,4,[1,0,0,x,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1]); > A2:=matrix(4,4,[1,0,0,0,0,1,0,y,0,0,1,0,0,0,0,1]); > A6:=matrix(4,4,[cos(f),- sin(f),0,0,sin(f),cos(f),0,0,0,0,1,0,0,0,0,1]); > e4:=matrix(4,1,[R*cos(phi[i]),R*sin(phi[i]),z,1]); eps0:=matrix(4,4,[0,-gamma0,beta0,deltax0,gamma0,0,- alpha0,deltay0,-beta0, alpha0, 0, deltaz0, 0,0,0, 0]); eps1:=matrix(4,4,[0,-gamma1,beta1,deltax1,gamma1, 0,- alpha1,deltay1,-beta1, alpha1,0,deltaz1,0,0,0,0]); eps2:=matrix(4,4,[0,-gamma2, beta2,deltax2,gamma2,0,- alpha2,deltay2,-beta2,alpha2,0,deltaz2,0,0,0,0]); eps3:=matrix(4,4,[0,-gamma3, beta3,deltax3,gamma3,0,- alpha3,deltay3,-beta3, alpha3,0,deltaz3,0,0,0,0]);	Задание матриц обобщенных перемещений узлов ФС станка, матриц поворотов и переносов (смещений) по осям координат

Продолжение табл. 5.3

Строки программы	Пояснения
<pre>&gt; r00:=multiply(A1,A2,A6,e4); r0:=eval(r00,y=0); Deltar00:=evalm(multiply(eps0,A1,A2,A6,e4)+multiply(A1,eps1 ,A2,A6,e4)+multiply(A1,A2,eps2,A6,e4)+ multiply(A1,A2,A6,eps3,e4)); Deltar0:=eval(Deltar00,y=0); r003:=eval(r03,[R=10^7,i=1,n=10,z=10^8]); plot3d([r003[1,1],r003[2,1],r003[3,1]],w=- 10^7..10^7,x=0..10^8);</pre>	<p>Построение номинальной поверхности дна шпоночного паза. Налагание функциональной связи <math>y=0</math></p>
<pre>&gt;n:=n; phi[i]:=2*Pi*i/n;</pre>	<p>Задание количества <math>n</math> лезвий фрезы, угла поворота фрезы</p>
<pre>&gt; r03:=eval(r0,f=2*Pi-arcsin(w/R));</pre>	<p>Задание условия движения фрезы по часовой стрелке, <math>w=y_j</math></p>
<pre>&gt; dr10:=diff(r03[1,1],w); dr11:=diff(r03[2,1],w); dr12:=diff(r03[3,1],w); drdw1:=vector([dr10,dr11,dr12]);dr13:=diff(r03[1,1],x); dr14:=diff(r03[2,1],x); dr15:=diff(r03[3,1],x); drdx1:=vector([dr13,dr14,dr15]); N1:=crossprod(drdw1,drdx1); modN1:=simplify(sqrt(N1[1]^2+N1[2]^2+ N1[3]^2)); n11:=N1[1]/modN1; n21:=N1[2]/modN1; n31:=simplify(N1[3]/modN1); nor1:=vector([n11,n21,n31]);</pre>	<p>Определение вектора нормали ко дну паза</p>
<pre>&gt; Deltar01:=eval(Deltar0,f=2*Pi-arcsin(w/R)); &gt; b4:=Deltar01[1,1]*nor1[1]; b5:=Deltar01[2,1]*nor1[2]; b6:=Deltar01[3,1]*nor1[3]; Deltar001:=eval(Deltar01,[R=10^7,i=1,n=10,z=10^8, gamma0=Pi/10800,beta0=Pi/10800,deltax0=5, gamma1=Pi/10800, beta1=Pi/10800,alpha1=Pi/10800, deltax1=5, deltay1=5, gamma2=Pi/10800,deltax2=5,deltay2=5, deltax3=5, deltay3=5, alpha0=Pi/10800,deltay0=5,deltaz0=5, deltaz1=5, deltaz2=5, deltaz3=5,beta2=Pi/10800, alpha2=Pi/10800, alpha3=Pi/10800,beta3=Pi/10800, gamma3=Pi/10800]); plot3d([Deltar001[1,1], Deltar001[2,1], Deltar001[3,1]], w=-10^7..10^7,x=0..10^8);</pre>	<p>Построение реальной поверхности дна шпоночного паза при условии, что малые углы поворотов = 0,0003 рад (<math>0^01'</math>), малые смещения = 5 мкм</p>

## Продолжение табл. 5.3

Строки программы	Пояснения
> balans_dna1:=b4+b5+b6;	Построение баланса точности вертикально-фрезерного станка при обработке им поверхности дна шпоночного паза
> Delta_3:=matrix(16,1,[0.1, 0.3, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.3, 0.3, 0.2, 0.1, 0.3, 0.4, 0.2, 0.3, 0.4]);	Матрица значений измеренных отклонений дна паза
> A33:=matrix(16,4,[-w1*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w1^2)*sin(2*Pi*i/n), -w1* sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w1^2)*cos(2*Pi*i/n),-x1,1, -w2*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w2^2)*sin(2*Pi*i/n), -w2*sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w2^2)*cos(2*Pi*i/n),-x2,1, -w3* cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w3^2)*sin(2*Pi*i/n), -w3*sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w3^2)* cos(2*Pi*i/n),-x3,1, -w4*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w4^2)*sin(2*Pi*i/n),	Строим конструкционную матрицу для баланса погрешностей станка при обработке поверхности дна шпоночного паза
-w4* sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w4^2)*cos(2*Pi*i/n),-x4,1, -w5*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w5^2)*sin(2*Pi*i/n), -w5*sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w5^2)*cos(2*Pi*i/n),-x5,1, -w6* cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w6^2)*sin(2*Pi*i/n), -w6*sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w6^2)* cos(2*Pi*i/n),-x6,1, -w7*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w7^2)*sin(2*Pi*i/n), -w7* sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w7^2)*cos(2*Pi*i/n),-x7,1, -w8*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w8^2)*sin(2*Pi*i/n), -w8*sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w8^2)*cos(2*Pi*i/n),-x8,1, -w9*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w9^2)*sin(2*Pi*i/n), -w9* sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w9^2)*cos(2*Pi*i/n),-x9,1, -w10*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w10^2)*sin(2*Pi*i/n), -w10* sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w10^2)*cos(2*Pi*i/n),-x10,1, -w11*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w11^2)*sin(2*Pi*i/n), -w11* sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w11^2)*cos(2*Pi*i/n),-x11,1, -w12*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w12^2)*sin(2*Pi*i/n), -w12* sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w12^2)*cos(2*Pi*i/n),-x12,1,	

Окончание табл. 5.3

Строки программы	Пояснения
<pre>-w13*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w13^2)*sin(2*Pi*i/n), -w13* sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w13^2)*cos(2*Pi*i/n),-x13,1, -w14*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w14^2)*sin(2*Pi*i/n), -w14* sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w14^2)*cos(2*Pi*i/n),-x14,1, -w15*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w15^2)*sin(2*Pi*i/n), -w15* sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w15^2)*cos(2*Pi*i/n),-x15,1, -w16*cos(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w16^2)*sin(2*Pi*i/n), -w16* sin(2*Pi*i/n)-sqrt(R^2-w16^2)*cos(2*Pi*i/n),-x16,1]);</pre>	
<pre>A3:=eval(A33,[j=1,n=10,R=10^7,w1=1000,w2=2000,w3=3000, w4=4000, w5=5000,w6=6000,w7=7000,w8=8000, w9=9000, w10=10000,w11=11000,w12=12000, w13=13000, w14=14000,w15=15000,w16=16000,x1=10000,x2=20000, x3=30000, x4=40000,x5=50000,x6=60000,x7=70000, x8=80000, x9=10000,x10=20000,x11=30000, x12=40000, x13=50000,x14=60000,x15=70000,x16=80000]);</pre>	<p>Подстановка значений переменных <math>w_i</math> и <math>x_i</math>, при которых производятся измерения величин матрицы <math>\Delta_3</math> (могут выбираться студентом самостоятельно)</p>
<pre>&gt; A3T:=transpose(A3); &gt; A3TA3:=multiply(A3T,A3); &gt; iA3TA3:=inverse(A3TA3);</pre>	<p>Преобразование, перемножение матриц</p>
<pre>&gt; rez_3:=multiply(iA3TA3,A3T,Delta_3); &gt; res_3_1:=evalf(rez_3[1,1]); &gt; res_3_2:=evalf(rez_3[2,1]); &gt; res_3_3:=evalf(rez_3[3,1]); &gt; res_3_4:=evalf(rez_3[4,1]);</pre>	<p>Определение параметров геометрической точности вертикально-фрезерного станка:  <math>res\_3\_1</math> – значение <math>(\alpha_0+\alpha_1+\alpha_2)</math>, <math>res\_3\_2</math> – значение <math>(\beta_0+\beta_1+\beta_2)</math>,  <math>res\_3\_3</math> – значение <math>\beta_0</math>,  <math>res\_3\_4</math> – значение <math>-\alpha_3*R*\sin(2*Pi*i/n)-\beta_3*R*\cos(2*Pi*i/n)+(\delta z_0+\delta z_1+\delta z_2+\delta z_3)</math></p>

1) Модель формообразующей системы вертикально-фрезерного станка имеет вид:

$$r_{00} := \begin{bmatrix} \cos(f) R \cos\left(\frac{2 \pi i}{n}\right) - \sin(f) R \sin\left(\frac{2 \pi i}{n}\right) + x \\ \sin(f) R \cos\left(\frac{2 \pi i}{n}\right) + \cos(f) R \sin\left(\frac{2 \pi i}{n}\right) + y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

При функциональной связи  $y=0$ , модель ФС имеет вид:

$$r_0 := \begin{bmatrix} \cos(f) R \cos\left(\frac{2 \pi i}{n}\right) - \sin(f) R \sin\left(\frac{2 \pi i}{n}\right) + x \\ \sin(f) R \cos\left(\frac{2 \pi i}{n}\right) + \cos(f) R \sin\left(\frac{2 \pi i}{n}\right) \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Баланс точности вертикально-фрезерного станка при обработке им поверхности дна шпоночного паза при данном виде связи и движении фрезы по часовой стрелке имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{bal1} = & -(\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2) * (w * \cos(2 * \text{Pi} * i / n) - \sqrt{R^2 - w^2} * \sin(2 * \text{Pi} * i / n)) - \\ & (\beta_0 + \beta_1 + \beta_2) * (w * \sin(2 * \text{Pi} * i / n) + \sqrt{R^2 - w^2} * \cos(2 * \text{Pi} * i / n)) - \beta_0 * x + \alpha_3 * R * \sin(2 * \text{Pi} * i / n) - \\ & \beta_3 * R * \cos(2 * \text{Pi} * i / n) + (\delta z_0 + \delta z_1 + \delta z_2 + \delta z_3); \end{aligned}$$

2) Положения номинальной и реальной поверхностей дна шпоночного паза представлены на рисунке 5.2.

3) Полученное уравнение баланса точности вертикально-фрезерного станка при обработке на нем поверхности дна шпоночного паза концевой цилиндрической фрезой с 10-ю лезвиями, движущейся по часовой стрелке, позволяет определить

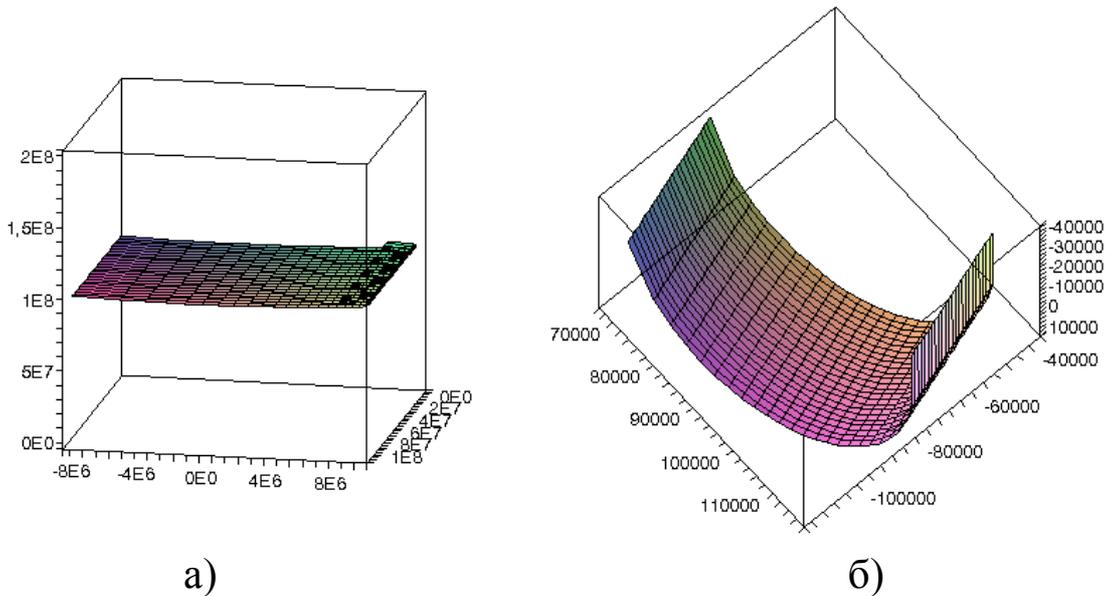


Рисунок 5.2 – Положения номинальной (а) и реальной (б) поверхностей дна шпоночного паза

параметры геометрической точности станка, влияющие на обработку поверхности дна шпоночного паза:  $\{\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \delta z_0, \delta z_1, \delta z_2, \delta z_3\}$ , т.е. 12 параметров из 24-х.

При этом в ходе определения всех составляющих геометрической точности возникают трудности с однозначным

определением значений каждого из отклонений в суммах  $\sum_{i=0}^2 \alpha_i$ ,  $\sum_{i=0}^2 \beta_i$ , а также в выражении  $(-\alpha_3 R \sin(2\pi/n) - \beta_3 R \cos(2\pi/n) + \sum_{i=0}^3 \delta z_i)$ .

Таким образом, для их определения рекомендуется построить баланс точности вертикально-фрезерного станка при обработке на нем поверхностей других видов (например, боковых, полуцилиндрических поверхностей шпоночного паза).

4) Полученные значения параметров геометрической точности фрезерного станка при обработке на нем поверхности дна шпоночного паза позволяют сделать вывод о том, что первоначальную геометрическую точность станка можно восстановить при ремонте или регулировке узлов:

– регулировка или замена подшипников шпиндельного узла для уменьшения величины углового биения шпинделя для уменьшения величин  $\alpha_3$  и  $\beta_3$ ;

- ремонт направляющих стола для уменьшения величин  $\alpha_1$  и  $\beta_1$ ;
  - ремонт направляющих продольных салазок для уменьшения величин  $\alpha_2$  и  $\beta_2$ ;
  - переустановка детали для уменьшения величин  $\alpha_0$  и  $\beta_0$ .
- Погрешности  $\delta z_i$ ,  $i=0..3$  можно компенсировать путем настройки фрезы на нужный размер.

### **6 Требования к отчету**

Отчет по лабораторной работе должен включать в себя:

- наименование лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- задание к лабораторной работе;
- текст программы и результаты в системе Maple;
- модель формообразующей системы металлорежущего станка;
- баланс точности металлорежущего станка при обработке им указанной поверхности;
- положения номинальной и реальной поверхностей;
- анализ баланса точности металлорежущего станка;
- выводы по результатам диагностики металлорежущего станка.

### **7 Библиографический список**

1. ГОСТ 18097-93 «Станки токарно-винторезные и токарные. Основные размеры. Нормы точности».
2. ГОСТ 17734-88 «Станки фрезерные консольные. Нормы точности и жесткости».
3. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
4. Диагностика токарно-винторезного станка при обработке цилиндрических, торцовых и винтовых поверхностей / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011613642, дата регистрации 11.05.2011 г.
5. Диагностика вертикально-фрезерного станка при обработке закрытого шпоночного паза / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615190, дата регистрации 01.07.2011 г.