

МАШИНОСТРОЕНИЕ  
MECHANICAL ENGINEERING

**Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Самар Е. В.**  
**E. B. Schelkunov, S. V. Vinogradov, M. E. Schelkunova, E. V. Samar**

**МЕХАНИЗМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ**

**PARALLEL STRUCTURE MECHANISMS IN METAL CUTTING MACHINES**

**Щелкунов Евгений Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru

**Mr. Yevgeny B. Schelkunov** – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru

**Виноградов Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergwin72@rambler.ru

**Mr. Sergey V. Vinogradov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

**Щелкунова Марина Евгеньевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmorevm@knastu.ru

**Ms. Marina E. Schelkunov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Computer Software and Computing, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmorevm@knastu.ru

**Самар Елизавета Владимировна** – магистр техники и технологии Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru

**Ms. Yelizaveta V. Samar** – Master of Engineering and Technology Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur) E-mail: ktm@knastu.ru

**Аннотация.** Приведены классификации механизмов с параллельной кинематикой и обзор представленных на рынке металлорежущих станков на базе механизмов с параллельной кинематикой.

**Summary.** The paper proposes a classification of parallel link mechanisms, and a review of the market of parallel link metal cutting machines.

**Ключевые слова:** станок с параллельной кинематикой, гексапод, трипод, линапод, гексаглайд, триглайд, пентапод, дельтапод, рабочее пространство.

**Key words:** parallel link machine tool, hexapod, tripod, linapod, hexaglide, triglide, pentapod, deltapod, workspace.

УДК 621.913

Впервые станок с параллельной кинематикой был представлен на выставке IMTS'94 в Чикаго. В настоящее время станки с параллельной кинематикой постепенно, но довольно быстро входят в состав оборудования, используемого во всех отраслях металлообрабатывающей промышленности.

Основными достоинствами таких станков являются:

- высокая точность позиционирования рабочего органа (РО);
- высокие скорости перемещения и ускорения РО;
- улучшенные массогабаритные параметры и низкая материалоемкость вследствие отсутствия традиционных направляющих и станины;
- сравнительно низкие затраты на обслуживание и ремонт;
- более высокая надежность вследствие отсутствия силовых зубчатых передач, силового гидропривода и системы централизованного смазывания;
- высокая степень унификации мехатронных узлов, обеспечивающая технологичность изготовления станка и его конструктивную гибкость.

Основным элементом этих станков является параллельный механизм, состоящий из неподвижного основания, подвижной платформы (РО) и связывающих их приводных штанг, соединенных с основанием и платформой с помощью шарниров.

Перемещение РО относительно обрабатываемой заготовки по любой из трех линейных и трех поворотных осей осуществляется путем согласованного изменения длин штанг с помощью системы ЧПУ. В металлорежущих станках таким РО является шпиндельный узел.

Траектория движения шпинделя формируется в системе координат детали, а его положение в любой точке траектории может быть задано тремя линейными координатами конца инструмента и двумя угловыми координатами, определяющими угол наклона оси инструмента.

На сегодняшний день механизмы параллельной кинематики (МПК) представлены широким разнообразием их исполнения. Механизмы параллельной структуры (МПС), применяемые в металлорежущих станках, можно классифицировать по следующим признакам: по виду штанг; по количеству штанг; по характеру расположения шарниров на платформе и основании; по расположению шпинделя и др.

По виду штанг разделение происходит:

- на механизмы со штангами управляемой переменной длины (бипод, трипод, пентапод, гексапод, «ножницы»);
- на механизмы со штангами постоянной длины (линапод, биглайд, триглайд, ортоглайд, гексаглайд, ротопод, «дельта», four-rod).

На рис. 1 приведена классификация МПК по виду и количеству штанг.

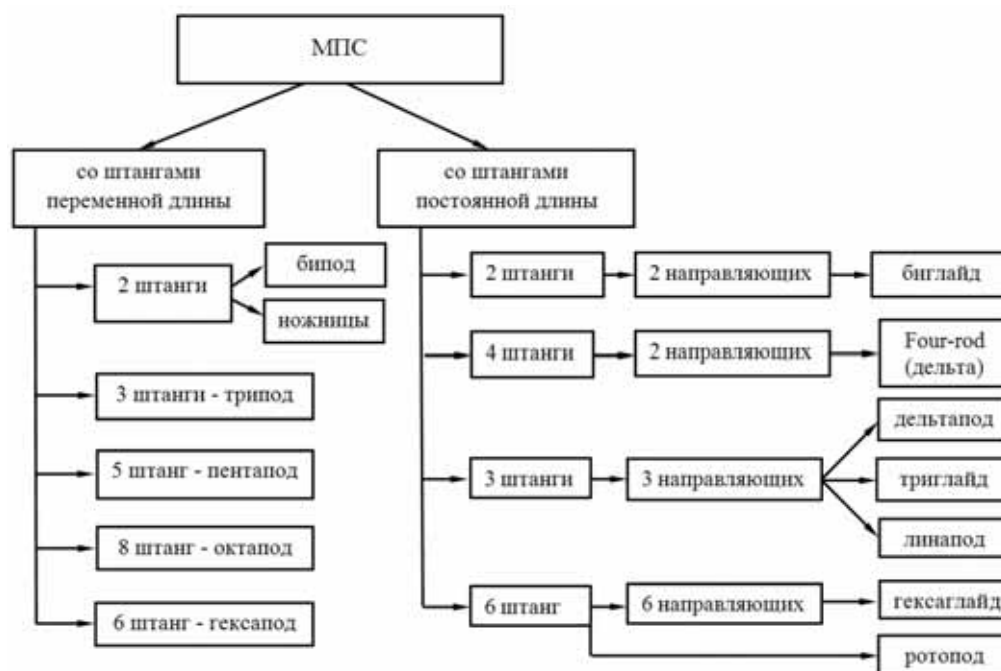


Рис. 1. Классификация МПК по виду и количеству штанг

Механизм трипод состоит из трех симметрично установленных телескопических штанг, связанных шарнирно одним концом с РО, а другим – с неподвижным основанием. Эти штанги приводятся от отдельных двигателей и работают на растяжение – сжатие. Дополнительная неприводная штанга расположена в центре. Она воспринимает изгибные деформации от инструментальной головки и поэтому должна иметь значительно большие размеры по сравнению с приводными штангами.

Среди триподов наиболее удачной разработкой является линейка станков Tricert фирмы Neos Robotics (Швеция), появившихся в 1992 г. Станки объединяют в себе функции как робота, так и станка.

Гексапод (от гекса – шесть) выполнен на базе шести механизмов поступательного перемещения.

На рис. 2 приведена типичная схема станка-гексапода.

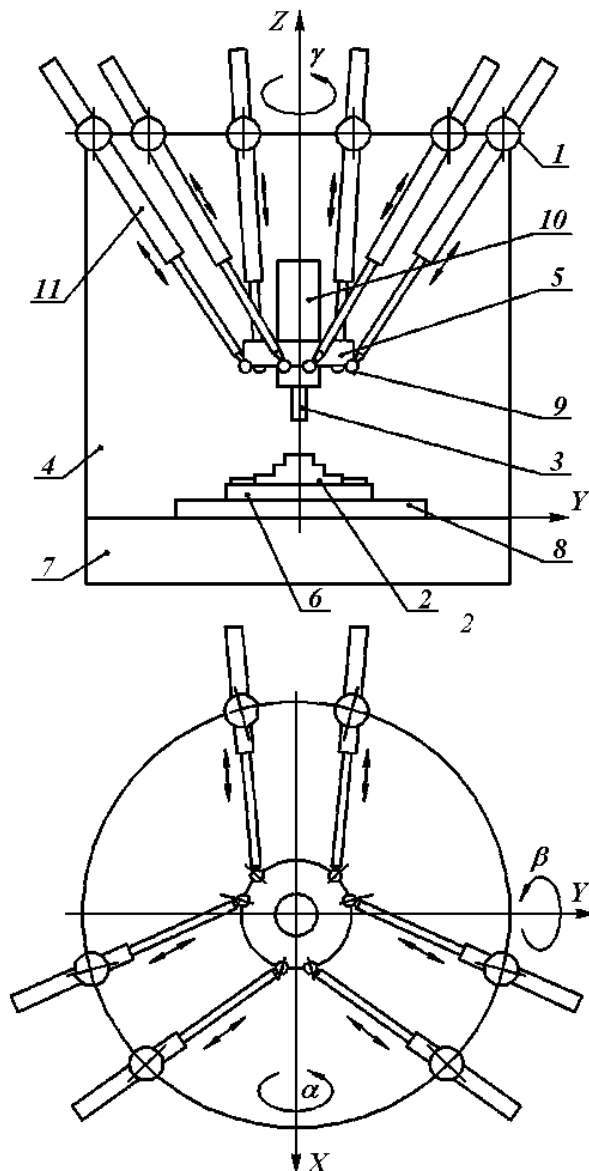


Рис. 2. Принципиальная схема станка-гексапода:

- 1 – шарнир основания; 2 – заготовка; 3 – инструмент; 4 – основание;
- 5 – платформа; 6 – приспособление; 7 – станина; 8 – стол;
- 9 – шарнир платформы; 10 – шпиндельный узел; 11 – штанги

Примером гексапода может служить, например, многоцелевой фрезерный станок OKUMA PM-600 (Япония).

Механизмы типа трипод и гексапод обладают высокой жесткостью. Их следует использовать в станках для высокоточной обработки деталей с точным позиционированием исполнительного органа. Триподы конструктивно проще гексаподов и более приспособлены к практическому применению. Гексаподы, оснащаемые шестью штангами, требуют значительно более сложного программного обеспечения [1].

Пентапод построен на основе трех основных и двух дополнительных штанг переменной длины. На рис. 3 показана компоновочная схема станка мод. «METROM Pentapod P800», представленного компанией Metrom в 2009 г. как абсолютно новый станок с параллельной кинематикой.

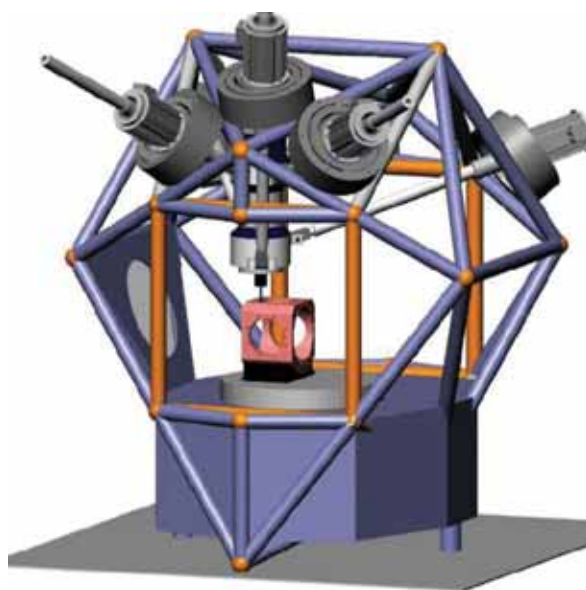


Рис. 3. Станок мод. «METROM Pentapod P800»

Каркас станка смонтирован в виде геометрической фигуры икосаэдр. Три верхних шарнира из пяти расположены на трех соседних гранях икосаэдра, а два шарнира – на удаленных от них гранях.

Шарниры платформы расположены на двух уровнях: три шарнира в непосредственной близости к инструменту, а два шарнира, наоборот, удалены. Такая компоновка обеспечивает исполнительному органу наклон на угол более  $90^\circ$ .

Отличительной чертой механизмов с постоянной длиной штанг является большой угол качания выходного звена и перемещение его только по одной координате. У большинства таких механизмов штанги шарнирно закреплены на каретках, перемещающихся по направляющим, расположение и количество которых может быть различно.

На рис. 4 приведены схемы гексаглайда и линапода.

У гексаглайда направляющие расположены в одной плоскости. Одним из первых данное техническое решение воплощено в совместной разработке Института машиностроения IWF (Германия) и Швейцарского федерального технологического института ETH в шести-координатном фрезерном станке, получившем название Hexaglide. Станок Hexaglide имеет шесть прямолинейных направляющих, расположенных параллельно друг другу в горизонтальной плоскости с ориентацией исполнительного органа к заготовке сверху вниз. Достоинством станка является возможность свободного доступа к рабочей зоне со всех сторон для удобства обслуживания, но «подвесная» компоновка предъявляет жесткие требования к металлоемкости конструкции и ограничения к рабочим усилиям при фрезеровании [1].

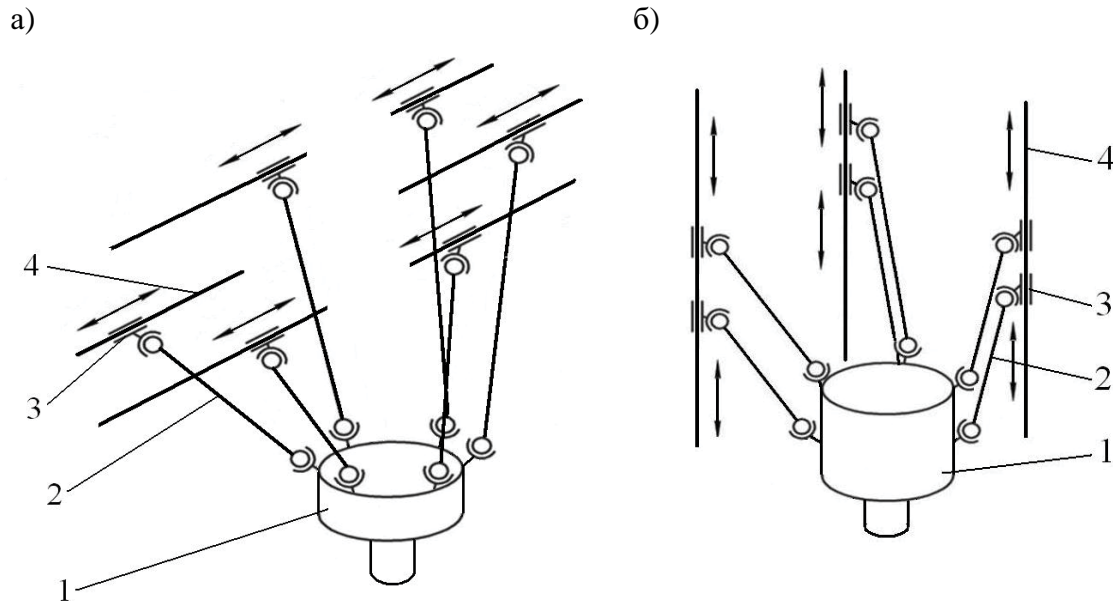


Рис. 4. Схемы механизмов с постоянной длиной штанг:  
 а – гексаглайд; б – линапод;  
 1 – платформа; 2 – штанга; 3 – каретка; 4 – направляющая

В отличие от гексаглайда у линапода направляющие размещены в разных плоскостях. В 2001 г. в Штутгартском университете был разработан шестикоординатный фрезерный станок Linapod вертикальной компоновки, который имел шесть отдельно управляемых штанг, опирающихся на три колонны с соосным перемещением по направляющим. Шесть штанг расположены вертикально по две на каждой колонне. Вертикальная компоновка станка Linapod обеспечивает повышенную жесткость конструкции за счет несущего основания в виде треугольной призмы [1].

Механизмы типа «дельта» (дельтапод) представляют собой замкнутую кинематическую цепь, состоящую из штанг постоянной длины, расположенных попарно параллельно и соединенных одним концом с платформой, несущей инструмент, а другим – с ведущим направляющим устройством или с ведущим поворотным устройством [2]. В металлорежущих станках применяются механизмы с ведущим направляющим устройством (см. рис. 5). У дельтапода на рис. 5 штанги расположены между каретками основания и подвижной платформой так же, как у линапода. Этот механизм был разработан фирмой Renault Automation (Франция) и использован в конструкции станка мод. Uganе SX. Дельта-механизмы обладают повышенной маневренностью и расширенной границей рабочей зоны, но сравнительно невысокой жесткостью.

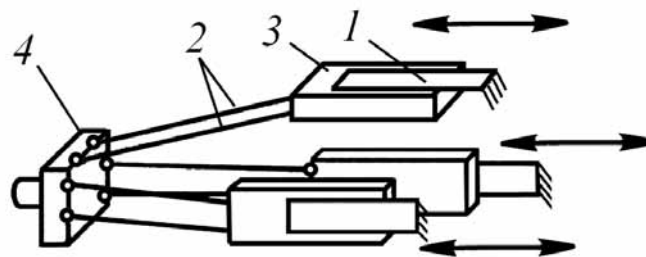


Рис. 5. Механизм «дельта»:  
 1 – направляющая; 2 – штанга; 3 – каретка; 4 – платформа

Технические характеристики станка URANE SX в отношении скоростей координатных перемещений и ускорений превышают все известные модели станков с МПК.

На рис. 6 показаны возможные варианты расположения шарниров на платформе и основании гексаподов.

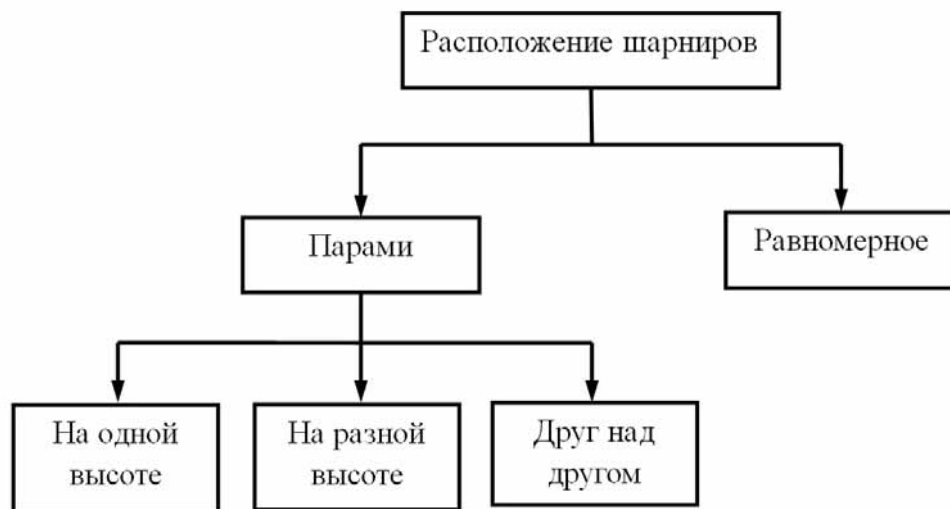


Рис. 6. Варианты расположения шарниров

На рис. 7 приведены упрощенные схемы наиболее распространенных вариантов компоновки.

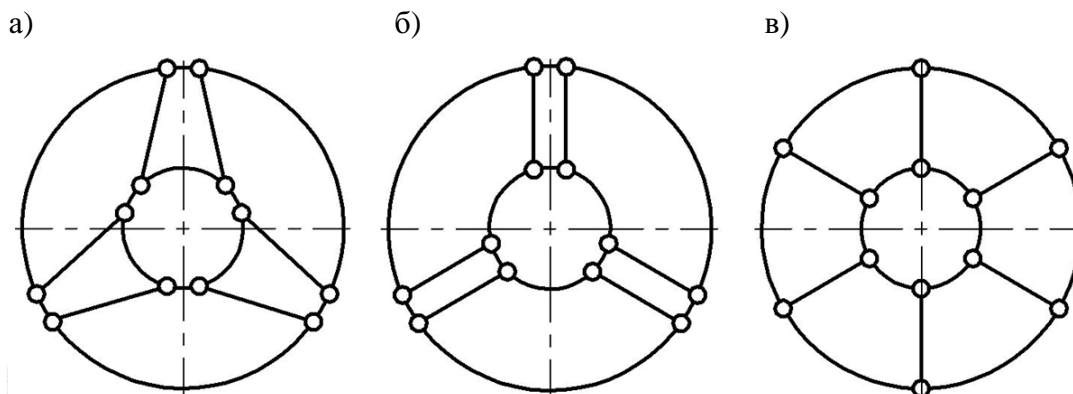


Рис. 7. Варианты компоновки (вид снизу):  
а, б – попарно; в – равномерно

Компоновки на рис. 7, а, б применяются в большинстве металлорежущих станков-гексаподов. Равномерная компоновка (см. рис. 7, в) не нашла применения на практике из-за недостаточной жесткости. Однако данная компоновка широко применяется при расчетах и анализе кинематики и характеристик механизмов данного класса.

Примером расположения шарниров на одной высоте может служить станок OKUMA PM-600.

Примерами станков с расположением шарниров на разной высоте могут служить многоцелевой станок MIKROMAT 6X и токарный станок НОН1000. В станке мод. MIKROMAT 6X шарниры основания и платформы расположены на разной высоте. Шарниры основания станка НОН1000 расположены парами один над другим, а шарниры платформы – на одной высоте.

По расположению шпинделя различают механизмы:

- с внутренним расположением шпинделя относительно контура штанг;
- с внешним расположением шпинделя относительно контура штанг.

Первым отечественным станком с внутренним расположением шпинделя относительно замкнутого контура раздвижных штанг является опытный станок, разработанный в 1987 г. Новосибирским электротехническим институтом.

Все известные механизмы параллельной структуры построены на основе различных сочетаний штанг и шарниров. На рис. 8 приведены некоторые сочетания штанг с шарнирами, применяемые в металлорежущих станках [2].

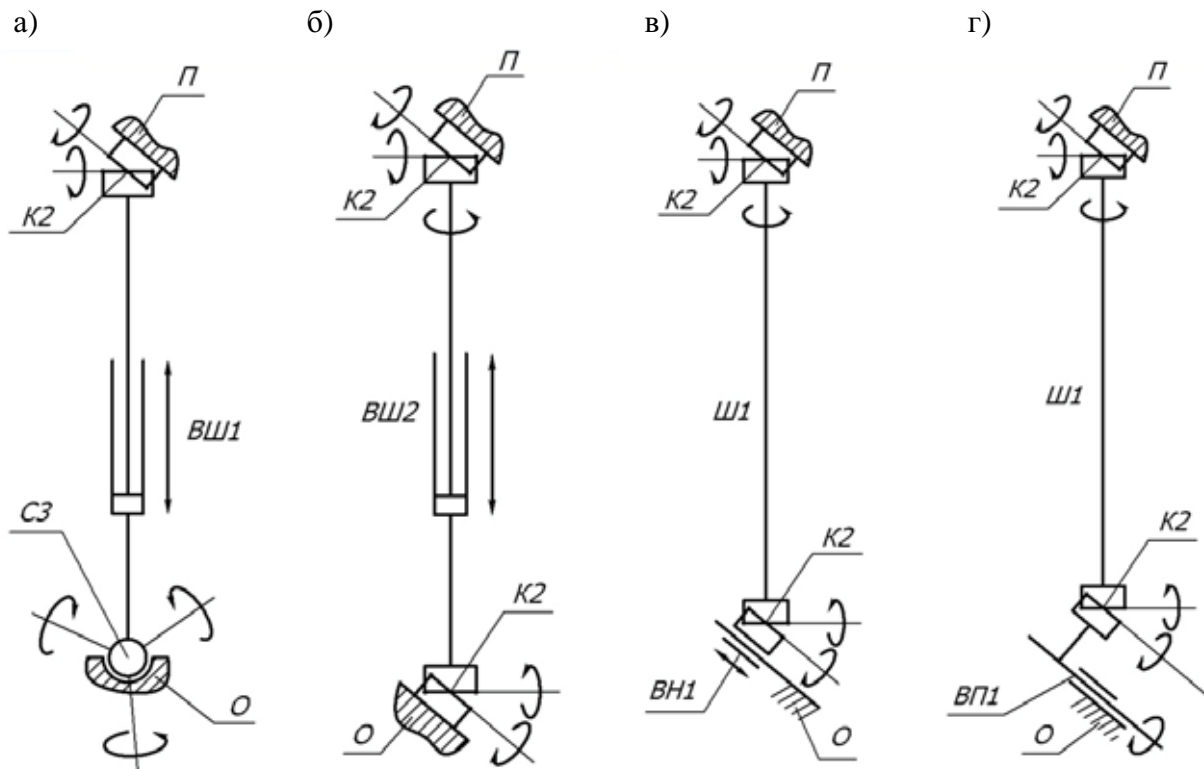


Рис. 8. Сочетания штанг с шарнирами:

О – основание; С3 – сферический шарнир с тремя степенями подвижности; ВШ1 – ведущая штанга с одной степенью подвижности; К2 – крестовый шарнир с двумя степенями подвижности; П – платформа

На рис. 8, а показана кинематическая цепь штанги металлорежущего оборудования фирмы Hoxel (США), построенная по формуле:  $O - C3 - BШ1 - K2 - П$ .

На рис. 8, б показана кинематическая цепь штанги металлорежущего оборудования фирмы Neos Roboties (Швеция) и станка Фраунгоферовского института (Германия), соответствующая формуле:  $O - K2 - \text{ведущая штанга с двумя степенями подвижности (BШ2)} - K2 - П$ .

На рис. 8, в штанга станка мод. Urane SX фирмы Renault Automation (Франция) соответствует формуле:  $O - \text{ведущее направляющее устройство с одной степенью подвижности (ВН1)} - K2 - \text{вращающаяся штанга с одной степенью подвижности (Ш1)} - K2 - П$ .

На рис. 8, г приведена кинематическая цепь штанги оборудования, разработанного фирмой ARIA (Швейцария), соответствующая формуле:  $O - \text{ведущее поворотное устройство с одной степенью подвижности (ВП1)} - K2 - Ш1 - K2 - П$ .

Использование рычажно-шарнирных механизмов в станках с параллельной кинематикой позволяет добиться значительной маневренности РО, но, в свою очередь, по сравнению со станками с традиционной прямоугольной системой координат существенно ограничивает размер рабочего пространства, выражаемого коэффициентом использования объема станка, определяемым как отношение общего объема станка к объему рабочей зоны.

В табл. 1 приведены усредненные данные по коэффициентам эффективности станков с прямоугольной системой координат и станков с параллельной кинематикой.

Таблица 1

Средние данные по коэффициентам эффективности станков с прямоугольной системой координат и станков с параллельной кинематикой

Станки с прямоугольной системой координат	Станки с параллельной кинематикой	
	Гексаподы	Триподы
Около 100	Около 250	Около 200

Увеличения объема рабочего пространства станков с параллельной кинематикой можно достичь применением агрегатно-модульного принципа компоновки станка, а также путем разделения необходимого числа степеней свободы РО между традиционной и параллельной структурами. Такую структуру принято называть гибридной. Примерами могут служить: совместная разработка Савеловского машиностроительного завода (СМЗ) и Национального института авиационных технологий (НИАТ) станок МЦ-2 и ГЕКСАМЕХ-1, станки моделей 6X и V100 фирмы MICROMAT (Германия) и др.

Примерами использования агрегатно-модульного принципа компоновки станков с параллельной кинематикой являются станки линейки Tricept шведской фирмы Neos Robotics AB и «METROM Pentapod P800» компании Metrom.

Трипод мод. Tricept TMC 845 выполнен в виде механического модуля с открытой архитектурой. У станка предусмотрено две боковые стойки, соединенные между собой траверсой. Между этими стойками находится модуль мод. Tricept 805, который может быть установлен в трех компоновочных вариантах: вертикальном, под углом  $45^\circ$  и горизонтальном. Такая многовариантность позволяет приспособливать станок к выполнению самых разных задач обработки [3].

В станке мод. ГЕКСАМЕХ-1 использован параллельный механизм гексапод с перемещениями по осям  $X = 800$  мм,  $Y = 800$  мм,  $Z = 700$  мм и стол с размерами  $800 \times 3000$  мм для обработки длинномерных деталей, перемещающийся по оси  $X$  от отдельного привода. В данном случае использование перемещений стола относительно зоны доступа шпиндельного модуля позволяет увеличить обрабатываемую поверхность до размеров установленного на станке стола.

В МЦ-2 агрегаты с последовательной кинематикой позволяют осуществлять линейные перемещения по оси  $X$  (перемещение траверсы) и оси  $Y$  (перемещение каретки), а закрепленный на каретке  $3Z$  модуль, выполненный на элементах параллельной кинематики, осуществляет перемещение шпинделя в направлении оси  $Z$ , а также повороты вокруг осей  $X$  и  $Y$ .

К гибридной структуре можно также отнести станки с управляемой формой рабочего пространства. Кафедрой металлорежущих станков и систем Кировоградского национального технического университета предложен станок-гексапод, схема которого представлена на рис. 9 [1].

Станок содержит неподвижную платформу 1, выполненную в виде плиты со столом 2, для размещения обрабатываемой детали, подвижную платформу 3 с РО 4, шесть штанг переменной длины, исходные элементы 5 которых шарнирно связаны с подвижной платформой 3, а корпуса 6 с помощью шарниров 7 – с неподвижной платформой 1, причем шарниры 7 могут перемещаться вдоль направляющих 8, размещенных на неподвижной платформе.

При одновременном изменении длин штанг происходит изменение положения РО в пространстве, ограниченном диапазоном ходов штанг. Для перемещения РО за пределами этого диапазона необходимо переместить шарниры основания вдоль направляющих. Длина перемещения каждого из шести шарниров зависит от необходимого направления увеличения рабочей зоны.



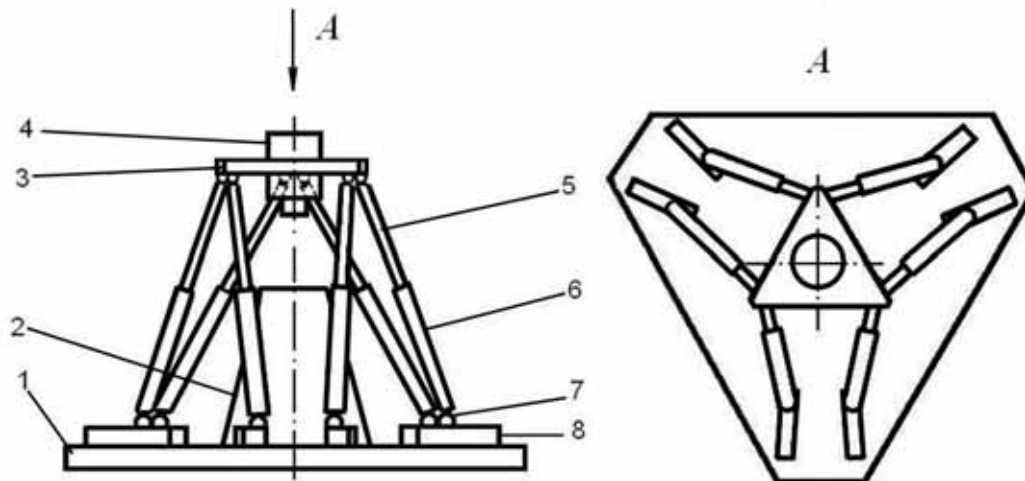


Рис. 9. Станок-гексапод с управляемой формой рабочего пространства:  
 1 – неподвижная платформа; 2 – стол; 3 – подвижная платформа; 4 – РО;  
 5 – шток штанги; 6 – корпус штанги; 7 – шарнир; 8 – направляющая

Другим подобным решением является трипод (см. рис. 10), разработанный на кафедре «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета [4].

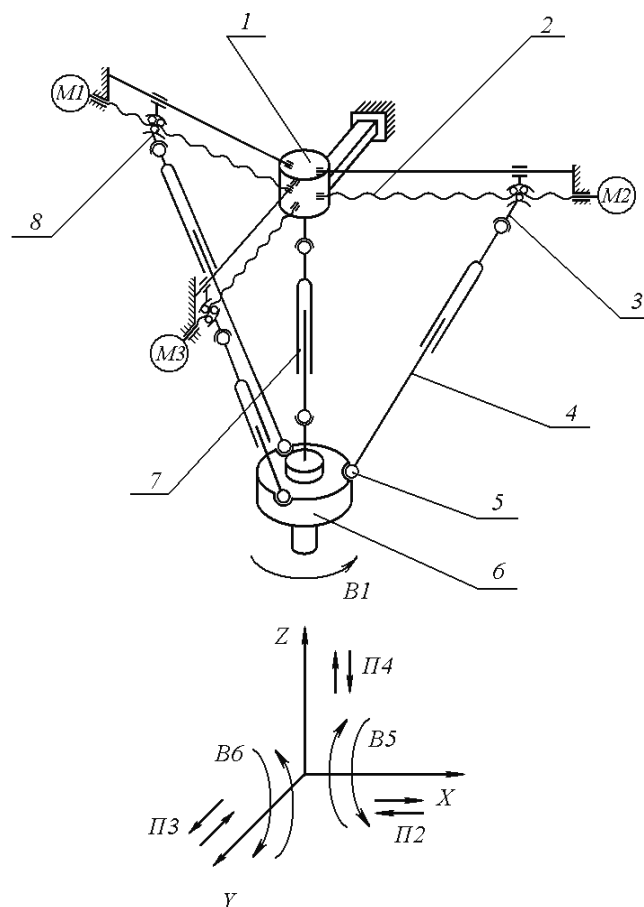


Рис. 10. Структурно-кинематическая схема параллельного механизма:  
 1 – центральная часть основания; 2 – ходовой винт; 3 – верхний шарнир; 4 – приводная телескопическая штанга; 5 – нижний шарнир; 6 – нижняя платформа с инструментальной головкой;  
 7 – центральная штанга; 8 – каретка; M1, M2, M3 – электродвигатели приводов кареток

Механизм содержит неподвижное основание, состоящее из центральной части 1 и трех ходовых винтов 2, расходящихся от центральной части лучами через каждые  $120^\circ$ , нижнюю платформу 6 и три телескопические приводные штанги 4, приводимые электродвигателями (на схеме не показаны). Приводные штанги 4 и центральная неприводная штанга 7 связывают основание и нижнюю платформу с помощью шарниров 3 и 5. Верхние шарниры 3 установлены на каретках 8, приводимых электродвигателями М1, М2, М3.

В станке объединены элементы, присущие механизмам с изменяемой длиной штанг и постоянной длиной штанг. От механизма с изменяемой длиной штанг здесь имеются приводные телескопические штанги 4 с двигателями (на схеме не показаны) и центральная штанга 7. От механизмов с постоянной длиной штанг имеются каретки 8 на направляющих.

В данной конструкции движения подвижной платформы могут реализовываться следующими способами:

- 1) путем изменения длин приводных телескопических штанг при фиксированном заданном положении верхних шарниров;
- 2) путем перемещения верхних шарниров приводных телескопических штанг при неизменных заданных длинах приводных телескопических штанг;
- 3) путем перемещения верхних шарниров приводных телескопических штанг вдоль ходовых винтов с одновременным изменением длин приводных штанг.

В данной статье приведена лишь незначительная часть примеров использования МПС в металлорежущих станках. Но даже приведенные примеры свидетельствуют о перспективности использования МПС в будущем.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Кузнецов, Ю. Н. Компоновки станков с механизмами параллельной структуры / Ю. Н. Кузнецов, Д. А. Дмитриев, Г. Е. Диневиц; под ред. Ю. Н. Кузнецова. – Киев-Херсон: ПП Вишемирский В.С., 2010. – 471 с.
2. Бушуев, В. В. Механизмы параллельной структуры в машиностроении / В. В. Бушуев, И. Г. Хольшев // СТИН. – 2001. – № 1. – С. 3-8.
3. Потапов, В. А. По материалам выставки ЕМО'2001 и зарубежной печати / В. А. Потапов, А. А. Воеводов // The parallel universe. V. Maier, American Machinist, 2001 V. 145, Nr. 8, P. 74-77. [www.americanmachinist.com](http://www.americanmachinist.com)
4. Пат. RU 115276 B23Q1/00. Параллельный механизм / Щелкунов Е. Б., Щелкунова М. Е., Виноградов С. В., Самар Е. В. – № 2011134223/02; заявл. 15.08.11; опубл. 27.04.12.