

Хольшев Игорь Геннадьевич

Проектирование структуры станков  
типа "гексапод"



Специальность: Технологии и оборудование механической и  
05.03.01 физико-технической обработки

Автореферат  
диссертации на соискание  
учёной степени кандидата технических наук

Москва – 2001

Работа выполнена в Московском Государственном Технологическом  
Университете "Станкин"

Научный доктор технических наук, профессор,  
руководитель **Бушуев В.В.**  
Официальные доктор технических наук, профессор,  
сппоненты **Жедь В.П.**  
кандидат технических наук,  
**Ермолаев В.К.**

Ведущая  
организация ИМАШ РАН им. Благонравова А.А.

Защита диссертации состоится "28" февраля в 14 часов  
на заседании диссертационного совета К 212.142.02 Московского  
Государственного Технологического Университета "Станкин"  
по адресу: 101472, г. Москва, Вадковский пер., дом 3-а

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Московского Государственного Технологического Университета  
"Станкин"

Автореферат разослан "19" марта 2002г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

к.т.н. доцент  
Поляков Ю.П.

**Актуальность.** Актуальность работы обусловлена тем обстоятельством, что именно на ранней стадии проектирования металлорежущих станков нового поколения параллельной структуры типа "гексапод" выбираются параметры основных конструктивных элементов, что решающим образом влияет на эксплуатационные показатели оборудования. При неэффективном выборе указанных параметров исправить ситуацию в дальнейшем невозможно. Поэтому проектирование оборудования типа "гексапод" на ранней стадии разработки эффективно только с применением компьютера, однако универсальные графические программные продукты ProEngineer, ANISYS и др. позволяющие решать широкий спектр задач имеют недостатки в сложности их использования, малой скорости вычисления, большого объема памяти занимаемой проектируемой моделью и их высокой стоимостью, а также не могут решить конкретные задачи проектирования.

Т.о. создание специализированного программного продукта (инструментальной среды), моделирование и исследование данного оборудования на ранней стадии разработки с учётом современных достижений в области разработки программного обеспечения является современной и актуальной задачей. Значительное количество теоретических работ и практических разработок в области конструирования металлорежущего оборудования параллельной структуры типа "гексапод" выполнено в Германии, Франции и Америке на уровне исследовательских и экспериментальных работ.

**Цель работы.** Целью настоящей работы является выбор рациональных геометрических параметров элементов конструкции оборудования типа "гексапод" на ранней стадии проектирования.

По мнению автора для этого следует:

1. Разработать критерии оценки оборудования типа "гексапод" на ранней стадии проектирования.
2. Описать геометрические параметры элементов конструкции оборудования типа "гексапод".
3. Разработать методику определения рабочего пространства, относительной точности и жёсткости кинематической структуры.
4. Создать инструментальную среду, где реализуются все математические модели, присущие данному оборудованию для выбора рациональных геометрических параметров основных элементов конструкции на ранней стадии разработки.
5. Разработать методику расчёта и рекомендации по выбору геометрических параметров основных элементов.
6. Провести оптимизацию геометрических параметров известных станков типа "гексапод" при использовании предлагаемой методики расчёта.

**Методы исследования.** Диссертационная работа построена на базе положений теории механизмов и машин, аналитической геометрии, теории алгоритмов, методов структурного и объектно-ориентированного программирования. В ней также использованы основные положения станковедения, основ конструирования машин, робототехники и методов оптимизации. Верификация разработанного программного обеспечения осуществлялась с помощью анализа существующих станков фирмы Лалик и института Фраунгофер и предложены рекомендации по совершенствованию оборудования.

**Научная новизна заключается в:**

1. Критериях оценки станка типа "гексапод" по изменению диапазона относительной точности и жёсткости кинематической структуры по рабочему пространству;
2. Качественных и количественных зависимостях, учитывающих связь основных конструктивных элементов станка с фактической конфигурацией рабочего пространства при исключении коллизий (пересечений) элементов конструкции, а также с объёмом занимаемым станком.

**Практическая ценность заключается в:**

1. Методике выбора на ранней стадии разработки рациональных геометрических параметров основных элементов конструкции оборудования для обеспечения минимального изменения точности и жёсткости кинематической структуры по рабочему пространству и сокращения габаритов занимаемых станком.
2. Рекомендациях по назначению угла расхождения штанг с учётом специфики проектируемого оборудования в частности в зависимости от максимального угла наклона шпинделя.
3. Оптимизации геометрических параметров известного оборудования фирмы Лалик (Россия) и института Фраунгофер (Германия).

**Апробация работы.**

Результаты работы докладывались и были одобрены на форуме: "2-ой семинар по параллельной кинематике" 12/13 апреля 2000г. г. Хемниц (Германия) и на заседаниях кафедры "Станки" МГТУ "Станкин".

**Публикации.**

По материалам исследований опубликованы 2 печатные работы.

**Структура и объём работы.**

Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов и списка литературы. В работе содержится множество наглядных рисунков, таблиц и список литературы из 40 наименований. Общий объём работы 240 страниц.

**Краткое содержание работы**

**Введение**

Во *введении* даётся концепция проектирования оборудования нетрадиционной компоновки, оборудования параллельной структуры ферменного типа, которому на сегодняшний момент в машиностроении всех стран мира уделяется большое внимание. Это связано с обеспечением высоких требований по точности металлообработки при высоких скоростях резания.

Отмечается, что получение эффективной конструкции станков новой компоновки весьма затруднительно при традиционных методах разработки. Предложенная концепция проектирования с использованием компьютера на самой ранней стадии проектирования, позволяет избежать серьёзных ошибок при назначении геометрических параметров основных элементов.

Для этой цели автором создана специализированная инструментальная среда, в которой реализованы математические модели необходимые для выбора основных параметров присущие оборудованию типа "гексапод", позволяющие полномасштабно исследовать, анализировать, и качественно принимать решения.

**Глава 1. Обзор информации по оборудованию параллельной структуры.**

В ней содержится предпосылки создания, обзор и конъюнктура рынка применения оборудования параллельной структуры ферменного типа, а также история создания и обзор публикаций.

В настоящее время конструктивные резервы повышения точности металлорежущих станков традиционной компоновки в значительной степени исчерпаны. Поэтому ведётся поиск новых направлений развития станков.

Кинематика оборудования параллельной структуры ферменного типа представляет собой замкнутую кинематическую цепь, состоящую из нескольких механизмов – штанг, которые параллельно соединены шарнирами одним концом с выходным звеном, представляющего собой платформу рабочего органа, а другим концом шарнирами с основанием. Работа оборудования заключается в перемещении ведущего механизма за счёт изменения положения штанг, которые и придают пространственное перемещение рабочего органа – платформы. Особенность кинематики станков ферменного типа заключается в механизмах – штангах, работающих на растяжение-сжатие, что значительно уменьшает весовые характеристики оборудования.

Оборудования параллельной структуры ферменного типа бывает трёх видов, "гексапод" (рис.1), "трипод" (рис.2), "дельта" (рис.3). Конъюнктура рынка диктует, что данные виды кинематики используются в металлообрабатывающих и измерительных механизмах, в различных вибрационных стендах, тренажёрах, роботах, манипуляторах, и микроманипуляторах. Анализ показал, что конструкции различаются расположением ведущих механизмов, типом штанг, шарнирными соединениями и наличием дополнительных устройств.

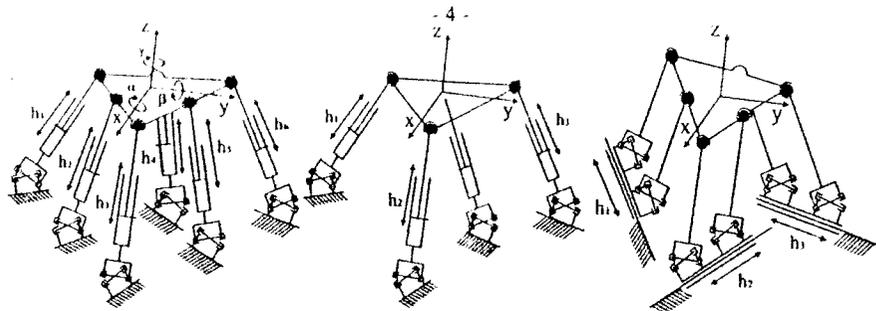


Рис.1 Кинематика "гексапод". Рис.2 Кинематика "трипод". Рис.3 Кинематика "дельта".

История механизмов с замкнутой кинематикой началась намного раньше, чем появился термин робот. Некоторые теоретические вопросы замкнутой кинематики начали рассматривать с 1645 года Christopher Wren, а затем в 1813 Cauchy, в 1867 Lebesgue и в 1897 Bricard. И только в начале 20 века Borel и Bricard разработали теорию замкнутой кинематики. В 1947 году шотландский инженер Гауф (Gough) спроектировал механизм на основе замкнутой кинематической цепи, позволяющий фиксировать и ориентировать платформу с целью тестировать износ пневматической системы. В шестидесятые годы 20 века в связи с бурным развитием авиационной индустрии, увеличиваются затраты на обучение пилотов. Поэтому возникает необходимость тестировать пилотов вне полёта. Аналогичное оборудование параллельной структуры нашло применение в авиации, которую сконструировал инженер Стюард (Steward). Начиная с 90 годов 20 века, с бурным развитием компьютерной индустрии появляется возможность углубленного исследования оборудования нетрадиционной компоновки. Обзор научно-исследовательской публикации показал, что данное оборудование остаётся предметом исследовательских работ. До сих пор остаются нерешённые проблемы по отдельным аспектам таких станков, которые позволяют качественно решать задачи, присущие параллельным кинематическим структурам. При конструировании станков параллельных структур важны некоторые ключевые вопросы:

- алгоритм и методика разработки;
- геометрические параметры элементов конструкции;
- математические модели и методы расчёта;
- критерии оптимизации.

В 1987 году в Новосибирском электротехническом институте (Россия) создан станок "гексапод" и была проведена экспериментальная работа по определению реального объёма рабочего пространства и упругим деформациям станка. В конце 90 годов институтом создан программный продукт, позволяющий графически реализовать геометрическую модель оборудования типа "гексапод", но в исследовательских работах остаётся актуальная проблема критериев для анализа кинематик с применением компьютера.

В институте Фраунhofer (Германия) разработали алгоритм процесса проектирования с применением инструментальной среды на основе CAD/CAM-системы. Институт Фраунhofer - центр исследования механизмов параллельной структуры, где проводятся фундаментальные исследования и прикладные разработки, но и там остаётся актуальная проблема и неослабевающий интерес к критериям оптимизации, что и является сейчас предметом исследовательских работ. Обзор информации по проблемам оборудования типа "гексапод" показал, что опубликованные источники совершенно не касаются новых подходов, методов проектирования, необходимых при разработке таких станков. Между тем именно на этом направлении с использованием компьютерного проектирования на самой ранней стадии разработки, следует ожидать наибольших положительных результатов и избежать серьёзных ошибок.

Таким образом, возникла необходимость формирования концепции проектирования оборудования типа "гексапод" в рамках которой была создана специализированная инструментальная среда на основе языка программирования C++ с поддержкой трёхмерной графической библиотеки и разработан критерии оптимизации при выборе параметров основных элементов оборудования.

## Глава 2. Кинематика оборудования параллельной структуры.

Для анализа кинематики использована формула Сомова-Малышева, в которой определяется степень подвижности и степень неподвижности кинематической структуры по формулам:

$$H_{cm} = 6(k-1) - 5p_1 - 4p_2 - 3p_3 - 2p_4 - p_5 \quad (1)$$

$$H_{cm} = 6(k - k_e - 1) - 5(p_1 - p_{1a}) - 4(p_2 - p_{2a}) - 3(p_3 - p_{3a}) - 2(p_4 - p_{4a}) - (p_5 - p_{5a}) \quad (2)$$

где  $k$  - число звеньев кинематической цепи;

$k_e$  - число ведущих звеньев кинематической цепи;

$p_i$  - число кинематических пар с  $i$ -ой степенью подвижности.

$p_{ia}$  - число кинематических пар ведущих звеньев с  $i$ -ой

степенью подвижности.

Число  $H_{cm}$  показывает степень подвижности рабочего органа; как правило, оно должно быть больше нуля. По числу  $H_{cm}$  можно сделать вывод о целесообразности использования рассматриваемой схемы механизма, как правило оно должно быть равным нулю. Если при расчёте получим число  $H_{cm} < 0$ , то кинематика схемы статически неопределима, т.е. в конструкции имеются избыточные механические связи. Если при расчёте получим число  $H_{cm} > 0$ , то в кинематике не хватает механических связей. Поэтому соблюдать условие  $H_{cm} = 0$ .

С использованием формулы (2) классифицируем 9 видов штанг (рис.4) с различной кинематикой работающих на растяжение-сжатие, представляющих собой комбинации шарниров (сферических и карданных) и ведущих механизмов (телескопического типа с вращающим и не вращающим штоком, направляющего и поворотного типа). Из этих 9 видов штанг могут быть синтезированы различные типы оборудования параллельной структуры.

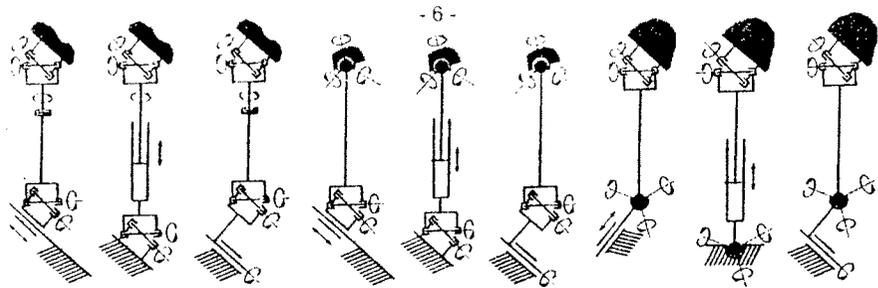


Рис.4. Кинематики штанг.

### Глава 3. Геометрическое описание кинематики оборудования параллельной структуры типа "гексапод".

Для изучения движения механизма, недостаточно знать его структуру, т.е. число звеньев, число и классы кинематических пар. Необходимо также знать размеры отдельных элементов, влияющие на движение, взаимные положения звеньев и т.д.

В связи со сложностью математического описания кинематической структуры оборудования типа "гексапод" необходимо разбить её на простые составляющие элементы и отдельно описать геометрию в виде символьных параметров для дальнейшего математического моделирования на компьютере.

Для описания геометрических параметров использовались:

- координатная система шпиндельной платформы в виде координат абсолютного расположения шпинделя в пространстве с переменными  $\{x_s, y_s, z_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s\}$  параметрами;
- координатная система шарнирных соединений на платформе в виде относительного расположения шести шарнирных соединений относительно шпиндельной платформы с постоянными  $\{x'_{pi}, y'_{pi}, z'_{pi}, \alpha'_{pi}, \beta'_{pi}, \gamma'_{pi}\}$  и переменными  $\{x'_{vpi}, y'_{vpi}\}$  параметрами;
- координатная система шарнирных соединений на основании в виде абсолютного расположения шести шарнирных соединений с постоянными  $\{x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}, \alpha_{bi}, \beta_{bi}, \gamma_{bi}\}$  и переменными  $\{x_{vbi}, y_{vbi}\}$  параметрами;
- координатная система коллизии элементов, где описано конструктивное ограничение при столкновении элементов штанги со штангой с параметрами  $(P_{k(i,j)} = \{x_k, y_k, z_k\}_{(i,j)})$  и  $P_{k(i,j)} = \{x_k, y_k, z_k\}_{(i,j)}$  и штанги со шпинделем с параметрами  $(P_{k(s,j)} = \{x_k, y_k, z_k\}_{(s,j)})$  и  $P_{k(i,j)} = \{x_k, y_k, z_k\}_{(i,j)}$ ;
- координатная система ограничения угла шарниров, где описано конструктивное ограничение угла наклона шарниров в виде функции  $\beta_v = f(\alpha_v)$  (рис.15);

Основные геометрические параметры приведена на рис.5, где показана:

- основание и шпиндельная платформа (рис.5 позиция 1 и 2 соответственно);
- шток и цилиндр штанги (рис.5 позиция 3) с переменным вылетом штанг  $\{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\}$ .

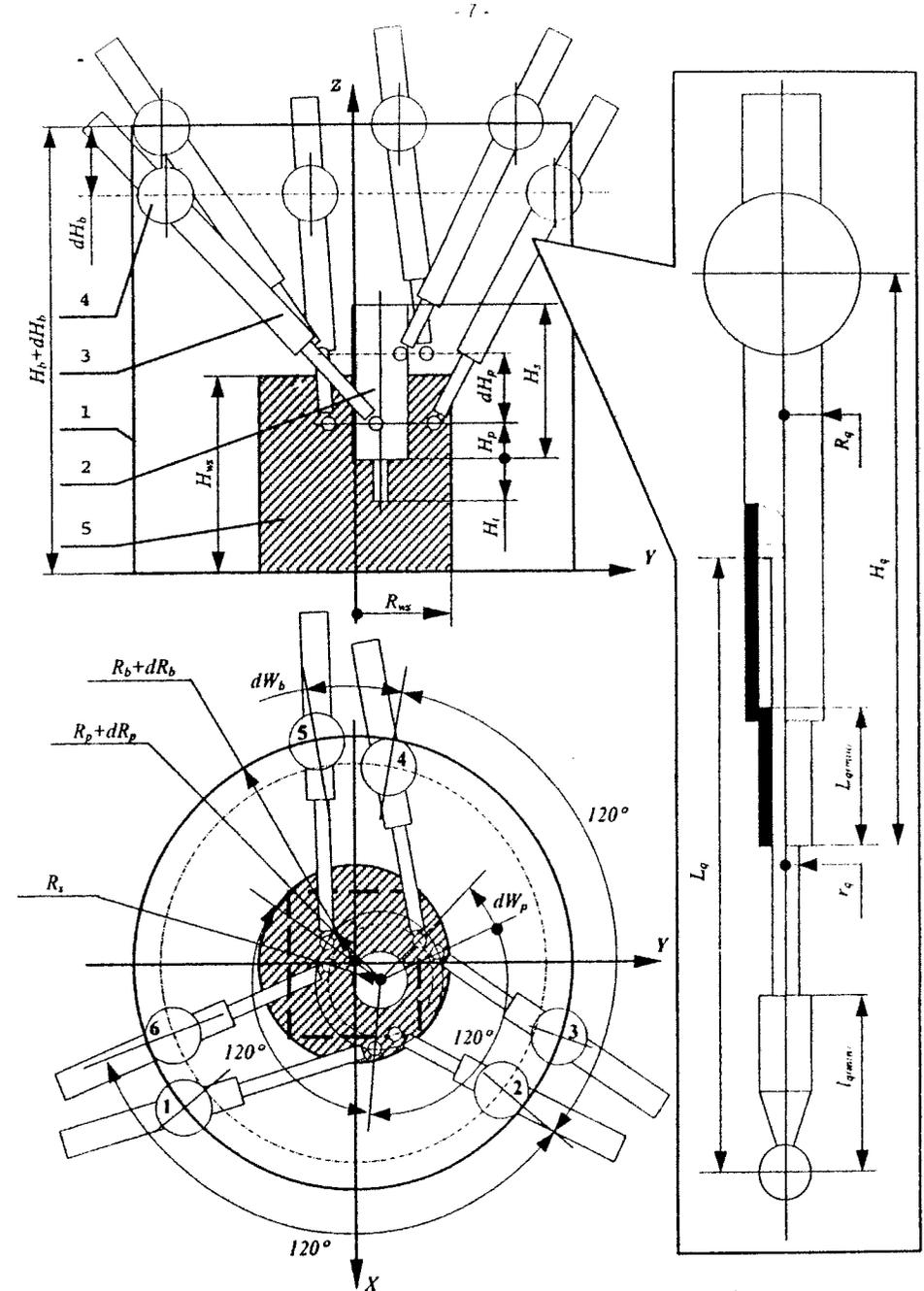


Рис.5 Геометрические параметры оборудования типа "гексапод"  
1- основание, 2- шпиндельная платформа, 3- штанги, 4-шарниры,  
5- рабочее пространство

Геометрия заданного рабочего пространства обслуживаемого рабочим органом показана в виде цилиндра с параметрами  $R_{вр}$ ,  $H_{вр}$  (рис.5 позиция 5).

Описанные выше геометрические параметры оборудования типа "гексапод" в виде символьных параметров позволяют в дальнейшем смоделировать кинематические структуры в виде трёхмерного изображения на компьютере.

#### Глава 4. Математическое описание кинематики оборудования параллельной структуры типа "гексапод".

При решении задач проектирования и управления оборудованием типа "гексапод" приходится определять как положения его звеньев относительно неподвижной системы координат – абсолютные положения звеньев, так и их относительные положения – обобщённые координаты. Первая задача называется прямой, где определяются точностные и жёсткостные характеристики оборудования, а вторая – обратной задачей о положениях манипулятора, где определяются рабочее пространство обслуживаемое рабочим органом.

Решение обратной задачи – определение обобщённых координат при заданном положении выходного звена сводится к перемножению матриц. При известных обобщённых координатах определение положения выходного звена является более сложной задачей, так как это связано с решением нелинейных систем алгебраических уравнений. Эффективным методом решения прямой задачи о положениях выходного звена является использование матрицы Якоби.

Известно, что аналитическое описание рабочего пространства кинематической структуры чрезвычайно затруднительно из-за большого числа ограничивающих факторов. Поэтому описание рабочего пространства может быть проведено только численными методами по специальному алгоритму (рис.6). Сущность алгоритма заключается в том, что рабочий орган сканирует (проходит) по замкнутой границе ограниченной элементами конструкции кинематики, эта граница образует рабочее пространство. Каждый отдельный блок алгоритма представляет собой совокупность множества элементарных математических вычислений, которые подробно рассмотрены в диссертационной работе.

Для определения жёсткостных и точностных характеристик кинематической структуры удобно использовать матрицу Якоби (формула 3). Она представляет собой квадратную матрицу частного передаточного отношения кинематической структуры. Жёсткость кинематической структуры (формула 4) типа "гексапод" будем рассматривать в зависимости только от жёсткости штанг (остальные элементы принимаем как абсолютно твёрдое тело).

Точность кинематической структуры (формула 5) типа "гексапод" будем рассматривать в зависимости только от погрешности вылета штанг (погрешность остальных элементов не учитываем).

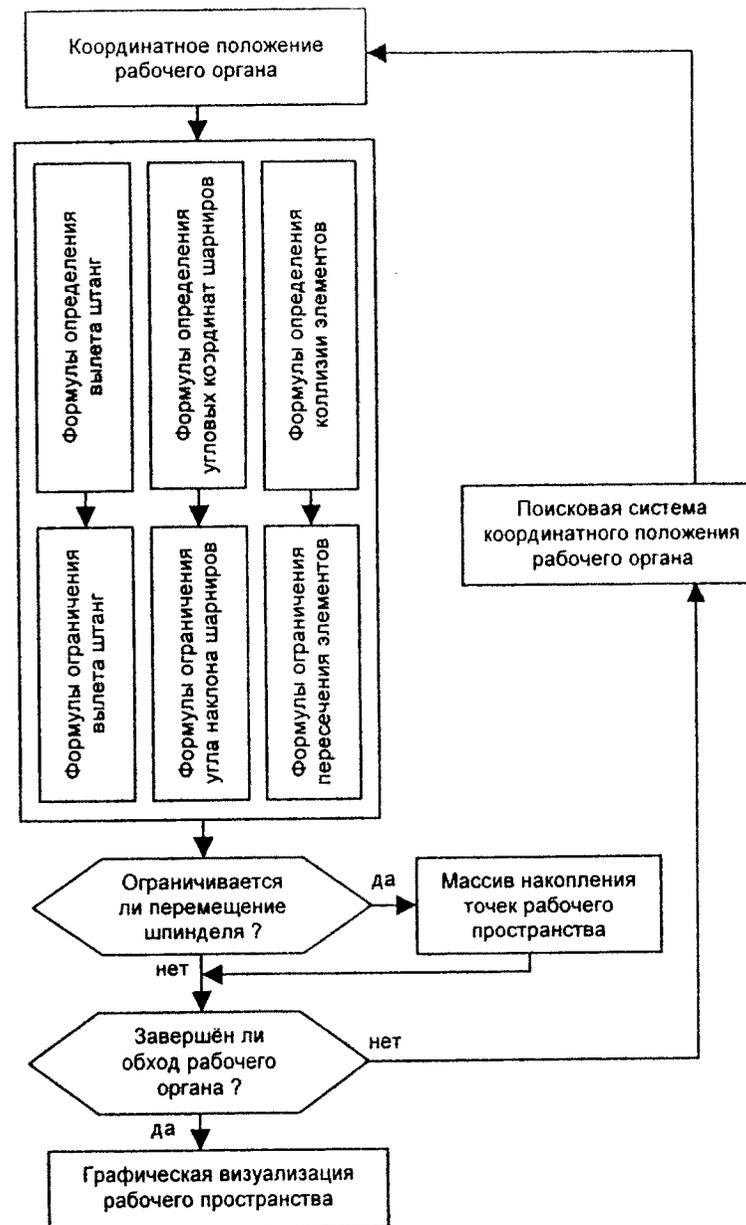


Рис.6 Алгоритм построения рабочего пространства

$$[Jak] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_s}(q_1) & \frac{\partial}{\partial y_s}(q_1) & \frac{\partial}{\partial z_s}(q_1) & \frac{\partial}{\partial \alpha_s}(q_1) & \frac{\partial}{\partial \beta_s}(q_1) & \frac{\partial}{\partial \gamma_s}(q_1) \\ \frac{\partial}{\partial x_s}(q_2) & \frac{\partial}{\partial y_s}(q_2) & \frac{\partial}{\partial z_s}(q_2) & \frac{\partial}{\partial \alpha_s}(q_2) & \frac{\partial}{\partial \beta_s}(q_2) & \frac{\partial}{\partial \gamma_s}(q_2) \\ \frac{\partial}{\partial x_s}(q_3) & \frac{\partial}{\partial y_s}(q_3) & \frac{\partial}{\partial z_s}(q_3) & \frac{\partial}{\partial \alpha_s}(q_3) & \frac{\partial}{\partial \beta_s}(q_3) & \frac{\partial}{\partial \gamma_s}(q_3) \\ \frac{\partial}{\partial x_s}(q_4) & \frac{\partial}{\partial y_s}(q_4) & \frac{\partial}{\partial z_s}(q_4) & \frac{\partial}{\partial \alpha_s}(q_4) & \frac{\partial}{\partial \beta_s}(q_4) & \frac{\partial}{\partial \gamma_s}(q_4) \\ \frac{\partial}{\partial x_s}(q_5) & \frac{\partial}{\partial y_s}(q_5) & \frac{\partial}{\partial z_s}(q_5) & \frac{\partial}{\partial \alpha_s}(q_5) & \frac{\partial}{\partial \beta_s}(q_5) & \frac{\partial}{\partial \gamma_s}(q_5) \\ \frac{\partial}{\partial x_s}(q_6) & \frac{\partial}{\partial y_s}(q_6) & \frac{\partial}{\partial z_s}(q_6) & \frac{\partial}{\partial \alpha_s}(q_6) & \frac{\partial}{\partial \beta_s}(q_6) & \frac{\partial}{\partial \gamma_s}(q_6) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[J_r] = \frac{r[F_s]}{[Jak]^{-1} \times [j_q] \times [Jak]^{-T} \times r[F_s]} \quad (4)$$

где  $[J_r] = [j_x \ j_y \ j_z \ j_\alpha \ j_\beta \ j_\gamma]^T$  - жёсткость кинематической структуры;

$r[F_s] = [x_{F_s} \ y_{F_s} \ z_{F_s} \ \alpha_{M_s} \ \beta_{M_s} \ \gamma_{M_s}]^T$  - силы и моменты, приложенные

к торцу инструмента;

$[j_q]$  - квадратная матрица жёсткости штанги на растяжение-сжатие.

$$[\Delta r_{max}] = \left\| [Jak]^{-1} \right\| \times [\Delta q_i], \quad (5)$$

где  $[\Delta r_{max}] = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta \alpha \ \Delta \beta \ \Delta \gamma]^T$  - точность кинематической структуры;

$[\Delta q_i] = [\Delta q_1 \ \Delta q_2 \ \Delta q_3 \ \Delta q_4 \ \Delta q_5 \ \Delta q_6]^T$  - погрешность вылета штанг.

Реализация математических моделей на компьютере осуществляется на языке программирования C++ с поддержкой трёхмерной графической библиотеки в виде законченного пакета программ – всё это есть инструментальная среда проектирования оборудования типа "гексапод".

### Глава 5. Инструментальная среда для проведения оптимизации оборудования типа "гексапод".

При проектировании оборудования типа "гексапод" конструктор должен обладать достаточно глубокой математической и компьютерной подготовкой. Данное оборудование представляет собой сложный математический объект, который для качественного проектирования требует широкого применения компьютера с трёхмерным изображением объекта. При этом основой для проектирования служит инструментальная среда в виде законченного пакета программ. Учитывая сложность задач по рациональному назначению параметров

элементов конструкции, реализовать эту задачу в численном виде не удастся, её решение возможно только в тесном диалоге человека и компьютера (рис.7). Кроме этого, в связи со сложностью и большой масштабностью исследовательской работы возможны ошибки в ручном расчёте, что ухудшает ценность полученных результатов, поэтому в работе максимально использованы автоматизированные расчеты, контролируемые человеком.

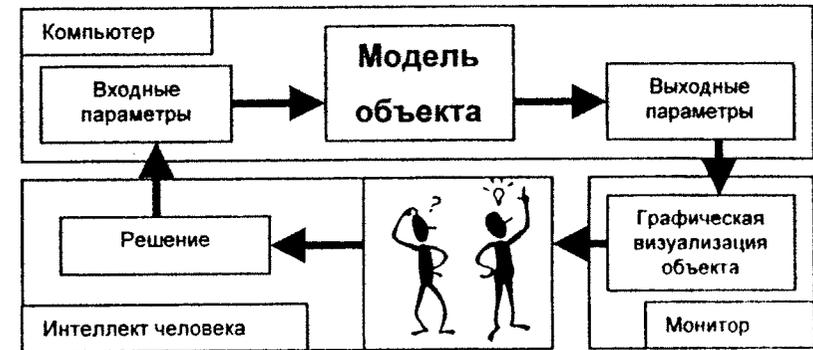


Рис.7 Диалог человека и компьютера при оптимизации параметров.

В структуре диалога (рис.7) "компьютер" представляет собой инструментальную среду, где имеются входные параметры, модель объекта и выходные параметры. В качестве входных параметров используются геометрические параметры оборудования типа "гексапод" (рассмотрено в главе 3). Модель объекта, где преобразовываются входные параметры в выходные данные, осуществляется на основе математического моделирования объекта (рассмотрено в главе 4). Выходные параметры используются для вывода параметров характеристик исследуемого объекта (рассмотрено в главе 6). В "мониторе" отображается информация моделируемого объекта в виде трёхмерного графического изображения.

В данной главе рассмотрена структура использования трёхмерного интерфейса инструментальной среды (рис.9) и методология проектирования и оптимизации геометрических параметров оборудования типа "гексапод" (рис.9).

Структура интерфейса инструментальной среды (рис.8) представляет собой мощную графическую систему, где пользователю (конструктору) даётся возможность наглядно видеть процесс проектирования при варьировании геометрических параметров. Программа позволяет также создать базу данных проектируемых и существующих станков "гексапод" в файле: \*.hpd. Кроме этого можно получить информационные данные характеристик проектируемого оборудования по рабочему пространству и по точности и жёсткости кинематической структуры в файле: C\_WS.txt и C\_J.txt соответственно, а при использовании программы Microsoft Excel обработать данные характеристики оборудования.

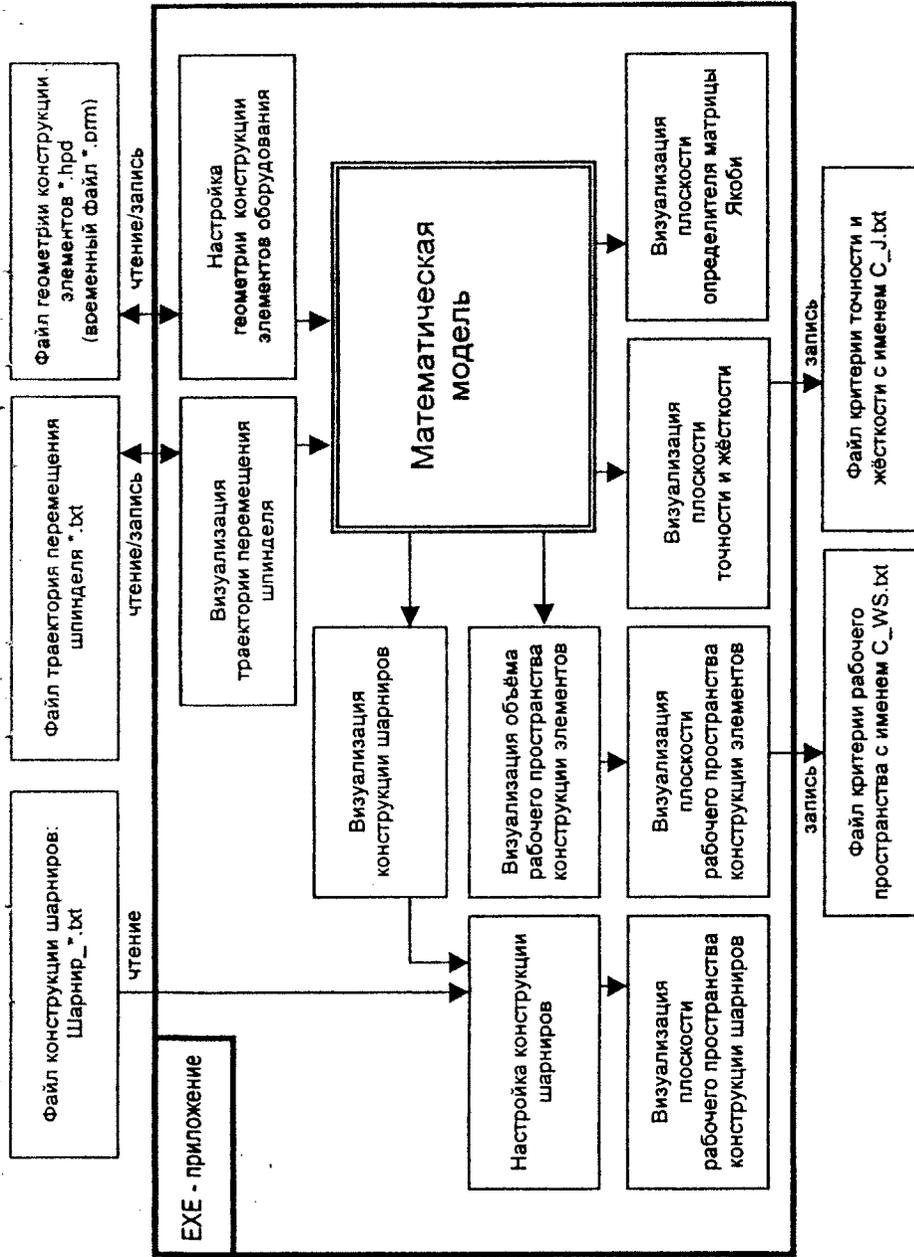


Рис.8 Структура инструментальной среды программы.

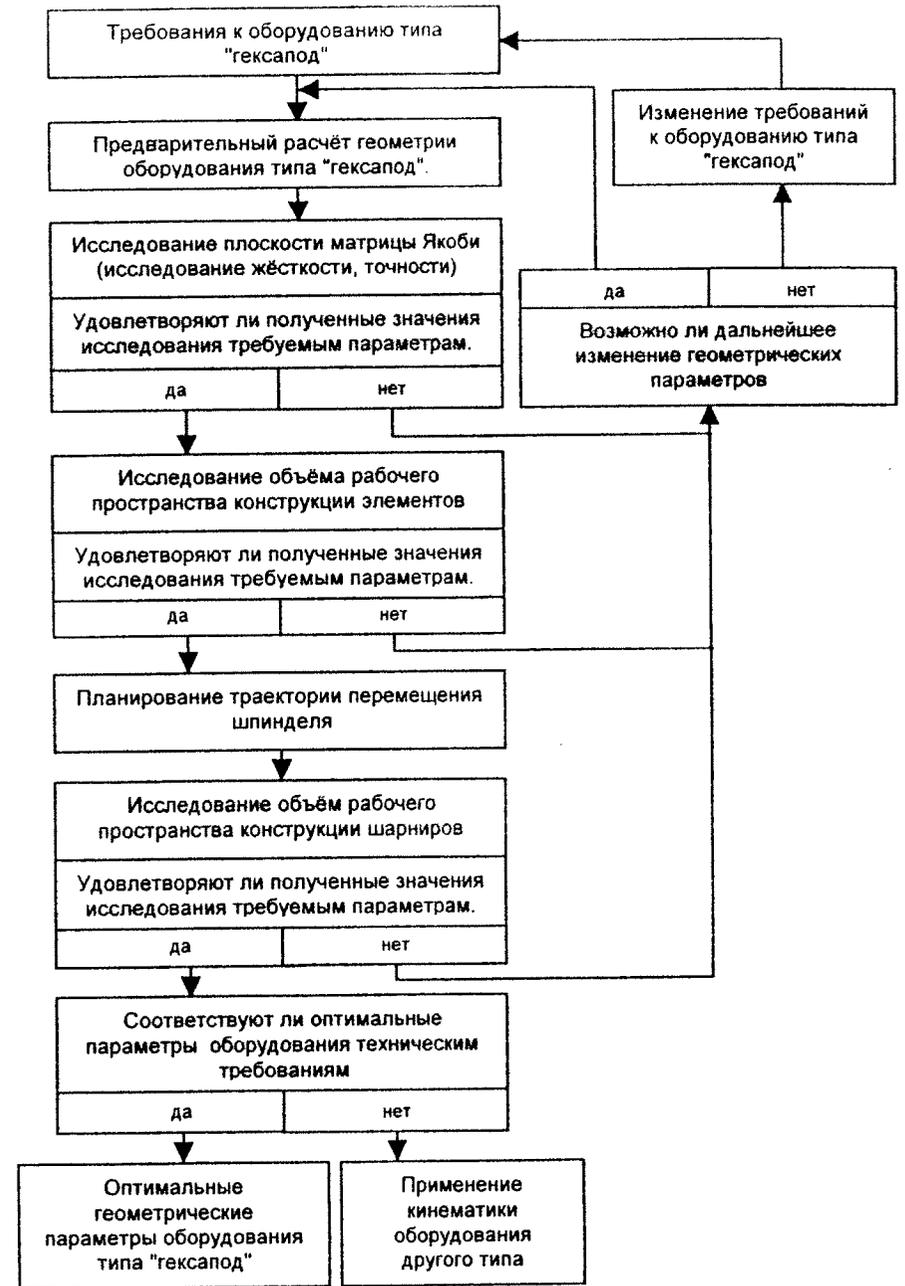


Рис.9 Алгоритм конструирования оборудования типа "гексапод".

В алгоритме проектирования оборудования типа "гексапод" (рис.9) представлена последовательность проектирования с использованием разработанной программы. Блок алгоритма "требования к оборудованию" является наиболее важным этапом проектирования, где представлен класс задач для проектирования оборудования. Эти задачи должны быть очень точно определены, поскольку не существует оборудования способного выполнять неограниченно широкие задачи. Таким образом, технологическая гибкость оборудования должна рассматриваться лишь в пределах класса задач, для которых он предназначен. При этом окончательное формирование требований для данного оборудования осуществляется путём итеративного этапа проектирования по алгоритму конструирования оборудования типа "гексапод" (рис.9).

Использование и применение инструментальной среды и алгоритма методологии проектирования позволяет пользователю наглядно проводить полномасштабную исследовательскую работу на компьютере и получить качественные и количественные результаты проектирования оборудования "гексапод".

Характеристики программного продукта предназначенного для проектирования оборудования типа "гексапод":

- Программный продукт ориентирован на использование компьютера типа PC Pentium или его аналоги.
- Требуемая операционная система для реализации программного продукта Windows 95 или выше.
- Драйвер видеоадаптера для отображения трёхмерного изображения на мониторе должен поддерживать графическую систему Open GL (рекомендуется установить графический ускоритель, ускоряющий трёхмерное изображение объекта).
- Программа реализована на Microsoft Visual C++ version 6.0 с поддержкой трёхмерной графической библиотеки Open GL.
- Общий объём продукта около 4МБ, в том числе файлы данных по станкам "гексапод".

#### Глава 6. Критерии оценки выбора геометрических параметров оборудования типа "гексапод".

Применение разработанной программы подтвердило, что рабочее пространство, обслуживаемое рабочим органом у оборудования "гексапод" представляет собой сложную пространственную форму (рис.10). Его поверхность зависит от максимального и минимального вылета штанг, от коллизии (пересечении) конструкции шпинделя со штангой (поверхность рабочего пространства имеет красный цвет) и от коллизии штанг (поверхность рабочего пространства имеет синий цвет), а форма рабочего пространства зависит от конструктивных параметров оборудования и от углового положения платформы. Сложный объём рабочего пространства затрудняет проектирование оборудования. Поэтому для наглядности используем горизонтальную усечённую плоскость рабочего пространства (рис.11).

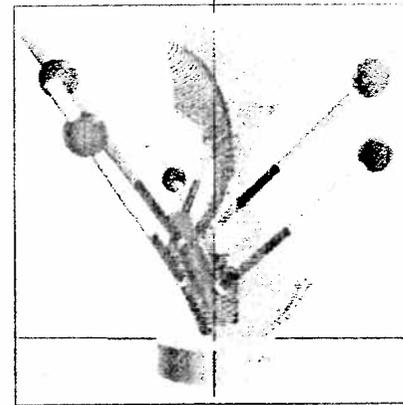


Рис.10 Форма рабочего пространства оборудования типа "гексапод".

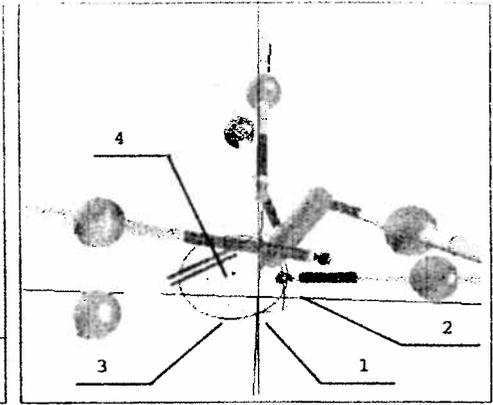


Рис.11 Поперечное сечение рабочего пространства. 1- реальная форма сечения рабочего пространства, 2- окружность цилиндра рабочего пространства, 3- окружность вписанная внутри сечения рабочего пространства, 4- центр плоскости рабочего пространства.

Для анализа рабочего пространства используем три критерия:

$$k_{ws} = \frac{r_{ws}}{R_{ws}}, \quad (6)$$

$$k_c = \frac{\sqrt{(x_{ws}^2 + y_{ws}^2)}}{R_{ws}}, \quad (7)$$

$$k_\alpha = \arctg\left(\frac{y_{ws}}{x_{ws}}\right), \quad (8)$$

где  $k_{ws}$  – величина, характеризующая относительный вписываемый радиус окружности (окружность вписана внутрь рабочего пространства);

$k_c$  – величина, характеризующая относительное смещение центра окружности рабочего пространства относительно оси z;

$k_\alpha$  – угол характеризующий смещение центра вписанной окружности рабочего пространства относительно оси z;

$r_{ws}$  – радиус окружности вписанной внутрь сечения рабочего пространства (рис.11 позиция 3) (его величина есть отношение  $s_{ws}$  – площади сечения рабочего пространства к  $p_{ws}$  – полупериметру границы сечения рабочего пространства);

$x_{ws}, y_{ws}$  – координаты центра смещения сечения рабочего пространства (рис.11 позиция 4);

$R_{ws}$  – радиус цилиндра рабочего пространства (рис.11 позиция 2).

Поэтому характеристики оборудования "гексапод" по рабочему пространству удобнее изобразить на графике (рис.12) в виде сечения рабочего пространства с учётом (сплошная линия) и без учёта (пунктирная линия) коллизии элементов, где плоскость сечения проходит через ось z и параллельна оси шпинделя (анализ показал, что при изменении угла поворота шпинделя  $z\alpha_s$  соответственно и поворота вертикальной плоскости сечения – сечение рабочего пространства мало меняется). Заданное рабочее пространство (цилиндр) изображается в виде прямоугольника. График рабочего пространства реализован с помощью программы Microsoft Excel, а данные получены с файла C\_WS.txt при помощи разработанной программы.

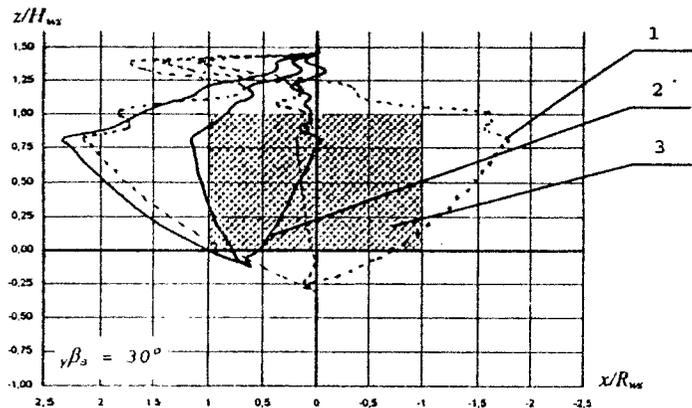


Рис.12 Сечение рабочего пространства.

- 1- рабочее пространство без учёта коллизии элементов,
- 2- рабочее пространство с учётом коллизии,
- 3- цилиндр рабочего пространства с параметрами  $R_{max}$ ,  $H_{max}$ .

При анализе точности и жёсткости кинематической структуры с применением формулы 4 и 5 учитываем следующие особенности:

- В оборудовании "гексапод" в качестве основного инструмента для металлообработки используют пальцевую фрезу, откуда жёсткость кинематической структуры вычисляется при приложении сил  $xF_s$ ,  $yF_s$ ,  $zF_s$  (крутящий момент - мал и его не учитываем);
- При расчёте жёсткости кинематической структуры неизвестна величина жёсткости штанг (жёсткость штанги зависит от её конструкции и величины вылета штанги), поэтому примем жёсткость штанги за единицу. Также примем за единицу и приложенные силы, и окончательная формула для определения относительной жёсткости кинематической структуры имеет вид:

$$[j^{n_r}] = \frac{1}{\left([Jak]^{-1}\right)^2 \times [I]} \quad (9)$$

где  $[j^{n_r}] = [j^{n_x} \ j^{n_y} \ j^{n_z} \ j^{n_\alpha} \ j^{n_\beta} \ j^{n_\gamma}]^T$  - матрица относительной жёсткости кинематической структуры;

$\left([Jak]^{-1}\right)^2$  - каждый элемент обратной матрицы Якоби возведённый в квадрат;

$$[I] = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$$

- При расчёте точности кинематической структуры неизвестна величина погрешности вылета штанг (погрешность штанги зависит от её конструкции и величины вылета), поэтому примем погрешность штанги за единицу, окончательная формула определения относительной точности кинематической структуры имеет вид:

$$[\Delta n_r] = \left\| [Jak]^{-1} \right\| \times [I]; \quad (10)$$

где  $[\Delta n_r] = [\Delta n_x \ \Delta n_y \ \Delta n_z \ \Delta n_\alpha \ \Delta n_\beta \ \Delta n_\gamma]^T$  - матрица относительной точности кинематической структуры;

$\left\| [Jak]^{-1} \right\|$  - модуль величины обратной матрицы Якоби, все элементы матрицы положительны;

$$[I] = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$$

Характеристики оборудования "гексапод" по относительной точности и жёсткости удобно изобразить на графике в виде трёх прямоугольников вдоль осей x, y, z (рис.13 позиция 1, 2, 3 соответственно), которые характеризуют изменение относительных величин точности и жёсткости в пределах цилиндра рабочего пространства. График относительной точности и относительной жёсткости реализован с помощью программы Microsoft Excel, а данные получены с файла C\_J.txt на основе разработанной программы.

При анализе графиков относительной точности и жёсткости удобно использовать цветовую диаграмму определителя матрицы Якоби (рис.14). На диаграмме видны зоны максимальной величины определителя матрицы Якоби в виде фигуры синего цвета (рис.14 позиция 3) и зоны нулевой величины определителя матрицы Якоби в виде фигуры красного цвета (рис.14 позиция 4). Сущность цветовой диаграммы заключается в том, что при расчёте жёсткостных и точностных характеристик (формулы 9 и 10) используется вычисление обратной матрицы Якоби. Поэтому определитель матрицы Якоби значительно влияет на элементы обратной матрицы Якоби, что соответственно влияет на жёсткость и точность кинематической структуры. Например, при попадании рабочего органа в зону нулевой величины определителя матрицы Якоби происходит потеря жёсткости кинематической структуры. Такое явление потери жёсткости в кинематике параллельной структуры

называется сингуляром. Цветовая диаграмма определителя матрицы Якоби реализована с помощью программы собственной разработки.

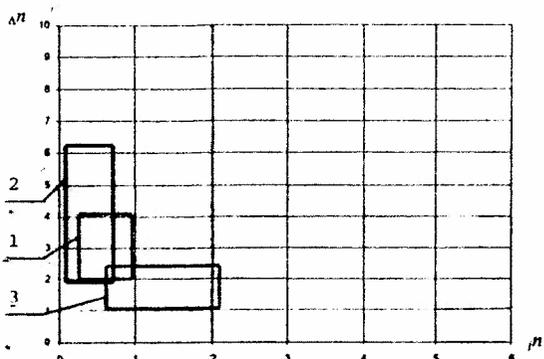


Рис.13 График относительной точности и относительной жёсткости кинематической структуры в пределах цилиндра рабочего пространства.

1- оси x, 2- оси y, 3- оси z.

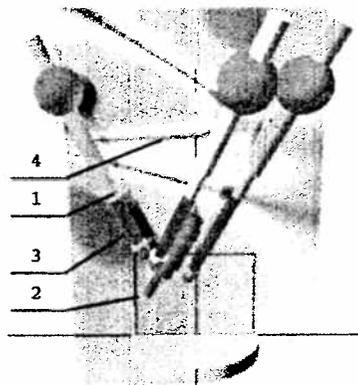


Рис.14 Цветовая диаграмма определителя матрицы Якоби.

1- модель оборудования типа "гексапод", 2- цилиндр рабочего пространства, 3- зона максимальной величины определителя матрицы Якоби, 4- зона минимальной величины определителя матрицы Якоби.

### Глава 7. Оптимизация геометрических параметров элементов при проектировании оборудования типа "гексапод".

В этой главе приведены результаты оптимизации проектирования оборудования "гексапод" по критерию минимального объёма занимаемого станком при обеспечении приемлемых изменений точности и жёсткости кинематической структуры в рабочем пространстве. Проектирование осуществлялось по алгоритму представленному на рис.9.

Сначала приведём технические требования для проведения оптимизации:

- Оборудование "гексапод" является симметричной конструкцией (рис.5), отсюда заданный объём рабочего пространства имеет цилиндр (рис.5 позиция 5) с размерами  $R_{ws} = 445 \text{ мм}$  и  $H_{ws} = 630 \text{ мм}$ , при этом коэффициент

эффективности  $K_{эф}$  - отношение площади станка к площади рабочего пространства должен быть менее 10.

- Штанги относительно платформы рекомендуется расположить вверх, этим в процессе металлообработки исключается коллизия штанг о заготовку, а также облегчается автоматический подвод детали к рабочему столу.

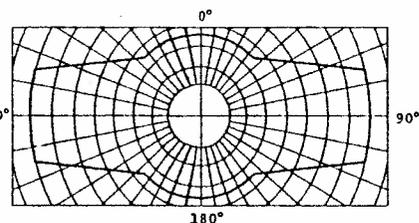


Рис.15 График диапазона угла наклона карданного шарнира фирмы INA.

- Максимальный угол наклона шпинделя составляет  $45^\circ$ , для устранения поломки шарниров, максимальный диапазон угла наклона должен соответствовать определённым характеристикам конструкции шарниров (рис.15).

- Максимальный и минимальный угол наклона шарнира  $\beta$  (рис.16) составляет соответственно не более  $80^\circ$  и не менее  $15^\circ$ ; этим исключается возможность коллизии (столкновения) шпиндельной платформы с корпусом основания.

- Диапазон вылета штанг составляет  $\Delta L_q = 1000 \text{ мм}$ , а параметр штанги  $L_{q(\min)} = 200 \text{ мм}$  и  $l_{q(\min)} = 100 \text{ мм}$ , вылет цилиндра штанги  $H_q$  должен составлять не менее половины длины суммы параметров  $\Delta L_q + l_{q(\min)} + l_{q(\min)}$  (рис.5), это уменьшает свисание цилиндра штанги, находящегося за корпусом основания, где закреплён электропривод. Габаритный размер шпинделя на платформе составляет  $R_{ws} = 100 \text{ мм}$  и  $H_{ws} = 500 \text{ мм}$ , вылет инструмента в среднем составляет  $H_i = 200 \text{ мм}$ .

- При увеличении угла наклона шпинделя  $\beta_2$  необходимо изменение формы рабочего пространства с учётом коллизии элементов, по сравнению с рабочим пространством без учёта коллизии элементов. Для этого следует варьировать геометрические параметры:  $R_p$  и  $R_b$  - радиус шарнирных точек на платформе и на основании.

- Зоны максимальной величины определителя матрицы Якоби благоприятно влияют на характеристики относительной точности и жёсткости. Поэтому при вертикальном положении шпинделя выбираем геометрические параметры оборудования так, чтобы эта зона находилась внутри цилиндра рабочего пространства. Для этого следует изменять геометрические параметры:  $H_q$  - расстояние от торца цилиндра штанги до оси шарнира на основании и  $H_b$  - высоту шарнирных точек на основании.

- Для исключения резкого ухудшения величин относительной точности и жёсткости вдоль осей координат x, y, z, при больших углах наклона шпинделя до  $\beta_2 = 40^\circ$  необходимо избегать попадания зоны минимальной величины определителя матрицы Якоби в пределы рабочего пространства. Для этого следует подобрать геометрические параметры:  $R_b$ ,  $H_b$  - радиус и высоту шарнирных точек на основании и  $dH_b$ ,  $dH_p$  - разница высоты верхних и нижних трёх шарнирных точек на основании и на платформе.

- Для улучшения характеристик относительной точности при проектировании оборудования "гексапод" необходимо расположить шесть шарниров на платформе и на основании в виде равностороннего треугольника. На такое расположение шарниров влияют следующие геометрические параметры:  $dW_b$  и  $dW_p$  - разница углового положения относительно верхних и нижних трёх шарнирных точек на основании и на платформе.

- Минимальная величина жёсткости оборудования в пределах цилиндра рабочего пространства подбирается таким образом, чтобы в процессе металлообработки погрешность обрабатываемой поверхности составляло

около 1 мкм при известной величине жёсткости одной штанги на растяжение – сжатие. Этим исключается ручная обработка по исправлению брака, и соответственно отпадают требования к операции шлифования, т.е. при угле наклона шпинделя  $\beta_s = 40^\circ$  минимальный параметр относительной жёсткости должен составлять не менее  $\mu = 0,1$ .

- Точность положения шпиндельной платформы составляет около 1 мкм, при известной величине погрешности позиционирования вылета одной штанги, т.е. при угле наклона шпинделя  $\beta_s = 40^\circ$  предельный параметр относительной точности не должен превышать  $\mu = 5$ .

Далее с помощью программы Microsoft Excel произведём предварительный расчёт геометрии оборудования типа "гексапод" (рис.16) на основе разработанных технических требований. Он необходим для внесения в разработанную программу геометрических параметров, что в дальнейшем позволяет анализировать станок по критериям рабочего пространства и относительной точности и жёсткости.

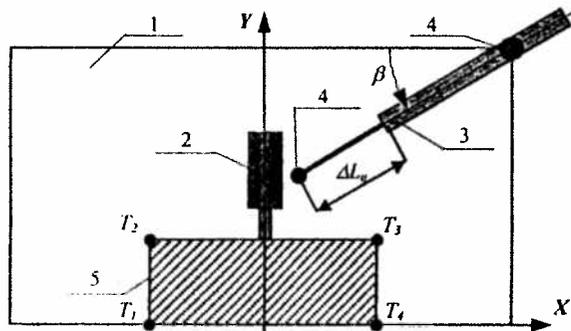


Рис.16 Схема оборудования типа "гексапод"  
1- основание, 2- шпиндельная платформа, 3- штанга, 4- шарниры, 5- рабочее пространство.



Рис.17 График зависимости диапазона вылета штанги  $\Delta L_q$  от угла наклона шарнира  $\beta$ . 1- кривая функции  $\Delta L_q(\beta)$ , 2- кинематика с большим углом расхождения штанг, 3- кинематика с малым углом расхождения штанг.

Рассмотрим график зависимости диапазона вылета штанги  $\Delta L_q$  от диапазона угла наклона шарнира  $\beta$  при постоянной величине рабочего пространства (рис.17). Из графика следует, что при постоянной величине рабочего пространства с увеличением величины  $\beta$  в диапазоне от  $\{15^\circ; 60^\circ\}$  до  $\{35^\circ; 80^\circ\}$  величина диапазона вылета штанги  $\Delta L_q$  уменьшается.

При оптимизации геометрических параметров в диапазоне изменений угла наклона шарниров  $\beta$  от  $\{15^\circ; 60^\circ\}$  до  $\{35^\circ; 80^\circ\}$  рассмотрим две схемы оборудования типа "гексапод" (рис.18 позиция 2 и 3) отличающиеся углом расхождения штанг:

$$\alpha_{\nabla} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{R_b - R_p}{H_q + \Delta L_q}\right), \quad (11)$$

где параметры см рис.6.

По результатам анализа двух схем станков типа "гексапод" отличающихся углом расхождения штанг можно сделать вывод о целесообразности классификации такого оборудования на станки с малым (до  $45^\circ$ ) и большим (свыше  $65^\circ$ ) углом расхождения штанг. Станки отличаются габаритами размерами конструкции шпиндельной платформы (см. табл.1), а также рабочим пространством и показателями относительной точности и жёсткости (рис. 18).

Таблица 1 Геометрические параметры оборудования типа "гексапод" (мм)

Конструктивный параметр	с большим углом расхождения штанг (в скобках даны параметры оборудования института Фраунгофер)	с малым углом расхождения штанг (в скобках даны параметры оборудованием фирмы Лапик)
$R_b$ - радиус шпинделя	1264 (1340)	1020 (980)
$dR_b$	220 (0)	0 (0)
$H_b$ - высота шпинделя	1800 (2010)	1780 (1745)
$dH_b$	0 (500)	0 (0)
$R_p$ - радиус платформы	200 (200)	340 (314)
$dR_p$	0 (0)	0 (0)
$H_p$ - высота платформы	100 (50)	100 (40)
$dH_p$	400 (400)	0 (0)
$H_q$	1054 (950)	800 (922)
$dL$	1060 (1000)	1000 (1000)
$l_q$ - длина штанги	1360 (1400)	1300 (1059)
$R_{ws}$ - радиус рабочего пространства	445 (445)	445 (608)
$H_{ws}$ - высота шпинделя рабочего пространства	630 (630)	630 (630)
$\alpha_{\nabla}$	$65^\circ (72^\circ)$	$44^\circ (40^\circ)$

При оптимизации оборудования Фраунгоферского института был снижен объём занимаемого станком (на 33%), а в станка фирмы Лапик исключена область резкого изменения точности и жёсткости и показана необходимость изменения геометрических параметров при переходе от измерительной к обрабатывающей системе, например при больших углах наклона шпинделя ( $\beta_s = 40^\circ + 60^\circ$ ) есть зона полной потери жёсткости. В табл.1 параметры до оптимизации показаны в скобках.

Выделим характерные особенности оборудования "гексапод" малым (до  $45^\circ$ ) и большим (свыше  $65^\circ$ ) углом расхождения штанг, которые влияют на характеристики рабочего пространства и на относительную точность и жёсткость.

1. Особенностью конструкции двух схем оборудовании является шпindelная платформа – это величины  $dH_p$  и  $R_p$  (рис.5); у оборудования с малым углом расхождения штанг величина  $dH_p = 0$  см и  $R_p = 68$  см, а у оборудования с большим углом расхождения штанг –  $dH_p = 40$  см и  $R_p = 40$  см. У оборудования с малым углом расхождения штанг при больших углах наклона шпинделя  $\beta_s = 45^\circ$  возможно столкновение (натякание) платформы на деталь из-за большого диаметра платформы (диаметр рабочего пространства в виде цилиндра составляет  $R_{из} = 89$  см). Поэтому для обработки детали с большим углом наклона шпинделя предпочтительно использовать оборудование с большим углом расхождения штанг из-за малого диаметра платформы.
2. Штанги рекомендуется расположить выше платформы, этим исключается коллизии (натякании) штанг об заготовки, а также облегчается простая установка заготовки на рабочем столе.
3. При вертикальном положении шпинделя реальная величина рабочего пространства, у оборудования с малым углом расхождения штанг больше, чем у оборудования с большим углом расхождения штанг (рис.18).
4. При изменении угла наклона шпинделя до  $\beta_s = 45^\circ$  рабочее пространство у оборудования с большим углом расхождения штанг уменьшается незначительно и перемещается в сторону против угла наклона шпинделя. Рабочее пространство у оборудования с малым углом расхождения штанг уменьшается значительно и отсекается из-за коллизии элементов. Поэтому в процессе обработки деталей, требующих большого угла наклона шпинделя рекомендуется устанавливать деталь не в центр рабочего стола, а с учётом фактического расположения рабочего пространства.
5. У оборудования с малым углом расхождения штанг при увеличении угла наклона шпинделя происходит смещение зоны сингуляра (на цветовой диаграмме рис.18 левый ряд – зона красного цвета) в область цилиндра рабочего пространства, что ограничивает угол наклона шпинделя до  $\beta_s = 45^\circ$  в процессе обработки. У оборудования с большим углом расхождения штанг – зоны сингуляра не изменяются, это является основанием перспективного использования данной кинематики при угле наклона шпинделя до  $\beta_s = 90^\circ$ .
6. Расположение шарниров на платформе в виде равностороннего треугольника (рис.19б) улучшают точностные характеристики по сравнению с расположением шарниров в виде равностороннего шестиугольника (рис.19а), поэтому вариант конструкции расположения шарниров в виде равностороннего треугольника более предпочтителен.

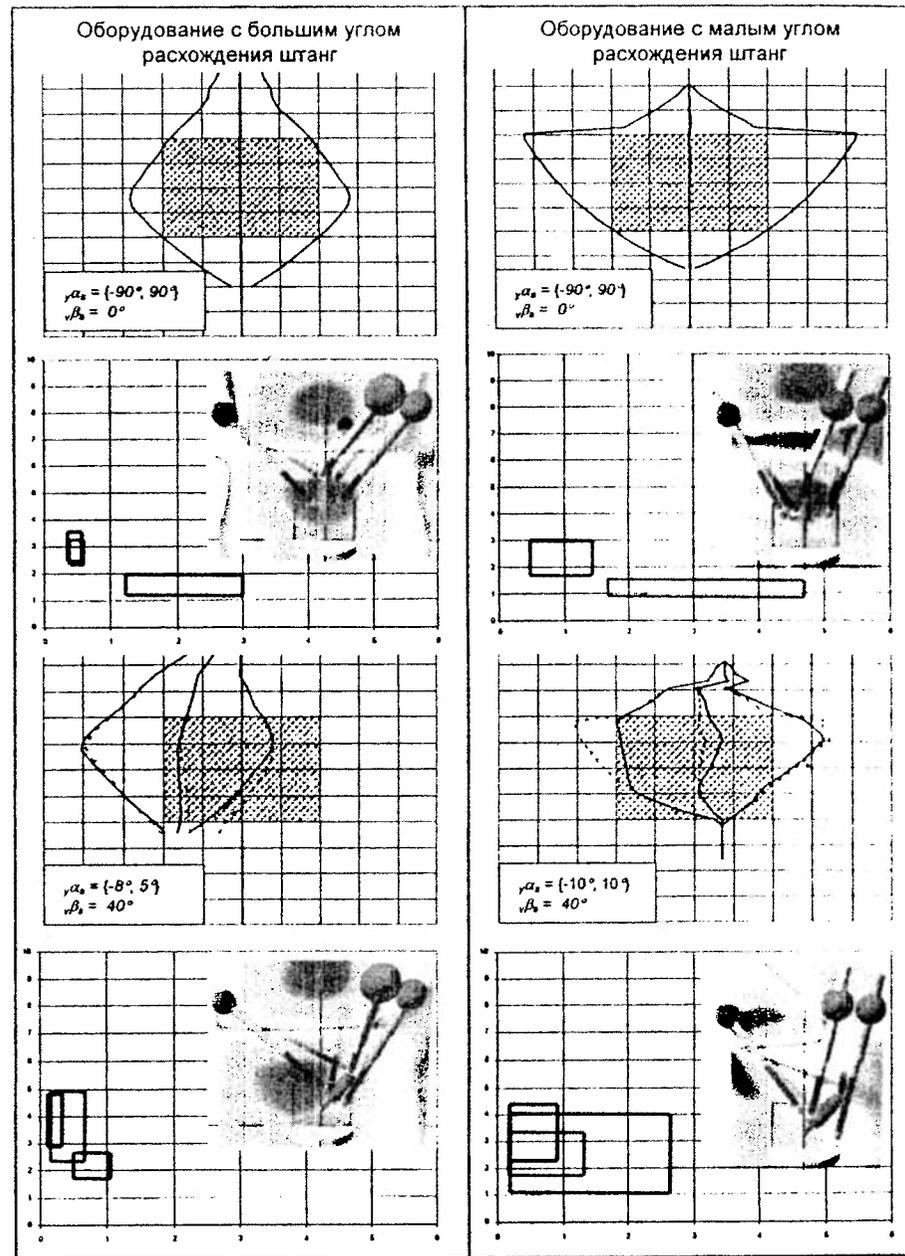


Рис. 18 Графики изменения объема рабочего пространства и графики зависимости относительной точности от относительной жёсткости при угле наклона шпинделя  $\beta_s = 0^\circ$  и  $\beta_s = 40^\circ$ .

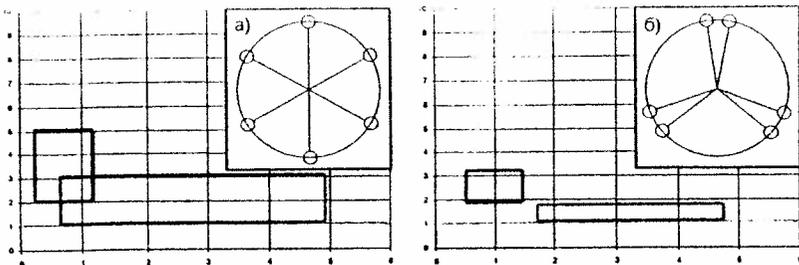


Рис.19 Влияние расположение шарниров на платформе на характеристики относительной точности и жёсткости. а) в виде равностороннего шестиугольника, б) в виде равностороннего треугольника.

7. При увеличении параметра  $dH_p$  с углом наклона шпинделя  $\beta_s = 45^\circ$  наблюдается картина ухода зоны сингуляра (на цветовой диаграмме рис.20 – зоны красного цвета) из цилиндра рабочего пространства. Также возникают зоны максимальной величины определителя матрицы Якоби около цилиндра рабочего пространства (на цветовой диаграмме рис.20 – зоны синего цвета), что улучшает точностные и жёсткостные характеристики оборудования. Увеличение параметра  $dH_p$  характерно только для оборудования с большим углом расхождения штанг, у оборудования с малым углом расхождения штанг увеличение  $dH_p$  ухудшает характеристику рабочего пространства из-за коллизии элементов.

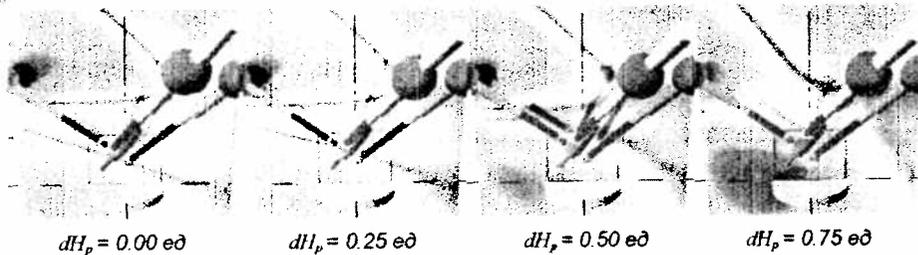


Рис.20 Влияние зоны сингуляра (на цветовой диаграмме зоны красного цвета) при увеличении параметра  $dH_p$ .

8. Слабым местом оборудования "гексапод" является конструкция шарниров на платформе. Используя разработанную программу при задании траектории движения шпинделя в пределах цилиндра рабочего пространства с углом наклона и поворота шпинделя в пределах  $\alpha_s = \pm 90^\circ$  и  $\beta_s = \pm 45^\circ$  получили, что граница определяемая конструкцией шарниров (рис.21а позиция 3) не полностью охватывает требуемую границу углов наклона шарниров (рис.21а позиция 1). Поэтому необходимо ограничить угол поворота шпинделя при  $\beta_s = 45^\circ$  до  $\alpha_s = \pm 10^\circ$  (рис.21б).

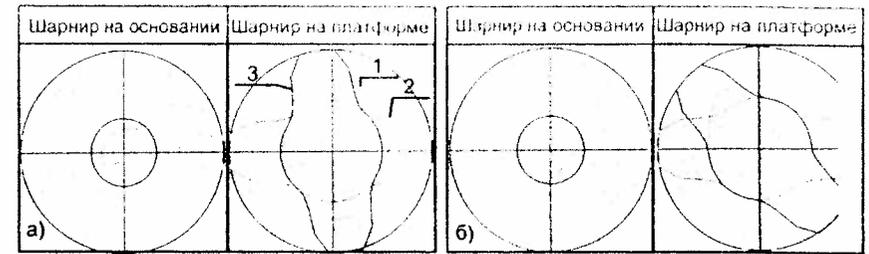


Рис.21 Граница угла наклона шарниров на основании и на платформе (одно деление на графике равна  $10^\circ$ ) при задании движения шпинделя в пределах цилиндра рабочего пространства с углом наклона шпинделя в пределах:

а)  $\alpha_s = \pm 90^\circ$  и  $\beta_s = \pm 45^\circ$ , б)  $\alpha_s = \pm 10^\circ$  и  $\beta_s = \pm 45^\circ$ .

1- реальная граница, 2- граница определяемой конструкцией шарнира, 3- настройка положения шарнира.

9. С учётом ограничения угла наклона шарниров предложено рациональное расположение шарниров на основании и на платформе для оборудования с разным углом расхождения штанг (рис.22). Конструкция шарниров на основании проектируется конструктором, где максимальный угол наклона шарнира составляет до  $\beta_s = 35^\circ$  (см. рис.21 шарниры на основании), а на платформе подобран карданный шарнир разработанной фирмой INA (см. рис.21 шарниры на платформе).

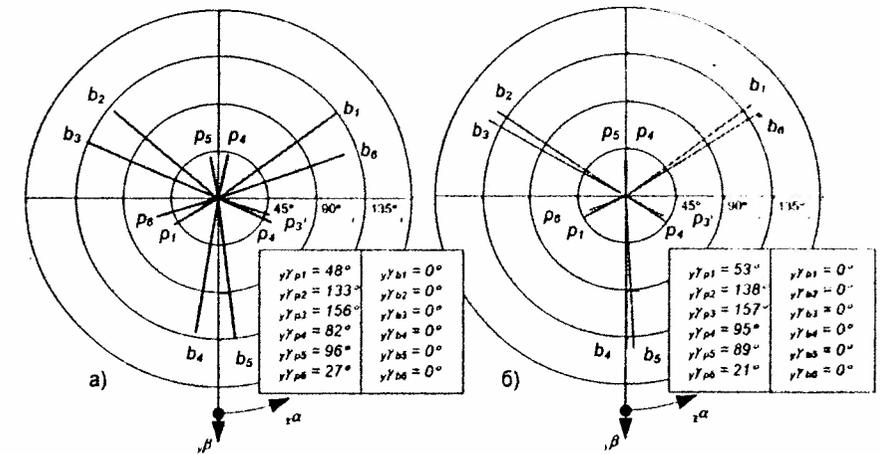


Рис.22 Расположение шарниров на основании и на платформе для оборудования: а) с большим и б) малым углом расхождения штанг.

10. Для автоматической смены инструмента предлагается рациональное расположение шпинделя (рис.23), где исключено его попадание в зону сингуляра (на цветовой диаграмме зона красного цвета), при этом исключается коллизия и учитываются конструктивные особенности шарниров на платформе с разным углом расхождения штанг.

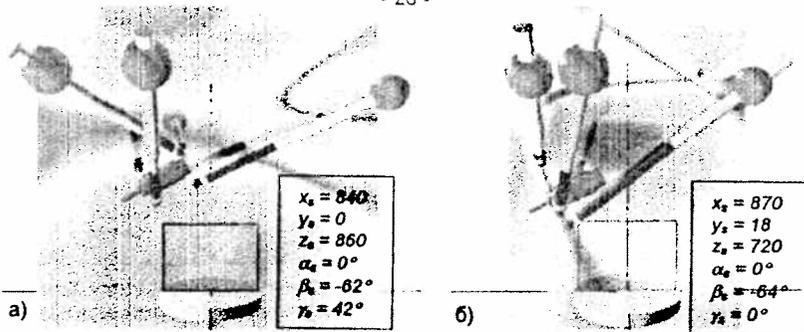


Рис.23 Положение шпинделя для автоматической смены инструмента и его цветовая диаграмма для оборудования с большим (а) и малым (б) углом расхождения штанг.

- 1.1. У оборудования с большим углом расхождения штанг жёсткость в горизонтальном направлении (рис.18 левый ряд) мало меняется и составляет от 0,25 до 0,5 жёсткости одной штанги, а жёсткость в вертикальном направлении при увеличении угла наклона шпинделя сильно меняется. У оборудования с малым углом расхождения штанг (рис.18 правый ряд) жёсткость в горизонтальном направлении меняется в более широком диапазоне и составляет 0,5 до 1,5 жёсткости одной штанги, а в вертикальном направлении при увеличении угла наклона шпинделя меняется незначительно. Т.е. при в вертикальном положении шпинделя горизонтальная жёсткость хуже в 4,5-6 раз по сравнению с вертикальной жёсткостью, а при изменении угла наклона шпинделя она изменяется в 1,5-2 раза.
12. Для обеспечения точности обрабатываемой поверхности в пределах 1 мкм с силой резания  $F = 20 \text{ Н}$  и углом наклона шпинделя  $\beta_s = 40^\circ (20^\circ)$ , необходимая жёсткость одной штанги у оборудования с большим углом расхождения штанг составляет не менее  $j_q = 90(80) \text{ Н/мкм}$ , а у оборудования с малым углом расхождения штанг составляет не менее  $j_q = 80(60) \text{ Н/мкм}$ .
13. Для обеспечения точности положения рабочего органа в пределах 1 мкм при угле наклона шпинделя  $\beta_s = 40^\circ (20^\circ)$ , необходимо оснастить измерительной системой штангу с точностью не хуже  $\Delta_q = 0,20 (0,22) \text{ мкм}$  для оборудования с большим углом расхождения штанг и  $\Delta_q = 0,23 (0,26) \text{ мкм}$  для оборудования с малым углом расхождения штанг.

#### Выводы по работе.

1. При проектировании оборудования параллельной структуры типа "гексапод" традиционные методы проектирования не обеспечивают требуемую точность и жёсткость кинематической структуры и не обеспечивают устранение коллизии (пересечений) элементов конструкции со значительным смещением рабочей зоны от центра рабочего стола, а также случаи потери жёсткости кинематической структуры (сингуляра) и т.п. Разработанная инструментальная среда позволяет избежать недостатки традиционного проектирования на ранней стадии проектирования.

2. Как показали проведённые теоретические исследования, очень важным является назначение рациональных геометрических параметров основных элементов конструкции на ранней стадии проектирования, поскольку они влияют как на конфигурацию рабочего пространства, объём занимаемый станком, так и на основные характеристики жёсткости и точности кинематической структуры. При не оптимальном выборе этих параметров исправить ситуацию в дальнейшем будет невозможно.
3. Назначение параметров основных элементов конструкции, оценка объёма занимаемого станком и фактической конфигурации рабочего пространства целесообразно проводить с учётом изменения относительной точности и жёсткости структуры по всему рабочему пространству. Это позволяет избежать потери точности и жёсткости при перемещении инструмента в рабочей зоне.
4. На относительную точность и жёсткость проектируемого оборудования значительно влияют коэффициент эффективности  $k_{эф}$  - отношение площади занимаемой станком к площади рабочего пространства, геометрические параметры шпиндельной платформы:  $dH_p$  - расстояние между тремя верхними и тремя нижними точками расположения шарниров и  $dW_p$  - разница углового положения трёх верхних и трёх нижних точек расположения шарниров. Чем больше величина коэффициента эффективности, тем меньше изменение относительной точности и жёсткости по рабочему пространству. При больших углах наклона шпинделя до  $40^\circ$  в пределах рабочего пространства образуются зоны потери жёсткости, что значительно сказывается на точностных и жёсткостных характеристиках оборудования.
5. По результатам анализа установлена существенная связь между основными эксплуатационными характеристиками (такими как конфигурация рабочей зоны, изменения точности и жёсткости структуры) и углом расхождения штанг. Это можно использовать при классификации оборудования типа "гексапод" по углу расхождения штанг на станки с малым (до  $45^\circ$ ) и большим (свыше  $65^\circ$ ) углом расхождения штанг. Описаны области рационального использования того или иного вида оборудования, в частности:
  - у оборудования с большим углом расхождения штанг диаметр шпиндельной платформы меньше, а диаметр основания станка больше;
  - применение оборудования с большим углом расхождения штанг предпочтительнее для обработки деталей с большими углами наклона шпинделя, из-за более благоприятной зоны работоспособности (по жёсткости) рабочего органа;
  - реальная величина рабочего пространства при малых углах наклона шпинделя больше у оборудования с малым углом расхождения штанг;
  - в процессе проектирования изменением параметров оборудования с большим углом расхождения штанг легче исключить зоны потери жёсткости в рабочем пространстве.

У двух классов данного оборудования (с большим и малым углом расхождения штанг) при изменении угла наклона шпинделя, зоны потери жёсткости меняются по-разному. Параметр  $dH_p$  влияет на относительную точность и жёсткость при больших углах наклона шпинделя, увеличивая этот параметр можно избежать потери жёсткости. Параметр  $dW_p$  влияет на относительную точность, поэтому рекомендуется располагать три пары шарниров на вершинах равностороннего треугольника. Но все эти параметры влияют на конфигурацию рабочего пространства, поэтому при выборе данных параметров необходимо исключать уменьшение рабочего пространства до недопустимых размеров.

6. Компьютерный анализ показал, что конфигурация рабочего пространства имеет сложную пространственную форму, которая зависит от максимального и минимального вылета штанг, конструкции шарниров и от коллизии (пересечений) элементов штанг и шпинделя. На конфигурацию рабочего пространства проектируемого оборудования значительно влияет угол расхождения штанг. При изменении углового положения шпиндельной платформы изменяется как конфигурация рабочего пространства, так и его положение относительно центра рабочего стола. Поэтому в процессе обработки при больших углах наклона шпинделя для данного оборудования рекомендуется устанавливать детали больших размеров не в центре рабочего стола, а с учётом изменения положения рабочего пространства.
7. Анализ конструкции станков с применением программы показал, что слабым местом в оборудовании "гексапод" является конструкция шарниров на платформе, т.е. при увеличении угла наклона шпинделя значительно ухудшается конфигурация рабочего пространства, это связано с ограничением угла наклона в конструкции шарниров. Поэтому конструкция шарниров ограничивает угол поворота шпинделя.
8. Эффективность предложенной концепции подтверждает проведённая автором оптимизация станков известных фирм (АО Лапик и Фраунхоферского института). При оптимизации станка Фраунхоферского института был снижен объём занимаемого станком (на 33%). В станке фирмы Лапик исключена область резкого изменения точности и жёсткости и показана необходимость изменения геометрических элементов при переходе от чисто измерительной к обрабатывающей системе, например, при больших углах наклона шпинделя ( $\gamma/\beta_s = 40^\circ + 60^\circ$ ) имеется зона полной потери жёсткости.

#### Публикации по теме диссертации.

1. Бушуев В.В. Хольшев И.Г. Механизмы параллельной структуры в машиностроении. Журнал "СТИН" 2001 – №1 – стр. 3–8.
2. Бушуев В.В. Хольшев И.Г. Оптимизация геометрических параметров оборудования "гексапод". Журнал "СТИН" 2002 – №1 – стр. 15–21.
3. Тезис доклада на семинаре по параллельной кинематике (12/13 апреля 2000г. в г. Хемнитц Германия). "Methodologie zur Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematik".

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Хольшев И.Г.

Проектирование структуры станков типа "гексапод"

Сдано в набор  
Формат 60\*90/16  
Объём 1,8уч.- изд.л.

Подписано в печать  
Бумага 80гр/м<sup>2</sup>  
Тираж 50 экз.

ПЛД №53-227

"Станкин" 101472, Москва, Вадковский пер., 3А