

УДК 621-01

**В.Б. Струтинский**, д-р техн. наук, проф., Нац. техн. ун-т Украины “КПИ”,  
**В.Н. Тихенко**, канд. техн. наук, доц., Одес. нац. политехн. ун-т

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ В СТАНКАХ

*В.Б. Струтинський, В.М. Тіхенко. Аналіз можливостей використання гідроприводних механізмів паралельної кінематики у верстатах.* Розглянуто особливості використання гідроприводних механізмів паралельної кінематики у верстатах. Показано шляхи поліпшення функціональних характеристик таких верстатів, що дозволяє виконувати високоточну обробку складних фасонних поверхонь.

*В.Б. Струтинский, В.Н. Тихенко. Анализ возможностей использования гидроприводных механизмов параллельной кинематики в станках.* Рассмотрены особенности использования гидроприводных механизмов параллельной кинематики в станках. Показаны пути улучшения функциональных характеристик таких станков, что позволяют выполнять высокоточную обработку сложных фасонных поверхностей.

*V.B. Strutinsky, V.N. Tikhenko. The analysis of possibilities of using hydraulic drive mechanisms of parallel kinematics in machine-tools.* The features of using hydraulic drive mechanisms of parallel kinematics in machine-tools are considered. The ways of improving functional characteristics of such machine-tools are shown, that makes high-accuracy complex contour forming possible.

Одним из новых направлений развития современного станкостроения является создание обрабатывающего оборудования нетрадиционной конструкции — так называемых станков с параллельной кинематикой [1, 2]. Механизм параллельной кинематической структуры или гексапод на основе Платформы Стюарта содержит шесть линейных приводов  $D1 \dots D6$  в виде гидrocиллиндров либо винтовых передач, реализующих управление шестью обобщенными координатами платформы (рис. 1, а). Каждый из приводов платформы связан в нижней части со сдвоенным сферическим шарниром на основании (рис. 1, б), а в верхней части — с шарниром на выходном звене (платформе). Платформа как рабочий орган станка может использоваться в качестве стола для закрепления обрабатываемой детали или узла крепления инструмента.

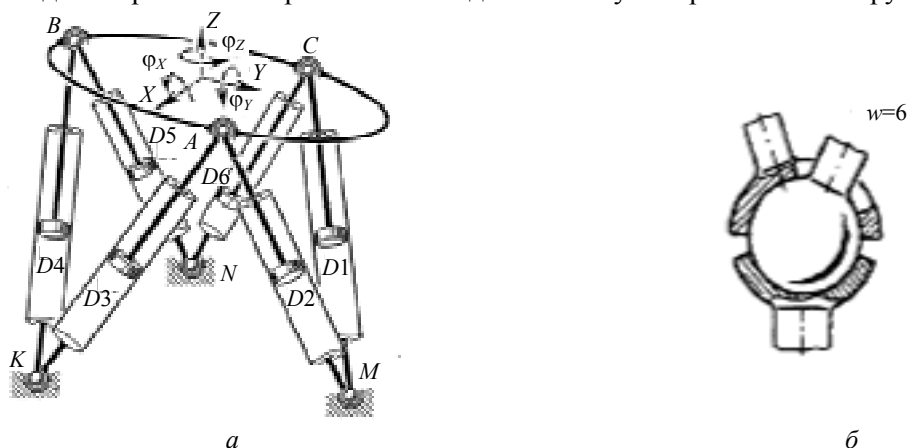


Рис. 1. Механизм станка с параллельной кинематикой на основе Платформы Стюарта: структурная схема (а), сдвоенный сферический шарнир (б)

Фиксированные длины следящих приводов определяют однозначное относительное положение платформы и основания (фактически образуется пространственная ферма). Изменением длины одного или нескольких приводов  $D1 \dots D6$  можно регулировать относительное положение соединенных тел, т.е. выполнять манипулирование платформой в определенном рабочем пространстве. Возможны различные варианты исполнения механизма: с карданными соединениями, с приводами, размещенными на основании, и др. Общим остается унификация приводов, т.е. все имеют одно и тоже конструктивное исполнение. К ним предъявляются очень высокие требования не только по быстродействию, но и по жесткости. Кроме того, их зона нечувствительности должна быть как можно меньше.

Каждый линейный привод платформы может рассматриваться как мехатронный модуль, действующий во взаимосвязи с другими модулями. Как отмечалось ранее, обычный мехатронный модуль, например, электрогидравлический следящий привод, обеспечивает движение механических объектов регулирования по одной управляемой координате [3]. Рассматриваемый механизм параллельной кинематической структуры — это мехатронная система, способная обеспечивать управление шестью обобщенными координатами [4].

Характерными особенностями механизмов данного типа является изменение передаточного отношения в широких пределах и ограниченность рабочего диапазона положений. Если  $L_{\max}$  — максимальная и  $L_{\min}$  — минимальная длина штока, то отношение  $k_L = L_{\max}/L_{\min}$  характеризует диапазон изменения такой опоры. При  $k_L \leq 1,6 \dots 1,8$  используются одноходовые гидроцилиндры, а при больших значениях необходимо применять телескопические или одноходовые гидроцилиндры со смещенным по оси нижним шарниром [3]. Однако понижение жесткости гидроцилиндра с увеличением хода ограничивает их применение в станках для сверхпрецизионной обработки. Нагрузки, приведенные к штоку отдельного гидроцилиндра, из-за изменения передаточного отношения механизма в широких пределах будут различными при разных положениях платформы. Несмотря на некоторую кинематическую простоту, эти механизмы представляют собой сложные в математическом описании системы, поскольку в пространстве координат (так называемых  $L$ -координатах, т.е. перемещениях штоков) нет понятий угол и момент, а присутствуют только длина и сила. Перемещения штоков не совпадают с перемещениями обрабатываемой детали.

Механизмы данного класса с электрогидравлическими следящими приводами уже используются в испытательных стендах и тренажерах, в активных системах амортизации для гашения сейсмических колебаний, в качестве точной регулируемой (юстирующей) подвески зеркал в крупногабаритных оптических системах при наличии упругости элементов их конструкций [3]. В станках они обеспечивают высокие скорости быстрых перемещений, однако точность позиционирования бывает недостаточной для прецизионной обработки. Несмотря на то, что это оборудование уже выпускается, многие задачи структурного и параметрического синтеза, возникающие в процессе проектирования, до сих пор не решены.

Поэтому рассмотрение новых возможностей применения механизмов параллельной кинематики, приводимых в действие гидроприводом, для улучшения функциональных характеристик станков является актуальным.

Оптимальной областью использования механизмов с параллельной кинематикой являются станки, на которых выполняются операции высокоточной обработки сложных фасонных поверхностей одинарной и двойной кривизны. Больше всего деталей с такими поверхностями изготавливаются в авиакосмической, автомобильной, турбинной отраслях промышленности. Например, в авиакосмической отрасли одними из наиболее часто обрабатываемых деталей являются разного рода шпангоуты и нервюры. Практически все они содержат линейчатые поверхности, так называемые переменные малки, причем угол их наклона может быть различным. Детали с малкованными и сложными трехмерными поверхностями чрезвычайно трудоемки и сложны в механической обработке. При отсутствии специализированных многокоординатных фрезерных станков с ЧПУ такие детали приближенно обрабатывали на универсальных фрезерных станках, а затем производилась доработка и доводка ручным инструментом. Пятикоординатное фрезерование с ЧПУ с осью инструмента, почти нормальной к обрабатываемой поверх-

ности, имеет некоторые преимущества по сравнению с трехкоординатным. Теоретически требуется, по меньшей мере, пять движений для изменения положения и направления оси шпинделя. Не менее двух из этих движений должны быть вращательными (поворотными), а остальные — поступательными. В зависимости от используемой кинематической схемы изменение углов инструмента по отношению к детали может быть выполнено различными методами:

- поворотом стола и/или шпинделя;
- совместным поворотом детали, закрепленной в шпинделе токарно-фрезерного обрабатывающего центра, и дополнительного фрезерного шпинделя;
- использованием силовых роботов-манипуляторов, на которых установлен вращающийся фрезерный инструмент, например, станков немецкой фирмы KUKA Roboter GmbH.

Существующие пятикоординатные фрезерные станки с ЧПУ имеют приводы поворота фрезерной головки и оси шпинделя, позволяющие наклонять концевую фрезу. Однако для обеспечения необходимой жесткости конструкция станков получается кинематически сложной и материалоемкой. Например, вес специальных пятикоординатных фрезерных станков с ЧПУ моделей ФП-14 и ФП14МЛ составляет 21 т [5]. Практика фрезерования показала, что дополнительное шестое движение ползуна станка с ЧПУ в направлении оси инструмента обеспечивает ряд преимуществ.

Особенно широкими возможностями обладают пятикоординатные фрезерные станки с ЧПУ, на которых, кроме основных координатных движений фрезы относительно заготовки, можно осуществлять поворот заготовки вокруг некоторой оси, например  $X$  (рис. 2). Если в качестве пятой координаты использовать изменение угла наклона  $\alpha$  оси шпинделя станка, то при одном закреплении заготовки могут быть обработаны также переходные поверхности (галтели) малых радиусов. Для обработки применяются концевые конические фрезы со сферическим закруглением. При фрезеровании сложных профилей используются маятниковые циклы, поэтому зона нечувствительности приводов влияет на точность обработки.

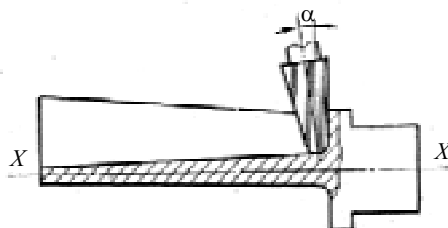


Рис. 2. Пятикоординатная фрезерная обработка сложных фасонных поверхностей

Системный анализ механизмов параллельной кинематики позволяет выявить особенности поведения гексапода в случае применения его в станках. В отличие от традиционных конструкций станков скорость платформы сложным образом зависит от линейной скорости каждого из его приводов, направления их перемещения и текущих координат платформы. В связи с этим траекторией с минимальным временем перемещения между двумя точками позиционирования будет не отрезок прямой по одной из осей, а некоторая линия в пространстве координат гексапода. Это значительно усложняет задачи программирования перемещений.

Сила тяжести платформы вызывает отклонения ее положения во время позиционирования. Эти отклонения (погрешность позиционирования) будут существенно изменяться при различных положениях платформы. Суммарная погрешность на плоскости платформы, например, в зоне обработки, будет образовываться как результат геометрического наложения погрешностей каждой из опор (линейных электрогидравлических следящих приводов). Подобным образом зона нечувствительности каждого из линейных электрогидравлических следящих приводов войдет как составная часть суммарной зоны нечувствительности гексапода. В механизмах параллельной кинематической структуры в качестве мехатронных модулей можно использовать линейные электрогидравлические следящие приводы с обратными связями по нагрузке и скорости, а также пьезогидравлический привод с генератором волновой деформации. Методики расчета этих приводов были рассмотрены ранее [6, 7]. Повышение жесткости нагрузочной ха-

рактические характеристики и снижение зоны нечувствительности электрогидравлических следящих приводов, достигаемые при введении дополнительных обратных связей по нагрузке, позволяют увеличить точность позиционирования платформы и уменьшить погрешности обработки.

Еще одним отличием гексапода от традиционных конструкций станков является то, что в нем отсутствуют направляющие. При этом снижается инерционность и металлоемкость привода, но уменьшается демпфирование. Для повышения устойчивости можно использовать дополнительное демпфирование при помощи магнитной жидкости [8]. Для этого конструктивно электрогидравлический следящий привод удобно выполнить тандемным, т.е. штоком исполнительного гидроцилиндра является также штоком демпфирующего гидроцилиндра (рис. 3). Управление исполнительным гидроцилиндром по командам от ЧПУ станка осуществляется с помощью электрогидравлического усилителя (ЭГУ).



Рис. 3. Гидроцилиндр мехатронного модуля станка с параллельной кинематикой с управлением от электрогидравлического усилителя

В таком случае можно обеспечить высокую точность выполнения заданной программы при достаточной устойчивости работы каждого электрогидравлического следящего привода и механизма параллельной кинематики в целом.

При обработке на электроэрозионных вырезных станках с помощью проволочного электрода-инструмента возникает необходимость получения расширяющихся и сужающихся конических поверхностей с переменным углом наклона (рис. 4).

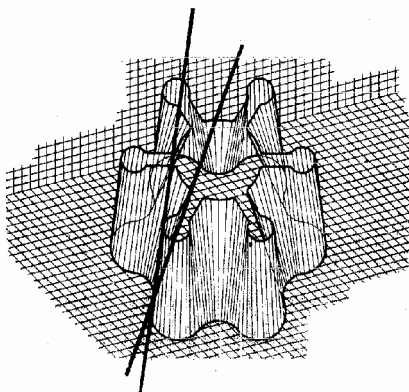


Рис. 4. Пример обработки конических поверхностей проволочным электродом-инструментом на электроэрозионном вырезном станке

Традиционные вырезные станки обычно работают в декартовой системе координат, что определяет компоновку их координатного стола 6 (рис. 5, а). Кроме того, в состав станка входят: рабочая скоба 1; рабочий стол 2; ванна с рабочей жидкостью 3; заготовка 4; проволочный электрод-инструмент 5; система управления подачами 7; двигатели подач 8; генератор импульсов технологического тока 9; блок перемотки и натяжения проволочного электрода-инструмента 10; регулирующее устройство подачи рабочей жидкости 11; насос 12 и бак для рабочей жидкости 13.

Принцип вырезания заключается в том, что электрод-инструмент внедряется в заготовку, образуя узкую щель шириной  $b_n$ , которая равна сумме диаметра проволоки  $d$  и двух боковых зазоров  $S_L$  между проволокой и деталью (рис. 5, б). На точность обработки влияет износ электрода-инструмента, величина зазора между электродом и заготовкой, точность приводов. Эрозионная геометрия образуется геометрией зазора и кинематикой передаваемых станком движений, при этом эрозионный промежуток между поверхностями электрода и заготовки составляет несколько сотых долей миллиметра. Используют ванну с рабочей жидкостью или подают ее поливом непосредственно в зону обработки. При обработке замкнутых внутренних поверхностей проволочный электрод-инструмент заправляют в предварительно прodelанное отверстие малого диаметра.

Осуществление движений рабочих органов станка должно соответствовать точности обработки с учетом геометрических и динамических погрешностей станка. Устройства осуществления движения необходимо выполнять с высокой жесткостью, чтобы исключить короткое замыкание между электродом и заготовкой и поддерживать регулируемый эрозионный зазор, который сравнительно невелик из-за наличия продуктов эрозии и собственных колебаний проволоки под действием разрядных импульсов. В связи с этим наименьший шаг перемещений, которые обеспечивают приводы подачи, должен составлять от 0,2 до 2 мкм.

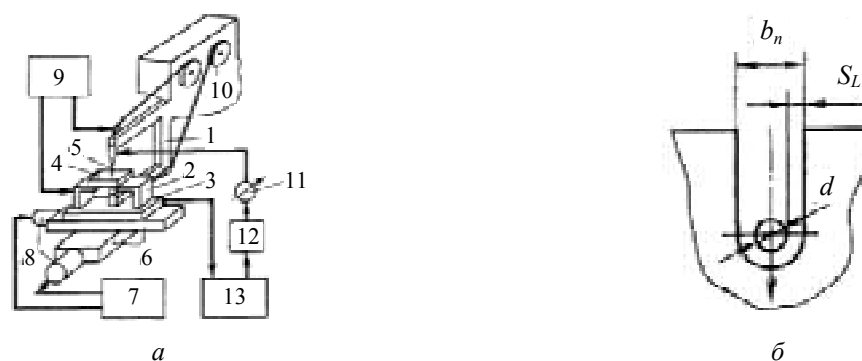


Рис. 5. Принципиальная схема вырезания проволочным электродом-инструментом: структурная схема (а) и прорезка щели (б)

Для получения расширяющихся и сужающихся конических поверхностей в вырезных станках необходимо обеспечивать поворот скобы с проволокой или заготовкой вокруг некоторой оси. Например, станок швейцарской фирмы AGIE оснащен рабочей (инструментальной) скобой для комплексной обработки расширяющихся и сужающихся конусов с бесступенчатым регулированием углов наклона до  $30^\circ$ . Однако размещение на скобе механизмов ее наклона вместе с датчиками обратной связи, устройств перемотки и натяжения проволоки требует значительного увеличения жесткости базовых узлов, что в свою очередь повышает металлоемкость станка. В процессе эксплуатации сложно обеспечить выборку зазоров в подвижных соединениях механизма наклона, что снижает надежность станка.

Было предложено вместо двухкоординатного стола использовать механизм параллельной кинематики, на платформе которого размещается заготовка. Это обеспечивает не только перемещения заготовки по требуемым осям, но и необходимые ее повороты вокруг той или иной оси. Значительно снижается вес узлов станка, все формообразующие движения реализуются в широком диапазоне скоростей перемещения платформы, причем в динамических режимах можно достичь больших значений ускорений по сравнению с существующими приводами.

Приведенные примеры показывают, что использование механизмов параллельной кинематики, приводимых в действие гидроприводом, позволяет достичь высокого быстродействия приводов станков при сохранении устойчивости движений. По сравнению с традиционными конструкциями снижается металлоемкость станков, повышается производительность и точность обработки. Это особенно важно для обеспечения операций высокоточной обработки, на-

пример, сложных фасонных поверхностей одинарной и двойной кривизны, расширяющихся и сужающихся конических поверхностей с переменным углом наклона.

### Литература

1. Обрабатывающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / [В.Л. Афонин, А.Ф. Крайнев, В.Е. Ковалев и др.]. — М.: Машиностроение, 2001. — 256 с.
2. Потапов, В.А. Станки с параллельной кинематикой на выставке ЕМО-2003 / В.А. Потапов // Машиностроитель. — 2004. — № 3 — С. 52 — 55.
3. Казмиренко, В.Ф. Электрогидравлические мехатронные модули движения. Основы теории и системное проектирование / В.Ф. Казмиренко. — М.: Радио и связь, 2001. — 432 с.
4. Тихенко, В.Н. Повышение эффективности следящих гидроприводов для станков с параллельной кинематикой / В.Н. Тихенко // Материалы междунар. науч.-техн. конф. “Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении”, Одесса, 10 — 11 окт. 2007 г. — К.: АТМ України, 2007. — С. 103 — 106.
5. Станки с числовым программным управлением (специализированные) / [В.А. Лещенко, Н.А. Богданов, Н.В. Вайнштейн и др.], под ред. В.А. Лещенко. — М.: Машиностроение, 1988. — 568 с.
6. Остапенко, А.И. К расчету характеристик электрогидравлического следящего привода с обратной связью по скорости исполнительного гидродвигателя / А.И. Остапенко, В.Н. Тихенко, А.А. Волков // Промислова гідроліка і пневматика. — Вінниця, 2006. — № 2(12). — С. 82 — 86.
7. Луговской, А.Ф. Расчет волнового пьезоэлектрического привода для мехатронных систем станков / А.Ф. Луговской, В.Н. Тихенко, В.М. Жеглова // Материалы междунар. науч.-техн. конф. “Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении”, Одесса, 10 — 11 окт. 2007 г. — К.: АТМ України, 2007. — С. 58 — 61.
8. Патент 7713 Україна. Пристрій активного додаткового демпфірування лінійних гідравлічних слідкуючих приводів машин / В.М. Тіхенко, О.В. Бучацький. Заявл. 30.08.04, опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7. — 2 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Оборский Г.А.

Поступила в редакцию 10 ноября 2008 г.