

СТАНОК С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПРИВОДАМИ КООРДИНАТНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РАБОЧЕГО ОРГАНА

М.М. Тверской

Описана кинематическая схема шестикоординатного станка с параллельными приводами координатных перемещений рабочего органа. Приведены основные соотношения для расчета геометрических параметров станка при заданных характеристиках его рабочего пространства.

подавляющее большинство металлообрабатывающих станков, промышленных роботов и других манипуляционных машин имеют последовательную кинематическую структуру. Их выходное звено (суппорт, стол, схват) связано со стойкой (станиной) единственной кинематической цепью, которая является разомкнутой. Перемещение выходного звена по нескольким координатам достигается за счет использования соответствующего числа приводов, включенных в указанную кинематическую цепь последовательно. Примером может служить трехкоординатный фрезерный станок консольного типа с ЧПУ, разомкнутая кинематическая цепь которого состоит из одного неподвижного звена (станины) и трех подвижных звеньев - консоли, поперечных салазок и стола. Перечисленные звенья образуют три поступательные пары, имеющие приводы, которые обеспечивают перемещение заготовки, установленной на столе, вдоль трех осей декартовой прямоугольной системы координат.

Приводы и направляющие поперечных салазок и стола, размещенные на консоли, существенно увеличивают ее совокупную массу, что отрицательно сказывается на динамических показателях станка и увеличивает его материалоемкость.

В то же время известны механизмы с параллельными приводами, у которых несколько приводов (как правило, линейных) перемещают одно и то же выходное звено. Такими механизмами являются платформы Гауфа и Стюарта, манипулятор Данилевского и другие [1]. Платформа Стюарта соединена с основанием шестью стержнями изменяемой длины. Каждый стержень состоит из двух звеньев, образующих поступательную пару, и привода линейных перемещений. Шесть верхних шарниров, с помощью которых стержни соединяются платформой, являются сферическими (трехосевыми), шесть нижних, соединяющих стержни с основанием, являются двухосевыми (кардановыми).

Согласованно изменяя длины шести стержней, можно осуществлять движение платформы по шести координатам (трем линейным и трем угловым). При заторможенных приводах подобные механизмы обращаются в пространственные фермы, стержни которых благодаря шарнирным соединениям воспринимают только осевые нагрузки, чем обеспечивается высокая жесткость механизма при малой материалоемкости. Масса подвижных звеньев в подобных механизмах существенно меньше суммарной массы подвижных звеньев в механизмах последовательной кинематической структуры.

Однако в механизмах параллельной кинематической структуры, в отличие от предыдущих, работа одного привода приводит к перемещению выходного звена одновременно по нескольким координатам. Покажем это, рассмотрев простейший плоский механизм, изображенный на рис. 1. Выходным звеном механизма является планшайба 1, центр которой (точка А) может перемещаться по двум координатам - x и y . Угловая координата φ_2 планшайбы может быть либо произвольной (там, где это допустимо), либо остается постоянной за счет дополнительной (пассивной) кинематической цепи 2 в виде двух параллелограммов. Механизм имеет два линейных привода, изменяющих длины стержней АВ и АС. При работе одного привода, изменяющего, например, длину стержня АВ, точка А будет перемещаться по окружности с центром в точке С, т. е. будут изменяться обе ее координаты - x и y . Механизм имеет особые положения, при которых оба стержня расположены на прямой ВС. Передаточные отношения от каждого привода до выходного звена по обеим координатам - непостоянны.

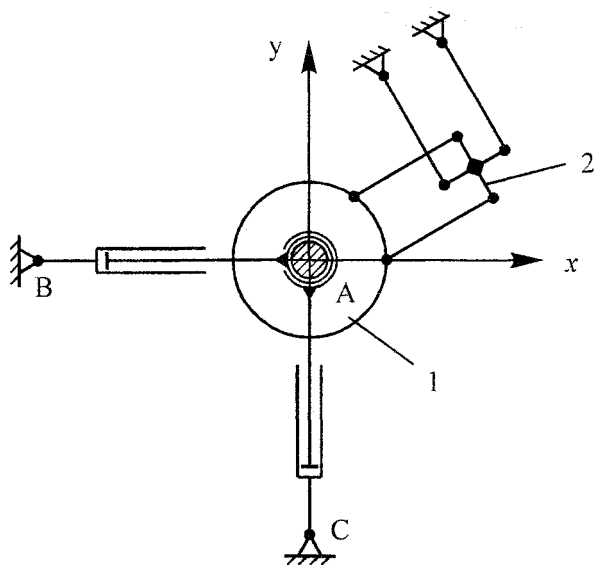


Рис. 1

свойствами) эти станки обладают и недостатками. Главными из них являются отмеченные выше сложность управления и наличие особых положений, а также недостаточные жесткость и величины перемещений по некоторым координатам.

Рассматриваемая ниже кинематическая схема станка-гексапода (рис. 2) существенно отличается от традиционной для этого класса станков схемы платформы Стюарта и имеют перед ней, на взгляд автора, определенные преимущества.

Исполнительным органом станка является гильза 1. На верхнем и нижнем торцах гильзы расположены сферические шарниры 2 и 3, по три шарнира на каждом торце. Центры шарниров каждого торца расположены на окружностях с интервалом 120° , а между собой две группы сферических шарниров смещены на 60° . На неподвижном основании 4 равномерно расположены шесть двухосных (кардановых) шарниров 5, которые соединены стержнями 6 и 7 изменяемой длины с шарнирами 2 и 3, расположенными на торцах гильзы 1. Шарниры верхней и нижней групп стержней на основании 4 чередуются. В гильзе 1 расположен вращающийся от электродвигателя 8 шпиндель с закрепленным в нем инструментом 9.

Удлиняя по одному и тому же закону все нижние стержни и соответственно укорачивая верхние, можно вертикально опускать гильзу 1. При этом силовая нагрузка на инструмент воспринимается всеми шестью приводами стержней равномерно.

Изменяя по периодическому закону длины всех стержней со смещением по фазе на 60° , можно осуществлять движение оси гильзы по поверхности прямого кругового цилиндра с вертикальной осью.

Изменяя длины верхних стержней по периодическому закону со смещением по фазе на 60° , а длины противоположных им нижних стержней в противофазе, можно осуществлять движение оси гильзы по поверхности прямого кругового конуса. Более сложные алгоритмы изменения длин стержней позволяют перемещать ось гильзы по весьма сложным траекториям.

Реактивный момент на статоре электродвигателя 8 воспринимается всеми шестью стержнями, поскольку поворот гильзы под действием реактивного момента вокруг своей оси при неизменных длинах всех стержней возможен только при смещении ее фланцев с шарнирами 2 и 3 навстречу друг другу. Поскольку фланцы соединены жесткой гильзой 1, то такой поворот возможен только в пределах, обусловленных упругой деформацией всех стержней, работающих на растяжение или сжатие. Это обеспечивает достаточную жесткость механизма по координате φ_z (см. рис. 2).

Управление поворотом гильзы вокруг своей оси имеет свои особенности. Во-первых, при обработке вращающимися (от электродвигателя 8) инструментами (сверлами, фрезами, шлифовальными кругами и т. п.) такое движение гильзы не требуется. Однако при закреплении на гиль-

Указанные особенности механизмов с параллельными приводами свидетельствуют о том, что управление движением выходного звена этих механизмов представляет намного более сложную задачу по сравнению с управлением механизмами последовательной кинематической структуры, в которых каждый провод перемещает выходное звено только по одной координате.

Однако с появлением и развитием микропроцессорных систем управления и научных основ мехатроники задачи управления движением выходного звена механизмов с параллельными приводами стали вполне разрешимыми, что и вызвало практический интерес к таким механизмам и появление станков-гексаподов с шестью управляемыми координатами [2].

Наряду с преимуществами (малой материалоемкостью и хорошими динамическими

зе некоторых видов схватов и измерительных головок оно должно быть предусмотрено. Поворот гильзы вокруг своей оси достигается одновременным уменьшением или увеличением длин всех шести стержней. При этом следует иметь ввиду то обстоятельство, что некоторые из положений механизма по отношению к координате φ_z являются особыми. При особых положениях гильзы все стержни располагаются в плоскостях, проходящих через ось гильзы и центр своего неподвижного шарнира. Механизм становится неуправляемым по координате φ_z . Поэтому необходим, например, дополнительный привод для выведения механизма из особых положений, либо эти положения должны быть запрещены.

Рассматриваемый механизм имеет пять основных геометрических параметров: D - диаметр окружности расположения центров неподвижных шарниров; d - диаметр окружностей расположения центров подвижных шарниров; L - длина гильзы (расстояние между плоскостями расположения подвижных шарниров); l_{\min} , l_{\max} - минимальная и максимальная длина каждого из шести стержней.

При этом параметры d и l_{\min} , как правило, определяются конструктивно - из условий размещения шарниров на фланцах гильзы и на нижних частях стержней. Для аналитического определения остальных из названных параметров необходимо задать величины желаемых перемещений гильзы (параметры рабочей зоны станка) и составить необходимые соотношения.

Введем неподвижную правую прямоугольную систему координат станка $Oxyz$, координатная плоскость xOy которой совпадает с плоскостью расположения центров неподвижных шарниров, а начало координат - с центром окружности (диаметром D), на которой они расположены (см. рис. 2).

Примем, что в исходном положении ось гильзы совпадает с осью Oz , а плоскость xOy делит длину гильзы пополам. Проекция всех шести стержней на плоскость xOy являются касательными к окружности диаметром d с центром в точке O . В процессе работы станка гильза может поворачиваться вокруг своей оси от этого исходного положения ($\varphi_z = 0$) в противоположных направлениях теоретически вплоть до указанных выше особых положений.

На рис. 3, а, где показан вид станка сверху (с положительного конца оси Oz), предельные углы поворота гильзы вокруг оси Oz обозначены φ_{z1} и φ_{z2} . При указанном на рисунке значении l_{\max} достигается только одно особое положение ($\varphi_z = \varphi_{z1}$).

Рассмотрим определение геометрических параметров станка, обеспечивающих его рабочее пространство, ограниченное сферой радиуса R , при движении гильзы без поворота вокруг своей оси, занимающей вертикальное положение.

Для этого необходимо, чтобы при указанном движении гильзы любая ее точка могла быть совмещена с любой точкой пространства, ограниченного сферой радиуса R с центром, совпадающим с положением этой точки при указанном выше исходном положении гильзы.

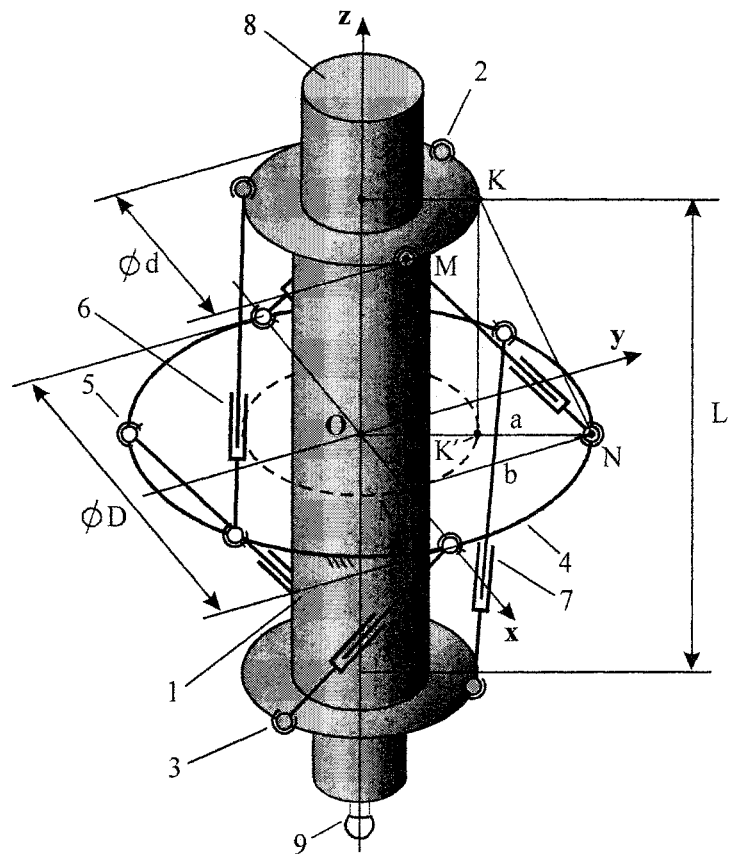


Рис. 2

При исходном положении гильзы, показанном на рис. 2, длины всех стержней одинаковы и равны l_0 . Расчет этой длины проведем для стержня NM.

$$l_0 = \sqrt{b^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}, \quad (1)$$

где b – длина касательной NM'.

Из прямоугольного треугольника OM'N находим

$$b^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2. \quad (2)$$

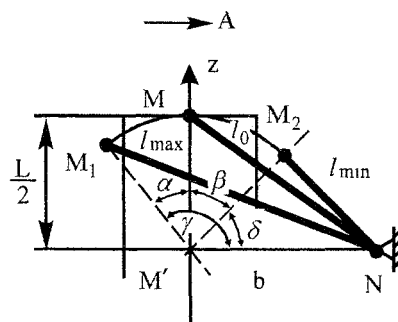
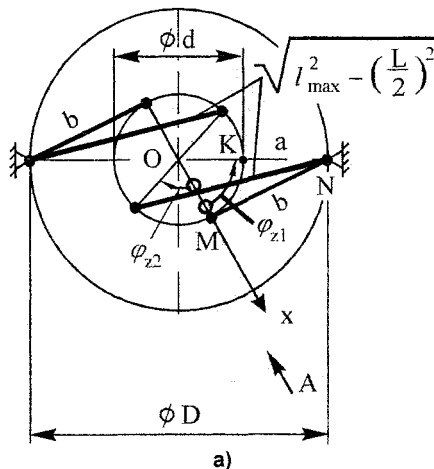


Рис. 3

Тогда

$$l_0 = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}. \quad (3)$$

Поскольку по условиям задачи точка M, как и любая другая точка гильзы, должна описывать сферу с заданным радиусом R, то при указанном угловом положении гильзы

$$l_{\max} = l_0 + R; \quad (4)$$

$$l'_{\min} = l_0 - R. \quad (5)$$

При других угловых положениях гильзы требуемые длины стержней будут отличаться от рассчитанных по формулам (4) и (5). Наименьшие длины стержней требуются для особого углового положения гильзы $\varphi_z = \varphi_{z1}$. Определим l_{\min} для этого положения из треугольника NKK' (см. рис. 2):

$$l_{\min} = \sqrt{a^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} - R, \quad (6)$$

где $a^2 = \left(\frac{D-d}{2}\right)^2. \quad (7)$

Объединяя равенства (6) и (7), получаем

$$(l_{\min} + R)^2 = \left(\frac{D-d}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2. \quad (8)$$

Из выражений (3) и (4) находим

$$(l_{\max} - R)^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2. \quad (9)$$

Левые части уравнений (8) и (9) не равны между собой, так как. l_{\min} рассчитывается для особого положения гильзы ($\varphi_z = \varphi_{z1}$), а l_{\max} – для исходного ($\varphi_z = 0$).

В уравнениях (8) и (9) три неизвестных – D , L , l_{\max} . Поэтому одну из этих величин необходимо задать дополнительно к заданным значениям d и l_{\min} .

Если $\frac{d}{2}$ есть не только радиус расположения центров сферических шарниров на фланцах гильзы, но и действительный наружный радиус «тела» гильзы, то должно выполняться неравенство:

$$\frac{D}{2} - \frac{d}{2} > R, \quad (10)$$

поскольку в противном случае смещение гильзы в горизонтальном направлении на величину R невозможно, так как этому помешают неподвижные шарниры. С учетом того, что действительный наружный диаметр гильзы может быть меньше d , при предварительных расчетах можно принять, что

$$D = 2R + d. \quad (11)$$

Тогда из уравнения (8) находим

$$L = 2\sqrt{l_{\min}^2 + 2Rl_{\min}}. \quad (12)$$

Из уравнения (9) находим

$$l_{\max} = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} + R. \quad (13)$$

Рассчитав по уравнениям (11)–(13) значения D , L и l_{\max} , можно найти углы α и β отклонения оси гильзы от вертикали при исходном угловом положении гильзы $\varphi_z = 0$. При увеличении длин двух противоположных стержней верхней и нижней групп от l_0 до l_{\max} этот угол будет равен α . При уменьшении длин двух противоположных стержней от l_0 до l_{\min} этот угол будет равен β (рис. 3, б).

Вначале по теореме косинусов найдем угол γ :

$$\gamma = \arccos \frac{b^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 - l_{\max}^2}{bL} = \arccos \frac{l_0^2 - l_{\max}^2}{bL}. \quad (14)$$

Формула (14) справедлива при $l_{\max} \leq b + \frac{L}{2}$. В противном случае угол γ достигает 180° (еще одно особое положение механизма) при $l = l_\gamma = b + \frac{L}{2}$.

Аналогично находим угол δ :

$$\delta = \arccos \frac{b^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 - l_{\min}^2}{bL} = \arccos \frac{l_0^2 - l_{\min}^2}{bL}. \quad (15)$$

После этого находим углы α и β :

$$\alpha = \gamma - 90^\circ; \quad \beta = 90^\circ - \delta. \quad (16)$$

Определим угол поворота гильзы вокруг вертикальной оси от исходного до особого положения, т. е. при уменьшении длин всех стержней от l_0 до $l_{\min} + R$ (см. рис. 3, а):

$$\varphi_{z1} = \arccos \frac{d}{D}. \quad (17)$$

Предельное значение угла φ_{z2} соответствует длине всех стержней, равной l_{\max} :

$$\varphi_{z2} = \arccos \frac{D^2 + d^2 + L^2 - 4l_{\max}^2}{2Dd} - 90^\circ. \quad (18)$$

Формула (18) справедлива при $l_{\max} \leq \sqrt{\left(\frac{D+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}$. В противном случае $\varphi_{z2} = 90^\circ$, и

это значение достигается при $l = l_z = \sqrt{\left(\frac{D+d}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}$.

Рассмотрим пример. Задано: $R = 120$ мм; $l_{\min} = 100$ мм; $d = 200$ мм.

Из уравнения (11) находим $D = 2 \cdot 120 + 200 = 440$ мм.

Из уравнения (2) находим $b^2 = 220^2 - 100^2 = 38400$, $b \approx 195,959$ мм.

Далее из уравнения (12) находим $\left(\frac{L}{2}\right)^2 = 10000 + 24000 = 34000$; $L \approx 368,78$ мм. Из уравне-

ния (1) следует, что $l_0^2 = 38400 + 34000 = 72400$; $l_0 \approx 269,07$ мм, а из уравнений (4) или (13) нахо-

дим $l_{\max} = 389,07$ мм. Проверим выполнение неравенства $l_{\max} \leq b + \frac{L}{2}$: $l_{\gamma} = b + \frac{L}{2} = 380,35 < l_{\max}$.

Следовательно, угол γ достигает 180° при $l < l_{\max}$. Поэтому теоретически $\alpha = 90^\circ$.

По формулам (15) и (16) рассчитаем углы δ и β : $\delta = 30,7^\circ$; $\beta = 59,3^\circ$.

Далее находим $\varphi_{z1} = \arccos \frac{200}{440} \approx 62,96^\circ$. После этого находим значение l_z , при котором

$\varphi_z = \varphi_{z2} = 90^\circ$: $l_z = \sqrt{(220+100)^2 + 34000} \approx 369,32 < l_{\max}$. Из этого следует, что и угол $\varphi_{z2} = 90^\circ$ теоретически достижим. Итак, при заданных параметрах $R = 120$ мм, $l_{\min} = 100$ мм, $d = 200$ мм нашли следующие расчетные геометрические параметры станка: $D = 440$ мм, $L = 368,78$ мм, $l_{\max} = 389,07$ мм углы отклонения оси гильзы от вертикали $\alpha = 90^\circ$; $\beta = 59,3^\circ$, углы поворота гильзы вокруг своей оси $\varphi_{z1} = 62,96^\circ$, $\varphi_{z2} = 90^\circ$. Следует еще раз отметить, что найденные углы $\alpha = 90^\circ$ и $\varphi_{z2} = 90^\circ$ скорее всего окажутся нереализуемыми по условиям столкновения конструктивных элементов станка. Реальные значения этих углов могут быть определены при конструировании станка.

Литература

1. Глазунов, В.А. *Пространственные механизмы параллельной структуры* / В.А. Глазунов, А.Ш. Колискор, А.Р. Крайнев. - М.: Наука, 1991. - 95 с.
2. Астанин, В.О. *Исследование металлорежущего станка нетрадиционной компоновки* / В.О. Астанин, В.М. Сергиенко // Станки и инструмент. - 1993. - № 3. - С. 5-8.