

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

С. В. Каменев

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СТАНКОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника и 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

Оренбург
2017

УДК 621.9:621.865.8(075.8)
ББК 34.63-5я73+32.816я73
К18

Рецензент – доцент, кандидат технических наук И. В. Парфенов

Каменев, С. В.

К18 Основы построения станков с параллельной кинематикой: учебное пособие / С. В. Каменев; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 127 с.
ISBN 978-5-7410-1662-6

В учебном пособии рассмотрена история появления и развития механизмов с параллельной кинематикой, и описаны их различные разновидности, используемые в современной промышленности. При этом основное внимание уделяется станкам с параллельной кинематической структурой, представляющим новое перспективное направление в станкостроении. Приводятся сведения о кинематике и конструктивных особенностях существующих станков данного типа, а также освещены вопросы их калибровки и компьютерного управления.

Учебное пособие предназначено для студентов направлений подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника и 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, изучающих такие дисциплины, как «Расчет и конструирование станков», «Конструирование мехатронных модулей», «Методология конструирования станков».

Учебное пособие подготовлено в рамках проекта по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса («Новые кадры ОПК – 2016»)

УДК 621.9:621.865.8(075.8)
ББК 34.63-5я73+32.816я73

ISBN 978-5-7410-1662-6

© Каменев С. В., 2017
© ОГУ, 2017

Содержание

Введение	5
1 Общие сведения о станках с параллельной кинематикой.....	6
1.1 Понятие станков с параллельной кинематической структурой	6
1.2 История развития механизмов с параллельной кинематикой	8
1.3 Промышленное использование параллельных механизмов	14
1.3.1 Технологии механической обработки	14
1.3.2 Позиционирующие устройства	22
1.3.3 Погрузочно-разгрузочные и сборочные роботы	24
1.3.4 Координатно-измерительная техника	26
1.3.5 Многофункциональные роботы	29
1.4 Контрольные вопросы.....	31
2 Конструктивные особенности станков с параллельной кинематикой	33
2.1 Классификация станков с параллельной кинематикой	33
2.2 Механизм гексапода.....	37
2.3 Компоновки гексаподов.....	39
2.3.1 Гексапод 6-6.....	40
2.3.2 Гексапод 6-3.....	40
2.3.3 Гексапод 3-3.....	41
2.4 Линейный привод стоек.....	41
2.4.1 Гексаподы с телескопическими стойками (система «Ingersoll»)	43
2.4.2 Гексаподы со стойками винтового типа (система «Hexel» и «Geodetic»).....	46
2.5 Основные конструктивные элементы гексаподов	49
2.5.1 Стойки	49
2.5.2 Сферический привод.....	51
2.5.3 Шарниры	54
2.5.4 Шпиндель	61
2.5.5 Поворотная головка	64
2.5.6 Базовая платформа	66
2.5.7 Энкодеры.....	67

2.5.8 Система управления.....	69
2.6 Контрольные вопросы.....	71
3 Характеристики гексаподов	73
3.1 Достоинства гексаподов	73
3.2 Ограничения гексаподов	78
3.3 Контрольные вопросы.....	79
4 Математические модели гексапода	80
4.1 Обратная кинематическая модель гексапода	80
4.2 Прямая кинематическая модель гексапода.....	84
4.3 Прямая кинематика с использованием дополнительных датчиков	87
4.4 Динамическая модель гексапода	88
4.4.1 Модель Д'Аламбера.....	88
4.4.2 Вывод уравнений динамики гексапода	89
4.4.3 Вычисление матрицы Якоби для кинематики гексапода.....	91
4.5 Планирование траектории движения	94
4.6 Контрольные вопросы.....	95
5 Калибровка станков с параллельной кинематикой.....	96
5.1 Понятие калибровки.....	96
5.2 Математический подход.....	98
5.3 Измерение внешними методами	101
5.4 Стратегии самокалибровки	108
5.5 Калибровка с использованием механических ограничений	110
5.6 Проблемы методов калибровки	111
5.7 Контрольные вопросы.....	112
6 Управление станками с параллельной кинематикой.....	114
6.1 Традиционные схемы управления для станков с параллельной кинематикой... ..	114
6.2 Специальные модели для станков с параллельной кинематикой	116
6.3 Динамический контроллер	118
6.4 Контроллер на основе прогнозирующей модели.....	121
6.5 Контрольные вопросы.....	124
Список использованных источников	126

Введение

Современный человек прошел в своем развитии миллионы лет, и вместе с ним развивались его орудия труда. Их образцы непрерывно сменяли друг друга на протяжении всей истории человечества. Станки различного назначения, изобретенные и производимые человеком, также развивались от первых примитивных инструментов до новейшего компьютеризированного оборудования. В истории развития станков можно выделить несколько этапов, последним из которых является разработка в 50-х годах 20-го века станков с числовым программным управлением.

Со времени появления этих станков требования к ним очень быстро менялись. Общей тенденцией в технологии обработки материалов резанием является постоянное повышение производительности за счет увеличения скоростей резания и подач. Однако, несмотря на то, что использование в станках интегрированных шпинделей и линейных двигателей позволяет достичь очень высоких скоростей, их величины на практике ограничиваются механикой традиционной конструкции существующих станков.

Для преодоления ограничений традиционных станков (с последовательной кинематикой) в 90-х годах 20-го века была разработана новая концепция станка с параллельной кинематикой. Машины, основанные на этой концепции, и в настоящее время известные как параллельные роботы, гексаподы или механизмы с параллельной кинематикой представляют собой замкнутые механизмы, обладающие повышенными характеристиками по жесткости, точности и грузоподъемности в сравнении с традиционным оборудованием.

При всех своих достоинствах, станки с параллельной кинематической структурой пока еще не получили широкого распространения в промышленности, и представлены на рынке металлообрабатывающего оборудования ограниченным числом доступных коммерческих образцов. Это объясняется рядом проблем, связанных с особенностями их проектирования и практического использования, рассмотрению которых посвящено предлагаемое учебное пособие.

1 Общие сведения о станках с параллельной кинематикой

1.1 Понятие станков с параллельной кинематической структурой

Большинство применяемого в промышленности металлообрабатывающего оборудования, представленного традиционными фрезерными, сверлильными и токарными станками, промышленными роботами и т.п., имеет кинематическую структуру с последовательными или незамкнутыми цепями, в связи с чем каждая присутствующая в них ось несет последующую ось, включая ее приводы и соединения (рисунок 1). Конструкции такого оборудования обычно основаны на ортогональной композиции трех линейных осей, которая может быть дополнена двумя вращательными осями для упрощения использования картезианской системы координат при управлении пространственными перемещениями.

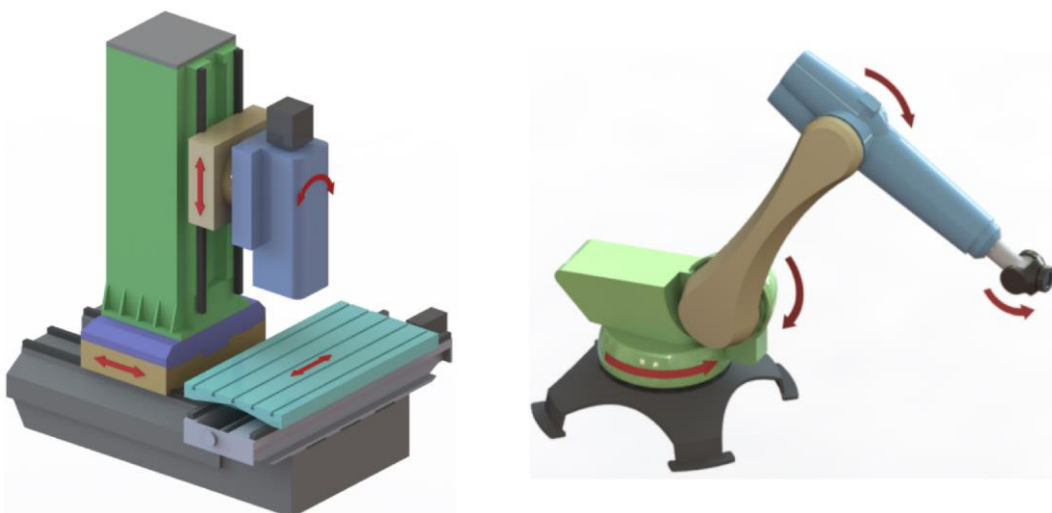


Рисунок 1 – Традиционная архитектура механизмов с последовательной кинематикой

Системы с последовательными или сложенными осями легко поддаются кинематическому анализу, но способствуют накоплению погрешностей, поскольку неточное позиционирование одной оси вызывает нарушение позиционирования другой оси, что умножает погрешности с каждым последующим звеном. Вдобавок к этому недостатку традиционные станки со сложенными осями, имеющие станину, суппорт и тому подобные детали, требуют установки на массивный бетонный фундамент для обеспечения стабильности несущей системы. Это приводит к тому, что

станок становится громоздкой производственной единицей, занимающей значительную площадь в цехе и имеющей проблемы транспортировки.

В связи с этим станки, основанные на замкнутой параллельной кинематике, представляют собой новую многообещающую технологию двадцать первого века, которая в настоящее время привлекает к себе все большее внимание со стороны ведущих станкостроительных фирм. Некоторые их прототипы, предложенные различными компаниями, уже доказали общую целесообразность использования систем с параллельной кинематикой. Такие системы характеризуются, как механизмы, построенные на кинематической структуре, которая позволяет осуществлять перемещения с N степенями свободы посредством подвижной платформы, несущей режущий инструмент, и неподвижного основания, соединенных между собой N независимыми кинематическими цепями. При этом каждая цепь состоит максимум из двух звеньев, соединение которых имеет одну степень свободы, а движение конструкции обеспечивается N линейными приводами, по одному на каждую цепь [16].

В настоящее время известны различные концепции механизмов с параллельной кинематикой, наиболее распространенными из которых являются так называемые триподы и гексаподы (рисунок 2).

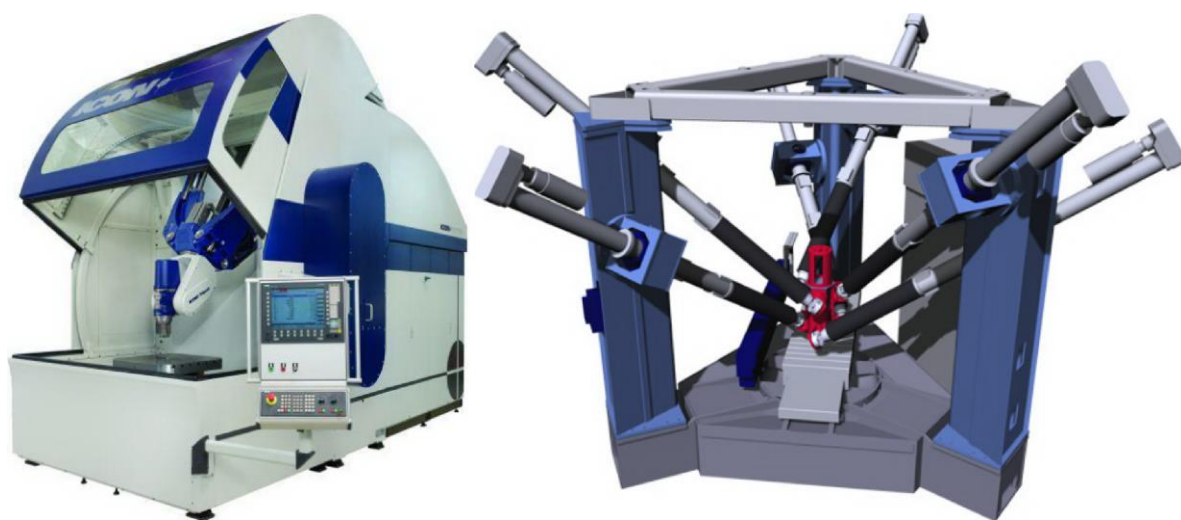


Рисунок 2 – Станки типа трипод и гексапод

1.2 История развития механизмов с параллельной кинематикой

Потребности в более высоких характеристиках станков и промышленных роботов общего назначения постоянно растут. В частности, необходимость адаптивной автоматизации во многих областях производства привела к повышению требований к технологическому оборудованию по точности и производительности обработки деталей и их сборки в узлы, точности контрольно-измерительных операций, нагрузочной способности оборудования, его эксплуатационной гибкости, надежности и длительности операционного цикла.

Общим трендом, направленным на удовлетворение этих требований является использование механизмов с параллельной кинематикой, которые обладают хорошим потенциалом, определяемым их высокой жесткостью, точностью и нагрузочной способностью. Поэтому начавшиеся несколько десятилетий назад исследования в области машин и механизмов, размерного синтеза, моделирования кинематики и динамики, а также проектной оптимизации, направленные на разработку параллельных механизмов, в настоящее время существенно увеличились.

Еще несколько столетий назад, английские и французские математики (Рен в 1645 г., Коши в 1813 г., Лебег в 1867 г.) проявляли повышенный интерес к полиэдрическим механизмам. Благодаря этому увлечению появились первые теоретические работы, посвященные параллельным механизмам и, в частности, платформам на шести стойках. Однако эти работы не получили широкого распространения и были известны лишь очень ограниченному числу ученых.

В 1928 году Джеймсом Е. Гвиннетом (James E. Gwinnet) в качестве концептуального развлекательного аттракциона был предложен сферический параллельный робот (рисунок 3). Вероятно, он являлся первым пространственным параллельным механизмом. Изобретение представляло собой вращающуюся платформу, способную наклоняться в любом направлении, которую надлежало использовать в сочетании с подвижной картиной для акцентирования действия, изображенного на этой картине такого, как, например, раскачивания лодки на волнах или виража самолета. К сожалению, развлекательная индустрия того времени не проявила должного внимания к этому изобретению.

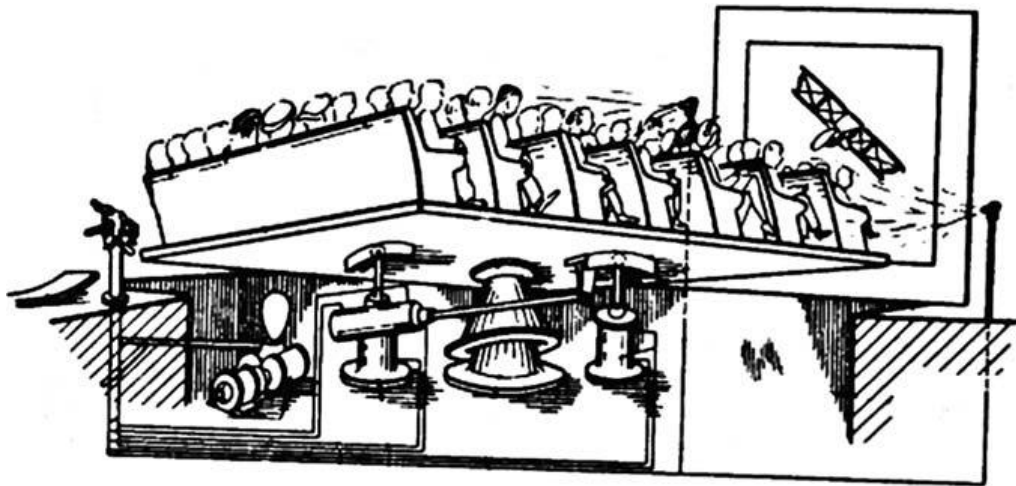


Рисунок 3 – Параллельный пространственный механизм Д. Е. Гвиннета

Десятью годами позднее Уиллард Л. В. Поллард (Willard L.V.Pollard) спроектировал оригинальную конструкцию параллельного робота для автоматической окраски распылением, который был заявлен, как первый промышленный параллельный робот. Этот робот на трех ногах имел возможность движения с пятью степенями свободы – тремя для позиционирования инструментальной головки и двумя другими для ее ориентации. Однако этот робот так и не был никогда построен, но впоследствии сын Полларда на его основе разработал и изготовил первый реальный промышленный параллельный робот (рисунок 4).

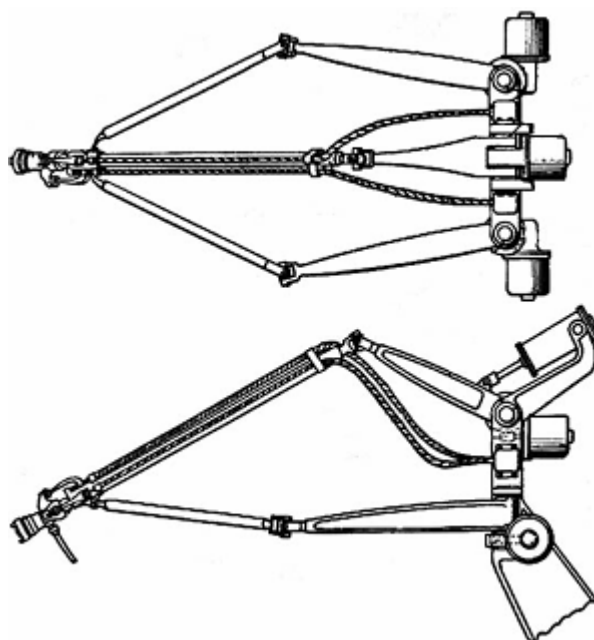


Рисунок 4 – Первый промышленный робот с параллельной кинематикой

В 1947 году доктор Эрик Гью (Eric Gough) сконструировал новый параллельный робот с шестью степенями свободы, который произвел революцию в робототехнике. Робот представлял собой первый октаэдральный гексапод, названный самим ученым универсальным механизмом. Он применялся, как оборудование для испытаний автомобильных шин, направленных на изучение их свойств под воздействием различных нагрузок. На рисунке 5 слева направо показана оригинальная конструкция машины образца 1954 г. и ее модернизированный вариант образца 2000 г.



Рисунок 5 – Первый октаэдральный гексапод конструкции Э. Гью

Данная машина состоит из шести одинаковых удлиняемых стоек, соединяющих фиксированное основание с подвижной платформой, на которой закрепляется шина. Кинематическая цепь, связанная с каждой из шести стоек от основания до платформы состоит из фиксированного шарнира Гука, подвижной тяги, призматического соединения, второй подвижной тяги и шарового шарнира, закрепленного на подвижной платформе. Положение и ориентация подвижной платформы вместе с закрепленной шиной изменяется в соответствии с вариацией длины тяг. Шина приводится во вращение конвейерной лентой, и такой механизм позволяет оператору измерять износ и задиры шины при различных условиях ее эксплуатации.

Описанный универсальный механизм сыграл важную роль в области промышленных роботов и все еще имеет большое значение в научных исследованиях парал-

лельных манипуляторов, которые имеют множество значительных преимуществ по сравнению с традиционными механизмами с последовательной кинематикой. К числу таких преимуществ относятся повышенная жесткость и грузоподъемность, повышенное отношение силы и момента, пониженные моменты инерции, замечательные динамические характеристики и меньшая накопленная погрешность позиционирования, к тому же для параллельных роботов более просто решается обратная кинематическая задача, что удобно для управления в реальном времени.

В 1965 году Стюарт (Stewart) опубликовал работу, описывающую подвижную платформу с шестью степенями свободы, которая была разработана, как пилотный симулятор. Так называемая платформа Стюарта представляла собой параллельный механизм, производный от октаэдрального гексапода (рисунок 6). Работа Стюарта внесла значительный вклад в дальнейшую разработку параллельных механизмов. В этой работе он предложил много вариантов использования гексапода, которые со временем стали реальностью. Также благодаря нему в научной среде получила популярность конструкция Гью. По существу, вклад Гью установил веху в разработке параллельных роботов в промышленности, в то время как Стюарт был тем, кто развил его в научной среде.

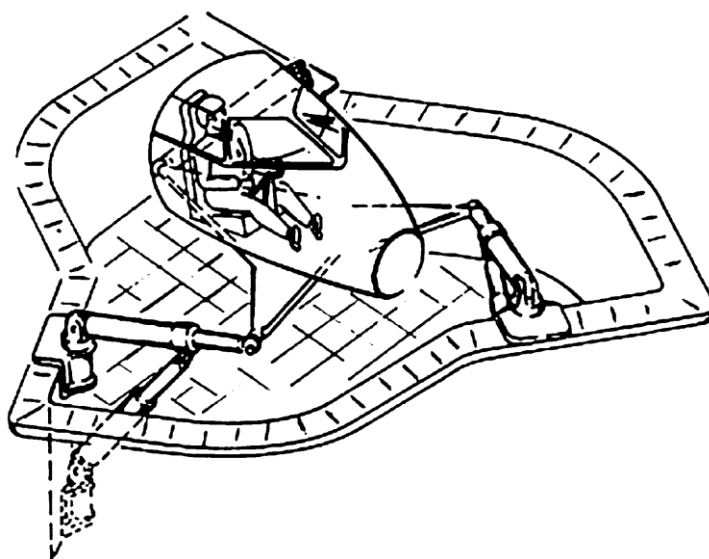


Рисунок 6 – Оригинальная платформа Стюарта

За прошедшие десятилетия различными исследователями были предложены и изготовлены множество новых механизмов, но, тем не менее, не так много из них были приняты промышленностью. Здесь следует упомянуть инженера Клауса Каппеля (Klaus Carpel), работавшего в исследовательской лаборатории Института Франклина в Филадельфии, который в 1962 г. предложил использовать октаэдральный гексапод, подобный конструкции Гью, в качестве симулятора движения. Каппель получил патент на свое изобретение в 1967 г. Идея Каппеля заинтересовала авиастроительную фирму «Sikorsky Aircraft Division of United Technologies», по запросу которой была разработана конструкция авиасимулятора вертолета (рисунок 7), которая является первым авиасимулятором, основанным на параллельной кинематике. Впоследствии Каппель также разработал различные робототехнические системы с параллельной кинематикой для вибрационных испытаний. Однако прошло много времени прежде, чем эти разработки были приняты в промышленности [17].

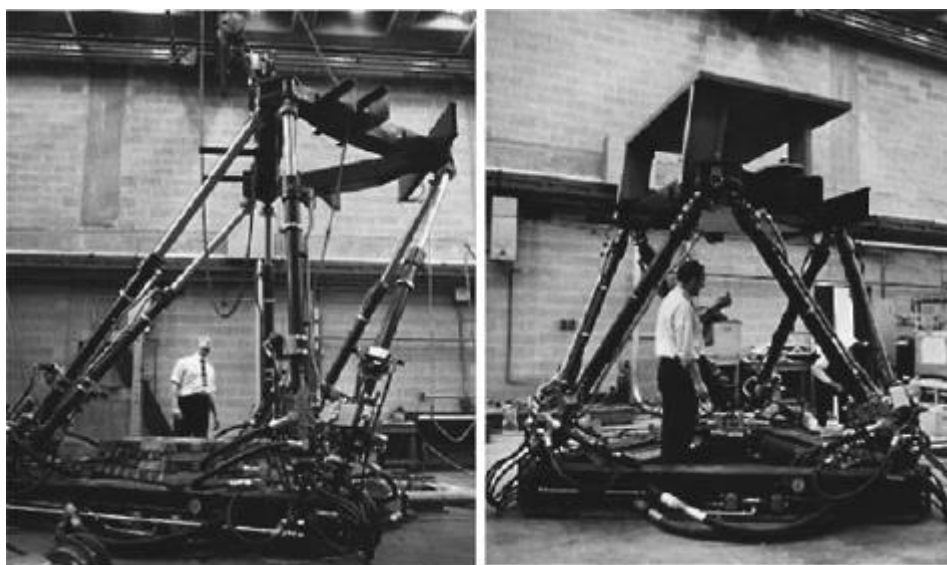


Рисунок 7 – Первый авиасимулятор, основанный на октаэдральном гексапode

В 1980 годах профессором Реймондом Клавелем (Reymond Clavel) и изобретателем Карлом-Эриком Ньюманном (Karl-Erik Neumann) были разработаны наиболее успешные на сегодняшний день конструкции роботов с параллельной кинематикой, соответственно получившие название «Delta robot» и «Tricept robot». Обе конструк-

ции имели коммерческий успех и в настоящее время применяются в различных отраслях промышленности [10].



Рисунок 8 – Конструкции роботов «Tricept» и «Delta»

В 1994 г. две американских станкостроительных компании «Giddings & Lewis» и «Ingersoll» удивили мир, представив новый тип станка (рисунок 9). Платформа-гексапод, совместно разработанная в 1990 г. компаниями «Mannesmann» и «Rexroth» и использованная, как испытательная платформа для автомобилей не привлекла к себе так много внимания, как презентация этих станков на выставке-продаже 1994 г. в Чикаго. Оба представленных станка были основаны на концепции структуры параллельной кинематики, разработанной Стюартом в 1965 г. Обе компании назвали свой новый образец станка гексаподом [1, 10].

Прототип компании «Ingersoll» представлял собой 12-узловой гексапод, смонтированный на октаэдрической раме со шпинделем, направленным вертикально вниз на обрабатываемую деталь. Прототип компании «Giddings & Lewis», получивший название «Variax Hexacenter», представлял собой фрезерный станок для высокоскоростного фрезерования алюминия, разработанный на основе конструкции авиасимулятора, с перекрещивающимися стойками и шпинделем, ориентированным вниз от платформы в направлении рабочего пространства, ограниченного станком.



Рисунок 9 – Гексаподы компаний «Ingersoll» (слева) и «Giddings & Lewis» (справа)

Впоследствии еще ряд различных компаний представили миру свои модели станков с параллельной кинематикой, некоторые из которых рассмотрены ниже.

1.3 Промышленное использование параллельных механизмов

1.3.1 Технологии механической обработки

Среди областей практического применения параллельных механизмов одной из наиболее экономически выгодных является механическая обработка материалов, позволяющая использовать все их достоинства в полной мере. При этом типовой станок-гексапод обеспечивает подвижность, жесткость и точность, не уступающие традиционным пятикоординатным станкам. Типовые варианты использования гексаподов в области механической обработки включают в себя обработку пресс-форм и штампов, лопаток турбин и других деталей сложной геометрической формы.

Обеспечение высокой жесткости и точности традиционных многокоординатных шлифовальных станков обходится слишком дорого. Поэтому шлифовальный станок-гексапод представляется более экономичным и современным устройством, имеющим гибкую архитектуру, приспособленную для высокоточного шлифования. Обычно использование шлифовальных станков-гексаподов связано с заточкой режущих инструментов и высокоточным шлифованием керамики.

Многообразно применение гексаподов в области нетрадиционных методов обработки. Гексаподы обеспечивают возможность контурной обработки и поэтому используются для лазерной резки, сварки и закаливания листового металла. Аналогичным образом они могут быть приспособлены для водоструйной обработки под высоким давлением.

В других областях обработки гексаподы используются для:

- обработки малых объемов дорогостоящих компонентов высокой сложности, таких как титановые изделия, используемые в военной авиационной технике;
- обработки легких металлов и сплавов;
- контурной обработки поверхностей большой площади и фрезерования штампов для прецизионной штамповки изделий из листового металла [16].

Однако, несмотря на существование в настоящее время весьма перспективных станков, основанных на параллельной структуре, лишь немногие из них используются в промышленности. Их медленное продвижение объясняется различными факторами, среди которых можно выделить следующие:

1) после десятка лет разработки такие структуры пока еще не достигли уровня проработки классических станков, опыт проектирования которых накапливался столетиями;

2) свойства параллельных структур коренным образом отличаются от свойств их классических аналогов с последовательной кинематикой. Данным фактом часто пренебрегают производители, которые концентрируют усилия главным образом на разработке механических компонентов, в то время как, более общие конструктивные решения остаются без внимания. Это приводит к созданию прототипов с серьезными конструкторскими ошибками;

3) параллельные станки и роботы по своей сути являются нелинейными, в то время как, системы ЧПУ, которые используются для управления параллельными структурами, изначально разработаны для линейных машин. Не нужно быть экспертом в теории управления для понимания того, что использование классического контроллера ЧПУ для параллельного робота не позволит управлять им наилучшим образом. Выполненная развернутая симуляция совокупной производственной си-

стемы (CAD, контроллер и параллельный станок), включающая все возможные источники погрешности показывает следующее. Погрешность позиционирования параллельного станка, при условии, что он имеет хорошую конструкцию, на 10-20 % состоит из погрешностей, обусловленных CAD-системой, на 70 % из погрешностей, происходящих от системы управления и лишь на 10 % из погрешностей, вызванных собственно станком. Поэтому, очевидно, что в данном случае должны быть разработаны специальные контроллеры для параллельных структур, а выходные данные CAD-систем должны быть адаптированы для параллельных станков.

Потенциал использования параллельных структур в области станкостроения мотивировал большой объем научно-исследовательских работ в этом направлении, особенно, что касается механических компонентов, контроля вибраций и синтеза структур с числом степеней свободы более шести. На самом деле большинство задач механической обработки требуют только от 3 до 5 степеней свободы (хотя избыточная подвижность, как это будет показано ниже, может давать некоторые преимущества). Далее будут упомянуты только промышленные образцы параллельных станков, хотя за последние годы было разработано множество академических прототипов. Также следует заметить, что некоторые промышленные образцы, которые были предложены в 2000-х годах, теперь более недоступны либо потому что выпускающие их компании сменили направление своей деятельности, либо по причине исчезновения этих компаний с быстроразвивающегося рынка станочного оборудования [9].

Наиболее простую параллельную кинематическую структуру имеют станки с двумя степенями свободы, которые доступны для приобретения у ряда производителей. Здесь следует упомянуть, например, станок модели «Genius 500» (изображен на рисунке 10 слева) производства немецкой компании «Cross Hüller» (входит в концерн «ThyssenKrupp AG») или станок модели «Trijoint 900H» (изображен на рисунке 10 справа) производства чешской компании «Kovosvit Mas». В обоих станках используются плоская кинематическая цепь, обеспечивающая шпинделю две линейных степени свободы.

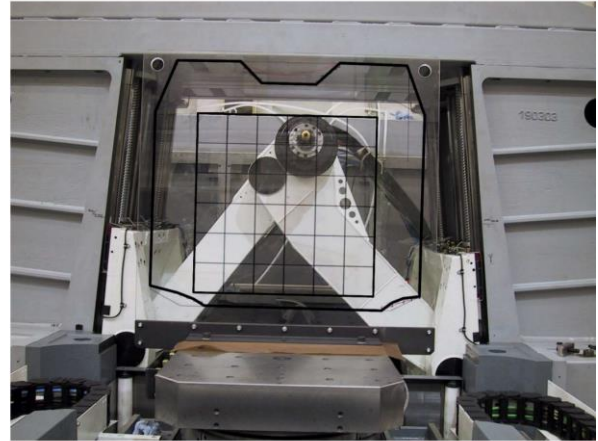
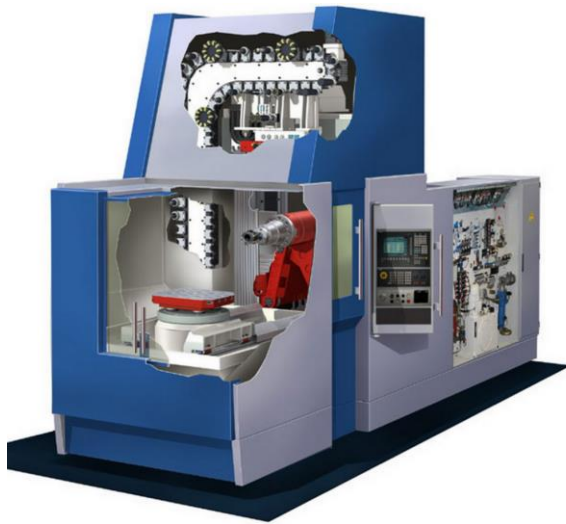


Рисунок 10 – Двухкоординатные станки с параллельной кинематикой моделей «Genius 500» (слева) и «Trijoint 900H» (справа)

Различные параллельные станки с тремя степенями свободы представлены на рынке такими моделями, как: «Sprint Z3» (производство «DS Technology») с двумя угловым ($\pm 45^\circ$) и одной линейной (до 370 мм) степенями свободы, «SKM 400» (производство «Starrage-Heckert»), «Index V100», «Urane SX» (производство «Comau») и др. На рисунке 11 слева представлена обрабатывающая головка «Sprint Z3», а справа параллельный станок «SKM 400». На рисунке 12 показан параллельный станок «V100» производства немецкой компании «Index».

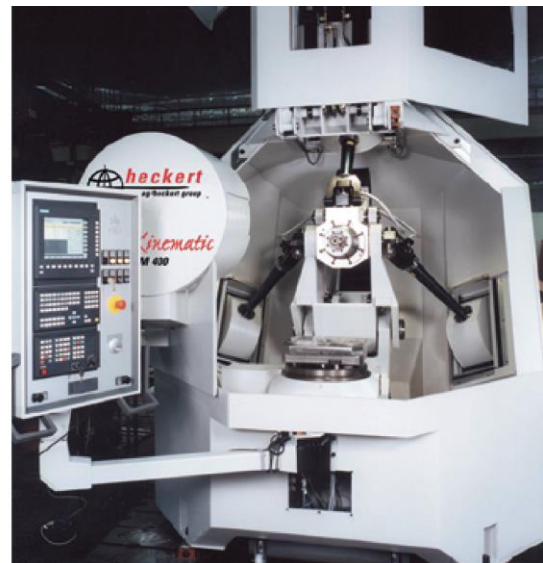


Рисунок 11 – Обрабатывающая головка «Sprint Z3» (слева) и станок «SKM 400» (справа)

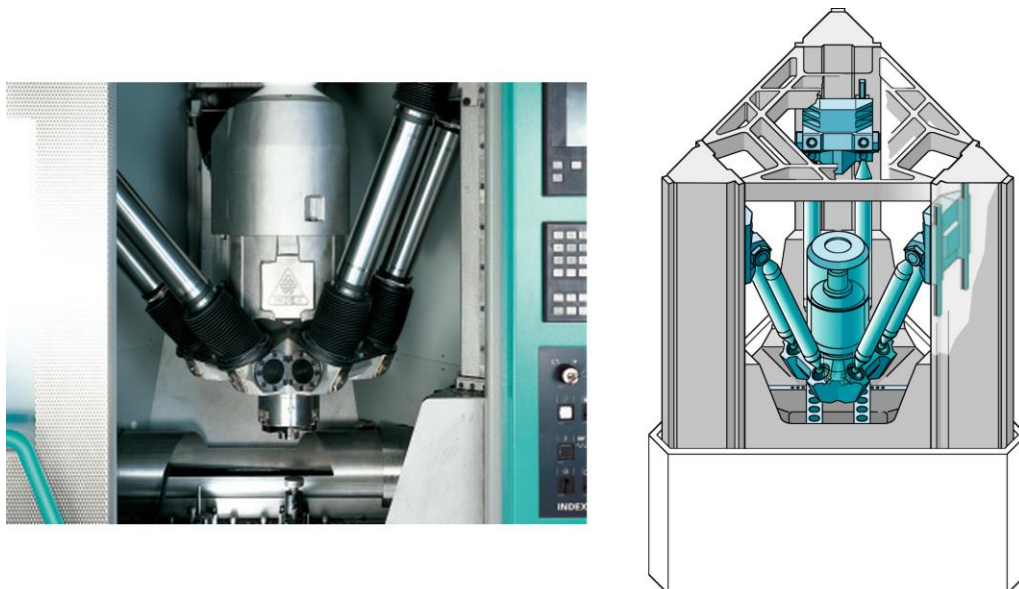


Рисунок 12 – Станок модели «Index V100» на основе «Delta» робота

Среди существующих параллельных станков с пятью степенями свободы интерес представляют следующие модели [9, 10, 14]:

- линейка станков-пентаподов немецкой компании «Metrom», предназначенных для высокоскоростной обработки разнообразных материалов (рисунок 13);
- высокоскоростной станок-гексапод «Mikromat 6X» одноименной немецкой компании (рисунок 14);

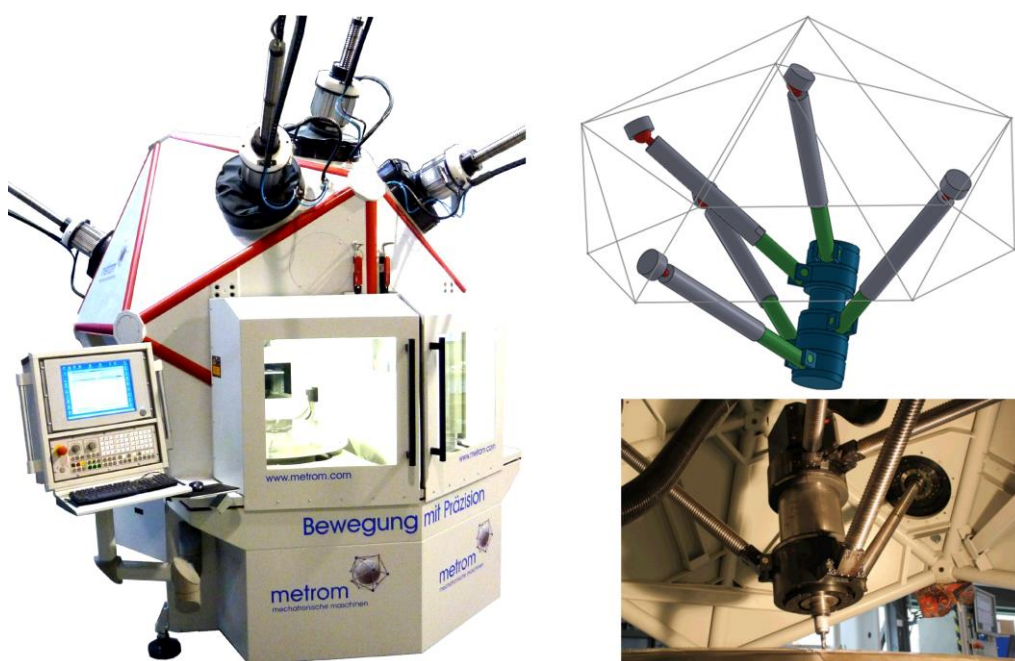


Рисунок 13 – Станок-пентапод модели «P1000» производства компании «Metrom»



Рисунок 14 – Станок-гексапод модели «Mikromat 6X»

- станки-гексаподы «Cosmo Center PM-600» (рисунок 15 слева) и «HexaM» (рисунок 15 справа) производства японских компаний «Okuma Corporation» и «Toyota»;

- высокоскоростной обрабатывающий центр «Гексамех-1» с параллельной структурой производства российского ООО «Савеловский машиностроительный завод» (СМЗ), изображенный на рисунке 16;



Рисунок 15 – Станки-гексаподы моделей «Cosmo Center PM-600» и «HexaM»



Рисунок 16 – Обрабатывающий центр с параллельной структурой «Гексамех-1»

- параллельный обрабатывающий модуль «СМW 380» (рисунок 17 слева), разработанный усилиями нескольких исследовательских лабораторий, включая INRIA (национальный исследовательский институт во Франции, работающий в области компьютерных наук, теории управления и прикладной математики);

- станок-гексапод «Pegasus» (рисунок 17 справа), выпускаемый немецкой компанией «Reichenbacher Hamuel GmbH» и предназначенный для высокоскоростной обработки древесины;



Рисунок 17 – Обрабатывающий модуль «СМW 380» (слева) и станок-гексапод «Pegasus» (справа)

- гексапод «DR Mader Hexapod» (рисунок 18) производства немецкой компании «Dr. Mader Maschinenbau», также производящей симуляторы на основе параллельной кинематики;

- ранее упоминавшийся «Octahedral Hexapod» (рисунок 9) производства «Ingersoll» (ныне входит в «Camozzi Group») и ряд других.



Рисунок 18 – Гексапод модели «DR Mader Hexapod»

Исследования, связанные с улучшением параллельных станков, все еще продолжаются. При этом главными направлениями исследований являются контроль вибраций, совершенствование методов калибровки, повышение жесткости, определение траекторий движения, анализ точности и разработка новых конструкций станков. Кроме проектирования станков для относительно тяжелых режимов работы также ведутся работы по созданию более легких станков для обработки мягких материалов таких, как древесина (например, проект LME). Нужно заметить, что при разработке конструкций станков большое внимание уделяется конфигурациям узлов, по которым осуществляется соединение платформ, поскольку это оказывает значительное влияние на характеристики станков [9].

Технические характеристики некоторых известных моделей пятикоординатных станков с параллельной кинематикой приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1 – Технические характеристик различных моделей станков с параллельной кинематикой

Производитель, модель	Ingersoll, НОН-600	Mikromat, 6X	СМЗ, Гексамех-1	Toyoda, HexaM	Okuma, Cosmo Center PM-600
Перемещения: линейные X/Y/Z, мм угловые A/B	600/600/800 ±15°/±15°	630/630/630 ±30°/±30°	3000/800/700 ±30°/±25°	Ø500/350 ±20°/±20°	Ø600/400 ±25°/±25°
Мощность шпинделя, кВт	37,5	16	30	15	9/6
Макс. скорость вращения шпинделя, об/мин	10000	30000	24000	24000	30000
Макс. скорость подачи, м/мин	40	30	30	100	100
Макс. ускорение, м/с ²	3,5	10	10	20	14,7
Волюметрическая точность, мкм	25	10	50	15	7

1.3.2 Позиционирующие устройства

Высокоточные позиционирующие устройства являются самой популярной областью применения параллельных механизмов. Здесь, прежде всего, следует упомянуть микропозиционирующие устройства для оптоэлектронной и полупроводниковой промышленности. Приводная система практически во всех этих устройствах включает в себя стойки изменяемой длины, приводимые в действие при помощи разнообразных линейных приводов. Обычно для позиционирования и ориентации рабочей платформы используются электромеханические шарико-винтовые передачи. И лишь в некоторых отдельных случаях, когда требуется очень маленький ход, используются пьезоэлектрические приводы [9]. В настоящее время микропозиционирующие параллельные устройства на рынке представлены продукцией различных компаний, а именно:

- немецких компаний «Physik Instrumente» и «miCos», предлагающих большой модельный ряд позиционирующих гексаподов (рисунок 19 слева) на основе платформы Гью с разрешением менее одного 1 мкм и 6-координатные позициони-

рующие системы «SpaceFAB» (рисунок 19 справа), предназначенные для укладки волокон в оптических кабелях с повторяемостью $\pm 0,5$ мкм;



Рисунок 19 – Гексапод модели H-850 (слева) и SpaceFAB модели SF-3000 LS (справа)

- компании «ALIO Industries» (США), выпускающей высокоточные гексаподы и триподы (рисунок 20) с гибридной кинематической структурой, имеющие повторяемость 50 нм, и предназначенные для использования в оптоволоконной, полупроводниковой и медицинской промышленности, а также для микрообработки;

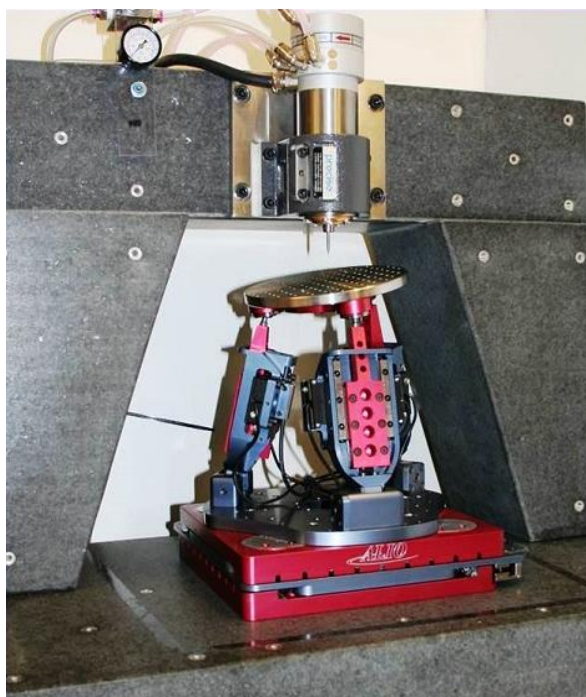


Рисунок 20 – Пятикоординатный «наностанок» на основе трипода «ALIO»

- компании «Newport Corporation» (США), выпускающей серию гексаподов НХР (рисунок 21) с повторяемостью до 0,5 мкм, которые находят применение в оптоволоконной промышленности, биоинженерии, астрономии и микрообработке.



Рисунок 21 – Укладка волокон оптического кабеля при помощи гексапода «Newport»

1.3.3 Погрузочно-разгрузочные и сборочные роботы

Применение параллельных роботов для погрузочно-разгрузочных и сборочных работ было рассмотрено в робототехнике уже достаточно давно. Однако их уменьшенная по сравнению с последовательными роботами рабочая зона определила то, что начавшаяся в 80-х годах прошлого века быстрая разработка промышленных роботов была направлена только на системы с последовательной кинематикой. Но уже в конце 80-х годов параллельные роботы нашли подходящую область применения и доказали свое преимущество над последовательной кинематикой [9].

В настоящее время существует две основных сферы применения параллельных роботов, где они превосходят механизмы с последовательной кинематикой, и это задачи, для которых требуется высокая скорость и высокая жесткость. Например, в упаковочной промышленности уже используются параллельные роботы, имеющие малый вес и высокую скорость движения. Здесь себя зарекомендовали две системы «Delta-robot» (выпускается различными компаниями) и «Hexa-robot» (компания «Toyota»). В обеих этих системах используется привод от коленчатых рычагов (рисунок 22). Благодаря малому весу подвижных частей они могут развивать уско-

рение до 20g в отдельных точках рабочей зоны и обеспечивать воспроизводимую точность позиционирования в пределах 10 мкм.



Рисунок 22 – Высокоскоростные роботы «Delta» (слева) и «Неха» (справа)

Вторая сторона практического использования параллельных роботов связана с более чем простым оперированием предметами и сборкой. Различные компании и исследовательские институты в различное время пытались создать параллельный механизм, занимающий промежуточное положение между роботами и станками. Это означает, что его можно использовать для решения производственных задач, где последовательные роботы не обеспечивают достаточную точность или жесткость, а традиционные станки не обладают достаточным рабочим пространством или являются слишком дорогими для их воспроизведения в требуемых размерах. В этой связи хорошие шансы на рынке оборудования имеют системы с гибридной кинематикой, потому что они имеют большую маневренность по сравнению с гексаподами.

В качестве примеров подобных систем можно назвать серию роботов «Tricept» (компания «PKMtricept SL», Испания), предназначенных для чистовой механической обработки и сборки с большими нагрузками в направлении оси Z, и робот «MultiCraft 560» одноименной норвежской компании, предназначенный для шлифования деталей сложной геометрической формы, таких как лопасти пропеллеров (рисунок 23).



Рисунок 23 – Робот «Tricept T605» (слева) и робот «MultiCraft 560» (справа)

Помимо высокой подвижности, триподы благодаря наличию шарнирного запястья на своем конце улучшают до $1/3$ невыгодное отношение размера рабочего пространства к размеру станка, характерное для станков с чистой параллельной кинематикой. Для гексаподов это отношение составляет от $1/6$ до $1/10$, для обычных станков – от $1/3$ до $1/4$. Жесткость таких гибридных систем в предпочтительном направлении (ось Z) находится в диапазоне от 6 до 30 Н/мкм. Также они имеют более высокую точность по сравнению с последовательными роботами.

1.3.4 Координатно-измерительная техника

Гексапод является идеальной для цеховых условий координатно-измерительной машиной (КИМ). КИМ, построенные на параллельной кинематике обеспечивают полное шестикоординатное управление измерительного щупа и способны контролировать труднодоступные поверхности деталей, а так же способны производить измерения с производительностью от 2 до 5 раз большей, чем традиционные КИМ.

В конструкции таких КИМ отсутствуют прямолинейные изнашиваемые направляющие и воздушные подшипники, наиболее сложные в изготовлении и уязвимые в эксплуатации. В качестве базовых элементов используются сферические

шарниры, технология применения которых позволяет достигать точности менее 0,05 мкм. Интегрированная система прецизионной компенсации погрешностей от внешних воздействий избавляет от необходимости создавать специальные термостабильные помещения и поэтому КИМ с постоянной стабильностью работает как в цехе, так и в лабораторных условиях. В итоге, все перечисленные конструктивные особенности КИМ позволяют в режиме шестимерного зондирования производить точные измерения с повышенной производительностью деталей сложной геометрии.

Существующими примерами КИМ с параллельной кинематикой являются:

- НСММ (Hexapod Coordinate Measuring Machine), разработанная компанией «Perry Automation» (США);

- модельный ряд машин производства ООО «ЛАПИК» (Россия);

- машина модели «С2000» производства компании «Mikrolar, Inc» (США);

НСММ представляет собой координатно-измерительную машину параллельной архитектуры с пятью активными и одной пассивной стойкой (рисунок 24). Каждая активная стойка оснащена бесщеточным электродвигателем постоянного тока, энкодером, датчиками перебега и исходного положения, а также тормозом. При этом стойки выполнены полыми для обеспечения беспрепятственной работы лазерной интерферометрической системы. Эта лазерная система определяет длину каждой стойки с субмикронной точностью [18].

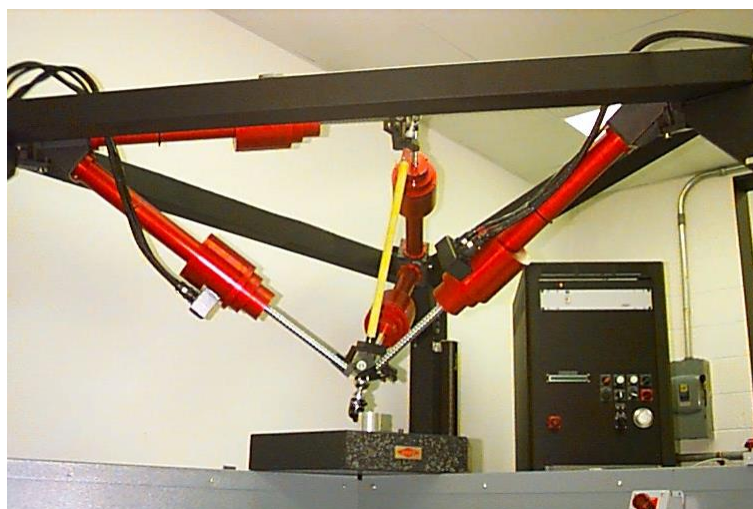


Рисунок 24 – Координатно-измерительная машина НСММ производства «Perry Automation»

Машина ООО «ЛАПИК» (рисунок 25) основана на октаэдральном гексапode с оригинальной конструкцией рамы, жесткость которой в 5 раз превосходит жесткость традиционных машин. Кинематическая схема машины представляет собой параллельную структуру в виде перевернутой пирамиды. В основании пирамиды располагаются сферические шарниры, которые служат точками отсчета для следящей системы. Следящая система состоит из излучателя и шести лазерных интерферометров с дискретностью отсчета перемещений 0,1 мкм, определяющих расстояния между соответствующими сферическим шарниром на неподвижной раме и элементом, расположенным на каретке.

Нужно добавить, что измерительная головка данной машины может быть заменена шпиндельной головкой, позволяющей выполнять финишную механическую обработку.



Рисунок 25 – Координатно-измерительная машина «КИМ-1000» (ООО «ЛАПИК») с измерительной (слева) и шпиндельной (справа) головкой

Особенностью машины «С2000» (рисунок 26) является ручной привод рабочей платформы. При выполнении измерений тактильный датчик, установленный на платформе, приводится оператором в контакт с измеряемой деталью. После чего вручную производится механическое сканирование детали. Во время этой операции

программное обеспечение машины отслеживает данные, поступающие от шести линейных энкодеров на стойках гексапода, и воспроизводит по ним измеряемую траекторию.

Полученная в результате измерений траектория может быть использована, например, для задания движения инструмента при последующем механическом удалении облоя на литых заготовках и т. п. В настоящее время практическое использование данного устройства осуществляется, главным образом, в сочетании с технологиями водоструйной обработки.



Рисунок 26 – Координатно-измерительная машина «С2000» производства «Mikrolar, Inc»

1.3.5 Многофункциональные роботы

На сегодняшний день известны две компании, выпускающие многофункциональные параллельные роботы, а именно японская компания «Fanuc Corporation» со своим роботом «F-200iB» и компания «Mikrolar, Inc» с несколькими моделями роботов, являющихся усовершенствованным вариантом робота «Hexabot» компании «Hexel Corporation». Оба робота представляют собой гексаподы с шестью степенями свободы, обладающие достаточно широким диапазоном функциональных возможностей, к которым относятся сварка, зачистка, сверление, фрезерование и позиционирование деталей [9].

На рисунке 27 слева показан робот «F-200iB» производства «Fanuc Corporation», а справа – робот модели «P2100» производства «Mikrolar, Inc». Робот «F-200iB» может использоваться как в вертикальном (со стойками ориентированными вверх или вниз), так и в горизонтальном положении, имеет номинальную грузоподъемность равную 100 кг и повторяемость ± 100 мкм. Робот «P2100» имеет грузоподъемность равную 200 кг, точность позиционирования ± 75 мкм и повторяемость ± 25 мкм.



Рисунок 27 – Роботы-гексаподы «F-200iB» производства «Fanuc Corporation» (слева) и «P2100» производства «Mikrolar, Inc» (справа)

Отдельно стоит упомянуть гексапод модели «P3000», на базе которого компания «Mikrolar, Inc» разработала установку «Hex-A-Jet» (рисунок 28) для высокоточной водоструйной резки материалов (гидродинамической обработки). Данный вид обработки применяется для резки как твердых (камень, стекло, металлы), так и мягких (дерево, кожа, резина и др.) материалов, и заключается в воздействии на обрабатываемый материал струей воды под высоким давлением (от 200 до 800 МПа), с высокой скоростью (от 600 до 1400 м/с) пропускаемой через специальное сопло. Это приводит к возникновению в материале напряжений, превышающих его предел текучести, что вызывает механическое истирание материала.



Рисунок 28 – Установка «Hex-A-Jet» на базе гексапода «P3000»

1.4 Контрольные вопросы

1 В чем заключается основное отличие станков с параллельной кинематической структурой от станков и роботов с последовательной кинематической структурой?

2 Что собой представлял первый промышленный робот с параллельной кинематикой?

3 Какие конструкцию и назначение имеет параллельный робот, предложенный Эриком Гью?

4 В чем состоит вклад Стюарта в разработку параллельных механизмов?

5 Что собой представляли прототипы станков-гексаподов, разработанные компаниями «Ingersoll» и «Giddings & Lewis»?

6 Какие виды механической обработки могут выполняться при помощи станков с параллельной кинематикой?

7 Что сдерживает широкое распространение станков с параллельной кинематикой?

8 Какие образцы станков с параллельной кинематикой доступны в настоящее

время на рынке металлообрабатывающего оборудования?

9 Что собой представляют позиционирующие устройства на основе параллельной кинематики?

10 Для каких целей используются системы «Delta-robot» и «Hexa-robot»?

11 В чем заключаются преимущества параллельных механизмов, занимающих промежуточное положение между роботами и станками?

12 Какими достоинствами обладают координатно-измерительные машины с параллельной кинематической структурой?

13 Для выполнения каких технологических операций могут использоваться на производстве многофункциональные параллельные роботы компаний «Fanuc Corporation» и «Mikrolar, Inc»?

2 Конструктивные особенности станков с параллельной кинематикой

2.1 Классификация станков с параллельной кинематикой

Параллельные манипуляторы могут быть разделены на две категории [8]: манипуляторы полной подвижности (с шестью степенями свободы) и манипуляторы, так называемой, пониженной подвижности (с пятью или менее степенями свободы). Последние, в свою очередь, могут быть подразделены на две группы. Первая группа объединяет в себе все манипуляторы, двигательные способности которых остаются постоянными во всем их рабочем пространстве. Некоторыми типовыми примерами таких механизмов являются манипуляторы поступательного движения (рисунок 29а), сферические механизмы (рисунок 29б) и роботы типа «SCARA» (рисунок 29в).

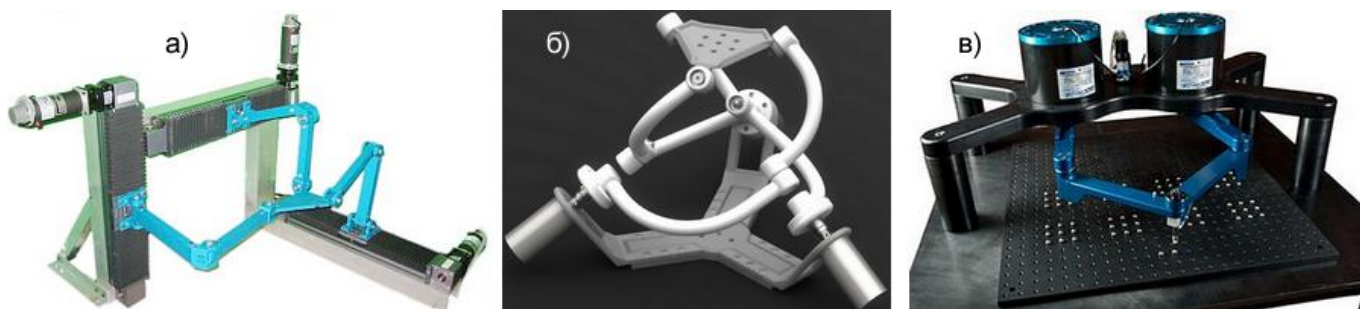


Рисунок 29 – Примеры параллельных манипуляторов первой группы

Однако решение производственных задач может потребовать того, чтобы рабочий инструмент изменял свое положение и ориентацию в рабочем пространстве. В этих случаях манипулятор должен обладать типом движения, не вписывающимся в первую группу, т.е. иметь смешанные степени свободы. Такие манипуляторы совместно реализуют вращательные и поступательные степени свободы. Их исполнительный орган совершает винтовое движение, варьирующее в зависимости от положения, так как чисто вращательное движение обычно получить сложно. Компенсация винтового смещения и генерация чисто вращательного движения осуществляется за счет наложения поступательных перемещений манипулятора.

В настоящее время большинство практических задач в области механической обработки требуют пятикоординатных операций, т.е. движения с тремя линейными и двумя вращательными степенями свободы. Для реализации пятикоординатной обработки широко используются станки с последовательной кинематикой. В станках большего размера с подвижной обрабатывающей головкой и подвижным столом часто используется гибридная архитектура. В одних случаях вращательные степени и свободы и вертикальное перемещение осуществляются обрабатывающей головкой, в то время как, рабочий стол имеет две линейные степени свободы. В других случаях возможна обратная архитектура, когда головка станка обладает тремя линейными степенями свободы, в то время как наклонный стол используется для закрепления детали. Для обработки больших литейных форм и матриц, а также нестандартных компонентов, используемых в аэрокосмической промышленности, рабочий стол обеспечивается линейными степенями свободы. Главными недостатками пятикоординатных станков являются их ограничения по динамическим характеристикам из-за зубчатых передач и их ограниченная статическая жесткость.

На начальном этапе первой альтернативой из области параллельной кинематики было использование архитектур, основанных на платформе Гью-Стюарта. Примерами таких станков параллельной кинематики являются: «Variax», «Octahedral Hexapod НОН-600» (Ingersoll), «Mikromat 6X», «Cosmo Center PM-600». Эти станки имеют лучшие жесткость и динамические характеристики, чем сопоставимые станки с последовательной кинематикой. Тем не менее, они имели существенное ограничение по диапазону вращательной подвижности, что препятствовало полноценной пятикоординатной обработке. Еще одним важным ограничением был их общий габаритный размер, отнесенный к достижимому размеру рабочего пространства. И что касается механической сложности, то использование шести степеней свободы обеспечивало им хорошую маневренность, но при высокой стоимости компонентов и систем управления.

Для улучшения углового диапазона были предложены другие параллельные архитектуры, отличные от платформы Гью-Стюарта, например станок «Eclipse-RR» (рисунок 30) производства южнокорейской компании «Daeyoung Machinery» или

«Metrom P1000» (рисунок 13). Однако эти станки все еще имеют проблему избыточного отношения размера станка к размеру рабочего пространства.



Рисунок 30 – Пятикоординатный станок «Eclipse-RP» производства «Daeyoung Machinery»

Одним из путей уменьшения этого отношения является комбинирование последовательных кинематических модулей с параллельными модулями для создания гибридных станков, как в случае с роботом «Tricept», где такая параллельно-последовательная архитектура увеличивает углы наклона, а также сокращает занимаемое им пространство. Однако его конструкция все еще страдает от недостатка хорошей динамики и угловой жесткости в силу того факта, что в ней используется поворотная головка, очень похожая на головки традиционных станков. Другим станком с гибридной кинематикой является станок «Space 5H» (рисунок 31) производства испанской компании «Fatronik». Данный станок имеет параллельный модуль (так называемая обрабатывающая головка «Hermes»), последовательно соединенной с рамой, которая имеет две линейных степени свободы. Этот станок разработан для фрезерования и сверления изделий авиационной промышленности и имеет очень хорошие характеристики, но не позволяет полностью обработать деталь с пяти сторон. Очень похожим устройством является станок «Ecospeed» (рисунок 32)

производства немецкой компании «DS Technologie» с обрабатывающей головкой, основанной на параллельном модуле «Sprint Z3» (рисунок 11) с одной вращательной и одной линейной степенью свободы.



Рисунок 31 – Станок «Space 5H» с параллельным модулем «Hermes»

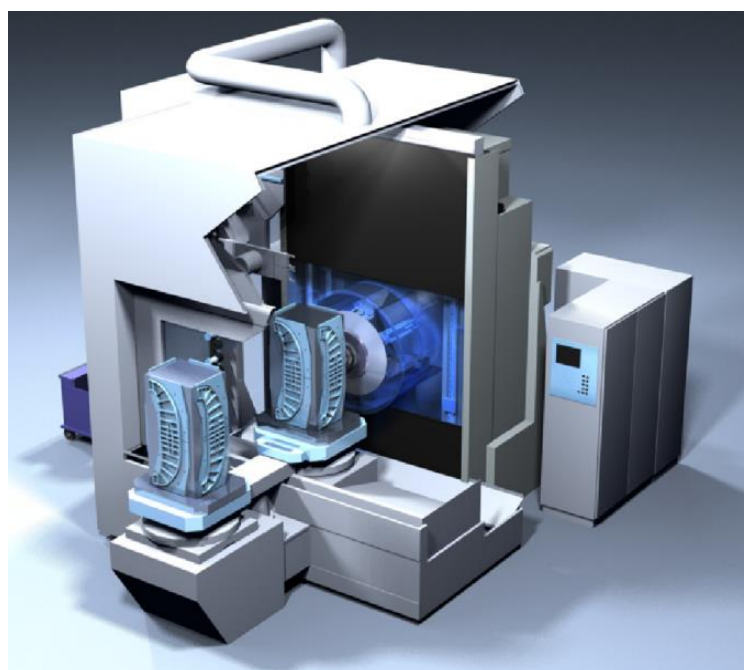


Рисунок 32 – Пятикоординатный обрабатывающий центр с гибридной кинематикой модели «ECOSPEED F HT»

Кроме того, существует еще одна альтернатива, которая позволяет увеличить углы наклона и уменьшить размеры станка. В этом случае станок разделяется на два модуля с тремя и двумя степенями свободы соответственно, установленных на неподвижной раме и работающих совместно. Например, первый модуль представляет собой параллельный манипулятор с тремя линейными степенями свободы, содержащий шпиндельную головку. Тогда вторым модулем будет являться наклонный стол с двумя вращательными степенями свободы. Относительное перемещение модулей реализует пятикоординатное движение для эффективной обработки деталей с пяти сторон. Другой возможностью является сочетание параллельных модулей, имеющих смешанные степени свободы (например, две линейных и одну вращательную) с наклонными столами или комбинированными столами (одна линейная и одна вращательная степень свободы).

В силу первичности своего появления наиболее разработанными в настоящее время являются конструкции станков-гексаподов, основанные на платформе Гью-Стюарта, особенности которых рассмотрены ниже.

2.2 Механизм гексапода

Механизм гексапода состоит из фиксированной верхней платформы шестиугольной формы и подвижной треугольной платформы, соединенных между собой шестью стойками (телескопического или винтового типа). Каждая пара стоек при помощи отдельных шарниров крепится к неподвижной платформе и сходится вместе в общем шарнире, расположенном в одном из трех узлов подвижной платформы (рисунок 33). Перемещение подвижной платформы обеспечивается за счет согласованного между собой изменения длины стоек, то есть:

- когда все шесть стоек одновременно удлиняются или укорачиваются с одинаковой скоростью, платформа движется вертикально вверх или вниз при сохранении своего горизонтального положения (рисунок 34а);

- когда одни стойки удлиняются, а другие укорачиваются и изменяют ориентацию, платформа движется горизонтально, до тех пор, пока не будет превышено допустимое гексаподом горизонтальное перемещение (рисунок 34б);

- когда изменяются длины и ориентация всех стоек, платформа наклоняется относительно координатных осей, до тех пор, пока не будет превышен допустимый угол поворота (рисунок 34в);

- когда все стойки имеют одинаковую длину и одновременно поворачиваются на один тот же угол, платформа вращается вокруг своей вертикальной оси, т.е. гексапод закручивается (рисунок 34г).

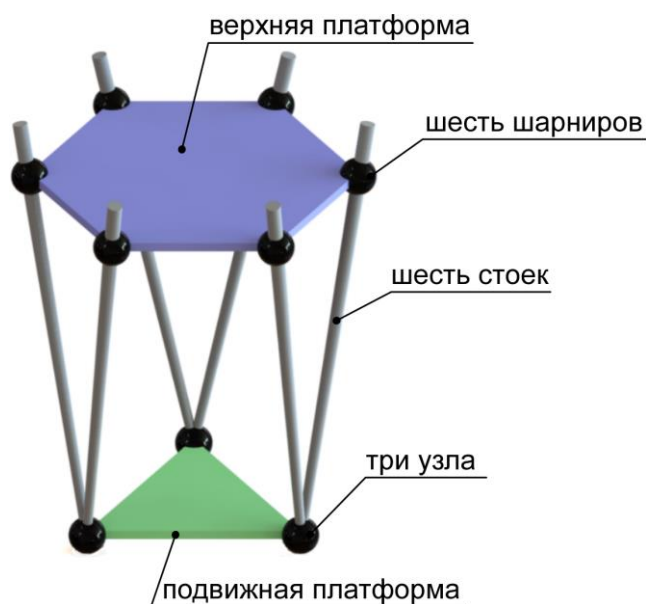


Рисунок 33 – Механизм гексапода

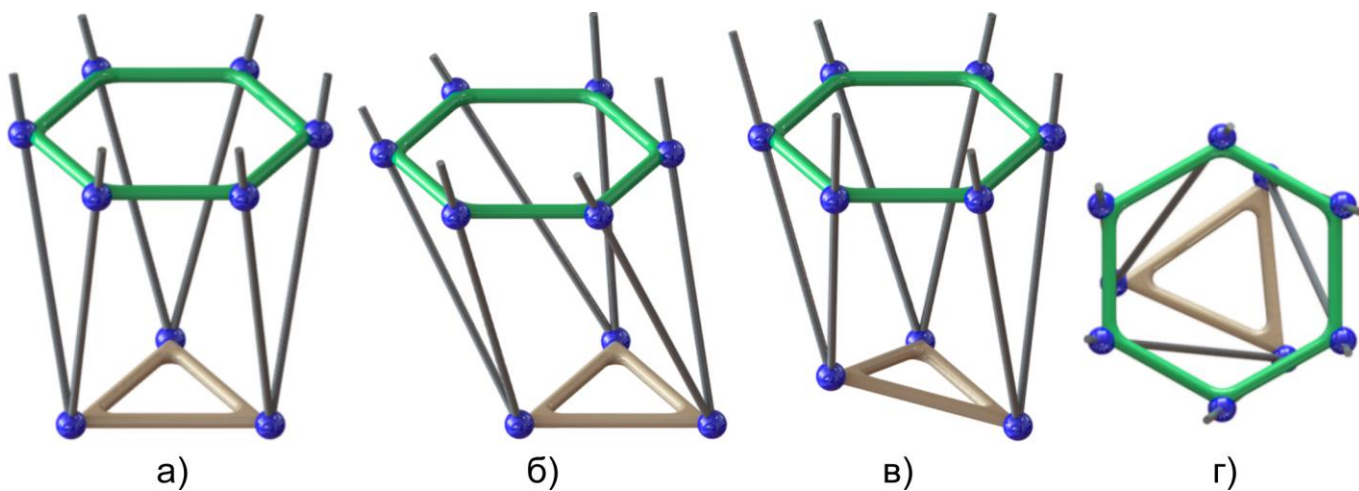


Рисунок 34 – Модели движений гексапода

Отсюда следует, что благодаря осевым и угловым перемещениям стоек подвижная платформа способна достигать любой точки рабочего пространства, что делает гексапод превосходным позиционирующим устройством. Конечно, в данном случае необходимо принимать меры предосторожности для предотвращения возможности столкновения стоек между собой или с платформой [16].

2.3 Компоновки гексаподов

Несмотря на то, что базовая конструкция гексапода задается его определением (шесть стоек, соединяющих базовую и рабочую платформу) существует несколько ее вариаций, различающихся используемым числом шарниров [13]. Каждая из шести удлиняемых стоек может иметь отдельный шарнир на базовой и рабочей платформе либо может иметь на них шарнир, общий с соседней стойкой. Соединение стоек в единственном общем узле упрощает кинематические уравнения системы за счет уменьшения числа неизвестных переменных.

Различные возможные компоновки гексапода представлены в виде трех схем на рисунке 35.

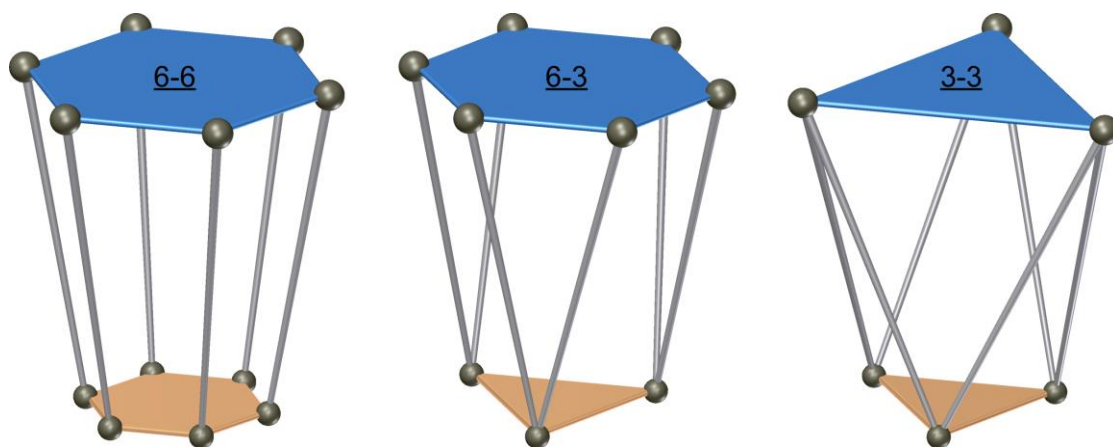


Рисунок 35 – Различные возможные компоновки гексапода

Первая цифра в обозначении каждой схемы соответствует числу узлов, в которых стойки соединяются с базовой платформой, а вторая цифра соотносится с

числом узлов, в которых стойки соединяются с рабочей платформой. Наиболее распространенная компоновка гексапода, известная как гексапод 6-6, изображена на рисунке 35 слева. В центре рисунка 35 показан гексапод 6-3, характеризующийся наличием шести шарниров на базовой платформе и трех на подвижной платформе. Соответственно, гексапод, который показан на рисунке 35 справа, имеющий по три шарнира на обеих платформах, обозначен, как гексапод 3-3.

Каждая из названных компоновок имеет свои достоинства и недостатки, которые могут быть представлены следующим образом.

2.3.1 Гексапод 6-6

К достоинствам данной компоновки гексапода следует отнести:

1) экономичность, так как в конструкции гексапода для соединения стоек с платформами используются стандартные шаровые или универсальные шарниры;

2) обеспечение большей угловой подвижности рабочей платформы по сравнению с другими компоновками при использовании одного и того же типа линейного привода, поскольку в данном случае стойки имеют больший угол наклона к плоскости рабочей платформы, и малейшее изменение их длины заметно отражается на изменении ориентации гексапода.

Недостатком компоновки является сложность ее математического описания, которое требует решения системы уравнений с большим числом неизвестных.

2.3.2 Гексапод 6-3

Достоинствами этой компоновки являются:

1) более простое математическое описание кинематики гексапода, так как здесь стойки соединяются только в трех узлах на рабочей платформе, что уменьшает число неизвестных переменных;

2) использование меньшего числа шарниров на рабочей платформе снижает ее массу и позволяет перемещать ее с большими скоростями и ускорениями, чем для гексапода 6-6;

3) меньшие потери на трение в связи с меньшим числом шарниров на рабочей платформе.

Недостатком компоновки является высокая стоимость и труднодоступность специальных шарниров (вилчатых шаров), специализированно выпускаемых ограниченным числом производителей.

2.3.3 Гексапод 3-3

В данном случае достоинствами выступают:

1) наименьшая для трех рассмотренных компоновок общая масса гексапода, что объясняется использованием минимального числа шарниров;

2) наиболее простое математическое описание кинематики гексапода, что существенно упрощает управление и позиционирование гексапода;

3) наименьшие потери на трение по сравнению с двумя остальными компоновками.

К недостаткам следует отнести:

1) высокую стоимость гексапода в связи с необходимостью использования шести специализированных шарниров;

2) меньшую чувствительность рабочей платформы к изменению длины стоек, т.е. в данном случае для изменения ориентации и положения платформы требуется большее изменение длины стоек, чем для других компоновок гексаподов.

2.4 Линейный привод стоек

Конструктивные особенности гексаподов, в первую очередь, определяются конструкцией линейного привода стоек. В настоящее время известны различные типы линейных приводов, наиболее распространенными среди которых являются гидравлические, пневматические и электромеханические приводы. Гидравлические и пневматические приводы (рисунок 36) имеют одинаковый принцип действия, основанный на использовании сжатой рабочей среды для управления вылетом исполнительного органа привода. Основное их отличие заключается в используемой рабочей

среде, которой в гидроприводах является гидравлическое масло, а в пневмоприводах – сжатый воздух.



Рисунок 36 – Гидравлический линейный привод

Гидроприводы обычно применяются при больших рабочих нагрузках свыше 2500 кг, а пневмоприводы – когда необходимо обеспечить высокую скорость перемещений при небольших нагрузках. Главным недостатком гидроприводов является возможность утечки масла, в то время как пневмоприводы сложно контролировать при наличии нагрузки, т.к. воздух может сжиматься под действием рабочей нагрузки, что приводит к погрешностям длины вылета.

Электромеханический линейный привод (рисунок 37) является относительно новым типом привода, который быстро стал стандартом во многих областях применения. Его конструкция включает в себя электродвигатель и механическую передачу, преобразующую вращение ротора в поступательное перемещение исполнительного органа. В качестве преобразователя движения в таком приводе используется либо ходовой винт, либо шарико-винтовая передача. Более эффективным и точным вариантом является шарико-винтовая передача, но она более дорогостояща и имеет увеличенные размеры, т.к. в ней необходимо обеспечить механизм рециркуляции шариков в подшипниковой гайке. Достоинствами ходового винта являются его простота, компактность, а также (обычно), удовлетворение условию самоторможения.



Рисунок 37 – Электромеханический линейный привод

Популярность электромеханических приводов с винтовыми передачами объясняется тем, что они обеспечивают большое передаточное отношение и способны выдерживать значительные нагрузки в течение длительного срока эксплуатации.

Еще одним типом линейного привода, который обычно не используется в гексаподах, но имеет хорошие характеристики, является линейный электродвигатель. Линейные двигатели представляют собой электроприводы, которые непосредственно обеспечивают линейное движение вместо преобразования вращательного движения в поступательное. В качестве основного недостатка таких двигателей следует назвать небольшое тяговое усилие, которое они могут обеспечить.

Наиболее инновационной концепцией линейного привода гексаподов, выступающей альтернативой жестким связям, является использование гибких проволочных тяг изменяемой длины, на которых подвешивается рабочая платформа. Это позволяет создавать легкие и быстрые конструкции роботов. Однако управление такими роботами усложняется необходимостью создания постоянного предварительного натяжения гибких тяг [4, 13].

2.4.1 Гексаподы с телескопическими стойками (система «Ingersoll»)

В названных конструкциях гексапод состоит из шести гидравлических телескопических стоек. Стойки могут иметь круглое или квадратное поперечное сечение и могут свободно удлиняться или укорачиваться в пространстве между основанием

и платформой. Платформа представляет собой выходное звено, обладающее шестью степенями свободы (рисунок 38). Концы гидравлических телескопических стоек соединяются с платформой и основанием посредством универсальных шарниров (рисунок 39). Данная система впервые была представлена, как система позиционирования пилотного тренажера. В настоящее время система коммерчески доступна для многих областей применения, где требуется микронная и субмикронная точность [16].

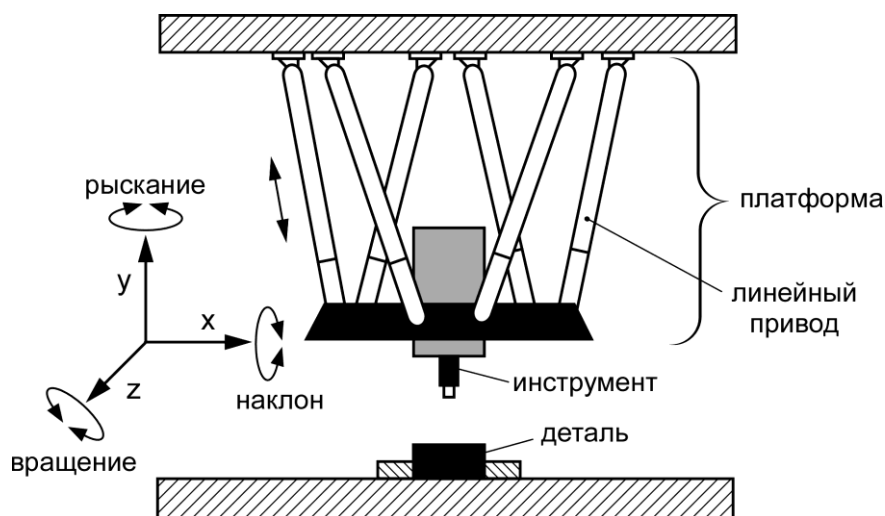


Рисунок 38 – Гексапод с телескопическими стойками системы «Ingersoll»

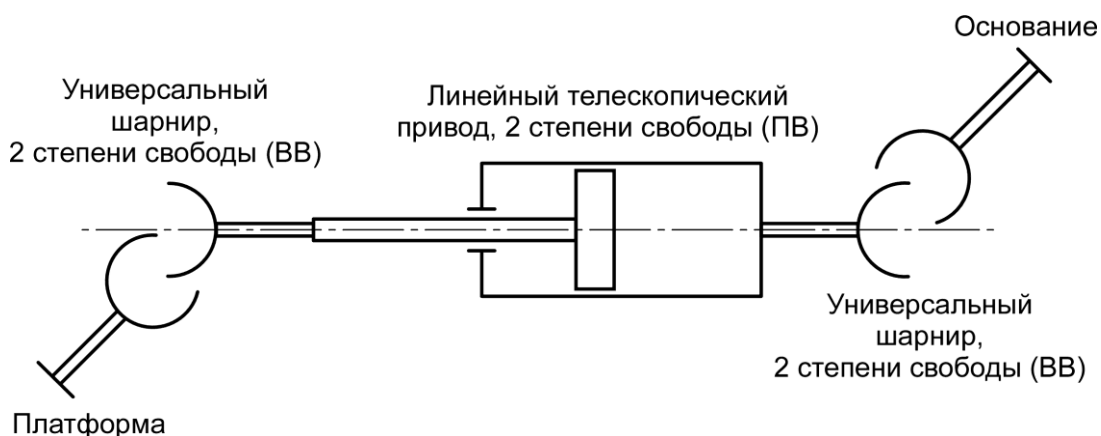


Рисунок 39 – Телескопическая стойка с универсальными шарнирами

Таблица 2 – Анализ системы с телескопическими стойками

Количество	Реализация	Ограничения	Степени свободы	Описание
6	основание/хомут (УШ)	4	2	ВВ
6	цилиндр/шток	4	2	ПВ
6	шток/платформа (УШ)	4	2	ВВ
Примечание – В – вращательная, П – поступательная, УШ – универсальный шарнир				

Взаимосвязь между подвижностью M , ограничениями c_i и общим числом степеней свободы выражается критерием следующего вида:

$$M = 6 \cdot (n_e - 1) - \sum_{i=1}^j c_i \quad (1)$$

где n_e – общее число элементов системы.

Для рассматриваемого случая общее число элементов системы равно 14 (6 стоек по 2 детали в каждой, основание и платформа). В соответствии с таблицей 2 общее число ограничений равно будет 72 ($3 \times 6 \times 4$). Следовательно, число степеней свободы гексапода определится как:

$$M = 6 \cdot (14 - 1) - 72 = 6$$

Путем сочетания восьмигранной рамы с описанным типом стоек компания «Ingersoll» создала наиболее жесткую и устойчивую конструкцию станка. За счет высокой жесткости и устойчивости данный станок обеспечивает высокие размерную точность обработки, качество поверхности и стойкость режущего инструмента. Рамная конструкция гексапода, состоящая из 12 стержней приблизительно одинаковой длины, соединенных в 6 узлах (рисунок 40), гарантирует ее устойчивость и минимизирует требования к фундаменту станка.

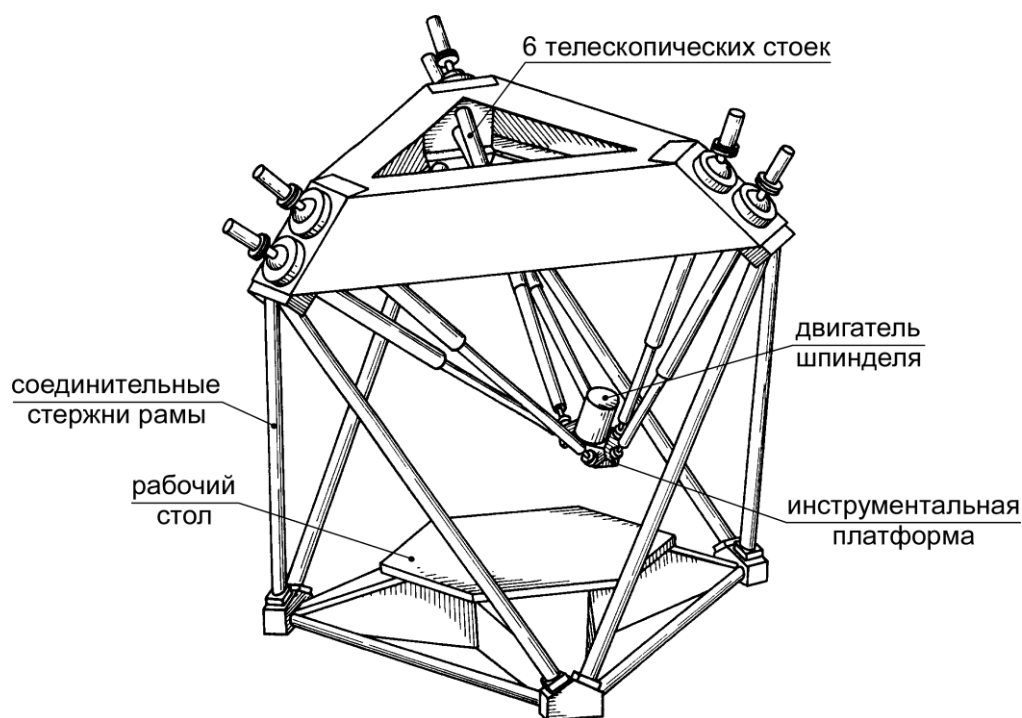


Рисунок 40 – Гексапод с жесткой рамой

2.4.2 Гексаподы со стойками винтового типа (система «Hexel» и «Geodetic»)

Фирмы «Hexel» и «Geodetic» существенно упростили подход к проектированию гексаподов за счет использования вильчатого шара в месте сопряжения двух стоек на рабочей платформе. Это разработка позволила уменьшить число стыков станка до девяти (шесть стыков на фиксированной платформе и три на рабочей платформе), что улучшает жесткость, упрощает управление и допускает автоматическую калибровку. При таком подходе к проектированию необходимая точность достигается за счет используемого программного обеспечения, что дает снижение затрат и времени на переналадку станка и следовательно приводит к созданию по-настоящему гибкого оборудования.

Данный тип гексаподов обладает чрезвычайной жесткостью и надежностью, поскольку не требует использования каких-либо телескопических механизмов. Они оснащены универсальными сферическими шарнирами, способствующими точной и воспроизводимой калибровке и благодаря своей конструкции, обеспечивающими превосходное демпфирование стоек [16].

Характеристики и принцип работы этого типа гексаподов могут быть обобщены следующим образом:

1) в рассматриваемом случае, гексапод состоит из шести высокоточных шарико-винтовых стоек, каждая из которых соединяет инструментальную платформу со встроенным сферическим серводвигателем, который установлен на верхней неподвижной платформе гексапода (рисунок 41). При этом стойки имеют круглое поперечное сечение для обеспечения возможности вращения;

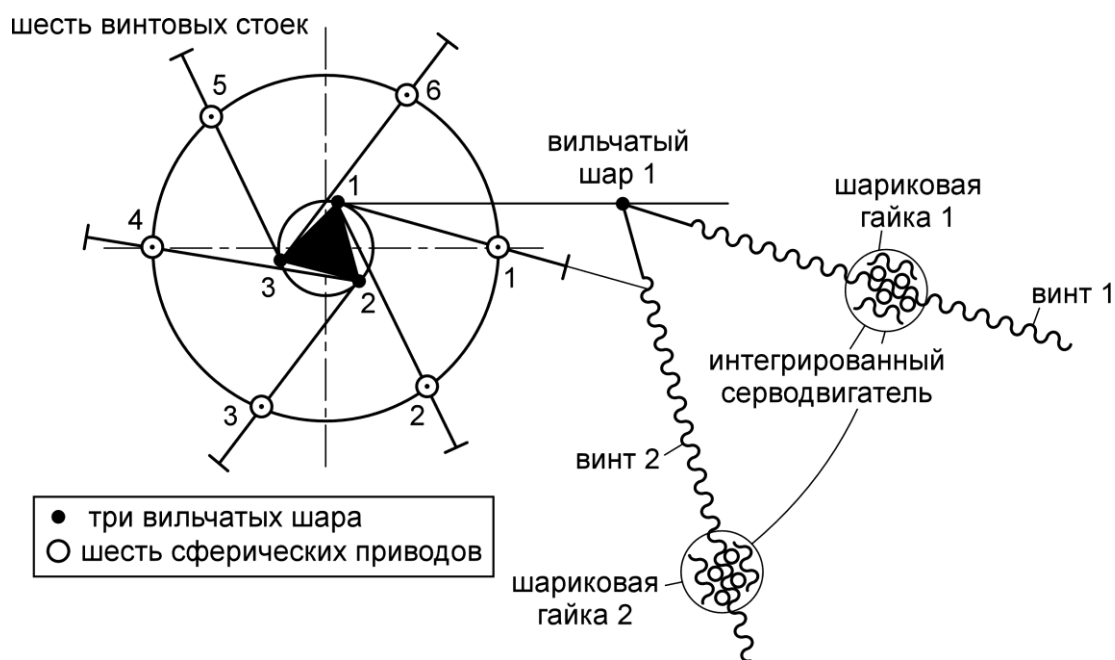


Рисунок 41 – Гексапод со стойками винтового типа

2) каждая из шести шарико-винтовых стоек приводится в движение серводвигателем (сферическим приводом) через шариковую гайку, которая закреплена в корпусе узла. Серводвигатель способен может вращаться со скоростью до 3200 об/мин, что обеспечивает движение винта, имеющего шаг 5 мм, со скоростью 16 м/мин;

3) за счет координатных перемещений винтов рабочая платформа изменяет свое положение в соответствии с контуром обрабатываемого изделия. Стойки соединяются на рабочей платформе в трех шарнирах, при этом каждая пара стоек имеет общий шарнир, состоящий из шара и гнезда и известный, как вилчатый шар;

4) каждая отдельная шарико-винтовая стойка не зависит от других и управля-

ется индивидуальным файлом, содержащим информацию, такую как:

- а) погрешность шага на длине винта;
- б) монтажные смещения;
- в) характеристики температурного расширения;

5) полностью взаимозаменяемые приводы калибруются в режиме офлайн, как отдельные элементы и автоматически компенсируются при сборке. Данная концепция позволяет собирать и обслуживать гексаподы очень быстро без потребности в сложных процедурах выравнивания и калибровки. Замена изношенных или поврежденных стоек может быть выполнена в течение двух часов, что минимизирует время простоя станка.

Общее число элементов гексапода так же, как и в предыдущем случае, будет равно 14. Число ограничений в соответствии с таблицей 3 будет равно 66 ($2 \times 6 \times 3 + 6 \times 5$).

Таблица 3 – Анализ системы с винтовыми стойками

Количество	Присутствие	Ограничения	Степени свободы	Описание
6	основание/стойка	3	3	ВВВ
6	корпус привода/стойка	5	1	П
6	стойка/платформа	3	3	ВВВ

Примечание – В – вращательная, П – поступательная

Следовательно, число степеней свободы гексапода по формуле (1) определится как:

$$M = 6 \cdot (14 - 1) - 66 = 12$$

Координатные перемещения стоек обеспечивают подвижной платформе и шпинделю 6 степеней свободы: линейные (X, Y, Z) и угловые (рыскание, наклон и вращение). Это делает шпиндель чрезвычайно подвижным и способным занимать практически любое, необходимое при обработке, положение.

2.5 Основные конструктивные элементы гексаподов

2.5.1 Стойки

Стойки, используемые в станках с параллельной кинематикой, могут быть разделены на стойки переменной длины и стойки постоянной длины. В случае стоек постоянной длины расстояние между точками их крепления остается неизменным и для приведения платформы в движение перемещаются основания стоек. Стойки переменной длины позволяют двигать платформу путем изменения расстояния между двумя точками крепления стоек. При этом их основания на раме станка остаются неподвижными. Дальнейшее возможное подразделение стоек представлено в виде схемы на рисунке 42 [1].

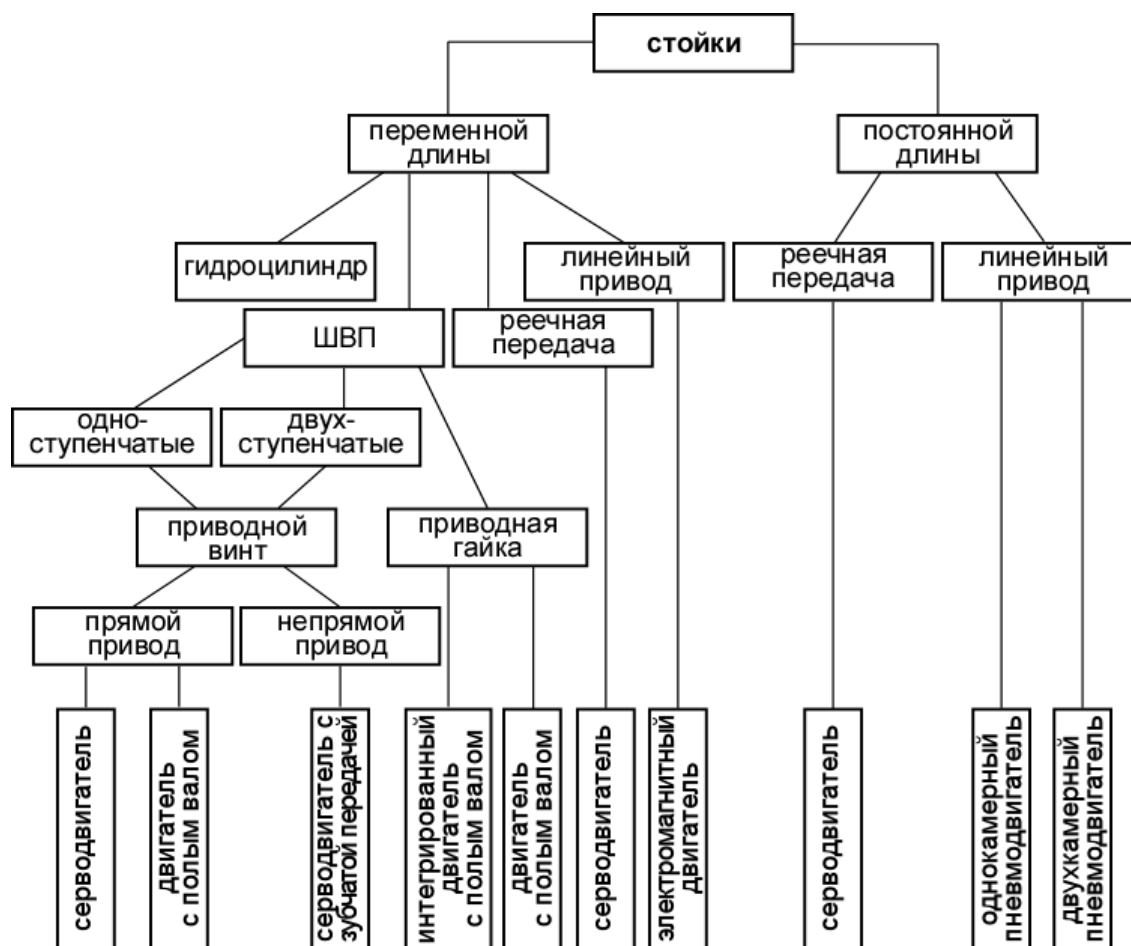


Рисунок 42 – Подразделение различных стоек

Достоинством станков с параллельной кинематикой является то, что стойки работают на чистое растяжение-сжатие. Поэтому для стоек необходимо обеспечить достаточную прочность на продольный изгиб и продольную жесткость, которые в значительной степени зависят от используемого материала, а также поперечного сечения стоек. Сравнение различных материалов при действии чисто сжимающей или растягивающей нагрузки, приведенное в таблице 4 [1], показывает возможность широкого применения углепластиков в качестве конструкционного материала облегченных стоек.

Таблица 4 – Классификационные коды качества стоек из различных материалов

Характеристика	продольная жесткость – растяжение, сжатие	прочность стержней на продольный изгиб
Показатель индекса качества	$E/(g \cdot \rho)$	$\bar{E}/(g \cdot \rho)$
Магний	0,89	1,17
Алюминий	1	1
Титан	0,87	0,72
Сталь	1,03	0,6
Стеклопластик	0,79	1,05
Углепластик	6,88	3,64
Кевларовый пластик	1,86	1,93

Наиболее распространенным типом стойки, используемым в настоящее время в различных конструкциях гексаподов, является стойка винтового типа системы «Hexel» и «Geodetic». Конструкция шарико-винтовой стойки фирмы «Geodetic» показана на рисунке 43. Винт соединяется с подвижной треугольной платформой посредством вильчатого шара и затем приводится в движение в точке опоры на верхней платформе при помощи сферического привода. Данная конструкция стойки имеет очень высокое отношение удлинение/укорочение, потому что винтовые стойки могут занимать неограниченное пространство за опорой на верхней платформе. Опоры (вильчатые шары и соединения сферических приводов) герметично закры-

ваются для сохранения жесткости и обеспечения плавного хода даже при ударных нагрузках. Чтобы обеспечить возможность применения различных инструментальных наладок допускается возможность использования разнообразных рабочих платформ [16].

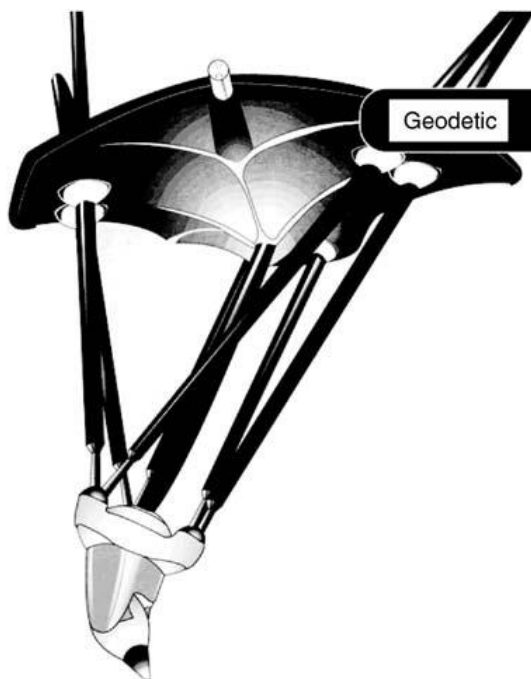


Рисунок 43 – Гексапод со стойками винтового типа фирмы «Geodetic»

2.5.2 Сферический привод

Сферический привод является специальным механизмом, который выступает ключевым элементом любого гексапода со стойками винтового типа. Он располагается на верхней платформе и обеспечивает точное позиционирование стоек. Сферический привод представляет собой полый шар, заключающий в себе высокомоментный специализированный бесщеточный двигатель постоянного тока. Ротор двигателя через шпонку передает вращение на шпиндель, который смонтирован на двух высокоточных подшипниках (рисунок 44). От шпинделя вращение передается шариковой гайке, что обеспечивает поступательное перемещение винта через полость серводвигателя. Для обеспечения большей надежности и снижения влияния тепловых деформаций данного узла используется его водяное охлаждение.

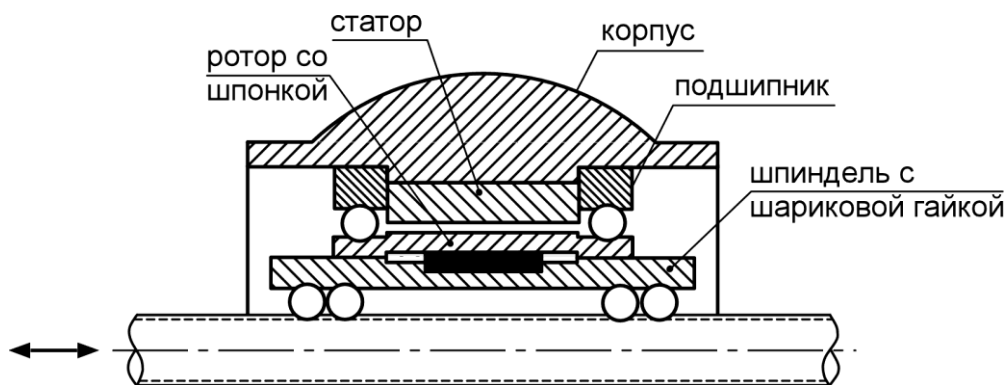


Рисунок 44 – Сферический привод

Точное позиционирование осуществляется при помощи контроллера на основе информации, поступающей от радиальных энкодеров, установленных снаружи узла. Термопара, встроенная в обмотки двигателя, за счет обратной связи с контроллером позволяет компенсировать температурные деформации. Все ответственные детали, заключенные в сферическом приводе эффективно защищаются от попадания инородных веществ. Сферический привод крепится к верхней платформе при помощи шести болтов; его точное и стабильное позиционирование гарантируется посредством реперного штифта.

Полость сферы, содержащей привод, герметизируется при помощи лабиринтного уплотнения. В конструкции, показанной на рисунке 45, используется гидростатическая система (рисунок 46) для обеспечения наибольшей жесткости в сочетании с низким коэффициентом трения при гарантированно хорошем смазывании. Лабиринтное уплотнение позволяет удерживать внутри сферического привода жидкость под высоким давлением, которая постоянно рециркулирует. Непосредственный контакт металлических поверхностей сведен к минимуму, за счет чего обеспечивается большее демпфирование и плавность работы. Сферический привод способен перемещать винт с осевой подачей свыше 40 м/мин под действием высоких нагрузок и ускорений.

Все компоненты привода, такие как винты, шариковые гайки, двигатели, подшипники и энкодеры стандартизированы. Это делает сферический привод механически простым, экономичным и надежным. Кроме того, этот привод может быть

легко адаптирован для удовлетворения широкого диапазона требований к рабочим характеристикам, необходимым для решения разнообразных производственных задач [16].

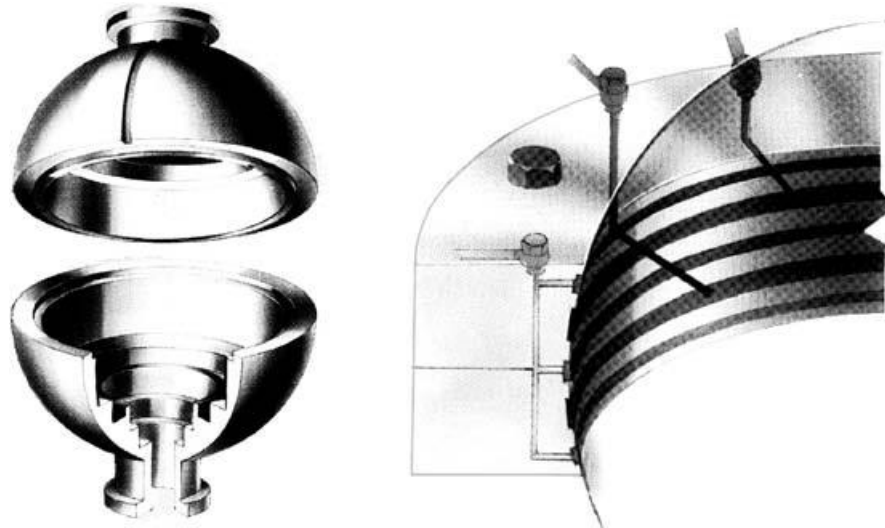


Рисунок 45 – Корпус сферического привода

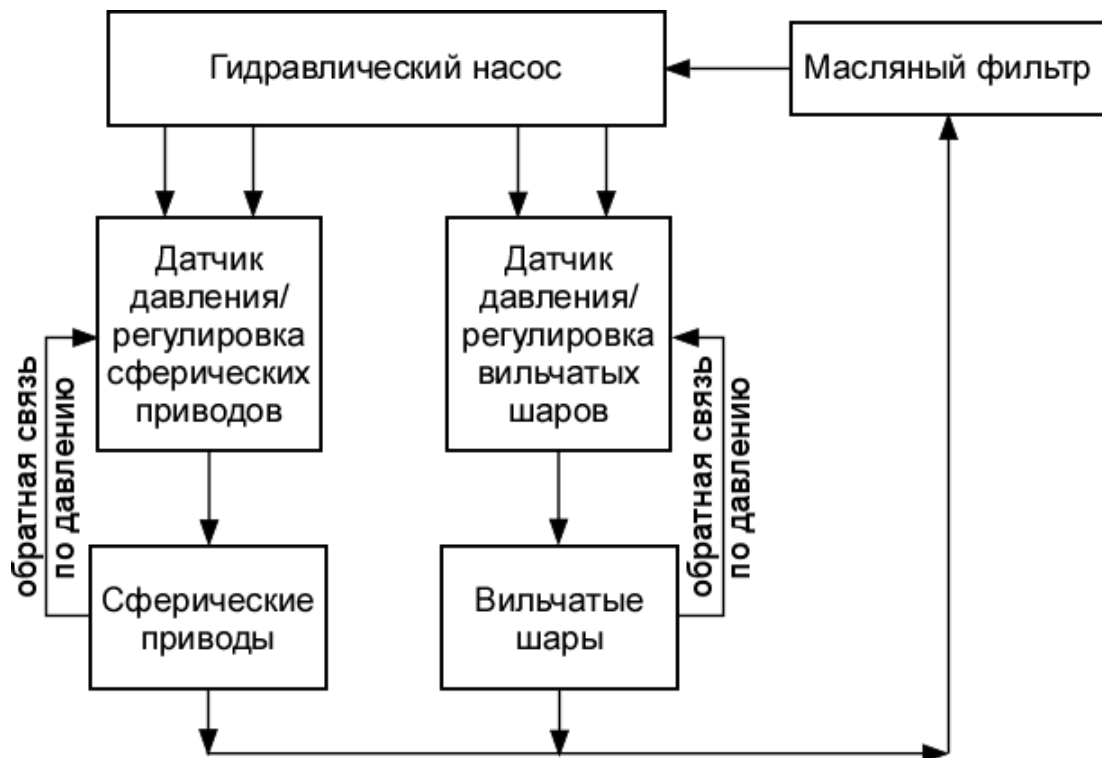


Рисунок 46 – Схема системы смазывания

2.5.3 Шарниры

Наиболее часто используемыми в параллельных механизмах типами механических шарниров являются (в порядке увеличения степеней свободы): вращательные, призматические, универсальные (карданные) и шаровые (сферические) шарниры.

2.5.3.1 Вращательные шарниры

Вращательный шарнир (рисунок 47) позволяет двум компонентам совершать относительное вращение вокруг оси шарнира. Вертикальный размер между этими двумя компонентами является постоянной величиной, называемой расстоянием смещения. Вертикальный размер и расстояние смещения описывают пространственную относительную взаимосвязь двух компонентов, которые формируют вращательный шарнир. Вращательный шарнир, как кинематическая пара с одной степенью свободы обеспечивает функцию вращения вокруг единственной оси.

Вращательные шарниры являются наиболее часто встречающимся типом шарнира в промышленных и исследовательских роботах и могут быть обнаружены во многих других областях применения, таких как складные механизмы, одноосные вращательные устройства и т.д. [17]



Рисунок 47 – Вращательный шарнир

2.5.3.2 Призматические шарниры

В конструкции линейного привода целью призматического шарнира является обеспечение двум деталям привода возможности скольжения относительно друг

друга. Этот шарнир может обеспечить не более двух степеней свободы: линейное перемещение и вращение вокруг оси, параллельной направлению линейного перемещения. При использовании электромеханического привода шарнир должен обеспечивать только линейное перемещение и ограничивать все вращательные степени свободы.

Самым простым вариантом такого шарнира является использование подвижного шпоночного соединения. Однако стандартные шпоночные соединения могут иметь значительные погрешности изготовления, что приводит к возникновению люфтов и избыточного трения в соединении, в то время как в данном случае очень важно обеспечить отсутствие угловых люфтов, которые могут вызвать неконтролируемое изменение длины стойки.

Поэтому более предпочтительным вариантом призматического шарнира выступает использование открытого линейного подшипника скольжения с цилиндрическим направляющим стержнем (рисунок 48), подобного линейным направляющим, которые обычно используются в традиционных конструкциях станков. Подшипник легко устанавливается на неподвижной части линейного привода, а металлический направляющий стержень прикрепляется к подвижной части привода (выдвигаемой стойке). Так как направляющий стержень может иметь погрешности профиля необходимо предварительно измерять его при помощи высокоточного глубиномера и вносить результаты измерений в систему ЧПУ для учета этих погрешностей в процессе работы [4, 17].

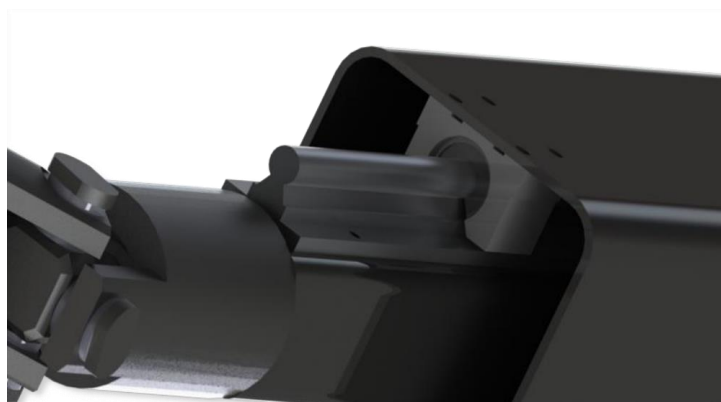


Рисунок 48 – Призматический шарнир на основе линейного подшипника скольжения

2.5.3.3 Универсальные и шаровые шарниры

В настоящее время существует большое количество различных типов шарниров, доступных для использования в конструкциях параллельных механизмов. Наиболее часто используемыми типами являются универсальные (карданные) и шаровые (сферические) шарниры. Оба указанных типа шарниров широко применяются во многих отраслях промышленности и выпускаются, как стандартные компоненты. При этом универсальные шарниры способны обеспечивать больший диапазон угловых перемещений, чем шаровые шарниры.

Шаровой шарнир позволяет одному элементу свободно вращаться относительно другого с полюсом вращения в центре шара. Ориентация каждой вращательной степени свободы определяется правилом правой руки и три вращательные координаты совместно формируют правую систему координат. Относительное положение двух компонентов шарнира может быть задано тремя эйлеровыми углами ϕ (поворот вокруг исходной оси z), θ (поворот вокруг новой оси x) и φ (поворот вокруг новой оси z). Шаровой шарнир кинематически эквивалентен трем пересекающимся вращательным шарнирам [17].

Стандартные шаровые шарниры редко обеспечивают угловое перемещение более 20° относительно оси шарнира, как это можно видеть на рисунке 49. Шаровой шарнир, показанный на данном рисунке, имеет небольшой диапазон перемещений, но осуществляет вращение вокруг единственной точки, что обеспечивает ему простую, дешевую и компактную конструкцию [13].



Рисунок 49 – Диапазон перемещений стандартного шарового шарнира

Более широкий угловой диапазон $\pm 30^\circ$ обеспечивают шаровые шарниры качения (рисунок 50), выпускаемые японской компании «Nephaist Seiko». Данные шарниры являются высокоточными (с люфтом менее 1 мкм) и жесткими узлами с чрезвычайно низким трением и рекомендуются производителем для использования в параллельных механизмах и фотоэлектрических устройствах.

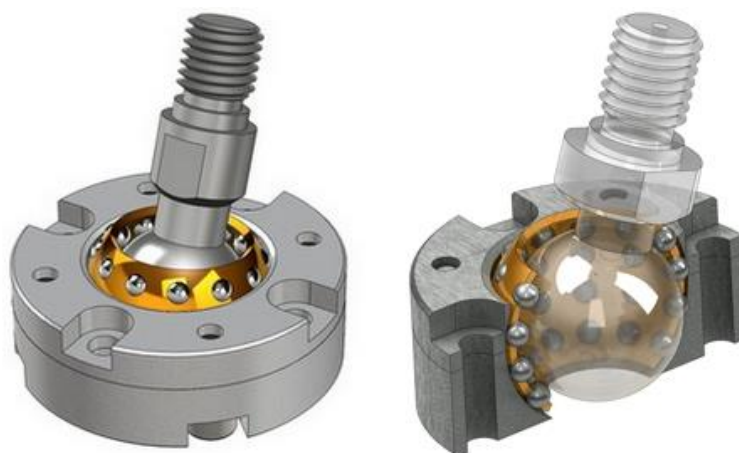


Рисунок 50 – Шаровые шарниры качения «Nephaist Seiko»

Универсальный шарнир позволяет двум компонентам осуществлять независимое движение с двумя вращательными степенями свободы относительно двух перпендикулярных осей. Обычно, универсальный шарнир эквивалентен двум вращательным шарнирам, оси которых полностью взаимно перпендикулярны. Использование в данном шарнире двух осей вращения обеспечивает большой диапазон угловых перемещений (рисунок 51), но увеличивает размеры шарнира и усложняет его конструкцию.



Рисунок 51 – Диапазон перемещений стандартного универсального шарнира

Часто в параллельных механизмах используются специальные конструкции универсальных шарниров, как, например, в случае со станком-гексаподом «PaLiDA» (рисунок 52), разработанного институтом технологии производства и станков в университете Ганновера (Германия). Гексапод представляет собой комбинацию высокоскоростного манипулятора и металлорежущего станка и позиционируется, как устройство для оперирования предметами и чистовой механической обработки с небольшими нагрузками. Для соединения стоек с рабочей платформой здесь используются карданные шарниры, приведенные на рисунке 53.



Рисунок 52 – Гексапод «PaLiDA»

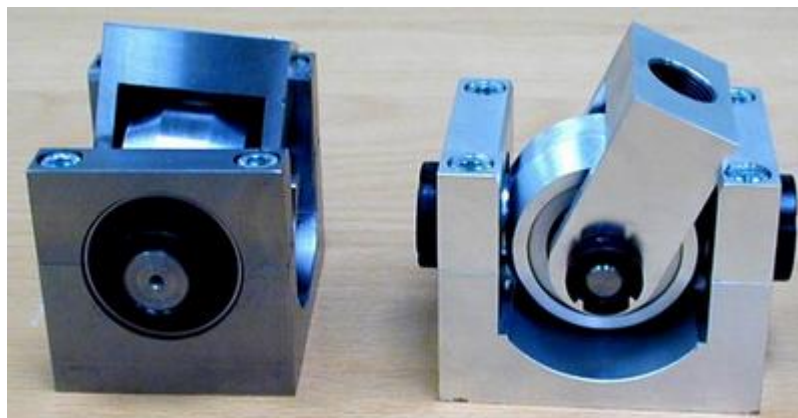


Рисунок 53 – Карданные шарниры, используемые в гексапode «PaLiDA»

2.5.3.4 Вильчатые шары

Данный узел представляет собой шарнир, позволяющий паре стоек, соединяться в общей фокальной точке на рабочей платформе (рисунок 54). Его конструкция представляет собой шар, разделенный на две половины, которые могут быть скомпонованы относительно друг друга различными способами [16].

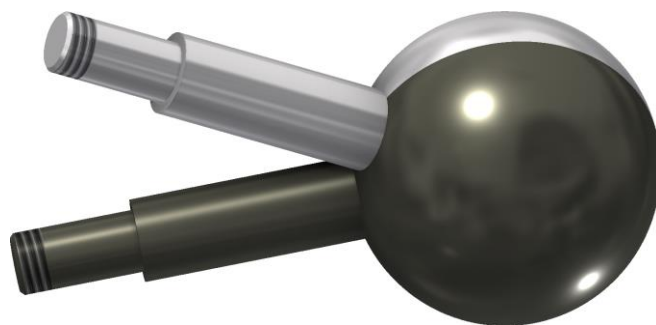


Рисунок 54 – Вильчатый шар

Гидростатический шарнир с вильчатым шаром. Данная разработка является последним словом в семействе сферических шарниров. В его конструкции используется система, похожая на систему, используемую в гидростатических сферических приводах, что гарантирует устранение зазоров. Это способствует большей плавности хода в условиях отсутствия вибраций и хорошего смазывания, что ведет к повышению точности и лучшему качеству обработанной поверхности (рисунок 55). Структурная схема системы смазывания гидростатических вильчатых шаров показана на рисунке 46.

Магнитный шарнир с вильчатым шаром. Ключевой особенностью этого шарнира является использование в нем мощного магнита из сплава неодима, железа и бора, поддерживающего половины шара в гнезде (рисунок 56). Это обеспечивает поддержку шара не менее чем по половине его поверхности с зазором, достаточным для обеспечения большой подвижности. Неотъемлемой составляющей магнитного гнезда является защита от перегрузки, позволяющая шарнирам смещаться, когда нагрузки превышают поддерживающие силы без какого-либо повреждения меха-

низма. В шарнире используется пластичный смазочный материал, введенный в пространство между шаром и гнездом для обеспечения критического демпфирования. Магнитный шарнир часто применяется при выполнении работ с малыми нагрузками. К ним обычно относятся лазерная резка, гидроабразивная обработка, измерения на координатно-измерительных машинах.

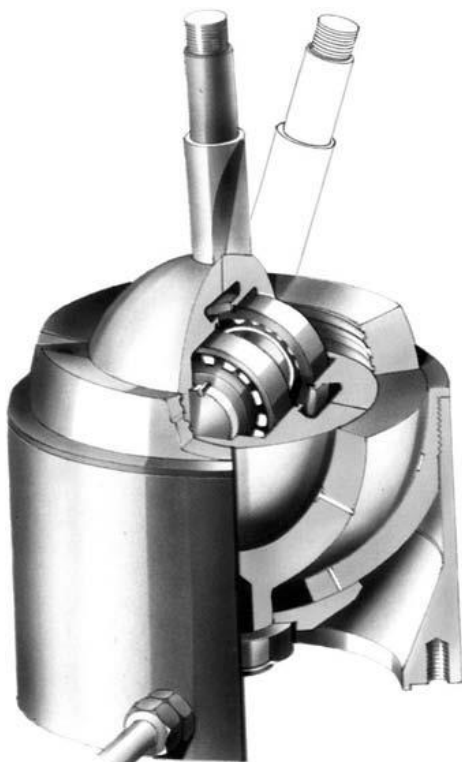


Рисунок 55 – Гидростатический шарнир с вильчатым шаром конструкции «Geodetic»



Рисунок 56 – Магнитный шарнир с вильчатым шаром конструкции «Geodetic»

Механический шарнир с вильчатым шаром. Данный тип шарнира был разработан для применения в условиях обработки с малыми нагрузками. Так же, как и в случае с магнитными шарнирами, механические шарниры состоят из некоторого числа элементов, каждый из которых отвечает за обеспечение той или иной степени свободы шарнира. Но в отличие от магнитных шарниров шар удерживается в гнезде посредством стопорного кольца (рисунок 57). Такая конструкция позволяет шарниру выдерживать перегрузки и устраняет проблему попадания в шарнир мелкой металлической стружки. Угловые перемещения элементов шарнира ограничиваются при помощи концевых выключателей.



Рисунок 57 – Механический шарнир с вильчатым шаром конструкции «Geodetic»

2.5.4 Шпиндель

Гексаподы оснащаются высокоскоростными шпиндельными узлами, сочетающими в себе высокую мощность с компактными размерами. Производители гексаподов часто используют конструкции шпинделей конической формы, чтобы мини-

мизировать возможный контакт с обрабатываемой деталью (рисунок 58). В шпиндельных узлах «Geodetic» используются электродвигатели с мощностью от 3 до 20 кВт, обеспечивающие шпинделю частоту вращения до 20000 об/мин. Для специальных областей применений «Geodetic» также предлагает шпиндели с пневмоприводом. Предусмотренный в шпиндельном узле механизм зажима инструментальной оправки позволяет использовать высокоскоростное устройство смены инструмента. В шпинделях с электроприводами используется водяное охлаждение. Для контроля скорости вращения шпиндели оснащаются датчиками обратной связи.

Для обеспечения бесперебойной работы шпинделей гексаподов они конструируются на основе гибридных подшипников качения с системой их автоматического смазывания. Шпиндели приспособлены для закрепления в них инструментов диаметром до 20 мм и длиной до 200 мм. Высокие скорости вращения способствуют повышению производительности, снижают износ режущего инструмента, увеличивают размерную точность обработки и обеспечивают повышенное качество обработанных поверхностей изделий. Такие конструкции шпинделей позволяют гексаподам выполнять фрезерные, гравировальные и сверлильные операции [16].



Рисунок 58 – Высокоскоростной конический шпиндель гексапода

Для увеличения скоростей вращения шпинделя и соответственного повышения производительности разработчики станков стремятся использовать новые перспективные конструкции шпиндельных узлов. Примером такой конструкции, которая может эффективно использоваться в гексаподах, является конструкция, основанная на концепции «TurboTool» («Aesop Inc.», США) [1]. Она представляет собой концепцию высокоскоростного режущего инструмента, предназначенную для повышения экономически выгодной скорости обработки алюминия и других металлов. «TurboTool» является претенциозной разработкой, которая объединяет в себе много новых элементов. К ним относятся:

- использование гидростатических подшипников высокого давления, подпитываемых через внутренний канал инструмента-шпинделя, через который вода подается на канавки в его режущей части;
- использование турбины для прямого привода инструмента-шпинделя, разработанного таким образом, чтобы инструмент был полностью сбалансированным и взаимозаменяемым;
- использование гибридного электромагнитно-гидростатического упорного подшипника, позволяющего осевое колебательное движение.



Рисунок 59 – Шпиндель «TurboTool»

«TurboTool» использует единственный монолитный вал, на котором выполнен режущий инструмент, самокомпенсирующиеся гидростатические подшипники и лопасти турбинного привода. Благодаря своей конструкции «TurboTool» обеспечивает

высокую скорость (до 100000 об/мин) и мощность (до 100 кВт) при компактном размере и невысокой стоимости шпинделя, который практически не подвержен поломкам. И даже, если он выйдет из строя, уровень затрат на его ремонт будет ниже, чем для традиционных высокоскоростных шпинделей.

Основными конструктивными особенностями шпинделя является то, что инструмент, выступающий из передней части корпуса, и самокомпенсирующиеся радиальные гидростатические подшипники с эффектом змеевидной поверхности «HydroSpindle» выполнены прямо на шпинделе. Эти специальные подшипники «HydroSpindle» не подвержены вихревой неустойчивости, как обычные гидростатические подшипники, что в сочетании с их протяженными кавитационно-устойчивыми демпфирующими площадками обеспечивает «TurboTool» чрезвычайно хорошее демпфирование и устойчивость к ударным воздействиям. Жидкость под высоким давлением подается к подшипникам через центральный герметичный канал и отводится через периферические канавки, соединенные с дренажными отверстиями. Через этот же канал жидкость поступает на режущую часть инструмента для его охлаждения и удаления стружки.

Такая компоновка обеспечивает шпинделю высокую нагрузочную способность и делает его более жестким, чем при использовании зажимаемой инструментальной оправки, которая обычно применяется в шпиндельных узлах на опорах качения. В задней части системы располагаются лопатки турбины, также выполненные за одно целое с инструментом-шпинделем. Турбина приводится во вращение распределенным потоком воды, подаваемой под давлением на лопатки. Турбинный привод способствует минимизации тепловыделения в шпинделе и соответственно уменьшает температурные погрешности, кроме того, он более экономичен, чем интегрированный электропривод.

2.5.5 Поворотная головка

Шпиндели гексаподов монтируются в поворотной головке, подвижность которой сопоставима с подвижностью человеческой руки (рисунок 60). Двухосевая головка обеспечивает шпинделю две степени свободы, а именно повороты в двух ор-

тогональных плоскостях. Благодаря наличию шарнирных сочленений данный независимый узел способен совершать движения, подобные движениям человеческой руки (запястья и кисти), что позволяет обрабатывать поверхности сложной формы, а также производить подрезку деталей.

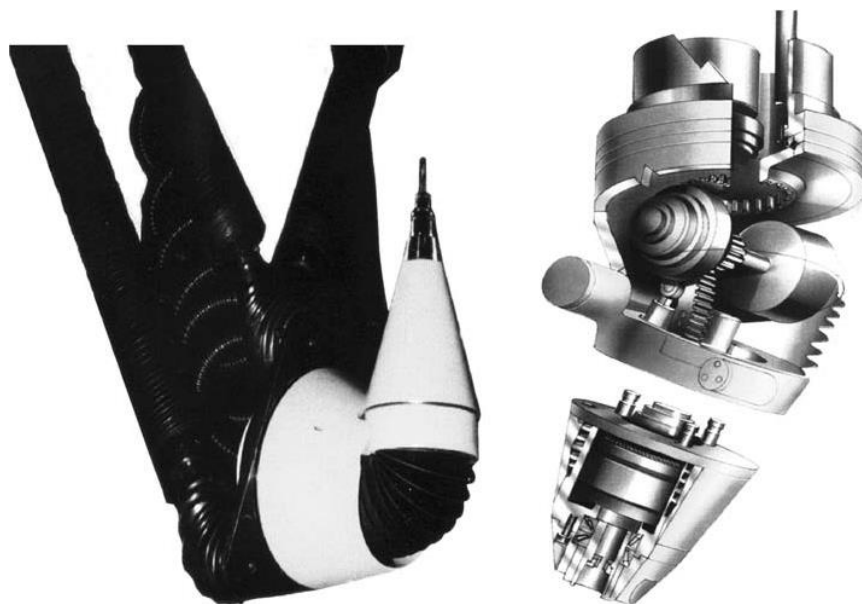


Рисунок 60 – Поворотная головка конструкции «Geodetic»

Двухосевая поворотная головка конструкции «Geodetic», показанная на рисунке 61, может поворачиваться на угол свыше 90° в вертикальной плоскости и на угол свыше 540° в горизонтальной плоскости. Вследствие наличия некоторого расстояния между центром платформы и дополнительной вращательной осью механизм самостоятельно конфигурирует себя для того, чтобы обогнуть возможные препятствия в рабочей зоне станка. Это позволяет подводить инструмент к детали под оптимальным углом. Чем больше интервал между двумя осями, тем лучше гексапод способен обходить препятствия. Мощный серводвигатель с водяным охлаждением, обладающий высоким вращающим моментом, обеспечивает точное позиционирование в диапазоне свыше 540° . Наклон головки достигается за счет использования зубчатого сектора с компенсацией люфта. Подшипники защищаются мощным воздушным экраном, который предотвращает их от загрязнения [16].

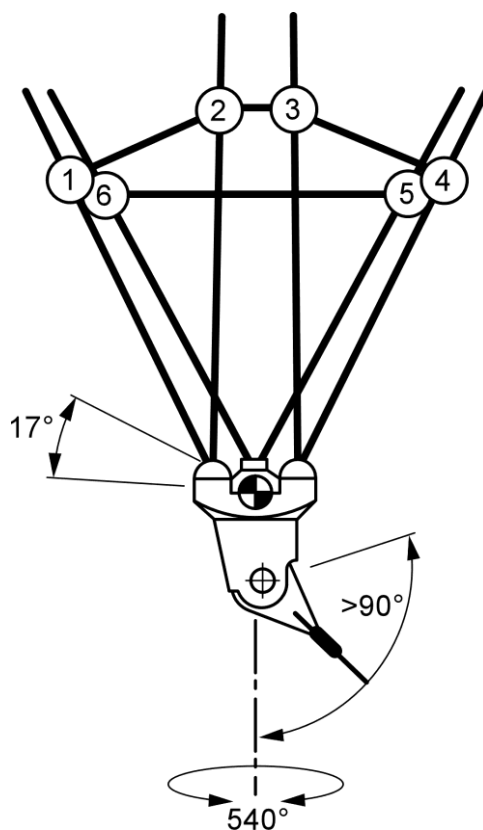


Рисунок 61 – Углы наклона двухосевой поворотной головки

2.5.6 Базовая платформа

Гексаподы должны монтироваться на жесткой базовой платформе, которая не должна существенно деформироваться под воздействием рабочих нагрузок. Купольная конструкция верхней платформы «Geodetic» показана на рисунке 62. Купол является наиболее логичной конфигурацией для достижения наилучшего углового диапазона гексапода при обеспечении максимальной жесткости и устойчивости.

Круглая форма платформы гарантирует то, что узлы крепления элементов рамы располагаются, как можно ближе к точкам концентрации напряжений, которыми являются места крепления сферических приводов. Предусмотренные на выпуклой поверхности купола ребра замыкают его конструкцию и повышают его жесткость, позволяя при этом легко подключать сферические приводы без необходимости использования сложной электропроводки. Собранный купол заделывается в резиновый корпус, который дополнительно демпфирует вибрации и обеспечивает 100 % контакт с поверхностями рамы. Купола из чугуна должны проектироваться с широ-

ким применением метода конечных элементов для минимизации их веса при сохранении достаточной для поддержания гексапода жесткости [16].

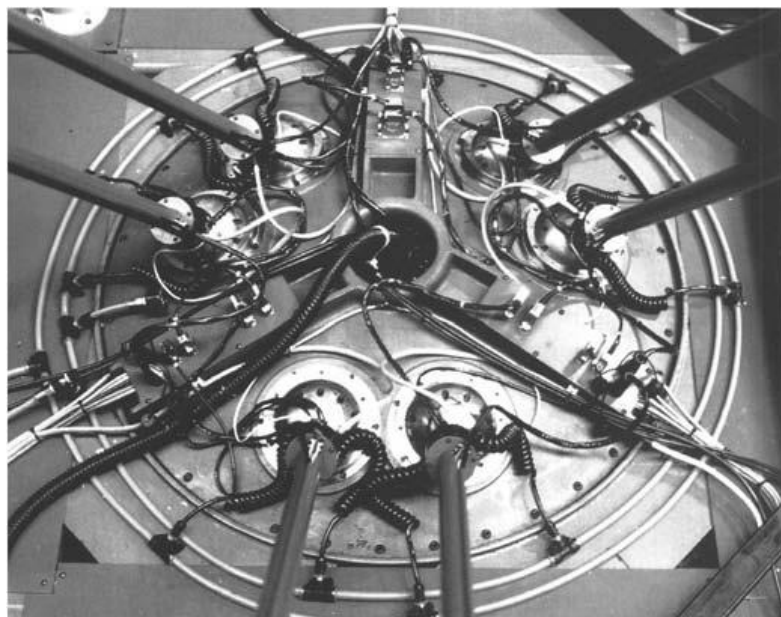


Рисунок 62 – Купольная верхняя платформа конструкции «Geodetic»

2.5.7 Энкодеры

Для контроля длины стоек в гексаподах используются линейные энкодеры. Существуют два основных типа энкодеров: относительные и абсолютные энкодеры. Абсолютные энкодеры требуют только однократной калибровки при своей установке, после чего могут незамедлительно использоваться для измерения необходимой длины стоек, в то время как относительные энкодеры требуют калибровки перед каждым своим использованием [13].

Абсолютные энкодеры включают в себя LVDT-датчики (Linear Variable Differential Transformer, т.е. дифференциальный трансформатор для измерения линейных перемещений) производства «Macrosensors» (рисунок 63а), LDDM-датчики (Laser Doppler Displacement Meter, т.е. лазерный доплеровский датчик смещений) производства «Optodyne» (рисунок 63б) и оптические системы производства «Renishaw» (рисунок 63в). Такие абсолютные энкодеры являются очень точными, но дорогостоящими системами.

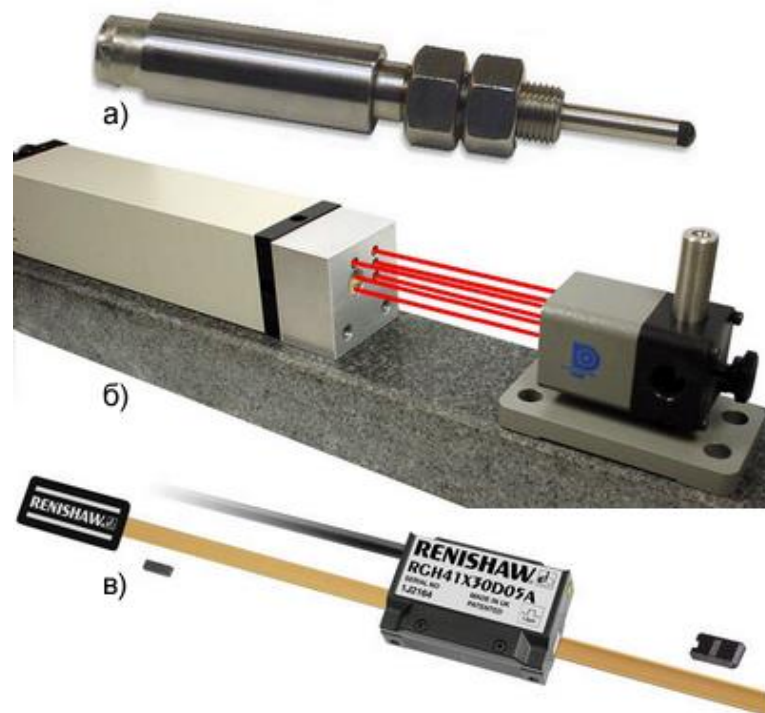


Рисунок 63 – Разновидности линейных энкодеров

Для измерения угловых перемещений стоек используются угловые энкодеры. Большинство существующих угловых энкодеров являются относительными энкодерами. Однако компания «Fanuc» производит относительные датчики, которые работают, как абсолютные благодаря наличию батареи, сохраняющей счет числа импульсов энкодера. Наиболее распространенными и наиболее экономичными угловыми энкодерами, которые по своему принципу действия являются относительными, выступают оптические энкодеры (рисунок 64 слева) и потенциометры (рисунок 64 справа). В потенциометрах измерение угловых смещений производится на основе колебаний электрического сопротивления, а в оптических энкодерах используется световой источник и фотодетектор. На диск оптического энкодера наносятся либо специальные метки, либо отверстия, которые при прохождении светового луча улавливаются фотодетектором, что позволяет измерять угловые перемещения.

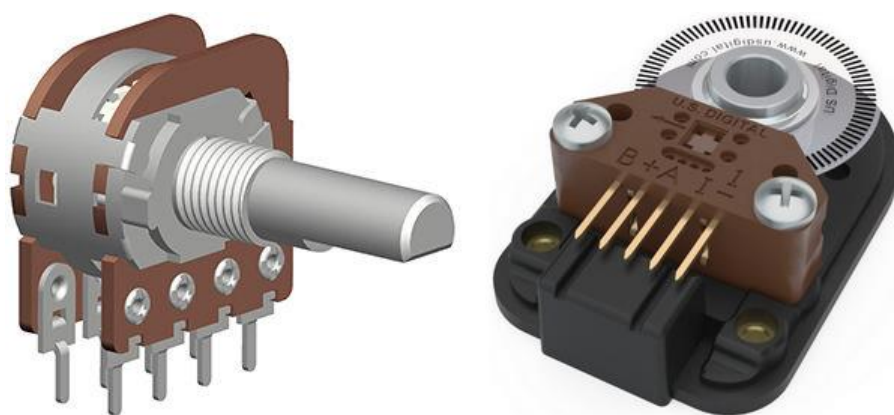


Рисунок 64 – Угловые энкодеры

2.5.8 Система управления

Как станок, гексапод нуждается в более сложной системе управления в сравнении с традиционными станками. В гексаподах для управления движениями инструментальной платформы должны учитываться непрерывные и согласованные между собой перемещения стоек. Траектория, описываемая режущим инструментом, управляется программным обеспечением CAD/CAM, основанным на картезианских координатах X , Y и Z и векторах ориентации A , B и C шести стоек. Задающие положение координаты X , Y , Z , A , B и C каждой стойки вычисляются контроллером в режиме реального времени, на что уходит несколько миллисекунд.

Помимо геометрии траектории, расчеты перемещений инструмента требуют дополнительных данных, таких как скорость и ускорение движения. Результаты вычислений затем анализируются и проверяются в реальном времени, чтобы удостовериться в том, что функциональные ограничения станка не будут превышены для предотвращения поломки инструмента на станке. Гексапод обладает чрезвычайной подвижностью своих элементов, что может привести к столкновениям между ними. Стойки могут соприкасаться или даже пересекаться друг с другом. Такая возможность должна восприниматься и предотвращаться контроллером гексапода.

Траектории должны корректироваться контроллером с учетом диаметра и длины инструмента в операционной системе реального времени. Программное обеспечение контроллера также должно компенсировать погрешности, обусловлен-

ные различными элементами станка. Вибрации, скоростные параметры стоек и погрешности позиционирования шарниров и узлов, вызванные неточными вычислениями, тоже должны быть скомпенсированы контроллером. Теплота, которая выделяется в результате относительных перемещений элементов под нагрузкой, приводит к появлению тепловых деформаций сложного характера, и это также должно компенсироваться и корректироваться. В 1997 г. компания «Siemens» разработала систему числового программного управления «SINUMERIK 840D» (рисунок 65), дающую возможность интеграции различных источников погрешности для создания эффективного контроллера, который был использован «Geodetic» и «Ingersoll».

В отличие от других, компания «Geodetic» использовала контроллер «Siemens», как инструмент, в реальном времени реализующий концепцию «Art-to-Part», который способен управлять одновременным движением неограниченного числа осей с использованием G и M кодов, CLDATA и APT. Под «Art-to-Part» понимается процесс проектирования изделия, начиная с его концептуального представления и заканчивая его производством в полностью цифровой среде.

Новый высокопроизводительный контроллер на базе персонального компьютера обеспечивает экономичный подход к управлению многокоординатными станками. Простой в использовании комплексный графический интерфейс пользователя помогает оператору справляться с выполнением всех утомительных задач. Взаимодействие со станком осуществляется через программируемый логический контроллер.

«Art-to-Part» использует последние алгоритмы преобразования прямой и обратной кинематики. Эти алгоритмы являются оптимизированными и чрезвычайно быстрыми. «Art-to-Part» является полностью независимым от аппаратного обеспечения и включает в себя базу данных инструмента, поддержку автоматической смены инструмента, автоматической смены головки, смены паллет, измерительных щупов и многих других функций. Полностью написанный на C++ «Art-to-Part» может быть портирован на любую платформу с минимальными затратами [16].



Рисунок 65 – Стойка ЧПУ «SINUMERIK 840D»

2.6 Контрольные вопросы

- 1 Какие ограничения имели первые станки с параллельной кинематической архитектурой, основанные на платформе Гью-Стюарта?
- 2 Какие преимущества дает использование гибридной параллельно-последовательной кинематики станка?
- 3 Каким образом реализуются все возможные перемещения подвижной платформы гексапода?
- 4 В чем заключаются основные достоинства и недостатки гексапода компоновки 6-6?
- 5 В чем заключаются основные достоинства и недостатки гексапода компоновки 6-3?
- 6 В чем заключаются основные достоинства и недостатки гексапода компоновки 3-3?
- 7 Какие типы линейных приводов стоек могут использоваться в гексаподах?
- 8 Что собой представляют гексаподы с телескопическими стойками?
- 9 Что собой представляют гексаподы со стойками винтового типа?
- 10 Что собой представляет сферического привод, который может использо-

ваться в конструкциях гексаподов?

11 В чем заключаются достоинства и недостатки шаровых и универсальных шарниров?

12 Каковы конструктивные особенности различных типов вильчатых шаров?

13 Какими конструктивными особенностями характеризуется шпиндель «TurboTool»?

14 Для чего в конструкциях гексаподов используются поворотные головки?

15 Каким основным требованиям должна удовлетворять базовая платформа гексаподов?

16 Какие типы энкодеров применяются для контроля линейных и угловых перемещений элементов гексаподов?

3 Характеристики гексаподов

Гексаподы представляют собой современную технологию, являющуюся переходным звеном между многокоординатными роботами и станками, в которых используются поступательные и/или вращательные движения. Текущая парадигма в проектировании и производстве гексаподов связана с интеграцией многочисленного аппаратного и программного обеспечения для создания уникального станка чрезвычайно высокой жесткости и точности. Целью создания такого интегрированного станка является улучшение качества и надежности, а также снижение затрат и времени производственного цикла за счет отказа от традиционных конструкций механизмов. Если разработки и улучшения в этой области будут продолжаться, то вероятно, что гексаподы, наконец, станут широко распространены. Гексаподы обеспечивают значительные преимущества для конечного пользователя, поскольку предлагают много новых атрибутов для производственного процесса [16].

3.1 Достоинства гексаподов

Многочисленные достоинства гексаподов включают в себя следующее:

1 *Шесть степеней свободы.* Гексапод, с его шестью стойками, обеспечивает инструментальной платформе 6 степеней свободы. Кроме поступательных перемещений в ортогональных направлениях X, Y и Z платформа также может совершать угловые перемещения (наклоняться и закручиваться). Это достоинство позволяет шпинделю поворачиваться на произвольные углы при обработке деталей сложной геометрической формы таких, как лопатки турбин, пресс-формы, штампы и другие детали, требующие высокой точности.

2 *Гибкость и адаптивность.* Гексаподы способны работать без перерывов в соответствии с гибким или адаптивным производственным процессом. При этом под гибкостью понимается способность реагировать на запланированные изменения, а под адаптивностью – способность реагировать на незапланированные изменения. Механическая простота и отсутствие потребности в специальном фундаменте предоставляет пользователю возможность быстро реконфигурировать оборудование

в соответствии с изменениями на поточной линии с опцией простого хранения разобранных станков, когда они не нужны.

3 Производительность. Гексаподы обеспечивают более высокую производительность за счет:

а) способности к непрерывной обработке благодаря использованию челночной системы паллет, которая может автоматически вносить заготовку в рабочую зону и удалять ее из нее;

б) использования высокоскоростного устройства автоматической смены инструмента;

в) снижения массы подвижных деталей для достижения очень быстрых ускорений/замедлений до 0,5-1 G (рисунок 66а). Многие конструкции гексаподов обеспечивают скорости подач до 30 м/мин (рисунок 66б) при сохранении точности обработки. Такая скорость подачи намного превышает скорость подачи в обычных станках, в которых часто заготовка перемещается вместе с массивной базовой деталью;

г) использования высокоскоростных и высокоточных шпинделей большой мощности;

4 *Жесткость и устойчивость*. Хорошая конструкция гексапода характеризуется своим жестким каркасом, в котором отсутствуют значительные деформации под действием нагрузок. Оптимальный подход к проектированию гексаподов должен учитывать подверженность стоек продольному изгибу. Критическая продольная нагрузка пропорциональна четвертой степени диаметра стойки и обратно пропорциональна квадрату ее длины. Следовательно, для обеспечения устойчивости конструкции достаточно стойки небольшого диаметра. Высокая жесткость и устойчивость элементов гексапода находят свое отражение в чрезвычайно высоких собственных частотах, что позволяет обработку с высокими скоростями резания. Жесткость гексапода фирмы «Ingersoll» примерно в 3-4 раза выше, чем жесткость обычного пятикоординатного обрабатывающего центра того же класса (рисунок 66в).

5 *Точность и надежность*. Точность гексаподов оценивается волюмометрической погрешностью. Любые нагрузки, возникающие при работе гексапода, преоб-

разуются в растяжение или сжатие. Следовательно, станок не подвержен влиянию изгибающих моментов, что способствует повышению точности обработки. Параллельное расположение стоек само по себе приводит к усреднению погрешности позиционирования. Гексаподы легче, чем традиционные станки и поскольку трение скольжения в них практически отсутствует, они характеризуются намного меньшей величиной мертвого хода при реверсировании осей, что способствует более плавной траектории движения. В этой же связи, длиной стоек можно управлять с точностью до 2,5 мкм с использованием специального программного обеспечения, а в некоторых моделях гексаподов обеспечивается субмикронная точность.

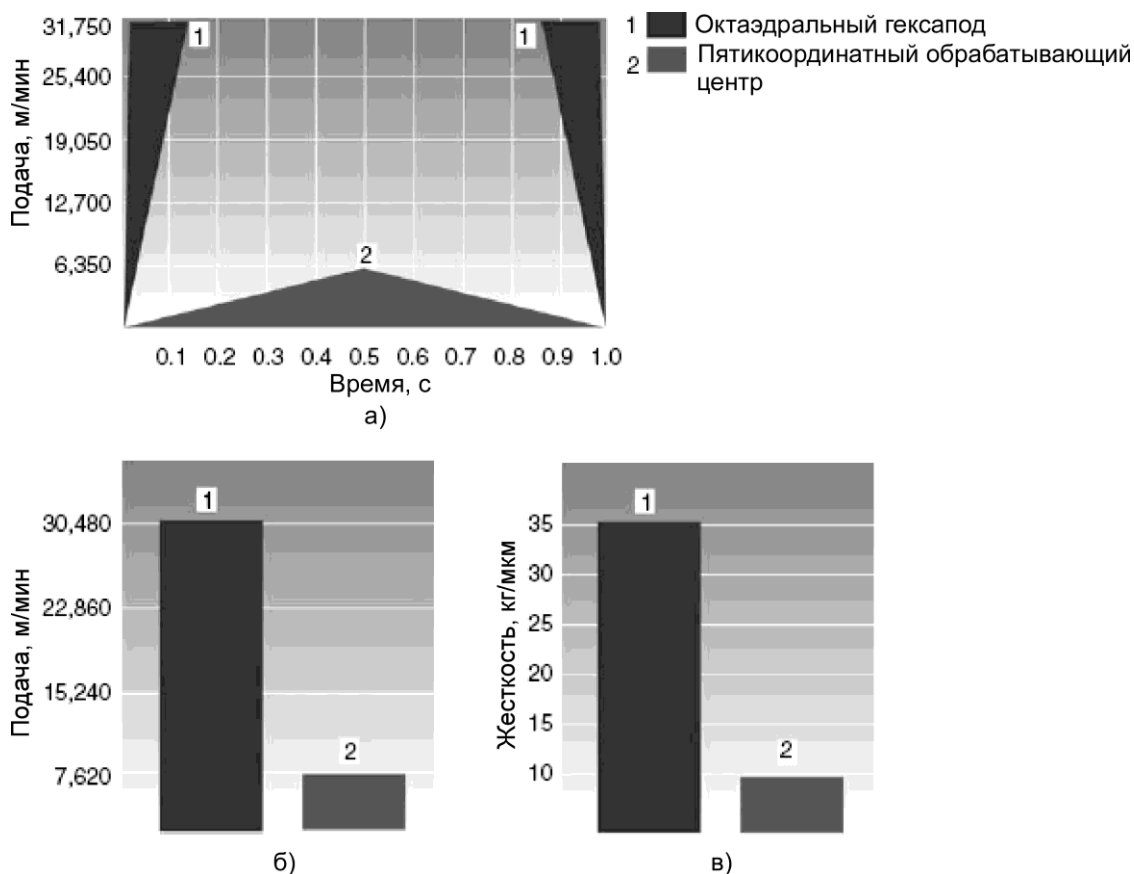


Рисунок 66 – Характеристики гексапода

6 Специфика установки. За счет концентрации всех сил, возникающих в процессе обработки, внутри замкнутой конструкции гексапода достигается важное преимущество, а именно отсутствие потребности в специальном фундаменте. Разработка и установка фундамента для обычных станков связана с существенными затратами. Независимость гексапода от фундамента позволяет ему успешно функциониро-

вать, например, на палубе корабле, находящегося в открытом море, будучи, положенным на бок или подвешенным к потолку без ущерба для его точности обработки.

7 Простота. Еще одним потенциалом гексаподов является их простота конструкции и легкость производства. Число деталей в гексапode составляет около 300 штук, в то время как в обычном станке оно составляет около 1000 штук. Другой важной характеристикой является наличие большого числа одинаковых деталей. Это настолько упрощает и ускоряет сборку гексапода, что он может продаваться в разобранном виде, как комплект деталей.

8 Мобильность. Гексапод характеризуется высокой мобильностью. Это станок, который можно взять как для работы на отдаленных нефтяных месторождениях, так и для работы на различных производственных предприятиях.

9 Высокая нагрузочная способность. Высокая номинальная нагрузка (мощность/вес) является очень важной характеристикой гексаподов. Силы резания, действующие на подвижную платформу, распределяются приблизительно одинаково по шести параллельным стойкам. Это означает, что каждая стойка подвержена только 1/6 от полной нагрузки. Кроме того, стойки испытывают только сжимающие или растягивающие осевые нагрузки, вследствие чего нет необходимости делать их массивными и крупногабаритными, как детали традиционных станков.

10 Масштабируемость. Размеры гексаподов могут масштабироваться, как в большую, так и в меньшую сторону для адаптации к множеству областей применения, варьирующих от микросборки и хирургии до фрезерных, сверлильных, токарных, сварочных, окрасочных и измерительных операций. Разновидности конструкций гексаподов варьируют по размеру от настольных моделей для полупроводниковой промышленности до огромных модулей таких больших, что их октаэдрическая рама представляет собой строительную конструкцию.

11 Маневренность. Гексаподы имеют сложное рабочее пространство (усеченный шестигранный конус), определяемый полярным размахом стоек между их максимальным удлинением и укорочением, а также степенью угловой подвижности. Маневренность существенно возрастает при добавлении в конструкцию гексапода двухкоординатной поворотной головки.

12 *Улучшенные системы управления.* Ключевым шагом в проектировании гексаподов стала разработка компьютерной системы управления и программного обеспечения, способных выполнять сложные алгоритмические вычисления, необходимые для управления стойками. Используемый в них процессор требует вычислительную мощность, эквивалентную объединенной мощности нескольких персональных компьютеров. Кроме того, программное обеспечение должно быть способным компенсировать смещения, температурные деформации и т.п.

13 *Стоимость.* На смену традиционным станкам приходят гексаподы. Поскольку создается все больше гексаподов, ожидается, что в ближайшем будущем их цена снизится на 20 % или ниже и будет сопоставима с ценой эквивалентных станков с ЧПУ (рисунок 67). Это объясняется тем, что они просты в проектировании и сборке. Быстрая сборка означает потребность в меньшем количестве инвентаря, в меньшем рабочем пространстве и меньших затратах труда. Шесть идентичных стоек упрощают конструкцию гексапода, обеспечивая легкую и быструю сборку и снижение затрат на техническое обслуживание. Замена поврежденных деталей, подверженных износу, также не вызывает никаких проблем. Управление и поверка облегчены за счет использования высокоэффективного программного обеспечения. Кроме того, потребление энергии в гексаподах значительно меньше, чем в традиционных станках. Рисунок 68 иллюстрирует сравнение гексаподов и обычных станков по ряду показателей.

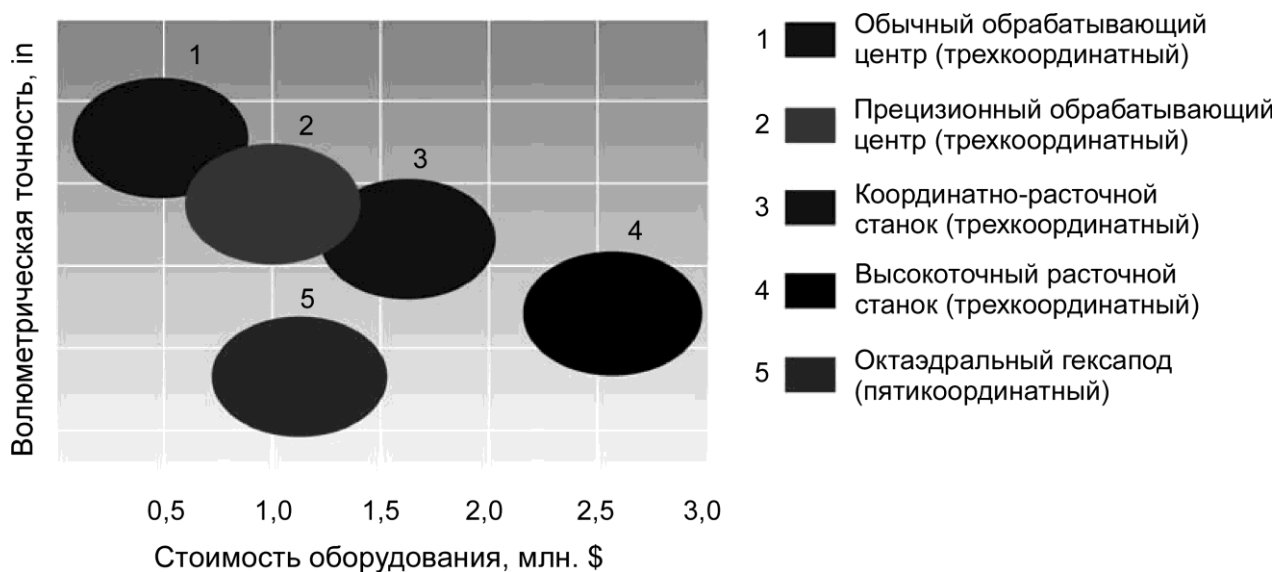


Рисунок 67 – Сравнение стоимости гексаподов и обычных станков

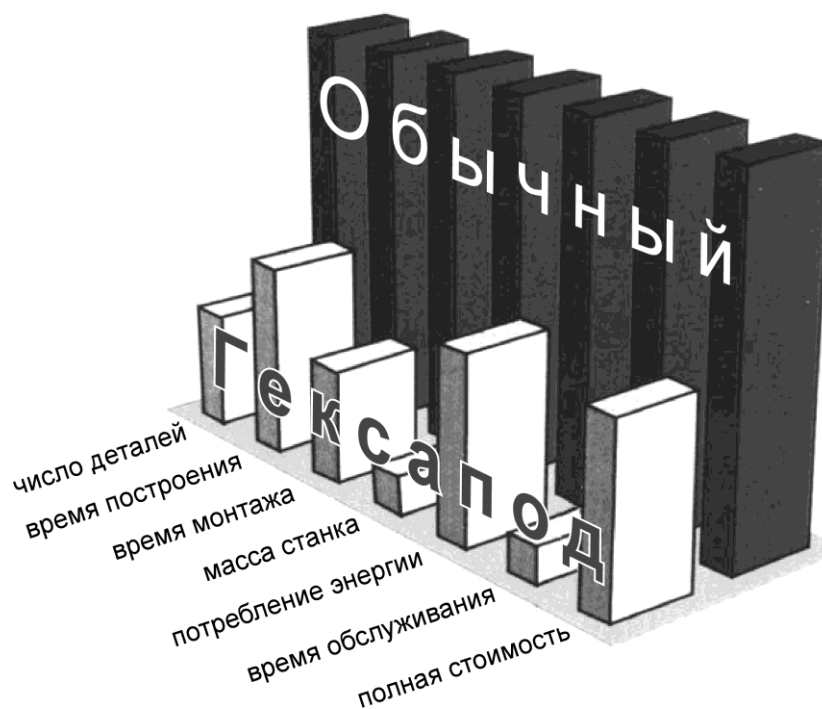


Рисунок 68 – Сравнение различных показателей гексаподов и обычных станков

3.2 Ограничения гексаподов

Однако, несмотря на отмеченные достоинства, использование гексаподов связано с рядом проблем, что требует дальнейших разработок и улучшений их конструкции. Основные ограничения гексаподов включают в себя:

1 *Трение.* Данное обстоятельство является ключевой проблемой гексаподов, т.к. высокие коэффициенты трения в их узлах ($\mu = 0,8$) негативно влияют на их точность и повторяемость. Однако в более совершенных конструкциях, где используются специальные керамические покрытия и смазочные материалы, коэффициент трения может быть снижен до 0,2.

2 *Длина стоек.* Точность гексапода обратно пропорциональна длине стоек вследствие наличия их возможной кривизны. Эта проблема может быть устранена путем предварительного контроля погрешностей формы каждой стойки перед их установкой на станок.

3 *Температурные деформации.* Большие температурные деформации в гексаподах наблюдаются вследствие быстрых перемещений стоек, а также высоких скоростей вращения шпинделя (20000-30000 об/мин). Одним из путей преодоления

данной проблемы является отслеживание температуры стоек в реальном времени и использование основанного на результатах предварительного инженерного анализа алгоритма автоматической компенсации температурного удлинения стоек, заложенного в программное обеспечение станка. В соответствии с этим в гексаподах компании «Ingersoll» применяется улучшенная технология температурной компенсации, основанная на использовании лазерной системы обратной связи, при помощи которой устраняются температурные изменения длины стоек.

4 *Поверка.* Точность гексапода зависит не только от точного контроля длины стоек, но и также от информации об их геометрических характеристиках. Благодаря наличию различных допусков на изготовление стоек гексаподов их конечная точность зависит от многих факторов и большое число параметров должно быть указано для описания геометрических характеристик механизма. Это осуществляется через трудоемкую процедуру поверки (калибровки) гексапода, которая все еще является нерешенной проблемой. Решение этой проблемы требует разработки системы поверки, которая будет гарантировать высокий уровень точности, позволяя гексаподу многократно производить обработку деталей с заданным допуском. Такая внутренняя система поверки должна позволять гексаподам контролировать их собственные характеристики и корректировать любые обнаруженные погрешности.

3.3 Контрольные вопросы

- 1 Чем объясняется высокая гибкость и адаптивность станков-гексаподов?
- 2 За счет чего обеспечивается высокая производительность станков-гексаподов?
- 3 Почему конструкции гексаподов обладают высокой жесткостью и устойчивостью?
- 4 Чем объясняется повышенная точность гексаподов по сравнению со станками традиционной компоновки?
- 5 С чем связана высокая нагрузочная способность, которой характеризуются гексаподы?
- 6 С чем связаны проблемы, возникающие при эксплуатации гексаподов?

4 Математические модели гексапода

4.1 Обратная кинематическая модель гексапода

Обратная кинематическая задача для гексапода связана с вычислением длины стоек и положений шарниров при заданном положении подвижной платформы. Разработка номинальной кинематической модели платформы в данном случае предполагает следующие допущения [1]:

- все соединительные шарниры являются идеальными в смысле того, что их координатные оси строго перпендикулярны друг другу и пересекаются в одной точке (соотнесенной с центром шарнира);
- линейные приводы идеально присоединены к шарнирам таким образом, что ось каждого привода проходит через соответствующие центры шарниров;
- удлинение каждой стойки может быть определено при помощи выходных данных датчика (линейного энкодера) без каких-либо погрешностей;
- платформа точно собрана таким образом, что положение на ней шарниров точно известно.

Конфигурация станка-гексапода параллельной структуры с шестью идентичными стойками приведена на рисунке 69.

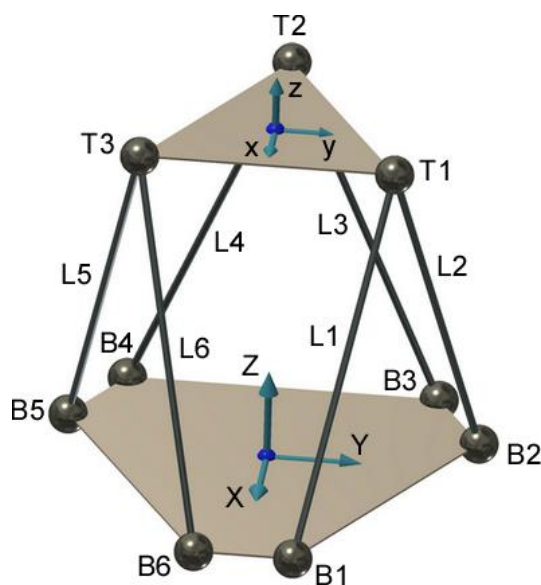


Рисунок 69 – Конфигурация станка-гексапода

Его нижняя платформа, называемая «Базовой», представляет собой полуправильный шестиугольник. Верхняя платформа, которая обозначается, как «Верхняя», представляет собой равносторонний треугольник. Один конец каждой стойки соединен с вершинами базовой платформы через универсальный шарнир с тремя степенями свободы. Другой конец стойки соединен с соседней стойкой через вильчатый шар для формирования спаренной структуры. Каждая пара стоек, в свою очередь, соединена с вершинами верхней платформы через универсальный шарнир с тремя степенями свободы. Полная система имеет шесть степеней свободы.

Система отсчета базовой платформы установлена путем фиксации прямоугольной системы координат (X, Y, Z) в центре тяжести платформы с осью Z , направленной вертикально вверх. Система отсчета верхней платформы установлена путем фиксации системы координат (x, y, z) в центре тяжести платформы с осью z , направленной наружу по нормали к плоскости платформы.

Длины шести стоек заданы, как L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 и L_6 . Обозначение положения начала верхней системы отсчета относительно начала нижней системы отсчета имеет вид $[P_x, P_y, P_z]$. Углы (α, β, γ) представляют собой углы поворота, определяемые вращением верхней платформы: сперва на угол β относительно оси Y , затем на угол α относительно оси X и, наконец, на угол γ относительно оси Z , как показано на рисунке 70.

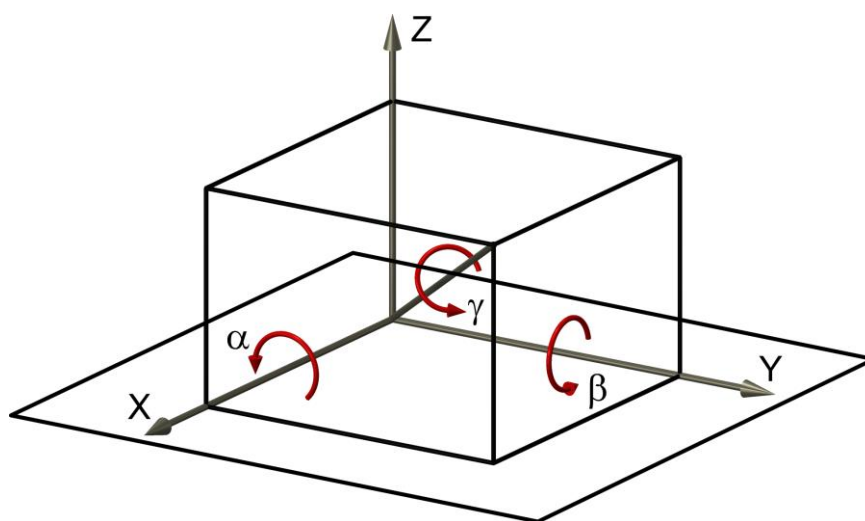


Рисунок 70 – Углы поворота, определяющие вектор приближения для верхней платформы

Повороты вокруг осей X, Y и Z могут быть соответственно выражены как:

$$\mathbf{R}_{X,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_{Y,\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_{Z,\gamma} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

С использованием метода углов Эйлера, матрица преобразования между подвижной верхней системой отсчета (TOP) и фиксированной базовой системой отсчета (BASE) может быть выражена следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{\text{BASE}}^{\text{TOP}} = \mathbf{T}_{\text{disp}} \cdot \mathbf{T}_{Y,\beta} \cdot \mathbf{T}_{X,\alpha} \cdot \mathbf{T}_{Z,\gamma} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \quad (3) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \beta \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta & P_x \\ \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha & P_y \\ -\sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Координаты вершин верхней системы отсчета могут быть приведены к базовой системе отсчета при помощи следующей матрицы преобразования:

$$\begin{bmatrix} X_{Ti} \\ Y_{Ti} \\ Z_{Ti} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\text{BASE}}^{\text{TOP}}(P_x, P_y, P_z, \alpha, \beta, \gamma) \cdot \begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

Геометрические размеры и конфигурация базовой и верхней платформы приведены на рисунке 71.

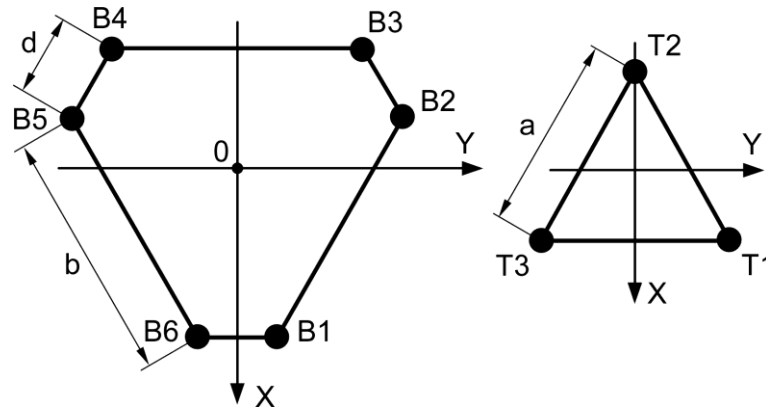


Рисунок 71 – Размеры базовой и верхней платформы

Координаты шести шарниров на базовой платформе в соответствии с рисунком 71 выражаются в базовой системе отсчета как:

$$\begin{aligned}
 \vec{B}_1 &: \left(\frac{\sqrt{3}}{6}(d+2b), \frac{d}{2}, 0 \right)^T & \vec{B}_2 &: \left(-\frac{\sqrt{3}}{6}(b-d), \frac{b+d}{2}, 0 \right)^T \\
 \vec{B}_3 &: \left(-\frac{\sqrt{3}}{6}(b+2d), \frac{b}{2}, 0 \right)^T & \vec{B}_4 &: \left(-\frac{\sqrt{3}}{6}(b+2d), -\frac{b}{2}, 0 \right)^T \\
 \vec{B}_5 &: \left(-\frac{\sqrt{3}}{6}(b-d), -\frac{b+d}{2}, 0 \right)^T & \vec{B}_6 &: \left(\frac{\sqrt{3}}{6}(d+2b), -\frac{d}{2}, 0 \right)^T
 \end{aligned} \tag{5}$$

Координаты трех шарниров на верхней платформе относительно базовой системы отсчета выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \vec{T}_1 &= \mathbf{R}_{\text{BASE}}^{\text{TOP}} \cdot \left(\frac{a\sqrt{3}}{6}, \frac{a}{2}, 0 \right)^T \\
 \vec{T}_2 &= \mathbf{R}_{\text{BASE}}^{\text{TOP}} \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{3}, 0, 0 \right)^T \\
 \vec{T}_3 &= \mathbf{R}_{\text{BASE}}^{\text{TOP}} \cdot \left(\frac{a\sqrt{3}}{6}, -\frac{a}{2}, 0 \right)^T
 \end{aligned} \tag{6}$$

Соответственно длины шести стоек могут быть определены как:

$$\begin{aligned} L_1 &= \left| \vec{B}_1 - \vec{T}_1 \right| & L_2 &= \left| \vec{B}_2 - \vec{T}_1 \right| & L_3 &= \left| \vec{B}_3 - \vec{T}_2 \right| \\ L_4 &= \left| \vec{B}_4 - \vec{T}_2 \right| & L_5 &= \left| \vec{B}_5 - \vec{T}_3 \right| & L_6 &= \left| \vec{B}_6 - \vec{T}_3 \right| \end{aligned} \quad (7)$$

4.2 Прямая кинематическая модель гексапода

Для механизма с последовательной кинематической структурой построение прямой кинематической модели является намного более простым, чем в случае модели обратной кинематики. Однако для параллельного механизма ситуация прямо противоположна, т.е. построение прямой кинематической модели для него осуществляется значительно сложнее [1]. Далее рассматривается построение прямой кинематической модели для структуры гексапода, иллюстрируемой рисунками 69 и 71.

В данном случае все кинематические преобразования определяются длинами L_i и ориентацией стоек по отношению к верхней платформе. При известных длинах всех шести стоек геометрические характеристики трех спаренных треугольных структур ($\Delta B_{2i-1} T_i B_{2i}$, $i = 1, 2, 3$) будут определяться так, как показано на рисунке 72.

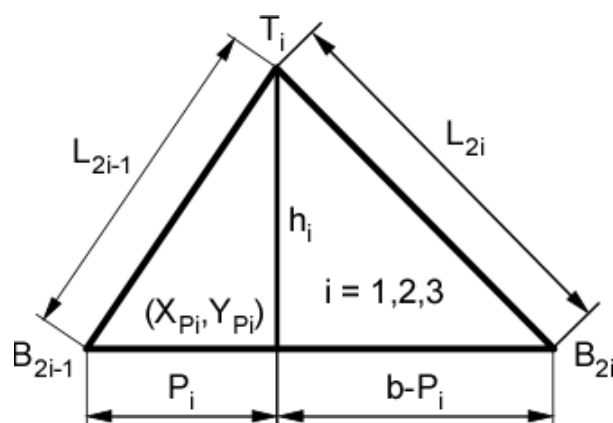


Рисунок 72 – Геометрические взаимосвязи спаренной структуры

Высоты трех спаренных треугольных структур (h_1, h_2, h_3) могут быть представлены через величины L_i и P_i . При помощи простых геометрических вычислений координаты X_{P_i} и Y_{P_i} , где $i = 1, 2, 3$, могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P_i &= \frac{1}{2b} (b^2 + L_{2i-1}^2 - L_{2i}^2); \quad i = 1, 2, 3 & X_{P2} &= -\frac{\sqrt{3}}{2} (b + 2d) \\
 h_i &= \sqrt{L_{2i-1}^2 - P_i^2}; \quad i = 1, 2, 3 & Y_{P2} &= \frac{1}{2} (d - 2P_1) \\
 X_{P1} &= \frac{\sqrt{3}}{6} (2b + d - 3P_1) & X_{P3} &= -\frac{\sqrt{3}}{6} (b - d - 3P_3) \\
 Y_{P1} &= \frac{1}{2} (d + P_1) & Y_{P3} &= -\frac{1}{2} (b + d - P_3)
 \end{aligned} \tag{8}$$

Так как три спаренные треугольные структуры ($B_1T_1B_2, B_3T_2B_4, B_5T_3B_6$) связаны между собой, они не могут свободно перемещаться без ограничений. Например, на положения T_i накладывается такое условие, что T_1, T_2 и T_3 должны формировать равносторонний треугольник с фиксированными размерами. Хотя координаты этих вершин T_i верхней платформы являются неизвестными, координаты их проекций (X_{Ti}, Y_{Ti}) на плоскость X-Y будут определяться следующими ограничениями:

$$\begin{aligned}
 Y_{T1} &= \sqrt{3}X_{T1} - (\sqrt{3}X_{P1} - Y_{P1}) = \sqrt{3}X_{T1} + \frac{1}{b} (L_1^2 - L_2^2) \\
 Y_{T2} &= Y_{P2} = \frac{1}{2b} (L_4^2 - L_3^2) \\
 Y_{T3} &= -\sqrt{3}X_{T3} - (\sqrt{3}X_{P3} - Y_{P3}) = -\sqrt{3}X_{T3} + \frac{1}{b} (L_5^2 - L_6^2)
 \end{aligned} \tag{9}$$

Расстояние между вершиной T_i и точкой пересечения ($X_{Ti}, Y_{Ti}; i = 1, 2, 3$), обозначенное как h_i , может быть вычислено по формуле:

$$h_i^2 = (X_{Ti} - X_{Pi})^2 + (Y_{Ti} - Y_{Pi})^2 + Z_{Ti}^2 \tag{10}$$

Для замыкания кинематической цепи должны быть добавлены еще три граничных условия, имеющие вид:

$$\begin{aligned}
(X_{T1} - X_{T2})^2 + (Y_{T1} - Y_{T2})^2 + (Z_{T1} - Z_{T2})^2 &= a^2 \\
(X_{T1} - X_{T3})^2 + (Y_{T1} - Y_{T3})^2 + (Z_{T1} - Z_{T3})^2 &= a^2 \\
(X_{T3} - X_{T2})^2 + (Y_{T3} - Y_{T2})^2 + (Z_{T3} - Z_{T2})^2 &= a^2
\end{aligned} \tag{11}$$

Комбинирование вышеприведенных выражений дает три нелинейных алгебраических уравнения с тремя переменными (X_{T1}, X_{T2}, X_{T3}).

$$\begin{aligned}
a^2 + 2X_{T1}X_{T2} - 2X_{T1} \cdot [X_{P1} + \sqrt{3} \cdot (Y_{P1} - Y_{P2})] - 2X_{P2}X_{T2} - \\
- [(\sqrt{3}X_{P1} - Y_{P1} + Y_{P2})^2 + (h_1^2 + h_2^2) - 4X_{P1}^2 - X_{P2}^2] + \\
+ 2\sqrt{[h_1^2 - 4(X_{T1} - X_{P1})^2] \cdot [h_2^2 - (X_{T2} - X_{P2})^2]} = 0
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
a^2 - 4X_{T1}X_{T3} - 2X_{T1} \cdot [X_{P1} - 3X_{P1} + \sqrt{3} \cdot (Y_{P1} - Y_{P2})] - 2X_{T3} \cdot [-3X_{P1} + \\
+ X_{P3} + \sqrt{3} \cdot (Y_{P1} - Y_{P3})] - [(\sqrt{3} \cdot (X_{P1} + X_{P3}) - Y_{P1} + Y_{P3})^2 + (h_1^2 + h_3^2) - \\
- 4X_{P1}^2 - 4X_{P3}^2] + 2\sqrt{[h_1^2 - 4(X_{T1} - X_{P1})^2] \cdot [h_3^2 - (X_{T3} - X_{P3})^2]} = 0
\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
a^2 + 2X_{T2}X_{T3} - 2X_{T3} \cdot [X_{P3} + \sqrt{3} \cdot (Y_{P2} - Y_{P3})] - 2X_{P2}X_{T2} - \\
- [(\sqrt{3}X_{P3} - Y_{P2} + Y_{P3})^2 + (h_3^2 + h_2^2) - X_{P2}^2 - 4X_{P3}^2] + \\
+ 2\sqrt{[h_2^2 - (X_{T2} - X_{P2})^2] \cdot [h_3^2 - 4(X_{T3} - X_{P3})^2]} = 0
\end{aligned} \tag{14}$$

Так как полученные уравнения имеют высокую степень нелинейности, их точное решение практически невозможно. Их приближенное решение может быть получено при помощи различных численных методов, например, метода Ньютона-Рафсона или оптимизационного алгоритма Левенберга-Марквардта, основанного на минимизации суммы квадратов невязок уравнений.

После определения координат вершин верхней платформы ее положение может быть выражено следующим образом:

$$\begin{aligned}
p_X &= \frac{1}{3} \cdot (X_{T1} + X_{T2} + X_{T3}) \\
p_Y &= \frac{1}{3} \cdot (Y_{T1} + Y_{T2} + Y_{T3}) \\
p_Z &= \frac{1}{3} \cdot (Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T3})
\end{aligned} \tag{15}$$

4.3 Прямая кинематика с использованием дополнительных датчиков

Несмотря на возросшую в последнее время эффективность вычислительных алгоритмов и производительность процессоров, решение прямой кинематической задачи для гексапода все еще связано с определенными сложностями, и нахождение текущей позиции платформы может быть затруднено даже при наличии хорошей информации о расположении этой позиции. Кроме того, вызывают интерес исследования того, как можно сократить время вычислений при решении уравнений прямой кинематики, так как она является важной проблемой управления.

Одним из возможных подходов к решению отмеченных проблем выступает использование дополнительных датчиков (т.е. датчиков, количество которых превышает число степеней свободы механизма) для получения информации, позволяющей более быстро вычислять текущую позицию платформы за счет более сложного аппаратного обеспечения [9].

Добавление дополнительных датчиков связано с некоторыми интересными проблемами, такими как:

- какие типы датчиков, в каком месте и в каком количестве необходимы для получения единственного решения прямой кинематической задачи?
- как согласуется точность вычислений позиции платформы при данной погрешности измерения датчиков с требуемой точностью позиционирования?

Существуют два основных типа датчиков (энкодеров), которые могут добавляться в конструкцию параллельного механизма:

- угловые датчики, которые могут помещаться на пассивных шарнирах механизма по возможности ближе к базовой платформе для того, чтобы не утяжелять подвижные элементы механизма;
- линейные или угловые датчики, которые помещаются на дополнительных кинематических цепях или между существующими кинематическими цепями.

Главным недостатком дополнительных кинематических цепей (стоек) является риск возможного сокращения рабочего пространства вследствие еще более возможного риска интерференции стоек. С другой стороны, угловые датчики, поме-

щенные на шарниры, будут иметь увеличенные за счет длины стоек погрешности измерения, и, следовательно, здесь можно ожидать относительно плохую точность в оценке позиции платформы.

4.4 Динамическая модель гексапода

Динамическая модель гексапода предназначена для определения скоростей и ускорений рабочей платформы при движении по заданной траектории, а также сил, которые должны обеспечивать линейные приводы [3, 13].

4.4.1 Модель Д'Аламбера

Среди нескольких описанных в литературе динамических моделей наиболее удобной для описания динамики гексапода представляется модель Д'Аламбера. В его основу положен принцип, согласно которому для получения уравновешенной системы сил, действующих на подвижную механическую систему, ко всем ее материальным точкам необходимо, кроме фактически действующих на них активных сил и реакций связей, также условно приложить силы инерции точек. В этом случае для решения системы сил можно применять все уравнения статики. Математическая запись этого принципа может быть представлена как:

$$\sum_{i=1}^N (\mathbf{F}_i - \mathbf{m}_i \ddot{\mathbf{r}}_i) \delta \mathbf{r}_i = 0 \quad (16)$$

где \mathbf{F}_i – сила, приложенная к материальной точке, Н;

\mathbf{m}_i – масса материальной точки, кг;

$\mathbf{m}_i \ddot{\mathbf{r}}_i$ – сила инерции материальной точки, Н

$\delta \mathbf{r}_i$ – смещение системы, м.

Преимуществом данного подхода над методом Ньютона-Эйлера, также используемым для решения задач динамики механических систем, является то, что в этом случае не требуется вычислять реакции связей.

4.4.2 Вывод уравнений динамики гексапода

Вывод уравнений, описывающих динамику гексапода, основывается на расчетной схеме, приведенной на рисунке 73. На данной схеме показано распределение масс, выраженное через центры тяжести различных компонентов. При этом точка m_T соответствует центру тяжести верхней платформы, точка m_1 – центру тяжести цилиндра (корпуса) и точка m_2 – центру тяжести поршня (винта).

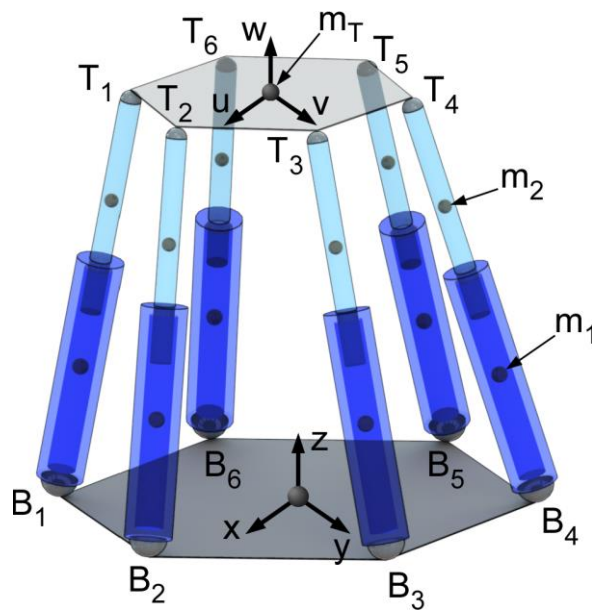


Рисунок 73 – Распределение масс гексапода

В соответствии с приведенной схемой вывод динамических уравнений упрощается за счет разделения полной системы на три подсистемы: поршни, цилиндры и платформа. Подвижная система координат задается в центре платформы. Дополнительные системы координат определяются своими началами, расположенными в основании каждой стойки (B_i , где $i = 1 \dots 6$). Для вычисления результирующих сил, необходимых для каждой стойки, перемещения платформы приводятся к системе координат стоек.

Силы, действующие на каждую стойку, показаны на рисунке 74. При этом каждая стойка рассматривается, как состоящая из двух основных компонентов: цилиндра и поршня. Цилиндр соединен с основанием в узле B_i , в то время как, пор-

шень присоединен к платформе в точке T_i . Сила тяжести предполагается действующей вертикально по нормали к плоскости основания. Поскольку во время работы линейного привода поршень перемещается относительно цилиндра, это относительно перемещение учитывается измерением расстояния между центром тяжести поршня и платформой (e_2) и расстояния между центром тяжести цилиндра и основанием (e_1).

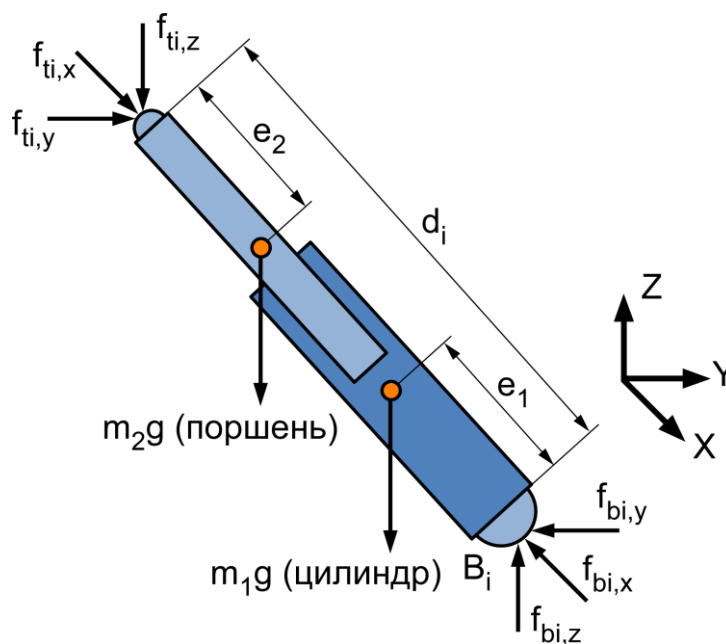


Рисунок 74 – Расчетная схема стойки

Каждая стойка рассматривается отдельно, как подсистема. Все подсистемы стоек комбинируются для формирования единственного матричного уравнения, которое нужно решить:

$$\tau = (\mathbf{J}_m^T)^{-1} (-\hat{\mathbf{F}}_m - \mathbf{J}_x^T \hat{\mathbf{F}}_x - \mathbf{J}_y^T \hat{\mathbf{F}}_y) - \hat{\mathbf{F}}_z \quad (17)$$

где τ – вектор сил, действующих на стойки;

\mathbf{J}_m – матрица Якоби платформы;

$\hat{\mathbf{F}}_m$ – суммарная сила, действующая на платформу;

\mathbf{J}_x – матрица Якоби компонентов стоек гексапода по направлению оси X ;

\hat{F}_x – суммарная сила, действующая на стойки в направлении оси X;

J_y – матрица Якоби компонентов стоек гексапода по направлению оси Y;

\hat{F}_y – суммарная сила, действующая на стойки в направлении оси Y;

\hat{F}_z – суммарная сила, действующая на стойки в направлении оси Z;

Решение приведенного уравнения дает неизвестные силы, действующие на каждую стойку.

4.4.3 Вычисление матрицы Якоби для кинематики гексапода

В рабочем пространстве гексапода существуют некоторые положения, в которых он приобретает одну или более дополнительных степеней свободы, что может привести:

- к потере контроля над рабочей платформой;
- к поломке гексапода, вследствие того, что его элементы могут быть подвержены чрезмерным нагрузкам.

Такие положения известны, как сингулярности. Сингулярности имеют значение, как для параллельных, так и для последовательных механизмов. В сингулярных положениях последовательный механизм утрачивает одну или более степеней свободы, а параллельный механизм наоборот приобретает одну или более степеней свободы.

Сингулярности определяются матрицей Якоби кинематики механизма. Когда определитель матрицы Якоби равен нулю, это указывает на сингулярное положение. Сингулярности могут быть проиллюстрированы на примере кривошипно-ползунного механизма, изображенного на рисунке 75. Так как он является гибридным механизмом, с его помощью можно показать два типа сингулярности. На рисунке 75а показан механизм, компоненты которого, вращаясь вокруг своих шарниров, приводят в движение ползун, перемещающийся вдоль направляющей. В одном случае, когда шатун совмещается с кривошипом (рисунок 75б), ползун занимает свое крайнее левое положение и получает возможность свободно вращаться. В результате для него утрачивается единственное возможное положение, и он может

приобретать множество положений, расположенных вдоль окружности. Другими словами он приобретает дополнительную степень свободы.

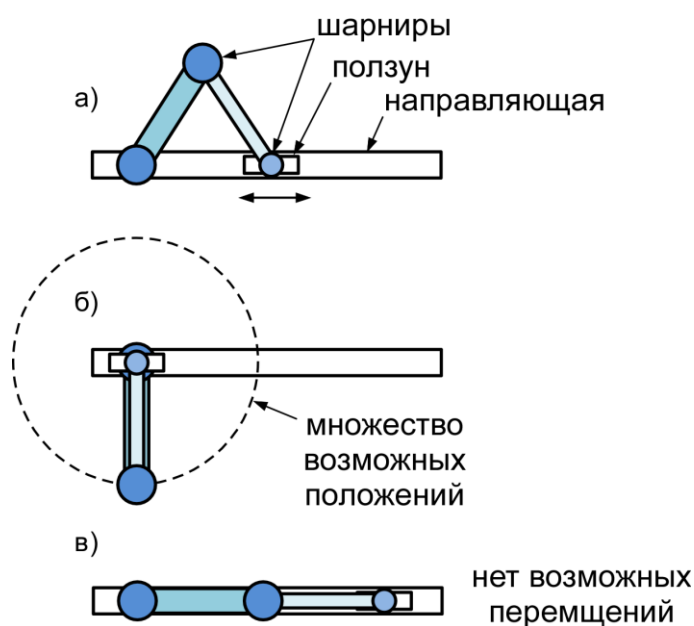


Рисунок 75 – Сингулярные положения кривошипно-ползунного механизма

В другом случае, когда ползун перемещается по направляющей в свое крайнее правое положение кривошип и шатун выстраиваются в линию, перемещение ползуна становится невозможным и механизм стопорится (рисунок 75в). Очевидно, что здесь степень свободы утрачивается.

При работе гексапода крайне нежелательно, чтобы подвижная платформа занимала сингулярные положения. По этой причине важно иметь возможность предсказывать эти положения перед планированием траектории движения платформы, что может быть сделано путем вычисления определителя матрицы Якоби.

Матрица Якоби обеспечивает взаимосвязь между входными линейными скоростями стоек и выходными линейными и угловыми скоростями подвижной платформы. Для гексапода, изображенного на рисунке 73, входной вектор ρ , который определяет линейные скорости шести стоек может быть записан в виде:

$$\dot{\rho} = [\dot{d}_1 \ \dot{d}_2 \ \dot{d}_3 \ \dot{d}_4 \ \dot{d}_5 \ \dot{d}_6]^T \quad (18)$$

Выходной вектор x , который определяет линейные и угловые скорости по-

движной верхней платформы может быть представлен в виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{v}_{px} \ \mathbf{v}_{py} \ \mathbf{v}_{pz} \ \boldsymbol{\omega}_{px} \ \boldsymbol{\omega}_{py} \ \boldsymbol{\omega}_{pz}]^T \quad (19)$$

Уравнение замкнутого контура для i -ой стойки будет иметь вид:

$$\mathbf{O}_B \mathbf{O}_T + \mathbf{O}_T \mathbf{T}_i = \mathbf{O}_B \mathbf{B}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{T}_i, \quad (20)$$

где \mathbf{O}_B и \mathbf{O}_T – центры базовой и верхней платформы соответственно

Дифференцирование уравнения (20) по времени дает уравнение следующего вида:

$$\mathbf{v}_p + \boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{p}_i = \mathbf{d}_i \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{s}_i + \dot{\mathbf{d}}_i \mathbf{s}_i, \quad (21)$$

где \mathbf{p}_i и \mathbf{s}_i соответственно обозначают вектор $\mathbf{O}_B \mathbf{O}_T$ и единичный вектор, направленный вдоль $\mathbf{B}_i \mathbf{T}_i$;

$\boldsymbol{\omega}_i$ – угловая скорость i -ой стойки относительно базовой системы отсчета в точке \mathbf{O}_B , рад/с;

Если обе части уравнения (21) скалярно умножить на \mathbf{s}_i , то $\boldsymbol{\omega}_i$ сокращается и уравнение принимает вид:

$$\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{v}_p + (\mathbf{p}_i \times \mathbf{s}_i) \cdot \boldsymbol{\omega}_p = \dot{\mathbf{d}}_i \quad (22)$$

Запись уравнения (22) для каждой стойки и комбинирование шести полученных скалярных уравнений дает матричное уравнение:

$$\mathbf{J}_x \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_p \dot{\boldsymbol{\rho}} \quad (23)$$

Здесь матрица \mathbf{J}_p справа определяет первый тип сингулярности (с потерей сте-

пней свободы), когда ее определитель равен нулю, а матрица \mathbf{J}_x слева определяет второй тип сингулярности (с добавлением степеней свободы), когда ее определитель равен нулю.

Матрица \mathbf{J}_x выражается как:

$$\mathbf{J}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1^T & (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{s}_1)^T \\ \mathbf{s}_2^T & (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{s}_2)^T \\ \mathbf{s}_3^T & (\mathbf{p}_3 \times \mathbf{s}_3)^T \\ \mathbf{s}_4^T & (\mathbf{p}_4 \times \mathbf{s}_4)^T \\ \mathbf{s}_5^T & (\mathbf{p}_5 \times \mathbf{s}_5)^T \\ \mathbf{s}_6^T & (\mathbf{p}_6 \times \mathbf{s}_6)^T \end{bmatrix} \quad (24)$$

Матрица \mathbf{J}_p является единичной и, следовательно, в гексапode будет отсутствовать первый тип сингулярности, т.е. все сингулярности в гексапode будут связаны с появлением дополнительных степеней свободы платформы.

4.5 Планирование траектории движения

Определение пути, по которому должна двигаться платформа гексапode необходимо для того, чтобы он беспрепятственно выполнял поставленные задачи. Наиболее важным этапом этой процедуры является проверка того, что действительна или нет заданная траектория с учетом присутствующих в рабочем пространстве сингулярных точек. Данная процедура называется планированием траектории движения. Для параллельных механизмов сингулярности существуют, как внутри рабочего пространства, так и на его границах. В связи с этим критерии действительности траектории для параллельных механизмов формулируются следующим образом [3]:

- траектория должна лежать внутри рабочего пространства механизма, откуда следует, что ограничения длины стоек и угловых перемещений шарниров не могут быть превышены и стойки не должны пересекаться между собой;
- траектория не должна иметь ни одной сингулярной точки на всем своем протяжении;

- если на траектории присутствует сингулярность, то путь должен быть перестроен заново с исключением обнаруженных сингулярных точек.

Планирование траектории может выполняться либо на основе вычисления определителя матрицы Якоби, либо на основе определения числа обусловленности матрицы Якоби. Вторым вариантом представляется более удобным поскольку, чем хуже обусловлена матрица, тем больше число обусловленности, которое изменяется от единицы до бесконечности (для сингулярных позиций) и позволяет судить о стабильности гексапода в любой его позиции.

4.6 Контрольные вопросы

1 Как выражается обратная кинематическая задача для гексапода?

2 На основе каких допущений может быть получена обратная кинематическая модель гексапода?

3 Как выражается прямая кинематическая задача для гексапода?

4 На основе каких геометрических соотношений может быть получена прямая кинематическая модель для гексапода компоновки 6-3?

5 Для чего используются дополнительные датчики при решении прямой кинематической задачи?

6 Что собой представляет динамическая модель гексапода, построенная на основе принципа Д'Аламбера?

7 Что понимается под сингулярными положениями гексапода?

8 В чем заключаются основные принципы планирования траектории движения для рабочей платформы гексапода?

5 Калибровка станков с параллельной кинематикой

5.1 Понятие калибровки

Процедура калибровки (поверки) жизненно необходима для любого устройства с компьютерным управлением. Несмотря на определяющую роль математического моделирования в проектировании механизмов с параллельной кинематикой (МПК), реальные физические системы всегда отличаются от своих моделей из-за погрешностей изготовления и сборки. Компенсация этих погрешностей осуществляется при помощи калибровки.

Вследствие нелинейных кинематических характеристик МПК общепринятые методы калибровки оборудования, такие как настройка осей и установление нулевой точки в данном случае не применимы. Параллельные кинематические оси не могут быть настроены последовательно друг за другом, а требуют рассмотрения, как единой системы взаимосвязанных входящих и исходящих параметров. Такой подход сопоставим с параметрической идентификацией любой сложной системы, например, регулируемой системы, которая должны быть идентифицирована. Идентифицируемыми параметрами системы здесь являются нулевые точки, длины стоек и многочисленные различные геометрические параметры, которые характеризуют кинематическое поведение станка. Для того чтобы максимально приблизить математическую модель станка к реальности необходимо выверить эти параметры путем процедуры, называемой кинематической калибровкой.

И хотя эти параметры в полном объеме указываются в проектной документации станка, они все равно нуждаются в определении путем калибровки. Геометрические допуски на изготовление и, особенно, на сборку деталей подвижных механизмов не могут быть приняты настолько малыми, чтобы исключить калибровку.

Калибровка всегда представляет собой определение параметров модели, которая описывает реальную систему любой физической природы. Целью этой процедуры всегда является максимально возможное приближение поведения модели к поведению реальной системы. Основная идея каждой калибровки заключается в записи входных и выходных характеристик системы и на основе этих записанных величин

приближение модели к реальности, для того чтобы она более точно симулировала выходные и входные характеристики моделируемой системы.

Калибровка для последовательных роботов и традиционных станков в настоящее время является хорошо изученной и разработанной проблемой. В связи с этим можно предположить, что калибровка МПК может выполняться теми же методами, что и для последовательной морфологии, но это, к сожалению, не совсем так. На самом деле между обоими типами механизмов существует большое отличие: для последовательного механизма малые погрешности геометрических параметров вызывают большие погрешности позиционирования исполнительного органа, в то время как, для параллельного механизма эти погрешности позиционирования будут также малы. Неотъемлемой составляющей калибровки является симуляция: она позволяет определить, насколько используемый метод калибровки чувствителен к измерительным помехам и цифровым погрешностям. Ее важность может быть продемонстрирована следующим примером, когда методы, прямо заимствованные из процедуры калибровки последовательных механизмов, могут привести к результатам, которые будут хуже, чем начальное приближение, поскольку симуляция учитывает реальные измерительные помехи [8].

Существующие методы калибровки можно разделить на три группы [9]:

- внешние методы, когда какое-либо внешнее измерительное устройство используется для определения (полного или частичного) действительного положения подвижной платформы для ее различных рассматриваемых конфигураций;
- методы самокалибровки (автокалибровки), когда подвижная платформа оснащается дополнительными датчиками (датчиками, которые могут быть использованы для решения других проблем, например, прямой кинематической задачи) и для калибровки используется только информация, поступающая от этих датчиков;
- методы принудительной калибровки, связанные с использованием механических систем, накладывающих на параллельный механизм ограничения движения по заданным степеням свободы.

Методы первой группы, как правило, являются сложными и трудоемкими для использования на практике, но могут давать хорошие результаты. Методы второй

группы могут давать меньшую точность, но более просты в использовании и также имеют преимущество в возможности их полной автоматизации. Методы третьей группы сопоставимы по точности с методами самокалибровки, но более дешевы, так как не требуют использования дорогостоящих дополнительных датчиков.

Калибровка имеет два важных аспекта. С одной стороны она включает в себя математический подход: выбор параметров для калибровки, измеряемые конфигурации станка, метод для оценки новых параметров станка. С другой стороны это определение погрешности внешнего измерения и типа датчиков (самокалибровка).

5.2 Математический подход

Что касается выбора параметров для калибровки, то наиболее обобщенный подход к этому состоит в выборе тех параметров, которые управляют кинематическими преобразованиями станка. Так как кинематические преобразования сильно отличаются в зависимости от кинематической структуры станка, можно сделать вывод, что и модели калибровки отличаются в зависимости от станка. Однако практика показывает, что большинство параметров, которые управляют кинематической моделью, являются одними и теми же для большинства станков. К ним можно отнести, например, положение шарниров, длину стоек, смещения энкодеров и т.п.

Обычно используемые модели включают в себя некоторые упрощения. Математическая модель используется для преобразования положений платформы в параметры, управляющие приводами стоек при допущении того, что они двигаются вдоль абсолютно прямых линий. Довольно сложно смоделировать перемещение более подходящим путем и поэтому вполне вероятно получить здесь погрешности позиционирования. Кроме того, она не учитывает тот факт, что движение сферических шарниров в реальности может существенно отличаться от предполагаемого движения относительно бесконечно малой точки. Упругость элементов, зазоры и температурные деформации также не учитываются этими моделями.

Несмотря на то, что существует возможность измерения некоторых параметров непосредственно, такой необходимости нет, и это даже является нерациональным. По причине содержащихся в модели упрощений значения параметров не могут

быть назначены в точном соответствии их реальным величинам. Вместо этого они уточняются специальным алгоритмом таким образом, чтобы максимально приблизить модель к реальности. Поэтому модельные значения часто могут значительно отличаться от значений, определяемых прямым измерением.

Калибровка минимизирует расхождение между выходными параметрами модели и выходными параметрами реального станка. Входные параметры в обоих случаях одинаковы. Здесь важно понимать, что результат этой оптимизации является оптимальным применительно к полученным измеренным величинам. Для того чтобы гарантировать их применимость ко всему рабочему пространству при различных режимах работы необходимо соблюдать некоторые условия. Как логическое следствие этого, очевидно, что измеряемые положения платформы должны быть тщательно обоснованы.

Идеей выбора положений является нахождение точек рабочего пространства, которые дают наиболее точные оценки. Для некоторых положений параметры кинематической модели не оказывают существенного влияния на измерения, так как в них над эффектом изменения кинематических параметров конструкции преобладают эффекты измерительных помех и неучитываемых источников погрешности. В результате полученные откалиброванные параметры будут ненадежными.

Различными исследователями были предложены разнообразные критерии наблюдаемости для оценки правильности выбора положений платформы. Эти критерии основаны на разложении по сингулярным числам матрицы Якоби дифференциальной кинематики. В качестве одного такого критерия наблюдаемости предлагается произведение всех сингулярных значений матрицы. В качестве другого критерия предлагается число обусловленности матрицы, и при этом указывается, что для получения надежных результатов требуется число обусловленности менее 100. Еще одним критерием выступает критерий усиления помех, определяемый как отношение максимального сингулярного значения к числу обусловленности.

Другая проблема, которая иногда возникает при калибровке, связана с наличием избыточных параметров. Ее решение с математической точки зрения сводит калибровку к нахождению неизвестных параметров набора нелинейных функций (ки-

нематическое преобразование), вычисляемых в отдельных точках (измеряемых положениях) с очень точной оценкой параметров функций (теоретическая конфигурация станка). Данная процедура реализуется на основе метода наименьших квадратов. Однако при таком подходе нужно учитывать один важный аспект, а именно измерительные помехи. Если помехи будут высоки, то результат аппроксимации может быть бесполезен и вычисленные параметры очень неточны.

Еще один аспект, который необходимо принимать во внимание во время калибровки, – это присутствие погрешностей, обусловленных редуцированными степенями свободы кинематической структуры. В случае платформы Гью/Стюарта или другой параллельной машины с 6 степенями свободы при пренебрежении другими источниками погрешности (тепловые явления, деформации вследствие сил тяжести, измерительные погрешности) калибровка будет давать нулевую погрешность позиционирования и ориентации платформы. Это объясняется тем, что число контролируемых степеней свободы является таким же, как и число возможных источников погрешностей платформы: три перемещения и три поворота.

Станки параллельной кинематики с редуцированными степенями свободы используют пассивные ограничения для устранения нежелательных степеней свободы. Из-за погрешностей изготовления и сборки очень вероятно, что эти пассивные элементы с высокой степенью вероятности приведут к появлению какой-либо погрешности той степени свободы, которую они ограничивают или, в наихудшем случае, контролируемой степени свободы. Например, для трехкоординатного станка, работающего в прямоугольной системе координат, с пассивными элементами для ограничения угловых степеней свободы, будут наблюдаться некоторые отклонения заданной фиксированной ориентации от реальной ориентации. Поэтому точность пассивных элементов должна строго нормироваться, минимизироваться погрешности их сборки или измеряться величины этих погрешностей для их учета в процессе калибровки.

5.3 Измерение внешними методами

Измерительный этап калибровки не является полностью независимым от уже известных аспектов математического подхода. Выбор положений и отладка параметров могут ограничивать число применимых методов измерения. Еще одним аспектом является то, что коммерчески доступные измерительные системы не способны к одновременному измерению шести координат. На самом деле, снижение числа одновременных измерений повышает точность измерений. Некоторыми типовыми измерительными устройствами являются [8]:

- лазерные трекеры;
- фотограмметрические системы;
- измерительные стойки с двумя сферическими наконечниками;
- датчики с сетчатой измерительной шкалой;
- измерительные индикаторы с дополнительной оснасткой;
- контрольные образцы совместно с контактными датчиками;
- другие устройства (угломеры, акселерометры).

Выбор измерительного оборудования должен осуществляться с учетом следующих критериев:

- точности измерительного устройства (прежде всего);
- времени измерения (степени автоматизации);
- требуемой квалификации оператора измерительного устройства;
- пределов измерений устройства.

На рисунке изображен 76 метод калибровки пятикоординатного станка «Verne» с параллельной кинематикой производства испанской компании «Fatronik». В данном случае стратегия калибровки основана на использовании измерительной стойки с двумя сферическими наконечниками производства «Renishaw», являющейся коммерчески доступным элементом. Путем сочетания этого элемента с калибратором (специальным измерительным устройством) также от компании «Renishaw» возможно определить абсолютное расстояние между центрами калибровочных сфер.

В ходе процедуры калибровки измеряются расстояния (теоретической величины 150 мм) между тремя сферами, размещенных в известных положениях на наклонно-поворотном столе и сферой, закрепленной в инструментальной оправке шпинделя. При этом станок последовательно перемещается от одной точки к другой, набор которых полностью покрывает рабочее пространство станка по линейным и угловым координатам. Для измерения используется инструмент двух различных длин, за счет чего обеспечивается 6 наборов измерений, в совокупности дающих 1944 измеренных точки.



Рисунок 76 – Калибровочная оснастка для станка «Verne»

Полученные результаты измерений приведены на рисунке 77. В верхней части рисунка 77 показаны погрешности запрограммированного расстояния в 150 мм, полученные в процессе калибровки. Как здесь видно, максимальная погрешность достигает 1 мм. В нижней части рисунка показан график, подтверждающий повышение точности станка после калибровки. В данном случае погрешность составляет менее 5 % от исходной погрешности для большинства точек и максимальную погрешность 10 % для некоторых предельных точек.

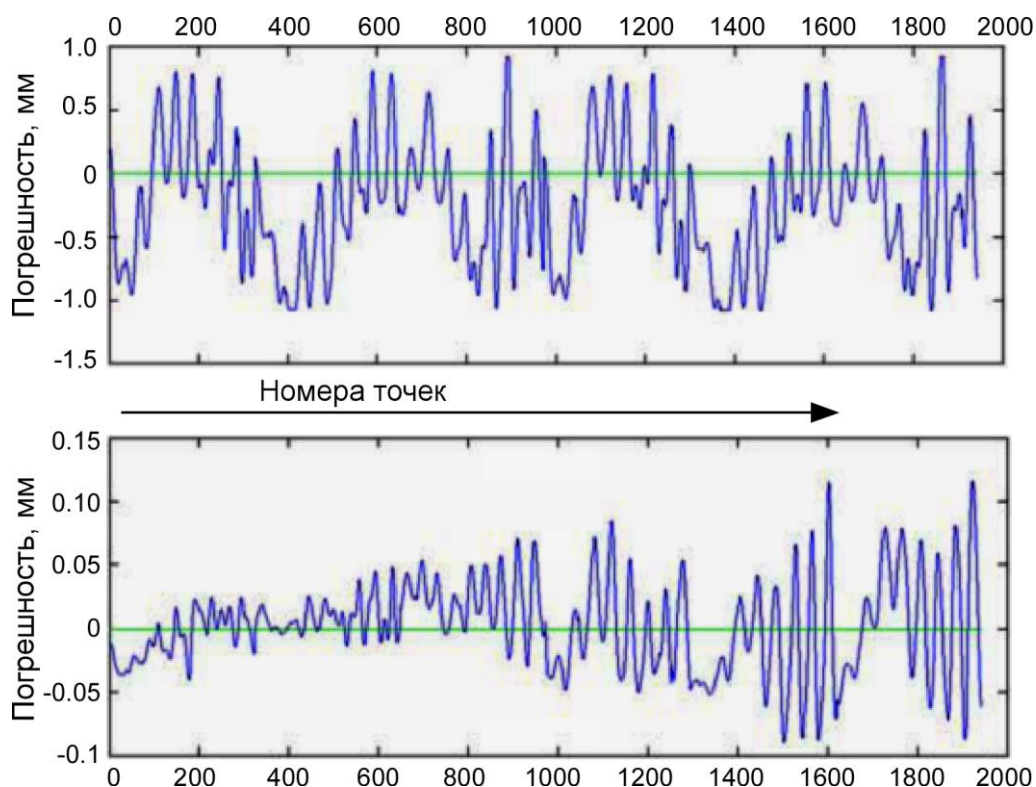


Рисунок 77 – Измеренные погрешности позиционирования для станка «Verne»

Метод, аналогичный описанному, используется и для калибровки еще одного станка «Fatronik» модели «Space 5H», основой которого является параллельный модуль, известный, как шпиндельная головка «Hermes» (рисунок 78). После подготовки программных файлов и отладки процедуры калибровки полная калибровка станка может быть выполнена его оператором за 5 часов. Главным ограничением данного метода является диапазон измерений шариковой стойки, составляющий ± 1 мм. Однако эта проблема проявляется только при первой калибровке после сборки станка и не возникает при последующих калибровках, то есть не является проблемой для конечного пользователя станка.

Другим примером внешнего метода калибровки является стратегия калибровки, в которой используется измерительная стойка с одним сферическим наконечником. Данная стратегия применяется для калибровки параллельной структуры пятикоординатного станка «HexaM» (рисунок 15 справа) производства японской компании «Toyota Machine Works, Ltd». Калибровка позволяет снизить погрешность позиционирования станка с ± 200 мкм до менее чем 50 мкм.

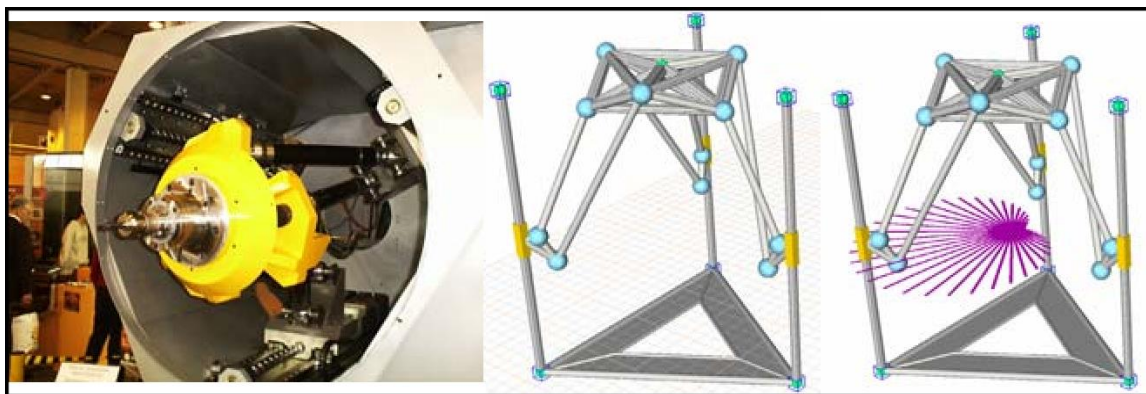


Рисунок 78 – Шпиндельная головка «Hermes»

На рисунке 79 показана процедура калибровки параллельного робота с 4 степенями свободы с использованием 3D камеры. Камера «видит» цель с 4 точек и определяет положение цели в системе координат камеры. Точность этой видеосистемы составляет 0,25 мм, а измеряемое пространство достигает 2 м³. Главная проблема этого метода заключается в определении положения системы координат камеры относительно системы координат станка, но данная проблема может быть решена с использованием преобразований между координатными системами и некоторых дополнительных измерений. Результаты калибровки, полученные с использованием этой методологии, улучшают точность робота на 80 %, давая показатели точности близкие к результатам контактных методов измерений. Похожая стратегия используется и для калибровки параллельного робота «Tricert РКМ».



Рисунок 79 – Калибровка четырехкоординатного параллельного робота с использованием 3D камеры

Существует еще один метод, пока еще широко применяемый для калибровки, который основан на ограничении движения вершины режущего инструмента в одном из измерений путем использования тестовых деталей и измерительных щупов (рисунок 80). Принцип процедуры калибровки может быть объяснен следующим образом: на поверочной плите со специальными опорными стойками, размеры и положение которых относительно центра плиты точно известны (измеряются при помощи КИМ) производится касание щупом заданного количества точек. В ходе этой процедуры координаты точек касания и соответствующие величины вылета стоек определяются системой управления станка и сохраняются в файл, на основе которого собственно и выполняется калибровка.

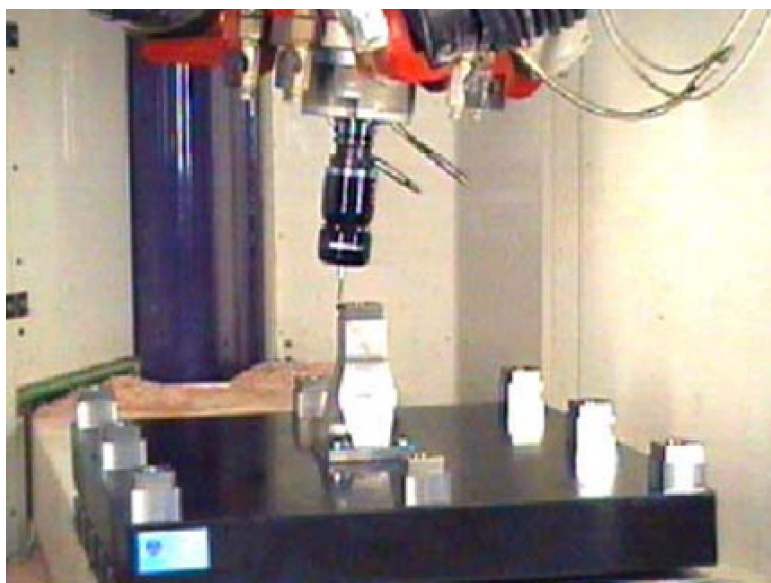


Рисунок 80 – Калибровка с использованием поверочной плиты

Другой подход к калибровке заключается в обработке детали на станке, подлежащем калибровке. По ее завершению измеряются размеры обработанной детали (обычно с использованием КИМ) и сравниваются с ее теоретическими размерами. На основе этой информации выполняется калибровка.

Подход, предложенный для калибровки параллельного станка «Okuma Cosmo Center PM-600» (рисунок 15 слева) состоит в использовании тестовой рабочей детали, представляющей собой параллелепипед с массивом сферических отверстий (ри-

сунок 81). Отверстия расположены в узлах сетки с размерами ячейки 20×20 мм, и на поверхности детали с размерами 300×400 мм содержится 273 отверстия. Действительное рабочее пространство станка больше, чем 300×400 мм, но такой выбор размеров упрощает оперирование заготовкой. Так как кинематические характеристики станка незначительно отличаются по его высоте (вследствие вертикальности и параллельности направления всех приводов), то для проведения калибровки достаточно расположить все отверстия в одной горизонтальной плоскости.

Отверстия имеют диаметр от 10 до 16 мм. Такой размер выбран, чтобы обеспечить хорошую измеряемость отверстий при помощи КИМ. Глубина отверстий должна быть примерно равной половине их диаметра. Лучше выбирать ее немного меньше, потому что глубина может варьировать по причине различных погрешностей и более безопасным является обрабатывать более мелкие отверстия, чем более глубокие. При фрезеровании глубоких отверстий инструмент может сформироваться или сломаться. И даже, если инструмент будет испытывать только упругие деформации без повреждения, это является нежелательным, поскольку приводит к неправильным измерениям.

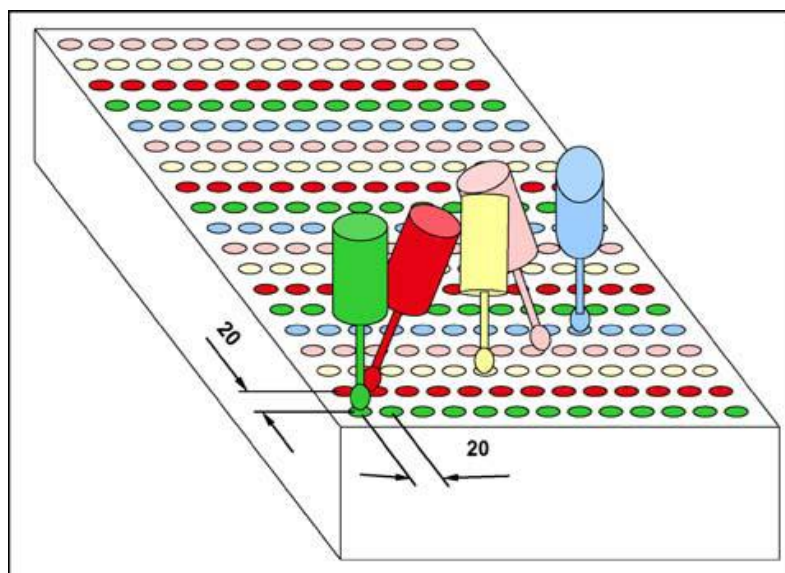


Рисунок 81 – Тестовая деталь для калибровки

Отверстия на приведенном рисунке обработаны рядами, при этом каждый ряд обработан с различной ориентацией шпинделя. Изменение ориентации шпинделя повышает ценность измерительной информации. Наиболее предпочтительными являются сильно отличающиеся друг от друга позиции (под позицией понимается комбинация положения и ориентации рабочей платформы). Это правило, подтвержденное практикой, имеет очевидное теоретическое обоснование. В этом случае матрица, которая используется для метода наискорейшего спуска, лучше обусловлена. Когда все позиции будут почти одинаковы, матрица Якоби будет иметь неполный ранг. И как только ранг матрицы станет меньше, чем число параметров, которые нужно определить, метод даст ошибку.

Отверстия обрабатываются сферической концевой фрезой со сменными режущими пластинами. Подача при фрезеровании всегда осуществляется в направлении оси Z. Частота вращения шпинделя составляет 1000 об/мин при подаче 0,5 мм/мин до завершения обработки. Для достижения максимально возможного качества поверхности и снижения сил, способных изменить положение вершины режущего инструмента, используется смазочно-охлаждающая жидкость.

Специальная комбинация стратегий калибровки предложена компания «Siemens» для калибровки станка модели «SKM 400» (производство «Heckert»), представляющего собой станок параллельной кинематики с тремя линейными осями и горизонтальным расположением шпинделя (рисунок 11 справа). Калибровка выполняется в два этапа. На первом этапе используется лазерный трекер LTD500 немецкой компании «Leica». С его помощью определяются картезианские координаты вершины режущего инструмента. На основе этих данных выполняется традиционная калибровка, обеспечивающая точность станка в пределах 35 мкм.

Учитывая, что точность измерительной системы составляет около 15 мкм оставшиеся 20 мкм, вероятно, объясняются ограничениями используемой модели погрешности (упругие деформации, геометрия). Данная проблема может иметь два решения: улучшение модели погрешности (с учетом влияния других эффектов) и разработка дополнительной стратегии компенсации погрешностей.

Второй вариант решения проблемы реализован «Siemens» путем добавления в СЧПУ станка специальной функции, выполняющей компенсацию пространственной погрешности. Благодаря этой функции пространственные погрешности могут одновременно компенсироваться в любой точке пространства станка по каждой из трех координат X, Y и Z. Работа этой системы основана на использовании измерительного устройства, одновременно записывающего три координаты точки рабочего пространства, такого трехмерный лазерный трекер.

Алгоритм компенсации реализуется СЧПУ первоначальным перемещением вершины режущего инструмента в заданное положение при допущении, что оно является идеальным. После этого посредством лазерного трекера определяется действительное положение инструмента в этой точке. Путем сопоставления действительных и заданных координат вершины режущего инструмента для каждой рассматриваемой точки может быть определена погрешность позиционирования станка. Полученная в итоге таблица пространственной погрешности затем вводится в систему управления станка. На основе этой таблицы система компенсирует погрешность в реальном времени, опираясь на процесс линейной интерполяции.

За счет использования этого метода пространственная погрешность станка была снижена до 15 мкм, что соответствует величине погрешности внешней измерительной системы.

5.4 Стратегии самокалибровки

В отношении стратегий самокалибровки известно, что информации от двух или более датчиков достаточно для выполнения самокалибровки. Самокалибровка имеет ряд достоинств, к которым относятся:

- отсутствие необходимости в каких-либо внешних измерительных устройствах;
- генерация высокоточных данных во всем объеме рабочего пространства станка;
- автоматизированность и полное отсутствие потребности в каком-либо внешнем вмешательстве;

- приспособленность для компенсации погрешностей в реальном времени;
- экономическая эффективность.

Различные исследователи работали над методами самокалибровки долгие годы по причине ее преимуществ над традиционной калибровкой. Разработанные методы самокалибровки можно объединить в две группы:

- оснащение станка внутренними датчиками в количестве большем, чем необходимо для его управления;
- добавление в станок избыточной пассивной стойки (ноги), оснащенной измерительным оборудованием.

При калибровке на основе дополнительных датчиков не может быть использована независимая система координат, поэтому в данном случае рассматривается перемещение системы координат, связанной с подвижной платформой, относительно системы координат, связанной с неподвижной платформой. Иногда упоминается, что использование только относительной калибровки является недостатком методов самокалибровки, однако в большинстве практических случаев все движения задаются относительно системы координат базовой платформы. Дополнительно следует заметить, что добавление датчиков позволяет упростить и ускорить решение прямой кинематической задачи, что делает самокалибровку очень многообещающей процедурой.

Примером калибровки вторым методом может служить калибровка параллельного робота с 4 степенями свободы с применением дополнительной (седьмой) стойки. Эта удлиняемая стойка соединяется с неподвижной платформой посредством универсального шарнира, и изменения ее длины измеряются при помощи линейного энкодера. Однако данный метод не подходит для параллельных механизмов определенной архитектуры, так как дополнительная стойка может существенно сократить рабочее пространство робота за счет интерференции с другими стойками [9].

5.5 Калибровка с использованием механических ограничений

В основу данного метода положен тот факт, что, обычно, число датчиков в параллельном механизме равно числу его степеней свободы. Фиксацией одного или более пассивных шарниров или частичным ограничением степеней подвижности механизма можно обеспечить подвижность результирующей системы меньшую, чем число датчиков. Это позволяет разработать соответствующий алгоритм калибровки.

При практическом использовании метода на механизм во время его калибровки накладываются механические ограничения путем установки стопорящих устройств. Благодаря этим ограничениям некоторые геометрические параметры в ходе калибровки будут оставаться постоянными, и уравнения связей будут описывать неизменность этих параметров.

В качестве примера такой калибровки можно привести подход к калибровке платформы Гью, предполагающий фиксацию одной или более ее стоек таким образом, чтобы их направление оставалось одним и тем же для набора калибровочных позиций. В этом случае уравнения связей будут являться функциями только геометрических параметров механизма и длины стоек. Достоинством данного метода является то, что он не требует дополнительных датчиков, но решение полученной таким способом системы, с учетом погрешностей измерения длины стоек, является сложной задачей.

Другим примером такой калибровки является предложение использовать блокирующее устройство, разрешающее только вращение платформы вокруг фиксированной точки (или иначе вокруг точки, которая может поступательно перемещаться в заданном направлении). Уравнения связей в данном случае обеспечиваются фиксацией координат центра вращения, но это предполагает использование прямой кинематики. В качестве альтернативного варианта может быть использована обратная кинематика: три активных стойки используются для придания платформе заданной ориентации, а три других стойки являются пассивными и обеспечивают измерения. При этом активные и пассивные стойки должны меняться местами в процессе калибровки. Следует заметить, что при таком подходе наилучшие результаты калиб-

ровки достигаются при большом диапазоне варьирования ориентирующих углов. Наблюдаемость этого метода пока еще находится под вопросом.

Данный метод является менее затратным, чем внешняя калибровка, но более сложным, чем самокалибровка. Так как он не позволяет использовать рабочее пространство робота полностью, можно предположить его меньшую точность по сравнению с внешней и самокалибровкой. Его главным недостатком является то, что линейные приводы должны быть способны пассивно перемещаться в соответствии с нагрузкой, которой они подвергаются [9].

5.6 Проблемы методов калибровки

При рассмотрении методов калибровки необходимо уделять внимание следующим вопросам [9]:

1 Наблюдаемость, под которой понимается возможность идентификации всех геометрических параметров робота или станка. Естественно, что для некоторых методов отдельные параметры не будут вообще влиять на модель, в то время как, другие параметры будут влиять только совместно с другими. Мерой наблюдаемости является якобиан уравнений связей, называемый матрицей наблюдаемости, ранг которой будет определять число наблюдаемых параметров. Матрица наблюдаемости может быть вычислена аналитически или же оценена численными методами. Набор наблюдаемых параметров может быть получен путем QR-разложения матрицы наблюдаемости. Число обусловленности матрицы наблюдаемости обычно рассматривается, как хороший показатель для количественной оценки процесса калибровки (чем меньше число обусловленности, тем лучше для процесса калибровки). Однако к использованию этой информации следует относиться осторожно, так как число обусловленности может сочетать данные различных физических величин: вообще число обусловленности не может быть использовано для сравнения различных методов калибровки.

2 Чувствительность к измерительным помехам, которые могут иметь место в датчиках, используемых для калибровки, и оказывать влияние на результаты измерений.

3 Выбор калибровочных позиций, так как результаты калибровки могут различаться в зависимости от положений, которые используются для создания уравнений связи, используемых в процессе калибровки. Следовательно, необходимо определять такие калибровочные позиции, которые будут обеспечивать наиболее точную калибровку.

4 Точность калибровки. Очевидно, что наилучшей оценкой пригодности метода калибровки будут являться экспериментальные измерения отклонений между заданными и действительными положениями исполнительного органа. Однако такие измерения затрагивают также управление роботом, которое может внести в систему некоторые возмущения, которые не связаны с погрешностью моделирования. Поэтому симуляция также играет важную роль, так как позволяет сфокусироваться на эффективности процесса калибровки, как такового. Это предполагает потребность в определении показателей, характеризующих точность калибровки. В большинстве работ, посвященных калибровке, не все измеренные калибровочные позиции используются для процесса калибровки: некоторые из них используются после калибровки для проверки результатов. При сравнении различных методов калибровки, предложенных в литературе, все еще возникают сложности, так как не существует стандартного показателя калибровки или сравнительного эталонного теста.

5 Однозначность, под которой понимается, что наборы геометрических параметров не должны сильно отличаться, чтобы аналогичным образом удовлетворять уравнениям связей.

5.7 Контрольные вопросы

1 Для чего применяется процедура калибровки станков с параллельной кинематикой?

2 На чем основаны внешние методы калибровки?

3 На чем основаны методы самокалибровки?

4 Что положено в основу методов принудительной калибровки?

5 Каким образом связана калибровка с математической моделью, заложенной в систему управления станком?

6 Что является типовыми измерительными устройствами, используемыми для внешней калибровки?

7 Каким критериям должно удовлетворять измерительное оборудование, используемое для внешней калибровки?

8 Что можно отнести к достоинствам методов самокалибровки?

9 На какие группы можно разделить существующие методы самокалибровки?

10 В чем заключаются особенности калибровки на основе механических ограничений?

11 Чему следует уделять внимание при выборе методов калибровки станков с параллельной кинематикой?

6 Управление станками с параллельной кинематикой

6.1 Традиционные схемы управления для станков с параллельной кинематикой

В настоящее время для управления станками с параллельной кинематикой обычно используются традиционные стратегии [8]. При этом наиболее распространенной схемой управления является схема «обратной кинематики». Ее обобщенный принцип представлен в виде блок-схемы на рисунке 82. Модуль генерации траектории движения выдает картезианские координаты исполнительного органа станка, которые преобразуются в необходимые положения шарниров посредством модуля обратной кинематики. Затем классический контур управления низкого уровня реализует сервоуправление шарнирами для достижения их нужного положения.

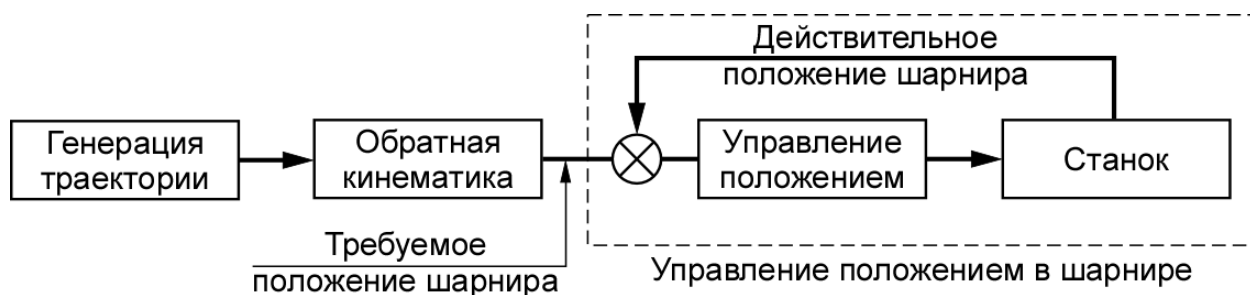


Рисунок 82 – Классическая схема управления с контролем положения в шарнире и генерацией траектории в декартовом пространстве

Существует две основные причины для систематического использования таких схем:

- 1 Возможность использования различного времени, затрачиваемого на АЦ преобразование для контура управления (который здесь является очень простым – это управление двигателем) и вычисления входных данных (что во многих случаях требует большого количества операций с плавающей точкой). Эти две задачи даже могут решаться двумя различными системами (например, усилители могут отвечать за низкоуровневое управление положением, в то время как, компьютер осуществ-

лять вычисления обратной кинематики).

2 Для большинства параллельных механизмов обратная кинематическая задача решается намного проще, чем прямая задача.

Потенциальным недостатком данного метода, обусловленным спецификой управления шарнирами, является сложность получения хорошей точности позиционирования в декартовом пространстве (что часто необходимо) с управлением, независимым от декартовой конфигурации.

Вторая стратегия, основанная на прямой кинематике, представлена в виде блок-схемы на рисунке 83. В данном случае контур управления замкнут на уровне позиционирования в декартовом пространстве: сервоуправляемые переменные здесь по-настоящему важны для пользователя, которому необходимо получить хорошую точность в декартовом пространстве станка.

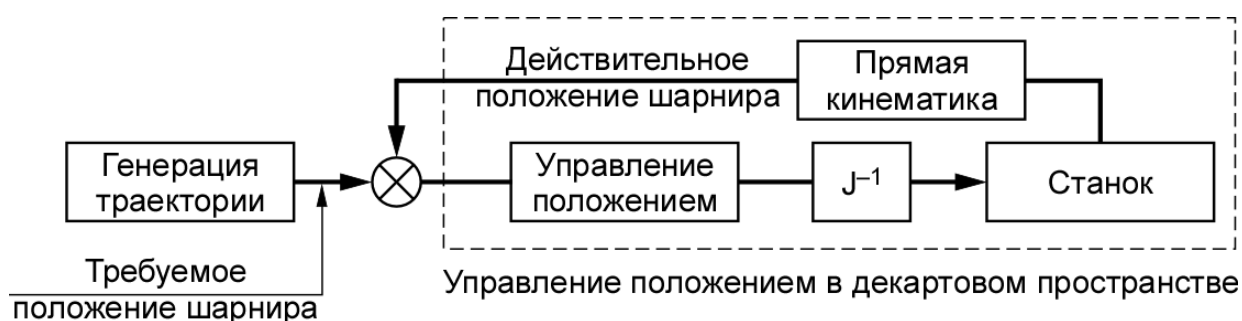


Рисунок 83 – Управление в декартовом пространстве

Однако эта схема имеет недостаток, который проистекает из необходимости вычисления прямой кинематики и обратной матрицы Якоби внутри контура управления, что требует высокой частоты дискретизации сигнала. Поэтому в случае использования данной схемы управления время на АЦ преобразование при управлении декартовыми положениями будет больше, чем для схемы «обратной кинематики».

Кроме того, вычисление прямой кинематики для параллельных роботов, в целом, не может быть выполнено через решение алгебраических уравнений (хотя некоторые типы механизмов это позволяют). Наиболее распространенный подход к

вычислению прямой кинематики основан на численных итерационных методах, упоминавшихся выше. В случае станков с избыточными степенями свободы, системы управления должны поддерживать число двигателей, превышающее число степеней свободы или число датчиков, превышающее число степеней свободы, и могут осуществлять управление, как на основе информации, поступающей от шарниров (схемы «обратной кинематики»), так и на основе информации, поступающей из декартового пространства (схемы «прямой кинематики») при одинаковой частоте управления.

6.2 Специальные модели для станков с параллельной кинематикой

По своему определению механическая архитектура МПК отличается от последовательной архитектуры. Даже, если схемы управления, разработанные для последовательных архитектур, подходят для использования в МПК, они будут далеки от того, чтобы давать хорошие результаты.

Для достижения хорошей точности и высокой скорости при разработке конструкции контроллера должны учитываться некоторые особенности. Основные отличия параллельной архитектуры от классической последовательной заключаются в следующем [8]:

1) синхронизация осей должна выполняться, как можно лучше. Например, обработка прямолинейной кромки на классическом станке является очень простой задачей, в то время как, для МПК прямолинейность обработанной кромки будет являться результатом качества синхронизации между всеми приводами стоек;

2) прямая кинематическая модель, в большинстве случаев, не существует в аналитической форме. Она вычисляется итерационным путем. Обратные кинематические модели часто существуют в аналитической форме. Схемы управления, используемые для МПК, учитывают данное обстоятельство. Для обработки этих моделей должны быть разработаны: контроллер с открытой архитектурой и математические функции для их вычисления;

3) в силу своей конструкции МПК способны достигать более высоких скоростей и ускорений, и поэтому системы управления в них должны эффективно обраба-

тывать эти характеристики, и делать это с возможностью применения продвинутых методов управления, таких как динамический или опережающий контроль.

Существуют некоторые специфические проблемы МПК, которые оказывают влияние на системы управления:

1) обратная кинематическая модель: для многих простых МПК (например, основанных на принципе DeltaTM, или таких как HexapodsTM, HexaMTM, HexaglideTM и тому подобных) обратную кинематическую модель довольно легко получить и применить. Такие модели не требуют использования итерационных методов для своего решения, вследствие чего чрезвычайно легко вычисляются и не должны создавать проблем для систем управления;

2) скоростные связи: система управления должна поддерживать зависимости линейной алгебры;

3) сингулярные конфигурации: как было упомянуто ранее, сингулярные конфигурации определяются путем анализа матрицы Якоби механизма, и поэтому система управления должна поддерживать вычислительный аппарат линейной алгебры;

4) прямая кинематическая модель: запись позиционных взаимосвязей для большинства МПК обычно представляет собой набор полиномиальных уравнений, которые, как правило, не могут быть решены в аналитической форме. Для решения этой проблемы обычно возможно обратиться к итерационным схемам вычисления;

5) станки с избыточными степенями свободы, требующие специальных стратегий управления;

6) другие проблемы: когда обратная кинематическая модель не разрешается без итераций («Space-5N», «Verne») или сингулярные конфигурации не выявляются только за счет анализа матрицы Якоби;

7) обратная динамическая модель для продвинутого контроля: использование этого типа контроля требует вычисления обратной динамической модели станка. Назначение этой модели заключается в определении аналитическим путем моментов, приложенных к двигателям, как функцию их положения, скорости и ускорения. Прежде всего, здесь должна вычисляться матрица Якоби механизма. Эта матрица

позволяет установить линейную зависимость между скоростью двигателей и скоростью исполнительного органа. Кроме того, транспонирование этой матрицы дает линейную взаимосвязь между усилиями на исполнительном органе и моментами на двигателях.

Существуют два типа контроллера, подходящих для структуры МПК: динамический контроллер и контроллер на основе прогнозирующих моделей, хотя оба типа также могут использоваться и для традиционных станков (последовательных).

6.3 Динамический контроллер

Некоторые задачи, выполняемые станками, требуют быстрых перемещений и высокой динамической точности. В таких случаях характеристики системы управления должны учитывать динамические интерактивные моменты. Данный тип управления, получивший название управления с вычислением величины момента или обратным динамическим управлением [8], основан на использовании динамической модели станка. Он позволяет линеаризацию и разъединение уравнений модели, предполагая единообразное движение во все рабочем пространстве станка. Соответственно, для использования такого управления должна быть вычислена обратная динамическая модель станка и применена в управлении станком.

Хотя динамическое управление подходит как для традиционных последовательных станков, так и для станков с параллельной кинематикой, во втором случае оно является практически необходимым. Опыт использования показывает, что обычно, вследствие пространственного распределения управляющихся элементов наблюдается большой разброс их сил инерции. Традиционная структура ПИД-регулирования может справляться лишь с небольшой вариацией этих сил инерции, в то время как, в станках с параллельной кинематикой данные вариации значительно превосходят эти границы. Это приводит к ситуации плохого исполнения траектории движения, что отражается на точности обработки и устойчивости станка.

Еще одна проблема станков с параллельной кинематикой связана с настройкой приводов. Типовая стратегия здесь заключается в настройке приводов на «наихудшее» положение. Это положение обычно характеризуется пониженной жесткостью,

большой инерционностью осей и т.п. Иногда настройка приводов выполняется таким путем, что во всем рабочем пространстве достигается некоторое усреднение характеристик. В обоих случаях результатом является то, что станок оптимизируется обычно в небольшой области рабочего пространства. В остальных точках рабочего пространства параметры приводов могут быть улучшены или настроены для получения повышенных характеристик станка.

Обе проблемы могут быть минимизированы путем использования динамического управления. В результате станок будет одинаково вести себя во всем рабочем пространстве с улучшенным и оптимизированным динамическим управлением и оптимальной точностью обработки.

Обратное динамическое управление состоит из преобразования нелинейной задачи управления в линейную путем использования подходящего закона обратной связи. Динамическая модель может быть записана на основе двух векторов, непосредственно используемых в управлении. Блок-схема системы управления представлена на рисунке 84.

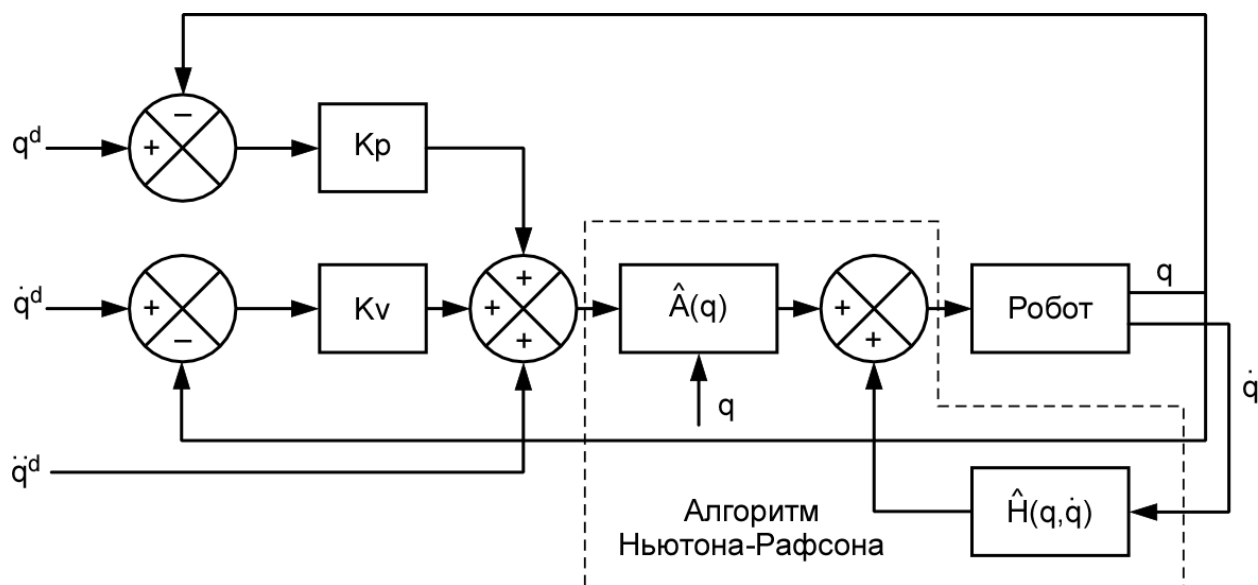


Рисунок 84 – Блок-схема обратного динамического управления

В идеальном случае использования совершенной модели при условии отсутствия каких-либо возмущений задача заключается в линейном управлении несвязанных двойных интеграторов, с учетом того, что $w(t)$ является входным управляю-

щим вектором.

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{w}(\mathbf{t}) \quad (25)$$

Использование данного управления требует вычисления в реальном времени обратной динамической модели и хорошей информации об инерционных, фрикционных и массовых параметрах. Компьютер должен быть достаточно производительным, чтобы эффективно выполнять эти вычисления. В классическом случае потребностями такого управления, применительно к контроллеру, являются токовые контуры приводов (т.е. способность приводов управлять моментами на актуаторах) и энкодеры. Скорость и ускорение вычисляются самой системой управления с использованием информации о положении.

Для улучшения работы системы управления станок может оснащаться некоторыми дополнительными датчиками. Например, на исполнительном органе станка может размещаться акселерометр или динамометрический датчик. Практическая реализация обратного динамического управления в контроллере может быть выполнена так, как показано на рисунке 85.

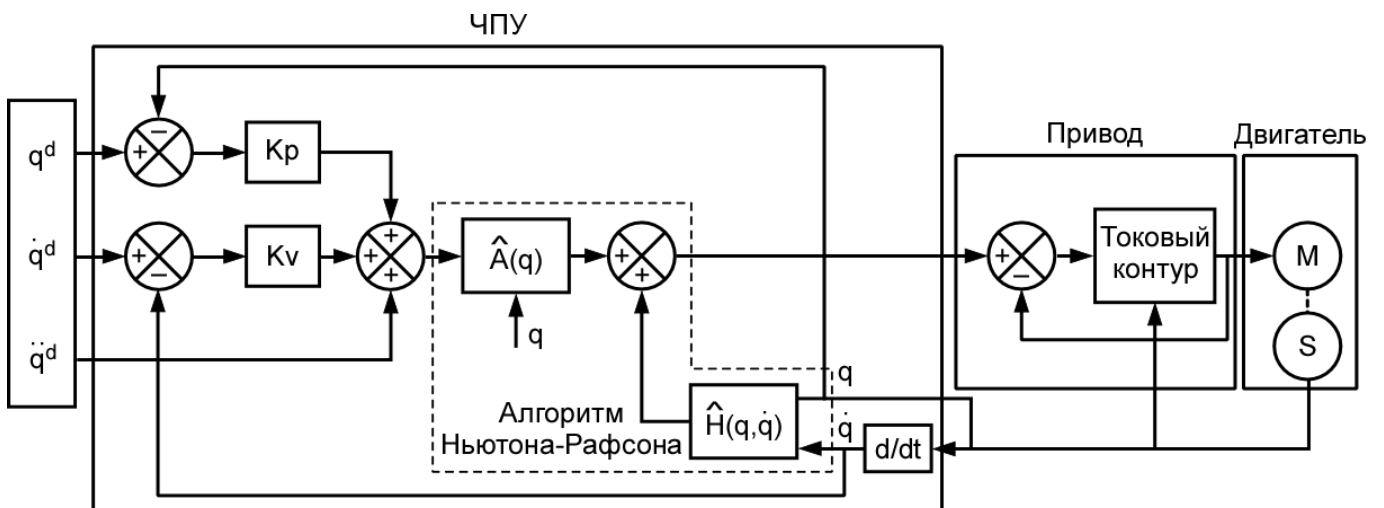


Рисунок 85 – Реализация обратного динамического управления в контроллере

Приведенный рисунок показывает, что все вычисления выполняются устройством ЧПУ. Это требует входных данных, которые соответствуют энкодерам двига-

телей и выходных данных, позволяющих управлять моментом двигателя через токовый контур привода. Как упоминалось выше, для расширенного управления могут быть добавлены некоторые дополнительные входы, такие как акселерометры или динамометрические датчики.

6.4 Контроллер на основе прогнозирующей модели

Для улучшения характеристик производственного оборудования предложены продвинутые контроллеры, основанные на использовании динамической модели оборудования, которая учитывает его инерционные параметры [8]. Эффективная модель может также принимать во внимание параметры, характеризующие трение и жесткость. Применение основанных на модели контроллеров осуществляется после этапа идентификации, которая заключается в оценке параметров модели.

Обратная динамическая модель станка, состоящего из n подвижных связей, вычисляет момент двигателя (управляемый вход), как функцию обобщенных координат (вектор состояния и его производная). Он может быть получен из решения уравнений Лагранжа или Ньютона-Эйлера.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (26)$$

где $\boldsymbol{\tau}$ – вектор вращающего момента двигателя размерностью $\mathbf{n} \times \mathbf{1}$;

$\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ – соответственно векторы пространственных положений, скоростей и ускорений шарниров размерностью $\mathbf{n} \times \mathbf{1}$;

$\mathbf{A}(\mathbf{q})$ – матрица инерционных характеристик размерностью $\mathbf{n} \times \mathbf{n}$;

$\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – вектор центробежных, кориолисовых сил, сил тяжести и моментов трения размерностью $\mathbf{n} \times \mathbf{1}$.

Уравнение может быть записано в форме линейной зависимости набора стандартных динамических параметров:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\chi}_s \quad (27)$$

где χ_s – вектор стандартных динамических параметров размерностью $13n \times 1$, который выражается как:

$$\chi_s^j = [XX_j \ XY_j \ XZ_j \ YY_j \ YZ_j \ ZZ_j \ MX_j \ MY_j \ MZ_j \ M_j \ Ia_j \ F_{Vj} \ F_{Sj}]^T \quad (28)$$

Он составляется для каждой j -ой связи из шести компонентов тензора моментов инерции ($XX_j, XY_j, XZ_j, YY_j, YZ_j, ZZ_j$), трех компонентов статического момента сечения (MX_j, MY_j, MZ_j), массы (M_j), суммарного момента инерции ротора актуатора и зубчатых колес (Ia_j), параметров кулоновского и вязкого трения (F_{Vj}, F_{Sj}).

Для определения параметров динамической модели вектор χ обычно оценивается на основе решения методом взвешенных наименьших квадратов линейной системы ($\mathbf{r} \times \mathbf{p}$), получаемой путем выборки и фильтрации данных динамической модели в направлении траектории ($\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t), \ddot{\mathbf{q}}(t)$):

$$\mathbf{y}(\tau) = \mathbf{W}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\chi + \rho \quad (29)$$

где \mathbf{y} – вектор измерений размерностью $\mathbf{r} \times 1$;

\mathbf{W} – матрица наблюдений размерностью $\mathbf{r} \times \mathbf{p}$;

ρ – вектор ошибок размерностью $\mathbf{r} \times 1$.

Дальнейшая последовательность действий может быть подразделена на два этапа, которыми являются:

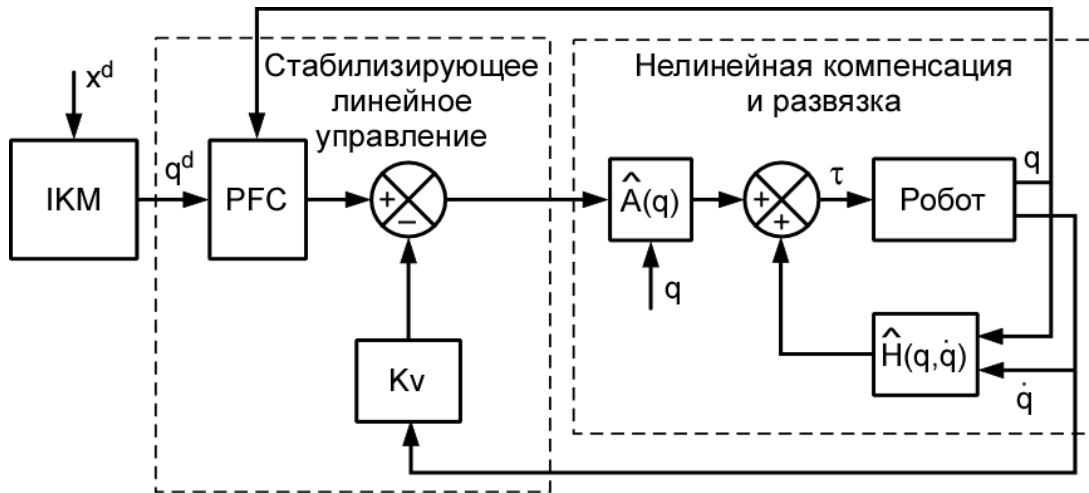
1 Процедура идентификации, включающая:

- возбуждение траекторий;
- захват сигнала;
- фильтрацию;
- определение производной;
- вычисление взвешенных наименьших квадратов.

2 Разработка стратегии управления, включающая:

- выбор параметров модели;
- выбор параметров контроллера.

Схема управления на основе прогнозирующей модели приведена на рисунке 86.



ИКМ (Inverse Kinematic Model) – обратная кинематическая модель;

PFC (Predictive Functional Control) – функциональное управление на основе прогнозирующей модели

Рисунок 86 – Архитектура контура управления на основе прогнозирующей модели

Различные современные исследователи работали над созданием управляющих алгоритмов, не требующих использования прогнозирующей модели. Для станков с параллельной кинематической структурой очень хорошо подходят стратегии управления, основанные на динамических моделях. Однако данный подход главным образом зависит от точности подгонки динамической модели к реальному станку. В процессе эксплуатации станка происходят небольшие изменения условий работы, таких как свойств окружающей среды, степени износа, величины рабочей нагрузки, что снижает точность динамической модели. В этом случае могут быть использованы альтернативные алгоритмы, основанные на динамических моделях с различными уровнями точности.

В качестве одного из таких подходов может использоваться динамическая модель с практически линейными независимыми кинематическими цепями. Структура

управления может быть представлена стандартным ПИД-контроллером для каждой кинематической цепи, который включает процедуру самонастройки контуров управления. Хотя он и не является контроллером со многими переменными, его использование позволяет учитывать некоторые изменения в условиях работы станка.

Аналогичным образом могут быть использованы различные адаптивные системы. Эти адаптивные системы выполняют измерения параметров станка в режиме реального времени с учетом многопараметрического аспекта, и имеют хорошие перспективы использования в станках с параллельной кинематикой. Адаптивные системы используют грубую динамическую модель, но так как они получают различную измерительную информацию от станка, они более подвержены внешним возмущениям. Следовательно, их промышленное применение дает более реалистичные результаты в сравнении с системами, основанными на моделях или системами с независимыми контурами управления.

Применительно к решению промышленных задач может использоваться робастное управление, обеспечивающее устойчивость системы и законов управления, для того чтобы гарантировать корректную траекторию движения. Робастное управление эффективно, если модель подвержена небольшим и ограниченными возмущениями.

И, наконец, для управления могут использоваться контроллеры, построенные на нейронных сетях, которые не используют каких-либо динамических моделей. Принцип их действия основан на процессе обучения и адаптации нейронной сети на основе измерительной информации, поступающей от станка. Главным недостатком контроллеров на основе нейронной сети является то, что их очень сложно настроить в случае, если отслеживается большое число степеней свободы.

6.5 Контрольные вопросы

1 На чем основан принцип управления параллельными станками, основанный на схеме обратной кинематики?

2 На чем основан принцип управления параллельными станками, основанный

на схеме прямой кинематики?

3 В чем заключаются основные отличия параллельной кинематической структуры станков от последовательной, которые должны учитываться при построении системы управления?

4 Какие существуют проблемы механизмов с параллельной кинематикой, оказывающие влияние на их системы управления?

5 Каким образом реализуется обратное динамическое управление станком с параллельной кинематикой?

6 Каким образом реализуется управление станком с параллельной кинематикой на основе прогнозирующей модели?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Parallel kinematic machines: theoretical aspects and industrial requirements / C.R. Böer, L. [Eds.]. – London: Springer-Verlag, 1999. – 455 p. – ISBN 978-1-4471-1228-0.
- 2 Fugui, X. Type Synthesis and Typical Application of 1T2R-Type Parallel Robotic Mechanisms / X. Fugui Xie, L. Xin-Jun, L. Tiemin // *Mathematical Problems in Engineering*, 2013 – Volume 2013. – P. 1-12.
- 3 Güneri, B. A Complete dynamic analysis of Stewart platform including singularity detection / B.Güneri. – İzmir: 2007. – 29 p.
- 4 Hartt, B. Hexapod Linear Actuators / B. Hartt, B. Gilchrist, V. Truman. – San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2012. – 110 p.
- 5 Hernández-Martínez, E.E. Calibration of Parallel Manipulators and their Application to Machine Tools. A State of the Art Survey / E.E. Hernández-Martínez, C.S. López-Cajún, J.C. Jáuregui-Correa // *Ingeniería Investigación y Tecnología*. – 2010. – Vol.XI, Núm.2. – P. 141-154.
- 6 Houdek, P. J. Design and Implementation Issues for Stewart Platform Configuration Machine Tools: thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree Master of Science / P. J. Houdek. – Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1997. – 57 p.
- 7 Küçük, S. Serial and Parallel Robot Manipulators – Kinematics, Dynamics, Control and Optimization / S. Küçük. – Rijeka: InTech, 2012. – 458 p. – ISBN 978-953-51-0437-7.
- 8 López de Lacalle, L.N. Machine Tools for High Performance Machining / L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz (Eds.). – London: Springer-Verlag, 2009. – 442 p. – ISBN 978-1-84800-379-8.
- 9 Merlet, J.-P. Parallel Robots (Second Edition) / J.-P. Merlet. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. – 401 p. – ISBN 978-1-4020-4132-7.
- 10 Pandilov, Z. Parallel kinematics machine tools: Overview – from history to the future / Z. Pandilov, V. Dukovski // *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*. – 2012. – Tome X. – P.111-124.

11 Service Robotics and Mechatronics: Selected Papers of the International Conference on Machine Automation ICMA2008 / Editors K. Shirase, S. Aoyagi. – London: Springer-Verlag, 2010. – 392 p. – ISBN 978-1-84882-693-9.

12 The development of hexapod kinematic machine / V. Poppeova and other // Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology. – 2012. – Vol. 16, No.1. – P. 39-42.

13 Van Vuuren, F. J. Design of a Hexapod Mount for a Radio Telescope: thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree Master of Science in Engineering (Mechatronic) / F. J. Van Vuuren. – Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2011. – 133 p.

14 Weck, M. Parallel Kinematic Machine Tools – Current State and Future Potentials / M. Weck, D. Staimer // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2002. – Vol. 51, No.2. – P. 671-683.

15 Xin-Jun, L. Parallel Kinematics: Type, Kinematics, and Optimal Design / L. Xin-Jun Liu, W. Jinsong. – Berlin: Springer-Verlag, 2014. – 309 p. – ISBN 978-3-642-36928-5.

16 Youssef, Helmi A. Machining technology: machine tools and operations / Helmi A. Youssef, Hassan El-Hofy. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 672 p. – ISBN 978-1-4200-4339-6.

17 Zhang, D. Parallel Robotic Machine Tools / D Zhang. – New York: Springer-Verlag, 2010. – 400. – ISBN 978-1-4419-1116-2.

18 Ziegert, J.C. Design and Testing of a High Speed, 5-DOF, Coordinate Measuring Machine with Parallel Kinematic Structure / J.C. Ziegert // ASPE Proceedings / Scottsdale, Arizona, 2000. – 4 p.

Учебное пособие

Сергей Владимирович Каменев

**ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СТАНКОВ С
ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ**

ISBN 978-5-7410-1662-6

