

**Министерство образования и науки Украины  
Национальный технический университет  
Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

**На правах рукописи**

**Хамуйела Жоаким Аугушту Герра  
ГЕНЕТИКО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ  
СИНТЕЗ ЗАЖИМНЫХ ПАТРОНОВ**

**Специальность 05.03.01. – процессы механической обработки,  
станки и инструмент**

**Диссертация на соискание  
ученой степени доктора технических наук**

**Научный консультант  
д.т.н., проф., засл. изобретатель УССР  
Кузнецов Ю.Н.**

**Киев – 2017**

## Содержание

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                       | 7  |
| РАЗДЕЛ 1. Проблема развития теории проектирования зажимных механизмов с использованием системно-морфологического подхода. ....                       | 15 |
| 1.1 Современные методы поиска технических решений и основные положения системно-морфологического подхода. .                                          | 15 |
| 1.2 Основные требования к зажимным механизмам. ....                                                                                                  | 30 |
| 1.3. Анализ известных классификаций, схем и конструкций зажимных патронов. ....                                                                      | 40 |
| 1.4. Анализ ранее проведенных исследований по применению системно-морфологического подхода при создании зажимных механизмов. ....                    | 47 |
| 1.5. Применение структурно-системного подхода и теории эволюция систем к проектированию зажимных патронов и принятая терминология. ....              | 54 |
| Цель и задачи исследований. ....                                                                                                                     | 70 |
| РАЗДЕЛ 2 Методология многоуровневого генетико-морфологического синтеза зажимных механизмов и поиск новых принципов действия. ....                    | 73 |
| 2.1. Многоуровневый морфологический синтез зажимного механизма как подсистемы металлорежущего станка. ....                                           | 73 |
| 2.2. Формирование критериев для принятия решений при выборе лучших вариантов на различных уровнях морфологического синтеза зажимного механизма. .... | 81 |
| 2.3. Предпосылки генетической классификации зажимных механизмов. ....                                                                                | 91 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.3.1. Структура зажимного механизма (ЗМ) . . . . .                                                                                                   | 94  |
| 2.3.2. Симметрия и топология структур ЗМ. . . . .                                                                                                     | 95  |
| 2.3.3. Принципы целостности структуры ЗМ. . . . .                                                                                                     | 97  |
| 2.4. Введение понятия механического гена и генетическая<br>классификация зажимных механизмов. . . . .                                                 | 97  |
| 2.5. Законы эволюции зажимных механизмов с различными<br>источниками энергии и передающими средами. . . . .                                           | 110 |
| 2.6. Поиск новых принципов действия зажимных механизмов по<br>признаку силового потока. . . . .                                                       | 114 |
| Выводы. . . . .                                                                                                                                       | 120 |
| РАЗДЕЛ 3 Генетико-морфологический подход к моделированию<br>и структурно-схемному синтезу зажимных патронов. . . . .                                  | 121 |
| 3.1. Описание зажимных механизмов с различными силовыми                                                                                               | 121 |
| 3.2. Моделирование и синтез зажимных патронов с различными<br>преобразователями силовых потоков и видом передающей<br>среды. . . . .                  | 129 |
| 3.3. Характер контактного взаимодействия объекта зажима с<br>зажимными элементами патрона, как первичного источника<br>силового пол. . . . .          | 139 |
| 3.4. Влияние структуры зажимного патрона на расширение<br>размерных возможностей зажима. . . . .                                                      | 144 |
| 3.5. Применение генетических операторов для структурно-<br>схемного синтеза зажимных патронов. . . . .                                                | 151 |
| 3.6. Морфологический синтез схем цанговых патронов двойного<br>зажима и выбор лучшего варианта. . . . .                                               | 163 |
| Выводы. . . . .                                                                                                                                       | 172 |
| РАЗДЕЛ 4 Теоретические исследования силовых характеристик<br>известных и синтезированных зажимных патронов с<br>различными силовыми потоками. . . . . | 175 |

|                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1. Силовые характеристики ИЗП с силовым потоком $F_{y1} - F_{y2}(F_{r1} - F_{r2})$ . . . . .                                                   | 175 |
| 4.2. Силовые характеристики ИЗП с силовым потоком $F_{x1} - F_{y2}(F_{a1} - F_{r2})$ . . . . .                                                   | 185 |
| 4.3. Синтез широкодиапазонных эксцентриковых ИЗП с ручным зажимом. . . . .                                                                       | 189 |
| 4.4 Силовые характеристики синтезированных широкодиапазонных эксцентриковых ИЗП с ручным зажимом. . . . .                                        | 194 |
| 4.5. Передача сил в синтезированном цанговом патроне двойного зажима. . . . .                                                                    | 205 |
| Выводы. . . . .                                                                                                                                  | 215 |
| РАЗДЕЛ 5 Теоретические исследования жесткостных характеристик известных и синтезированных зажимных патронов в системе шпиндельного узла. . . . . |     |
| 5.1. Основные соображения по приведению жесткости системы “патрон-объект зажима” для различных конструкций зажимных патронов. . . . .            | 217 |
| 5.2. Влияние случайных факторов на жёсткостные характеристики зажимных патронов с различными силовыми потоками. . . . .                          | 233 |
| 5.3. Частота собственных колебаний системы “патрон-объект зажима” для зажимных патронов различных конструкций. . . . .                           | 235 |
| 5.4. Статическая жесткость синтезированных шпиндельных узлов с учетом податливости его элементов. . . . .                                        | 243 |
| Выводы. . . . .                                                                                                                                  | 251 |
| РАЗДЕЛ 6 Сравнительные экспериментальные исследования известных и синтезированных зажимных механизмов. . . . .                                   |     |
| 6.1. Объекты экспериментальных исследований. . . . .                                                                                             | 252 |



|                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2. Методика экспериментальных исследований. . . . .                                                                                                                    | 257 |
| 6.2.1. ИЗП с цельной конусной втулкой. . . . .                                                                                                                           | 257 |
| 6.2.2. Широкодиапазонные эксцентриковые ИЗП. . . . .                                                                                                                     | 259 |
| 6.2.3. Цанговые патроны с одинарным и двойным зажимом. . . . .                                                                                                           | 263 |
| 6.2.4. Шпиндельный узел с самодействующим мотор-шпинделем                                                                                                                | 264 |
| 6.3. Экспериментальные исследования силовых и жесткостных<br>характеристик высокоскоростного высокоточного ИЗП с<br>цельным упругим зажимным элементом. . . . .          | 265 |
| 6.4. Производственные испытания высокоскоростного<br>высокоточного зажимного патрона при резании. . . . .                                                                | 271 |
| 6.5. Экспериментальные исследования силовых и жесткостных<br>характеристик высокоскоростного широкодиапазонного<br>эксцентрикового ИЗП. . . . .                          | 274 |
| 6.6. Сравнительные экспериментальные исследования<br>статических жесткостных характеристик цанговых патронов<br>одинарного и двойного зажима. . . . .                    | 279 |
| 6.7. Экспериментальные исследования статической жесткости<br>высокоскоростного шпиндельного узла с ручным цанговым<br>зажимом. . . . .                                   | 282 |
| Выводы. . . . .                                                                                                                                                          | 287 |
| РАЗДЕЛ 7 Разработка рекомендаций и расширение области<br>применения результатов исследований. . . . .                                                                    | 289 |
| 7.1. Примеры реализации генетико-морфологического подхода в<br>зажимных патронах и захватных устройствах промышленных<br>роботов с различными силовыми потоками. . . . . | 289 |
| 7.2. Рекомендации по реализации генетико-морфологического<br>подхода в приводах зажимных механизмов. . . . .                                                             | 304 |
| 7.3. Примеры реализации генетико-морфологического подхода<br>при проектировании шпиндельных узлов на модульном                                                           | 308 |

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| принципе. ....                                                                                                                     |     |
| 7.4. Применение идеологии многоуровневого морфологического синтеза при создании станков каркасных компоновок. ....                 | 321 |
| 7.5. Прогнозирование мобильных станков для различных условий их применения методом морфологического анализа                        | 326 |
| Выводы. ....                                                                                                                       | 331 |
| ОБЩИЕ ВЫВОДЫ. ....                                                                                                                 | 333 |
| ЛИТЕРАТУРА. ....                                                                                                                   | 336 |
| Приложения. ....                                                                                                                   | 369 |
| Приложение А. Некоторые термины из генетики и синергетики для природных и антропогенных систем, использованные в диссертации. .... | 370 |
| Приложение Б. Технические условия на синтезированный высокоскоростной широкодиапазонный эксцентриковый ИЗП типа ЭСФПШ - 13. ....   | 381 |
| Приложение В. Документы по использованию результатов диссертационной работы. ....                                                  | 399 |
| Приложение Г. Копия диплома конкурса на лучшую монографию. АН высшего образования Украины. ....                                    | 407 |
| Приложение Д. Примеры описания принципов одинарного зажима с различными силовыми потоками. ....                                    | 408 |

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы

Развитие и разработка новых технических и научных идей непосредственно связана с созданием технической базы народного хозяйства будущего. В последнее время правительство Анголы, как других африканских стран много внимания уделяет развитию машиностроения, где технологическая оснастка и зажимные механизмы станков играют важное значение и требуют непрерывного совершенствования.

Отличительной чертой настоящего этапа развития науки и техники является их непосредственная связь и тесная взаимозависимость. Новые научные идеи, как правило, сразу внедряются в технику и промышленность. В связи с этим становится понятным то внимание, которое уделяет любое государство разработке принципиально новых научных и технических идей, поиску новых технических решений на уровне изобретений.

Практика работы научно-исследовательских заведений, СКБ, других организаций, занятых созданием и изготовлением новой техники, показывает, что в целом ряде случаев поиск принципиально новых технических идей наталкивается на ряд трудностей причиной, которых является не отсутствие или низкий уровень квалификации, а незнание методологии поиска новых технических решений (ТР), т.е. креативного подхода.

К сожалению, в Анголе этому вопросу до последнего времени не уделялось должного внимания. Подтверждением тому может служить сравнение патентного фонда развитых стран. Из 26 миллионов изобретений на долю США приходится 6,5 млн., Англии – 5 млн., Франции – 2,8 млн., Японии – 3,2 млн., Украины – до 1 млн., Анголы – 0,15 млн.

При непрерывном развитии металлорежущих станков, особенно с ЧПУ, зажимные механизмы (ЗМ), которым посвящена данная работа, подолгу сохраняют

традиционные конструкции, что требуют новых научных обобщений, иного методологического подхода.

Поэтому развитие методологии создания новых ЗМ с применением многоуровневого морфологического синтеза и генетического подхода является актуальной проблемой, что позволит повысить технико-экономические показатели и расширить технологические возможности станков нового поколения.

### **Связь работы с научными программами, планами, темами**

Исследования проводились в соответствии с научной тематикой кафедры «Конструирование станков и машин» НТУУ «КПИ» в рамках госбюджетных тем №2267-ф «Развитие теории проектирования станков новых компоновок на основе системного анализа и синтеза механизмов с параллельной структурой» (№0109v000817), №2652-п «Создание многоцелевых токарных и многокоординатных сверлильно-фрезерных станков нового поколения» (№0106U007223), №2805-п «Создание и исследование высокоскоростных шпиндельных узлов с зажимными механизмами на модульном принципе для многокоординатных станков нового поколения» (№0115U002422). Диссертация связана с научно-исследовательской и опытно конструкторскими работами в рамках международного сотрудничества между НТУУ «КПИ» и Техническим университетом Габрово (Болгария).

### **Цель и задачи исследования**

Целью является повышение технико-экономических показателей и расширение функциональных возможностей металлорежущих станков, в том числе нового поколения, за счет поиска новых оригинальных технических решений и дальнейшего развития теории ЗМ с применением многоуровневого системно-морфологического подхода, начиная с поиска новых идей и принципов действия с учетом накопленных знаний об эволюции ЗМ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Выполнить анализ эволюции ТС различного происхождения, законов их развития и существующих методов поиска новых технических решений.
2. Проанализировать ранее выполненные работы по применению системно-морфологического подхода при создании ЗМ.
3. Разработать методологию многоуровневого синтеза к ЗМ и предпосылки для генетической классификации зажимных патронов (ЗП).
4. Развить и применить генетико-морфологический подход для структурно-схемного синтеза новых разновидностей ЗП.
5. Выполнить теоретические исследования основных характеристик синтезированных ЗП с различными силовыми потоками и контурами.
6. Экспериментально исследовать силовые и жесткостные характеристики ЗП с различными силовыми потоками.
7. Разработать рекомендации для производства и учебного процесса по применению многоуровневого морфологического синтеза и генетико-морфологического подхода применительно к задачам создания сложных ТС различного функционального назначения.

**Объект исследования** – процесс эволюции ЗМ металлорежущих станков как развивающихся динамических антропогенных систем с применением теории эволюционного и генетического синтеза.

**Предмет исследования** – структурные характеристики ЗП токарных и сверлильно-фрезерных станков с ЧПУ с заданными функциональными свойствами.

**Методы исследования.** Теоретические исследования базируются на основе: теории ТС; автоматизации поискового конструирования с применением современных системных методов поиска новых ТР; теории множеств и алгебры логики; теоретической механики, сопротивления материалов и теории упругости; методов принятия решений и многокритериальной оптимизации параметров

синтезированных ТС различного уровня сложности; генетического подхода к эволюции сложных развивающихся систем различного антропогенного происхождения.

В экспериментальных исследованиях были использованы современные методы и способы измерения. Обработка результатов выполнялась с использованием теории эксперимента и математической статистики с помощью стандартных программ. Экспериментальные исследования проведены в статике и производственных условиях, а также на действующих макетах настольных станков и ЗМ, разработанных с участием автора.

### **Научная новизна полученных результатов**

Основной научный результат – получила дальнейшее развития теория синтеза ЗМ, впервые разработана и реализована методология многоуровневого генетико-морфологического синтеза и моделирования ТС различного уровня сложности, которая прошла практическую апробацию применительно к ЗП различного назначения и конструктивного исполнения.

Для этого:

1. Впервые разработаны теоретические основы многоуровневого морфологического синтеза с применением положений теории эволюции систем с учетом наследственных принципов усложнения генетической информации на хромосомном, объектном, популяционном, видовом, системном и межсистемном уровнях.

2. Впервые предложено на нижнем (начальном) генетическом уровне моделирования и описания структуры ЗМ применять материальную точку как искусственный механический ген, несущий информацию о виде поступательных и вращательных перемещений и нагрузок с указанием направления в эвклидовом (трехмерном) пространстве. Это обеспечивает полноту решения задач на

хромосомном уровне и существенно упрощает поиск структур при взаимодействии двух материальных точек согласно систематики по Флинку.

3. Показано, что передача силы (энергии) от одной материальной точки на входе к другой материальной точке на выходе осуществляется в виде множества силовых (энергетических) потоков, представляющих морфологическую модель входов и выходов (условных пар на хромосомном уровне) с максимальным числом вариантов 144 для любых механизмов; 72 – для ЗМ, обеспечивающих закрепление невращающихся объектов сложной формы, а при зажиме объектов типа тел вращения в ЗП, уменьшенных до 48 вариантов.

4. По аналогии с периодической классификацией первичных источников электромагнитного поля предложена генетическая классификация источников упруго – силового поля, в основу которой положены пространственные формы контактного взаимодействия зажимного элемента с объектом зажима, обобщенные 7-ю геометрическими классами поверхностей (цилиндрическими, коническими, плоскими, призматическими, пирамидальными, сферическими, тороидальными) и 12-ю классами (видами) совместимых упруго – силовых полей из 32 возможных.

5. Показано, что основу структурообразования популяции ЗП определяют силовые (энергетические) потоки и виды преобразования энергии, которые в механическом исполнении сводятся к ограниченному количеству 7-ми типов: рычажные, клиновые, плунжерные, спиральные, винтовые, зубчатые и пружинные (упругие).

6. Впервые, применительно к механическим устройствам, разработан метод направленного синтеза ЗП с использованием 5-ти универсальных генетических операторов: репликации, скрещивания, инверсии, кроссинговера и мутации. Результаты практической апробации метода стали основой для разработки оригинальных технических решений на уровне изобретений.

7. Получил развитие подход приведения жесткости в месте зажима системы «патрон-деталь» для ЗП с различными силовыми потоками и преобразователями

силы и движения, по результатам которого показано, что произвольный ЗП можно характеризовать динамическим портретом с присущей ему частотой собственных колебаний.

### **Практическое значение полученных результатов**

Разработаны схемы, конструкции, изготовлены и испытаны опытные образцы ЗП для токарных и фрезерных станков с ЧПУ, которые позволяют повысить их технико-экономические показатели и расширить функциональные возможности при обработке деталей различной конфигурации в различных производственных условиях.

Научно обоснованы практические рекомендации, касающиеся областей применения результатов диссертационной работы для синтеза ТС различного происхождения.

Разработан проект ТУ на синтезированные широкодиапазонные эксцентриковые ИЗП типа ЭСФПШ-13, внедренный в производство на Украине (ООО «Техноэлектропласт» г. Полтава).

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе: НТУУ «КПИ» на кафедре «Конструирование станков и машин» при изучении дисциплин «Технологическое оборудование с параллельной кинематикой», «Металлообрабатывающее оборудование», «Станки с ЧПУ и станочные комплексы»; а также в техническом высшем учебном заведении Республики Анголы (Университет Августиньо Нето, факультет инженерии, г. Луанда).

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, которые выносятся на защиту, получены автором самостоятельно.

Соискатель лично разработал: методологию многоуровневого морфологического и генетического подходов при описании и синтезе ЗП для зажима тел вращения (деталей и режущих инструментов) на токарных и сверлильно-



фрезерных станках с ЧПУ, в том числе с механизмами параллельной структуры (МПС).

В опубликованных в соавторстве работах автору принадлежат основные идеи проведенных исследований и научное обоснование теоретических положений. Постановка задач и обсуждение научных результатов выполнены вместе с научным консультантом.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 18 республиканских и международных конференциях в Украине и вне Украины: VII Международный конгресс высшего образования (Гавана, Куба, 2010); XI Международная научная конференция UNITECH'11 (Габрово, Болгария, 2011); Международная научно-техническая конференция «Динамика механических и биотехнических систем в механике, энергетике и экономике» (Севастополь, 2011); XII Международная научно-механическая конференция АСПГП «Промышленная гидравлика и пневматика» (Донецк, 2011); Международная научная конференция «Машины, технологии, материалы» МТМ'11 (София, 2011); XII Международная научная конференция UNITECH'12 (Габрово, Болгария, 2012); XVII Международная техническая конференция «Гидромеханика в инженерном деле» (Черкассы, Украина 2012); VI Международная научно-методическая конференция (остров Джерба, Тунис, 2012); XVI научная конференция ТНТУ им. И. Пулюя (Тернополь, 2012); Международная научная конференция «Машины, технологии, материалы» МТМ'12 (София, Болгария, 2012); XIII Международная научно-техническая конференция АС ПГП «Промышленная гидравлика и пневматика» (Чернигов, 2012); XIII Международная научная конференция UNITECH'13 (Габрово, Болгария, 2013); VIII Международная научно-техническая конференция «Техника и технология сборки» (ТТСМ-2014) (Жешув-Berezka, Польша, 2014); III Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів» (ТК-2014) (Луцьк, 2014); VI Конференція, посвячена 47-й годовщине создания факультета

инженерии, Университета Авгуштиньо Нетто, 07 – 11 сентября 2013 года. – Инженерный факультет Университета Нетто. – Анголе 2013г.; IV Международная выставка образования – Место проведения – Помещения FILDA / 07-10 ноября 2013 – Ангола 2013 г.; XIV Международная научно-техническая конференция UNITECH'14 (Габрово, Болгария, 2014); III Международная научная конференция «Инженерная, технологии, образование, безопасность» (Большой Тырново, Болгария, 2015); V Международная научная конференция «Комплексное обеспечение качества технологических процессов и систем» (Чернигов, 2015).

Диссертация в полном объеме докладывалась и получила положительную поддержку на научном семинаре кафедры «Конструирование станков и машин НТУУ «КПИ», Киев, 3 сентября 2014 г.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 54 научных работах, среди них 3 монографии, 20 статей в фаховых изданиях, 13 патентов Украины на изобретения, полезные модели, промышленный образец.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из вступления, семи разделов, общих выводов, перечня ссылок из 340 наименований и приложений. Основной текст изложен на 368 страницах машинописного текста, полный текст составляет 411 страниц и содержит \_\_\_рисунков, \_\_\_таблиц.

## РАЗДЕЛ 1

### **Проблема развития теории проектирования зажимных механизмов с использованием системно-морфологического подхода**

#### **1.1. Современные методы поиска технических решений и основные положения системно-морфологического подхода**

Научный анализ творческого процесса, новых достижений в методологии творчества и потребность обновления развивающегося мира свидетельствует о том, что систему творческих (креативных) знаний в настоящее время пополняют технологии активизации творческой деятельности и развития при этом творческой личности. Появилась новая перспективная интеграционная область знаний – креатология (от лат. creation – создание, творчество), в развитии которой заметных успехов достигла днепропетровская школа проф. Пигорова Г.С. [203].

Вся производственная, научная и творческая деятельность людей нацелена на удовлетворение потребностей в обществе (технических, экономических, социальных, духовных, эргономических и др.) при решении различных проблем за счет активизации творчества и изобретения новой техники и новых технологий [95, 101, 122, 124, 203, 209-211]. Причем изобретать надо не то, что хочется, а то, что нужно обществу на сегодняшний день. В истории познания творчества человека можно выделить несколько важных уроков, послуживших истоками в формирование и развитии креатологии в трех направлениях: мировоззренческом, теоретическом, технологическом (табл. 1.1) [203].

Для решения вышеуказанных проблем и удовлетворения потребностей общества возникают новые цели активизации творчества: активизация творческого поиска (за счет освоения и применения новых знаний и методов творчества); развитие творческой личности; развитие творческого коллектива.

Общество уже перешло от мировоззренческого через теоретическое к технологическому направлению, где характер потребностей в творчестве и его результате меняется: на смену экономике вещей приходит экономика знаний (инновационная экономика).

Таблица 1.1

*Направление и уроки развития знаний и творчества*

| п/п | Направления и развития знаний творчества | Уроки истории развития знаний творчества                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Мировоззренческое, с VI века до н.э.     | <p>1. Хотя творчество включено в познание, исследовать его желательно самостоятельно, специально.</p> <p>2. Знания творчества (т.е. о творчестве и для творчества) это не просто информация, а интеллектуально обогащенный ее концентрат, являющийся инструментом сильного положительного воздействия на творческий поиск и на развитие личности.</p> |
| 2   | Теоретическое, с XVI века                | <p>3. Исследования творчества, как многофакторного явления, должны проводится интегративно, на стыке целого ряда изучающих его наук</p>                                                                                                                                                                                                               |
| 3   | Технологическое, с 30-х годов XX века    | <p>4. Творческий поиск становится (с помощью современных методов и технологий творчества) более управляемый, а поэтому и намного более эффективным.</p> <p>5. Необходимы формирование, освоение и применение системы знаний творчества как составляющей ядро современной креатологии</p>                                                              |

Важнейшее требование к процессу творчества: усиление (больше творческих прорывных разработок); ускорение (сокращение времени создания и освоения);

удешевление (снижение совокупных затрат на проектирование, изготовление, обслуживание).

Сдерживающим фактором является репродуктивная форма передачи и использования знаний, при которой накопление знаний происходит при сужении кругозора. Преодолеть этот отрицательный фактор, расширяя кругозор, можно за счет обучения методологии творчества (современные методы поиска новых решений), креативное обучение и постоянного разностороннего самообразования, переквалификации и повышения квалификации [124].

К сожалению, большинство ученых и специалистов, призванных создавать новую технику, не могут отказаться от репродуктивного мышления, считая, что только классические фундаментальные и специальные знания способны развивать творческую мысль, но как показывает практика, этого не происходит. Они не понимают принципиальной разницы между четко определенными классическими инженерными задачами и творческими, которые несравнимо сложнее: как правило отсутствует постановка задачи; не указан метод решения; отсутствуют примеры для заимствования, результат не известен даже компетентному специалисту с большим опытом и др.

Перед инженером всегда возникают задачи и вопросы, связанные с поиском (изобретением) новых, более эффективных конструкторско-технологических решений и в первую очередь таких, которые превышают мировой уровень. Такие инженерные задачи возникают при разработке новых машин, приборов, технологического оборудования и технологий, при выполнении плановых работ по реконструкции и модернизации.

Решение проблемы интенсивного развития экономики выдвинуло большое количество дополнительных инженерных задач, связанных с экономией трудовых ресурсов, сырья, материалов, энергии, а также с повышением производительности, качества и технического уровня изделий, сокращения ручного малоквалифицированного и монотонного труда, и тому подобное.

Это требует обязательного овладения креативным подходом на основании использования современных методов инженерного творчества, специально подготовленной информации и вычислительной техники.

В настоящее время в инженерной практике разработаны много (больше 100) методов активизации творчества, которые можно условно разделить на две группы [2, 6, 209-211]: **Эвристические** методы технического творчества, с помощью которых решают задачи технического творчества без использования ЭВМ вместо традиционного метода «проб и ошибок»; **Компьютерные** методы поискового конструирования, построенные на использовании ЭВМ.

Возможна другая классификация методов [92, 93, 95, 98], согласно которой их можно разделить на четыре группы: **Системные** (комбинаторные или гибридные), которые направлены на последовательный перебор всех возможных вариантов решения и построены на принципах анализа построения и особенностей ТС (объекта); **Ассоциативные** (психологическая активизация творчества), которые предусматривают активизации генерирования идей путем психологического преодоления инерции мышления и представляют бессистемный поиск решения задач; **Программные** (алгоритмические), которые обеспечивают более или менее целеустремленное движение к решению задания путем выявления технических и физических противоречий в известных ТС (объектах) и их последующее преодоление; **Комбинированные и специализированные** как объединение (или сочетание) первых трех групп методов.

Первые две группы принадлежат к эвристическим методам, третья группа относится с одной стороны к эвристическим, если не используется ЭВМ (например, АРИЗ-алгоритм решения изобретательских заданий), а с другой – к компьютерным (например, ОЭМ – обобщенный эвристический метод).

В инженерно-конструкторской деятельности согласно фреймовой модели последовательно решаются задачи трех типов: I – выбор и поиск наиболее эффективного физического принципа действия (ФПД); II – выбор и поиск наиболее

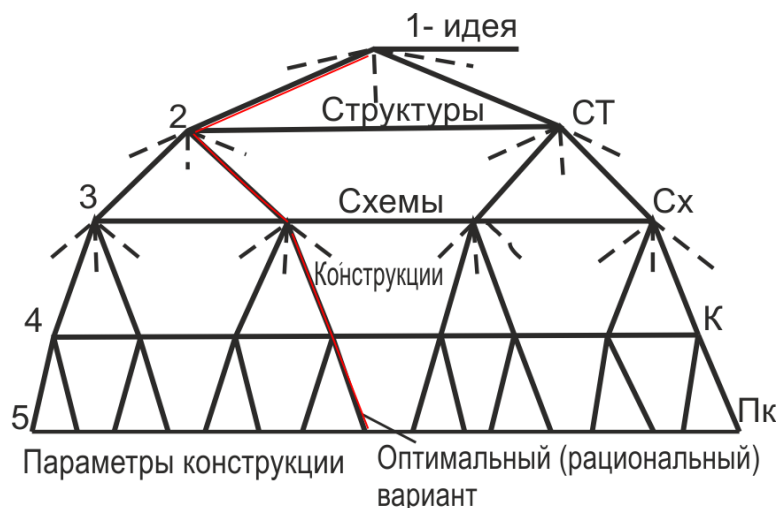
рационального технического решения (ТР) при определенном (заданном) физическом принципе действия; III – определение оптимальных значений параметров заданного технического решения. Другими словами, мы имеем цепь задач:  $\Phi П Д \rightarrow Т Р \rightarrow opt Т Р$  [2, 9, 34, 46, 59, 95, 98, 164, 165, 174, 199, 209, 233].

Задачи I и II типа не имеют точных математических решений и требуют применения эвристических методов, методов поискового конструирования, которые составляют последовательность шагов, процедур и приемов переработки большого объема информации и не всегда дают наилучшие решения. Только для задач III типа (а в последнее время и II типа) используют математические методы оптимизации, которые дают точное решение и применяют ЭВМ с большим эффектом. Инженер (конструктор или технолог) должен быть не столько специалистом, который перебирает известные варианты, сколько исследователем и изобретателем новых решений, творцом и создателем новых идей.

Процесс оптимального проектирования ТС, как и прогнозирования, является многовариантным (многоуровневым, многоциклическим, многокритериальным, многоэкстремальным в многосвязной области [2, 28, 95, 98] ТС будет оптимальной, если для ее реализации выбрана оптимальная (или, по крайней мере, рациональная) техническая идея. Любая техническая задача имеет множество (дерево) конкретных решений (вершин) (рис. 1.1).

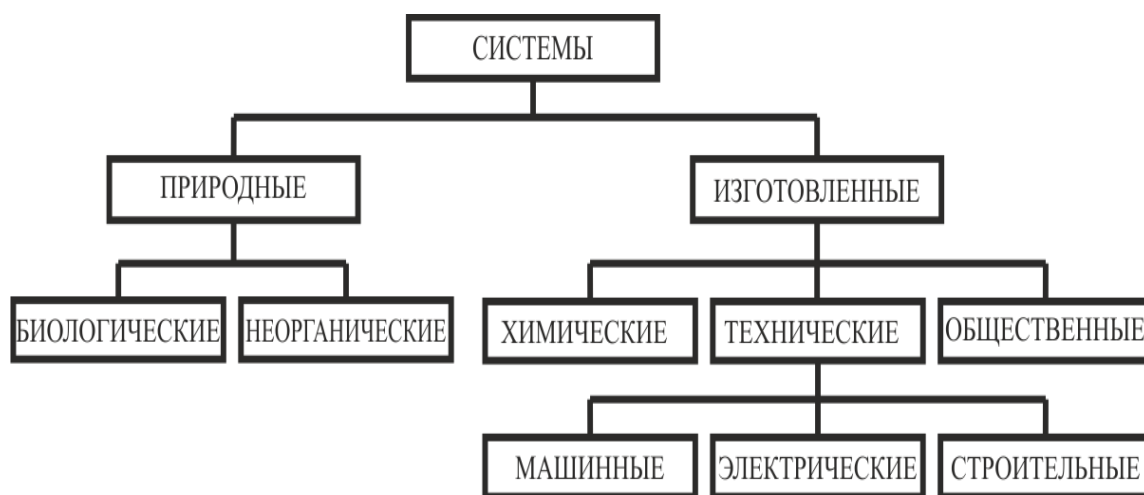
При создании новых ТС во второй половине XX столетия все менее надежным, непроизводительным методом мышления и поиска новых решений является метод проб и ошибок, который вступил в противоречие с научно-технической революцией. Поэтому в XXI столетии нужны новые методологические подходы и научная организация умственного труда.

**Поиск идей** – наиболее высокий уровень творческой деятельности человека и пока еще неформализованный, связанный в основном с интуицией человека.



*Рис. 1.1. Дерево решений при создании ТС от идеи до конструкции (жирным выделена ветвь оптимального решения)*

Перед рассмотрением наиболее распространенных системных методов введем основные понятия, касающиеся системы и системного подхода. В переводе с греческого (system) система – целое, составленное из частей. Поэтому под системой понимают множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом. Все системы можно разделить на классы по принципу происхождения (рис. 1.2) [75, 98, 273, 278].



*Рис. 1.2. Разделение систем по их происхождению*

При этом отдельные элементы этой структуры определяются на основании общепринятой классификации отраслей знания (например, классы технических систем (ТС) отвечают известным отраслям техники – машиностроение,



электротехника, строительство и т.д.). Но такой подход к классификации не дает полного определения даже к ТС, потому что в последнее время существуют разные гибридные системы (например, биотехнические, к которым принадлежат человеко-машинные сложные системы).

Объективное содержание системы связано с тем, что система владеет, как правило, функциональной или пространственной замкнутостью. Можно провести некоторую границу, с одной стороны которой находится система, а с другой – внешняя среда. Поэтому под системой можно понимать совокупность взаимосвязанных объектов, которую выделяют из внешнего мира за функциональными (отрасль промышленности, система социального обеспечения, автоматизированная система управления технологическим процессом, кровеносная система, система планирования народного хозяйства и тому подобное) или пространственными (солнечная система, живой организм, промышленное предприятие, криминальный кодекс и тому подобное) признаками.

Система – это совокупность, которая создана (и упорядоченная за определенными правилами) из конечного множества элементов. При этом между элементами системы существуют определенные связи. Возможны также системы, имеющие изолированные элементы (или группы элементов), которые не имеют связи с другими элементами системы.

Элемент и система являются относительными понятиями с точки зрения системного подхода.

Для ТС характерны ряд признаков:

1. Происхождение (создается Человеком из различного вида оборудования и сырья).
2. Иерархичность (например, для станка-автомата, как ТС автоматическая линия является надсистемой I порядка, автоматический цех – надсистемой II порядка, а завод-автомат – надсистема III порядка. Подсистемами I порядка для станка-автомата будут механизмы главного движения, подачи, автоматического изменения инструмента и тому подобное. Подсистемами II порядка, например, для механизма

главного движения есть шпиндельный узел, коробка скоростей, электродвигатель). 3. Целостность (невозможность сводить сложное к простому, целое к частям, наличие в целом объекте таких свойств и качеств, которые не могут присутствовать в его частях). 4. Связи между элементами. 5. Наличие интегрированных качеств (например, простая совокупность деталей станка, не объединённых должным образом, свойств станка не имеет). 6. Система является полуавтоматической (часть функций выполняется автоматом, ЭВМ, а часть пусть даже малая – Человеком (например, подготовка задания для автоматической работы системы)).

Сущность системного подхода по данным С. А. Саркисяна [245] заключается в том, что некоторая область материального мира разделяется на две части, одна из которых рассматривается как система, а вторая как окружающая среда. Без связей со средой ТС мертва, например, станок не может выдавать обработанные детали, если на него не поступают заготовки и энергия.

Все связи ТС со средой принято разделять на входные переменные  $X$ , управляющие воздействия  $U(t)$ , возмущающие воздействия  $\Omega(t)$  и выходные переменные  $Y(t)$  (рис. 1.3). Кроме того, сама ТС характеризуется совокупностью параметров состояния  $Z(t)$ .

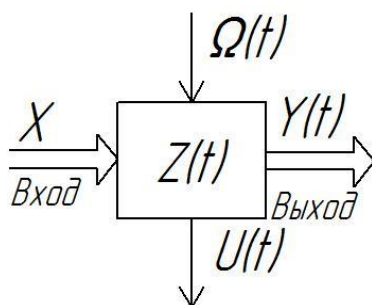


Рис. 1.3. Графическое представление ТС

К **системным** относятся методы: морфологического анализа (наиболее распространенный в практике решение задач для различных систем и не только ТС); “матриц открытий”; организующих понятий; ступенчатого подхода к решению задач; функционально изобретательства; десятичных матриц и др. [2, 3, 23, 27, 69, 76-79, 95-98, 151, 164, 165, 182-184, 204-206, 209-211, 214, 246, 266, 309-313, 316, 317].

К **ассоциативным** методам относятся методы контрольных вопросов (Великобритания, Т. Ейлор – 1969 г., США, Д. Пойа - 1945 г); сведений характерных признаков (США, Г. Кроуфорд – 1954 г); конференций идей (Германия, В. Гильде и др. – 1970 г); фокальных объектов (США, Ч. Вайтинг – 1958 г.); гирлянд случайностей и ассоциаций (СССР, Г. Буш – 1972 г); мозгового штурма (США, А. Осборн – 1957 г); синектики (США, В. Гордон – 1944 г.) и другие. Все эти методы направлены на преодоление психологических барьеров [6, 13, 30-32, 80, 95, 170, 209, 213, 246, 276, 288], связанных с наличием вектора инерции мышления. Это способствует психологической активизации творчества, хотя разработали их не психологи.

Цель методов активизации поиска состоит в том, чтобы: 1 - сделать процесс генерирования идей интенсивнее; 2 - повысить концентрацию оригинальных идей в общем их потоке. Главное достоинство методов активизации поиска – простота, доступность и универсальность, Принципиальный недостаток методов – непригодность при решении достаточно трудных задач.

**Алгоритмические методы** – это методы программного решения технических задач в определенной последовательности. Приоритет разработки программных методов принадлежит СССР, где разработаны алгоритм решения изобретательских задач (АРИЗ) [8-10] и обобщенный эвристический метод (ОЭМ) [2, 209, 211]. Такие методы основаны на основных положениях теории решения изобретательских задач (ТРИЗ). В свою очередь ТРИЗ является составной частью эвристики и основана на исследовании законов развития ТС. В эвристике на ее современном уровне некоторые термины несколько отличаются от принятых в других науках.

**Алгоритм** – это система приемов и методов, направленных на решение поставленной задачи, регламентирующая последовательность их применения. В узком смысле слова алгоритм – это точное однозначное предписание решения данной задачи (алгоритм – это латинская форма имени арабского ученого Альхорезми). Действуй по Альхорезму, откуда и название). Понятие алгоритма в ТРИЗе несколько шире математического понятия, поскольку допускает

перестановки и изменения в форме предписания. Итак, под алгоритмом понимают комплекс действий (шагов, этапов), последовательно выполняемых и направленных на решение изобретательской задачи (не сугубо в математическом, а в более широком понимании).

**Прием** – одинарная элементарная операция. Прием в действиях отдельного человека понимается как некоторое предписание решающему задачу, например, «используй аналогично». Прием может относиться к рассматриваемой задаче, например «дробление системы», «объединение систем в одну» и т.д.

**Метод** – система операций, предусматривающая определенный порядок их применения. Например, метод фокальных объектов (МФО) предусматривает ряд операций по составлению семантических понятий и их использованию для генерирования новых идей решения. Метод обычно основан на каком-то одном принципе.

**Теория** – система многих методов и приемов, предусматривающая целенаправленное управление процессом решения задач на основе законов развития объективной деятельности.

К **комбинированным** методам относятся функционально-стоимостной анализ (ФСА) [12, 95, 98], вепольный анализ [8], фонды эвристических приемов, физических эффектов, технических решений [6, 233, 240], которые являются дополнительной информацией к системным методам, расширяющей области альтернативных реализаций различных морфологических и других признаков. Наибольший интерес применительно к ЗМ представляет специализированный метод, разработанный проф. Кузнецовым Ю.Н. в НТУУ «КПИ» и получивший название – дифференциально-морфологический метод синтеза зажимных патронов [96, 98, 111] (см.п.1.4).

Рассмотрим основные положения системно-морфологического подхода. Он базируется преимущественно на комбинаторном принципе и классификации. Он относится к наиболее распространенным методам поиска новых решений. Термин «морфология» (учение о форме: греч. *morph* – форма и *logos*- учение) ввел в 1796 г. Гете – основоположник учения о форме и строении растений и животных – морфологии организмов. Это не единственный случай, когда словотворчество поэта

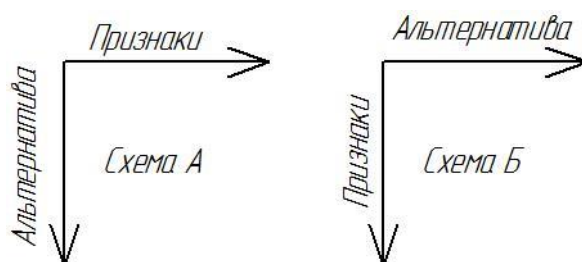
получало широкое признание и распространение во многих науках: в последующем появились морфология человека, морфология земли и тому подобное.

Для решения технических задач морфологический анализ впервые был использован швейцарским астрономом Ф. Цвикки, который в 1942 г. был привлечен американской фирмой «Аэроджент инжиниринг корпорейшен» к участию в ракетных исследованиях и построил морфологическую таблицу (ящик) для ракетных двигателей, которые работают на химическом топливе. Эта таблица содержала 576 важных вариантов, среди которых были схемы секретных тогда немецких самолетов-снарядов ФАУ-1 и ракет ФАУ-2, а в 1951 г. он составил морфологическую таблицу, которая содержала уже 36884 типов реактивных двигателей [316, 317].

Под морфологическим анализом в широком смысле этого термина понимается построение многоаспектного описания множества возможных решений задач [182, 183]. Многоаспектное описание ТС есть построение множества ее моделей, каждая из которых отображает либо одну из сторон ее функционирования, либо взаимодействие этой системы с ее средой, этап ее жизненного цикла.

Введем некоторые определения для использования их в данной диссертации: морфологическая модель или морфологическое множество (ММ); морфологическая таблица (МТ) или морфологический ящик; морфологическая матрица (ММц); морфологическая формула (МФ).

**Морфологическая модель (ММ)** – это описание множества возможных решений создаваемого объекта с его основными (функциональными) признаками и альтернативами (вариантами) их реализации, которое может быть представлено в виде морфологической таблицы или матрицы.



**Морфологическая таблица (МТ)** – это представление морфологической модели в виде таблицы с конкретным словесными описаниями функциональных признаков и вариантов (альтернатив) их реализации (табл. 1.2)

Таблица 1.2

Образец морфологической таблицы

| Признак 1<br>$\Phi_1$ | Признак 2<br>$\Phi_2$ | ... | Признак n<br>$\Phi_n$ |
|-----------------------|-----------------------|-----|-----------------------|
| 1.1. -----            | 2.1. ----             | ... | n.1. -----            |
| 1.2. -----            | 2.2. ----             | ... | n.2. -----            |
| .                     | .                     | .   | .                     |
| .                     | .                     | .   | .                     |
| .                     | .                     | .   | .                     |
| 1. m                  | 2.m                   |     | n.m. -----            |

МТ – это классификационная таблица, каждая строка которой представляет собой классификацию множества решений исследуемых по какому-либо существенному признаку. МТ существенно избыточны.

На этапе морфологического синтеза надо из огромного числа технических решений (ТР), содержащихся в МТ, отобрать лучшие с точки зрения условий задачи, а значит, решить оптимизационную задачу в ее общей постановке [182]. Ф. Цвикки разработал только морфологический анализ [316, 317]. Еще в 1973г. В. М. Глушков указывал, что с ростом возможностей ЭВМ будут неукоснительно расти возможности морфологического метода [48] и в основном в диалоговом режиме.

**Морфологическая матрица (ММц)** – это представление морфологической модели в виде множества функциональных признаков и альтернатив (вариантов) их реализации, выражаемых буквенным, цифровым или буквенно-цифровым обозначением.

Цифровое

$$\begin{bmatrix} 1.1 & 2.1 & . & . & . & n.1 \\ 1.2 & 2.2 & . & . & . & n.2 \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ 1.m & 2.m & . & . & . & n.m \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Буквенное

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & . & . & . & a_{n1} \\ a_{12} & a_{22} & . & . & . & a_{n2} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ a_{1m} & a_{2m} & . & . & . & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

**Морфологическая формула (МФ)** – вариант решения морфологической модели, представленный как результат синтеза виде сочетания отдельных альтернатив признаков, записанной в цифровом или буквенном виде.

$$\text{Например, МФ} = 1.1 - 2.2 - \dots - n.m \quad (1.3)$$

$$\text{или МФ} = a_{11} - a_{22} - \dots - a_{nm} \quad (1.4)$$

Пользуясь знаками алгебры логики морфологические формулы (1.3) и (1.4) множество записать:

$$\text{МФ} = 1.1 \wedge 2.2 \wedge \dots \wedge n.m \quad (1.5)$$

$$\text{или МФ} = a_{11} \wedge a_{22} \wedge \dots \wedge a_{nm} \quad (1.6)$$

Метод морфологического анализа направлен на последовательный перебор всех возможных вариантов решения и является ярким примером системного подхода к решению творческих задач.

**Цель метода** – системно исследовать все возможные варианты решения задач, которые вытекают из закономерностей структуры (морфологии) совершенствуемой ТС, и тем самым учесть, кроме известных, необычные варианты, которые при простом переборе могли быть опущены. **Идея метода** – отойти в зону, далекую от того, которая лежит на виду. **Суть метода** – в совершенствуемой ТС выделяют несколько характерных для нее структурных и морфологических признаков, для каждого из которых составляют максимально полный перечень конкретных вариантов (альтернатив) технического выражения использования этих признаков. Таким образом, каждый признак может характеризовать какой-то конструктивный узел (элемент структуры) ТС, какую-то функцию (или связь между элементами), какой-то режим работы (или состояние) ТС, какую-то форму взаимодействия элементов, то есть параметров характеристики ТС, от которых зависит решение проблемы и достижение основной цели.

**Преимущество метода** – его многовариантность. Поскольку метод основан на использовании морфологии объектов, он позволяет образовать пространство (область) изменений объекта (морфологический ящик) и систематически его

анализировать. При этом в отличие от простого перебора исключается пропуск каких либо вариантов, что позволяет преодолеть инерцию мышления специалистов, найти оригинальные решения на необъятном, в понимании полного перебора, множестве.

К недостаткам метода относится то, что наряду с реально возможными комбинациями вариантов характеристик (или признаков) морфологическая матрица имеет большое количество несовместимых. Пока еще не разработан аппарат выбора допустимых решений из большого количества возможных вариантов. В настоящее время для решения этой задачи пытаются использовать ЭВМ. Когда будет найден действительно практичный и универсальный метод оценки эффективности применения того или другого варианта, можно будет, исходя только из теоретических соображений, избирать оптимальную комбинацию элементов для каждой проектируемой ТС. В этом случае, процесс изобретательства, в сущности, будет заменен непосредственно анализом альтернативных вариантов.

Чаще всего оказывается, что рабочие характеристики ТС, в основу построения которых положена не известная ранее комбинация элементов (признаков), в большей или меньшей мере являются неопределенными.

**Наиболее целесообразная область использования метода** – решение конструкторских и технологических задач общего плана (проектирование машин, их узлов, механизмов, технологической оснастки, инструментов, поиск технологических принципов, компоновок, схем, способов формообразования).

Метод можно использовать при прогнозировании развития ТС, и определении возможности патентования в том или другом абстрактном виде комбинаций основных параметров с целью "заблокировать" возможные будущие изобретения.

Выделяют **пять последовательных этапов морфологического анализа** [182, 232, 233]: 1) точная формулировка задачи (проблемы), которая отражает основное требование к объекту; 2) декомпозиция объекта на функциональные элементы с составлением списка всех морфологических признаков и требований к ним, то есть



всех важных характеристик объекта; 3) построение морфологической модели, рассмотрение всех элементов и выбор для каждого полного набора различных вариантов реализации, то есть составление всех возможных вариантов по каждой характеристике; 4) анализ функциональной ценности решений, которые возникают из матрицы, то есть синтез вариантов объекта; 5) выбор наиболее рациональных вариантов конкретных решений, то есть выбор лучших сочетаний на основе заданного критерия.

При синтезе на этапе 4 количество вариантов может определяться астрономическими числами, потому что каждая из "n" характеристик имеет  $K_i$  разных вариантов (альтернатив). Совокупность вариантов морфологической модели позволяет определить полное количество решений:

$$N = \prod_{i=1}^n K_i. \quad (1.7)$$

Если каждая из "n" характеристик имеет одинаковое количество альтернатив ( $K_1 = K_2 = K = \text{const}$ ), то полное количество решений

$$N = K^n. \quad (1.8)$$

С учетом большого количества вариантов бессистемный их перебор неблагоприятен. При выполнении четвертого этапа следует руководствоваться перечнем технических требований, которые есть в техническом задании и откорректированы с учетом уточнения формулировки задачи. Поскольку при синтезе приходится оперировать несколькими характеристиками с большим числом вариантов (10 и больше), однозначных правил выбора нет, чаще – это интуитивный выбор.

На пятом этапе выбирают не более 2-3 вариантов наилучших решений для детальной конструктивной проработки.

Можно рекомендовать такой порядок выбора лучших решений: 1) осуществить ранжировку требований по их значимости; 2) осуществить ранжировку вариантов решений с учетом числа предъявляемых требований и их значимости; 3)

использовать экспертные оценки или другой метод неформальных процедур, выбрать 2-3 наиболее благоприятных варианта. Существует много методов принятия решений [22, 38, 44, 49, 60, 64, 79, 147, 153, 154, 169, 173, 207, 208, 222, 245].

Одним из эффективных субъективных методов качественной оценки вариантов является метод ранжирования по приоритету, который служит для многокритериального, качественного анализа на основании экспертизы вариантов построения объектов (метод парных сравнений) [12, 26]. Эти методы будут использованы в данной диссертации.

## **1.2 Основные требования к зажимным механизмам**

В автоматизированных металлорежущих станках ЗМ оказывают значительное влияние на точность и производительность обработки деталей, определяют режимы и качество обработки, возможность сокращения припусков на последующие операции и уменьшения количества операций. Быстродействие зажимных механизмов позволяет сократить вспомогательное время на установку, закрепление заготовок и съем обработанных деталей, установку и закрепление и режущих инструментов в автоматическом цикле работы [111].

Таким образом, принцип надежного зажима можно сформулировать следующим образом: для того, чтобы надежно и быстро зажать (закрепить) объект, необходимо в течение минимального или заданного времени приложить определенные силы со стороны одних поверхностей (зажимающих) к другим поверхностям (зажимаемым) так, чтобы с помощью опорных, фиксирующих и стопорных элементов неподвижно и точно зафиксировать объект или создать силы сцепления (трения) между ними, исключая их относительное смещение, вибрации под действием собственного веса и внешних сил (резания, центробежных) и предотвращающие деформации, искажения формы и качества поверхности объекта закрепления.

Трудно создать эффективный ЗМ, удовлетворяющий требованиям обеспечения высокой точности и получения больших усилий закрепления, поэтому

проектирование ЗМ должно базироваться на глубоком анализе и точном расчете параметров процесса закрепления при взаимодействии основных зажимных элементов с объектом закрепления.

Основные требования, предъявляемые к ЗМ при зажиме-разжиме (I состояние) и резании (II состояние) и объясняющие большое многообразие конструкций, показаны в виде структурной схемы на рис. 1.4 [107, 109, 111]. Кроме основных, к ЗМ предъявляются также дополнительные и специальные требования: быстрая сменность и переналаживаемость, легкость регулировки, ширина диапазона, защищенность, ремонтпригодность, возможность автоматической

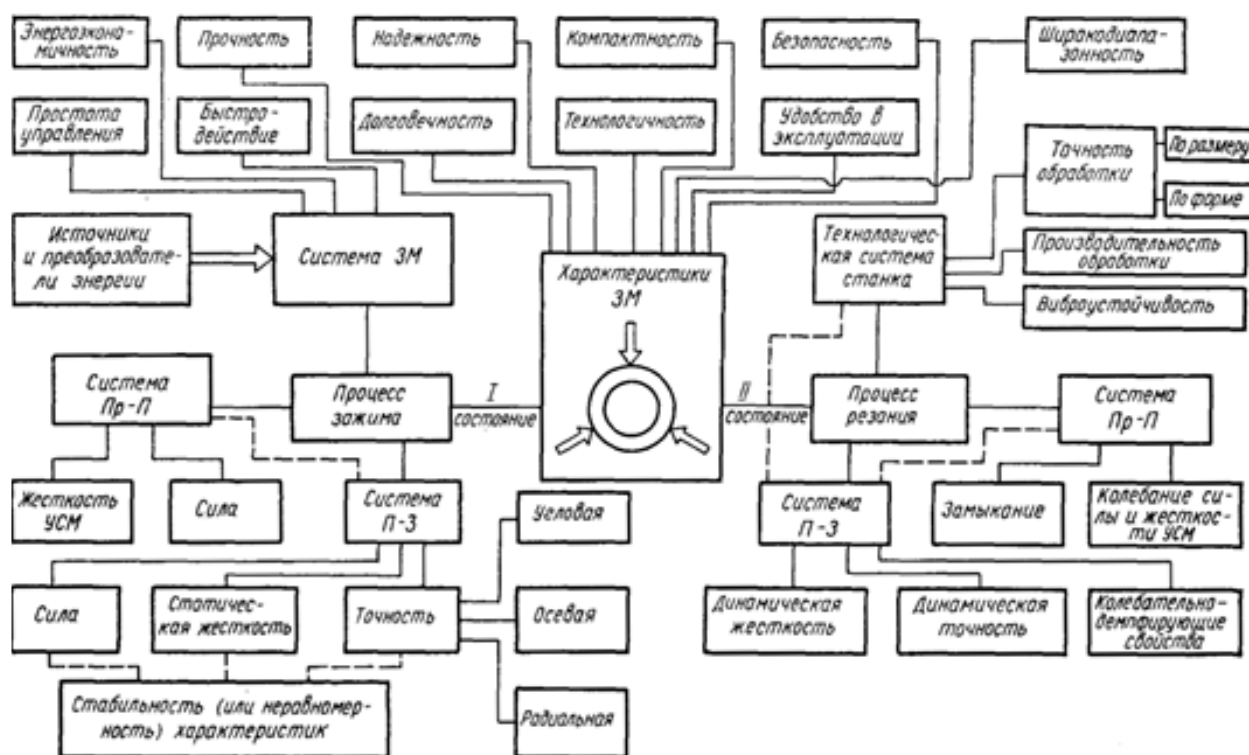


Рис. 1.4. Структура требований к ЗМ

регулировки параметров зажима или дистанционного управления, бесшумность, безопасность работы и др. Таким образом, основные и дополнительные требования к ЗМ вытекают из требований, предъявляемых к станку, технологическому процессу и определяющих точность и производительность обработки при высоком качестве выпускаемой продукции. Рассмотрим более подробно некоторые требования.

Создаваемая в процессе резания сила действует одинаково на инструмент и заготовку. Основную проблему составляет закрепление заготовки из-за частой ее сменяемости, так как инструмент сменяется только после износа и при действии сил резания дополнительно прижимается к поверхности базирования и закрепления. Заготовка в основном удерживается в ЗМ за счет сил трения и сцепления, которые изменяются в широком диапазоне. Силы зажима заготовки и инструмента должны обеспечивать жесткость контакта сопряженных поверхностей, предотвращать их смещение под действием сил в процессе обработки, возникновение вибраций и недопустимые деформации элементов системы. Сила зажима должна создать предварительный натяг системы, превышающий действие других сил (резание, инерция), и при этом находиться в определенных пределах. Она не может быть меньше силы, обеспечивающей производительную и точную обработку деталей, и не может быть чрезмерно большой и вызывающей недопустимые деформации обрабатываемых деталей и элементов станка, а также повышенный износ механизма.

Требуемые силы зажима определяют с учетом возможности отклонения от номинальных характеристик и размеров заготовок, затупления режущего инструмента и вызванного этим увеличения сил резания, разброса сил трения в зажимных элементах. Эти факторы учитывают выбором соответствующих исходных данных для расчета или выбором значения коэффициента запаса  $K_{зан}$ , на который умножают рассчитанные значения сил зажима. Коэффициент запаса  $K_{зан}$  в основном принимают равным 1,5...2; если силы резания отжимают заготовку от базирующих поверхностей, то  $K_{зан} \geq 2,5$ . Рекомендуется [186] принимать  $K_{зан}$  равным произведению коэффициентов, отражающих конкретные условия обработки. В соответствии с этим  $K_{зан}$  может изменяться от 1,5 до 8.

При обработке на станках заготовок, удерживаемых силами сцепления в зажимных элементах, составляющие сил резания могут вызывать прокручивание заготовки от крутящего момента резания, проскальзывание от осевых сил резания,

поворот относительно точки опоры от изгибающих моментов, а также смещения от сочетаний действия этих составляющих.

В станках с ЧПУ и станочных системах продолжительность операций, связанных с манипулированием заготовками и инструментами (загрузка – разгрузка, зажим – разжим, перекантование, смещение и т. д.), оказывает существенное влияние на общий баланс времени выполнения технологических операций. Поэтому продолжительность зажимных операций должна быть сведена до нескольких секунд или долей секунд. По быстродействию среди конструкций ЗМ следует отдать предпочтение вакуумным, пневматическим, магнитным и электромагнитным. Кроме использования быстродействующих приводов рабочего перемещения зажимных элементов, необходимо создавать такие ЗМ переменной структуры, рабочий ход зажима которых предельно мал и служит только для натяга системы, а зазор при переходе на другой размер обрабатываемой заготовки выбирается дополнительными кинематическими цепями с большой скоростью.

Усложнение технологических циклов, установка ЗМ в автоматизированные технологические системы и в дорогие металлорежущие станки накладывают на ЗМ жесткие требования по надежности, так как простой механизма приводит к неизбежному простое станка или целой технологической линии. Отказ ЗМ приводит к повреждению режущего инструмента или рабочего органа станка, к травмированию обслуживающего персонала, поэтому следует предъявлять повышенные требования к надежности и безопасности работы ЗМ, необходимости введения дополнительных предохранительных и блокирующих устройств, контролирующих падение силы зажима. Снижение режимов (скорости) резания или отключение станка необходимо начинать при уменьшении силы зажима до границ допустимой с разбросом 7...10 % от номинальной и завершать при падении силы до 50 % . Особенно это важно при обработке вращающихся с большой частотой заготовок, так как на них оказывают большое влияние центробежные силы. Поэтому при токарной обработке заготовок диаметрами 80...120 мм со скоростями резания

120 ... 170 м/мин допускается уменьшение силы зажима от действия центробежных сил неуравновешенных зажимных элементов до 12 ... 15 % и до 30 % при заклинивании подвижных элементов патрона.

Отказ или неисправность ЗМ следует рассматривать не только как аварию, но и как отклонение от нормативной заданной характеристики, оговоренной в стандартах. Для ЗМ, применяемых в станках с ЧПУ и ГПС, доминирующими требованиями становятся гибкость, быстрая переналаживаемость и широкодиапазонность. Применение ЗМ, удовлетворяющих этим требованиям, позволяет обрабатывать заготовки минимальными партиями в режиме «безлюдной технологии». Требования к ЗМ, и в частности, к ЗП, могут быть выражены количественно через соответствующие характеристики (табл. 1.3) [111].

Величина и разброс характеристик ЗП зависят от качества их изготовления и регулировки, поскольку они являются функцией отклонения от номинала размеров (линейных, угловых) и жесткости деталей, сил трения, качества сборки и т. д. На стабильность характеристик большое влияние оказывает отклонение диаметра  $d$  зажимаемой поверхности объекта закрепления:  $\Delta d = d_{\max} - d_{\min}$ .

Абсолютная величина любой характеристики – функции  $\Phi$  определяется ее средним значением  $\Phi_{cp}$  или математическим ожиданием  $\bar{\Phi}$ :

$$\Phi = \Phi_{cp} = 0,5(\Phi_{\max} + \Phi_{\min}); \quad \Phi = \bar{\Phi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_i, \quad (1.9)$$

где  $\Phi_{\max}$ ,  $\Phi_{\min}$  и  $\Phi_i$  – соответственно максимальное, минимальное и случайное абсолютные значения характеристики;  $n$  – число замеров случайных значений (объем выборки) характеристики.

Разброс характеристик определяют по абсолютной разности  $\Delta\Phi$  их предельных значений или дисперсии  $\sigma_{\Phi}^2$ :

$$\Delta\Phi = \Phi_{\max} - \Phi_{\min}; \quad \sigma_{\Phi}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \bar{\Phi})^2, \quad (1.10)$$

Относительный разброс характеристик определяют различными коэффициентами и показателями (табл.1.4). Например, суммарную радиальную силу зажима цилиндрической заготовки с отклонением диаметра  $\Delta d$  можно определить средним значением этой силы  $T_{\Sigma} = 0,5(T_{\Sigma \max} - T_{\Sigma \min})$ , показателем неустойчивости  $\varepsilon_T = \Delta T / \Delta d = (T_{\Sigma \max} - T_{\Sigma \min}) / (d_{\max} - d_{\min})$ , коэффициентами неравномерности  $\delta_T = \Delta T_{\Sigma} / T_{\Sigma}$  и стабильности  $K_T = T_{\Sigma \min} / T_{\Sigma \max}$  и т.д. При  $\Delta d = 0$ ,  $\varepsilon_T = 0$  неравенство  $\delta_T \neq 0$  характеризует влияние разброса случайных факторов (трения, жесткости детали и т. д.) на неравномерность радиальной силы.

При коэффициенте охвата  $K_0 < 0$  патрон с рабочим диапазоном диаметров  $\bar{\Delta d}$  не может закреплять заготовки в рабочем диапазоне диаметров станка  $\bar{\Delta D}$ . При  $K_0 = 0$  полностью используется рабочий диапазон диаметров станка и обеспечивается сила зажима в заданных пределах. При  $K_0 > 0$  имеется запас на износ и резерв на дополнительный охват диаметров заготовки. В последнем случае коэффициент  $K_0$  можно рассматривать как показатель запаса на износ рабочей

Таблица 1.3

*Характеристики ЗМ*

| Показатель                                                                                       | Обозначение      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b><i>Кинематические и размерные характеристики</i></b>                                          |                  |
| Радиальный ход зажимного элемента патрона, мм                                                    | $y_n$            |
| Передаточное отношение патрона                                                                   | $u_n$            |
| Рабочий диапазон диаметров заготовок, мм, зажимаемых (обрабатываемых) в конкретной модели станка | $\Delta \bar{D}$ |
| Рабочий диапазон диаметров патрона без переналадки, мм                                           | $\Delta \bar{d}$ |
| Максимальное отклонение диаметров зажимаемых заготовок без переналадки патрона, мм               | $\Delta d$       |
| <b><i>Силовые и энергетические характеристики патрона</i></b>                                    |                  |
| Радиальная сила на один зажимной элемент, Н                                                      | $T$              |
| Суммарная радиальная сила зажима, Н                                                              | $T_{\Sigma}$     |
| Момент сцепления, удерживающий заготовку от прокручивания, Н·м                                   | $M_{np}$         |
| Осевая сила сцепления, удерживающая заготовку от проскальзывания, Н                              | $P_{np}$         |
| Момент сцепления, удерживающий заготовку от вырыва, Н·м                                          | $M_{\epsilon}$   |
| Коэффициент усиления патрона                                                                     | $k_n$            |
| Коэффициент полезного действия патрона                                                           | $\eta_n$         |

Продолжение табл. 1.3

| Показатель                                                            | Обозначение    |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>Жесткостные характеристики</b>                                     |                |
| Патрон — деталь                                                       |                |
| Отжатие заготовки на вылете от силы, мм                               | $y_p$          |
| Осевое отжатие от силы, мм                                            | $x_o$          |
| Коэффициент заделки заготовки                                         | $\beta_j$      |
| Угол поворота оси заготовки относительно оси шпинделя от момента, рад | $v_u$          |
| Угол закручивания заготовки относительно шпинделя от момента, рад     | $v_k$          |
| Зона нечувствительности при двухстороннем нагружении заготовки, мм    | $z_o$          |
| Жесткость:                                                            |                |
| радиальная, Н/мм                                                      | $j_p$          |
| изгибная, Н·м/рад                                                     | $j_u$          |
| крутильная, Н·м/рад                                                   | $j_k$          |
| осевая, Н/мм                                                          | $j_o$          |
| Патрон                                                                |                |
| Жесткость:                                                            |                |
| радиальная, Н/мм                                                      | $C_p$          |
| поворотная, Н·м/рад                                                   | $C_n$          |
| осевая, Н/мм                                                          | $C_o$          |
| упругого элемента, Н/мм                                               | $C_{y.э}$      |
| <b>Точностные характеристики (погрешности зажима)</b>                 |                |
| <b>системы патрон - деталь</b>                                        |                |
| Радиальное биение на вылете, мкм                                      | $\Delta_p$     |
| Угол перекоса оправки, рад                                            | $v_o$          |
| Конусность зажима                                                     | $K$            |
| Радиальная деформация тонкостенной кольцевой заготовки от силы, мкм   | $\delta$       |
| Осевое смещение заготовки (прутка) при подаче (отскок), мкм           | $\Delta_{o,n}$ |
| Осевое смещение заготовки (прутка) при зажиме (оттягивание), мкм      | $\Delta_{o,з}$ |
| Суммарное осевое смещение заготовки, мкм                              | $\Delta_o$     |



Продолжение табл. 1.3

| Показатель                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Обозначение |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Разброс длин отрезанных из прутка деталей без вторичной подрезки торца, мкм                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $\Delta_l$  |
| Примечание. Условные обозначения: $\Delta \bar{D} = \bar{D}_{max} - \bar{D}_{min}$ ; $\bar{D}_{max}$ , $\bar{D}_{min}$ – максимальный и минимальный диаметры зажимаемых в конкретной модели станка заготовок; $\Delta \bar{d} = \bar{d}_{max} - \bar{d}_{min}$ ; $\bar{d}_{max}$ , $\bar{d}_{min}$ – максимальный и минимальный диаметры рабочего отверстия патрона; $T_z = zT$ ; $S_z = zS$ ; $z$ – число зажимных элементов ЗП. |             |

поверхности зажимных элементов ЗП при условии, что зажимаются заготовки одного номинального диаметра с соответствующими отклонениями. При  $K_0 \geq 0$  ЗП относят к широкодиапазонным, в противном случае (т. е. когда не обеспечивается охват заданного диапазона заготовок диапазоном диаметров патрона) – к узкодиапазонным.

Таблица 1.4

## Относительная оценка разброса характеристик ЗМ

| Наименование                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Обозначение        | Формула                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Показатель нестабильности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $\varepsilon_\Phi$ | $\Delta\Phi/\Delta d$                                           |
| Показатель дискретности (комплектности)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $K_K$              | $n/\bar{n} = (\lceil \Delta\bar{D} \rceil + 1) / \bar{n}$       |
| Коэффициент:<br>неравномерности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $\delta_\Phi$      | $\Delta\Phi/\Phi_{cp}$                                          |
| стабильности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | $K_\Phi$           | $\Phi_{min}/\Phi_{max}$                                         |
| разброса (перегрузки)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $\lambda_\Phi$     | $\Phi_{max}/\Phi_{min} = 1/K_\Phi$                              |
| охвата                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | $K_o$              | $\Delta\bar{d}/\Delta\bar{D}$                                   |
| широкодиапазонности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $\delta_d$         | $\Delta\bar{d}/d_{cp}$ или $\Delta\bar{d}/(\bar{d}_{cp} + d_0)$ |
| качества патрона по широкодиапазонности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $\varepsilon'_K$   | $\Delta_d/\delta_\Phi$                                          |
| Примечание. Условные обозначения: $\bar{d}_{cp}$ , $\bar{d}_o$ – средний и начальный диаметры рабочего отверстия патрона; $n = \lceil \Delta\bar{D} \rceil + 1$ – количество целочисленных номиналов диаметров заготовок, зажимаемых в рабочем диапазоне станка; $\bar{n}$ – количество целочисленных номиналов диаметров, охватываемых патроном без его переналадки или смены (при $\bar{n} < 1$ принимают $\bar{n} = \lceil \Delta\bar{d} \rceil$ ); $ \Delta\bar{D} $ , $ \Delta\bar{d} $ – безразмерные значения $\Delta\bar{D}$ и $\Delta\bar{d}$ ; $K_K$ округляют до ближайшего большего целого числа. |                    |                                                                 |

Силовые характеристики ЗП должны быть такими, чтобы противодействовать силам и моментам резания при обработке заготовки, вращающейся с частотой  $n(\omega)$  (рис.1.5,а). При обработке заготовок, удерживаемых за счет сцепления (силы  $T_{\mu_1}$ ,  $T_{\mu_2}$ ,  $T_{\mu_3}$ ) с зажимными элементами, составляющие сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ,  $P_{св}$  и момент  $M_{св}$  могут вызывать: прокручивание заготовки от крутящего момента резания  $M_p$ , проскальзывание от осевых сил резания  $P_o$ , поворот относительно точки опоры от изгибающих моментов  $M_u$ , а также смещение от различных сочетаний действия этих составляющих. Для вращающихся обрабатываемых заготовок сравнительно высокой жесткости основная характеристика – необходимая радиальная сила зажима  $T_{\Sigma}$ , определяется при соблюдении следующих условий: 1)  $M_{np} > M_p$ ; 2)  $P_{np} > P_p$ ; 3)  $M_{\epsilon} > M_u$ .

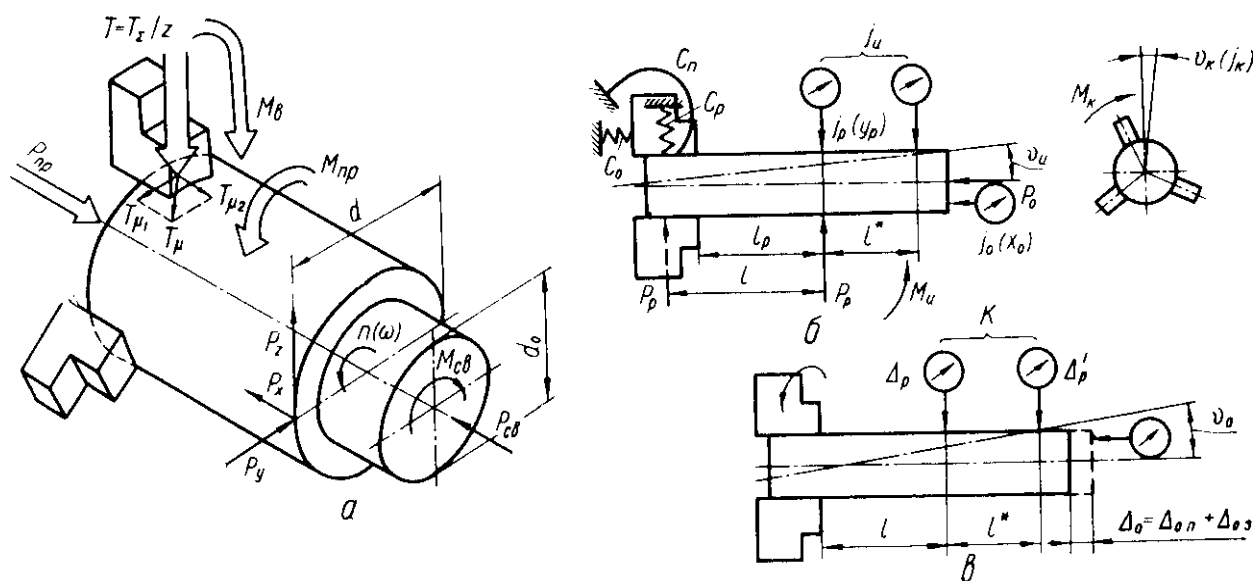


Рис. 1.5. К определению силовых (а), жесткостных (б) и точностных (в) характеристик зажимного патрона

При вращении заготовки или инструмента на неуравновешенные элементы зажимного патрона действует центробежная сила  $F_{\omega k} = m\omega^2 R_k$ , которая приводит к уменьшению радиальной силы зажима на величину  $\Delta T_{\omega} = T - T_{\omega}$  (рис.1.6).

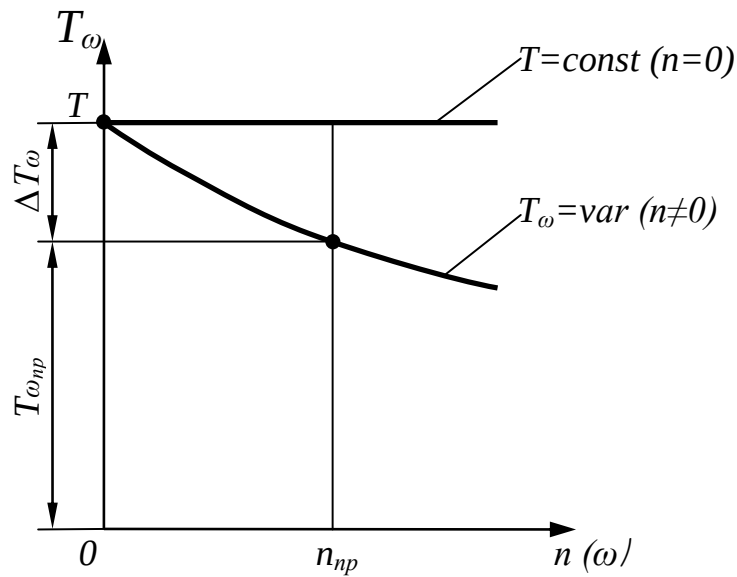


Рис. 1.6. График изменения радиальной силы зажима с учётом влияния центробежных сил

Поэтому одной из силовых характеристик ЗП, работающих на высоких частотах вращения, является предельная радиальная сила зажима  $T_{\omega_{np}}$  при максимально допустимой частоте вращения  $n_{np}$  ( $\omega_{np}$ ), которая по условиям эксплуатации с точки зрения техники безопасности должна быть не менее  $2/3 T$ .

Для сравнения разных конструкций ЗП в условиях высокоскоростной обработки предложено ввести дополнительный показатель —

коэффициент потери радиальной силы зажима  $T$  одним зажимным элементом при одинаковой частоте вращения шпиндельного узла (или суммарной силы зажима  $T_\Sigma = zT$  всеми  $z$  зажимными элементами):

$$K_{T_\omega} = \frac{T_\omega}{T} = \frac{T_{\Sigma\omega}}{T_\Sigma} = \frac{T - \Delta T_\omega}{T} = 1 - \frac{\Delta T_\omega}{T} = 1 - \lambda_{T_\omega}, \quad (1.11)$$

где  $\lambda_{T_\omega} = \Delta T_\omega / T = \Delta T_{\Sigma\omega} / T_\Sigma$  — показатель уровня падения выходной силовой характеристики.

При определенной частоте вращения ЗП полностью теряет работоспособность, когда  $T_{\Sigma\omega} = 0$ , а коэффициент потери становится тоже равным нулю ( $K_{T_\omega} = 0$ ), что соответствует показателю уровня падения  $\lambda_{T_\omega} = 1$ .

Для определения жесткостных характеристик  $j_p, j_u, j_o, j_k, C_p, C_n, C_o$  упругие отжатия оправки (рис. 1.5, б) измеряют индикаторами на определенных вылетах  $l_p$  нагружения силами  $P_p$  и  $P_o$ , соответствующими реальным условиям обработки, т. е. реальным значениям и плечам приложения сил резания. По величинам упругих отжатий  $y_p, v_u, x_o, v_k$  определяют жесткости:  $j_p = P_p / y_p$ ,  $j_u = M_u / v_u = P_p l_p / v_u$ ,  $j_o = P_o / x_o$ ,  $j_k = M_k / v_k$ . В этом случае место закрепления (или защемления) детали в продольном

сечении характеризуют коэффициентом заделки  $\beta_j$  (для консольного закрепления  $\beta_j = 3y_u/y$ , где  $y$  – отжатие детали и системе П - Д или другой системе).

*Точностные характеристики* ЗП определяют его способность сохранять положение детали после загрузки (подачи) и зажима. Эти характеристики оценивают погрешностями изготовления самого ЗП, погрешностями подачи и закрепления, которые определяют величинами нарушенного положения закрепленной детали (инструмента)  $\Delta_p$  на вылете  $l$ ,  $K=2v_o=2(\Delta_p-\Delta'_p)/l^*$ ,  $\Delta_{o.n}$ ,  $\Delta_{o.з}$ ,  $\Delta_o$ , (рис.1.5,в).

### 1.3. Анализ известных классификаций, схем и конструкций зажимных патронов

Анализ показал [109, 111], что независимо от назначения, схемы работы и конструктивного исполнения системы ЗМ имеют общие структурную и функциональную схемы (рис. 1.7), включающие источник и преобразователь энергии (ПЭ) в движущие силы (моменты), узел управления (УУ), привод (Пр) с передаточно-усилительными механизмами (ПУМ), упругим (УЗ) и регулировочным (РЗ) звеньями для переноса движущей силы  $S_s$  или момента  $M_{кр}$  и передачи на исполнительный механизм (патрон (П)), преобразующий движущую силу в зажимную  $T_s$ , непосредственно воздействующую на деталь или не сколько деталей. Патрон состоит из передаточно-усилительных звеньев (ПУЗ) и зажимных элементов (ЗЭ), расположенных в одном или нескольких местах. Передаточно-усилительный механизм можно назвать передаточно-преобразовательным (ППМ), так как он преобразует силы и перемещения (силы увеличивает, перемещения уменьшает). В любой системе ЗМ есть подсистемы, которые можно рассматривать как самостоятельные системы [4, 111]. К ним относятся подсистемы привод - патрон (Пр- П) и патрон - деталь (П - Д), каждая из которых может быть в свою очередь многозвенной и сложной.

С позиции системного подхода ЗМ как техническую систему можно представить на различных уровнях иерархии состоящим из подсистем различных

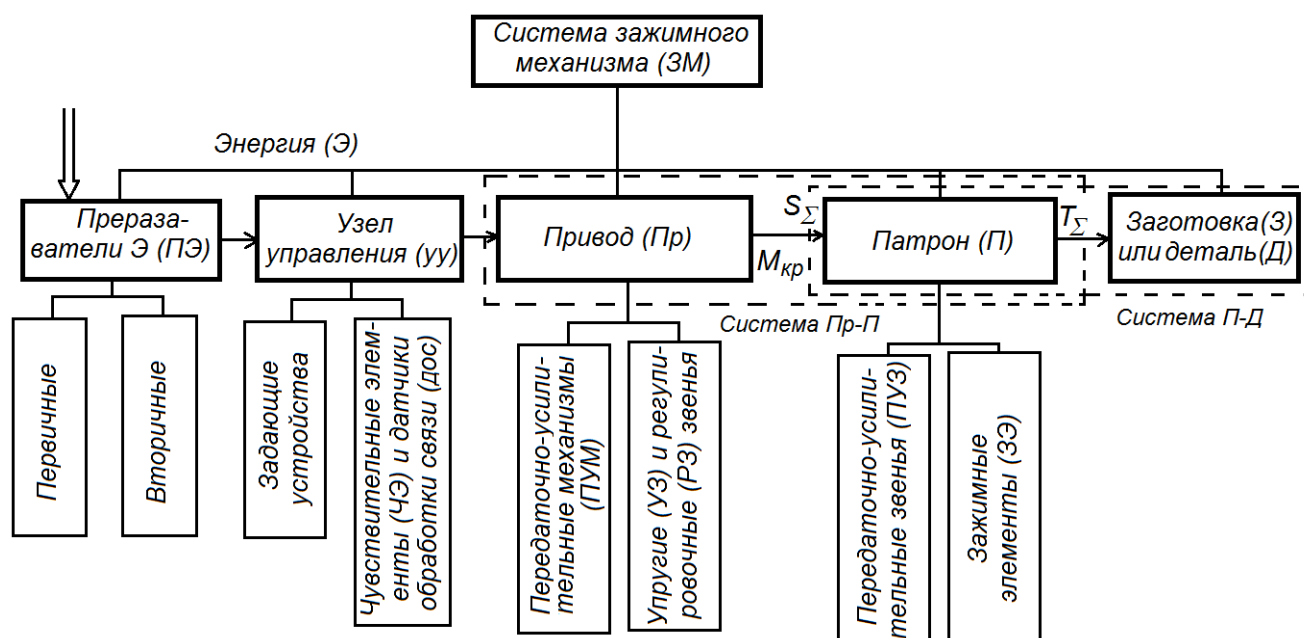


Рис. 1.7. Обобщенная структурно-функциональная схема ЗМ

уровней [2, 225], т. е. сложная структура системы ЗМ имеет многоуровневое иерархическое деление на все более простые элементы (рис. 1.8).

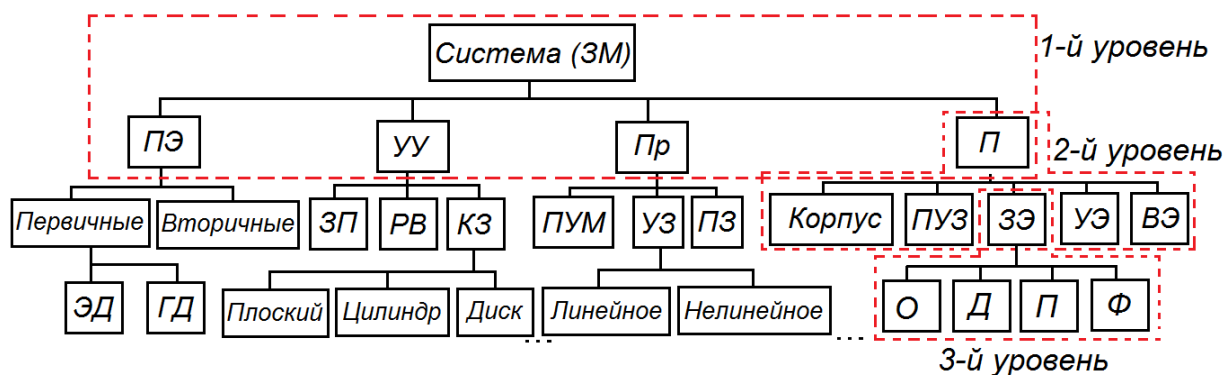


Рис. 1.8. Трёхуровневые иерархические деления структуры ЗМ с геометрическим замыканием токарного автомата

Выбор оптимальной структуры и синтез схем ЗП в начальной стадии проектирования в зависимости от исходных данных нельзя выполнять без классификации. В соответствии с поэлементной структурой зажимного патрона механического исполнения (рис.1.9) с указанием внешних и внутренних связей элементов выделены следующие основные элементы: передаточно-усилительные

звенья (ПУЗ); зажимные (ЗЭ); упругие (УЭ) и вспомогательные (ВЭ). В ЗП в зависимости от условий передачи сил и перемещений может быть одно, два или несколько ПУЗ. В качестве ЗЭ применяют кулачки, клинья, губки, цанги, плунжеры, шарики, втулки и т.д. Эти элементы располагают в одни, два и более рядов. Различают ЗЭ: основные (ОЭ), промежуточные (ПЭ), дополнительные (ДЭ), фиксирующие (ФЭ) и их сочетания.

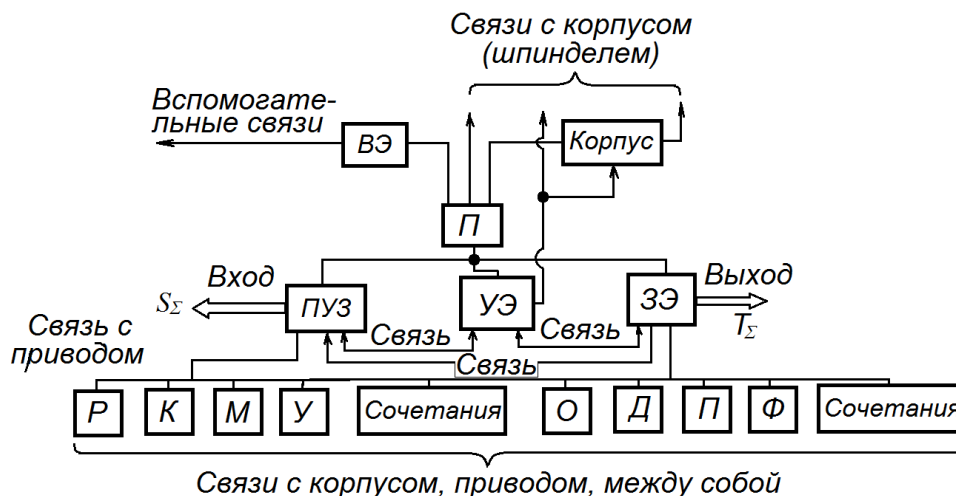


Рис. 1.9. Поэлементная структура зажимного патрона механического исполнения

ОЭ связаны с приводом (с одной стороны) и деталью (с другой стороны); иногда ОЭ связано с деталью через ПЭ. ПЭ обычно не связаны с приводом, остаются неподвижными в осевом направлении, перемещаются с ОЭ (сменные элементы) или с деталью (плавающие элементы). ДЭ образуют дополнительный ряд зажима, сдвинутый относительно ОЭ, или чередуются в одном ряду с ОЭ. ДЭ связаны с приводом самостоятельно или через ОЭ, связь с которыми может быть жесткая или упругая. За счет регулировки или конструктивного исполнения ОЭ и ДЭ работают независимо, последовательно, параллельно-последовательно. ФЭ связаны с корпусом или другими ЗЭ и фиксируют положение объекта или стопорят его до закрепления.

УЭ связаны с ПУЭ, ЗЭ или корпусом патрона и выполняют различные функции. ВЭ определяют не столько принцип действия патрона, сколько его

конструктивные особенности. К ВЭ относят фланцы, упоры, оси, втулки, уплотнения, демпферы и пр.

На рис.1.10 изображена схема классификации ЗП по восьми признакам. Эта классификация относится к ЗП, применяемым в универсальных металлорежущих станках, но некоторые ее элементы могут быть отнесены и к ЗП для станков-автоматов и станков с ЧПУ. Цанговые патроны могут классифицироваться и по другим признакам [111].

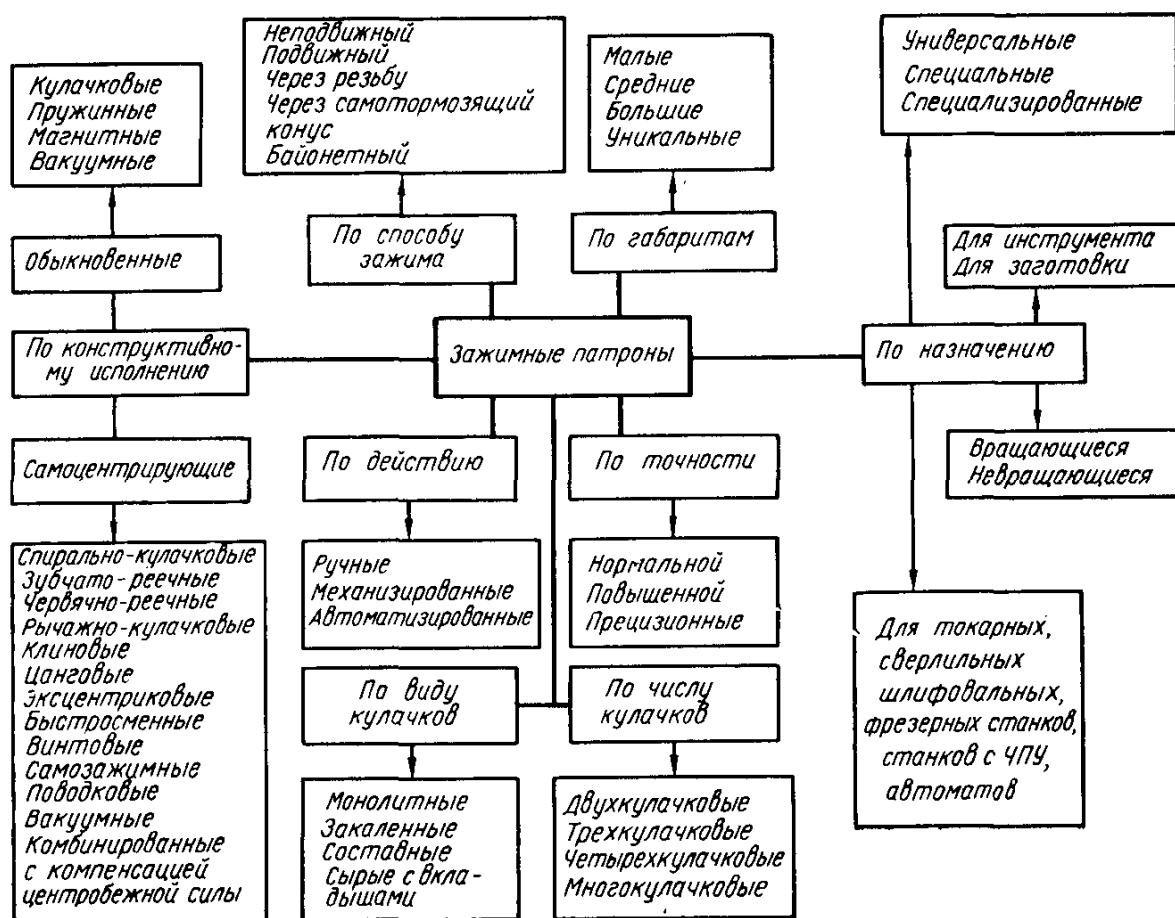


Рис.1.10. Схема классификации зажимных патронов

На токарных станках чаще применяют двух-, трех- и четырех кулачковые ЗП с ручным и механизированным приводом зажима. В двухкулачковых ЗП закрепляют разные фасонные отливки и поковки. Кулачки таких патронов, как правило, предназначены для закрепления только одной детали. В самоцентрирующих ЗП

закрепляют заготовки круглой и шестигранной формы или круглые прутки большого диаметра. В четырехкулачковых ЗП закрепляют прутки квадратного сечения, а в ЗП с индивидуальным регулированием кулачков детали прямоугольной или несимметрической формы.

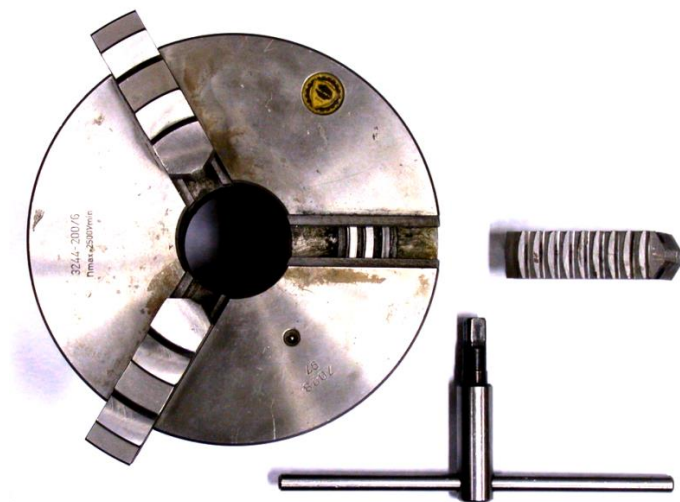


Рис. 1.11. Трехкулачковый патрон

Наиболее распространенным является трехкулачковый ЗП (рис. 1.11), в котором кулачки перемещаются в радиальных пазах от спирали под действием усилия, прикладываемого в одном месте с помощью торцевого рычага или ключа. В таких ЗП используются кулачки разных видов: прямые и обратные.

Четырехкулачковые ЗП (рис. 1.12) имеют четыре радиальных паза для кулачков с независимым перемещением от отдельных механизмов. В них закрепляются заготовки с нецилиндрической формой или, когда ось обрабатываемой цилиндрической поверхности не совпадает с осью шпинделя.



Рис. 1.12. Четырехкулачковый зажимной патрон

Высокую точность центрирования обеспечивают клиновые ЗП с пневматическим, гидравлическим и электромеханическим приводом зажима [225].

В последнее время многие фирмы ведут работы по созданию ЗП, предназначенных для высокоточных высокоскоростных шпинделей и снабженных механизмом компенсации центробежных сил. В патроне типа KTGF (рис.1.13) используются компенсаторы центробежной силы в виде уравнивающих грузов – противовесов 2. Движение от привода зажима передается через связанную с тягой



штулку 1, которая с помощью специальных Т-образных наклонных пазов в обойме 7 перемещает основные кулачки 4 вместе со сменными кулачками 6, прижатыми болтами 5 к рифленой поверхности на стыке кулачков 4 и 6. При движении кулачка 4 в радиальном направлении поворачивается специальный штифт 3 двигающий противовес 2 при изменении диаметра базовой поверхности заготовки. При больших частотах вращения центробежные силы действуют одновременно на противовесы 2 и комплекты кулачков 4, 6, сохраняя установленную силу зажима. При изменении диаметра заготовки сила противодействия может увеличить или уменьшить силу зажима, тогда результирующая сила зажима вращающейся заготовки  $T_{\Sigma n} = T_{\Sigma} \pm F$ . Исследования, проведенные фирмой Forkardt по изучению влияния центробежной силы на силу зажима, показали, что в патронах с компенсатором (рис.1.14, область а) при зажиме деталей с малым диаметром  $D_1$  центробежная сила  $F_u$  увеличивает силу зажима  $T_{\Sigma}$ , а при зажиме деталей с большим диаметром  $D_2$   $F_u$  незначительно уменьшает силу  $T_{\Sigma}$ . В патронах без компенсатора (рис.1.14, область б) центробежная сила оказывает гораздо большее влияние, а при определенных частотах  $F_u = T_{\Sigma}$ , т. е.  $T_{\Sigma n} = 0$ , и заготовка не зажимается.

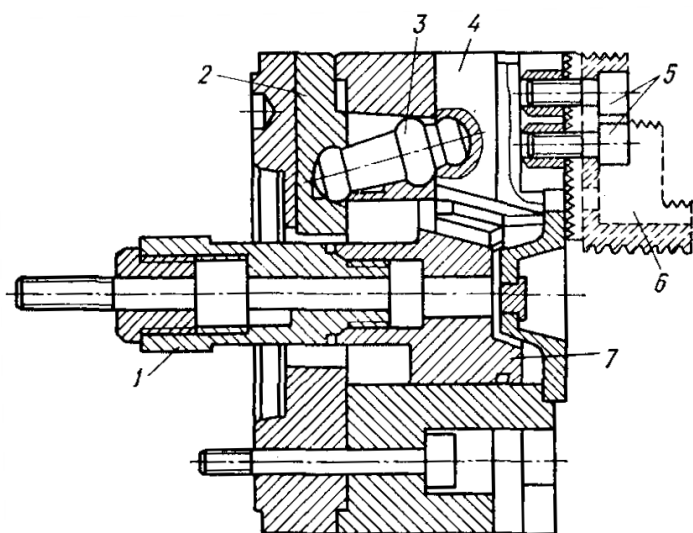


Рис.1.13. Клиновой патрон типа KTGF с компенсатором в виде уравновешивающих грузов

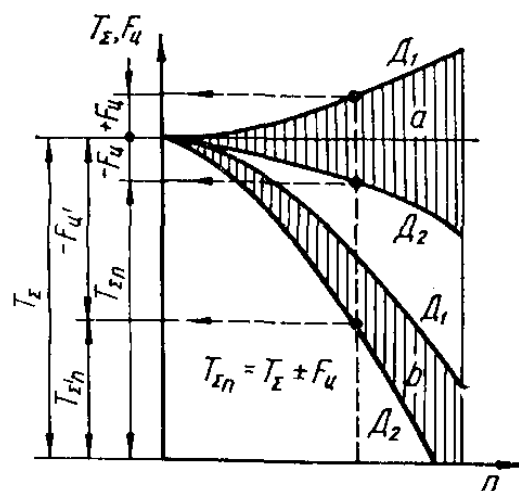


Рис. 1.14. Зависимость силы зажима от центробежной силы при изменении частоты вращения: область а – патрона с компенсатором; область б – патрона без компенсатора

Цанговые ЗП применяются главным образом для закрепления холоднотянутого калиброванного прутка и режущего инструмента с цилиндрическим хвостовиком [108, 109, 117, 125, 225]. Основной зажимной элемент – цанга в виде упругой втулки со сквозными продольными разрезами, число которых 3, 5, 7 и более в зависимости от размеров зажимных объектов. Пример инструментального цангового ЗП приведен на рис. 1.15, применительно к фрезерным и многоцелевым станкам с ЧПУ в условиях автоматической смены инструмента вместе с оправкой, которые хранятся в инструментальном магазине.

Сверлильные ЗП (рис. 1.16) используются в сверлильных и других станках, ручных, пневматических, электрических дрелях и других приспособлениях для закрепления инструмента с широким диапазоном диаметров.



*Рис. 1.15. Инструментальный цанговый патрон*



*Рис. 1.16. Сверлильный зажимной патрон с ключом*

Высокую точность центрирования обеспечивают мембранные ЗП (рис. 1.17), в которых упругие мембраны крепятся к фланцу ЗП болтами и имеют от 3 до 8 кулачков со сменными губками.



*Рис. 1.17. Мембранный шестикулачковый ЗП*

Термопатроны (рис. 1.18) используются для тех же целей, что и цанговые ЗП. Их особенность – обеспечение горячей посадки. Преимущество – высокая сила зажима и работа на высоких частотах вращения, недостаток – небольшое отклонение диаметра одного размера, вильный износ и высокая цена.

Альтернативой для термопатронов являются гидропатроны (рис. 1.19), в которых зажим инструмента обеспечивается благодаря высоким давлениям жидкости до 700-1000 атмосфер. Инструмент может зажиматься через переходную цилиндрическую цангу или непосредственно. Наличие жидкости внутри ЗП способствует гашению вибраций.



*Рис. 1.18. Термопатроны*



*Рис. 1.19. Гидравлический ЗП*

Гидропатроны значительно дороже цанговых, но не требуют использования специального устройства как термопатроны и являются более универсальными. Недостатки – опасность поломки при ошибочном зажиме в холостую, возможности заклинивая при некачественном инструменте, возможность закипания жидкости внутри ЗП без использования охлаждения.

#### **1.4. Анализ ранее проведенных исследований по применению системно-морфологического подхода при создании зажимных механизмов**

Основные работы по применению системно-морфологического подхода в станкостроении велись и ведутся под руководством проф. Кузнецова Ю.Н. в НТУУ «КПИ», создавшем научную школу и подготовившим учеников не только в Украине, но и за ее пределами (Россия, Болгария, Ливан, Иордания), (табл. 1.5). Им созданы основы теории проектирования высокоточных самонастраивающихся, широкодиапазонных, быстроперенастраиваемых ЗМ прутковых автоматов при рассмотрении оптимального проектирования как последовательного решения многоуровневых, многоэкстремальных задач структурного, схемного и параметрического синтеза [111].

Таблица 1.5

*Использование метода морфологического анализа в работах Киевской и Тернопольской научных школ*

| №<br>п/п | Объекты синтеза                                                                     | Авторы и источники                        |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1        | Предохранительные устройства для станков с лезвийной обработкой                     | Нагорняк С.Г., Луцив И.В. [176]           |
| 2        | Устройства с межинструментальной кинематической связью                              | Луцив И.В. [159]                          |
| 3        | Устройства микроперемещений в металлорежущих станках                                | Шевченко А.В. [279, 280]                  |
| 4        | Устройства для сферического прошивания и дорнование отверстий                       | Вачев А.А. [36] Максимов И.Т. [161]       |
| 5        | Высокоточные цанговые патроны (ВЦП) с неподвижной цилиндричной цангой               | Проскуряков А.И. [216]                    |
| 6        | Цанговые патроны двойного зажима (ЦПДЗ)                                             | Торба В.В. [249]                          |
| 7        | Механизмы подачи и упора прутка                                                     | Дьяченко Ю.П. [96]                        |
| 8        | Самонастраивающиеся цанговые патроны (СЦП)                                          | Вачев А.А. [36]                           |
| 9        | Гидромеханические приводы зажима                                                    | Иванюк И.А. [74]                          |
| 10       | Самонастраивающиеся приводы зажима                                                  | Сидорко В.И. [229]                        |
| 11       | Широкодиапазонные зажимные патроны (ШДЗП)                                           | Ахрамович В.Н. [15]                       |
| 12       | Быстропереналаживаемые зажимные патроны (БПЗП)                                      | Волошин В.Н. [40]                         |
| 13       | Широкодиапазонные цанговые патроны (ШЦП)                                            | Кушик В.Г. [145]<br>Юрчишин О.Я. [294]    |
| 14       | Многофункциональные зажимные (МФЗМ) и подающие (МФПМ) механизмы                     | Эль Рашины Х.А. [289]                     |
| 15       | Устройства для направления и поддержки прутка                                       | Сидорко В.И. [229]                        |
| 16       | Зажимные механизмы с автоматическим регулированием характеристик                    | Иванюк И.А. [74]                          |
| 17       | Высокоточные цанговые патроны с упругим фланцем (ВЦП УФ)                            | Неделчева П.М. [178]                      |
| 18       | Компоновки двухшпиндельных токарных автоматов                                       | Мирошниченко С.В. [166]                   |
| 19       | Компоновки многошпиндельных токарных автоматов                                      | Скляр Р.А. [103]                          |
| 20       | Устройства для отрезки прутков и труб                                               | Мачуга Р.И. [116]                         |
| 21       | Суппортные системы для обточки кристаллов                                           | Гуминов В.В. [55]                         |
| 22       | Самозажимные клиновые сверлильные патроны (КСП)                                     | Ромашко А.С. [221]                        |
| 23       | Широкодиапазонные эксцентриковые зажимные патроны (ЭЗП)                             | Аль-Дабас Хасан [267]                     |
| 24       | Устройства автоматической смены зажимных элементов (УАСЗЭ)                          | Аль Рефо И.Ф. [7]<br>Эль Голям Ж.Н. [115] |
| 25       | Инструментальные зажимные патроны (ИЗП)                                             | Фиранский В.Б. [255]                      |
| 26       | Компоновки токарных многоцелевых станков с механизмами параллельной структуры (МПС) | Подольский М.И. [208]                     |
| 27       | Компоновки малогабаритных фрезерных станков с компьютерным управлением              | Степаненко А.А. [132]                     |
| 28       | Высокоскоростные зажимные патроны (ВСЗП)                                            | Эль-Дахаба Ф.В. [290]                     |
| 29       | Подающие цанги (ПЦ) и патроны (ГШ)                                                  | В. Хусейн Рамадан [33]                    |
| 30       | Приводы ЗМ для высокоскоростной обработки                                           | Придальный Б.И. [215]                     |

Кузнецовым Ю.Н. разработаны универсальные динамические и математические модели системы ЗМ пруткового автомата как нелинейной динамической системы при последовательном воздействии на объект закрепления (ОЗ) различных возмущений со стороны механизмов подачи, закрепления и резания в их взаимосвязи. Изучен механизм образования погрешностей и упругих отжаты в системе патрон-деталь (П-Д), представляющую консольную балку с заделкой в месте закрепления в виде упруго-фрикционного шарнира в продольном сечении и упруго-фрикционной подвески в поперечном.

Установлена связь силовых, жесткостных и точностных характеристик между собой и с отклонением диаметра прутка; получены аналитические зависимости для расчета сил, жесткости, точности и быстродействия цанговых ЗМ с механическими и гидравлическими приводами зажима (ПрЗ). Предложен графоаналитический метод расчета силовых характеристик ЗМ с построением силового портрета.

Проф. Кузнецов Ю.Н. разработал дифференциально-морфологический метод синтеза зажимных механизмов [111], который реализован в кандидатских диссертациях Проскурякова К.И. [216], Торбы В.В. [249], Вачева А.А. [36], Иванюка И.А. [74], Содорко В.И. [229], Ахрамовича В.Н. [15], Кушика В.Г. [145], Эль-Рашини Хусейн Али [289], Ромашко А.С. [221], Валид Али Хусейна Рамадана [83], Аль Рефо Ибрагима Фархана [17], Неделчевой П.М. [178], Эль-Дахаби Фарук Вахида [290], Хасана Аль Дабасса [267], Юрчишин О.Я. [294].

В основном дифференциально-морфологический метод реализован на цанговых зажимных патронах (ЗП), но может быть использован для структурно - схемного синтеза приводов зажима и других ТС.

Сущность метода в том, что для разрешения противоречий на стадии поиска структур ( $C_T$ ) используют эвристические приемы полного, неполного и комбинированного расчленения зажимного элемента, дифференцирующие и интегрирующие функции и поверхности, что дает различные основные и дополнительные эффекты, а при полном однонаправленном расчленения

синтезируемые структуры соответствуют новым принципам зажима или обеспечивают новые качества. В соответствии с основным эффектом расчленения на стадии структурного синтеза выбирают несколько предпочтительных структур по полуформализуемому частному критерию качества, отражающему основные требования к синтезируемому патрону, а далее проводят морфологический анализ схем с использованием приемов: перестановки, сочетания, установления последовательности работы и функции зажимных элементов и передаточно-усилительных звеньев, введения различных связей ( $C_B$ ) выбора их места.

Приемы расчленения ЗЭ (рис. 1.20) относятся к эвристическим и используются

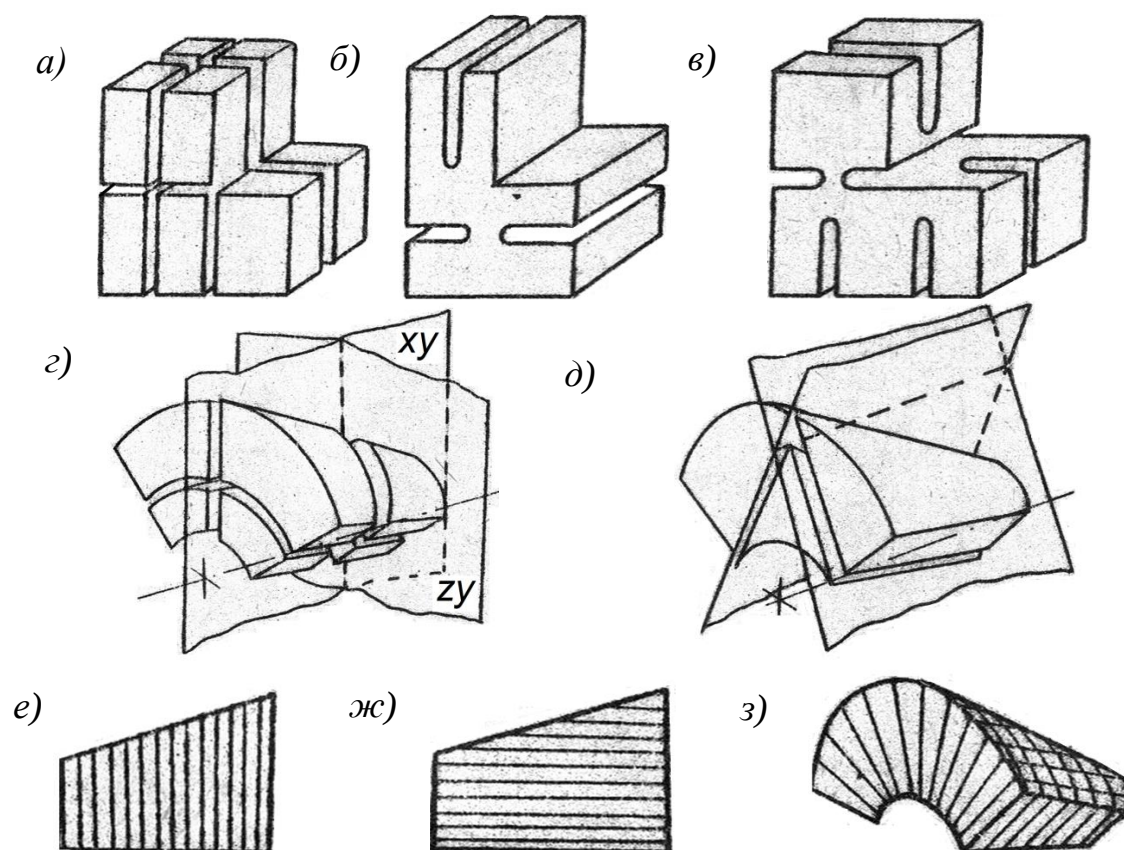


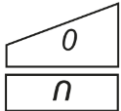
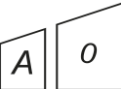
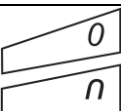
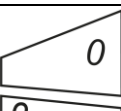
Рис. 1.20. Варианты расчленения (дифференциации функций) зажимных элементов: а, б – полное продольное и поперечное; в, г – неполное продольное и поперечное; д) полное объёмное; е) полное многогранное (многослойное) поперечное; ж) полное многогранное (многослойное) продольное; з) полное многогранное (многослойное) продольное и поперечное, образующее сыпучую или текущую среду.

не только при синтезе структур и схем, но и при выборе принципа зажима. Сущность приемов расчленения проследим на примере синтеза структур зажимных патронов с клиновым ПУЗ, к которым относятся цанговые патроны.

Каждый вид расчленения дает основной или дополнительный эффект [111]. Расчленение может быть (табл. 1.6): полное (продольное, поперечное, угловое, звездой, гранное), неполное и комбинированное.

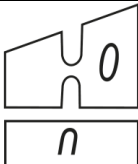
Таблица 1.6

*К выбору схемы расчленения ЗЭ для получения требуемого эффекта зажима*

| Схема                                                                               | Вид<br>расчленения       | Получаемый эффект зажима                    |                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                                                                                     |                          | основной                                    | дополнительный                                            |
| Польное расчленения                                                                 |                          |                                             |                                                           |
|    | Продольное               | Осевая<br>точность                          | Радиальная<br>точность                                    |
|   | Поперечное               | Жёсткость                                   | Компенсация<br>неровностей<br>детали                      |
|  | Угловое                  | Самонастройка<br>на размер                  | Стабильность<br>осевой<br>точности,<br>долговечность      |
|  |                          | Быстродействие                              | Осевая<br>точность                                        |
|  |                          | Равномерности<br>зажим                      | Осевая<br>и радиальная<br>точность                        |
|  | Звёздой                  | Образование<br>количество точек<br>зажима   | Компактность<br>технологи-чность                          |
|  | Гранное<br>(Треугольное) | Мульти-пликация<br>широкодиа-<br>пазонность | Равномерность<br>круговой,<br>жёсткости,<br>долговечность |
| Неполное расчленение                                                                |                          |                                             |                                                           |
|  | Продольное               | Компенсация<br>углового<br>зазора           | Стабилизация<br>жёсткости                                 |



продолжение табл.1.6

|                                                                                                  |                                        |                                                       |                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------|
|                 | Поперечное                             | Компенсация погрешностей детали                       | Равномерность зажима               |
|                 | Звездой                                | Радиальная точность                                   | Равномерность зажима               |
| Комбинированное расчленение                                                                      |                                        |                                                       |                                    |
|                 | Полное продольное, неполное поперечное | Осевая точность + компенсация неточности изготовления | Жёсткости                          |
|                 | Звёздой полное-неполное                | Образование и распределение мест контакта             | Равномерность круговой, жёсткости, |
| Примечание. Обозначения зажимных элементов: О – основной; Д – дополнительный; П – промежуточный. |                                        |                                                       |                                    |

Из анализа расчленения ЗЭ с клиновым ПУЗ установлено, что новые принципы зажима и существенное улучшение показателей качества достигаются только полным однонаправленным расчленением. Например, расчленение вдоль оси патрона дает эффект осевой точности, перпендикулярно к оси с раздвижением – высокой жесткости, угловое – самонастройки на размер, гранное – широкодиапазонности за счет мультипликации хода; многослойное расчленение (рис.1.20, е-з) – широкодиапазонности по форме, чувствительности, сыпучести и т.д. Неполное расчленение служит для выравнивания эпюр контактных давлений, компенсации технологических погрешностей изготовления элементов патрона и погрешностей формы деталей, а также для стабилизации характеристик зажима. Наивысшую радиальную точность зажима обеспечивает отсутствие сквозного расчленения в поперечном сечении кругового контура ЗЭ.

Для перебора различных вариантов структур ЗП и выбора лучшего предложено принять систему приоритета частных показателей в пятибалльной



шкале. Каждому виду полного двухнаправленного расчленения присвоен свой балл в соответствии с эффектом действия на частный показатель. Если полное расчленение однонаправленное, принимают половину балла, а при сочетании двух и более расчленений берут среднеарифметическое значение баллов отдельных расчленений. Например, коэффициент жёсткости для структуры патрона с полным двух направленным расчленением (продольным и поперечным):  $(3 + 5) / 2 = 4$ .

Метод морфологического анализа получил применение в различных областях техники [45, 65, 189-191, 230]. Примером может служить морфологический анализ схем кинематического дробления стружки при многолезвийной обработки, в том числе с кинематическими межинструментальными связями (КМИС) [159], где Луцив И.В. предложил все множество морфологических признаков схем дробления стружки с применением КМИС, разбить на 5 групп: *typ* – особенности многолезвийной обработки (метод лезвийной обработки; количество режущих лезвий и связь между ними); *kin* – обеспечение кинематики дробления (колебательные движения при дроблении, дополнительный привод, вид дополнительных колебаний); *sys* – наладка системы (наладка инструментов, установка заготовки); *cut* – особенности геометрии режущих лезвий; особенности КМИС (без системы управления, с системой управления). С учётом предложенных альтернатив для реализации 12 функциональных (морфологических) признаков получено  $N = 60\,480\,000$  вариантов, однако не дана методика выбора лучших вариантов, кроме отсева неработоспособных с использованием логических ограничений и наложения дополнительных ограничений.

Анализ выполненных исследований с применением системно-морфологического подхода свидетельствует о том, что в них применялся одноуровневый морфологический синтез, а выбор лучших вариантов ориентирован на интуицию специалистов (экспертов) и только в докторской диссертации Кузнецова Ю.Н. [111] предложен комплексный показатель качества, что частично

формализовано с применением метода расстановки приоритета (или парных сравнений), предложенного проф. Блумбергом В.А. [26].

Первой попыткой применить многоуровневый метод решения технических задач является использование Р. Коллером [303, 304] фреймовой модели. Согласно этой модели морфологическое моделирование (анализ) предложено осуществлять на трёх уровнях описания изучаемой ТС:

1 – на уровне физических (химических, геометрических и др.) эффектов (Эф), совокупность которых может быть положена в основу реализации функции искомой ТС; 2 – на уровне материальных носителей этих эффектов НЭф (материалы, из которых могут быть изготовлены соответствующие подсистемы и/или функциональные элементы данных ТС); 3 – на уровне функциональных элементов (ФЭ) – технических реализаций элементарных функций (ЭФ), на которые распадается функция исследуемой ФС, совокупность которых образует искомую ФС (ТС и т. д.).

На каждом уровне описания строят морфологическую таблицу (МТ) стандартной структуры: число строк соответствует числу ЭФ, а число столбцов – число вариантов реализации Эф, НЭф, ФЭ, соответственно. Для сложных ТС искомые ТР ищут опять – таких с помощью МТ, поэтапно: для подсистем, для ТС и для их совокупностей (комплексных систем в терминологии Р. Коллера).

Методологическая база метода еще слаба, но и с его помощью получают хорошие практические результаты благодаря, в первую очередь, автоматизированной базе данных.

### **1.5. Применение структурно-системного подхода и теории эволюция систем к проектированию зажимных патронов и принятая терминология**

Создание новых развивающихся ТС невозможно без анализа и учета накопленного человеческого опыта, который как генетическая информация передается из поколения в поколение на различных носителях. Непрерывное расширение и усложнение ТС и выполняемых ими функций подтверждает

диалектику их развития во времени. Если первые приспособления, предназначенные для расширения физических возможностей Человека при выполнении той или иной работы, были элементарными орудиями в виде палок, камней, топоров, ножей и т.п., то на современном этапе развития человеческого общества приходится иметь дело с целыми системами, которые не только заменяют физический труд, но и поддаются автоматическому управлению, а также осуществляют рабочие процессы при оптимальных параметрах и режимах. Появились большие ТС, к которым относятся металлорежущие станки с ЧПУ.

Развитие любой ТС включает эволюционные, характеризующие количественные изменения, и революционные, отражающие качественные изменения. Ретроспективный анализ развития ТС проводится именно с этих позиций, ориентируясь на достижения науки и техники. ТС быстро изменяются, их конструкции совершенствуются, они становятся более производительными, более качественными и надежными, многофункциональными, энергоэкономичными, быстроперенастраиваемыми и адаптивными к изменяющимся условиям окружающей среды.

В работе Веселовского О.Н. и Шнейберга Я.А. [37] авторы утверждают, что для исторического развития орудий и машин характерна тенденция замены человека-исполнителя машинами по характерным качественным периодам: весь комплекс многообразных составляющих физической и интеллектуальной деятельности Человека в производстве материальных благ выполняется самим Человеком, использующим разнообразные орудия труда; человек заменяется транспортными машинами, приводимыми в движение живым двигателем (прирученными животными); человек в выполнении функций двигателя заменяется энергетическими машинами; Человек заменяется машиной, выполняющей технологические функции, требующие от исполнителя навыков, умения, квалификации (замена рук рабочего машиной и передача машине орудия); человек заменяется автоматизированными системами машин, выполняющими функции

контроля и управления производственным процессом и поддержания этого процесса в заданном режиме; человек заменяется вычислительными машинами и кибернетическими устройствами, которые выполняет ряд логических операций.

Динамика развития орудий труда (табл. 1.7) наглядно показывает сокращение хронологических периодов существования различных форм орудий труда и рост их эффективности.

Прогрессивная эволюция ТС аналогична эволюции видов в живой природе и подчиняется S-подобной кривой (рис. 1.21) [8, 50, 75, 95, 98, 103, 298]. Кривая показывает, как изменяются во времени главные показатели ТС, например, мощность, рабочее давление, масса, производительность, скорость, точность и т.п.

*Таблица 1.7*

*Динамика развития ТС*

| Период<br>Становления                   | Высший уровень<br>орудий труда             | Способ производства                                                                                  | Форма организации<br>производства                                                                     |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Примерно до<br>I<br>тысячелетия<br>н.э. | Приспособления                             | Первобытнообщинный<br>(индивидуально-<br>общинного склада без<br>эксплуатации человека<br>человеком) | Индивидуально-<br>общинная без<br>разделения труда                                                    |
| I в. До н.э. –<br>V в н.э.              | Механизмы                                  | Рабовладельческий (с<br>принудительным трудом)                                                       | Ремесла (с разделением<br>труда)                                                                      |
| V – XV в.в.                             | Механизмы                                  | Феодалный (с<br>принудительным трудом)                                                               | Мануфактуры (с<br>разделением труда)                                                                  |
| XVI XVIII<br>вв.                        | Машины,<br>автоматические<br>системы машин | Капиталистический (с<br>эксплуатацией человека<br>человеком)                                         | Промышленное<br>машинное<br>производство,<br>автоматизированное<br>производство                       |
| XX в                                    | Автоматические<br>системы                  | Социалистический (с<br>осознанной потребностью<br>труда)                                             | Промышленное<br>машинное и<br>автоматизированное<br>производство,<br>предприятия-автоматы<br>будущего |

На участке, который условно называется «детством», ТС развивается медленно (начальное развитие). Потом ТС быстро совершенствуется, наступает пора «созревания» ТС (участок 2). На участке 3 темпы развития снижаются, ТС выбирает свои возможности, наступает «зрелость», а далее «старость» ТС.

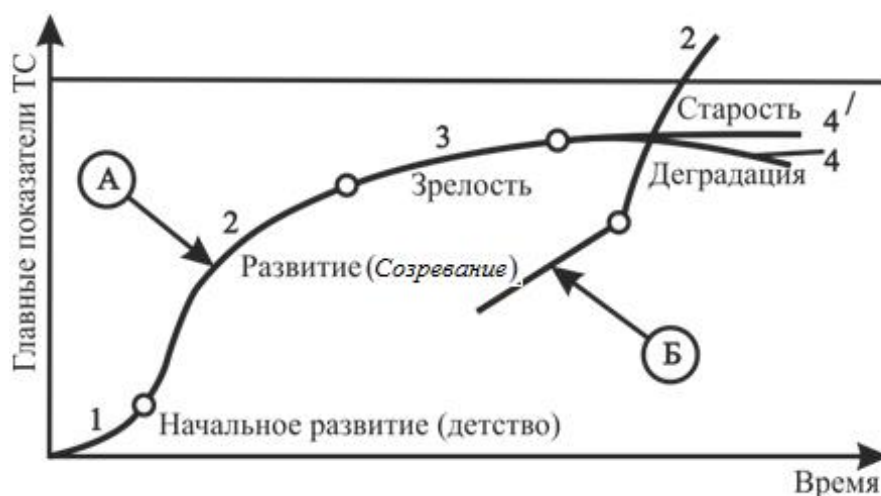


Рис. 1.21. Кривые развития ТС:

*А* – полная кривая старой ТС;      *Б* – начало развития новой ТС

В дальнейшем система *А* может быть деградирована (кривая 4 вниз) или на длительное время удерживает достигнутые показатели (участок 4') либо заменяется принципиально другой системой *Б*.

Деградация ТС или уменьшение основных показателей вызывает изменение среды надсистемы, в которой функционирует система. Таким образом, технический уровень изделий и ТС со временем повышается благодаря внедрению изобретений. Технический уровень – это совокупность технических свойств-параметров, которые определяют совокупную ценность изделия.

Существующая гипотеза о законе прогрессивной эволюции ТС в условиях конкурентной борьбы и рыночных отношений дает такую формулировку: “В ТС с одинаковой функцией переход от поколения к поколению призванный устранением обнаруженного основного дефекта (или дефектов), связанного с улучшением критериев развития ТС, и осуществляется при наличии научно-технического уровня и социально-экономической целесообразности”.

При переходе от одного поколения ТС к другому осуществляется последовательное многовариантное усовершенствование конструкций на различных иерархических уровнях:

1. Улучшают параметры ТС до тех пор, пока не будет достигнут глобальный параметрический экстремум при неизменном принципе действия и техническом решении.
2. После исчерпания возможностей первого цикла осуществляется переход к рациональному техническому решению (структуре) и развитие снова идет по параметрическому циклу. Уровни (циклы 1 и 2) повторяются до тех пор, пока не будет достигнуто приближение к глобальному экстремуму по структуре для данного принципа действия. При этом значения критерия развития, как правило, изменяются в соответствии с S-подобной функцией развития вида

$$K = \frac{L}{a + e^{be - \beta t}} = \frac{L}{a + \exp(b \cdot \exp - \beta t))}, \quad (1.12)$$

где  $L$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $\beta$  – коэффициенты, которые определяются по статистическим данным;  $t$  – время.

3. После исчерпания возможностей 1 и 2 циклов осуществляется переход к рациональному физическому принципу действия и развитие снова идет по параметрическим и структурным циклам.

4. Циклы 1, 2, 3 повторяются до тех пор, пока не будет достигнуто приближение к глобальному экстремуму по принципу действия для множества физических эффектов.

Закон также предусматривает, что при переходе ТС от поколения к поколению осуществляются изменения конструкции, корреляционно связанные с характером дефекта при минимальных производственных и интеллектуальных задач.

Анализ эволюции развития ТС позволяет прогнозировать их основные показатели благодаря применению таких методов [50, 51, 103, 298]: статистических; экспертных; моделирования; на основе анализа информационных данных.

В работе [103] рассмотрено практическое применение экстраполяции на примере прогнозирования развития параметров металлорежущих станков при

использовании корреляционного метода. Данные для прогноза взяты на основании анализа технических характеристик восьмишпиндельных токарных автоматов, которые выпускались с 1950 по 2000 годы. Точность прогноза при использовании линейной модели во временном интервале 3...5 лет по скорости резания составляет 80%. Для прогноза в интервале времени 10...15 лет линейная модель не может использоваться, что требует применения моделей более высоких порядков.

В последние годы в области технических наук появляется много работ, в которых используются основы теории эволюции живых существ, так как законы **эволюции** – это универсальные законы Природы, связанные с генетикой, вопросами симметрии, наследственности и изменчивости [39, 162, 196, 202, 217, 231, 253, 254, 272, 281-285, 318 -327]

В технических, гуманитарных и общественных науках появились такие понятия, как генетическое программирование (с генетическими алгоритмами) [79, 152, 201], генетическая электромеханика [281, 283], наследственная механика [217], технологическая наследственность [56, 63, 87, 220, 257], генетическое материаловедение [63], генетическая стандартизация [35, 248], эволюционная электроника, генетическая история, генетическая психология, генетическая социология, экономическая генетика, генетическая лингвистика, эволюционная кибернетика и др.

Везде используется генетика как междисциплинарная область знаний, которая изучает наследственности и структурные изменчивости в природных и антропогенных (АГС) системах (термин «генетика» введено в биологию английским генетиком В.Бетсоном в 1907 г.), а также 5 универсальных генетических операторов [281]: репликация, инверсия, скрещивание, кроссинговер (или кроссовер) и мутация.

О важности знания законов эволюции Балашов Е.П. [20] говорит: «Игнорирование концепции развития в процессах проектирования, производства и эксплуатации систем приводит к созданию нежизнеспособных систем. Представители технических наук обычно пренебрегают исследованиями общих

закономерностей развития систем и анализом трудностей и противоречий, возникающих в процессе разработки прикладных методов и методик создания систем определенного функционального назначения».

При эволюции АГС, к которым относятся ТС, наблюдаются те же законы, как и в живых системах, имеющих свои программы развития, так как наличие такой программы является фундаментальным свойством живых систем. Программы развития имеют генетическую природу, материализованную в структуре генома каждого живого организма. Поэтому наличие собственной программы развития до последнего времени считалось уникальным свойством, отличающим живую систему от искусственной.

В Природе существует много сложных систем, к которым относится и Человек, как совершенное творение природы [127]. По словам автора теории синергетики Германа Хакена [258, 259]: “Основная отличительная особенность сложных систем – их поистине неисчерпаемое разнообразие, в котором так и не удастся разобраться, несмотря на многочисленные попытки понять до конца природу сложных систем ... . Перед нами возникает острая проблема отыскания унифицированных принципов, которые позволили бы нам должным образом подходить к исследованию таких систем...” В природе наблюдаются механизмы, как в ТС.

Разрабатывая технические конструкции, ученые порой заимствуют у природы решения, созданные в ходе эволюции у животных или растений миллионы лет назад. Так, шарнирное соединение было подмечено сначала у животных, а уже затем применено в технике. Так же поступают инженеры при создании миниатюрных летающих роботов, воспроизводящих движения крыльев насекомых.

Но порой даже то, что считается результатом сугубо человеческой инженерной мысли, оказывается давно воплощенным Природой в живых организмах. Так было с винтовым соединением, принцип работы которого реализован в структуре конечностей жука *Trigonopterus oblongus*, что было обнаружено два года назад [325].



Первым научным достижением Человека стала механика – наука о законах движения тел, которая имеет отношение ко всем явлениям природы и творениям техники, ко всем научным исследованиям [172]. Механика, как наука и как первый шаг по пути облегчения физического труда Человека, является древнейшей наукой времен Герона Александрийского, Архимеда, Коперника, Галилея, основанная на законах, открытых Ньютоном и другими учеными, а также развитая и превратившаяся в инженерную науку. Первыми новинками творений Человека стали водяные и солнечные часы, полиспасты, нагнетательные насосы, водяное колесо, созданные до нашей эры.

Механика стала необходимой наукой при изучении различных физических явлений, химических и биологических процессов, при проектировании технологических процессов в различных производствах, при строительстве различных сооружений, при создании различных машин, механизмов, узлов и деталей, при изменении природных явлений на земле, под землей и под водой, в воздухе и космосе.

Законам механики подчинены передвижения живых существ, процессы в живых организмах, изучение которых в медицине позволяет диагностировать, излечивать болезни и создавать искусственные органы человеческого организма. Практически нет ни одной области знаний, где бы не требовались знания основных законов механики.

Открытие кажущихся на первый взгляд парадоксальных новых эффектов и явлений [315], объективно существующих в Природе, позволяет на много лет вперед прогнозировать развитие науки и техники, решать сложнейшие проблемы, стоящие перед человечеством, среди которых энергетические, экологические, сырьевые, информационные и др.

Во многом Человек обращается к самому себе и стремится создать новое по своему подобию [127]. Для иллюстрации этого приводятся только некоторые сравнения Человека и ТС (табл. 1.8).

Таким образом, являясь учеником Природы – творца для облегчения физического и умственного труда (за счет механизации и автоматизации), Человек начал творить, создавая различные системы для выполнения функций, аналогичных его функциональным возможностям и способностям, используя свой разум за счет приобретения информации и сохранение ее в виде генетической информации, передаваемой по наследству различными способами от поколения к поколению.

Таблица 1.8

## Сравнение Человека и ТС по выполняемым функциям (фрагмент)

| Человек                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Техническая система                                                                                                                                                                              |                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Система (орган)                                                                  | Функции                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Система (узел)                                                                                                                                                                                   | Функции                                                                                              |
| Опорно - двигательный аппарат (скелет, тело, руки, ноги, пальцы, кисти и ступни) | 1. Опорная - фиксация мышц и внутренних органов.<br>2. Защитная – защита жизненно важных органов (головной и спинной мозг, сердце и др.).<br>3. Двигательная - обеспечение простых движений, двигательных действий (осанка, локомоции, манипуляции) и двигательной деятельности.<br>4. Рессорная - смягчение толчков и сотрясений.<br>5. Участие в обеспечении жизненно важных процессов (минеральный обмен, кровообращение, кроветворение и др.). | Корпус, станина, основание, опоры, каркас, ходовая часть, двигатели и движители, транспортное средство, приводной механизм, шарнирно-рычажный механизм, зажимной механизм, роботы и манипуляторы | Несущая система, передвижение, манипулирование, захват, зажим, удержание, перемещение в пространстве |

История развития человеческого общества, и эволюция техники всегда была связана с механикой. Однако с открытием электричества стала немислимым в настоящее время жизнедеятельность Человека и развитие ТС без него. Электричество стало основным источником энергии ТС и первичным

преобразователем альтернативных источников энергии (воды, ветра и солнца), конкурируя с бензином и газом.

Эта тенденция определила особую роль электромеханической науки, связанной с исследованием и созданием электромеханических преобразователей энергии, которая непосредственно используется в процессах производства, транспортировки, распределения и потребления электрической энергии.

В этом отношении заслуживают особого внимания работы, проводимые на кафедре электромеханики НТУУ “КПИ” под руководством проф. Шинкаренко В.Ф. – автором теории эволюции электромеханических систем [283]. Им открыта периодическая система электромагнитных элементов – электромагнитных генов (первичных источников электромагнитного поля), которая одновременно является их генетической классификацией.

Результаты генетического и структурно-системного анализа генетической классификации показали, что исторически сложившееся, необозримое множество электромагнитных и электромеханических объектов, созданных многими поколениями специалистов, обладает высокоупорядоченными системными связями, разнообразие и сущность которых раскрывается через структуру и генетическую информацию исходного элементного базиса генетической классификации [283, 314] (рис. 1.22).

Стало очевидным, что создаваемое разнообразие объектов и систем электромагнитного происхождения, строго регламентировано и является результатом предсказуемой эволюции, элементный базис которой представлен периодической структурой генетической классификации.

В основу этой классификации положены пространственные формы реально существующих источников поля с такими геометрическими классами поверхностей: цилиндрическими ( $G_{цл}$ ); коническими ( $G_{кн}$ ); плоскими ( $G_{пл}$ ); тороидально плоскими ( $G_{тп}$ ); сферическими ( $G_{сф}$ ); тороидально-цилиндрическими ( $G_{тц}$ ) (табл. 1.9).

Таким образом, дискретным значением базового признака  $P_G$  ставится в

соответствие подмножество элементов, на котором определено 6 геометрических классов поверхностей:

$$P_G = \langle G_{цл}, G_{кн}, G_{пл}, G_{тп}, G_{сф}, G_{тц} \rangle \subset S_0 \quad (1.13)$$

при общем случае  $G_i \subset S_0, i = 1, 8$



Рис.1.22. Генетическая модель структурной организации и эволюции сложных электромеханических систем

В расширяющемся разнообразии создаваемых Природой и Человеком объектов и систем наблюдаются общие принципы их структурной организации, которые проявляются в виде межсистемных аналогий или скрытых

внутрисистемных гомологий. Такие свойства имеют место как в естественных (биологических, химических, электромагнитных и др.) системах, так и в системах естественно-антропогенного происхождения (числовых, лингвистических, технических и др.).

Таблица 1.9

*Генетическая классификация первичных источников электромагнитного поля  
(Порождающая периодическая система электромагнитных элементов)*

|     |        |          |          |          |          |          |          |
|-----|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.0 | 7[2]0x | ЦЛ 0.0 x | КН 0.0 x | ПЛ 0.0 x | ТП 0.0 x | СФ 0.0 x | ТЦ 0.0 x |
|     | 7[2]0y | ЦЛ 0.0 y | КН 0.0 y | ПЛ 0.0 y | ТП 0.0 y | СФ 0.0 y | ТЦ 0.0 y |
| 0.1 |        |          |          |          |          |          |          |
| 0.2 | 4[1]2y | ЦЛ 0.2 y | КН 0.2 y | ПЛ 0.2 y | ТП 0.2 y | СФ 0.2 y | ТЦ 0.2 y |
| 1.0 |        |          |          |          |          |          |          |
| 1.1 |        |          |          |          |          |          |          |
| 1.2 |        |          |          |          |          |          |          |
| 2.0 | 4[1]2x | ЦЛ 2.0 x | КН 2.0 x | ПЛ 2.0 x | ТП 2.0 x | СФ 2.0 x | ТЦ 2.0 x |
| 2.1 |        |          |          |          |          |          |          |
| 2.2 | 4[0]4x | ЦЛ 2.2 x | КН 2.2 x | ПЛ 2.2 x | ТП 2.2 x | СФ 2.2 x | ТЦ 2.2 x |
|     | 4[0]4y | ЦЛ 2.2 y | КН 2.2 y | ПЛ 2.2 y | ТП 2.2 y | СФ 2.2 y | ТЦ 2.2 y |
|     |        | ЦЛ       | КН       | ПЛ       | ТП       | СФ       | ТЦ       |

Научные разработки проф. Шинкаренко Б.Ф. дали толчок научным разработкам проф. Кузнецова Ю.Н., который попытался применить основы теории эволюции сложных систем и учение о свойстве элементарных структур (принцип элементарности) в разработке концепции создания станков нового поколения с механизмами параллельной структуры [100, 102, 105, 106, 113, 122, 284, 307, 315].

По аналогии с другими сложными развивающимися системами (табл.1.9) проф. Кузнецов Ю.Н. предложил в механических системах в качестве материального носителя наследственной информации использовать элементарные частицы (искусственные механические гены). Таким материальным носителем может служить материальная точка (далее будем называть механическим геном).

В процессе научного познания установлено, что указанная закономерность определяется свойствами целостных структур, элементарного и субэлементарного

уровней, определяющих структурную организацию объектов и систем более высокого уровня сложности, образующихся в процессе структурной эволюции. Фундаментальность таких целостных структур определяется их инвариантностью к уровню сложности систем-потомков, реализуемых ими функций и времени их эволюции. Такими свойствами наделены, прежде всего, электроны (электромагнитные системы), атомы (химические соединения) и гены (биологические системы).

Таблица 1.9

*Аналогия уровней организации сложных развивающихся систем*

| Уровень структурной организации | Область знаний                                                      |                                                            |                     |                      |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|
|                                 | Электромеханика                                                     | Механика                                                   | Биология*           | Космогония*          |
| Метасистемный                   | Интегрированная динамическая система (энергоблок, техноценоз)       | Интегрированная механическая система (техноценоз)          | Биогеоценоз         | Вселенная            |
| Системный                       | Электромеханические системы                                         | Механические Системы                                       | Экосистемы          | Метагалактики        |
| Видовой                         | Виды электромеханических объектов                                   | Виды механизмов                                            | Виды                | Галактики            |
| Популяционный                   | Электромеханические структуры                                       | Механизмы                                                  | Популяции особей    | Звездные скопления   |
| Объективный                     | Электромеханические пары (парные электромагнитные хромосомы)        | Кинематические пары (соединения звеньев), цепи и структуры | Особи               | Звезды               |
| Хромосомный                     | Первичные источники электромагнитного поля (родительские хромосомы) | Механические звенья, элементарные твердые тела             | Хромосомы           | Элементарные частицы |
| Генетический                    | Электроны (электромагнитные гены)                                   | Элементарные частицы (механические гены)                   | Гены                | Элементарные частицы |
| По данным                       | Проф. В.Ф.Шинкаренко (НТУУ «КПИ»)                                   | Проф. Ю.Н.Кузнецова (НТУУ «КПИ»)                           | Акад. И.А.Рапопорта |                      |

Наличие межсистемных аналогий – свидетельство общности системных принципов структурной организации в развивающихся системах различной

физической природы. Элементный базис и фундаментальные свойства таких целостных структур упорядочиваются периодическими порождающими системами, выполняющими функцию генетических программ структурной организации и развития сложных систем. Открытие и познание порождающих систем в той или иной области знаний имеет общенаучное и междисциплинарное значение, так как непосредственно связано с возникновением и становлением новой научной парадигмы, определяющей переход от фрагментарных исследований к системным.

В работе [53] Грановский Г.И. для описания различных схем движений при резании использовал структурно-системный подход и представление об элементарности – учение о свойстве элементарных структур, как теоретической основы для обобщения и синтеза знаний в современных фундаментальных науках. Различные принципиальные кинематические схемы резания им предложено получать на сочетании двух элементарных движений: прямолинейного и вращательного с их цифровым кодированием – номером схемы (рис. 1.22).

|     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|     |     |     |     |     |     |     |
| 101 | 203 | 301 | 401 | 402 | 403 | 405 |
|     |     |     |     |     |     |     |
| 501 | 503 | 615 | 619 | 701 | 703 | 719 |

Рис. 1.22. Кинематические схемы резания и их коды: 101 – строгание, протягивание; 203 – разрезка ленточными пилами; 301 – протягивание круговым сегментов; 401 – сверление, точение, расточка; 402 – конусное точение; 403 – торцевое фрезерование; 501 – фрезерование тел вращения; 503 – кромочное фрезерование тел вращения; 615 – объемное фрезерование пальцевыми фрезерами, контурное точение; 619 – контурное цилиндрическое фрезерование; 701 – объемное фрезерование дугowymi строчками; 703 – фрезерование барабанных кулачков; 719 – фрезерование дисковых кулачков

В дальнейшем этот подход был использован в теории компоновки станков на модульном принципе [1, 41]. Например, запись с кодом 401 = OZC представляет собой обозначение и структурную формулу технологического модуля (с поступательным движением Z, направленным вдоль оси вращательного движения C), обеспечивающего операции сверления, растачивания, продольного точения и другие подобные им операции согласно схемы 401.

Смирнов В.А. [231], анализируя способы построения научных теорий пришел к выводу, что имеется две фундаментальные системы мышления. На семантическом уровне первая представлена теоретико-множественным мышлением и реализована в аксиоматическом методе построения теории. Вторая система основана на генетическом, конструктивном мышлении [144, 237, 238]. На практике объекты генетически строящейся теории являются хотя и эффективно определенными, но абстрактными объектами, которыми, например, могут быть символы алфавита или другие языки описания изучаемой области или объекта. Для системы мышления основываются на различных и даже несовместимых концепциях истины.

Второй способ построения научной теории использует генетически-конструктивный метод [237, 238], при котором исходные понятия оказываются на описания эмпирически фиксируемых предметов и явлений, а так называемые **конструкты**. Термин конструкт используется для указания на некую абстрактную модель (идеальный объект, порождаемый теоретическим сознанием и существующий лишь в языке соответствующих концептуальных систем). Объекты такого рода служат средством представлений знаний о тех характеристиках изучаемого фрагмента действительности, которые невозможно непосредственно наблюдать ни при каких условиях. Введение в структуру теории идеальных моделей позволяет весьма успешно использовать такое познавательное средство, как **мысленный эксперимент**. Представляемые воображаемые объекты в некоторой знаковой форме, исследователь может вносить в нее определенные преобразования, вводить в содержание конструктов характеристики, не обнаруженные эмпирическим



путем, рассматривать интересующие его сущности в таких условиях, которые в реальной обстановке могут быть невозможными. Все это позволяет увидеть изучаемый объект в каком-то новом ракурсе и обнаружить такие способы его описания, которые ранее оставались незадействованными.

Такие возможности обусловлены тем обстоятельством, что значение конструкторов определяется не посредством каких-то эмпирических интерпретаций, а исключительно его связями с другими терминами, входящими в структуру соответствующей теоретической системы.

В связи с этим мысленное оперирование с идеальными объектами может изменять характер связей, существующих между языковыми средствами некоторой концептуальной, а тем самым открывать возможности качественно иного описания воображаемой действительности, а значит и появления новых содержательных и интерпретаций тех результатов, которые получены с помощью интеллектуальных операций. Такие понятия термодинамики как «идеальные газы» и «идеальная тепловая машина», «виртуальные частицы», о которых говорит современная микрофизика, «точки», «прямые линии» и «плоскости» в геометрии – все это примеры конструкторов. Производя всевозможные операции с объектами такого рода, ученые обретают возможность развивать создаваемые ими теории, не попадая в абсолютную зависимость от эмпирической реальности.

Использование конструкторов в содержательных концепциях оказывается возможным при условии их определенной корректировки, учитывающей особенности реальных предметов и явлений, теоретическим, отображением которых и являются идеальные объекты.

Определив фундаментальные для конкретной теоретической системы конструкторы, исследователь обычно старается сформулировать некоторые законы, описывающие их взаимосвязь таким образом, что становится возможным соотнести эти законы с поведением реальных вещей и явлений, благодаря чему можно выводить эмпирические характеристики в качестве частных случаев из общих

положений. Некоторые определения из области генетики, которые могут быть использованы в данной диссертационной работе из терминологического справочника [281] (приведены – Приложение А).

### **Цель и задачи исследования**

На основе анализа ранее выполненных исследований можно констатировать, что основной тенденцией развития науки в настоящее время является постепенный переход к структурно-системным исследованиям и подходам, носящим междисциплинарный характер.

Концептуальную основу структурно-системного подхода определяет представление об элементарности. Учение о свойстве элементарных структур выполняет роль теоретической основы для обобщения и синтеза знаний в современных фундаментальных науках. Методологической основой исследования сложных систем выступает принцип существования ограниченного количества элементарных (порождающих) структур, что подтверждается исследованиями в различных областях живой, неживой природы и человеческой деятельности, к примеру [289, 307]: все разнообразие живой природы определяется 64-мя комбинациями генетического кода; все живые организмы образованы из 24-х химических элементов; вся цветовая гамма образована из 7-ми цветов; все источники электромагнитного поля содержат 6-ти геометрических классов поверхностей; все разнообразие чисел образовано из 10-ти цифр; все музыкальные произведения написаны с использованием 7-ми нот; все литературные и другие произведения написаны, как языки общения, из ограниченного количества букв алфавита и звуков; все правильные геометрические фигуры состоят из 5-ти тел Платона.

Задача поиска и упорядочивания (классификации) соответствующих элементарных структур, через свойства которых можно было бы выявить принципы организации и определить уровни детерминированного представления систем произвольной физической природы, является центральной проблемой структурно-системных исследований.

Именно такой методологический подход определил цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Целью является повышение технико-экономических показателей и расширение функциональных возможностей металлорежущих станков, в том числе нового поколения, за счет поиска новых оригинальных технических решений и дальнейшего развития теории ЗМ с применением многоуровневого системно-морфологического подхода, начиная с поиска новых идей и принципов действия с учетом накопленных знаний об эволюции ЗМ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. выполнить анализ эволюции ТС различного происхождения, законов их развития и существующих методов поиска новых технических решений;
2. проанализировать ранее выполненные работы по применению системно-морфологического подхода при создании ЗМ;
3. разработать методологию многоуровневого синтеза ЗМ и предпосылки для генетической классификации ЗП;
4. разработать и применить генетико-морфологический подход для структурно-схемного синтеза новых разновидностей ЗП;
5. выполнить теоретические исследования основных характеристик синтезированных ЗП с различными силовыми потоками и контурами;
6. экспериментально исследовать силовые и жесткостные характеристики ЗП с различными силовыми потоками

7. разработать для производства и учебного процесса рекомендации по применению многоуровневого морфологического синтеза и генетико-морфологического подхода применительно к задачам создания сложных ТС различного функционального назначения.

## РАЗДЕЛ 2

### **Методология многоуровневого генетико-морфологического синтеза зажимных механизмов и поиск новых принципов действия**

#### **2.1. Многоуровневый морфологический синтез зажимного механизма как подсистемы металлорежущего станка**

При поисках новых технических решений и создании ТС новых поколений (машин, их механизмов и узлов) необходимо учитывать объективные законы развития систем нового происхождения, которые заимствованы из биологии. Жизнь любого класса ТС представляют в виде эволюционной  $S$  – образной кривой [3, 75, 98, 210]. Эта кривая показывает, как изменяются во времени главные показатели ТС, например, мощность, рабочее давление, масса, габариты, скорость, точность, производительность и т.п.

По улучшению этих показателей наряду с развитием одной ТС в соответствии с запросами общества зарождаются новые ТС того же назначения, реализующие новые идеи и принципы действия (технологические, физические, геометрические и др.).

С развитием техники и повышением технологического уровня машин, к которым относятся и металлорежущие станки, изменяются выполняемые ими функции и совершенствуют принципы их конструирования.

Конструирование или инженерное проектирование является непрерывным творческим процессом и полностью его формализовать нельзя, особенно на начальных этапах поиска новых идей и технических решений, когда необходимо разрешать противоречия между растущими потребностями общества и возможностями существующих ТС. Инженерное проектирование включает в себя с одной стороны одновременно и науку, и искусство, а с другой стороны – анализ и синтез [269].

**Анализ** - расчленение рассматриваемой ситуации на функциональные элементы и изучение каждого элемента в отдельности, выполняется при проектировании для проверки первоначально поставленных целей.

**Синтез** – объединение элементов в единое целое, больше относится к проектированию, чем любой другой процесс, но он должен быть творческим, чтобы комбинация объединяемых элементов была оригинальной на уровне изобретений [209, 211]. В процессе проектирования наука и искусство, анализ и синтез неотделимы друг от друга, проявляются одновременно и являются основой идеологии конструирования станка, его механизмов и узлов настоящей диссертационной работе.

При конструировании станка и его механизмов, узлов и оригинальных (ответственных) деталей применяется два принципа (подхода) [28, 38, 60, 87, 98, 193, 293]:

1) эволюционное изменение, когда ТС совершенствуется или модернизируется в течение определенного времени путем внесения лишь незначительных улучшений преимущественно при сохранении заложенной технологии или принципа действия (изобретения нижних уровней);

2) создание нового, что характерно для настоящего времени с учетом бурного роста научных и технических открытий, новых концепций и методологических подходов, заимствованного прошлого и настоящего, но в основном сориентированного на будущее (изобретения высших уровней).

Однако следует принять во внимание тот факт, что как наука неотделима от искусства, так и анализ связан с синтезом, эволюционные изменения и создание нового происходят одновременно.

Таким образом, при инженерном проектировании необходимо учитывать диалектику развития ТС, которая заключается в том, что в новом объекте совмещают новые и известные технические решения, т.е. учитывают эволюцию на основе переноса генетической информации от одного поколения к другому и необходимость обеспечения выполнения ряда условий, связанных с такими факторами, как затраты, время, критерии отбора, техническая осуществимость, рабочие характеристики, производство, техническая эстетика, экология и т.д.

Процесс инженерного проектирования ТС предполагает последовательность действий, в рамках которых возможно логическое и поэтапное развитие конструкции. Этапы могут повторяться или чередоваться,

так как в процесс проектирования приходится принимать ряд решений, пока, наконец, не будет достигнут такой результат, при котором возникает рациональное решение и возможен переход на следующий этап.

Создания новой ТС включает четыре основных этапа [98, 275]:

- 1 – научный (инженерное прогнозирование);
- 2 – конструкторский (инженерное проектирование);
- 3 – технологический (подготовка производства);
- 4 – организационный (освоение производства).

В данной диссертации основное внимание уделено раскрытию второго конструкторского этапа и частично первого научного с позиций системного подхода, согласно которого будем рассматривать систему ЗМ, являющуюся подсистемой станка (рис.2.1). В рабочей машине, функции системы реализуются через потоки [79, 98, 273]: материальные ( $S$ ), энергетические ( $E_n$ ) и информационные ( $I$ ).

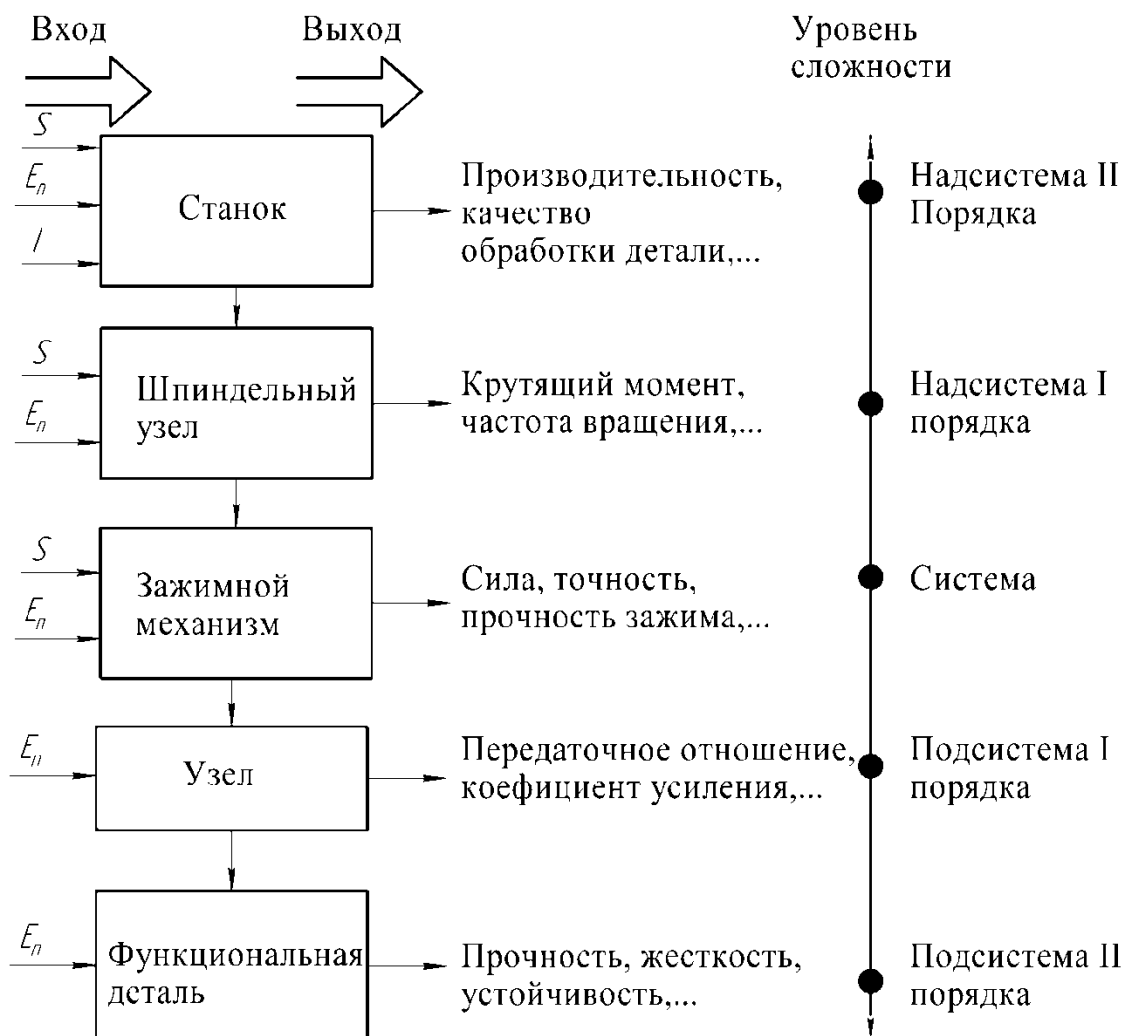


Рис.2.1. Иерархия ТС на примере металлорежущего станка и его элементов

Эти три типа потоков (или влияний) при любом процессе преобразования осуществляются людьми ( $\Sigma Me$ ), техническими системами ( $\Sigma TS$ ) и окружением ( $Umg$ ). Обозначения заимствованы из работы Хубки В. [273].

Материальные ( $S$ ), энергетические ( $E_n$ ) и информационные ( $I$ ) потоки, отображающие преобразования входного состояния в выходное, можно представить определенной совокупностью элементарных функций, в свою очередь реализующихся физическими операциями, т.е. материальные, энергетические и информационные потоки являются функциональной структурой ТС. Неиспользованная часть потоков возвращается во внешнюю среду. При этом ТС реализует определенный набор (вектор) функций, удовлетворяющих вектору потребностей, ради выполнения которых собственно и создается ТС.

При проектировании ЗМ как ТС разного уровня сложности, возможно решение следующих инженерных задач (табл.2.1) [273]: 1 – поиск нового принципа действия; 2 – создания нового ЗМ; 3 – новое применение ЗМ; 4 – модернизация ЗМ; 5 – совершенствование ЗМ и принципа действия.

В табл.2.1 приняты следующие обозначения:  $od^1$  – начальное состояния операнда на входе;  $od^2$  – необходимое конечное состояние операнда на выходе;  $N_{in}$  – побочные входы (например, центробежные силы неуравновешенных частей);  $N_{op}$  – побочные выходы (например, потеря силы зажима);  $TS$  – техническая система;  $AP$  – рабочий процесс (например, способ зажима);  $\Sigma Ot$  – операторы (рабочий, воздействия в виде сил и моментов резания, технические средства, окружение - внешние воздействия на  $TS$  (ЗМ);  $\Delta TS$  – отклонение параметров  $TS$  (ЗМ);  $\Delta AP$  – отклонение параметров рабочего процесса (например, способа зажима);  $\Delta N_{in}$  – отклонение побочных входов;  $\Delta N_{op}$  – отклонение побочных выходов.

Метод морфологического исследования реализуется двумя качественно разными этапами.

**Первый этап** (морфологический анализ - МА) заключается в получении описаний всех систем, принадлежащих к исследуемому классу, т.е. является классификацией множества систем.



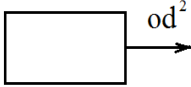
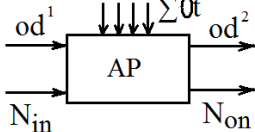
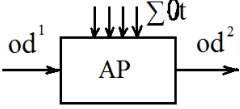
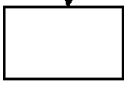
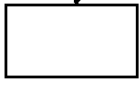
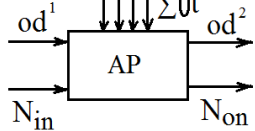
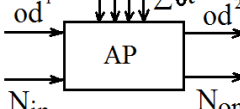
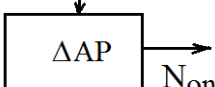
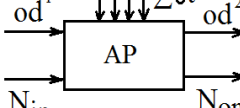
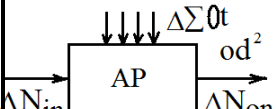
**На втором этапе** (морфологического синтеза, МС) проводится оценивание описаний разных систем исследуемого класса и выбор тех, которые в том или ином приближении соответствуют условиям задачи. В результате морфологического синтеза получается цельное описание всей исследуемой системы на уровне описания отдельных подсистем и отношений между ними.

Итак, целями МА и МС систем является:

– системное исследование всех возможных вариантов решения задачи, возникающей из закономерностей построения (морфологии) усовершенствуемого объекта, а это позволяет учесть варианты, которые при простом переборе могли быть упущены исследователем при рассмотрении;

Таблица 2.1

Типичные инженерные задачи

| № задачи | Ситуация                                                            | Данное                                                                              | Найти                                                                                | Деятельность                                                  |
|----------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1        | Для удовлетворения требований нужен новый продукт                   |  |  | Процесс проектирования при заданном выходе                    |
| 2        | Для заданного способа зажима и всех операторов существующей ТС (ЗМ) |  |  | Создание (выбор) новой ТС (ЗМ)                                |
| 3        | Для разработанной ТС (ЗМ) ищется возможность применения             |  |  | Новое применение существующей ТС (ЗМ)                         |
| 4        | Побочный выход существующей ТС вредный                              |  |  | Разработка (модернизация ТС (ЗМ), ликвидация побочного выхода |
| 5        | Необходимо повысить эффективность ТС (ЗМ) и способа зажима          |  |  | Совершенствование ЗМ и принципа действия                      |

– реализация совокупности операций поиска на морфологическом множестве вариантов описания функциональных систем, которые отвечают первичным требованиям, т.е. условиям задачи.

Вариант системы является выбор альтернатив из каждого столбца морфологической таблицы или матрицы и в общем виде записывается так:

$$B_i = \{P_1^{j_1}, \dots, P_n^{j_n}\}, j_g \in \overline{1, k_g} \quad (2.1)$$

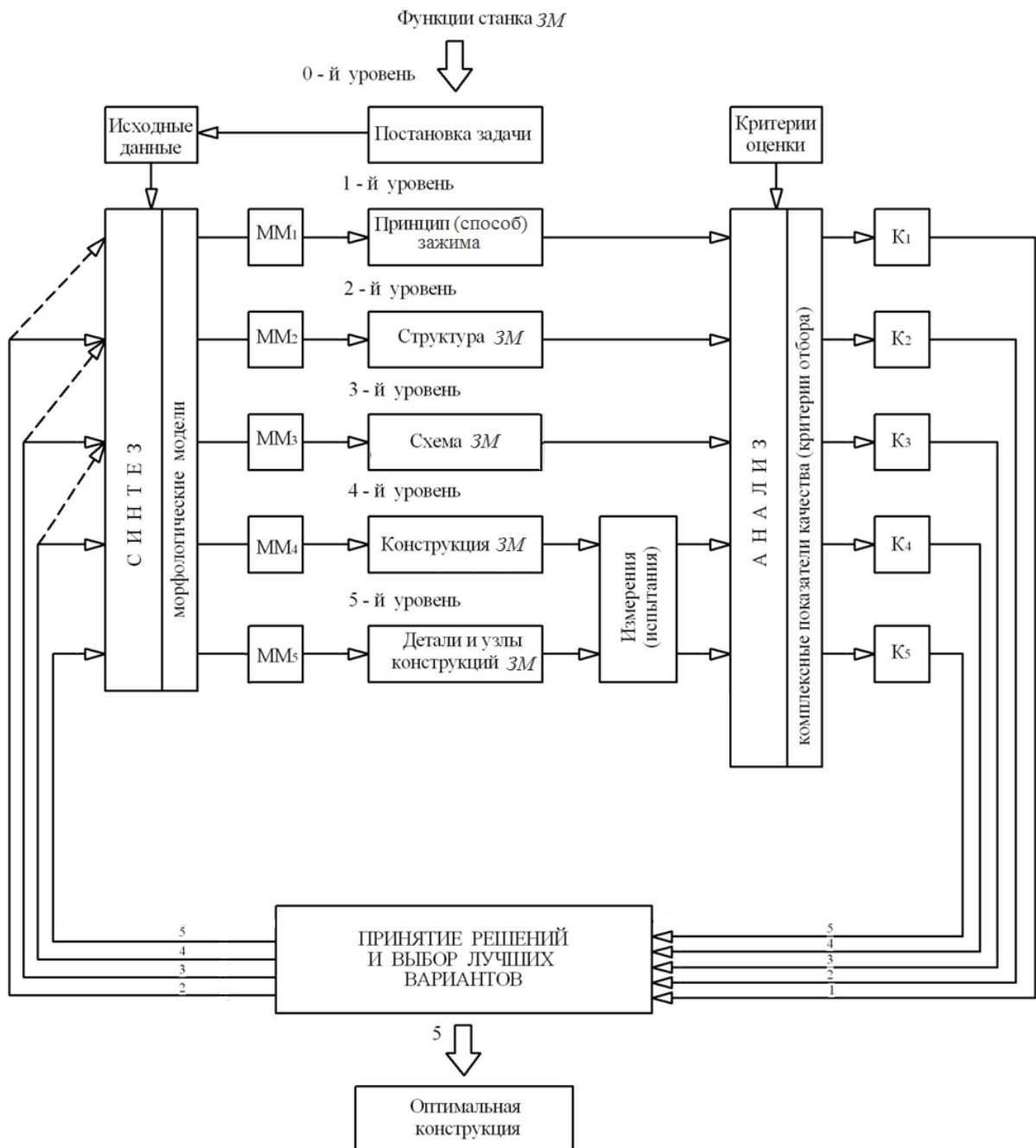
Целостные варианты исследуемых сгенерированных систем отличаются один от другого для морфологического множества, на котором они определяются, хотя б одним значением  $P_i^j$ . Поиск в морфологическом множестве вариантов систем при решении задачи синтеза осуществляется по разным функциям цели и алгоритмам.

Сложный процесс оптимального проектирования ЗМ как сложной ТС можно представить в виде итерационного процесса последовательного решения многовариантных (многоуровневых, многоциклических, многокритериальных, многоэкстремальных) задач синтеза, анализа и испытаний (рис. 2.2) [111]. При этом на каждом уровне, начиная от идей и заканчивая конструкцией, множество вариантов решения может быть представлено в виде морфологических моделей с последовательной их конкретизацией [132, 136].

Согласно [2, 111] на каждом уровне решение представляет собой многокритериальную задачу, причем сложность решения состоит в том, что отсутствует стратегия решения, одновременно лучшая (рациональная, а при параметрическом синтезе оптимальная) по каждому из критериев. В соответствии с теорией исследования операций [167, 168] решение должно содержать методы приведения частных критериев (показателей) к однородному виду, определения их относительной важности (весовых коэффициентов) и формирования обобщенного критерия.

Задачи I и II уровней трудно формализуемы, поэтому для их решения требуются, например, применения неформальных процедур, а принятие решений осуществляется в условиях неполной и нечеткой исходной информации с укрупнением критериев отбора  $K_1$  и  $K_2$  (оценка) [153, 154, 173],

что возможно в диалоговом режиме работы с ЭВМ, наделенных искусственным интеллектом и имитационной САПР [2, 209, 211].



*Рис.2.2. Алгоритм оптимального проектирования ЗМ с применением многоуровневого системно-морфологического подхода*

Задачи III уровня используют методы схемной оптимизации по обобщенному критерию  $K_3$ .

Задачи IV – V уровней сводятся к параметрической оптимизации по обобщенным (комплексным) критериям  $K_4 – K_5$ .

Задачи многоуровневого морфологического синтеза и анализа могут последовательно решаться с отбором лучших решений по качественным и

количественным показателям по обобщенному (комплексному) критерию вида [48, 111, 124, 167, 168, 207]:

$$K = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{k_i}{[k_i]} \rightarrow \min(\max), \quad (2.2)$$

где  $\alpha_i$  – весовые коэффициент, принимающие большие значения в соответствии с важностью критериев и определяемые методами ранжирования, построения матриц парных сравнений (расстановки приоритетов) на основе интуиции специалист и экспертных «контрольных оценок» по предпочтительности с составлением системы равенств и неравенств для целевой функции с неизвестными  $\alpha_i$ ;  $K_i$  –  $i$  - тый частный показатель качества;  $[K_i]$  – максимально достигаемое значение показателя;  $n$  – количество функциональных признаков.

При выборе лучшего варианта решения из множества перебираемых  $m$  механизмов характеризуемых  $n$  важными свойствами, составляется матрица [107-109, 111]:

$$K = \begin{vmatrix} K_i^{(1)} & \dots & K_k^{(1)} & \dots & K_n^{(1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_i^{(i)} & \dots & K_k^{(i)} & \dots & K_n^{(i)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_i^{(m)} & \dots & K_k^{(m)} & \dots & K_n^{(m)} \end{vmatrix} \quad (2.3)$$

где элемент (частный показатель)  $K_i^{(k)} (i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n)$  представляет некоторое число, характеризующее качество  $i$  – того станка с точки зрения  $K$  – ого свойства. При этом при сравнении  $i$  – того и  $j$  – того станков с точки зрения  $K$  – того показателя качества (частного критерия)  $K_k^{(i)} = K_k^{(j)}$ , то варианты считаются равноценными.

Устанавливаемое отношение предпочтительности (равноценности) является транзитивным.

Таким образом, всегда можно перебираемые варианты ЗМ ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) расположить в порядке убывания (не возрастания) их предпочтительности [207].

На III и IV уровнях синтеза ЗМ решение о возможности использования обобщенного критерия (2.2) с частным количественными и качественными показателями (критериями) сводится по существу к проверке условия, при

котором изменения какого-либо частного показателя качества всех синтезированных объектов на одну и ту же величину не изменяют порядок предпочтений.

В тех случаях, когда лучшему критерию соответствуют меньшие натуральные значения показателя  $K_i$ , при приведении к однородному виду используют прием:

$$K_i^* = 1 - K_i. \quad (2.4)$$

Если показатели выражаются в бальной системе, то показатель качества представляется как:

$$K_i = \frac{K_i - K_{imax}}{K_{imax} - K_{imin}}, \quad (2.5)$$

где  $K_i$  – число баллов  $i$  – того частного показателя;  $K_{imax}$  и  $K_{imin}$  – соответственно максимальное и минимальное число баллов в множестве перебираемых вариантов станков.

## **2.2. Формирование критериев для принятия решений при выборе лучших вариантов на различных уровнях морфологического синтеза зажимного механизма**

В процессе решения сложных задач синтеза ЗМ применяются методы системного анализа, среди которых для многоуровневого морфологического синтеза, начиная от выбора идей (принципа действия) на первом уровне и заканчивая выбором схемы на третьем уровне, является метод анализа информации (МАИ) [79] на основе экспериментальных оценок. Этот метод приводит к структуре в виде мульти дерева, что позволяет избавиться от сложных сравнений, заменив их попарными сравнениями [26], и кроме того обладает средствами для проверки последовательности (непротиворечивости) утверждений эксперта. На основе парных сравнений определяются локальные приоритеты, а использование построенной иерархической структуры позволяет получить значения глобальных приоритетов альтернатив и оценить их надежность.

На каждом уровне многоуровневого морфологического синтеза каждая ситуация выбора лучшего решения ЗМ может быть охарактеризована векторной оценкой  $K$  – множества частных показателей  $K_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ),

$$K = \{K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_n\}.$$

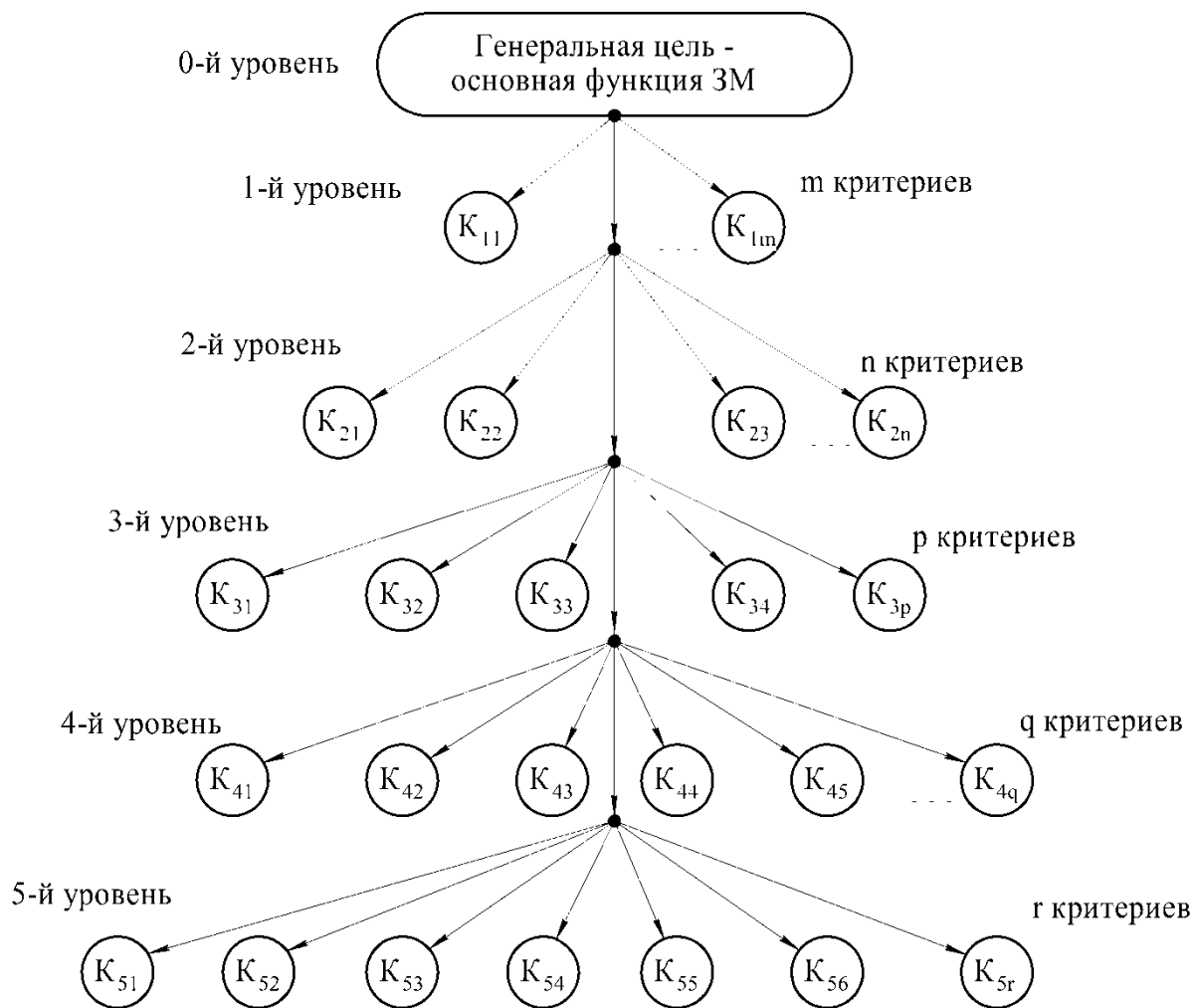
По мере перехода от первого уровня к второму и далее (рис.2.2) происходит конкретизация ЗМ и увеличение частных показателей, т.е. множества показателей  $K_I$  первого уровня принадлежит множеству показателей  $K_{II}$  второго уровня и т.д.

$$K_I \subset K_{II} \subset K_{III} \subset K_{IV} \subset K_V.$$

Это можно представить в виде дерева целей (рис.2.3) [49], как дерева качественных и количественных показателей для отбора лучших решений на основе требований, предъявляемых к ЗМ и его элементам.

ЗМ, как каждая ТС, имеет несколько критериев, определяющих их меру совершенства и прогрессивности.

Особенно важно правильно выбрать значения критериев для разработки новых ЗМ на уровне лучших мировых достижений.



*Рис.2.3. Дерево целей – частных критериев на различных уровнях морфологического синтеза ЗМ*

Как для любой ТС, полный набор критериев ЗМ включает такие четыре группы [98]: 1) функциональные, характеризующие важнейшие показатели реализации функций ЗМ; 2) технические, связанные с возможностью и простотой изготовления ЗМ; 3) экономические, определяющие экономическую целесообразность реализации функций ЗМ; 4) антропологические, связанные с вопросами человеческого фактора или действием позитивных и негативных факторов на людей, вызванных созданием ЗМ.

Для критериев развития ЗМ должны выбираться только такие параметры, которые допускают возможность количественной оценки. Критерий должен иметь единицу измерения для сравнения различных вариантов ЗМ. Он может быть представлен и безразмерными удельными величинами, а при качественном сравнении в балльной или весовой оценке. При выборе критериев

должны обеспечиваться условия исключительности, постоянства, минимальности и независимости.

Исключительность предусматривает, что за критерий могут быть приняты такие параметры ЗМ, которые в первую очередь характеризуют его эффективность и наиболее существенно влияют на развитие ЗМ. К нему относится обеспечение надежной силы зажима, исключающей нарушение положения или разрушение объекта закрепления в процессе обработки или в процессе зажима.

Постоянство критериев предусматривает их сохранение на протяжении жизненного цикла класса ЗМ.

Минимальность и независимость определяет, что вся совокупность критериев должна содержать лишь такие, которые не могут быть выведены из других критериев и не могут быть их прямым следствием.

Описание каждого из критериев ЗМ содержит такие данные: 1) сущность критериев, время и причины его возникновения; 2) формулу или способ определения критерия; 3) диапазон и характер изменения значений критерия во времени; 4) оценку степени всеобщности критерия по определенной шкале (принадлежность к определенному классу, группы классов ЗМ); 5) оценку перспективности критерия (актуальность, рост или снижение); 6) основные способы и средства улучшения критерия.

Мировые тенденции развития станкостроения влияют не только на изменение компоновок, конструкций, систем приводов и управления, но и на изменение их функциональных элементов, к которым относятся ЗМ. Это в свою очередь изменяет приоритетность показателей и критериев отбора лучших решений. К таким тенденциям относится высокоскоростная (High speed cutting) и высокопроизводительная (High production cutting) обработка на высоких скоростях резания [4, 5, 99, 292]. Из-за повышения частот вращения существенное негативное влияние начинают оказывать центробежные силы неуравновешенных частей.

Для перемещения рабочих органов на скоростях до 60 – 200 м/мин с ускорениями до 0,5 – 5g при выполнении холостых и рабочих движений



существенно сокращаются кинематические цепи и количество механических передач энергии от источника энергии к исполнительному органу. Вместо механических передач начинают широко применяться электромеханические системы в виде мотор-шпинделей для вращательных движений и электрические линейные приводы поступательных движений, а новые станки оснащаются мехатронными системами [5, 101, 109, 292].

Применение нанотехнологий и необходимость обеспечить высокую точность обработки прецизионных изделий до 0,01 мкм с шероховатостью поверхности до 0,001 мкм (нанометра) при небольших сил резания на первый план выдвигает обеспечения высокой точности зажима.

Агрегатно-модульный принцип начинает применяться в конструкциях шпиндельных узлов с ЗМ различного назначения, что повышает универсальность, сокращает сроки и затраты на их изготовление, сборку и переналадку в условиях гибкого автоматизированного производства.

Многоуровневой морфологический синтез, являющийся многокритериальным методом при выборе рациональных вариантов, начинается с независимой оценкой альтернатив соответствующих функциональным признакам, т.е. функциональным подсистемам, на которые при декомпозиции раскладывается система ЗМ.

Этот метод базируется на двух допущениях. При первом допущении альтернативы, которые принадлежат отдельным функциональным подсистемам, можно описывать независимо от альтернатив, принадлежащим другим функциональным подсистемам. При втором допущении наилучший целостный вариант системы ЗМ содержит лучшие альтернативы, которые в некоторых случаях не отвечают действительности, поскольку при таком условии могут нарушаться условия целостности.

Количество элементов первичного морфологического множества предварительно уменьшается путем отсека нерациональных вариантов.

Оставшееся подмножество рациональных вариантов анализируется на предмет их эффективности и совместимости отдельных альтернатив.

При поиск рациональных вариантов в морфологическом множестве находится один или несколько целостных вариантов систем ЗМ с использованием как аддитивной (формула 2.2), но и мультипликативной функции цели (умножение эффектов):

$$K = \prod_{i=1}^n \alpha_i \frac{K_i}{[K_i]} \quad (2.6)$$

Многообразие требований, предъявляемых к ЗМ, может быть выражено через количественные или качественные показатели, которые в размерном или безразмерном виде формируют частные критерии для отбора лучших решений [111].

В тех случаях, когда задачи синтеза (I – II уровни, иногда III уровень) трудно формализуемые (неформализуемые) из-за неопределённой или нечетной информации приходится обращаться к экспертизе (эксперт, а лучше группа экспертов) и неформальным процедурам [67, 153, 154, 173, 188]. В этом случае приведение отдельных показателей (частных критериев) к однородному виду возможно при оценке их в одной порядковой шкале по принципу – более выгодному значению показателя соответствует больше вес (оценка, балл) [207, 222].

Применительно к ЗМ удобнее всего частные показатели, формирующие комплексный показатель, с сохранением физического их смысла привести к такому однородному безразмерному виду, при котором каждый из них в идеальном случае стремился бы к 1 в интервале 0 – 1 [207].

После приведения частных показателей к однородному, нормализованному виду необходимо выполнить анализ их относительной важности [207], т.е. провести мысленный эксперимент для ранжирования показателей и определения весовых коэффициентов с учётом их влияния, например, на технико-экономические показатели станка [4, 5, 99, 122], например, производительность (П), качество (К) обработки при минимальных затратах (З), характеризующие эффективность обработки [99].

$$\Xi = \frac{\Pi \uparrow \text{К} \uparrow}{\text{З} \downarrow} \rightarrow \max. \quad (2.7)$$

Рассмотрим на примере, выражая влияние показателей ЗМ на эффективность обработки в виде графа связей (рис.2.4). Каждая связь (ребро графа) соответствует весу 1. Из рис. 2.4 видно, что у показателя  $K_C$  – 6 связей,  $K_T$  – 5 связей,  $K_{Ж}$  и  $K_D$  – по 4 связи,  $K_{Тх}$  – 2 связи,  $K_y$  – 1 связь и др. Таким образом, отношение предпочтения для приведенных к однородному виду показателей при выборе лучшего решения ЗМ по комплексному критерию будет (знак  $>$  обозначает предпочтения по важности; знаки  $\approx$  – равноценность):

$$K_C > K_T > \{K_{Ж} \approx K_D\} > K_{Тх} > K_y \quad (2.8)$$

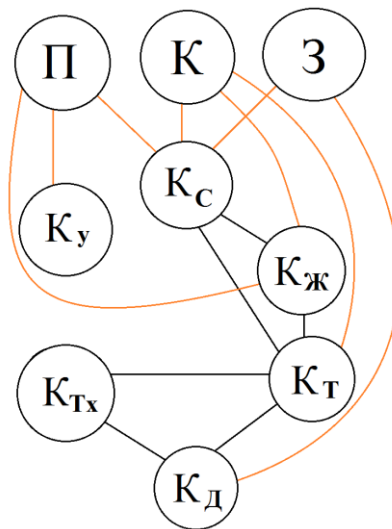


Рис.2.4. Граф связей и взаимовлияния ЗМ на технико-экономические показатели станка

Таблица 2.2

Критерии отбора лучших решений ЗМ на различных уровнях проектирования (см. рис. 2.3)

| №<br>п/п | Критерий                                 | Обозначение       | Уровни |    |     |    |   |
|----------|------------------------------------------|-------------------|--------|----|-----|----|---|
|          |                                          |                   | I      | II | III | IV | V |
| 1        | Сила зажима                              | $K_C$             | I      | L  | L   | +  | + |
| 2        | Стабильность (неравномерность) силы      | $\delta_C$        |        |    | L   | +  | + |
| 3        | Жесткость зажима                         | $K_{Ж}$           |        | L  | L   | +  | + |
| 4        | Стабильность (неравномерность) жесткости | $\delta_{Ж}$      |        |    | L   | +  | + |
| 5        | Точность зажима                          | $K_T$             |        | L  | L   | +  | + |
| 6        | Стабильность (неравномерность) точности  | $\delta_T$        |        |    | L   | +  | + |
| 7        | Прочность элементов                      | $K_{\delta}$      |        |    | L   | +  | + |
| 8        | Неравномерность прочности                | $\delta_{\delta}$ |        |    | L   | +  | + |
| 9        | Долговечность                            | $K_D$             |        |    | L   | L  | L |
| 10       | Надежность                               | $K_H$             |        |    | L   | L  | L |
| 11       | Металлоёмкость                           | $K_M$             |        |    | L   | +  | + |

|    |                           |          |   |   |   |   |   |
|----|---------------------------|----------|---|---|---|---|---|
| 12 | Технологичность           | $K_{Тх}$ |   |   | └ | └ | └ |
| 13 | Энергоемкость             | $K_{Э}$  | ┐ | └ | └ | + | + |
| 14 | Быстродействие            | $K_{Бд}$ |   |   | └ | + | + |
| 15 | Быстроходность            | $K_{Бх}$ |   |   | └ | + | + |
| 16 | Быстро переналаживаемость | $K_{Бп}$ |   |   | └ | + | + |
| 17 | Широкодиапазонность       | $K_{Ш}$  |   | └ | └ | + | + |
| 18 | Безопасность работы       | $K_{Бр}$ |   |   | ┐ | └ | └ |
| 19 | Бесшумность               | $K_{Бш}$ |   |   | └ | └ | └ |
| 20 | Удобство работы           | $K_{у}$  |   |   | ┐ | └ | └ |
| 21 | Многоместность            | $K_{Мм}$ |   |   | ┐ | └ | └ |
| 22 | Многопозиционность        | $K_{Мп}$ |   |   | ┐ | └ | └ |
| 23 | Стыкуемость               | $K_{Ст}$ | ┐ | ┐ | └ | └ | └ |

*Примечание: критерий ┐ – неформализованный; └ – полуформализованный; └ – полудетерминированный; + – детерминированный; □ – отсутствует.*

Согласно [167, 168, 207] при наличии полной непротиворечивости информации относительную важность каждого показателя можно оценить положительным числом  $\alpha_1$  – весовым коэффициентом, обладающим свойством аддитивности ( $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ ). Исходя из этого отношениям (2.8) будет соответствовать отношения весовых коэффициентов:

$$\alpha_c > \alpha_T > \{\alpha_{ж} \approx \alpha_d\} > \alpha_{Тх} > \alpha_y \quad (2.9)$$

Так как  $\alpha_{ж} = \alpha_d$ , то в отношениях (2.9) их веса суммируются в дискретной шкале отношений при замене на знак  $>$  (больше), т.е.

$$\alpha_c > \alpha_T > \{\alpha_{ж} + \alpha_d\} > \alpha_{Тх} > \alpha_y \quad (2.10)$$

Оценивая важность критериев весовыми коэффициентами в порядковой шкале отношений с учётом дискретности шкалы, равной единице, приведем их нормирование в баллах, начиная с менее важного, т.е.

$$1 > 2 > (3 + 3) < 7 < 8$$

Общая сумма баллов равна  $1 + 2 + 6 + 7 + 8 = 24$ . Отсюда,  $\alpha_y = \frac{1}{24}$ ,  $\alpha_{Тх} = \frac{2}{24}$ ,

$$\alpha_{ж} = \alpha_d = \frac{3}{24}; \alpha_T = \frac{7}{24}; \alpha_c = \frac{8}{24}.$$

Согласно выражения (2.2) комплексный показатель качества ЗМ будет:

$$K = \frac{8}{24} K_c + \frac{7}{24} K_T + \frac{3}{24} K_{ж} + \frac{3}{24} K_d + \frac{2}{24} K_{Тх} + \frac{1}{24} K_y. \quad (2.11)$$

В случае отсутствия информации для формирования частных критериев, а также для определения весовых коэффициентов на основе экспертных оценок удобно пользоваться широко распространенным методом парных сравнений (расстановки приоритетов) [26], о чём уже упоминалось в данном параграфе и что будет проиллюстрировано далее.

На IV и V уровнях, а в некоторых случаях на III уровне (рис.2.2), когда удаётся количественно оценить частные критерии (показатели) для выбора лучшего решения задача оптимального проектирования может решаться одним из трех методов [47]:

1. Из  $n$  критериев  $K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_n$  один выбирается в качестве целевой функции  $K_i = \phi \rightarrow \min (\max)$ , а остальные становятся ограничениями  $K_1 = R_1, K_2 = R_2, \dots, K_{n-1} = R_{n-1}$ .

2. Формирование комплексного критерия в размерном или безразмерном виде по выражениям (2.2) и (2.6).

3. Изменение (расширение) масштаба постановки задачи (по глобальному критерию).

При малом количестве признаков и альтернатив (десятки и сотни вариантов) можно организовать полный перебор, однако при большом количестве вариантов решений, исчисляемых тысячами и даже миллионами, даже при использовании совершенных быстродействующих ЭВМ – это бесперспективно [38].

Основная проблема выбора лучших решений из морфологического множества, дающего иногда астрономическое количество вариантов, это сокращение альтернатив и функциональных признаков.

В работе предложено применять комбинированный поэтапный метод сокращения признаков и альтернатив. На первом этапе образуют различные альтернативные комбинация из нескольких элементов и исключают из них наихудшие [198]. К наихудшим относят нереализуемые, наиболее дорогие по затратам, известные морально устаревшие комбинации, а также те, что незначительно устраняют недостатки известного с комбинаций. На втором

этапе применяют метод парных сравнений [26] с построением квадратичных матриц, содержащих одну или две итерации.

Рассмотрим процедуру выполнения первого этапа на абстрактном примере. Допустим морфологическое множество технических решений (ТР) представлено в виде морфологической таблицы (МТ) с четырьмя признаками (табл. 2.3). Согласно зависимости (1.9) общее число ТР:  $N = 4 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 2 = 120$ .

Из МТ (табл.2.3) выбираем признаки  $\Phi_3$  и  $\Phi_4$ , имеющих наименьшее число альтернатив, и образуем из этих признаков все возможные парные

Таблица 2.3

Абстрактная морфологическая таблица синтезируемого объекта с пятью признаками (функциональными элементами)

| Альтернатива | Признаки (функциональные) |          |          |          |
|--------------|---------------------------|----------|----------|----------|
|              | $\Phi_1$                  | $\Phi_2$ | $\Phi_3$ | $\Phi_4$ |
| 1            | $A_1^1$                   | $A_2^1$  | $A_3^1$  | $A_4^1$  |
| 2            | $A_1^2$                   | $A_2^2$  |          | $A_4^2$  |
| 3            | $A_1^3$                   | $A_2^3$  |          |          |
| 4            | $A_1^4$                   |          |          |          |

Примечание: Для альтернатив индекс внизу – номер признака, индекс сверху – номер альтернативы этого признака комбинации (табл.2.4), которые в данном абстрактном примере допустимые и равноценные, поэтому ни одну из них не относим к наихудшим и не исключаем.

Таблица 2.4

Комбинация альтернатив из двух признаков  $\Phi_3$  и  $\Phi_4$

|                            |               |               |
|----------------------------|---------------|---------------|
| $\Phi_3 \backslash \Phi_4$ | $A_4^1$       | $A_4^2$       |
| $A_3^1$                    | $A_3^1 A_4^1$ | $A_3^1 A_4^2$ |

Выбираем из исходной МТ (табл.2.3)следующий признак  $\Phi_2$  с наименьшим числом альтернатив. С помощью альтернатив этого признака и двух допустимых комбинаций в табл.2.4 образуем все возможные комбинации из трех признаков (табл.2.5). Сравнительный анализ этих комбинаций по

заданному критерию позволяет, например, три из них исключить,  $A_2^1 A_3^1 A_4^1$ ,  $A_2^2 A_3^1 A_4^1$ ,  $A_2^3 A_3^1 A_4^2$  (перечеркнуты).

Таблица 2.5

Сокращение комбинации из трех признаков

| $\Phi_3 \Phi_4 \backslash \Phi_2$ | $A_2^1$                                   | $A_2^2$                                   | $A_2^3$                                   |
|-----------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $A_3^1 A_4^1$                     | <del><math>A_2^1 A_3^1 A_4^1</math></del> | <del><math>A_2^2 A_3^1 A_4^1</math></del> | $A_2^3 A_3^1 A_4^1$                       |
| $A_3^1 A_4^2$                     | $A_2^1 A_3^1 A_4^2$                       | $A_2^2 A_3^1 A_4^2$                       | <del><math>A_2^3 A_3^1 A_4^2</math></del> |

Далее выбираем из исходной МТ (табл.2.3) последний признак  $\Phi_1$  с наименьшим числом альтернатив и с помощью оставшихся допустимых комбинаций в табл.2.5 образуем все возможные комбинации из четырех признаков (табл.2.6) с отсеком по определенному критерию, например, пяти нежелательных вариантов (перечеркнутых один раз).

Таблица 2.6

Сокращение комбинаций из четырех признаков

| $\Phi_2 \Phi_3 \Phi_4 \backslash \Phi_1$ | $A_1^1$                                         | $A_1^2$                                         | $A_1^3$                                         | $A_1^4$                                         |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $A_2^1 A_3^1 A_4^2$                      | $A_1^1 A_2^1 A_3^1 A_4^2$                       | <del><math>A_1^2 A_2^1 A_3^1 A_4^2</math></del> | $A_1^3 A_2^1 A_3^1 A_4^2$                       | <del><math>A_1^4 A_2^1 A_3^1 A_4^2</math></del> |
| $A_2^2 A_3^1 A_4^2$                      | $A_1^1 A_2^2 A_3^1 A_4^2$                       | $A_1^2 A_2^2 A_3^1 A_4^2$                       | <del><math>A_1^3 A_2^2 A_3^1 A_4^2</math></del> | <del><math>A_1^4 A_2^2 A_3^1 A_4^2</math></del> |
| $A_2^3 A_3^1 A_4^1$                      | <del><math>A_1^1 A_2^3 A_3^1 A_4^1</math></del> | <del><math>A_1^2 A_2^3 A_3^1 A_4^1</math></del> | <del><math>A_1^3 A_2^3 A_3^1 A_4^1</math></del> | $A_1^4 A_2^3 A_3^1 A_4^1$                       |

Осталось семь вариантов ТР, которые можно записать как сочетание альтернатив четырёх признаков. Если допустимых вариантов довольно много, то проводится сокращение по дополнительным наиболее важным показателям (критериям), например, КПД, расход металла, стоимость комплектующих и т. п. (в табл. 4 перечеркнуты дважды). Оставшиеся варианты после сокращения двух сочетаний запишем в виде морфологических формул [124]:

$$X_1 = A_1^1 A_2^1 A_3^1 A_4^2; X_2 = A_1^1 A_2^2 A_3^1 A_4^2; X_3 = A_1^1 A_2^2 A_3^1 A_4^2;$$

$$X_4 = A_1^2 A_2^2 A_3^1 A_4^2; X_5 = A_1^4 A_2^3 A_3^1 A_4^1; X_{12} = A_1^4 A_2^3 A_3^1 A_4^1.$$

Из общего числа вариантов  $N = 24$  по этапам число исключений составило (табл.2.5, 2.6),  $N^1 = 3 + 7 = 10$ , что дало оставшихся вариантов для сравнения  $N^2 = 5$ , т. е. в 4,8 раза меньше. При использовании на последнем этапе метода парных сравнений [26] по основному или комплексному показателю качества [107-109] выбирают 1...2 наиболее эффективных

вариантов ТР для дальнейшей проработки. Таким образом, предложенный метод отсеивания ненужных вариантов позволил сократить время перебора и трудоемкость выбора от 12 до 24 раз.

Такой метод отбора лучших решений целесообразно применять на верхних уровнях морфологического синтеза (выбор лучших идей или принципов действия и структурных схем).

### **2.3. Предпосылки генетической классификации зажимных механизмов**

В современной науке проблема создания новых ТС успешно решается применением нового методологического подхода, предусматривающего системный анализ, учение об эволюции, морфологический анализ и другие методы поиска технических решений [124, 209-211, 233].

Системный подход позволяет удачно объединить структурные исследования в различных областях науки и техники благодаря его междисциплинарному характеру с использованием соответствующих философских категорий, положений общей теории систем [75, 98].

Наглядным примером междисциплинарности и общности системного подхода может служить перенос теории эволюции электромеханических систем [283] на механические и другие системы [99, 100, 106, 113].

Настоящая диссертация посвящена некоторым вопросам эволюции развития и синтеза осесимметричных зажимных устройств (зажимных патронов) для вращающихся объектов зажима (заготовок, деталей, инструментов) различной формы. Проведём аналогию между электромеханической, системой, например, электродвигателем (рис. 2.5, а) и системой вращающегося зажимного устройства, например, цанговым зажимным патроном (рис. 2.5, б).

Результаты сравнения (табл.2.7) показывают, что энергетические потоки в обеих системах одинаковые.

Если в электромеханической системе элементарным источником электромагнитного поля на генетическом уровне является электрический заряд,



то в механической системе вращающегося зажимного устройства элементарным источником упруго-силового поля в месте контакта зажимного элемента (ЗЭ) и объекта зажима (ОЗ) на генетическом уровне является элементарная сила  $dT$ , приложенная нормально к материальной точке на поверхности контакта.

В последнем случае с учётом размеров поверхности (или линии) контакта получим нормальное напряжение  $\frac{dT}{dF}$  или удельную силу  $\frac{dT}{dL}$  (здесь  $dF$  – элементарная площадка поверхности контакта между ЗЭ и ОЗ,  $dL$  – элементарная линия вдоль поверхности контакта между ЗЭ и ОЗ).

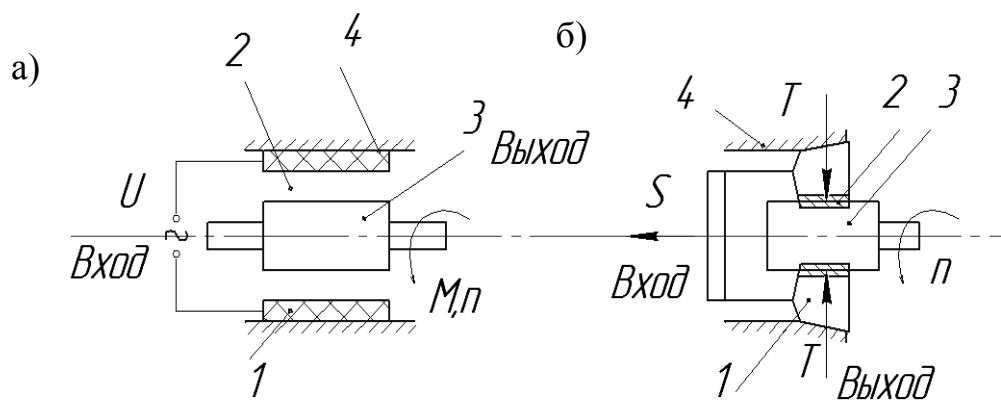


Рис.2.5. Аналогия между электромеханической системой (а) и системой вращающегося зажимного устройства механического исполнения (б)

Таблица 2.7

Сравнение признаков систем

| № поз. | Электромеханическая система (рис.2.15, а)     | Система вращающегося зажимного устройства (рис.2.10, б)                        |
|--------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Вход   | Электрический ток с напряжением U             | Осевая сила S от привода зажима                                                |
| 1      | Статор                                        | Зажимной элемент (ЗЭ)                                                          |
| 2      | Электромагнитное поле                         | Упруго-силовое поле                                                            |
| 3      | Ротор                                         | Объект зажима (ОЗ)                                                             |
| 4      | Корпус                                        | Шпиндель                                                                       |
| Выход  | Крутящий момент M и частота вращения ротора n | Радиальная (нормальная) сила зажима T и частота вращения объекта закрепления n |

Аналогично с предложенной проф. Шинкаренко В.Ф. генетической классификацией первичных источников электромагнитного поля [283] может быть предложена генетическая классификация источников упруго-силового поля, в основу которой положены пространственные формы контактного взаимодействия ЗЭ с ОЗ, обобщённые геометрическими классами поверхностей силовых (упруго-силовых) полей: цилиндрическими ( $G_{цл}$ ); коническими ( $G_{кн}$ ); плоскими ( $G_{пл}$ ); тороидальными плоскими ( $G_{тп}$ ); сферическими ( $G_{сф}$ ); тороидальными цилиндрическими ( $G_{тц}$ ). Пространственные формы контактного взаимодействия определяются пространственными формами ОЗ и ЗЭ. При совпадении форм ОЗ и ЗЭ дискретным значениям базового признака  $P_G$  ставится в соответствие подмножество элементов, на котором определено шесть геометрических классов поверхностей [283]:

$$P_G = \{ G_{цл}, G_{кн}, G_{пл}, G_{тп}, G_{сф}, G_{тц} \} \subset S_0, \infty. \quad (2.12)$$

В общем случае  $G_i \subset S_0$ .

Возможны сочетания различных форм поверхностей или их преобразования за счёт несовпадения осей вращения геометрических фигур, что даёт дополнительные классы геометрических поверхностей: эксцентриково-цилиндрические ( $G_{эцл}$ ), эксцентриково-конические ( $G_{экн}$ ), плоско-конические ( $G_{плк}$ ) или клиновые ( $G_{кл}$ ) и др.

Однако из технико-экономических соображений, технических ограничений и уровня технологий область существования первичных источников поля, которая определяет генофонд любого класса механических систем вращающегося зажимного устройства на определённом этапе его эволюции, может быть ограничена.

Для генетической классификации ниже рассмотрим структуру осесимметричных ЗМ, симметрию и топологию, а также принцип целостности их структур.

### 2.3.1. Структура зажимного механизма (ЗМ)

Структура ЗМ – совокупность взаимосвязанных элементов, образующих целостность системы и обуславливающих ее функционирование на основе

принципов преобразования энергии от источника до объекта закрепления в виде потенциальной энергии упруго-напряженного состояния контакта (сопряжения) «зажимной элемент-объект закрепления». Структура ЗМ представляет совокупность взаимосвязанных элементов, образующих целостность системы и обуславливающих функционирование на основе принципов преобразования энергии от источника до объекта зажима и передачи упруго силового поля для создания потенциальной энергии упруго-напряженного состояния контактного взаимодействия зажимных элементов и объекта зажима.

Структуры ЗМ относят к динамическим преобразователям энергии в виде силового потока. Эти структуры являются трехмерными объектами с явно выраженной геометрической информацией, что связано с многовариантностью возможных пространственных компоновок и разнообразием форм активных частей (зажимных элементов, передаточно-усилительных и преобразовательных звеньев).

Кроме этого структура еще воспроизводит пространственную геометрию и топологию взаимосвязанных силовых контуров и силового потока. Потому все ЗМ в исполнительной части (зажимном патроне или зажимном приспособлении) и сило-преобразующие явления имеют соответствующие геометрические прообразы (геометрические модели). Изучение принципов структурной организации ЗМ непосредственно связано с анализом пространственной геометрии и взаимной ориентации сило-передающих и напряженных поверхностей.

Осуществление процесса преобразования энергии силового потока возможно лишь при условии наличия полной внутренней упорядоченности и закономерностей связей, совокупность которых определяет понятие структурной организации ЗМ.

Под организацией в теории структур имеется в виду внутренняя упорядоченность, согласованность отдельных элементов структуры [259, 270, 278]. Основными критериями, которые определяют структурную организацию произвольного ЗМ, являются: наличие хотя бы двух активных частей –

(подвижной (зажимной элемент (ЗЭ)) и неподвижной (объект закрепления (ОЗ)) и существование согласованных силовых связей между ними, что обеспечивает процесс преобразования энергии в необходимую силу зажима объекта.

По аналогии с генетической электромеханикой [283] доминантной компонентой произвольного ЗМ является силовое поле (упруго-напряженное состояние), свойства которого определяются законами механики деформированного тела.

### **2.3.2. Симметрия и топология структур ЗМ**

Ведущая роль симметрии в поисках закономерностей и объяснения природы физических явлений в современной науке общепризнано.

Вполне очевидно и понимание принципа симметрии как общенаучной методологической основы, с использованием которой осуществляется взаимопроникновение и объединение разных теорий и установление общих закономерностей структурной организации систем различной физической природы [16, 254].

Существует непосредственная связь между понятиями «симметрия и структура» любой системы. Если система имеет определенную структуру, то она обязательно содержит соответствующую этой структуре симметрию [66].

В соответствии с теоремой Нетер [283], понятие симметрии непосредственно связано с законами сохранения (энергии, количества движения и др.).

Структуры ЗМ имеют геометрические свойства с характерными формами взаимодействующих активных частей, пространственной ориентацией взаимосвязанных контуров замыкания силовых потоков, векторными свойствами упругих деформаций, сил и моментов.

Принципы симметрии являются основой анализа структуры силового поля, они определяют численные аналогии и гомологии, которые имеют место в строении и функционировании разных видов преобразования энергии в ЗМ.

Топологичными называются свойства ЗМ, которые не меняются вследствие гомеоморфных отображений, т.е. не нарушаются при взаимно

однозначных и взаимно непрерывных преобразованиях. Таким образом, топологические преобразования непосредственно связаны с трансформацией (деформацией) пространственной формы объектов (растяжениями, изгибами, сдвигами, скручиваниями и др.) при условии отсутствия разрывов и склеиваний. Поэтому их применение возможно лишь в случаях, когда ЗМ как объекты принадлежат к одному топологическому пространству. В состав топологических признаков объекта, которые остаются инвариантными относительно топологических преобразований, как известно, принадлежат такие признаки, как ориентированность, размерность и связываемость [256].

Методы симметрии и топологии при условии полной идеализации постановки задачи следует рассматривать как универсальную методологическую основу обобщения и определения принципов формо- и структурообразования систем ЗМ.

Силовая симметрия источника силового поля подчиняется законам теоретической механики и, в частности, статике твердого тела – разделу механики, в котором излагается общее учение о силах и изучаются условия равновесия материальных тел, находящихся под действием сил.

Условия равновесия тела существенно зависят от того, является ли это тело твёрдым, жидким или газообразным.

### **2.3.3. Принципы целостности структуры ЗМ**

Концепция целостности динамических эволюционирующих систем, имеющих сложное строение, является одной из ключевых при проведении структурно-системных исследований [124, 125].

Задача определения целостности системы обуславливает необходимость декомпозиции ее структуры и определения минимальные совокупности элементов и взаимосвязей между ними, что обеспечивает целостные свойства данной системы. Процедура декомпозиции структуры любой системы принадлежит к классу индетерминированных задач, а их решение предусматривает использование творческого подхода.

Целостность системы определяется двумя закономерностями [98]:

- целое не сводится к простой сумме частей;
- изменение в одной части обуславливает изменение во всех остальных частях и в системе в целом.

#### 2.4. Введение понятия механического гена и генетическая классификация зажимных механизмов

В генетике термин ген обозначает материальный носитель информации, созданной природой, с помощью которого осуществляется передача наследственной информации в ряде поколений [171].

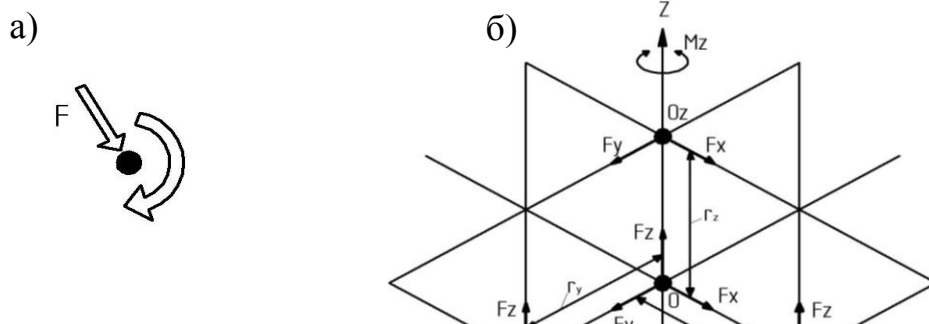
Под это определение подпадают и волновые процессы [283, 284] элементарных механических структур природного происхождения – энергетические напряженные силовые потоки, распространяемые с определенной скоростью от источника через преобразователи энергии к объекту закрепления и создающие в контакте зажимной элемент – объект закрепления упруго-напряженное состояние.

Если в электромеханических системах электромагнитным геном является элементарный источник электромагнитного поля (движущийся заряд, микроструктуры Ампера) [283], то в любых механических системах механическим геном является элементарный источник энергетического (силового) поля, которым может служить материальная точка [129, 131, 137, 138], движущаяся в пространстве и переносящая информацию о силе  $F$  и (или) моменте на плече  $r$ ,  $M = F \cdot r$ , (рис.2.6, а). В декартовой системе координат XYZ (рис.2.6,б) источниками движения могут быть три силы  $F \in F_x, F_y, F_z$  и три момента сил  $M \in M_x, M_y, M_z$ , где:

$$M_x = F_y \cdot r_z = F_z \cdot r_y; \quad (2.12)$$

$$M_y = F_x \cdot r_z = F_z \cdot r_x;$$

$$M_z = F_x \cdot r_y = F_y \cdot r_x.$$



$$M = F \cdot r$$

*Рис.2.6. Механический ген – движущаяся материальная точка*

Возможен перенос понятия механического гена к зажимным механизмам с учетом теории напряжений. В теории напряжений [213, 235] различают 2 основных вида внешних сил: объемные и поверхностные. К объемным силам относятся силы тяжести, инерции и др. Поверхностные силы возникают при контактном взаимодействии двух и более твердых тел.

Рассмотрим сплошное изотропное тело, которое находится в равновесии под действием систем внешних сил. В результате действия этих сил в теле возникают дополнительные силы взаимодействия между отдельными его частицами, т.е. возникают внутренние силы. Рассечем мысленно это тело на 2 части и рассмотрим в окрестности произвольной точки М элемент площади  $dF$ , ориентация которого задается вектором нормали  $\vec{n}$  (ось  $n-n$  на рис. 2.7).

Внутренние силы ввиду малости площадки  $dF$  можно считать равномерно распределенными, и поэтому их равнодействующая  $\vec{dP}$  будет приложена в т.М. В общем случае направление вектора  $\vec{dP}$  не совпадает с нормалью к площадке. Вектор  $\vec{Pn} = \frac{\vec{dP}}{dF}$  называется полным напряжением. Необходимо отметить, что вектор полного напряжения  $\vec{Pn}$  зависит не только от положения т.М, но и от ориентации площадки.

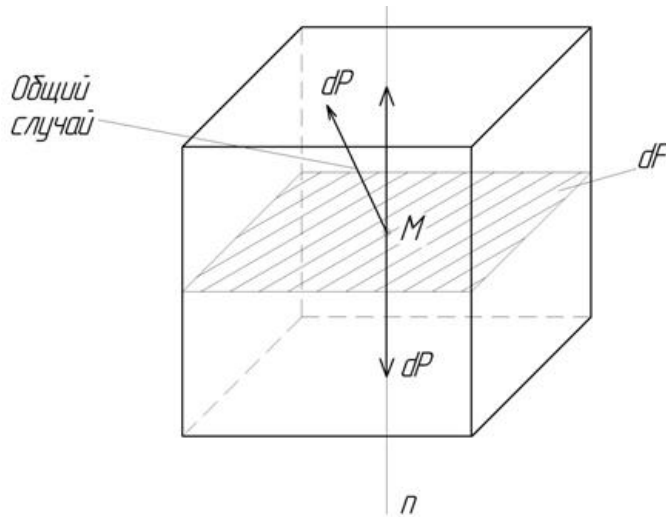


Рис.2.7. Сплошное изотропное тело, находящееся в равновесии

Полное напряжение целесообразно разложить на 2 составляющие: перпендикулярно к поверхности, т.е. нормальное напряжение  $\sigma_n$ , и параллельную поверхности, т.е. касательное напряжение  $\tau_n$ . Напряжение  $\overline{P_n}$  можно также представить в виде проекций  $P_{nx}$ ,  $P_{ny}$ ,  $P_{nz}$  на координатные оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Очевидно, что в произвольной т.М внутри деформируемого тела можно построить внутри деформируемого тела можно построить бесконечно большее число площадок, каждой из которых будет соответствовать свой вектор полного напряжения.

Совокупность векторов напряжений, действующим по всем площадкам построенным в данной точке, напряженным состоянием в этой точке. Выделим теперь в теле элементарный параллелепипед, грани которого перпендикулярны осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (рис. 2.7). Так как размеры этого параллелепипеда бесконечно малы, то одноименные напряжения, действующие на противоположных гранях, будут практически равны между собой. Таким образом напряженное состояние в любой точке тела определяется совокупностью девяти напряжений, которую называют тензором напряжений [218].

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Здесь индексы при  $\sigma$  и  $\tau$  показывают направление действия напряжений согласно рис. 2.8.



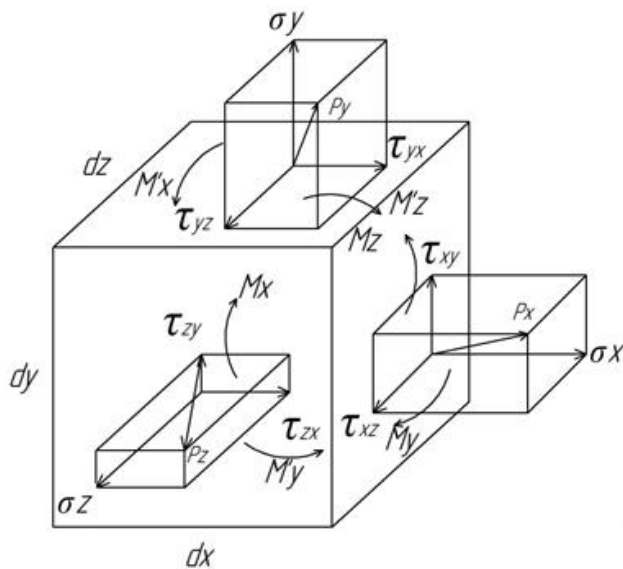


Рис.2.8. Напряжения, действующие на гранях элементарного параллелепипеда

Число независимых компонент напряженного состояния может быть уменьшено до шести, если учесть закон парности касательных напряжений.

Рассмотрим равновесие элементарного объема. Положим, что действующие напряжения приложены в центрах граней параллелепипеда и запишем суммы моментов относительно осей X, Y, Z:

$$\begin{aligned} M_x - M'_x &= 0 & \tau_{yz}(\alpha_x \alpha_y) \alpha_z - \tau_{yz}(\alpha_x \alpha_z) \alpha_y &= 0 \\ M_y - M'_y &= 0 & \tau_{xz}(\alpha_y \alpha_z) \alpha_x - \tau_{xz}(\alpha_x \alpha_y) \alpha_z &= 0 \\ \tau_{yx}(\alpha_x \alpha_z) \alpha_y - \tau_{xy}(\alpha_y \alpha_z) \alpha_x &= 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Отсюда следует, что  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ;  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ;  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ .

Таким образом касательные напряжения, действующие на двух взаимно-перпендикулярных площадках, равны по величине и направлены одинаково по отношению к ребрам.

Нормальное напряжение от приложения нормальной элементарной силы  $dP$ , приложенной к материальной точке на элементарной площадке  $dF$  и действующей зеркально согласно принципа сохранения упруго-силовой симметрии (принцип Даламбера и второй закон Ньютона – сила действия равна силе противодействия) можно считать условной механической хромосомой в виде контактного взаимодействия двух элементарных тел – двух условных механических генов (движущихся материальных точек).

**Первичный источник силового поля (ПИСП)** – пространственная поверхность контактного взаимодействия двух тел. Большое разнообразие источников силового поля технического и природного происхождения обуславливают необходимость введения понятия ПИСП.

Под первичным источником силового поля будем понимать пространственную упруго-напряженную поверхность, на которой заданы вид

(стационарный, переменный и др.) и закон распределения поля (стационарный, волновой, пульсирующий и др.) поля.

Для преимущественного большинства ЗМ и зажимных устройств (ЗУ) – патронов, оправок, приспособлений таким законом есть распределение поверхностных сил контактного взаимодействия двух и более твердых тел.

Поэтому для таких ПИСП пространственная поверхность первичного источника поля будет определяться обводной геометрической формой, образованной направленным движением поверхностной упругосиловой волны поля при условии, что группа упругосиловой симметрии такого источника является высшей в отношении групп симметрии потенциального возможных упругосиловых структур высшего уровня организации, которые могут быть синтезированы на его основе.

Независимо от происхождения все источники ПИСП можно разделить на природный (магнетит, электростатик) и искусственные (технические), т.е. антропогенного происхождения (катушка с током, обмотка статора, электродвигатель, гидродвигатель, пневмодвигатель и др.).

Для любого ЗМ всегда основным требованием является обеспечением необходимой силы зажима для осуществления заданных требованиях к качеству выпускаемой продукции. Обеспечение требуемой силы является необходимым условием, но недостаточным из-за повышенных требованиях к жесткости, точности, долговечности, прочности, безопасности, быстрой переналаживаемости и т. д [111].

Значительных успехов в развитии теории эволюции электромеханических систем достиг проф. Шинкаренко В.Ф. [283], который создал генетическую модель строения и развития электромеханической структуры, положив в основу понятие первичного источника поля (ПИП) как пространственной токнесущей поверхности, на которой заданы вид и закон распределения поля (стационарный, волновой, пульсирующий и др.).

По аналогии с электромеханическими системами можно рассматривать другие технические системы, в частности, механические на следующих уровнях по мере усложнения структуры: генетическом, хромосомном, объектном,

популяционном, видовом, системном, метасистемном [283]. Для различных механических систем есть свои особенности эволюции развития. Однако с точки зрения системного подхода все подчиняется единым принципам. Это касается и ЗМ различного назначения, что ранее проиллюстрировано на примере цанговых патронов [120, 125, 129], а далее будет рассмотрено для более широкого круга ЗМ для деталей типа тел вращения.

Передачу энергии в пространстве можно представить в виде силового (энергетического) потока от одной материальной точки  $O_1$  (матрица в системе координат  $X_1 Y_1 Z_1$ ) к другой материальной точки  $O_2$  (матрице в системе координат  $X_2 Y_2 Z_2$ ), (рис.2.9):

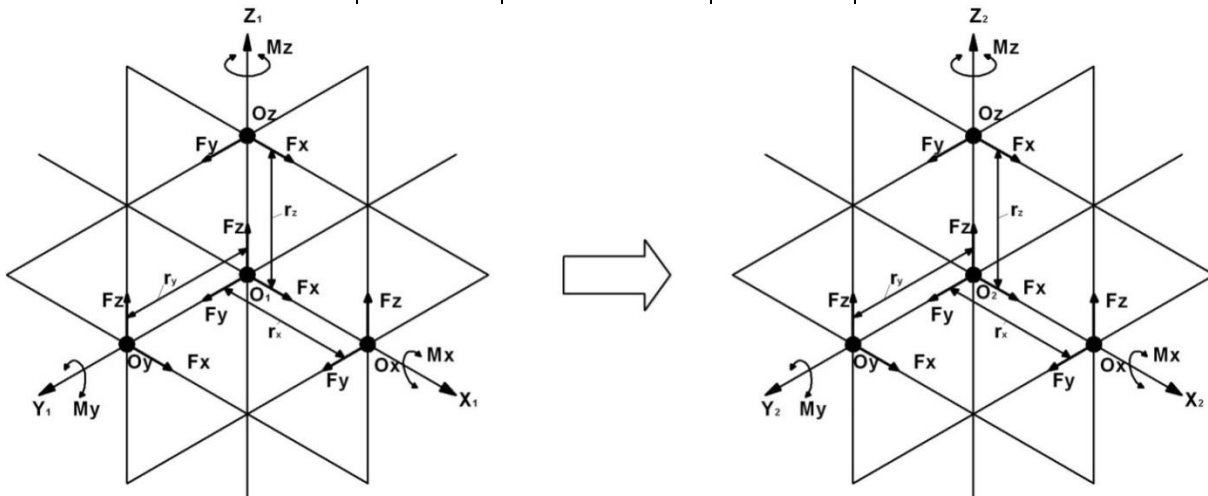
$$M_{EN} = \begin{vmatrix} \pm F_{X1} \\ \pm F_{Y1} \\ \pm F_{Z1} \\ \pm M_{X1} \\ \pm M_{Y1} \\ \pm M_{Z1} \end{vmatrix} \rightarrow M_{EX} = \begin{vmatrix} \pm F_{X2} \\ \pm F_{Y2} \\ \pm F_{Z2} \\ \pm M_{X2} \\ \pm M_{Y2} \\ \pm M_{Z2} \end{vmatrix} \quad (2.15)$$


Рис.2.9. Обобщенная модель силовых (энергетических) потоков в механической системе

С учетом принципа симметрии [16, 66, 254, 285] и эволюции систем [253, 283] в любой механической системе всего силовых (энергетических) потоков при одном входе и одном выходе будет:  $N_{\text{сп}} = 12 \cdot 12 = 144$ .

Для ЗМ на выходе могут быть только силы, нормальные к поверхностям объекта зажима в системе координат  $X_2 Y_2 Z_2$ , поэтому силовых (энергетических) потоков будут меньше:

$$M'_{EN} = \begin{vmatrix} \pm F_{X1} \\ \pm F_{Y1} \\ \pm F_{Z1} \\ \pm M_{X1} \\ \pm M_{Y1} \\ \pm M_{Z1} \end{vmatrix} \rightarrow M'_{EX} = \begin{vmatrix} \pm F_{X2} \\ \pm F_{Y2} \\ \pm F_{Z2} \end{vmatrix} \quad (2.16)$$

и составит  $N'_{сп} = 12 \cdot 6 = 72$ .

При зажиме объектов типа тел вращения (рис.2.10) радиальная сила зажима на выходе может менять координату  $Z_2$  на  $Y_2$ , поэтому силовых потоков станет ещё меньше, так как  $|\pm F_{y2}| = |\pm F_{z2}|$ ,

$$M''_{EN} = \begin{vmatrix} \pm F_{X1} \\ \pm F_{Y1} \\ \pm F_{Z1} \\ \pm M_{X1} \\ \pm M_{Y1} \\ \pm M_{Z1} \end{vmatrix} \Rightarrow M''_{EX} = \begin{vmatrix} \pm F_{X2} \\ \pm F_{Y2} \end{vmatrix} \quad (2.17)$$

и составит  $N'_{сп} = 12 \cdot 4 = 48$  (табл.2.8).

При зажиме плоских деталей, у которых толщина значительно меньше их диаметра силовых потоков становится ещё меньше, а именно  $N'_{сп} = 8 \cdot 2 = 16$ .

$$M'''_{EX} = \begin{vmatrix} \pm F_{X1} \\ \pm F_{Y1} \\ \pm M_{X1} \\ \pm M_{Y1} \end{vmatrix} \Rightarrow M'''_{EN} = |\pm F_{X2}| \quad (2.18)$$

Изменение направления силы  $F$  или момента  $M$  вместо знака перед ними ( $\pm$ ) целесообразно обозначать следующим образом: если направление положительное в сторону положительной оси координат знак (+) не ставится, если направление противоположное, то вместо знака (–) сила или момент подчёркиваются чертой снизу, т.е.  $-F \rightarrow \underline{F}$ ,  $-M \rightarrow \underline{M}$  (см. табл. 2.8).

Поскольку основными объектами исследования является ЗМ для тел вращения, конструктивно вписанные в шпиндельный узел для зажима заготовки (токарные, шлифовальные, зубообрабатывающие станки) или для зажима инструмента (сверлильно-фрезерные и многоцелевые станки), целесообразно применять цилиндрическую систему координат (рис.2.10).

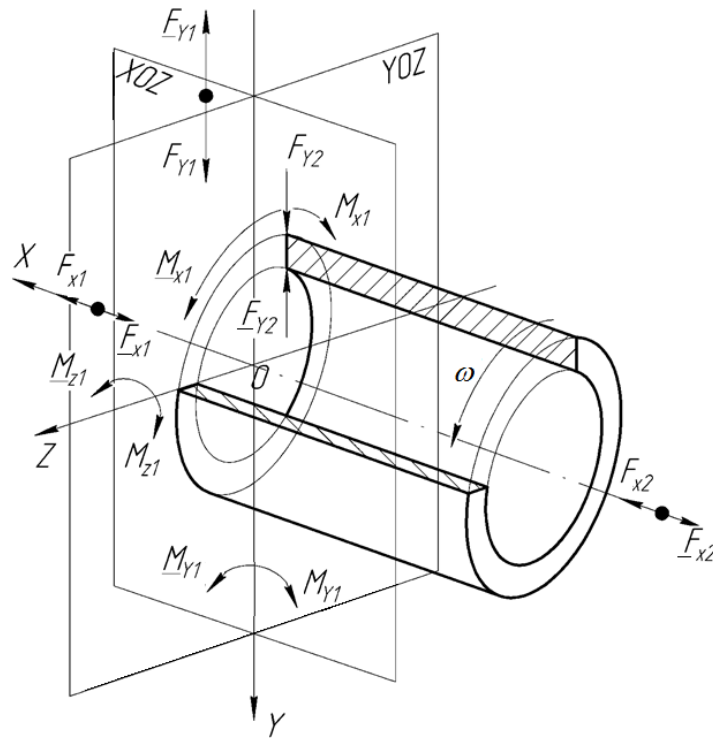


Рис.2.10. Размещение сил и моментов для зажима детали типа тел вращения в декартовой системе координат

Поскольку основными объектами исследования является ЗМ для тел вращения, конструктивно вписанные в шпиндельный узел для зажима заготовки (токарные, шлифовальные, зубообрабатывающие станки) или для зажима инструмента (сверлильно-фрезерные и многоцелевые станки), целесообразно применять цилиндрическую систему координат (рис.2.11).

Таким образом вместо обозначения силы  $F_x$  вдоль оси вращения (по оси X) вводим обозначение  $F_a$ , вместо сил  $F_y$  и  $F_z$  в плоскости YOZ, перпендикулярной оси вращения, вводим обозначение радиальной  $F_r$  и тангенциальной  $F_t$  силы, соответственно вместо моментов  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  вокруг осей X, Y, Z обозначим их как моменты осевой  $M_a$ , радиальный  $M_r$  и тангенциальный  $M_t$ .

Таблица 2.8

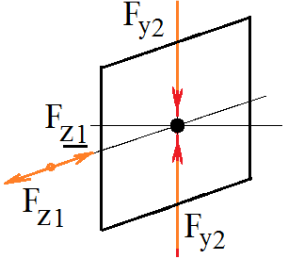
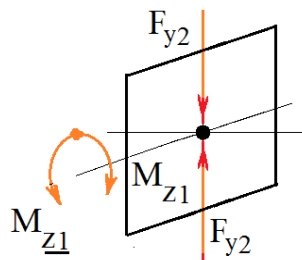
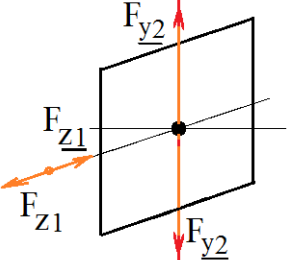
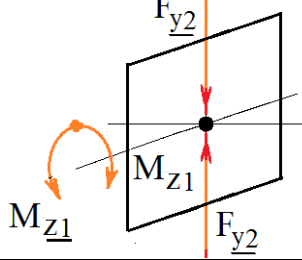
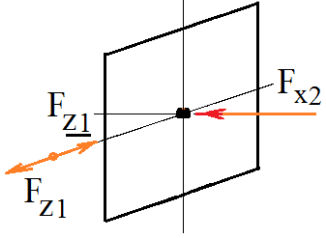
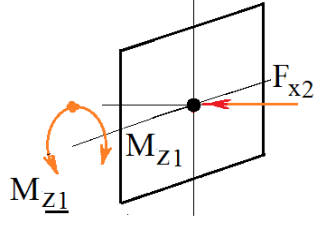
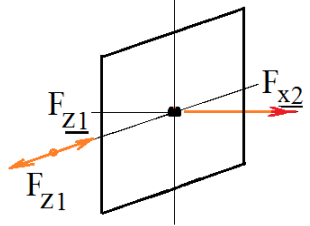
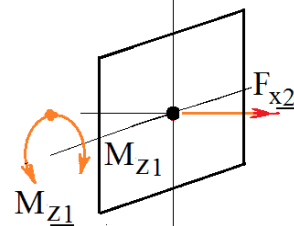
Классификация энергетических (силовых) потоков в системе вращающегося зажимного устройства одинарного зажима в декартовой системе координат

| №<br>n/n | Схема | Код               | №<br>n/n | Схема | Код               |
|----------|-------|-------------------|----------|-------|-------------------|
| 1        | 2     | 3                 | 4        | 5     | 6                 |
| 1        |       | $F_{X1} - F_{Y2}$ | 25       |       | $M_{X1} - F_{Y2}$ |

|    |  |                                           |    |  |                                           |
|----|--|-------------------------------------------|----|--|-------------------------------------------|
| 2  |  | $\underline{F_{X1}} - \underline{F_{Y2}}$ | 26 |  | $\underline{M_{X1}} - F_{Y2}$             |
| 3  |  | $F_{X1} - \underline{F_{Y2}}$             | 27 |  | $M_{X1} - \underline{F_{Y2}}$             |
| 4  |  | $\underline{F_{X1}} - F_{Y2}$             | 28 |  | $\underline{M_{X1}} - F_{Y2}$             |
| 5  |  | $F_{Y1} - F_{Y2}$                         | 29 |  | $M_{Y1} - F_{Y2}$                         |
| 6  |  | $\underline{F_{Y1}} - F_{Y2}$             | 30 |  | $\underline{M_{Y1}} - F_{Y2}$             |
| 7  |  | $F_{Y1} - \underline{F_{Y2}}$             | 31 |  | $M_{Y1} - \underline{F_{Y2}}$             |
| 8  |  | $\underline{F_{Y1}} - \underline{F_{Y2}}$ | 32 |  | $\underline{M_{Y1}} - \underline{F_{Y2}}$ |
| 9  |  | $F_{X1} - F_{X2}$                         | 33 |  | $M_{X1} - F_{X2}$                         |
| 10 |  | $\underline{F_{X1}} - F_{X2}$             | 34 |  | $\underline{M_{X1}} - F_{X2}$             |
| 11 |  | $F_{X1} - \underline{F_{X2}}$             | 35 |  | $M_{X1} - \underline{F_{X2}}$             |
| 12 |  | $\underline{F_{X1}} - \underline{F_{X2}}$ | 36 |  | $\underline{M_{X1}} - \underline{F_{X2}}$ |

продолжение табл. 2.8

|    |   |                               |    |   |                               |
|----|---|-------------------------------|----|---|-------------------------------|
| 1  | 2 | 3                             | 4  | 5 | 6                             |
| 13 |   | $F_{Y1} - F_{X2}$             | 37 |   | $M_{Y1} - F_{X2}$             |
| 14 |   | $\underline{F_{Y1}} - F_{X2}$ | 38 |   | $\underline{M_{Y1}} - F_{X2}$ |
|    |   | $F_{Y1} -$                    |    |   | $M_{Y1} -$                    |

|    |                                                                                     |                                           |    |                                                                                      |                                           |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 15 |                                                                                     | $\underline{F_{X2}}$                      | 39 |                                                                                      | $\underline{F_{X2}}$                      |
| 16 |                                                                                     | $\underline{F_{Y1}} - \underline{F_{X2}}$ | 40 |                                                                                      | $\underline{M_{Y1}} - \underline{F_{X2}}$ |
| 17 |    | $F_{Z1} - F_{Y2}$                         | 41 |    | $M_{Z1} - F_{Y2}$                         |
| 18 |                                                                                     | $\underline{F_{Z1}} - F_{Y2}$             | 42 |                                                                                      | $\underline{M_{Z1}} - F_{Y2}$             |
| 19 |    | $F_{Z1} - \underline{F_{Y2}}$             | 43 |    | $M_{Z1} - \underline{F_{Y2}}$             |
| 20 |                                                                                     | $\underline{F_{Z1}} - F_{Y2}$             | 44 |                                                                                      | $\underline{M_{Z1}} - F_{Y2}$             |
| 21 |  | $F_{Z1} - F_{X2}$                         | 45 |  | $M_{Z1} - F_{X2}$                         |
| 22 |                                                                                     | $\underline{F_{Z1}} - F_{X2}$             | 46 |                                                                                      | $\underline{M_{Z1}} - F_{X2}$             |
| 23 |  | $F_{Z1} - \underline{F_{X2}}$             | 47 |  | $M_{Z1} - \underline{F_{X2}}$             |
| 24 |                                                                                     | $\underline{F_{Z1}} - \underline{F_{X2}}$ | 48 |                                                                                      | $\underline{M_{Z1}} - \underline{F_{X2}}$ |

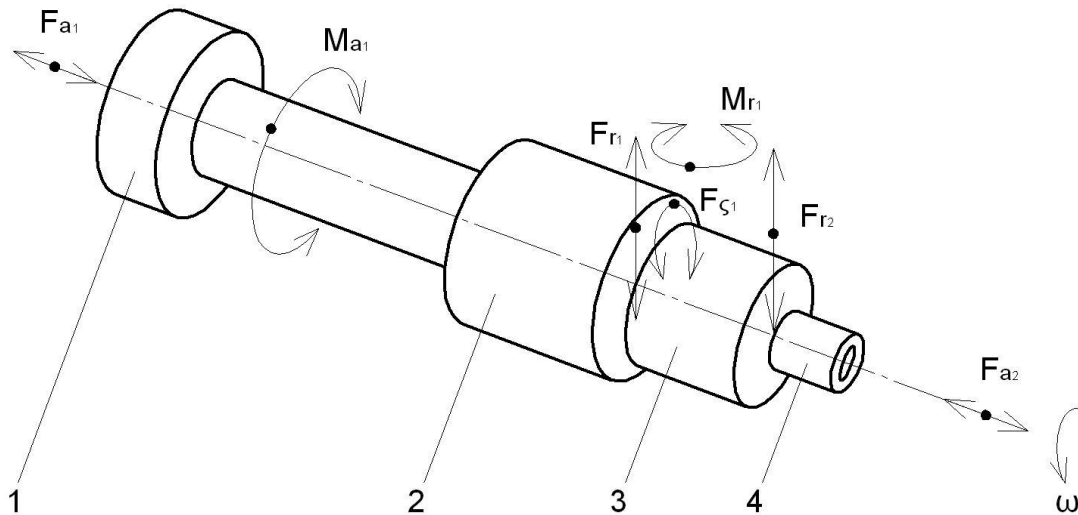


Рис.2.11. Размещение сил и моментов для зажима детали типа тела вращения в цилиндрической системе координат шпиндельного узла станка:

1 – привод зажима (ПрЗ); 2 – шпиндельный узел (ШУ);  
3 – зажимной патрон (ЗП); 4 – объект зажима (ОЗ)

Тогда  $F_r$  вместо классификации схем (табл.2.8) все энергетические (силовые) потоком можно представить в виде таблицы хромосом «вход - выход» (табл.2.9), соответствующей измененной матрице преобразований (2.19):

$$M^{EN} = \begin{array}{c} F_{a1} \\ \underline{F}_{a1} \\ F_{r1} \\ \underline{F}_{r1} \\ F_{\tau1} \\ \underline{F}_{\tau1} \\ M_{a1} \\ \underline{M}_{a1} \\ M_{r1} \\ \underline{M}_{r1} \\ M_{\tau1} \\ \underline{M}_{\tau1} \end{array} \Rightarrow M^{EX} = \begin{array}{c} F_{a2} \\ \underline{F}_{a2} \\ F_{r2} \\ \underline{F}_{r2} \end{array} \quad (2.19)$$

Следует заметить, что при введении на выходе тангенциальной силы  $F_{\tau}$ , направленной по касательной на определенном радиусе, количество силовых потоков даже для вращающихся объектов увеличится с 48 до 72.

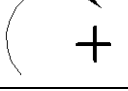
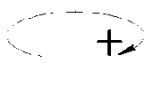
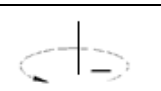
Выполненные патентно-информационные исследования и анализ источников [4, 56, 87, 89, 104, 107-112, 177, 186, 190, 225, 236, 301, 302] показали, что в практике проектирования ЗМ из всего количества силовых



потоков-порождающей системы (рис. 2.12) наиболее часто применяется родительская хромосома  $F_{a_1} - F_{r_2}$ , а для  $2/3$  родительских хромосом еще не известно их применение.

Таблица 2.9

Классификация энергетических (силовых) потоков (Порождающая система) вращающегося ЗМ одинарного зажима в цилиндрической системе координат

| От источника энергии |                      | Вид усилия (момент)                  | Выход к объекту зажима                                                              |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |
|----------------------|----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                      |                      |                                      | Направление                                                                         | Выходное усилие $F_2$                                                             |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |
|                      |                      |                                      |                                                                                     | Осевое $F_{a2}$                                                                   |                                                                                    | Радиальное $F_{r2}$                                                                 |                                                                                     |
|                      |                      |                                      |                                                                                     |  |  |  |  |
| Вход                 | Входное усилие $F_1$ | Осевое $F_{a1}$                      |    | $F_{a1} - F_{a2}$                                                                 | $F_{a1} - \underline{F}_{a2}$                                                      | $F_{a1} - F_{r2}$                                                                   | $F_{a1} - \underline{F}_{r2}$                                                       |
|                      |                      |                                      |    | $\underline{F}_{a1} - F_{a2}$                                                     | $\underline{F}_{a1} - \underline{F}_{a2}$                                          | $\underline{F}_{a1} - F_{r2}$                                                       | $\underline{F}_{a1} - \underline{F}_{r2}$                                           |
|                      |                      | Радиальное $F_{r1}$                  |   | $F_{r1} - F_{a2}$                                                                 | $F_{r1} - \underline{F}_{a2}$                                                      | $F_{r1} - F_{r2}$                                                                   | $F_{r1} - \underline{F}_{r2}$                                                       |
|                      |                      |                                      |  | $\underline{F}_{r1} - F_{a2}$                                                     | $\underline{F}_{r1} - \underline{F}_{a2}$                                          | $\underline{F}_{r1} - F_{r2}$                                                       | $\underline{F}_{r1} - \underline{F}_{r2}$                                           |
|                      |                      | Тангенциальное $F_{\tau1}$           |  | $F_{\tau1} - F_{a2}$                                                              | $F_{\tau1} - \underline{F}_{a2}$                                                   | $F_{\tau1} - F_{r2}$                                                                | $F_{\tau1} - \underline{F}_{r2}$                                                    |
|                      |                      |                                      |  | $\underline{F}_{\tau1} - F_{a2}$                                                  | $\underline{F}_{\tau1} - \underline{F}_{a2}$                                       | $\underline{F}_{\tau1} - F_{r2}$                                                    | $\underline{F}_{\tau1} - \underline{F}_{r2}$                                        |
|                      | Входной момент $M_1$ | Вокруг оси вращения $M_{a1}$         |  | $M_{a1} - F_{a2}$                                                                 | $M_{a1} - \underline{F}_{a2}$                                                      | $M_{a1} - F_{r2}$                                                                   | $M_{a1} - \underline{F}_{r2}$                                                       |
|                      |                      |                                      |  | $\underline{M}_{a1} - F_{a2}$                                                     | $\underline{M}_{a1} - \underline{F}_{a2}$                                          | $\underline{M}_{a1} - F_{r2}$                                                       | $\underline{M}_{a1} - \underline{F}_{r2}$                                           |
|                      |                      | Вокруг радиуса $M_{r1}$              |  | $M_{r1} - F_{a2}$                                                                 | $M_{r1} - \underline{F}_{a2}$                                                      | $M_{r1} - F_{r2}$                                                                   | $M_{r1} - \underline{F}_{r2}$                                                       |
|                      |                      |                                      |  | $\underline{M}_{r1} - F_{a2}$                                                     | $\underline{M}_{r1} - \underline{F}_{a2}$                                          | $\underline{M}_{r1} - F_{r2}$                                                       | $\underline{M}_{r1} - \underline{F}_{r2}$                                           |
|                      |                      | В плоскости оси вращения $M_{\tau1}$ |  | $M_{\tau1} - F_{a2}$                                                              | $M_{\tau1} - \underline{F}_{a2}$                                                   | $M_{\tau1} - F_{r2}$                                                                | $M_{\tau1} - \underline{F}_{r2}$                                                    |
|                      |                      |                                      |  | $\underline{M}_{\tau1} - F_{a2}$                                                  | $\underline{M}_{\tau1} - \underline{F}_{a2}$                                       | $\underline{M}_{\tau1} - F_{r2}$                                                    | $\underline{M}_{\tau1} - \underline{F}_{r2}$                                        |
| Принцип зажима       |                      |                                      |                                                                                     | Торцевой                                                                          |                                                                                    | Радиальный                                                                          |                                                                                     |

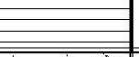
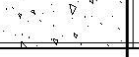
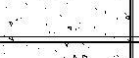
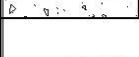
| Выход<br>Вход  |   | $F_{a_2}$                                                                         |                                                                                   | $F_{r_2}$                                                                         |                                                                                    | $F_{\tau_2}$                                                                        |                                                                                     |
|----------------|---|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                |   | +                                                                                 | -                                                                                 | +                                                                                 | -                                                                                  | +                                                                                   | -                                                                                   |
| $F_{a_1}$      | + |  |  |  |  |  |                                                                                     |
|                | - |  |  |  |  |                                                                                     |                                                                                     |
| $F_{r_1}$      | + |                                                                                   |                                                                                   |  |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |
|                | - |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |
| $F_{\tau_1}$   | + |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |
|                | - |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |
| $M_{a_1}$      | + |                                                                                   |                                                                                   |  |  |  |  |
|                | - |                                                                                   |                                                                                   |  |  |  |  |
| $M_{r_1}$      | + |                                                                                   |                                                                                   |  |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |
|                | - |                                                                                   |                                                                                   |  |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |
| $M_{\tau_1}$   | + |  |                                                                                   |  |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |
|                | - |  |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |
| Принцип зажима |   | торцевой                                                                          |                                                                                   | радиальный                                                                        |                                                                                    | тангенциальный                                                                      |                                                                                     |

Рис. 2.12 Картина применяемости родительских хромосом (силовых потоков) в практике проектирования зажимных механизмов.

На рис. 2.12 приняты следующие обозначения:



- тянущая  $F_{a_1}$ , к оси  $F_{r_2}$ ,

прижим  $F_{a_2}$  сплющивание  $F_{\tau_2}$ , по часовой стрелке  $M_{a_1}$ ,  $M_{r_1}$ ,  $M_{\tau_1}$ ,



- нажимная  $F_{a_1}$ , к оси  $F_{r_2}$ ,

прижим  $F_{a_2}$  сплющивание  $F_{\tau_2}$ , по часовой стрелке  $M_{a_1}$ ,  $M_{r_1}$ ,  $M_{\tau_1}$



превалирует



большое распространение



ограничено



мало распространено



единичные случаи



не известно

## 2.5. Законы эволюции зажимных механизмов с различными источниками энергии и передающими средами

В последнее время во всех сферах деятельности, кроме механической, используются электрическая, магнитная и др. виды энергии. Поэтому при конструировании ЗМ необходимо учитывать различные физические законы, принципы и процессы, протекающие в пространстве и во времени [107-109].

Если рассматривать явления в какой-либо сфере в малом элементарном объеме, то они становятся достаточно простыми для понимания и количественного описания, т.е. возможно установить общую зависимость между величинами, характеризующими поведение среды в элементарном объеме [160]. Например, в механических упруго-силовых полях, характеризующихся упругими деформациями и напряжениями, каждый элементарный объем должен находиться в динамическом равновесии, т.е. сумма всех сил, действующая на этот объем должна быть равна нулю. Равенство нулю всех внешних и внутренних сил вытекает из закона сохранения импульса силы и может быть записано в виде уравнения равновесия:

$$\sum_{i=1}^n F_i = 0. \quad (2.20)$$

Для понимания процессов в жидких и газообразных средах и их количественного описания к закону сохранения импульса следует добавить закон сохранения материи или уравнения неразрывности, т.е. накопление вещества определяется разницей  $\Delta Q = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}}$  ( где  $Q_{\text{вх}}$  – приход вещества;  $Q_{\text{вых}}$  – расход вещества) или сумма потоков вещества равна нулю:

$$, \sum_{i=1}^n Q = 0. \quad (2.21)$$

При изучении процессов, связанных с энергосбережением, используется закон сохранения энергии, согласно которому для элементарного объема сумма притекающей, утекающей и поглощаемой (выделяемой) энергии равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n E = 0. \quad (2.22)$$

Последние два уравнения справедливы лишь в тех случаях, когда вещество или энергия не поглощаются или не выделяются внутри элементарного объема и не происходит их накопление. Если происходит поглощение, выделение или накопление, то это следует учесть в уравнениях введением некоторых

дополнительных потоков, и уравнения остаются в силе.

Кроме этих трёх законов сохранения, необходимо учитывать состояние и поведение передающей среды, для которой строятся уравнения равновесия с учётом связей между собой различных характеристик движения.

Механические, электрические и тепловые процессы связаны со взаимодействием частиц или тел в различных средах и характеризуются многими физическими величинами, к которым относятся положение, скорость и ускорение частиц, температура, потенциал и напряженность электрического поля, объёмная плотность вещества или объёмная плотность заряда, напряженность магнитного поля, магнитная индукция. Все эти величины взаимосвязаны, однако степень их влияния друг на друга различна, что позволяет упростить задачу и рассматривать не всю картину процессов, а только отдельные части. Например, при рассмотрении ЗМ механического исполнения после преобразования электрической энергии в механическую не учитываются электрические и магнитные взаимодействия и наоборот.

Для описания количественной оценки каждого из процессов необходимо учитывать свойства среды. При описании механических процессов в упругой среде-твёрдом теле основной характеристикой движения является перемещение частицы или некоторого малого объёма относительно произвольной начальной точки отчёта. Для упругих тел в качестве точки отчёта удобно выбрать такую, в которой находилась частица, когда тело было в недеформированном состоянии. Таким образом, появляются две категории производных величин: геометрическая – деформации и силовая – напряжённая. Для практических целей взаимосвязь между деформацией и напряжением считают линейной согласно закона Гука [295] (рис.2.13, а):

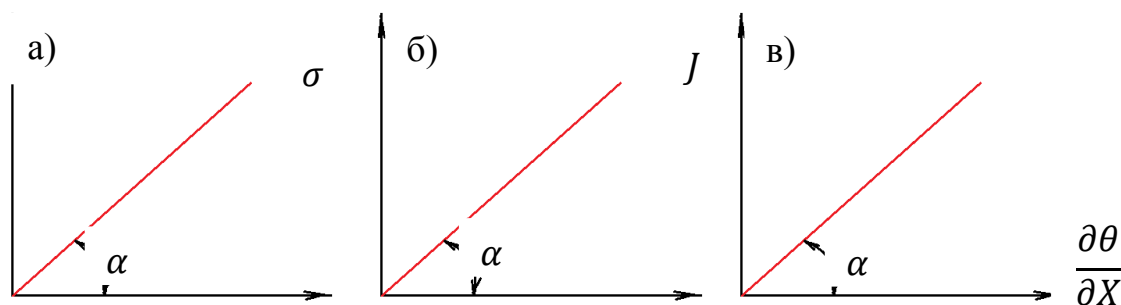


Рис.2.13. Графическая интерпретация закона Гука (а), Стокса (б), Фурье (в)

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (2.23)$$

где  $\sigma = \frac{F}{S}$  – напряжение;  $F$  – сила;  $S$  – площадь;  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  – относительное удлинение;  $\Delta l$  – деформация стержня;  $l$  – длина стержня;  $E$  – модуль упругости, равный  $\operatorname{tg} \alpha$ .

В жидкостях и газах согласно закона Стокса величина напряжения  $\sigma$  оказывается пропорциональной скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$  рис.2.13,б)

$$\sigma = \varepsilon \cdot \eta, \quad (2.24)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости, равной  $\operatorname{tg} \alpha$ .

Такие среды называют вязкими или текучими, а их применение в ЗМ заслуживает внимания.

В случае распространения тепла в твердом теле согласно закона Фурье (рис.2.13, в) между плотностью теплового потока  $J$  и градиентом температуры  $\frac{\partial v}{\partial X}$  устанавливается пропорциональная зависимость:

$$J = C \cdot \frac{\partial v}{\partial X}, \quad (2.25)$$

где  $C$  – коэффициент теплопроводности, равный  $\operatorname{tg} \alpha$ ;  $v$  – температура;  $X$  – длина распространения теплового потока.

Применение тепловых потоков начало применяться в высокоскоростных инструментальных зажимных патронах [235].

Применение электромагнитных полей в силовых (энергетических) потоках ЗМ является перспективным для станков с ЧПУ и мехатронными системами, что заслуживает особого внимания в данной диссертации при сокращении кинематических цепей и замене механических передач.

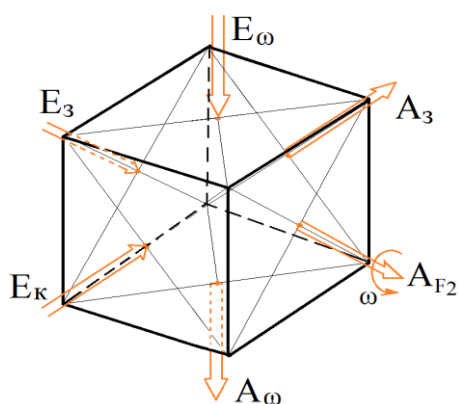
Кроме перечисленных в работе будут использованы закон гомологических рядов ЗМ с различными источниками энергии [162, 171, 283] и следующие принципы: топологической инвариантности источников поля; сохранения упруго силовой симметрии; парности; десимметризации П.Кюри; сохранения генетического кода; сохранения базового вида механических и других преобразователей энергии.

Для механических систем число влияющих принципов и законов будет меньше, что детально будет рассмотрено на ЗМ с механическими преобразователями энергии.

В соответствие с законом сохранения энергии на рис.2.14 представлена обобщенная кубическая модель энергетических процессов, происходящих в ЗМ при зажиме и поддержании объекта зажима в зажатом состоянии при вращении шпинделя и при резании.

В соответствии с этой моделью уравнение  $\sum_{i=1}^n E = 0$  примет вид:

$$E_3 + E_\omega + E_K + A_{F2} + A_3 + A_\omega = 0 \quad (2.26)$$



*Рис. 2.14. Обобщенная кубическая модель энергетических процессов, происходящих в ЗМ:  $E_3$  – подводимая энергия для зажима;  $E_\omega$  – подводимая энергия для вращения шпиндельного узла с ЗМ;  $E_K$  – дополнительная энергия, компенсирующая потерю силы зажима  $F_2$ ;  $A_3$  – потери в ЗМ из – за трения и действия центробежных сил;  $A_\omega$  – потери в приводе главного движения на вращение шпинделя;  $A_{F2}$  – полезная работа зажима*

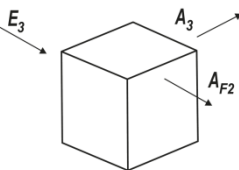
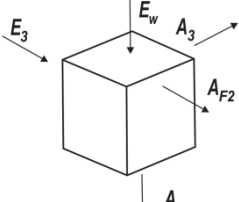
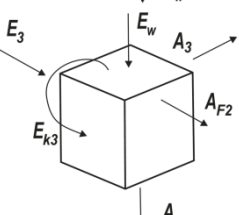
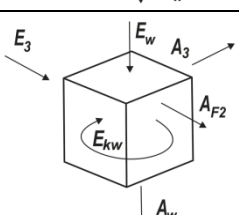
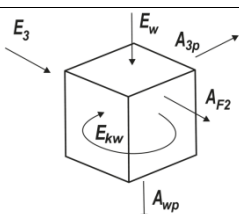
При потере силы зажима  $F_2$  во время вращения из-за действия центробежных сил  $F_\omega$  неуравновешенных частей в сторону, противоположную силе  $F_2$ , необходимо расходовать дополнительную энергию  $E_K$ , которая может быть от источника зажима извне или от энергии  $E_\omega$ , обеспечивающей уравнивающие центробежные силы  $F_{\omega y}$  изнутри. Частные кубические модели энергетических процессов при различном состоянии ЗМ приведены в табл. 2.10.

## 2.6. Поиск новых принципов действия зажимных механизмов по признаку силового потока

Массив принципов зажима представляет морфологическую модель (табл.2.11).

Морфологическая модель принципов зажима в свернутом виде представляет морфологическую матрицу:

*Модели энергетических процессов,  
происходящих при различных состояниях и исполнениях ЗМ*

| №<br>п/п | Состояние ЗМ                                                                      | Модель                                                                              | Условие равновесия                                     |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1        | Зажим при<br>невращающемся<br>шпинделе                                            |    | $E_3 + A_{F2} + A_3 = 0$                               |
| 2        | Зажим при<br>вращении<br>шпинделя без<br>компенсации<br>центробежных<br>сил       |    | $E_3 + E_w + A_{F2} + A_3 + A_w = 0$                   |
| 3        | Зажим при<br>вращении<br>шпинделя и<br>компенсация<br>центробежных<br>сил извне   |    | $E_3 + E_w + E_{K3} + A_{F2} + A_3 + A_w = 0$          |
| 4        | Зажим при<br>вращении<br>шпинделя и<br>компенсация<br>центробежных<br>сил изнутри |   | $E_3 + E_w + E_{KW} + A_{F2} + A_3 + A_w = 0$          |
| 5        | Резание зажатой<br>детали с<br>компенсацией<br>центробежных<br>сил изнутри        |  | $E_3 + E_{wp} + E_{KW} + A_{F2} + A_{3p} + A_{wp} = 0$ |

$$M_{ПЗ} = M_{ИЭ} \wedge M_{СП} \wedge M_{СВ}, \quad (2.27)$$

где  $M_{ИЭ}$ ,  $M_{СП}$ ,  $M_{СВ}$  – морфологические матрицы соответственно источника энергии, силовых потоков и зон зажима, силовых воздействий.

$$M_{ПЗ} = \begin{vmatrix} 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \\ 1.4 \\ 1.5 \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} 2.1 & 3.1 \\ 2.2 & 3.2 \\ 2.3 & 3.3 \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} 4.1 & 5.1 \\ 4.2 & 5.2 \\ 4.3 & 5.3 \\ 4.4 & 5.4 \\ 4.5 & 5.5 \end{vmatrix} \quad (2.28)$$

дающий  $N_{ПЗ} = 5 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 5 = 750$  вариантов решений, из которых известно на сегодняшний день не более сотни.

Для одного вида источника энергии (ИЭ) число вариантов решений  $N'_{ПЗ} = 3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 5 = 225$ , а для двойного наружного зажима от тянущего усилия

$F_{x1}$  и  $M_{x1}$  с одним и двумя силовыми потоками получим морфологическую матрицу

$$M'_{пз} = \begin{vmatrix} 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 \\ 2.2 & 3.2 & 4.3 & \\ & & 4.5 & \end{vmatrix}, \quad (2.29)$$

дающую  $N_{пз} = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 1 = 12$  вариантов (табл.2.12).

Если увеличить количество признаков за счёт конкретизации, то морфологическая модель будет иметь характерные признакам, относящиеся к ЗМ в целом, приводу зажима (ПрЗ), исполнительному органу – зажимному патрону (ЗП) и различным функциям, обеспечивающим работоспособность и нормальное функционирование ЗМ в составе всего станка, например, токарного автомата (табл.2.11) [136].

Таблица 2.11

*Морфологическая таблица принципа зажима тела вращения в виде силового потока (от источника энергии до объекта зажима)*

| 1.Источник энергии (ИЭ)     | Количество                 |                         | Силовое воздействие                    |                                          |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|                             | 2.Силовых потоков (входов) | 3. Зон зажима (выходов) | 4. Входное                             | 5. Выходное                              |
| 1.1. Электро-магнитное поле | 2.1. Один                  | 3.1. Одна               | 4.1. Осевое тянущее ( $F_{x1}$ )       | 5.1. Радиальное к оси шпинделя $F_{y2}$  |
| 1.2. Упругое поле           | 2.2. Два                   | 3.2. Две                | 4.2. Осевое нажимное ( $E_{x1}$ )      | 5.2. Радиальное от оси шпинделя $E_{y2}$ |
| 1.3. Тепло                  | 2.3. Несколько             | 3.3. Несколько          | 4.3. Крутящий момент правый $M_{x1}$   | 5.3. Осевое тянущее $F_{x2}$             |
| 1.4. Холод                  |                            |                         | 4.4. Крутящий момент левый $M_{x1}$    | 5.4.Осевое нажимное $E_{x2}$             |
| 1.5.Биологический (ручной)  |                            |                         | 4.5. Комбинированное $F_{x1} + M_{x1}$ | 5.5.Комбинированное $F_{x2} + F_{y2}$    |



Принципы зажима из морфологической матрицы (2.29)

| № вар-та | Морфологическая формула                         | Структура силовых потоков                                                   |
|----------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $X_1$    | $2 \cdot 1 - 3 \cdot 1 - 4 \cdot 1 - 5 \cdot 1$ | $F_{x1} - F_{y2}$                                                           |
| $X_2$    | $2 \cdot 1 - 3 \cdot 1 - 4 \cdot 3 - 5 \cdot 1$ | $M_{x1} - F_{y2}$                                                           |
| $X_3$    | $2 \cdot 1 - 3 \cdot 1 - 4 \cdot 5 - 5 \cdot 1$ | $(F_{x1} + M_{x1}) - F_{y2}$                                                |
| $X_4$    | $2 \cdot 1 - 3 \cdot 2 - 4 \cdot 1 - 5 \cdot 1$ | $F_{x1} - 2F_{y2} = F_{x1} - (F_{y2}^1 + F_{y2}^2)$                         |
| $X_5$    | $2 \cdot 1 - 3 \cdot 2 - 4 \cdot 3 - 5 \cdot 1$ | $M_{x1} - 2F_{y2} = C - (F_{y2}^1 + F_{y2}^2)$                              |
| $X_6$    | $2 \cdot 1 - 3 \cdot 2 - 4 \cdot 5 - 5 \cdot 1$ | $(F_{x1} + C) - 2F_{y2} = (F_{x1} + M_{x1}) - (F_{y2}^1 + F_{y2}^2)$        |
| $X_7$    | $2 \cdot 2 - 3 \cdot 1 - 4 \cdot 1 - 5 \cdot 1$ | $2F_{x1} - F_{y2} = (F_{x1}^1 + F_{x1}^2) - F_{y2}$                         |
| $X_8$    | $2 \cdot 2 - 3 \cdot 1 - 4 \cdot 3 - 5 \cdot 1$ | $2M_{x1} - F_{y2} = (M_{x1}^1 + M_{x1}^2) - F_{y2}$                         |
| $X_9$    | $2 \cdot 2 - 3 \cdot 1 - 4 \cdot 5 - 5 \cdot 1$ | $2(F_{x1} + M_{x1}) - F_{y2}$                                               |
| $X_{10}$ | $2 \cdot 2 - 3 \cdot 2 - 4 \cdot 1 - 5 \cdot 1$ | $2F_{x1} - 2F_{y2} = (F_{x1}^1 + F_{x1}^2) - (F_{y2}^1 + F_{y2}^2)$         |
| $X_{11}$ | $2 \cdot 2 - 3 \cdot 2 - 4 \cdot 3 - 5 \cdot 1$ | $2M_{x1} - 2F_{y2} = (M_{x1}^1 + M_{x1}^2) - (F_{y2}^1 + F_{y2}^2)$         |
| $X_{12}$ | $2 \cdot 2 - 3 \cdot 2 - 4 \cdot 5 - 5 \cdot 1$ | $2(F_{x1} + M_{x1}) - 2F_{y2} = 2(F_{x1} + M_{x1}) - (F_{y2}^1 + F_{y2}^2)$ |

Морфологическую модель способов зажима, кроме табл. 2.13, можно представить в виде объединения морфологических матриц:

*Развернутой*

$$M_{C3} = \left| \begin{array}{cc} 1 \cdot 1 & 2 \cdot 1 \\ 1 \cdot 2 & 2 \cdot 2 \\ & 2 \cdot 3 \\ & 2 \cdot 4 \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{cc} 3 \cdot 1 & 4 \cdot 1 \\ 3 \cdot 2 & 4 \cdot 2 \\ 3 \cdot 3 & 4 \cdot 3 \\ 3 \cdot 4 & 4 \cdot 4 \\ 3 \cdot 5 & \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{ccc} 5 \cdot 1 & 6 \cdot 1 & 7 \cdot 1 \\ 5 \cdot 2 & 6 \cdot 2 & 7 \cdot 2 \\ 5 \cdot 3 & 6 \cdot 3 & 7 \cdot 3 \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{cc} 8 \cdot 1 & 9 \cdot 1 \\ 8 \cdot 2 & 9 \cdot 2 \\ 8 \cdot 3 & 9 \cdot 3 \\ 8 \cdot 4 & 9 \cdot 4 \end{array} \right| \quad (2.30)$$

*Свернутой*

$$M_{C3} = M_{3M} \wedge M_{Pr3} \wedge M_{3П} \wedge M_{Ф}, \quad (2.31)$$

где  $M_{3M}$ ,  $M_{Pr3}$ ,  $M_{3П}$ ,  $M_{Ф}$  – морфологические матрицы соответственно зажимного механизма (ЗМ) как технической системы в целом; привода зажима (ПрЗ) как системы; зажимного патрона (ЗП) как подсистемы; функций, выполняемых ЗМ.

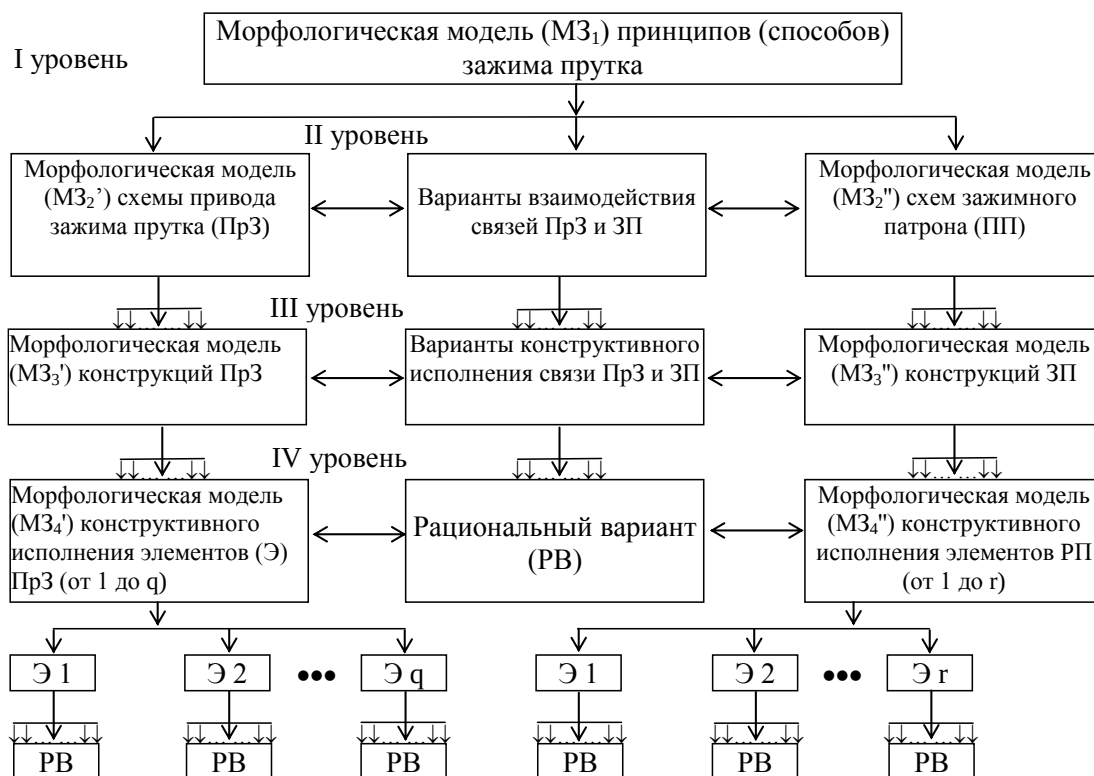
Выбрав 1 - 2 лучших варианта способа зажима для их реализации, переходим на II уровень (рис.2.15), где строятся морфологические модели  $M3_2'$  схем привода зажима (ПрЗ) и  $M3_2''$  схем зажимного патрона.

Морфологическая таблица (МЗ<sub>1</sub>) принципов (способов) зажима прутка

| Зажимной механизм (ЗМ)                                                                |                                                                                                                                                                             |                                                                 | Привод Зажима (ПрЗ)                                                                                                           |                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Преобразование энергии (на входе)                                                  | 2. Силовой поток (вход – выход)                                                                                                                                             |                                                                 | 3. Замыкание                                                                                                                  | 4. Структура                                                                                                                                     |
| 1.1.Первичное<br>1.2.Вторичное                                                        | 2.1. Осевая сила – радиальная сила<br>2.2.Радиальная сила – радиальная сила<br>2.3.Крутящий момент – радиальная сила<br>2.4.Осевая сила и крутящий момент – радиальная сила |                                                                 | 3.1.Силовое неупругое<br>3.2.Силовое упругое<br>3.3.Геометрическое<br>3.4.Фрикционное (Самоторможение)<br>3.5.Комбинированные | 4.1.Постоянная<br>4.2.Переменная с самонастройкой<br>4.3.Переменная с авторегулированием<br>4.4.Переменная с самонастройкой и авторегулированием |
| Зажимной патрон (ЗП)                                                                  |                                                                                                                                                                             |                                                                 | Функции ЗМ                                                                                                                    |                                                                                                                                                  |
| 5. Количество мест (зон) зажима                                                       | 6. Силовой контур                                                                                                                                                           | 7. Объем зажимных элементов                                     | 8. Основные по манипулированию                                                                                                | 9. Дополнительные                                                                                                                                |
| 5.1. Одно у рабочей зоны<br>5.2. Два у рабочей зоны<br>5.3. Несколько в разных местах | 6.1. Замкнутый<br>6.2. Открытый<br>6.3. Замкнутый<br>6.4. Комбинированный                                                                                                   | 7.1.Постоянный<br>7.2.Переменный<br>7.3.Постоянный и переменный | 8.1. Зажим-разжим<br>8.2. Зажим<br>8.3. Разжим<br>8.4. Подача и зажим                                                         | 9.1. Уравновешивание центробежной силы<br>9.2. Уменьшение (снятие) напряжений<br>9.3. Стабилизация характеристик<br>9.4. Переналаживаемость      |

Дальнейшие процедуры выполняются в указанной на рис.2.15 последовательности, что даёт оригинальные решения на уровне изобретений, описанные в работах [124, 125, 136].

С учетом накопленной информации и опыта создания ЗМ различных принципов действия, структур, схем и конструкций на верхнем уровне (рис. 2.15) поиск идей создания новых ЗМ без учета источника энергии может быть осуществлён при рассмотрении двух переменных (подсистем): зажимного патрона (ЗП) по оси X и привода зажима (ПрЗ) по оси Y.



*Рис.2.15. Иерархия многовариантного морфологического синтеза конструкторских решений при проектировании механизма зажима прутка токарного автомата*

По виду передаточно-усилительного звена рассмотрим следующие ЗП: цанговый (Ц), клиновой (К), рычажный (Р), плунжерный (П), эксцентриковый (Э), упругий (У).

ПрЗ рассмотрим по виду замыкания: силовое (С), геометрическое (Г), фрикционное (Ф) с самоторможением.

В этом случае морфологическая матрица идей будет двухмерной (рис.2.16), дающей  $N = 6 \cdot 3 = 18$  комбинаций. Если добавить третью переменную  $Z$  – вид используемой энергии  $\mathcal{E}$ , то морфологическая матрица будет трёхмерной и иметь вид параллелепипеда (рис.2.17), составленная из кубов малого размера, число которых зависит от числа видов используемой энергии (ИЭ) для создания силы зажима: ручной человеческой (Ч), электрической (Э), магнитной (М), тепловой (Т), кинетической (К) за счёт центробежных сил. В результате получится  $N = 6 \cdot 3 \cdot 5 = 90$  комбинаций.

|         |    |    |    |    |    |    |     |
|---------|----|----|----|----|----|----|-----|
|         | Ц  | К  | Р  | П  | Э  | У  |     |
| ЗП (X)  | ЦС | КС | РС | ПС | ЭС | МС | ← С |
| ПрЗ (Y) | ЦГ | КГ | РГ | ПГ | ЭГ | МГ | ← Г |
|         | ЦФ | КФ | РФ | ПФ | ЭФ | МФ | ← Ф |

Рис. 2.16. Двухмерная морфологическая матрица идей ЗМ

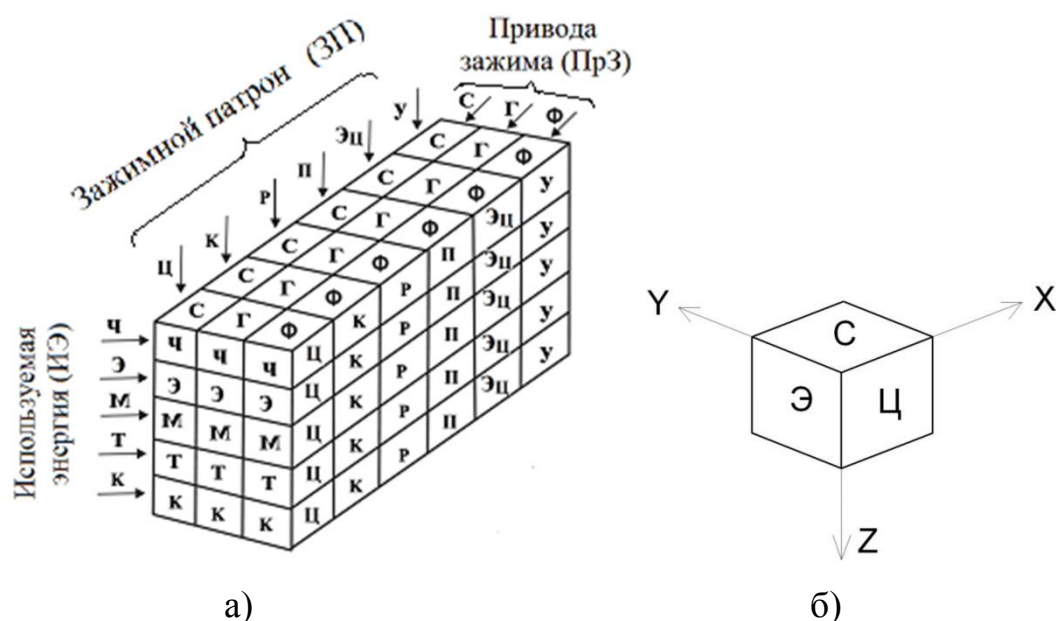


Рис.2.17. Трехмерная морфологическая матрица идей: а) фрагмент одного варианта ЗМ; б) от электрического источника с приводом зажима силового замыкания и цанговым зажимным патроном

## Выводы

1. Впервые разработаны теоретические основы многоуровневого морфологического синтеза ЗМ с применением теории эволюции систем различного происхождения и усложнением структуры на уровне генетической информации: генетическом, хромосомном, объектном, популяционном, видовом, системном и межсистемном уровнях.
2. Впервые предложено на генетическом уровне описание ЗМ, где

источником энергетического (силового) поля принята материальная точка, движущаяся в пространстве под действием силы и (или) момента, что обеспечивает полноту решения задач и существенно упрощает поиск по заданной функции цели.

3. Показано, что передача энергии от одной материальной точки на входе к другой материальной точке на выходе осуществляется в виде множества силовых (энергетических) потоков на хромосомном уровне, представляющих морфологическую модель (пар хромосом) входов и выходов с максимальным числом вариантов 72 для любых ЗМ, а при зажиме объектов типа тел вращения, уменьшенных до 48.

4. Представленный системно-морфологический подход как многоуровневой является основой для создания базы данных (фондов) изображения элементов, то позволяет автоматизировать проектирование механизмов подачи и зажима прутка токарных автоматов.

5. Структурное разнообразие объектов антропогенного происхождения, является результатом предсказуемой структурной эволюции, ограниченный элементный базис которой представлен Порождающими периодическими системами. Передача генетической информации осуществляется человеком, посредством передачи опыта с использованием различных носителей информации.

6. С учетом междисциплинарности показано применение основных положений генетической электромеханики в механических системах различного происхождения и соответствующих им областях знаний.

7. Открытие генетических программ в механике сплошных, текучих, газообразных и других сред является ключом к генетическому прогнозированию и созданию Человеком сложных развивающихся ТС по объективным законам Природы.

8. Предложенный подход позволяет системно подойти к созданию, исследованию и прогнозированию развития любых механических систем, начиная с генетического уровня, что проиллюстрировано на зажимных механизмах.

## РАЗДЕЛ 3

### Генетико-морфологический подход к моделированию и структурно-схемному синтезу зажимных патронов

#### 3.1. Описание зажимных механизмов с различными силовыми потоками на различных уровнях сложности структуры

Структуру ЗМ, реализующего определенный принцип зажима, на различных уровнях сложности и генетической информации можно представить в виде генетической модели построения и развития (рис. 3.1) [134, 283].



Рис.3.1. Генетическая модель строения и развития структуры зажимного механизма (ЗМ) на примере одного силового потока с замкнутым контуром

Количественный состав и пространственные варианты хромосомных наборов (потомков разного поколения) для каждого вида ЗМ ограничены и определяют кариотип популяций соответствующего вида.

Эти ограничения обусловлены принципом целостности структуры ЗМ и соответствующими группами пространственной и упруго силовой симметрии, характерными для определенного вида ПИСП.

Дальнейшее усложнение структуры ЗМ переводит его в подсистему, для которой имеется более сложная система - шпиндельный узел, являющаяся надсистемой первого уровня для системы ЗМ. Далее шпиндельный узел, как привод главного движения (вращения заготовки или инструмента) входит составной частью в станок, как надсистема второго уровня, а станок – в станочную систему-надсистему третьего уровня и т.д. [129, 134].

Используя системно-морфологический подход все объекты зажима в зависимости от соотношения их основных размеров (рис.3.2) и вариантов их расположения по отношению к рабочей зоне (РЗ) (рис.3.3) можно представить в виде морфологической модели (табл.3.1), где по горизонтали даны признаки, характеризующие объект зажима, а по вертикали варианты реализации (альтернативы) этих признаков.

В зависимости от конструкции станка и конкретной номенклатуры обрабатываемых деталей или обрабатывающих режущих инструментов число вариантов решений уменьшается.

Таблица 2.7

*Морфологическая модель  
объектов зажима типа тел вращения (см. рис.3.2, 3.3)*

| 1. Тип и соотношение размеров               | 2. Расположение рабочей зоны (РЗ) по отношению к объекту зажима (ОЗ)               |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.1. Диск                                   | 2.1. Спереди (РЗ <sub>1</sub> )                                                    |
| 1.2. Палец                                  | 2.2. Внутри (РЗ <sub>2</sub> )                                                     |
| 1.3. Ось                                    | 2.3. Снаружи (РЗ <sub>3</sub> )                                                    |
| 1.4. Кольцо                                 | 2.4. Сзади (РЗ <sub>4</sub> )                                                      |
| 1.5. Втулка                                 | 2.5. Спереди и внутри (РЗ <sub>1</sub> +РЗ <sub>2</sub> )                          |
| 1.6. Гильза (трубка)                        | 2.6. Спереди и снаружи (РЗ <sub>1</sub> +РЗ <sub>3</sub> )                         |
| 1.7. Пруток                                 | 2.7. Спереди и сзади (РЗ <sub>1</sub> +РЗ <sub>4</sub> )                           |
| 1.8. Труба                                  | 2.8. Внутри и снаружи (РЗ <sub>2</sub> +РЗ <sub>3</sub> )                          |
| 1.9. Проволока                              | 2.9. Спереди, внутри, снаружи (РЗ <sub>1</sub> +РЗ <sub>2</sub> +РЗ <sub>3</sub> ) |
| 1.10. Инструмент с цилиндрическим хвостиком | 2.10. Спереди, снаружи, сзади (РЗ <sub>1</sub> +РЗ <sub>3</sub> +РЗ <sub>4</sub> ) |

Для описания ЗМ на хромосомном уровне необходимо использовать элементарный силовой поток (родительскую хромосому), вводя для различных вариантов количества силовых потоков их комбинацию в зависимости от поставленной задачи, характеристик объекта зажима (ОЗ) (рис. 3.1) и

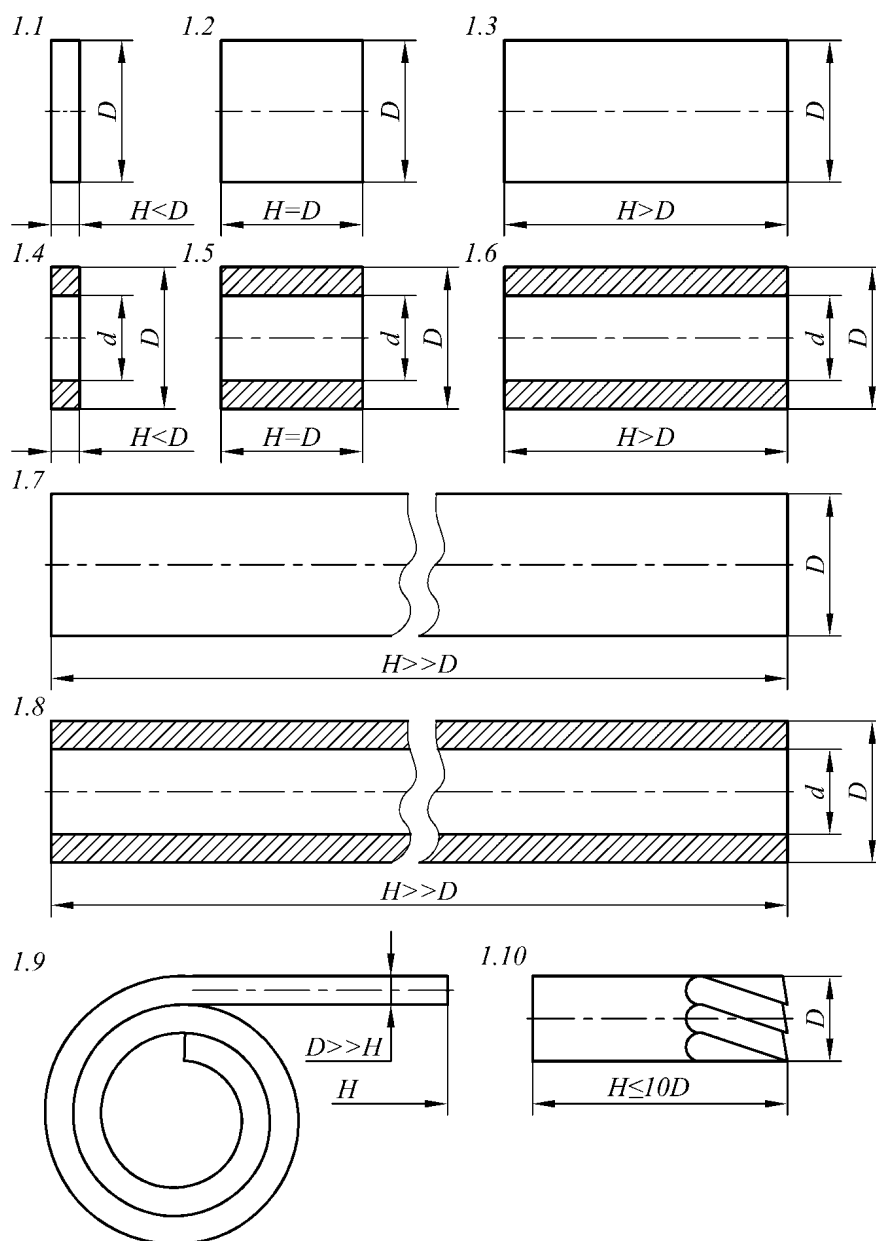


Рис.3.2. Объекты зажима – детали типа тел вращения  
(альтернативы 1.1 – 1.10)

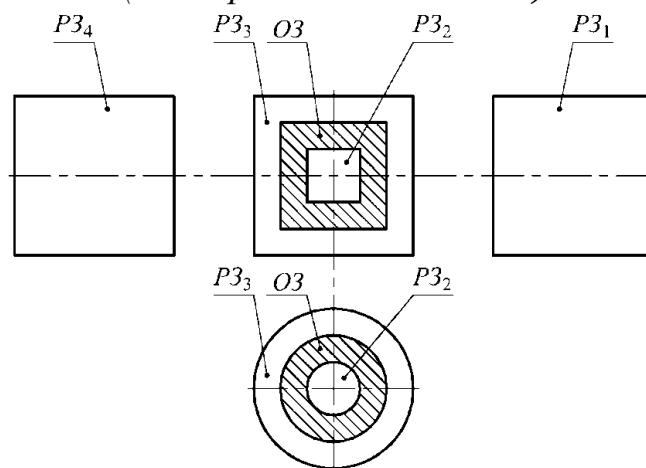


Рис. 3.3. Варианты расположения рабочей зоны (P3) по отношению к объекту зажима (O3)



расположения рабочей зоны обработки по отношению к нему (рис. 3.2), что зависит от технологических возможностей станка и конструкции его элементов и, в первую очередь шпиндельного узла (ШУ), наличия дополнительных устройств на линии шпинделя (оси ОЗ): задней бабки (ЗБ), люнета (ЛН) и других устройств поддержки и направления длинномерного ОЗ – прутка, трубы, вала, проволоки, свернутой в бунт [138].

Следует отметить, что ключевыми идеями многоуровневого генетико-морфологического подхода с построением моделей и описанием синтезируемого объекта являются следующие:

- Каждый уровень структурной иерархии сохраняет наследственную (генетическую) информацию уровня предшествующего;
- Структура объекта произвольного уровня образуется на основе структур предшествующих уровней (чем выше уровень иерархии, тем выше сложность объекта);
- Каждый объект произвольного уровня иерархии представляется генетическим кодом или структурной формулой.

Это будет проиллюстрировано далее на описании ЗМ различной сложности структуры с учетом уровня генетической информации [143, 144, 202, 253, 282-284].

Для зажима сплошного ОЗ разной длины (рис. 3.4,а) число силовых потоков при одинарном зажиме определяется из морфологической матрицы с учетом входа и выхода

$$M_{СП} = \begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_{x1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{y1} \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

дающей  $N_{СП} = 7 \cdot 2 = 14$  вариантов.

При вращении ОЗ, зажатого снаружи, из-за центробежных сил  $F_\omega$  неуравновешенных частей зажимных элементов (ЗЭ) происходит уменьшение выходной силы  $F_{y2}$  до силы  $F_{y2\omega}$ , зависящей от ряда факторов [40, 107-109, 118, 290]. Для зажима пустотелого ОЗ (рис. 3.4,б) число силовых потоков при одинарном зажиме увеличивается и определяется морфологической матрицей (3.2), дающей  $M_{\Pi T} = 8 \cdot 3 = 24$  варианта:

$$M_{\Pi T} = \begin{vmatrix} F_{x1} \\ F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{y1} \\ M_{x1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{y1} \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{y2} \end{vmatrix}. \quad (3.2)$$

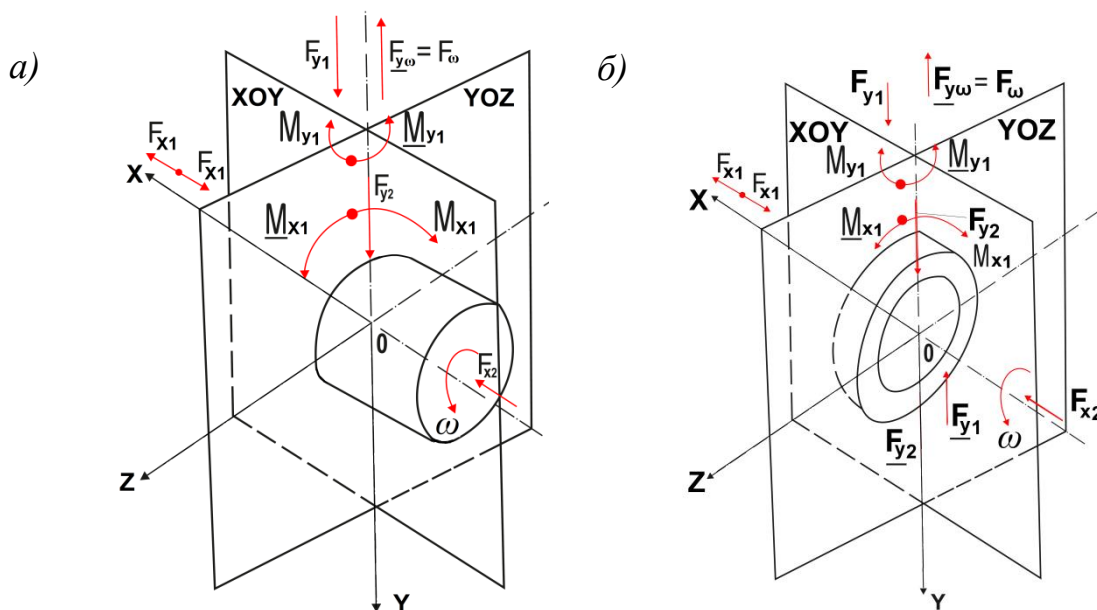


Рис.3.4. Обобщённые модели силовых потоков при зажиме цилиндрической детали: а – сплошной, б – пустотелой

Если не учитывать направление действия сил и моментов на входе, пользуясь принципом симметрии [16, 66, 254, 283, 285], число вариантов для описания на хромосомном уровне сократится, т.е.

$$M'_{CI} = \begin{vmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \end{vmatrix}, \quad (3.3)$$

$$M'_{IT} = \begin{vmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{y2} \end{vmatrix}, \quad (3.4)$$

что в первом случае даёт  $N'_{CI} = 8$  вариантов, а во втором  $N'_{IT} = 12$  вариантов.

Любой энергетический (силовой) поток в ЗМ может осуществляться с помощью механических кинематических цепей, электромагнитных, магнитных и др. полей, исключая кинематические цепи.

При наличии механических кинематических цепей силовой поток может характеризоваться следующими тремя характеристиками [70, 134, 186, 187]:

- 1) коэффициентом усиления  $K_y$ , как отношение выходной силы зажима  $F_2$  к входной нагрузке (силе  $F_1$  или моменту  $M_1$ );
- 2) передаточным отношением  $U$ , как отношение скорости (перемещения) ЗЭ на выходе к скорости (перемещению) на входе от источника энергии (ИЭ) или привода зажима (ПрЗ);
- 3) коэффициентом полезного действия  $\eta$ , как отношение расходуемой энергии к полезной энергии зажима.

При отсутствии кинематических цепей силовой поток характеризуется только к.п.д. При наличии механических кинематических цепей и других полей, используются все характеристики, но с учетом участков силового потока при последовательной, параллельно-последовательной и параллельной передаче энергии.

В практике используется до двух, а иногда и более, силовых потоков, зависящих от количества входов и выходов ( $n_{\text{вх}} = 1, 2, n_{\text{вых}} = 1, 2$ ).

Таким образом для распространённых случаев возможны следующие 4 случая (рис. 3.5):

- 1)  $1 \rightarrow 1$ ; 2)  $1 \rightarrow 2$ ; 3)  $2 \rightarrow 1$ ; 4)  $2 \rightarrow 2$ .

Для наружного радиального зажима с силой  $F_{y2}$  сплошного ОЗ в случае 1 будет  $N_1 = 7 \cdot 1 = 7$  вариантов, в случае 2 –  $N_2 = 7 \cdot 2 = 14$  вариантов, в случаях 3 и 4 –  $N_3 = N_4 = 7 \cdot 7 \cdot 1 = 49$  вариантов.

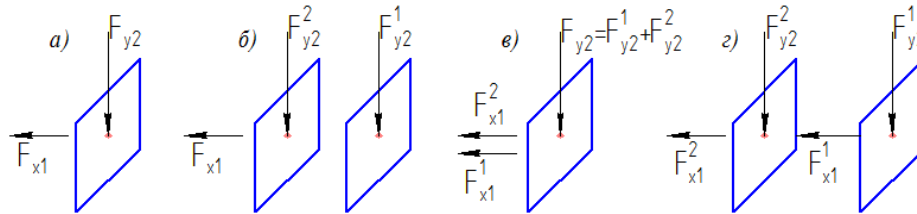


Рис. 3.5. Варианты силовых потоков при одном (а, в) и двух (б, г) выходах радиальной силы зажима  $F_{y2}$

С учётом расположения мест зажима-выхода силовых потоков при одноопорной и двухопорной схеме зажима ОЗ, длина которых больше диаметра, возможны варианты выхода сил: с одной стороны (код 10); с двух сторон (код 11); в центре (код 00).

При этом морфологическая матрица выхода силового потока будет:

$$M_{EX} = \left| \begin{array}{c} F_{x2}^1 \\ F_{y2}^1 \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{c} F_{y2}^2 \\ 0 \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{c} 10 \\ 11 \\ 00 \end{array} \right|, \quad (3.5)$$

а число вариантов  $N_{EX} = 2 \cdot 2 \cdot 3 = 12$ ; некоторые из них показаны на рис. 3.6 с кортежами: а)  $F_{y2}^1 - 0 - 10$ ; б)  $F_{y2}^1 - F_{y2}^2 - 10$ ; в)  $F_{y2}^1 - F_{y2}^2 - 11$ ; г)  $F_{x2}^1 - 0 - 10$ ; д)  $F_{x2}^1 - F_{y2}^2 - 10$ ; е)  $F_{y2}^1 - F_{y2}^2 - 11$ ; ж)  $F_{y2}^1 - F_{y2}^2 - 11$ ; з)  $F_{y2}^1 - F_{y2}^2 - 00$ .

На объектном уровне для замыкания силового потока в качестве хромосомы-наследника используется элементарный силовой контур ЗП, который может быть замкнутым (открытым и закрытым) [111] в плоскости, перпендикулярной оси вращения X шпинделя (ЗП, ОЗ) (рис.3.7) при зажиме снаружи (рис.3.7,а), изнутри (рис.3.7,б), торцевом вдоль оси вращения (рис.3.7,в) и комбинированном объемном (рис.3.7,г).

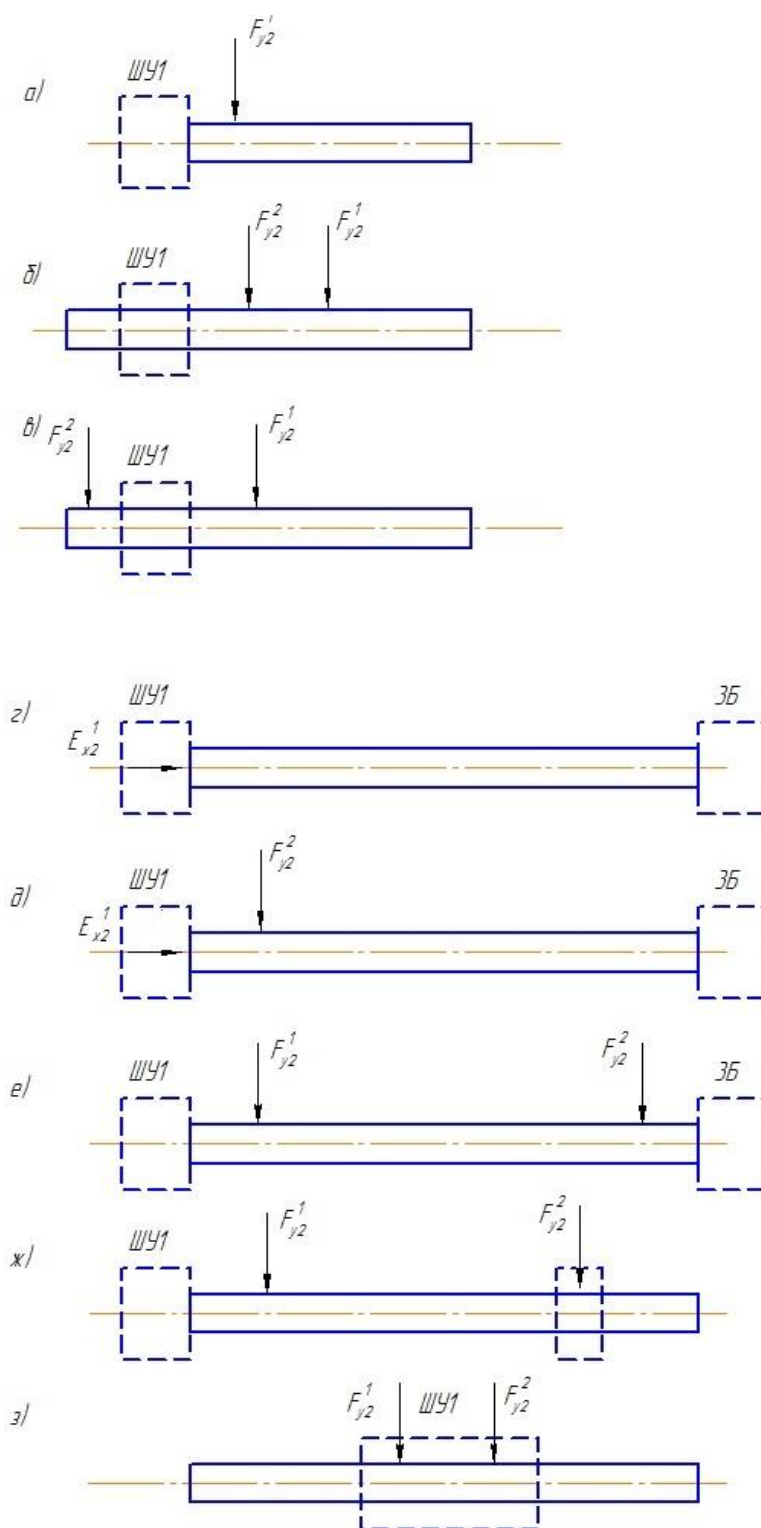


Рис.3.6. Варианты выхода силовых потоков при зажиме вращающейся длинномерной детали (ОЗ): ШУ1 – основной шпиндельный узел; ШУ2 – дополнительный шпиндельный узел; ЗБ – задняя бабка

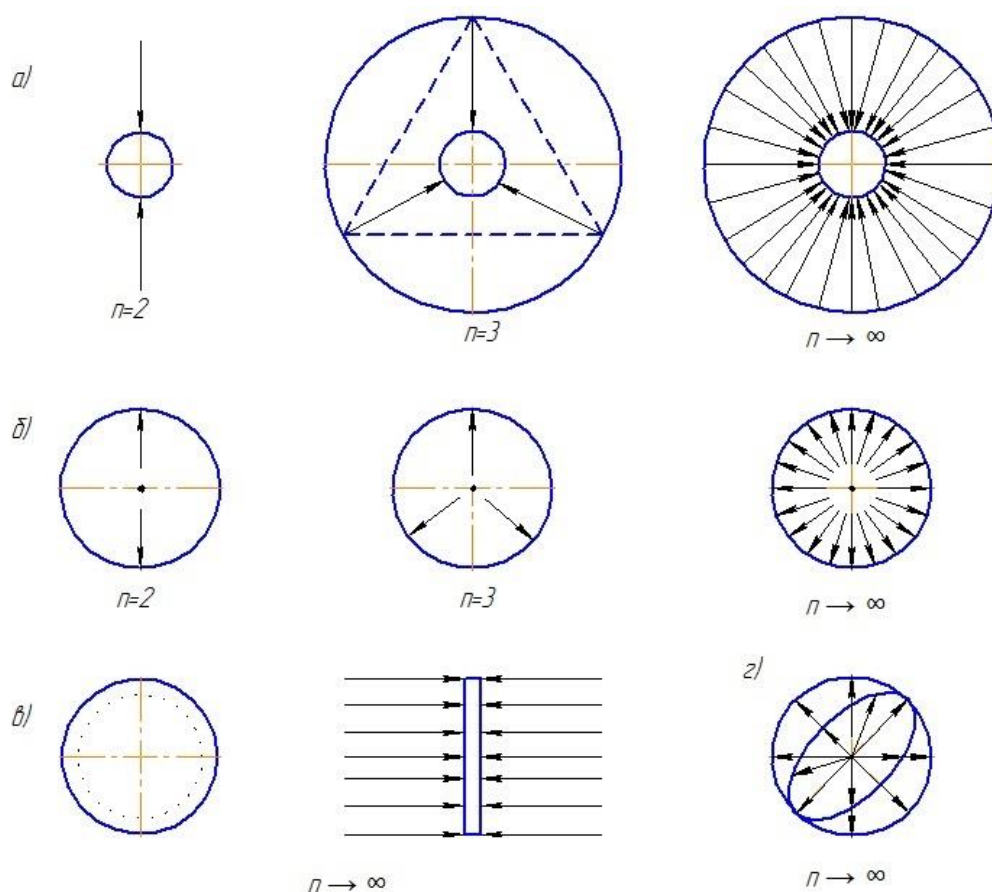


Рис.3.7. Силовые контуры с различным замыканием сил ( $n$  - количество элементарных сил, нормальных к поверхности контакта зажимных элементов и ОЗ)

### 3.2. Моделирование и синтез зажимных патронов с различными преобразователями силовых потоков и видом передающей среды

Для описания зажимных патронов на популяционном уровне между входом и выходом силового потока вводится преобразователь (силы, перемещения и энергии).

Преобразование энергии в силовом (энергетическом) потоке может осуществляться различными преобразователями, которые в механическом исполнении сводятся к ограниченному количеству и могут быть следующие (рис.3.8): а – рычажные (LV), б – клиновые (WD), в – спиральные (SL), г – плунжерные (PL), д – винтовые (SC), е – зубчатые (GR), ж – пружинные (SR).

Схемная реализация силовых потоков в любом простом механизме с одним преобразователем на популяционном уровне может быть представлена в виде морфологической модели (табл.3.2). Всего различных схем будет:  $N_{cx} = 12 \cdot 7 \cdot 6 = 504$ .

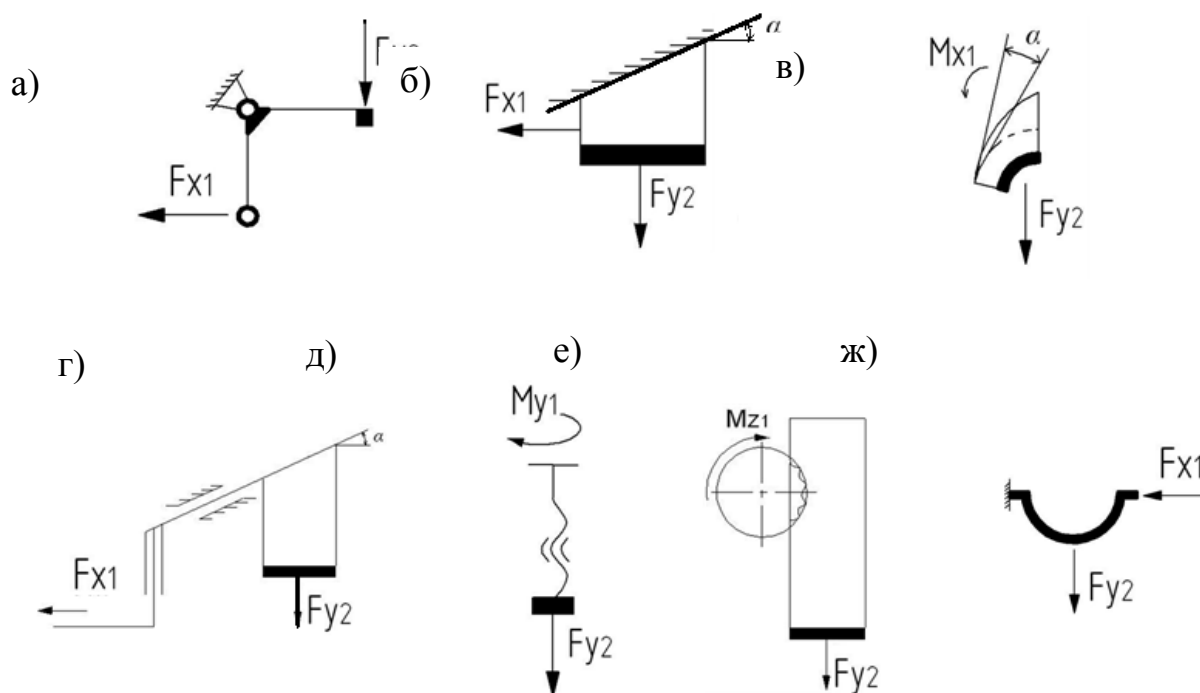


Рис.3.8. Механические преобразователи энергии: а – level (LV); б – wadge (WD); в – spiral (SP); г – plunger (PL); д – screw (SC); е – gear (GR); ж – spring (SR)

Тела вращения, которые могут зажиматься, по геометрической форме делятся на тонкостенные диски или пластины (FL), призмы (PR), пирамиды (PM), цилиндр (CL), конусы (CN), сферы (AR) и торы (TR).

На популяционном уровне структура генетической формулы «зажимной патрон – объект зажима» (без конкретного источника энергии и привода) показана на рис.3.9,а.

Таблица 3.1

Морфологическая таблица схем простых зажимных патронов на популяционном уровне

| Вход $Od^1$      | Преобразователь | Выход $Od^2$    |
|------------------|-----------------|-----------------|
| 1.1. $+ F_{x1}$  | 2.1. LV         | 3.1. $+ F_{x2}$ |
| 1.2. $- F_{x1}$  | 2.2. WD         | 3.2. $- F_{x2}$ |
| 1.3. $+ F_{y1}$  | 2.3. SL         | 3.3. $+ F_{y2}$ |
| 1.4. $- F_{y1}$  | 2.4. PL         | 3.4. $- F_{y2}$ |
| 1.5. $+ F_{z1}$  | 2.5. SC         | 3.5. $+ F_{z2}$ |
| 1.6. $- F_{z1}$  | 2.6. GR         | 3.6. $- F_{z2}$ |
| 1.7. $+ M_{x1}$  | 2.7. SR         |                 |
| 1.8. $- M_{x1}$  |                 |                 |
| 1.9. $+ M_{y1}$  |                 |                 |
| 1.10. $- M_{y1}$ |                 |                 |
| 1.11. $+ M_{z1}$ |                 |                 |
| 1.12. $- M_{z1}$ |                 |                 |

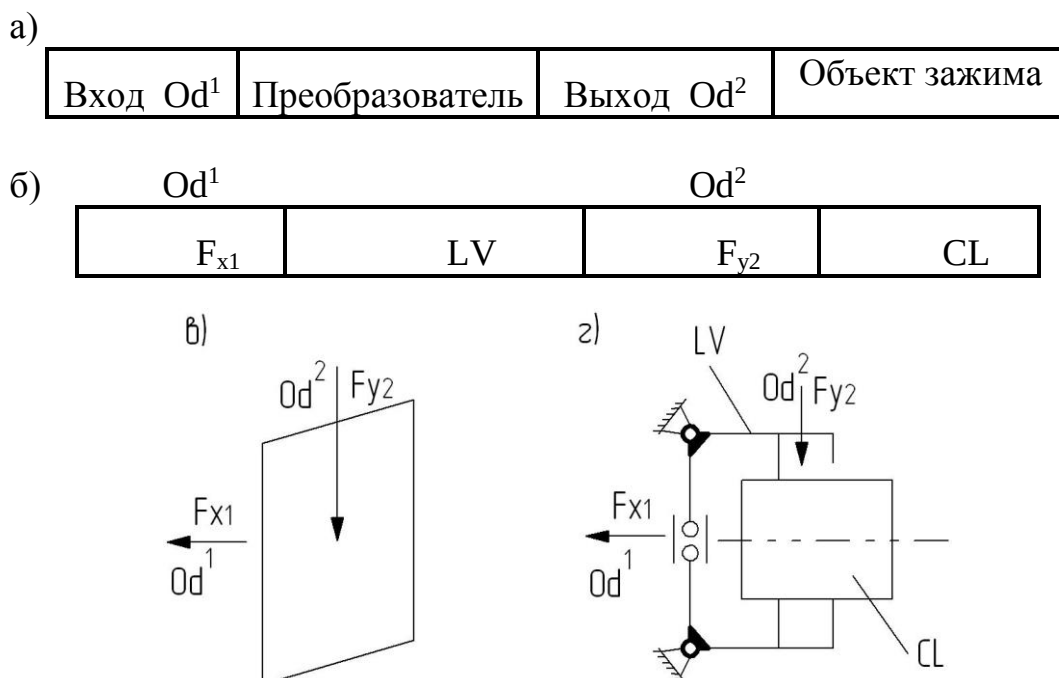


Рис.3.9. Обобщённая структура (а), конкретная генетическая формула (б), силовой поток (в) и схема рычажного зажимного патрона (г)

На рис.3.9,б,г представлены генетическая формула и схема рычажного (LV) зажимного патрона для закрепления цилиндрических деталей (CL), в котором осевая сила ( $F_{x1}$ ) от источника энергии (привода) преобразуется в радиальную (нормальную к поверхности детали) силу ( $F_{y2}$ ) (рис.3.9,в).

Пользуясь цилиндрической системой координат ниже рассмотрены различные виды преобразователей энергии (перемещений, скоростей, сил и моментов) в силовых потоках ЗМ и ЗП (рис.3.10 – 3.14).

В различных ТС, в том числе и ЗМ, силовые (энергетические) потоки могут быть:

$M_x$  – механические передачи и преобразователи с помощью твердых тел, в том числе и сил упругости;

Э – электромагнитные поля, действующие непосредственно или в составе (структуре) электромеханических систем передачи и преобразования;

Ж – жидкотекучие и вязкие среды для передачи и преобразования;

В – воздушные среды для передачи и преобразования, в том числе вакуум;

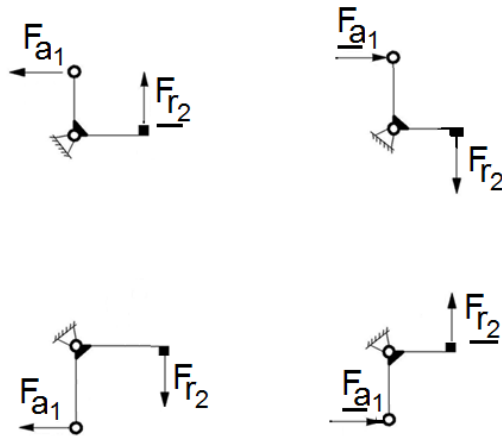
М – магнитные поля притяжения и отталкивания;

Т – тепловые потоки расширения и сужения при нагреве и охлаждении;

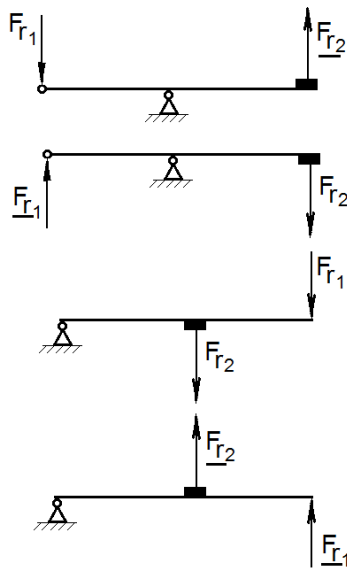
Ц – центробежные силы от вращения неуравновешенных частей.



а)  $F_{a1} - F_{r2}$



б)  $F_{r1} - F_{r2}$



в)  $F_{a1} - F_{a2}$

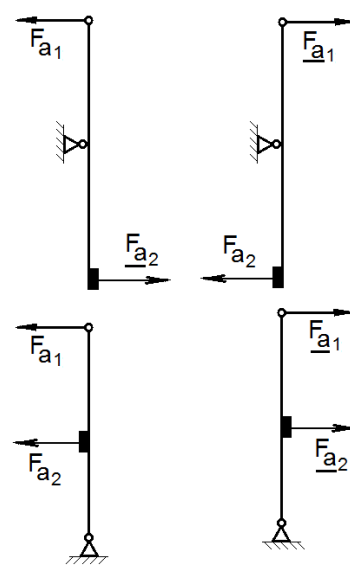


Рис.3.10. Виды рычажных преобразователей (LV) в ЗМ

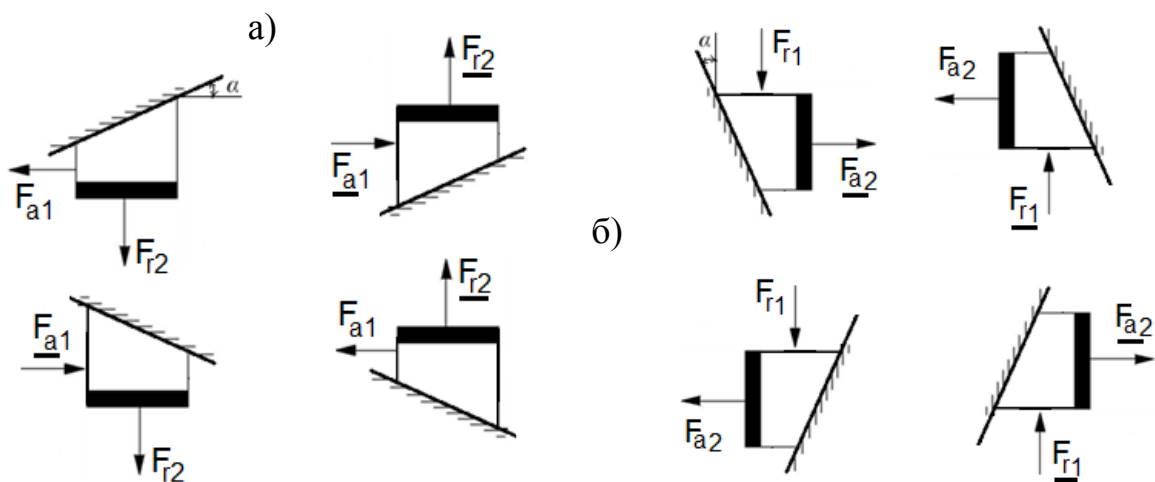


Рис.3.11. Виды клиновых преобразователей (WD) в ЗМ: а – вдоль оси вращения; б – поперек (радиально) оси вращения

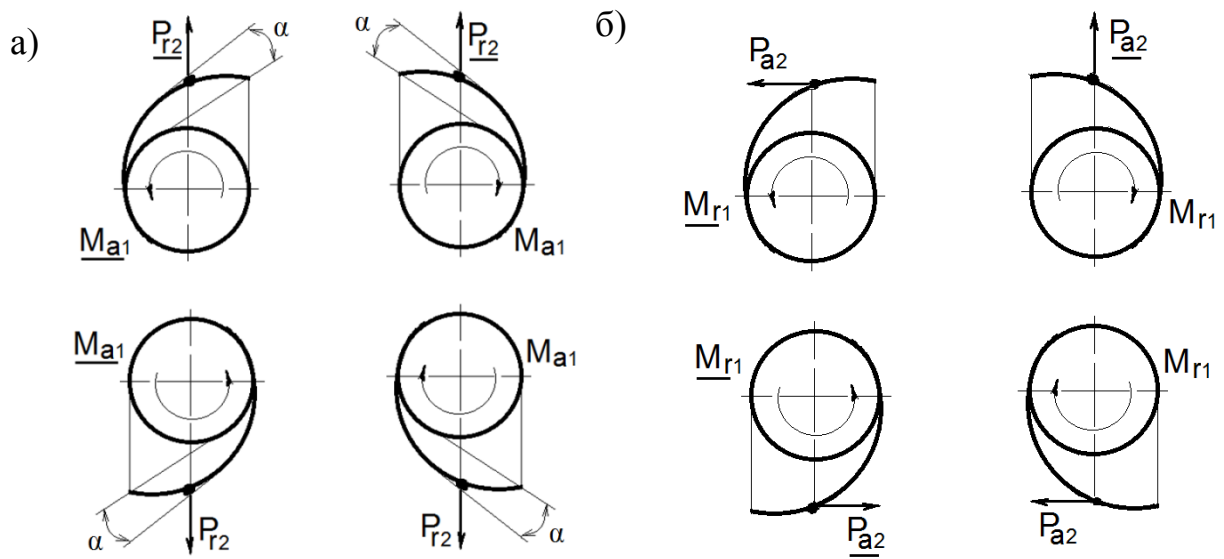


Рис.3.12. Виды спиральных преобразователей (SP) в 3М: а – с осью вращения параллельно оси вращения шпинделя; б – тоже перпендикулярно оси вращения шпинделя

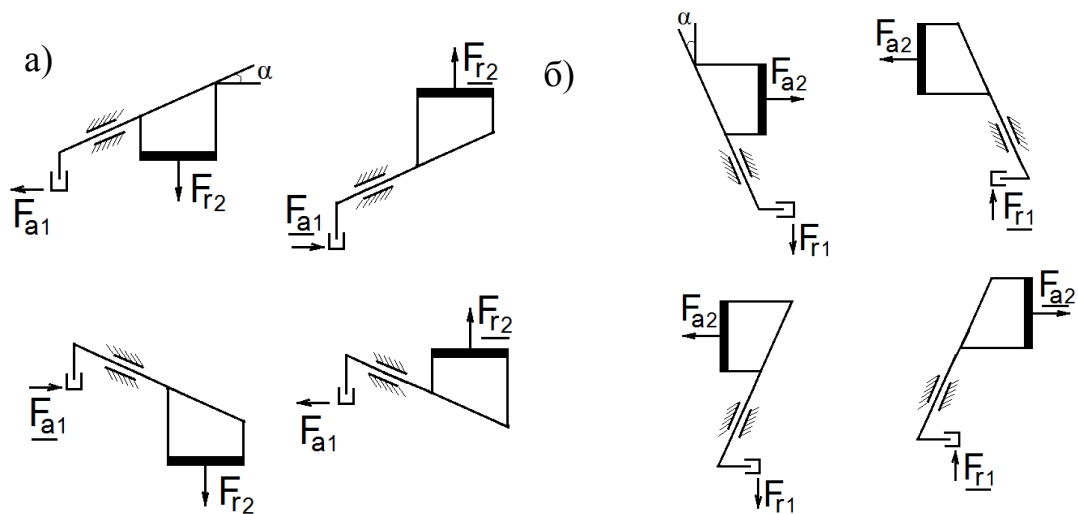
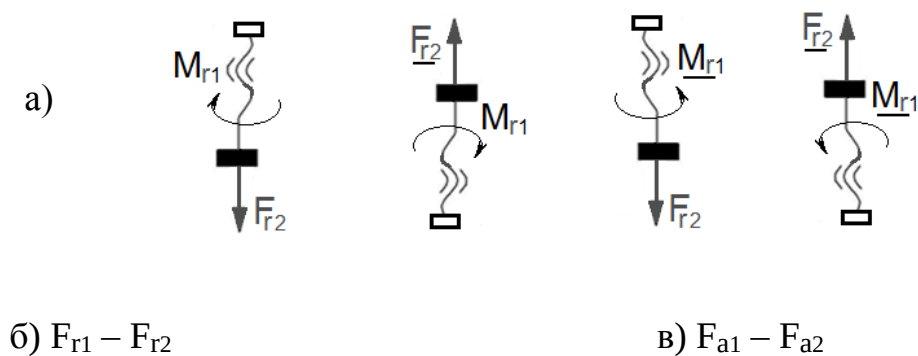


Рис.3.13. Виды плунжерных преобразователей (PL) в 3М: а – вдоль оси вращения; б – поперёк (радиально) оси вращения



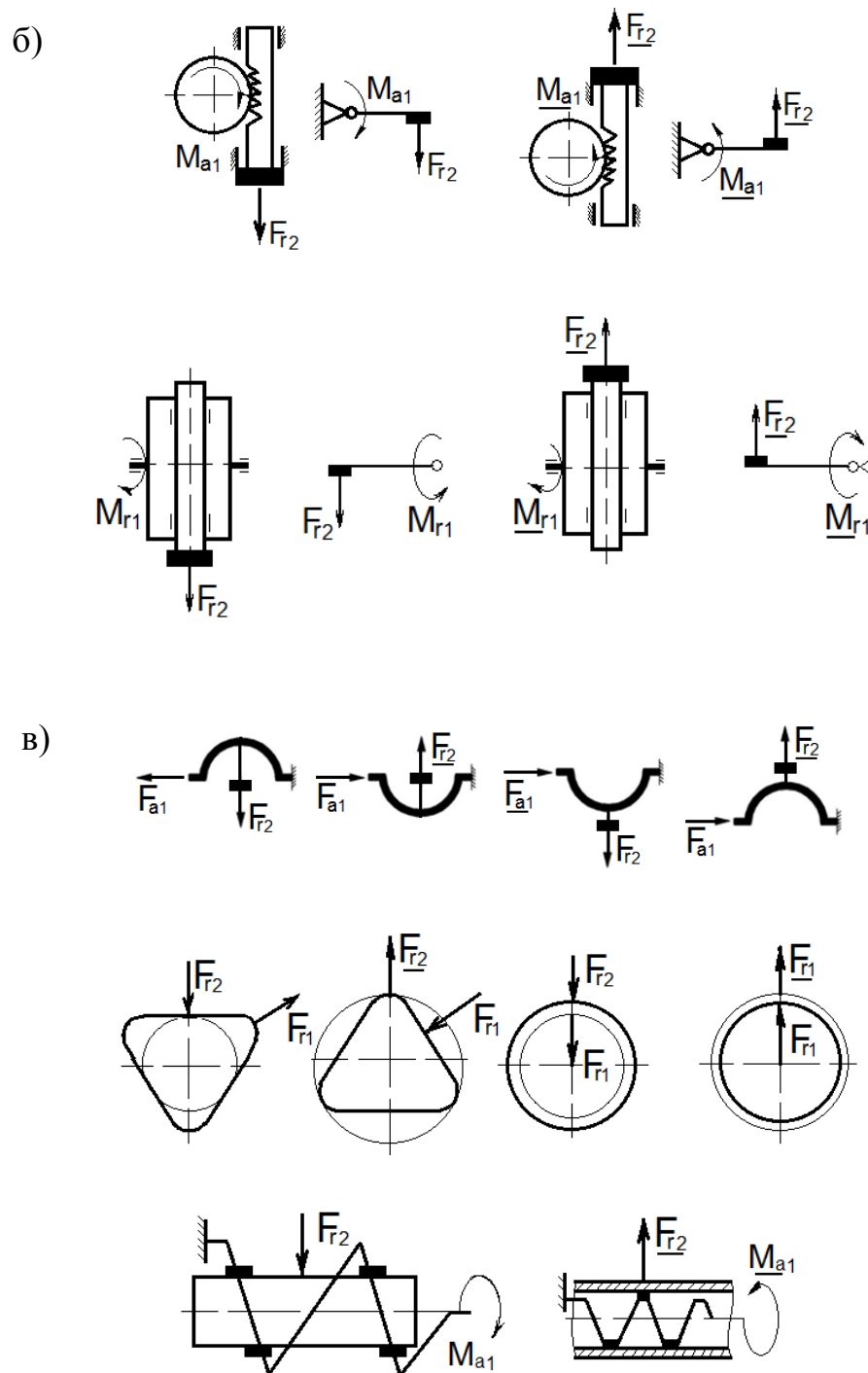
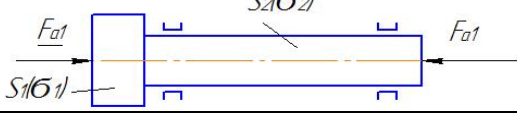
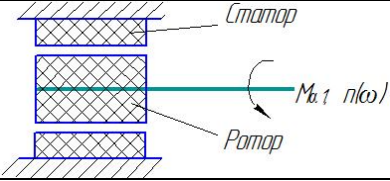
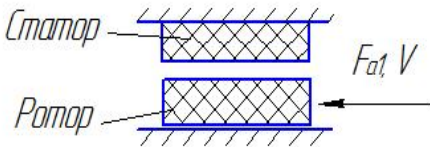
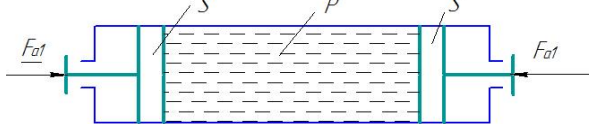
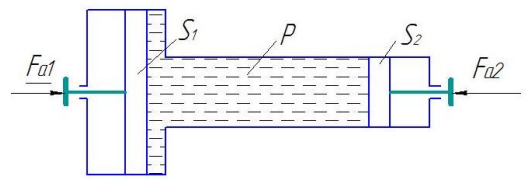
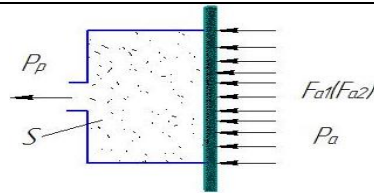
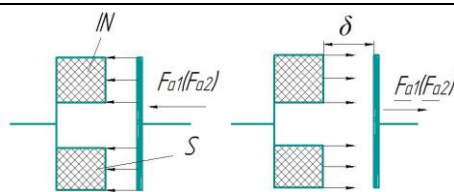
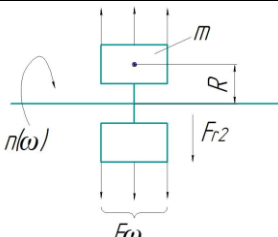


Рис.3.14. Виды преобразователей в ЗМ:  
 а – винтовых (SC); б – зубчатых (GR); в – упругих (SR)

Схемы и характеристики силовых (энергетических) потоков с различными средами передачи и преобразования приведены в табл. 3.3.

Виды силовых потоков с различными средами в 3М

| №<br>п/<br>п | Вид<br>поток<br>а | Схема потока с различными средами                                                   | Признаки передачи и<br>преобразования                                                                                                                           |
|--------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1            | М                 |    | $ F_{a1}  = S \cdot \sigma$                                                                                                                                     |
| 2            |                   |   | $ F_{a1}  = S_1 \cdot \sigma_1$<br>$ F_{a1}  = S_2 \cdot \sigma_2$                                                                                              |
| 3            | Э                 |    | $M_{a1} = IBS_B$                                                                                                                                                |
| 4            |                   |    | $F_{a1} = IBL$                                                                                                                                                  |
| 5            | Ж(В)              |  | $ F_{a1}  = S \cdot p$                                                                                                                                          |
| 6            |                   |  | $ F_{a1}  = S_1 \cdot p$<br>$ F_{a2}  = S_2 \cdot p$<br>$\frac{S_1}{ F_{a1} } = \frac{S_2}{ F_{a2} }$<br>$K_{yc} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{ F_{a1} }{ F_{a2} }$ |
| 7            | В                 |  | $F_{a1} = P_p S$<br>$F_{a2} = S(P_a - P_p)$                                                                                                                     |
| 8            | М                 |  | Постоянный ток<br>$ F_{a2}  = \frac{1}{2} (IN)^2 \mu_o \frac{S}{\delta^2}$<br>Переменный ток<br>$ F_{a2}  = \frac{1}{4} (IN)^2 \mu_o \frac{S}{\delta^2}$        |
| 9            | Ц                 |  | $F_{r2} = F_w$<br>$F_w = z \cdot m \cdot \omega^2 R$                                                                                                            |

Примечание:  $S$  – площадь тела (среды);  $\sigma$  – нормальные напряжения растяжения-сжатия в твёрдом теле;  $M_{a1}$  – крутящий момент сил электромагнитного поля;  $S_1, S_2$  – жидкотекучей или воздушной среды со стороны соответственно входа и выхода;  $n(\omega)$  – частота (угловая скорость) вращения;  $P_p$  – разряжение (давление);  $P_a$  – атмосферное давление;  $I$  – сила тока,  $N$  – число витков катушки;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $R$  – радиус неуравновешенных масс  $m$ ;  $B$  – индукция;  $S_B$  – площадь витков;  $L$  – длина проводника.

Пример описания ЗМ в виде генетических формул представлен на уровнях (см.рис. 3.1):

генетическом,  $F_{x1}$  ;

хромосомном,  $F_{x1} - F_{y2}$ ;

объектном,  $F_{x1} - F_{y2}(1 \cdot K_R)$ ;

популяционном,  $F_{x1} - LV - F_{y2}(1 \cdot K_R)$ ;

видовом,  $F_{x1} - LV - F_{y2}(1 \cdot K_R) - CL$ ;

системном,  $\mathcal{E} - \mathcal{EM} - F_{x0} - (WD - LV) - F_{x1} - LV - F_{y2}(1 \cdot K_R)$ .

Здесь  $\mathcal{E}$  – электрический источник энергии;  $\mathcal{EM}$  – электромеханический преобразователь (первичный), создающий на входе привода зажима (ПрЗ) осевую силу  $F_{x0}$ ;  $(WD - LV)$ - гибридный клинорычажный передаточно-усилительный механизм с выходной силой  $F_{x1}$ , являющейся входом в зажимной патрон (ЗП),  $LV$  – рычажный преобразователь – передаточно-усилительное звено (ПуЗ);  $F_{y2}(1 \cdot K_R)$  – выходная радиальная сила зажима  $F_2$  при замкнутом силовом контуре (цифра 1, а если контур разомкнутый – цифра 0) и количестве зажимных элементов  $n$ , определяемом множителем репликации  $K_R$  (для трехкулачкового ЗП  $K_R = 3$ ).

С использованием вышеприведенных соображений приведём примеры описания и синтеза ЗМ для зажима режущих инструментов с учётом высокоскоростной обработки и расширения диапазона диаметров режущих

инструментов с цилиндрическим хвостовиком (фрез, сверл, разверток, зенкеров).

Пример 1. Создать ЗМ и вписать в шпиндельный узел (ШУ) сверлильно-фрезерного станка для высокоскоростной обработки.

В качестве источника энергии в силовом потоке выберем электромагнитное поле Э (поз. 3, табл. 3.3), момент которого  $M_{a0}$  преобразуем в осевое перемещение через винтовой преобразователь SC, (см. рис. 3.8, д), а далее усилие  $F_{a1}$  передадим цанговому (клиновому) патрону через гидравлическую (жидкотекучую) среду Ж (поз. 6, табл. 3.3) для зажима фрезы с цилиндрическим хвостовиком CL.

Запишем этот ЗМ в виде генетико-морфологической формулы силового потока на популяционном уровне:

$$\mathcal{E} - M_{a0} - SC - F_{a1} - Ж - F_{a1} \cdot K_{yc} - WD - F_{r2} - CL \quad (3.6)$$

Этой формуле соответствует схема ЗМ по патенту Украины №80481 [330], представленная на рис. 3.15.

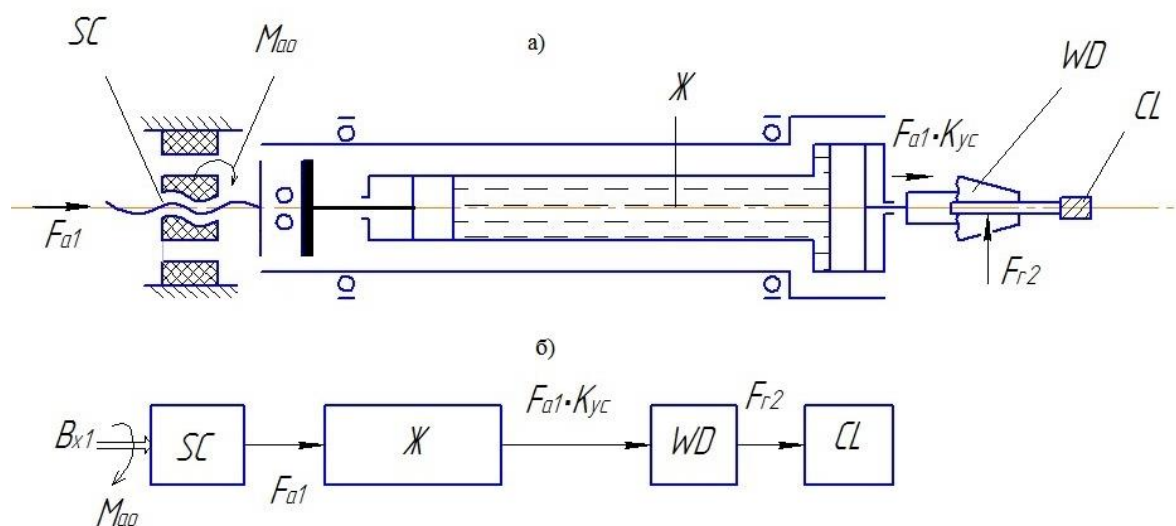


Рис.3.15. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы электрогидромеханического ЗМ с цанговым ЗП и одним силовым потоком

Пример 2. Создать широкодиапазонный инструментальный зажимной для сверлильных, фрезерных, многоцелевых станков и дрелей (рис.3.16,а).

В качестве источника энергии выбран ручной зажим через две механические цепи (силовые потоки).



По второй кинематической цепи от руки передаётся усилие вращением резьбовой гайки  $SC_2$  с моментом  $M_{a1}^2$  для натяга системы путем дополнительного перемещения конусной втулки  $WD$  с силой  $F_{a1}^2$ , а далее через поворот эксцентричных зажимных кулачков. Это можно записать генетической формулой:

$$M_2 - M_{a1}^2 - SC_2 - F_{a1}^2 - WD - N^2 - LV \cdot F_{r2}^2 - CL. \quad (3.8)$$

Так как выходное усилие зажима  $F_{r2}$  определяется действием двух силовых потоков, то оно равно  $F_{r2}^1 = F_{r2}^2 + F_{r2}$  и зависит от сумм двух входных сил  $F_{a1} = F_{a1}^1 + F_{a1}^2$ .

Сложив 2 потока, получим формулу:

$$\begin{array}{l} \begin{array}{c} \xrightarrow{M} \\ \left[ \begin{array}{l} M_1 - M_{a1}^1 - SC_1 - F_{a1}^1 \\ M_2 - M_{a1}^2 - SC_2 - F_{a1}^2 \end{array} \right] \end{array} \begin{array}{c} \leftarrow F_{a1}^1 \\ \leftarrow F_{a1}^2 \end{array} \begin{array}{c} \otimes \\ \otimes \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow F_{a1} \\ \rightarrow F_{a1} \end{array} \end{array} \quad \begin{array}{l} M - (F_{a1}^1 - F_{a1}^2) - WD - (N^1 + N^2) - \\ - LV - (F_{r2}^1 + F_{r2}^2) - CL \end{array} \quad (3.9)$$

Такой подход к записи ЗМ позволяет без особых сложностей переходить к построению расчётных схем и математических моделей ЗМ различного исполнения по мере их усложнения, используя законы механики различных тел, что будет рассмотрено в разделе 4 настоящей диссертации.

### 3.3. Характер контактного взаимодействия объекта зажима с зажимными элементами патрона, как первичного источника силового поля

Возможны различные варианты формы рабочей поверхности зажимного элемента (ЗЭ) и формы ответной поверхности объекта зажима (ОЗ), что определяет характер их взаимодействия.

Виды формы возможны следующие: цилиндрическая (CL); коническая (CN); плоская (FL); призматическая (PR); пирамидальная (PM); сферическая (AR); тороидальная (TR). Все варианты взаимодействия поверхностей ЗЭ и ОЗ можно представить морфологической моделью в виде морфологической таблицы (табл.3.4) и матрицы (3.10).



$$M_{3Э-ОЗ} = \begin{vmatrix} CL \\ CN \\ FL \\ PR \\ PM \\ AR \\ TR \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} CL \\ CN \\ FL \\ PR \\ PM \\ AR \\ TR \end{vmatrix} \text{ или } \begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 \\ 1.2 & 2.2 \\ 1.3 & 2.3 \\ 1.4 & 2.4 \\ 1.5 & 2.5 \\ 1.6 & 2.6 \\ 1.7 & 2.7 \end{vmatrix} \quad (3.10)$$

Наиболее плотный контакт, а следовательно, наибольшая жёсткость и точность зажима, обеспечиваются при условии, когда формы поверхностей ЗЭ и ОЗ одинаковые с минимальным отклонением их геометрических размеров.

Таблица 3.4

*Морфологическая таблица  
вариантов взаимодействия (упруго-силового поля) ЗЭ и ОЗ*

| 1. Форма рабочей поверхности ЗЭ | 2. Форма ответной рабочей поверхности ОЗ |
|---------------------------------|------------------------------------------|
| 1.1. Цилиндрическая (CL)        | 2.1. Цилиндрическая (CL)                 |
| 1.2. Коническая (CN)            | 2.2. Коническая (CN)                     |
| 1.3. Плоская (FL)               | 2.3. Плоская (FL)                        |
| 1.4. Призматическая (PR)        | 2.4. Призматическая (PR)                 |
| 1.5. Пирамидальная (PM)         | 2.5. Пирамидальная (PM)                  |
| 1.6. Сферическая (AR)           | 2.6. Сферическая (AR)                    |
| 1.7. Тороидальная (TR)          | 2.7. Тороидальная (TR)                   |

В этом случае для зажима снаружи и изнутри наилучшими будут следующие контактные взаимодействия: CL – CL; CN – CN; FL – FL; PR – PR; PM – PM; AR – AR; TR – TR.

Среди ОЗ в виде тел вращения наиболее распространёнными формами поверхности являются CL, CN, PR, TR. Поэтому морфологическую матрицу (3.10) можно выполнить усеченной

$$M'_{3Э-ОЗ} = \begin{vmatrix} CL \\ CN \\ PR \\ TR \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} CL \\ CN \\ PR \\ TR \end{vmatrix}, \quad (3.11)$$

дающей количество вариантов для зажима и изнутри по  $N = 4 \cdot 4 = 16$ , из них. 4 наилучших (CL – CL; CN – CN; PR – PR; TR – TR).

При зажиме снаружи рабочие поверхности ЗЭ будут внутренними (обозначим подчеркиванием чертой снизу), а поверхности ОЗ наружными (матрица 3.12), а при зажиме изнутри наоборот (матрица 3.13):

Практика применения ЗМ показывает, что нежелательными вариантами

$$M''_{ЗЭ-ОЗ} = \begin{vmatrix} CL & \underline{CL} \\ CN & \underline{CN} \\ PR & \underline{PR} \\ TR & \underline{TR} \end{vmatrix}. \quad (3.12)$$

$$M'''_{ЗЭ-ОЗ} = \begin{vmatrix} CL & \underline{CL} \\ CN & \underline{CN} \\ PR & \underline{PR} \\ TR & \underline{TR} \end{vmatrix}. \quad (3.13)$$

взаимодействия ЗЭ и ОЗ для зажима снаружи:  $\underline{CL} - CN$ ;  $\underline{CL} - PR$ ;  $\underline{CL} - TR$ ;  $\underline{CN} - CL$ ;  $\underline{CN} - PR$ ;  $\underline{CN} - TR$ ;  $\underline{PR} - CN$ ;  $\underline{PR} - TR$ ;  $\underline{TR} - CL$ ;  $\underline{TR} - CN$ ;  $\underline{TR} - PR$ .

Матрицу (3.12) можно представить как двухмерную таблицу (рис. 3.17).

|                       |           | Объект зажима (ОЗ) |                    |                    |                    | К-во совм. вариантов |
|-----------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
|                       |           | CL                 | CN                 | PR                 | TR                 |                      |
| Зажимной элемент (ЗЭ) | <u>CL</u> | <u>CL</u> – CL     | <del>CL – CN</del> | <del>CL – PR</del> | <del>CL – TR</del> | 1                    |
|                       | <u>CN</u> | <del>CN – CL</del> | <u>CN</u> – CN     | <del>CN – PR</del> | <del>CN – TR</del> | 1                    |
|                       | <u>PR</u> | <u>PR</u> – CL     | <del>PR – CN</del> | <u>PR</u> – PR     | <del>PR – TR</del> | 2                    |
|                       | <u>TR</u> | <del>TR – CL</del> | <del>TR – CN</del> | <del>TR – PR</del> | <u>TR</u> – TR     | 1                    |
| всего                 |           |                    |                    |                    |                    | 5                    |

Рис. 3.17. Двухмерная морфологическая таблица взаимодействия ЗЭ с ОЗ при зажим снаружи (перечеркнуты нежелательные варианты)

Для матрицы (3.13) двухмерная таблица показана на рис. 3.18.

|                       |    | Объект зажима (ОЗ) |                    |                    |                    | К-во совм. вариантов |
|-----------------------|----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
|                       |    | CL                 | CN                 | PR                 | TR                 |                      |
| Зажимной элемент (ЗЭ) | CL | CL – <u>CL</u>     | <del>CL – CN</del> | CL – <u>PR</u>     | <del>CL – TR</del> | 2                    |
|                       | CN | <del>CN – CL</del> | CN – <u>CN</u>     | <del>CN – PR</del> | <del>CN – TR</del> | 1                    |
|                       | PR | PR – <u>CL</u>     | <del>PR – CN</del> | PR – <u>PR</u>     | <del>PR – TR</del> | 2                    |
|                       | TR | <del>TR – CL</del> | TR – <u>CN</u>     | <del>TR – PR</del> | TR – <u>TR</u>     | 2                    |
| всего                 |    |                    |                    |                    |                    | 7                    |

Рис. 3.18. Двухмерная морфологическая таблица взаимодействия ЗЭ с ОЗ при зажим изнутри (перечеркнуты нежелательные варианты)

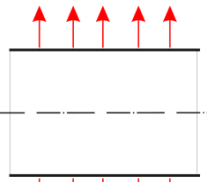
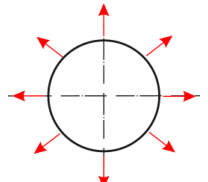
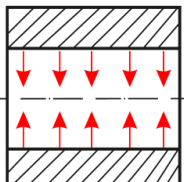
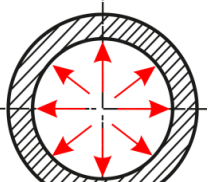
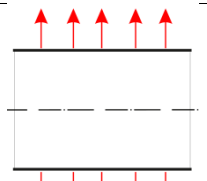
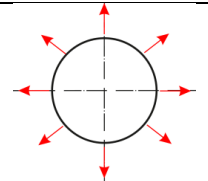
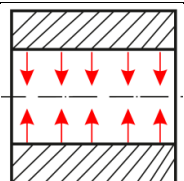
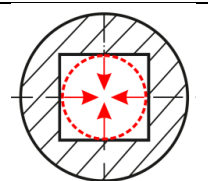
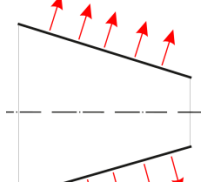
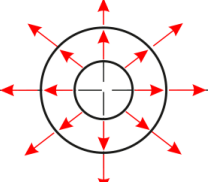
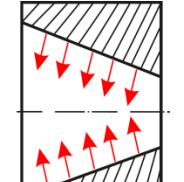
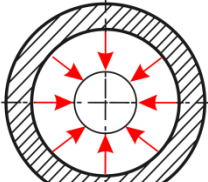
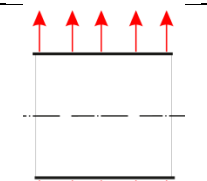
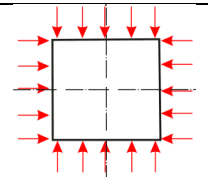
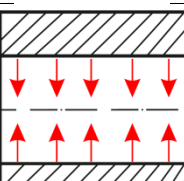
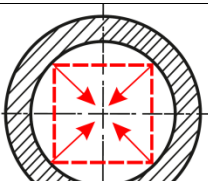
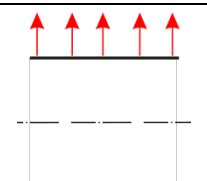
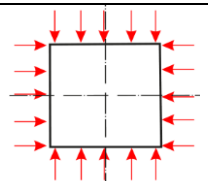
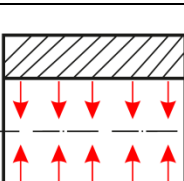
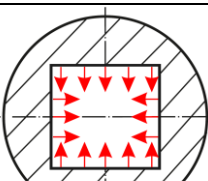
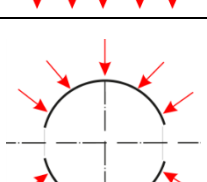
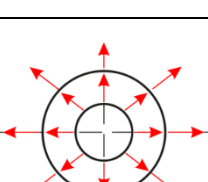
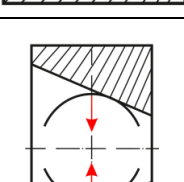
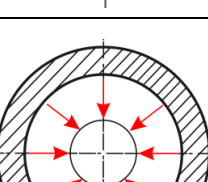
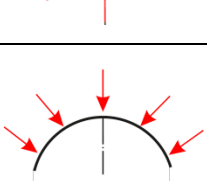
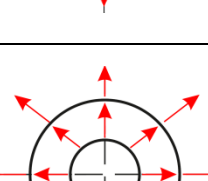
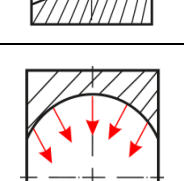
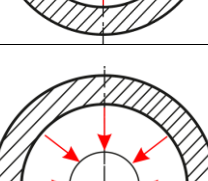
Таким образом из 32-х вариантов взаимодействия ЗЭ с ОЗ возможным является только 12 вариантов (табл.3.5).

При двойном зажиме количество совместимых вариантов взаимодействия ЗЭ с ОЗ станет значительно больше, что будет рассмотрено далее.

Таблица 3.5

Варианты совместимого взаимодействия ЗЭ с ОЗ

| ЗАЖИМ СНАРУЖИ         |                |             |               |                |             |
|-----------------------|----------------|-------------|---------------|----------------|-------------|
| Зажимной элемент (ЗЭ) |                |             | Объект зажима |                |             |
| Обоз.                 | Силовой контур |             | Обоз.         | Силовой контур |             |
|                       | Вдоль оси      | Поперек оси |               | Вдоль оси      | Поперек оси |
| <b><u>CL</u></b>      |                |             | <b>CL</b>     |                |             |
| <b><u>CN</u></b>      |                |             | <b>CN</b>     |                |             |
| <b><u>PR</u></b>      |                |             | <b>PR</b>     |                |             |
| <b><u>PR</u></b>      |                |             | <b>CL</b>     |                |             |
| <b><u>TR</u></b>      |                |             | <b>TR</b>     |                |             |

| ЗАЖИМ ИЗНУТРИ |                                                                                     |                                                                                     |           |                                                                                      |                                                                                       |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| CL            |    |    | <u>CL</u> |    |    |
| CL            |    |    | <u>PR</u> |    |    |
| CN            |    |    | <u>CN</u> |    |    |
| PR            |   |   | <u>CL</u> |   |   |
| PR            |  |  | <u>PR</u> |  |  |
| TR            |  |  | <u>CN</u> |  |  |
| TR            |  |  | <u>TR</u> |  |  |

### 3.4. Влияние структуры зажимного патрона на расширение размерных возможностей зажима

Обеспечение требуемой силы зажима и прочности ЗМ в настоящее время является необходимым условием, но недостаточным вследствие повышения гибкости быстропереналаживаемого автоматизированного производства, что требует широкодиапазонности и быстропереналаживаемости ЗМ, в частности, зажимных патронов (ЗП) при сохранении их точности, жесткости, долговечности и стабильности характеристик [108-111].

На широкодиапазонность ЗМ существенно влияет структура ЗП, виды силового потока, контура и вид передающей среды.

Ниже это будет проиллюстрировано на наружном зажиме ОЗ цилиндрической формы (CL), которым может быть штучная заготовка, прутки и инструмент. На рис.3.19 представлены 8 схем охвата различных ЗП ( $ЗП_1 \dots ЗП_8$ ) с увеличением диапазона зажимаемых диаметров [133, 300]:

I –  $ЗП_1$  для  $ОЗ_1$  – одного диаметра режущего инструмента с цилиндрическим хвостовиком, имеющего отклонения в пределах  $\mu\text{м}$ ;

II –  $ЗП_2$  для  $ОЗ_1$  – одного диаметра – режущего инструмента, имеющего отклонения в пределах сотнях долей мм;

III –  $ЗП_3$  для  $ОЗ_1$  – одного номинального диаметра режущего инструмента или прутка, имеющего отклонения в пределах от десятых долей миллиметра (мм) до одного мм;

IV –  $ЗП_4$  для  $ОЗ_2$  одного-двух номинальных диаметров;

V –  $ЗП_5$  для  $ОЗ_3$  двух-трех номинальных диаметров;

VI –  $ЗП_6$  для  $ОЗ_4$  трех-пяти номинальных диаметров;

VII –  $ЗП_7$  для  $ОЗ_5$  от пяти номинальных диаметров до половины или полного рабочего диапазона станка;

VIII –  $ЗП_8$  для  $ОЗ_6$  от половины до полного рабочего диапазона станка и даже с запасом.

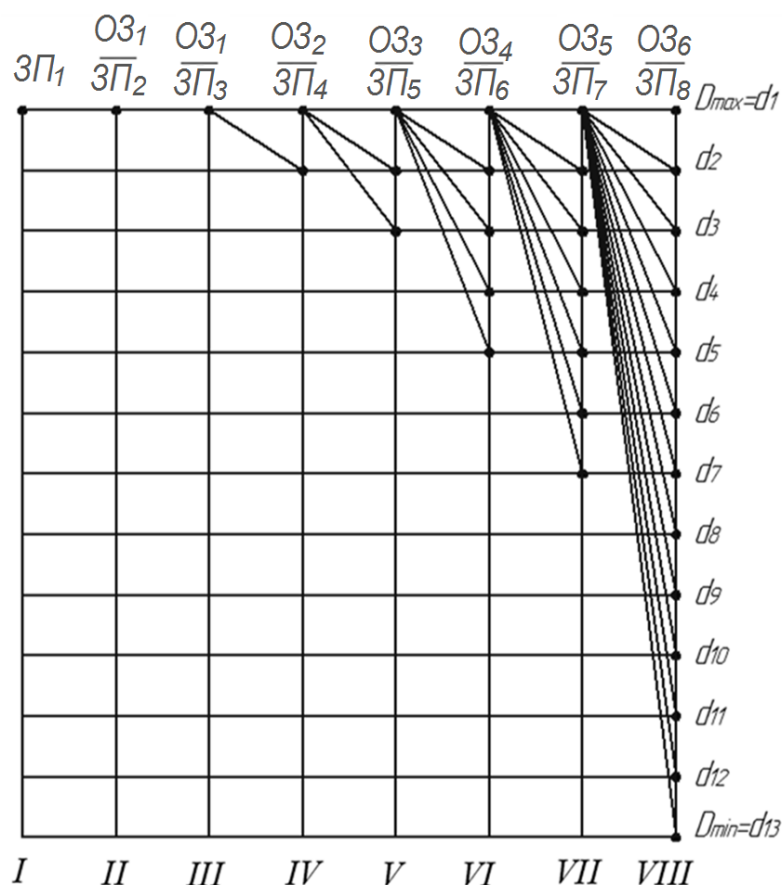


Рис.3.19. Схемы охвата диаметров  $OЗ$  с использованием  $ЗП$  различных структур

Увеличение диапазона  $\Delta d$  зажимных диаметров влияет на тенденции изменения характеристик  $ЗП$  в различных структурах (см. рис.3.20).

Радиальные биения  $\Delta r$  увеличиваются (рис.3.20, а). Статический коэффициент усиления  $K_{\Pi}$  как отношение выходной силы зажима  $F_2$  входной  $F_1$  (рис.3.20, б), увеличивается с введением передаточно-усилительных звеньев (клинового, рычажного) или элементов самонастройки и уменьшается с использованием нескольких передаточно-усилительных звеньев для увеличения хода последнего звена (мультипликации), что увеличивает потери на трение, а при изменении принципа действия (применение физического или другого эффекта) коэффициент усиления существенно увеличивается (кривая 1, рис. 3.20, б), или приближается к единице (пунктирная кривая 2, рис. 3.20, б). Коэффициент удержания силы зажима  $K_{F\omega} = F_{\omega} / F_2$  (где  $F_{\omega}$  – динамическая радиальная сила зажима при вращении  $ЗП$  с учетом влияния центробежных сил

неуравновешенных ЗЭ) уменьшается (кривая 1, рис. 3.20, в) и при том существенно при разрыве связи между ЗЭ (пунктирная кривая 2, рис. 3.20, в).

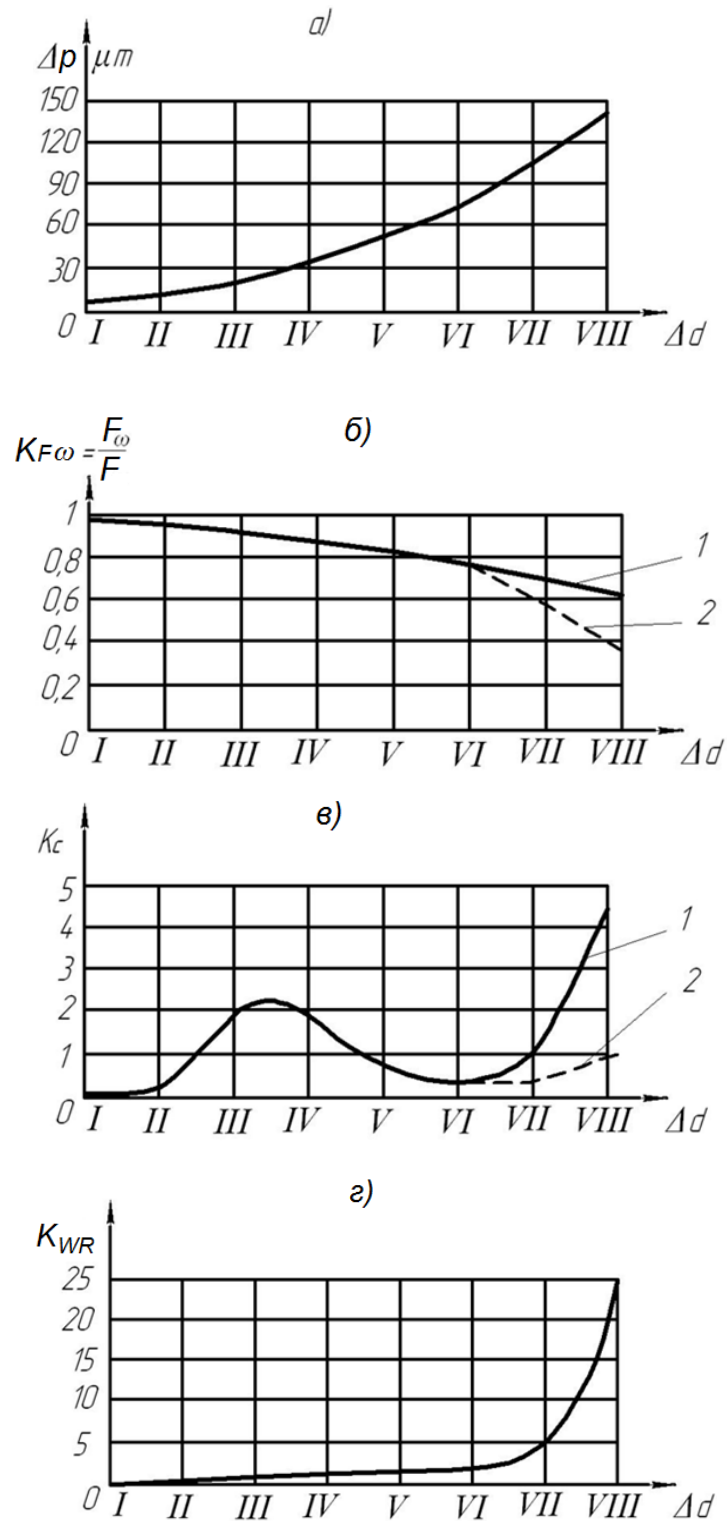


Рис.3.20. Тенденции изменения характеристик различных структур ЗП с увеличением диапазона зажима  $\Delta d$ : а – радиального биения; б – статического коэффициента усиления; в – коэффициента удержания силы зажима; г – широкодиапазонности

Коэффициент качества ЗП по широкодиапазонности  $K_{WR}$  расчет сначала монотонно, а затем интенсивно (рис. 3.20, д) и равен:

$$K_{WR} = \frac{\Delta F_2}{F_2} \cdot \frac{\Delta d}{D_{max}} = \delta_F \cdot \delta_d, \quad (3.14)$$

где:  $\Delta F_2$  – разброс радиальной силы зажима при отклонении зажимаемых диаметров;  $\Delta d = D_{max} - D_{min}$ ;  $F_2$  – среднее значение радиальной силы зажима;  $D_{max}$  – максимальный диаметр зажима ОЗ, предусмотренный паспортом станка;  $\delta_F = \frac{\Delta F_2}{F_2}$  – коэффициент неравномерности силы зажима;  $\delta_d = \frac{\Delta d}{D_{max}}$  – коэффициент охвата.

Пример эволюции структур и схем ЗП для тел вращения в соответствии с рис. 3.20) по критерию широкодиапазонного [110] приведен в табл. 3.6.

К I группе относятся высокоточные инструментальные ЗП фирмы Schunk GmbH с силовой запрессовкой системы TRIBOS для работы на частотах вращения  $n$  до 110 000 об / мин, термопатроны фирм Haimer GmbH с системой "Safelosk", Marquart с хвостовиком HSK-63A и др. [108].

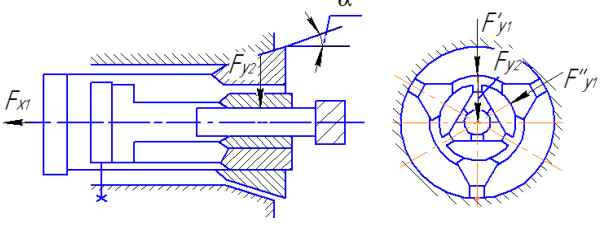
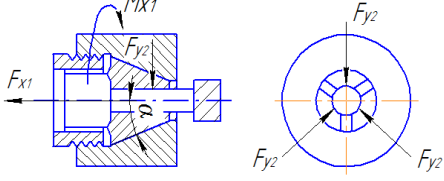
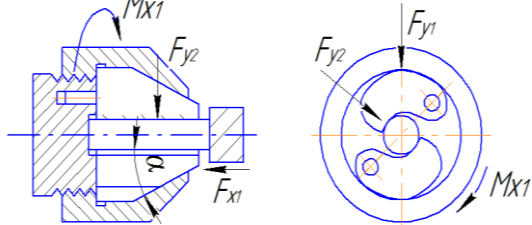
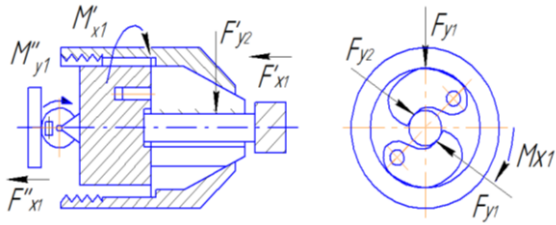
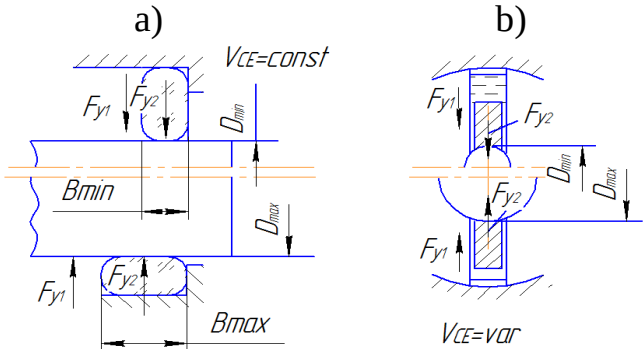
Ко II группе относятся высокоточные инструментальные ЗП гидромеханические типа CoroGrip фирмы Sandvic Coromant с гидравлическим насосом, который обеспечивает давление зажима до 70 МПа, а разжима до 100 МПа [108, 140]. В ЗП I и II групп радиальные биения не превышает 2-6 мкм, и зажим хвостовиков разного диаметра в сторону уменьшения обеспечивается за счет применения переходных цилиндрические цанговых втулок. К III группе относятся цанговые ЗП одинарного и двойного зажима для инструментов и калиброванных прутков. Переход на другой диаметр зажима может осуществляться сменой основной цанг, неподвижных в осевом направлении промежуточных цилиндрических цанг, вкладышей, которые крепятся к рабочим губкам основной цанги [56, 104, 109, 125, 225, 236]. Смена основных цанг может быть автоматической в условиях гибкого автоматизированного производства [7, 115]. К IV группе относятся самонастраивающиеся цанговые подпружиненным ЗП [36, 225] с



Таблица 3.6

Схемы зажимных патронов, их силовые (энергетические) потоки и их генетические формулы

| № Структуры | Тип патрона                                                         | Структурная схема с силовым потоком | Генетическая формула           |
|-------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1           | 2                                                                   | 3                                   | 4                              |
| I           | С упругой сплошной цилиндрической втулкой                           |                                     | $F_{y1} - F_{y2}$              |
| II          | С упругой сплошной конической втулкой                               |                                     | $F_{x1} - F_{y2}$              |
| III         | Цанга с упругими лепестками                                         |                                     | $F_{x1} - F_{y2}$              |
| IV          | Самонастраивающийся цанговый патрон (СЦП)                           |                                     | $(F_{x1}^c + F_{y2}) - F_{y2}$ |
| V           | Широкодиапазонный цанговый патрон (ШЦП) с одинарной мультипликацией |                                     | $F_{x1} - F'_{y1} - F_{y2}$    |

| 1    | 2                                                                                                          | 3                                                                                    | 4                                                                                                                                          |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| VI   | Широкодиапазонный<br>цанговый патрон<br>(ШЦП) с двойной<br>мультипликацией                                 |    | $F_{x1} - (F'_{y1} - F''_{y1}) - F_{y2}$                                                                                                   |
| VII  | Цанговый патрон с<br>резьбовой втулкой                                                                     |    | $M_{x1} - F_{x1} - F_{y2}$                                                                                                                 |
| VIII | Широкодиапазонный<br>эксцентриковый<br>сверлильно-фрезерный<br>патрон с одной<br>кинематической цепью      |   | $M_{x1} - F_{x1} - F_{y1} - F_{y2}$                                                                                                        |
| IX   | Широкодиапазонный<br>эксцентриковый<br>сверлильно-фрезерный<br>патрон с двумя<br>кинематическими<br>цепями |  | $M'_{x1} - F'_{x1} - F'_{y1} - F'_{y2} - F''_{x1} - F''_{y1} - F''_{y2}$<br>$M'_{y1} - F'_{x1} - F'_{y1} - F''_{x1} - F''_{y1} - F''_{y2}$ |
| X    | Широкодиапазонный патрон с<br>зажимными<br>элементами<br>постоянного (а) и<br>переменного (б)<br>поля      |  | $F_{y1} - F_{y2}$                                                                                                                          |

промежуточным ЗЭ, автоматически выбирающими зазор между ними и прутком при его подаче. Такие патроны надежно работают при зажиме

некалиброванных заготовок и горячекатанных прутков. Охват диапазона  $\Delta d$  обеспечивается за счёт хода основной цанги  $X_o$  и самонастройки  $X_s$ :

$$\Delta d = 2(X_o \cdot \operatorname{tg} \alpha + X_s \cdot \operatorname{tg} \beta), \quad (3.15)$$

где  $\alpha$  – половина угла конуса основной цанги;  $\beta$  – угол клина промежуточного ЗЭ, не превышающего угол трения (не более  $4 \dots 5^\circ$ ).

Переход на другой диапазон диаметров зажима может осуществляться сменой патронов, промежуточных ЗЭ (клиновых кулачков, браслетных цанги). К V группе относятся широкодиапазонные цанговые ЗП с одинарной мультипликацией ( $m = 1$ ) за счет образования тангенциальной разрезкой дополнительных клиновидных ЗЭ [110, 145], обеспечивающих диапазон

$$\Delta d_1 = \frac{2 X_o}{\cos^{\pi/Z}} \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.16)$$

где  $Z$  – количество тангенциальных разрезов (не менее 3);  $\alpha$  – половина угла конуса основной цанги.

К VI группе относятся широкодиапазонные цанговые ЗП с двойной мультипликацией ( $m = 2$ ) [225] за счет введения во внутрь основной цанги с одинарной мультипликацией промежуточной цилиндрической цанги с тангенциальной разрезкой, образующей вторую группу клиновидных ЗЭ и вторую скорость мультипликацию хода, а значит диапазон:

$$\Delta d_2 = \frac{\Delta d_1}{\cos^{\pi/Z}} = \frac{2 X_o}{(\cos^{\pi/Z})^2}. \quad (3.17)$$

Переход на другой диапазон диаметров зажима осуществляется сменой промежуточной цилиндрической цанги или вкладышей, прикрепляемых к её клиновидным ЗЭ.

Дальнейшее увеличение диапазона возможно за счёт тройной мультипликации, однако приводит к увеличению диаметральных габаритов ЗП и снижению его коэффициента усиления.

При числе мультипликаций  $m$  диапазон диаметров зажима будет:

$$\Delta d_m = \frac{2 X_o}{(\cos^{\pi/Z})^m}. \quad (3.18)$$

При  $z = 3$  увеличения диапазона с увеличением числа мультипликаций происходит в геометрической прогрессии:

$$\Delta d = \frac{2 X_0}{\cos \pi/3} = 4X_0; \Delta d_2 = 8X_0; \Delta d_3 = 16X_0, \quad \text{и т. д.}$$

Это приводит к мысли перехода на другой принцип зажима с использованием сыпучих и текучих сред (VIII группа СЕ).

К VII группе относятся разработанные в НТУУ «КПИ», широкодиапазонные клино-плунжерные ЗП с двумя передаточно-усилительными звеньями для прутков [15, 110] и быстропереналаживаемые ЗП с позиционируемыми многопрофильными кулачками [40, 107, 109].

Для расширения диапазона работы ЗП необходимо [95, 104, 110, 111, 112]: переходить от цельного жесткого ЗЭ путем увеличение податливости упругих связей между отдельными ЗЭ до разрыва этих связей; вводить кроме твердых, текучие сыпучие среды; менять принципы зажима даже при одной схеме силового (энергетического) потока; заменять непрерывную схему охвата для твердых сред дискретной или дискретно-непрерывной.

### **3.5. Применение генетических операторов для структурно-схемного синтеза зажимных патронов**

Поиск новых ЗМ и их элементов, как ТС разной сложности структуры в задачах генетического синтеза осуществляется с помощью универсальных генетических операторов [152, 283], которые воспроизводят соответствующее механизмы размножения и генетической изменчивости, свойственные биологическим системам. Анализ хромосомных наборов известных классов ЗМ, зажимных патронов (ЗП) и приводов зажима (ПрЗ) свидетельствует о том, что в задачах генетического синтеза структур используется пять генетических операторов синтеза: репликации, скрещивания, кроссинговера, инверсии и мутации.

Комбинаторные варианты первых четырех генетических операторов вместе с операторами геометрических преобразований [283] определяют

потенциально возможные пространственные комбинации (хромосомные наборы) и варианты различных мутаций силовых (энергетических) потоков и сред (твердых, текучих, сыпучих) в структурах ЗМ, т.е. устанавливают диапазон их генетической изменчивости в пределах конкретного вида системы ЗМ.

**Оператор репликации** моделирует процедуру размножения исходной структуры с сохранением соответствующей совокупности её генетических признаков – пространственной формы преобразователя силового потока (ПСП). На хромосомном уровне при осуществлении процедуры репликации роль исходной структуры выполняют хромосомы-репликаторы (разрезы, надрезы, канавки, пазы, создающие зажимные элементы и т.п.), которые делят пространство ПСП на отдельные зажимные элементы – пространственные композиции хромосом-наследников. Примером создания с использованием оператора репликации зажимных цанг с конической пространственной формой преобразователя WD являются радиальные разрезы конического пространства вдоль оси вращения (рис. 3.21).

Пространство преобразователя WD (рис. 3.21, а) делится на клиновые (рис. 3.21, в) и сегментные элементы (формы) в поперечном направлении (рис. 3.21, б) и секторные элементы (рис. 3.21, в). Генетический оператор репликации был использован при синтезе цанговых зажимных патронов дифференциально-морфологическим методом [111, 112], где на стадии поиска структур и схем применялся эвристический приём полного и неполного расчленения. Генетические механизмы репликации обуславливают возникновение структурного полиморфизма – одного из наиболее производительных (эффективных) факторов генетической изменчивости, предполагающего существование двух и более форм объекта соответственно с заданной группой признаков.

Соответственно заданного количества элементов (множителей репликации  $K_R = 1, 2, 3, \dots$ ) в результате репликации зажимного элемента (ЗЭ) одним из методов его расчленения образуются 2, 3 и более количеств

контактных взаимодействий ЗЭ с объектом зажима (ОЗ), относительная ориентация которых в пространственной структуре силового потока ЗМ и силового контура в ЗП конкретизируется с помощью соответствующих симметричных преобразований (параллельного переноса, поворота, зеркального отображения, смещения и их комбинаций).

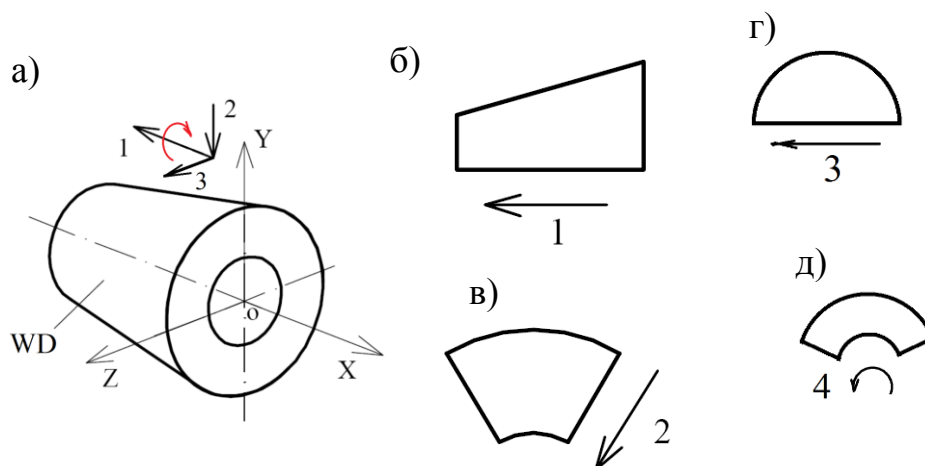


Рис.3.21. Создание традиционных и нетрадиционных зажимных цанг с применением генетического оператора репликации: а) конический ПСП; б) плоскость разреза  $YOX$ ; в) плоскость разреза  $YOZ$ ; г) плоскость разреза, параллельная плоскости  $XOZ$ ; д) поверхность разреза вокруг оси вращения  $X$ ; 1, 2, 3, 4 – направления разреза

Рассмотрим на примере родительской хромосомы  $F_{a1} - F_{r2}$  и хромосомы-наследника  $F_{a1} - WD - F_{r2}^1$  (силовой поток с осевой силой от привода зажима на входе  $F_{a1}$  с коническим преобразователем  $WD$  и радиальной силой зажима на выходе  $F_{r2}$ ) набора первого поколения цанговых ЗП двойного зажима (ЦПДЗ) (рис. 3.22), что приводит к повышению жесткости системы ЗП-ОЗ.

В поперечном направлении для того же первичного силового потока с родительской хромосомой  $F_{a1} - F_{r2}$  (рис. 3.23, а).

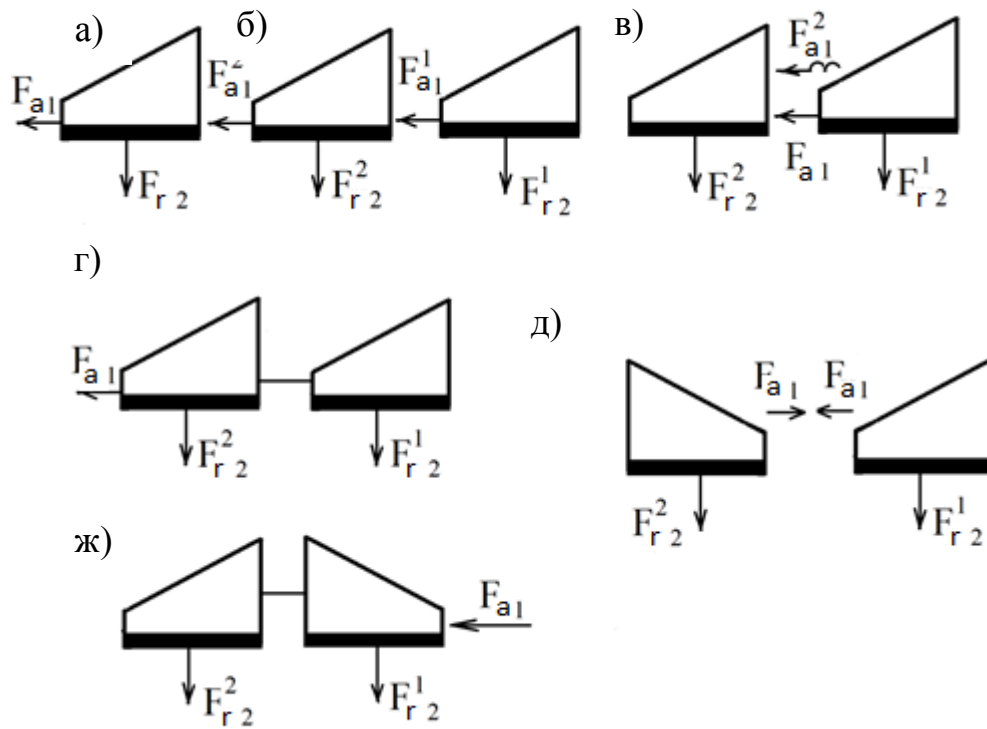


Рис. 3.22. Фрагмент хромосомного набора первого поколения, созданного по результатам репликации в продольном направлении ( $K_R = 2$ ) на примере первичного силового потока  $F_{a1} - F_{r2}$

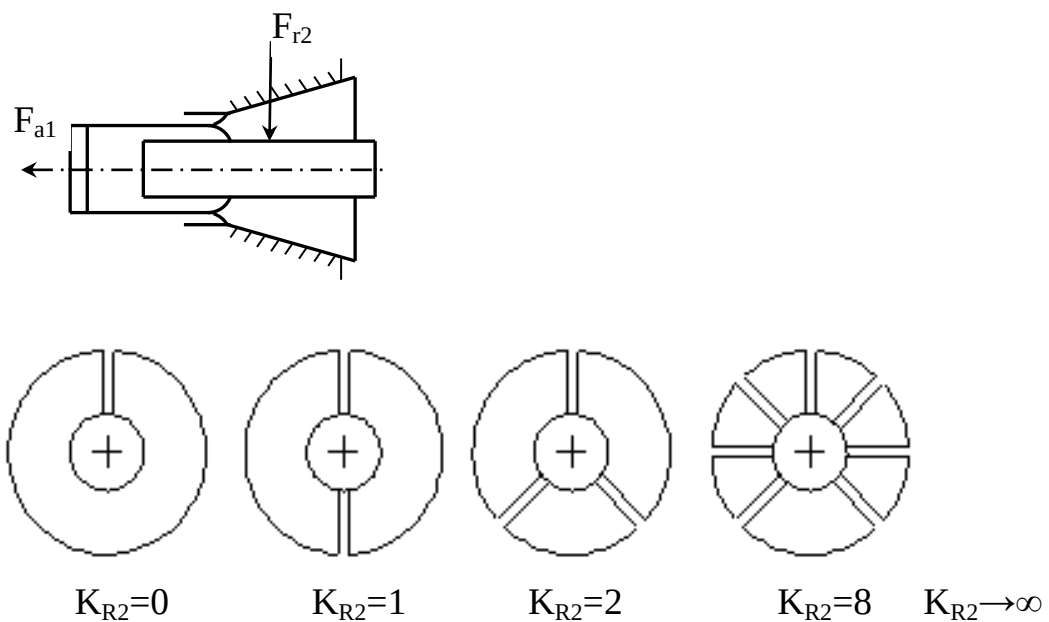


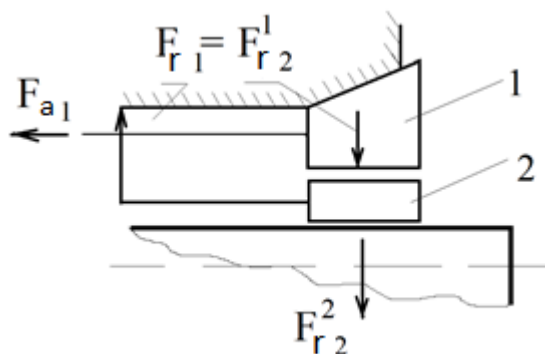
Рис. 3.23. Фрагмент хромосомного набора первого поколения, созданного по результатам репликации в поперечном направлении с различным множеством репликаций  $K_{R2}$  для первичного силового потока  $F_{a1} - F_{r2}$

В данном случае увеличение  $K_{R2}$  приводит к увеличению податливости ЗЭ и расширению возможностей зажима (см.п. 3.4).

**Оператор скрещивания**, как наиболее распространённый и эффективный, моделирует механизмы структурообразования зажимных механизмов и, в частности, цанговых зажимных патронов со смешанной генетической информацией. В методологии структурного синтеза будем понимать гибрид, созданный в результате скрещивания родственных структур, отличающихся генетической информацией.

Например, при создании высокоточных цанговых патронов (ВЦП) в осевом направлении (рис.3.24, а) используется оператор скрещивания пространственных форм ПСП конической  $G_K$  (рис.3.24, в) и цилиндрической (рис.3.24, б). Процедура скрещивания применяется как на уровне синтеза родительских хромосом (рис. 3.25, а), так и хромосом-наследников (рис. 3.25, б).

а)



б)



Рис. 3.24. Высокоточный цанговый патрон (ВЦП) результат скрещивания силовых потоков  $F_{a1} - WD - F_{r1}^1$  и  $F_{r1}^2 - SR - F_{r2}^2$ : 1 – цанга тянущего типа; 2 – неподвижная цилиндрическая цанга



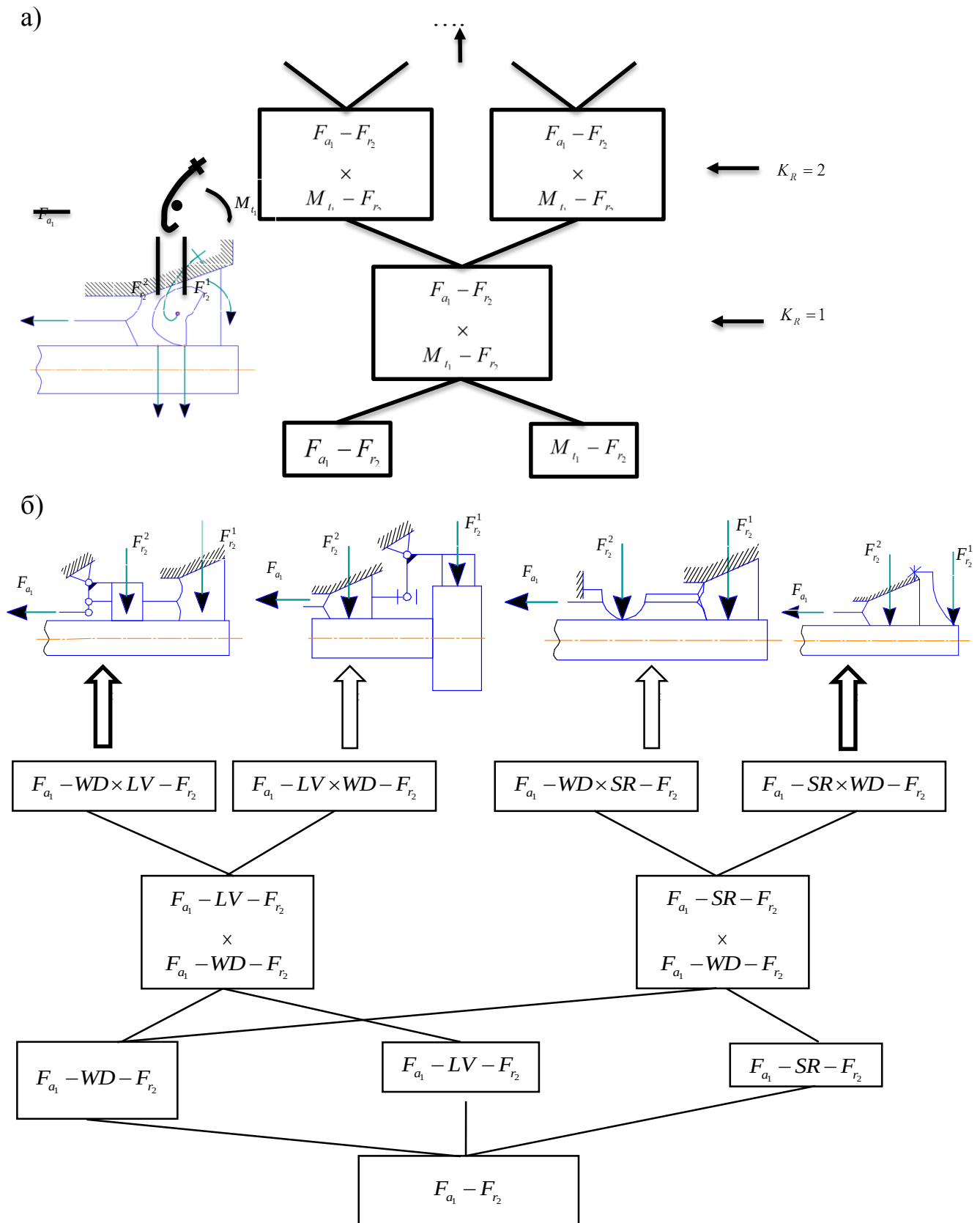


Рис. 3.25. Варианты использования оператора скрещивания на уровне синтеза зажимных патронов из двух родительских хромосом (а) и трёх хромосом-наследников одной родительской хромосомы (б)

Роль исходных структур при скрещивании выполняет любая пара одного рода силовых потоков [282, 283], которые отличаются генетической информацией по одной (моногибридное скрещивание), двумя (дигибридное скрещивание) или большего числа (полигибридное скрещивание) генетических признаков (рис. 3.25).

**Оператор инверсии** воспроизводит один из распространённых механизмов генетических мутаций в цанговых зажимных патронах. Под инверсией будем понимать размещение пары элементов в пространстве в обратном (зеркальном) порядке, например, цанга тянущего типа (генетический код  $F_{a1} - F_{r2}$ ), применяемая в многошпиндельных токарных автоматах (МТА) (рис. 3.26, а), и нажимного типа (генетический код  $\underline{F}_{a1} - F_{r2}$ ), применяемая в (одношпиндельных токарных автоматах) (ОТА) (рис. 3.26, б).

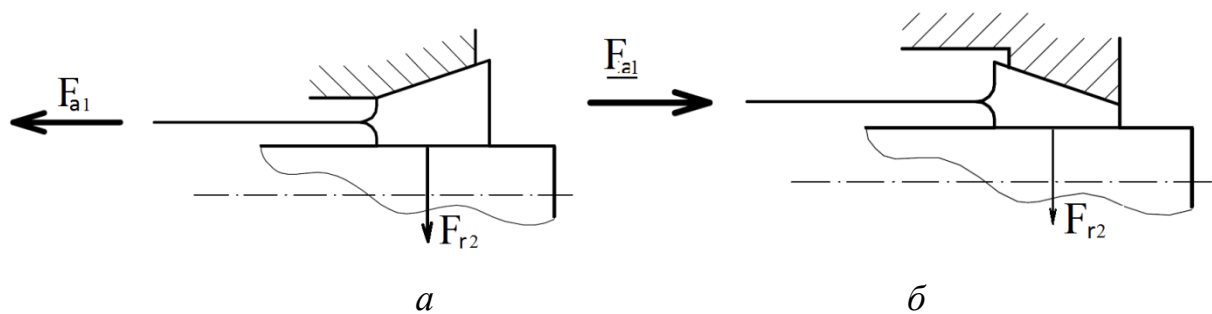


Рис. 3.26. Цанговые зажимные патроны тянущего (а) и нажимного (б) действия

**Оператор кроссинговер** моделирует обмен (пересечение) отдельных элементов на хромосомном и объектном уровнях развития ЗМ по схеме:

|                                                                                                                                                  |                   |                                                                                                                                        |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Родительские особи                                                                                                                               |                   | Наследники                                                                                                                             |        |
| $X_1 X_2 X_3 \quad \dots \quad X_{n-1} \mid X_n \quad \dots \quad X_L$<br>$Y_1 Y_2 Y_3 \quad \dots \quad Y_{n-1} \mid Y_n \quad \dots \quad Y_L$ | $\Longrightarrow$ | $Y_1 Y_2 Y_3 \quad \dots \quad Y_{n-1} X_n \quad \dots \quad X_L$<br>$X_1 X_2 X_3 \quad \dots \quad X_{n-1} Y_n \quad \dots \quad Y_L$ | (3.19) |

Примером применения оператора кроссинговера может служить синтезирование структур и схем цанговых ЗП с перекрёстным соединением ЗЭ (а. с. СССР № 1366310 и №1509190) [125].

Пусть есть 2 особи с хромосомами (рис. 3.27)  $X = \{X_1 X_2 X_3\}$  и  $Y = \{Y_1 Y_2 Y_3\}$ . В данном случае случайным образом определяется точка в середине хромосом, в которых обе хромосомы делятся на две части и обмениваются ими по схеме:

$$\begin{array}{c|c} X_1 X_2 & X_3 \\ Y_1 Y_2 & Y_3 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{c} Y_1 Y_2 X_3 \\ X_1 X_2 Y_3 \end{array} \quad (3.20)$$

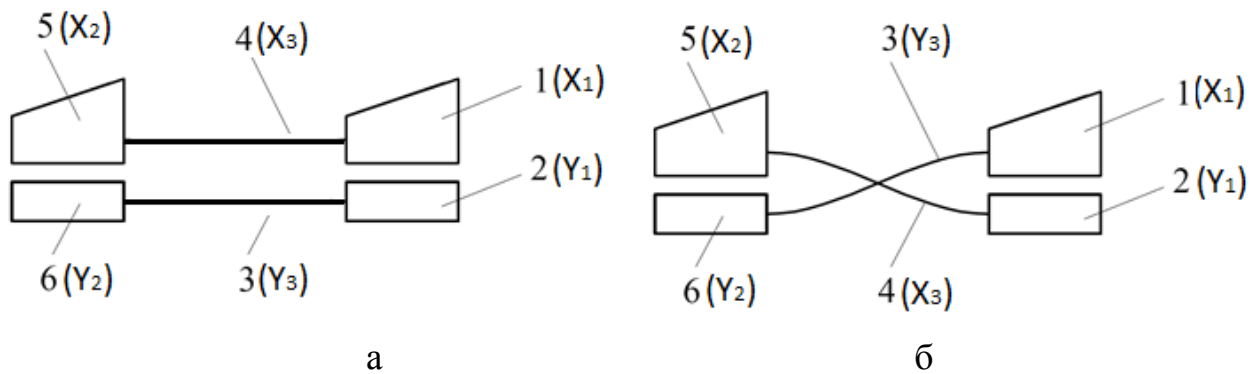


Рис. 3.27. Синтез известного цангового патрона (а) двойного зажима и с перекрёстными лепестками (б): 1 – основной зажимной элемент; 2, 6 – промежуточные зажимные элементы; 3 – лепестки, соединяющие основной 1 и промежуточный 6 зажимные элементы; 4 – лепестки, соединяющие промежуточный 2 и дополнительный 5 зажимные элементы

**Оператор мутации** можно рассматривать как моделирование изменения в структуре ЗМ, которые не учитываются генетическими операторами репликации, скрещивания и кроссинговера. В результате мутации могут появиться совершенно неожиданные структуры. Этот оператор нужен для природного отбора и размножения (распространения) случайно выбранного сочетания в хромосоме по схеме:

До мутации

После мутации

$$X_1 X_2 X_3 \dots X_{n-1} X_n X_{n+1} \dots X_L \Rightarrow X_1 X_2 X_3 \dots X_{n-1} \overline{X_n} X_{n+1} \dots X_L \quad (3.21)$$

Мутацию можно рассматривать как моделирование изменения в структуре ЗМ (или ЗП), которые не учитываются генетическими операторами репликации, скрещивания и кроссинговера. Рассмотрим пример (рис. 3.28).

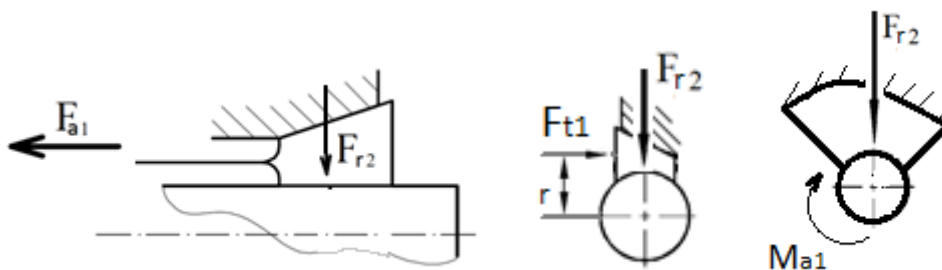


Рис. 3.28. Мутации зажимного патрона от родительской хромосомы  $F_{a1} - F_{r2}$  (а) к клиновому с тангенциальной силой входа на радиусе  $r$   $F_{t1} - F_{r2}$  (б), а затем к эксцентриковому  $M_{a1} - F_{r2}$  (в)

На объектном уровне было  $F_{a1} - WD - F_{r2}$  (рис. 3.28, а) после изменения силы  $F_{a1}$  на  $F_{t1}$  стало  $F_{t1} - WD - F_{r2}$  (рис. 3.28, в), а после замены  $WD$  на  $SP$  и  $F_{t1}$  на  $M_{a1}$  на плече  $r$  ( $M_{a1} = F_{t1}r$ ) стало  $M_{a1} - SP - F_{r2}$  (рис. 3.28, в). Мутация при естественном отборе создает стабильную популяцию, что нужно проиллюстрировать на эволюции цанговых патронов для токарных автоматов и станков с ЧПУ, где основным является зажимная цанга тянущего типа [111, 225]. Применение генетических операторов позволяет проследить эволюцию развития любой технической системы и синтезировать новые, принципиально неожиданные на уровне изобретений и даже открытий.

Исследования показали [111, 229, 249], что для надежного зажима и исключения влияния свободно вращающегося конца прутка на точность обработки деталей по мере его выработки эффективным оказывается многоступенчатый и, в частности двойной (в двух местах) зажим. Это направило мысль ученых и конструкторов на поиск новых конструкций цанговых патронов двойного зажима с использованием дифференциально-морфологического метода, где с помощью генетических операторов мутации (пространственной деформации), инверсии, скрещивания и кроссинговера (рис. 3.29, 3.30) предложено множество оригинальных решений на уровне изобретений.

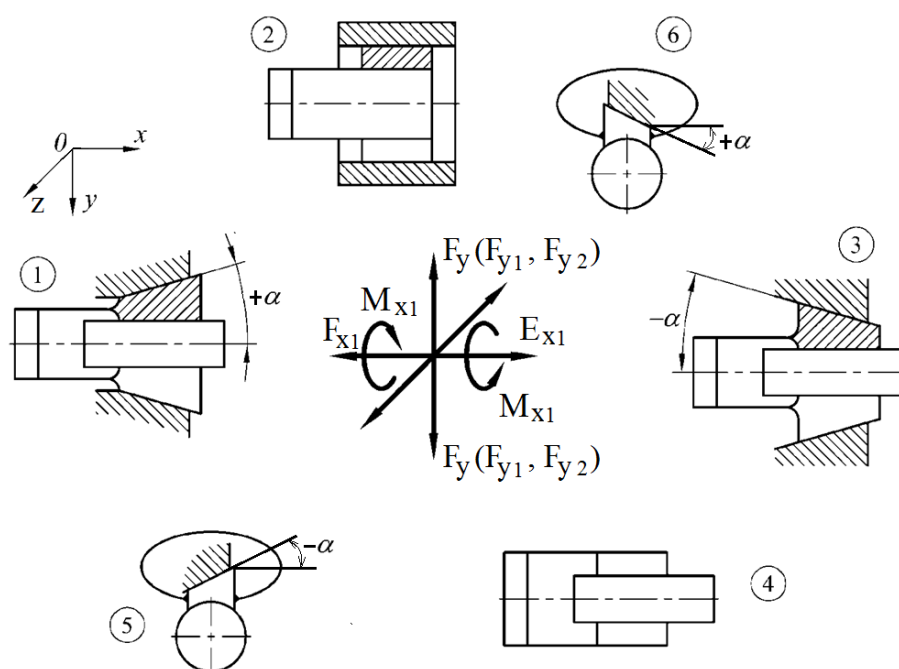


Рис.3.29. Пример пространственной мутации цанги с одинарным зажимом

На рис. 3.29 проследим процесс преобразования в плоскости  $XOZ$  зажимной цанги тянущего типа с конусом  $+\alpha$  (поз.1) в цангу нажимного типа с конусом  $-\alpha$  (поз.3), а при конусе  $\alpha = 0$  получаются цанговые захваты объекта изнутри (поз. 2) и снаружи (поз. 4). Если повернуть лепестки и губки цанг (поз. 1 и 3) из плоскости  $XOZ$  в плоскость  $YOZ$ , то получаются зажимные цанги фланцевого типа с кольцевым лепестками и губками (поз. 5 и 6), у которых наружная коническая поверхность превращается в спираль Архимеда с углом подъема  $\alpha$ .

На рис. 3.30 приведен пример пространственной мутации основного (ОЗЭ) и дополнительного (ДЗЭ) зажимных элементов поворотом их вокруг оси  $Z$ , что существенно влияет на жесткость системы патрон-деталь за счет изменения условной базы зажима ( $B_{\min}, B, B_{\max}$ ) и условного вылета нагружения силой  $P$  ( $l_{p_{\min}}, l_{p_{\max}}$ ). Лучшим является по сравнению с исходным  $(0, \pi_1)$  – конуса в одну сторону  $((B, l_{p_{\min}})$  вариант разворота дополнительного зажимного элемента на  $180^\circ (\pi_2, \pi_1)$  – конуса в разные стороны  $(B_{\max}, l_{p_{\min}})$ .

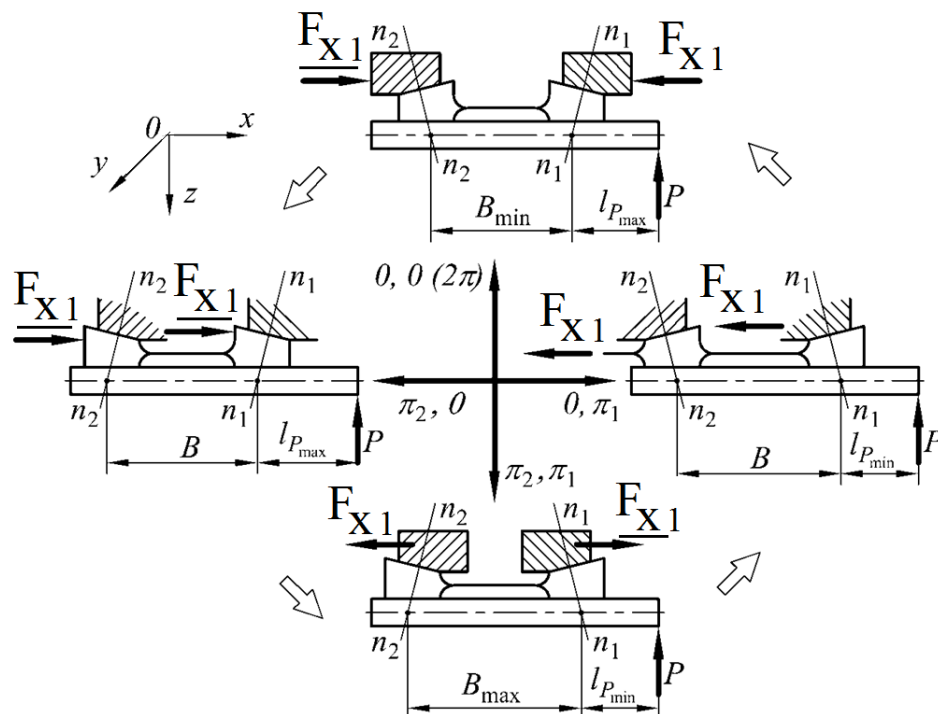


Рис. 3.30. Пример пространственной мутации цанги с двойным зажимом

При многоуровневом структурно-схемном синтезе на объектном уровне зарекомендовал себя дифференциально-морфологический метод [111, 112] с

применением эвристического приема расчленения зажимного элемента (рис.3.31), дающего двойной зажим, что расширяет классификацию энергетических (силовых) потоков, так как двойной, двухместный или двухсторонний зажим могут предполагать наличие нескольких потоков (последовательных, параллельных или параллельно-последовательных), т.е. несколько входов и выходов (рис. 3.32).

Реализация схемы (рис. 3.32, д) позволяет создать новый гомологический ряд цанговых патронов двойного зажима (рис. 3.33), а применение различных генетических операторов [131, 135, 137], например, скрещивание (гибридизация), кроссинговер (рис. 3.31, д) и мутация расширяют для проектировщика горизонты поиска неожиданных решений, которые находятся в расширенной генетической классификации и могут составлять генетический фонд на многие десятки, а то и сотни лет.

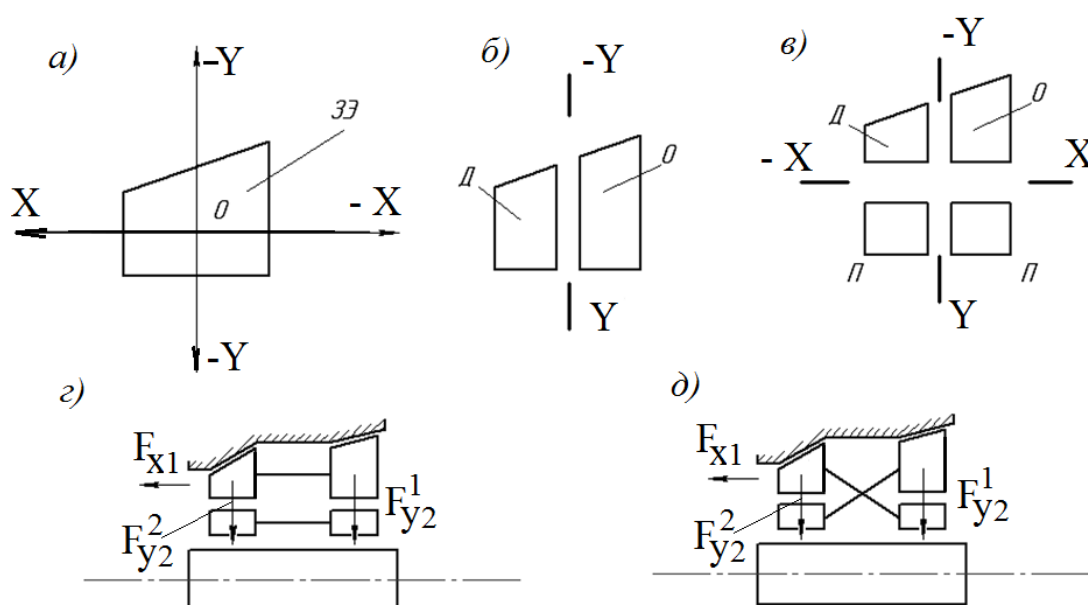


Рис.3.31. Расчленение зажимного элемента ЗЭ (а) поперек (б), вдоль и поперёк (в) в плоскостях  $XOY$  для синтеза цанговых патронов двойного зажима при различных связях между зажимными элементами (г,д): О – основными, Д – дополнительными; П – промежуточными

Генетическая классификация энергетических (силовых) потоков в ЗМ различного исполнения обобщает свойства порождающих упруго-силовых структур этих механизмов и составляет системную основу для познания фундаментальных принципов структурной организации и закономерной

развития механических, электромеханических, гидравлических, пневматических, электромагнитных, магнитных и других систем зажима деталей типа тел вращения по аналогии с генетической классификацией первичных источников электромагнитного поля [283].

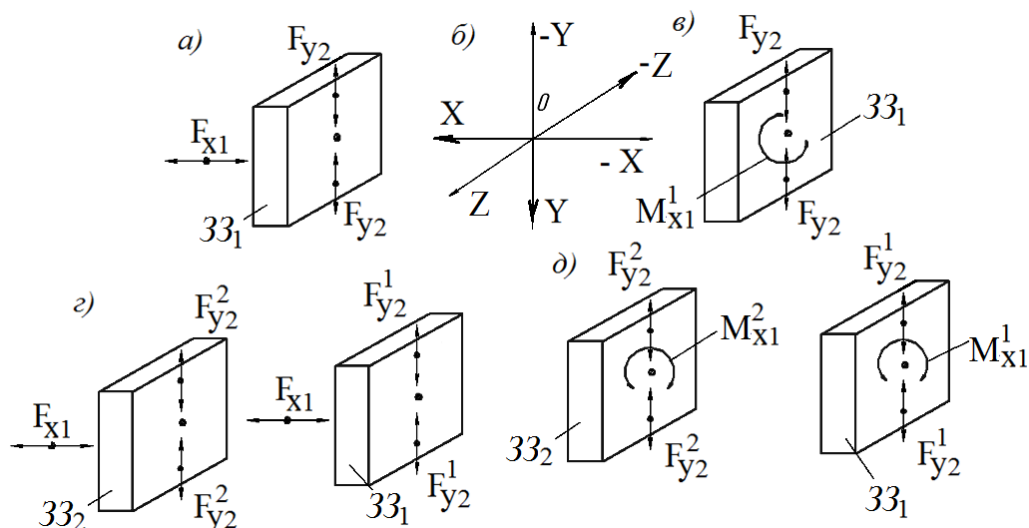


Рис.3.32. Фрагменты силовых потоков в цанговых патронах в системе координат (б) при одинарном (а, в) и двойном зажимах: 331 и 332 – зоны соответственно первого и второго зажимов

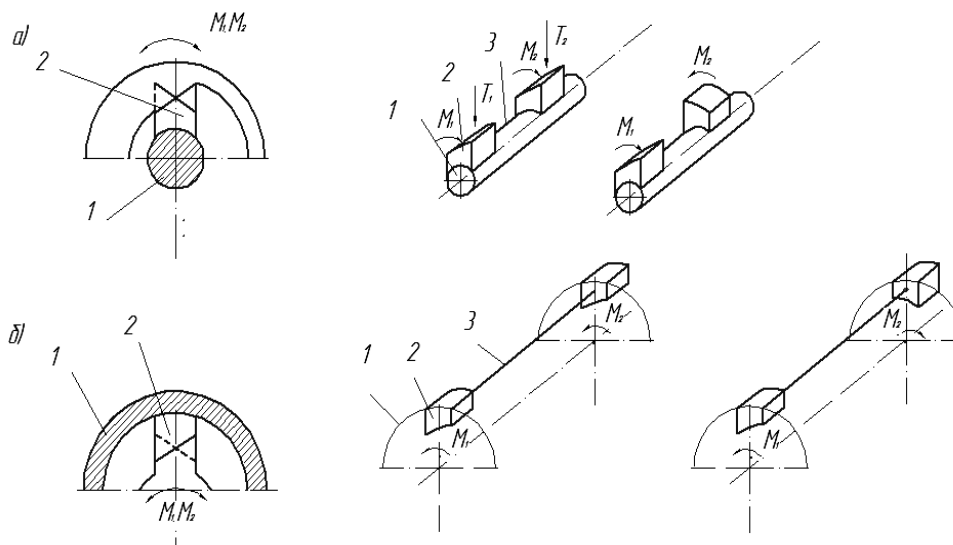


Рис.3.33. Визуализация принципа формообразования гомологического ряда цанговых патронов двойного зажима с родительской хромосомой – силовым потоком  $M_{x1} - F_{y2}$  ( $M_{a1} - F_{r2}$ ) и механическим преобразователем в виде спирали (SL) для зажима объектов: а – снаружи; б – изнутри: 1 – объект зажима (ОЗ); 2- зажимной элемент (ЗЭ); 3 – связывающий элемент (СЭ)

В предложенной классификации характера взаимодействия зажимного элемента и объекта зажима(детали, заготовки или инструмента) отображены

различные принципы и законы механики, среди которых принцип топологичной инвариантности источников поля; принцип симметрии [16, 39, 254]; принцип парности; принцип сохранения базового вида механических и других преобразователей энергии; закон сохранения энергии; принцип Даламбера; Закон Гука и др.

### 3.6. Морфологический синтез схем цанговых патронов двойного зажима и выбор лучшего варианта

Для синтеза различных конструктивных схем патронов многоместного зажима разработана морфологическая модель, основными признаками которой являются (табл. 3.7): 1. Объект зажима (ОЗ). 2. Структура (вид, характер расчленения и тип ЗЭ, конструктивное исполнение ПУЗ, переднего и заднего зажимов). 3. Связи между ЗЭ и ЗЭс корпусом. 4. Вход силового потока от привода зажима.

Морфологическая матрица,

свёрнутая

$$M_{МЗ} = M_{ОЗ} \wedge M_{ССтр} \wedge M_{ССв} \wedge M_{ССП} \quad (3.22)$$

развёрнутая

$$M_{МЗ} = \begin{vmatrix} 1 \cdot 1 \\ 1 \cdot 2 \\ 1 \cdot 3 \\ 1 \cdot 4 \\ 1 \cdot 5 \\ 1 \cdot 6 \\ 1 \cdot 7 \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} 2 \cdot 1 & 3 \cdot 1 & 4 \cdot 1 & 5 \cdot 1 & 6 \cdot 1 & 7 \cdot 1 \\ 2 \cdot 2 & 3 \cdot 2 & 4 \cdot 2 & 5 \cdot 2 & 6 \cdot 2 & 7 \cdot 2 \\ 2 \cdot 3 & 3 \cdot 3 & 4 \cdot 3 & 5 \cdot 3 & 6 \cdot 3 & 7 \cdot 3 \\ 2 \cdot 4 & 3 \cdot 4 & 4 \cdot 4 & 5 \cdot 4 & 6 \cdot 4 & 7 \cdot 4 \\ & 3 \cdot 5 & 4 \cdot 5 & 5 \cdot 5 & 6 \cdot 5 & 7 \cdot 5 \\ & 3 \cdot 6 & & & 6 \cdot 6 & 7 \cdot 6 \\ & & & & & 7 \cdot 7 \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} 8 \cdot 1 & 9 \cdot 1 \\ 8 \cdot 2 & 9 \cdot 2 \\ 8 \cdot 3 & 9 \cdot 3 \\ 8 \cdot 4 & 9 \cdot 4 \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} 11 \cdot 1 \\ 11 \cdot 2 \\ 11 \cdot 3 \\ 11 \cdot 4 \\ 11 \cdot 5 \end{vmatrix} \quad (3.23)$$

Общее количество вариантов

$$N = 7 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 5 = 14\,112\,000$$

Для поиска вариантов решения сузим поиск, ограничив конкретным назначением цангового патрона (альтернатива 6.1) для зажима круглого прутка



(альтернатива 1.1) в токарном автомате с приводом тянущего типа (альтернатива 10.1).

В этом случае морфологическая матрица выглядит усечённой:

$$M_{M3} = |1 \cdot 1| \wedge \begin{vmatrix} 2 \cdot 1 & 3 \cdot 1 & 4 \cdot 1 & 5 \cdot 1 & 6 \cdot 1 & 7 \cdot 1 \\ 2 \cdot 2 & 3 \cdot 2 & 4 \cdot 2 & 5 \cdot 2 & & 7 \cdot 2 \\ 2 \cdot 3 & 3 \cdot 3 & 4 \cdot 3 & 5 \cdot 3 & & \\ 2 \cdot 4 & 3 \cdot 4 & 4 \cdot 4 & 5 \cdot 4 & & \\ 2 \cdot 5 & 3 \cdot 5 & 4 \cdot 5 & 5 \cdot 5 & & 7 \cdot 5 \\ & 3 \cdot 6 & & & 6 \cdot 6 & 7 \cdot 6 \\ & 3 \cdot 7 & & & & 7 \cdot 7 \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} 8 \cdot 1 & 9 \cdot 1 \\ 8 \cdot 2 & 9 \cdot 2 \\ 8 \cdot 3 & 9 \cdot 3 \\ 8 \cdot 4 & 9 \cdot 4 \end{vmatrix} \wedge |10 \cdot 1| \quad (3.24)$$

Это дает существенно меньшее число вариантов  $N = 5 \cdot 7 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 = 56\,000$ .

Выбор лучших решений в условиях многокритериальной задачи требуют применения комбинированного метода, изложенного в п. 2.2 раздела 2.

Для наглядности проиллюстрируем комбинированный метод на примере морфологического синтеза зажимных патронов двойного зажима при модернизации токарного пруткового автомата, не изменяя конструкцию привода зажима тянущего типа и самого шпинделя, у которого передний конец имеет коническое отверстие и фланец с центрирующей цилиндрической поверхностью и присоединительными резьбовыми отверстиями по торцу.

Представим морфологическую модель в виде четырех функциональных признаков  $\Phi_1$ - $\Phi_4$ , характеризующих передаточно-усилительные звенья (ПУЗ) переднего  $\Phi_1$  и заднего  $\Phi_2$  зажимов, связей  $\Phi_3$  между зажимными элементами (ЗЭ) переднего и заднего зажимов и связей  $\Phi_4$  зажимных элементов с приводом зажима.

Для каждого функционального признака выберем варианты реализации в виде альтернатив (рис. 3.24):

$A_1^1$  – ПУЗ переднего зажима ( $\Phi_1$ ) ЗЭ в виде губок цанги;

$A_1^2$  – ПУЗ переднего зажима мембранное с многолепестковым ЗЭ;

$A_2^1$  – ПУЗ заднего зажима ( $\Phi_1$ ) клиновое с ЗЭ в виде губок цанги;

Таблица 3.7. Морфологическая таблица конструктивных схем зажимных патронов многоместного зажима

| 1. Объект зажима                                                                                                                                                                                            | С Т Р У К Т У Р А                                                                              |                                                                                                                                                     |                                                                                                                 |                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                                           |                                                                                              | С в я з и                                                                               |                                                                                     | 11. Вход силового потока от привода зажима                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                             | Расчленение ЗЭ                                                                                 |                                                                                                                                                     | 4. Тип ЗЭ                                                                                                       | Конструктивное исполнение                                                                          |                                                                                                                               |                                                                                                                                           | 9. Между ЗЭ                                                                                  | 10. ЗЭ с корпусом                                                                       |                                                                                     |                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                             | 2. Вид                                                                                         | 3. Характер                                                                                                                                         |                                                                                                                 | 5. ПУЗ                                                                                             | 6. Переднего зажима                                                                                                           | 7. Заднего зажима                                                                                                                         |                                                                                              |                                                                                         | 8. Направление конусов                                                              |                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                |                                                                                                                                                     |                                                                                                                 |                                                                                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                                           |                                                                                              |                                                                                         |                                                                                     |                                                                                                                                                             |
| 1.1. Пруток круглый<br>1.2. Пруток гранный<br>1.3. Пруток профильный<br>1.4. Заготовка трубчатая<br>1.5. Заготовка шпунтовая<br>1.6. Заготовка сплошная шпунтовая<br>1.7. Резущий инструмент<br>.<br>.<br>. | 2.1.Продольное<br>2.2. Поперечное<br>2.3. Угловое<br>2.4. Сочетание<br>2.5. Нет<br>.<br>.<br>. | 3.1. Радиальное полное<br>3.2. Радиальное неполное<br>3.3. Тангенциальное полное<br>3.4. Тангенциальное неполное<br>3.5. Сочетание<br>3.6. Нет<br>. | 4.1. Основной<br>4.2. Дополнительный<br>4.3. Промежуточный<br>4.4. Фиксирующий<br>4.5. Сочетание<br>.<br>.<br>. | 5.1. Рычажное<br>5.2. Клиновое<br>5.3. Мембранное<br>5.4. Упругое<br>5.5. Сочетание<br>.<br>.<br>. | 6.1. Цанга зажимная<br>6.2. Клин<br>6.3. Кулачок<br>6.4. Экстен-трик<br>6.5. Спираль<br>6.6. Втулка коническая<br>.<br>.<br>. | 7.1. Цанга зажимная<br>7.2. Цанга подающая<br>7.3. Клин<br>7.4. Кулачок<br>7.5. Экстен-трик<br>7.6. Спираль<br>7.7. Шарики<br>.<br>.<br>. | 8.1. С вершиной назад<br>8.2. С вершиной вперед<br>8.3. Встречное<br>8.4. Нет<br>.<br>.<br>. | 9.1. Жесткая<br>9.2. Упругая<br>9.3. Комбинированная<br>9.4. Отсутствует<br>.<br>.<br>. | 10.1.Жесткая<br>10.2.Упругая<br>10.3.Фрикционная<br>10.4.Отсутствует<br>.<br>.<br>. | 11.1. Осевая сила тянущая<br>11.2. Осевая сила нажимная<br>11.3. Крутящий момент (окружная сила)<br>11.4. Радиальная сила<br>11.5. Сочетание<br>.<br>.<br>. |

- $A_2^2$  – ПУЗ заднего зажима рычажное с ЗЭ в виде кулачков;  
 $A_2^3$  – ПУЗ заднего зажима мембранное с многолепестковым ЗЭ;  
 $A_2^4$  – ПУЗ заднего зажима с дугообразными лепестками;  
 $A_3^1$  – жёсткая связь ( $\Phi_3$ ) между ЗЭ переднего и заднего зажимов;  
 $A_3^2$  – упругая связь между ЗЭ;  
 $A_3^3$  – нет связи между ЗЭ;  
 $A_4^1$  – непосредственная связь привода ( $\Phi_4$ ) с передним зажимом;  
 $A_4^2$  – непосредственная связь привода задним зажимом;  
 $A_4^3$  – связь привода с передним зажимом через задний;  
 $A_4^4$  – связь привода с задним зажимом через передний;  
 $A_4^5$  – независимые связи привода с передним и задним зажимом.

Построим морфологическую модель структурных схем патронов двойного зажима (табл. 3.8).

Таблица 3.8

*Морфологическая таблица структурных схем патронов двойного зажима для токарных автоматов*

| $\Phi_1$ | $\Phi_2$ | $\Phi_3$ | $\Phi_4$ |
|----------|----------|----------|----------|
| $A_1^1$  | $A_2^1$  | $A_3^1$  | $A_4^1$  |
| $A_1^2$  | $A_2^2$  | $A_3^2$  | $A_4^2$  |
|          | $A_2^3$  | $A_3^3$  | $A_4^3$  |
|          | $A_2^4$  |          | $A_4^4$  |
|          |          |          | $A_4^5$  |

Табл. 3.8 можно записать в другой форме в виде морфологической матрицы буквенно-цифровой.

| $\Phi_1$    | $\Phi_2$    | $\Phi_3$    | $\Phi_4$    |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $A_1^1$<br> | $A_2^1$<br> | $A_3^1$<br> | $A_4^1$<br> |
| $A_1^2$<br> | $A_2^2$<br> | $A_3^2$<br> | $A_4^2$<br> |
|             | $A_2^3$<br> | $A_3^3$<br> | $A_4^3$<br> |
|             | $A_2^4$<br> |             | $A_4^4$<br> |
|             |             |             | $A_4^5$<br> |

Рис. 3.35. Графическое изображение альтернатив функциональных элементов структурных схем зажимных патронов двойного зажима. или цифровой

$$M_{cc} = \begin{vmatrix} A_1^1 & A_2^1 & A_3^1 & A_4^1 \\ A_1^2 & A_2^2 & A_3^2 & A_4^2 \\ & A_2^3 & A_3^3 & A_4^3 \\ & A_2^4 & & A_4^4 \\ & & & A_4^5 \end{vmatrix} \quad (3.25)$$

$$M_{cc} = \begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 \\ & 2.3 & 3.3 & 4.3 \\ & 2.4 & & 4.4 \\ & & & 4.5 \end{vmatrix} \quad (3.26)$$

Согласно матрицам (3.25) и (3.26) число вариантов ТР будет  $N = 2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 5 = 120$ .

Используя поэтапное сокращение вариантов (см. п.2.2 раздела 2) с учетом техническим ограничений в поставленной задаче приходим к вариантам структурных схем патронов двойного зажима, вписываемых в шпиндельный узел с минимальными переделками (рис. 3.36).

$$X_1 = A_1^1 A_2^1 A_3^1 A_4^3 \text{ или } 1.1 - 2.1 - 3.1 - 4.3 \text{ (рис. 3.36, а)}$$

$$X_2 = A_1^1 A_2^1 A_3^3 A_4^5 \quad (1.1 - 2.1 - \underline{3.3} - \underline{4.5}) \text{ (рис. 3.36, б)}$$

$$X_3 = A_1^1 A_2^1 A_3^3 A_4^3 \quad (1.1 - 2.1 - \underline{3.3} - 4.3) \text{ (рис. 3.36, в)}$$

$$X_4 = A_1^1 A_2^2 A_3^2 A_4^4 \quad (1.1 - \underline{2.2} - \underline{3.2} - \underline{4.4}) \text{ (рис. 3.36, г)}$$

$$X_5 = A_1^1 A_2^3 A_3^1 A_4^4 \quad (1.1 - \underline{2.3} - \underline{3.1} - \underline{4.4}) \text{ (рис. 3.36, д)}$$

$$X_6 = A_1^1 A_2^4 A_3^2 A_4^4 \quad (1.1 - \underline{2.4} - \underline{3.2} - \underline{4.4}) \text{ (рис. 3.36, е)}$$

$$X_7 = A_1^1 A_2^1 A_3^2 A_4^4 \quad (1.1 - 2.1 - \underline{3.2} - \underline{4.4}) \text{ (рис. 3.36, ж)}$$

$$X_8 = A_1^1 A_2^3 A_3^3 A_4^1 \quad (1.1 - \underline{2.3} - \underline{3.3} - \underline{4.1}) \text{ (рис. 3.36, з)}$$

В вариантах  $X_2 - X_8$  подчеркнуты альтернативы, отличные от вариантов  $X_1$ .

Для выбора лучшего варианта ТР методом парных сравнений [26] на основе многокритериального качественного анализа выбираем следующие критерии, считая их равнозначными:  $K_1$  – жесткость зажима;  $K_2$  – обеспечение зажима максимального диаметра прутка согласно паспортным данным станка;  $K_3$  – осевая точность зажима – минимальное оттягивание прутка от упора;  $K_4$  – трудоемкость и технологичность изготовления патрона по количеству и сложности оригинальных деталей.

Выбираем систему количественных соотношений:

$$a_{ij} = \begin{cases} 2, \text{ если } x_i \text{ лучше } x_j (x_i > x_j) \\ 1, \text{ если } x_i \text{ равнозначна } x_j (x_i = x_j) \\ 0, \text{ если } x_i \text{ хуже } x_j (x_i < x_j) \end{cases}$$

Сравниваем варианты по каждому критерию, составляя системы парных неравенств, строя матрицы смежности по критериям  $K_1 - K_4$  и определяя суммированием абсолютные значения комплексного показателя в принятой балльной системе (табл. 3.9):

$$K_{\text{комп}} = \sum_{i(j)=1}^{n=4} a_{ij} \quad (3.27)$$

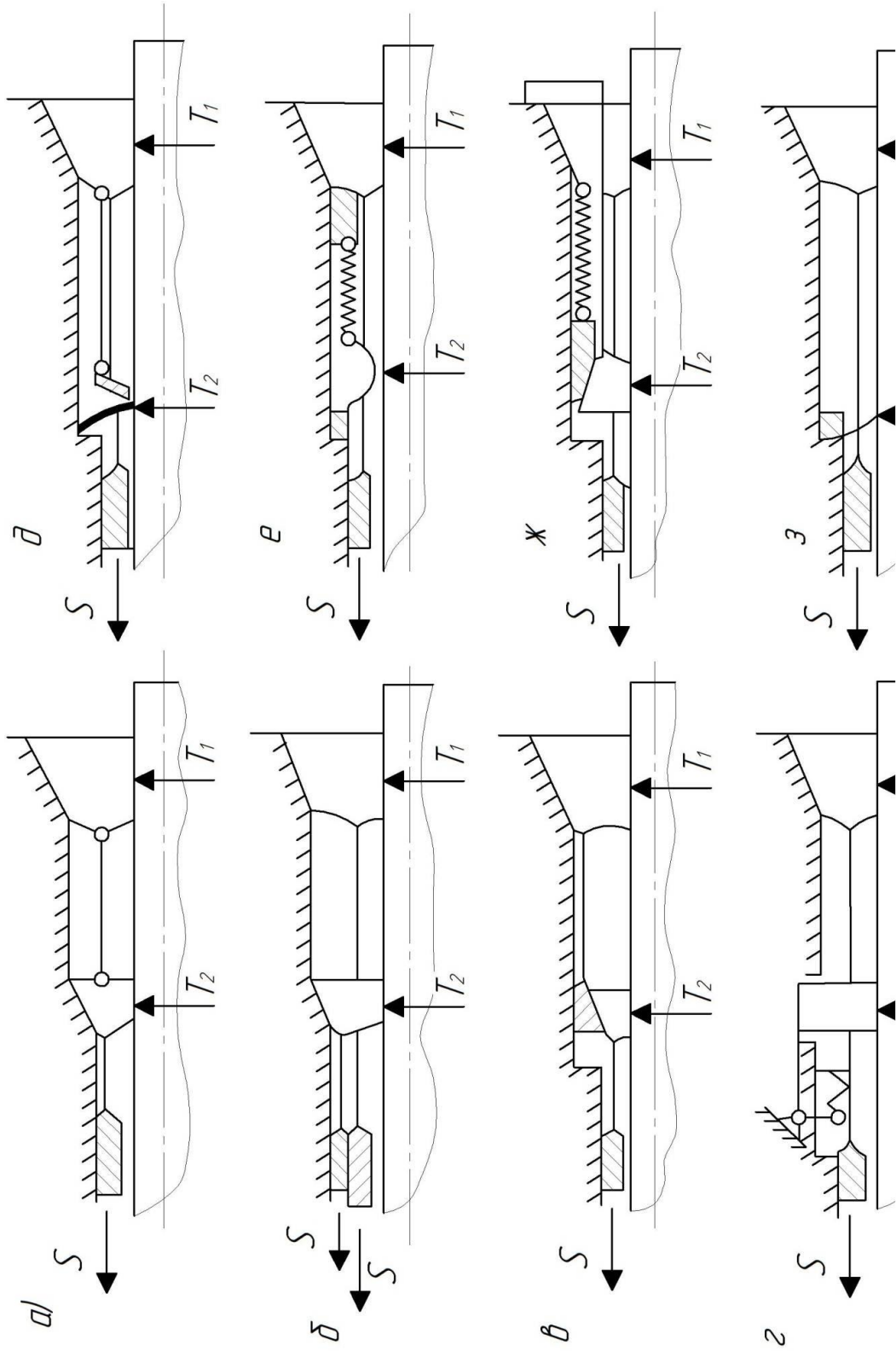


Рис. 3.36. Синтезированные патроны двойного зажима после поэтапного отбора вариантов для окончательного выбора лучших решений: S – осевая сила от привода зажима; T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> – радиальные силы соответственно переднего и заднего зажимов



Из табл. 3.9 видно, что даже при первом приближении из восьми синтезированных вариантов зажимных патронов лучшими оказались  $X_6$  и  $X_5$ , которые могут быть выбраны для дальнейшей конструкторской проработки и принятия оптимального решения [47]. Если проранжировать варианты от лучшего к худшему, то

$$X_6 > X_5 > X_8 > X_7 > X_2 > X_1 > X_3 > X_4.$$

Наихудший вариант  $X_4$  нецелесообразно применять при модернизации токарных автоматов.

Конструкторская реализация варианта  $X_6$  (рис. 3.36, е), защищенного патентом Украины №80489 [331], приведена на рис. 3.37 – 3.38.

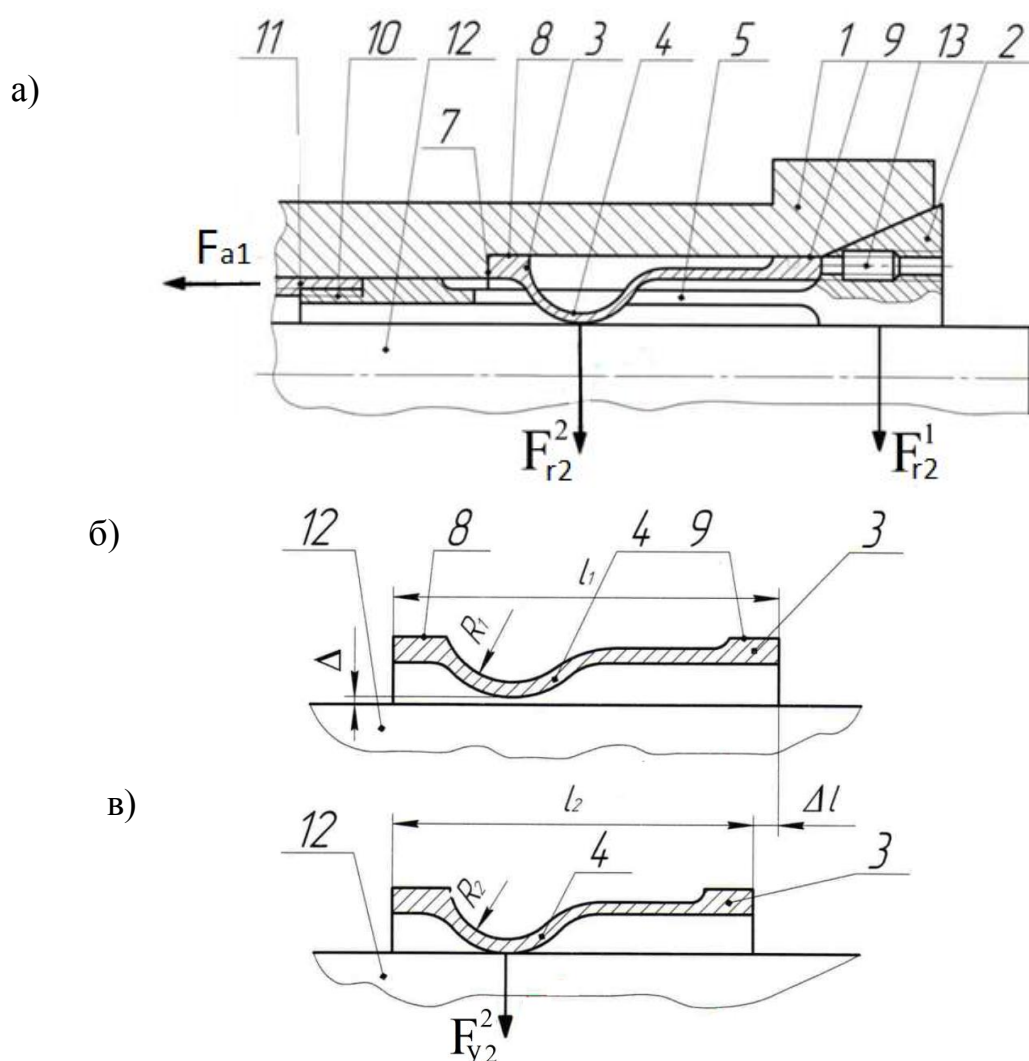


Рис. 3.37. Синтезированный цанговый патрон двойного зажима для многошпиндельного токарного автомата: 1 – шпиндель; 2 – цанга основная; 3, 4, 7, 8, 9 – дугообразные лепестки дополнительной цанги; 10 – присоединительная часть цанги 2; 11 – труба зажима; 12 – пруток; 13 – винт регулировочный



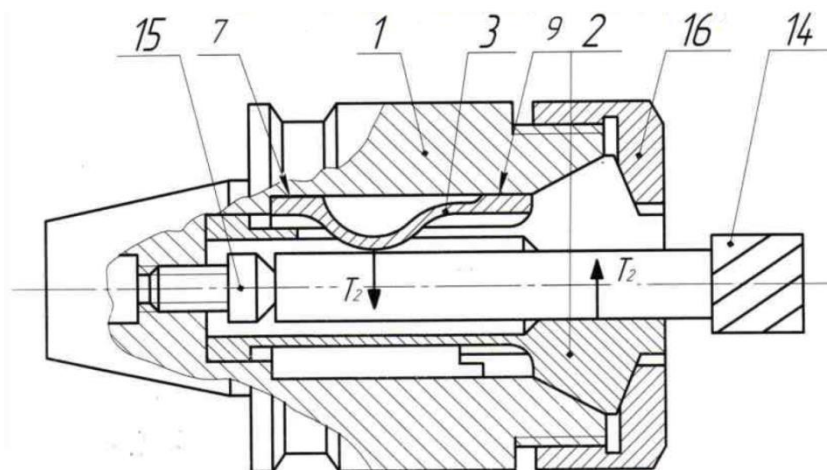


Рис. 3.38. Синтезированный инструментальный цанговый патрон двойного зажима: 1 – корпус оправки с коническим хвостовиком; 2 – цанга основная; 3 – упругие лепестки дополнительной цанги; 7, 9 – направляющие поверхности; 14 – фреза с цилиндрическим хвостовиком; 15 – упор регулируемый; 16 – упорная гайка для ручного зажима

### Выводы

1. Предложена новая концептуальная модель описания и синтеза зажимных механизмов, методологической основой которой является генетико-морфологический подход и принцип существования ограниченного количества элементарных (порождающих) структур, в частности, силовых (энергетических) потоков и механических преобразователей.

2. При оценке и отборе лучших вариантов синтезированных ЗМ и ЗП целесообразно пользоваться тремя показателями, характеризующими силовой (энергетический) поток:

- коэффициент усиления  $K_{ус}$ , как отношение выходной силы зажима  $F_2$  к входной нагрузке (сила  $F_1$  или моменту  $M_1$ );

- передаточное отношение  $U$ , как отношение скорости  $V$  (перемещения  $S$ ) ЗЭ на выходе к скорости (перемещению) на входе от источника энергии (ИЭ) или привода зажима (ПрЗ);

- коэффициент полезного действия (к.п.д.)  $\eta$ , как отношение полезной энергии зажима к расходуемой энергии:

3. С использованием и конкретизацией генетической информации идея многоуровневой генетико-морфологической модели включает следующие принципы описания [2, 18-22]:

- каждый уровень структурной иерархии сохраняет описание предшествующего уровня;

- структура объекта произвольного уровня образуется на основе структур предшествующих уровней (чем выше уровень иерархии, тем выше сложность объекта);

- каждый объект произвольного уровня иерархии представляется кодом или структурной (генетической, морфологической, генетико-морфологической) моделью.

4. На объектном уровне для замыкания силового потока в качестве хромосомы – наследника используется элементарный силовой контур ЗП, который подчиняется принципам симметрии и может быть замкнутым (открытым и закрытым) в плоскости, перпендикулярной оси вращения шпинделя (ЗП, ОЗ) при зажиме снаружи, изнутри, торцевом вдоль оси вращения и комбинированном.

5. На основе периодической классификации первичных источников электромагнитного поля предложена генетическая классификация источников упруго – силового поля, в основу которой положены пространственные формы контактного взаимодействия зажимного элемента с объектом зажима, обобщенные 7-ю геометрическими классами поверхностей упруго – силовых полей: плоскими (призматическими) тороидально – плоскими (диски, пластины), коническими, цилиндрическими, пирамидальными, сферическими и тороидально-цилиндрическими и ограниченными классами упруго-силовых полей.

6. Показано, что основу структурообразования популяции ЗМ определяют силовые (энергетические) потоки и вид преобразователя энергии, которые в механическом исполнении сводятся к ограниченному количеству (семь) типов

(рычажные, клиновые плунжерные спиральные, винтовые, зубчатые и пружинные (упругие)).

7. Анализ вариантов взаимодействия ЗЭ с ОЗ различной геометрической формы из 7 классов, упомянутых в п. 5 выводов, показал, что совместимыми и благоприятными при одинарном зажиме являются 5 для зажима изнутри и 7 для зажима снаружи. Однако при двойном зажиме их количество значительно увеличивается.

8. Приведены примеры применения для синтеза ЗП пяти универсальных генетических операторов (репликации, инверсии, скрещивания, кроссинговера, мутации), из которых особого внимания заслуживает оператор скрещивания, дающий множество гибридных решений, проиллюстрированных на примерах цанговых патронов двойного зажима.

## РАЗДЕЛ 4

### Теоретические исследования силовых характеристик известных и синтезированных зажимных патронов с различными силовыми потоками

#### 4.1. Силовые характеристики ИЗП с силовым потоком $F_{y1} - F_{y2} (F_{r1} - F_{r2})$

Рассмотрим ИЗП с силовым потоком – генетическим кодом на хромосомном уровне  $F_{y1} - F_{y2} (F_{r1} - F_{r2})$  в цилиндрической системе координат с цельным упругим ЗЭ (SR) в виде цилиндрической втулки, что соответствует генетической формуле  $F_{r1} - SR - F_{r2}$  (рис. 4.1).

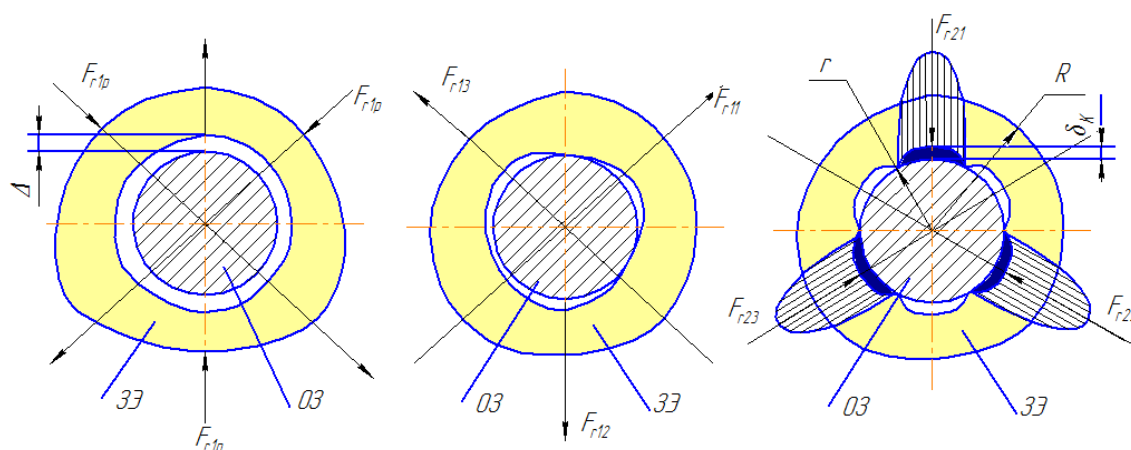


Рис. 4.1. Схема процесса зажима-разжима: а – разжато (зазор  $\Delta$ ); б – выборка зазора; в – зажато (натяг  $\delta$ )

Создание зазора  $\Delta$  между ЗЭ и ОЗ может осуществляться с помощью упругой деформации тела ЗЭ с помощью гидропресса (патроны фирмы Schunk GmbH типа TRIBOS) [107] прикладыванием сил  $F_{y1}$  (рис. 4.1, а) или нагревом ЗЭ (термопатроны с системой «Safelosk фирмы Haimer GmbH) [108, 139, 140].

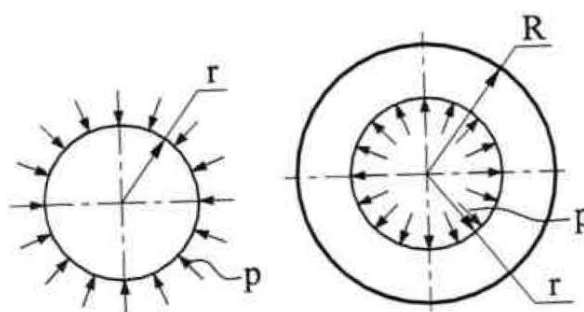


Рис. 4.2. Удельное контактное давление, возникающее в соединении патрона с хвостовиком инструмента при посадке с натягом

При охлаждении зажим хвостовика инструмента обеспечивается натягом системы по аналогии с сопряжением двух деталей по прессовой посадке.

Величина радиального перемещения хвостовика инструмента [235]:

$$\Delta_r = \frac{r}{E_1} (1 - \mu_1) p, \quad (4.1)$$

где:  $r$  – внешний радиус инструмента;  $E_1$  – модуль упругости для материала хвостовика инструмента;  $\mu_1$  – коэффициент Пуассона для материала хвостовика инструмента.

Величина радиального перемещения установочной цилиндрической части зажимного патрона, изготовленного из стали [235]:

$$\Delta = \frac{r}{E_2} \left( \frac{1-k^2}{1-k^2} + \mu_2 \right) p, \quad (4.2)$$

где:  $E_2$  – модуль упругости для теплостойкой стали;  $\mu_2$  – коэффициент Пуассона для теплостойкой стали;  $k = r/R$  – отношение радиуса контакта хвостовика инструмента к внешнему радиусу зажимной части патрона.

Подставив зависимости (4.1) и (4.2) в (4.3) получим:

$$\frac{r}{E_1} (1 - \mu_1) p + \frac{r}{E_2} \left( \frac{1-k^2}{1-k^2} + \mu_2 \right) p = \frac{\delta}{2}. \quad (4.3)$$

После преобразований получим зависимость для определения контактного давления:

$$p = \frac{0,5 \cdot \delta}{\frac{r}{E_1} (1 - \mu_1) p + \frac{r}{E_2} \left( \frac{1-k^2}{1-k^2} + \mu_2 \right)}. \quad (4.4)$$

При зажиме инструмента из быстрорежущей стали можно принять, что  $E_1 \approx E_2 \approx E$  и  $\mu_1 \approx \mu_2 \approx \mu$ . Тогда из зависимости (4.4) величина контактного давления в соединении при  $d = 2r$ :

$$p = \frac{1-k^2}{2} \cdot \frac{\delta \cdot E}{d}. \quad (4.5)$$

По контактному давлению можно определить крутящий момент в статике, передаваемый зажимным патроном:

$$M = \frac{f \cdot \pi \cdot k \cdot d^2 \cdot h \cdot p}{2}, \quad (4.6)$$

где:  $f$  – коэффициент трения при установившемся процессе распрессовки;  $h$  – длина контактного участка цилиндрического хвостовика инструмента с зажимным патроном.

Во время вращения зажимного патрона с зажатым инструментом возникает центробежная сила, которая приводит к уменьшению контактного давления в зоне зажима. Величину уменьшения давления  $p_\omega$  в зоне контакта можно найти из условия равенства радиальных перемещений хвостовика инструмента  $u_i$  и цилиндрической части патрона  $u_n$  (рис. 4.3):

$$u_i = u_n, \quad (4.7)$$

Радиальные перемещения цилиндрической части патрона и инструмента в зоне контакта определяются за зависимостями [235]:

$$u_n = A_1 r + \frac{B_1}{r} - \frac{1-\mu^2}{8E} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 r^3, \quad (4.8)$$

$$u_i = C_1 r - \frac{1-\mu^2}{8E} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 r^3, \quad (4.9)$$

где  $\gamma$  – плотность материала оправки и инструмента, изготовленных из стали;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\omega$  – угловая скорость;  $A_1 = A(1 - \mu)/E$ ,  $B_1 = -B(1 + \mu)/E$ ,  $C_1 = C(1 - \mu)/E$  – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий.

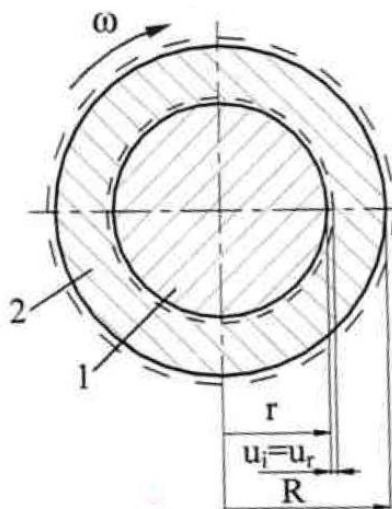


Рис. 4.3. Перемещения ЗЭ и ОЗ в зоне контакта при вращении

Подставив (4.8), (4.9) в зависимость (4.7) и осуществив превращения получим:

$$(1 - \mu)A - (1 - \mu)B \frac{1}{r^2} = (1 - \mu)C. \quad (4.10)$$

Постоянные интегрирования определим из граничных условий. Радиальное направление на внешнем контуре цилиндрической части патрона  $(\sigma_r)_{\rho=R} = 0$ , а на внутреннем контуре  $-(\sigma_r)_{\rho=r} = -p_\omega$ . Из зависимостей для определения радиальных напряжений постоянные интегрирования, будут иметь вид:

$$A = \frac{r^2}{R^2 - r^2} p_\omega + \frac{3 - \mu}{8} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 (r^2 - R^2), \quad (4.11)$$

$$B = \frac{r^2 R^2}{R^2 - r^2} p_\omega - \frac{3 + \mu}{8} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 r^2 R^2. \quad (4.12)$$

Для хвостовика инструмента радиальные напряжения на его внешнем контуре  $(\sigma_r)_{\rho=r} = -p_\omega$ . Тогда постоянная интегрирования будет иметь вид:

$$C = p_\omega + \frac{3 + \mu}{8} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 r^2. \quad (4.13)$$

Подставив полученные зависимости (4.11), (4.12) в (4.10) получим зависимость для определения потери давления в зоне контакта хвостовика инструмента с зажимным патроном при условии изготовления хвостовика инструмента и патрона из стали:

$$p_\omega = \frac{3 + \mu}{8\mu} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 r^2 (1 - k^2). \quad (4.14)$$

Суммарное давление в зоне контакта хвостовика инструмента цилиндрической части зажимного патрона в процессе его устоявшегося вращения при выражении  $R$  через  $k$  и  $d$ :

$$p_\Sigma(\omega) = p - p_\omega = \frac{1 - k^2}{2} \left( \frac{\delta E}{d} - \frac{3 + \mu}{16\mu} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 \frac{d^2}{k^2} \right). \quad (4.15)$$

Критическая частота вращения, при которой происходит разжим инструмента под действием центробежных сил, определится из условия  $p_\Sigma(\omega) = 0$ . Выразив критическую частоту вращения через критическую угловую скорость из зависимости (4.15), получим:

$$n_{кр} = \frac{120k}{\pi} = \sqrt{\frac{\delta E \mu g}{(3+\mu) \gamma d^3}}. \quad (4.16)$$

Максимальный крутящий момент, передаваемый зажимным патроном в процессе вращения, определится по суммарному давлению в зоне контакта:

$$M_{max}(\omega) = \frac{f \pi d^2 h}{2} p_{\Sigma}(\omega). \quad (4.17)$$

Полученные за зависимость (4.16) значения критических частот вращения для зажимных патронов четырех размеров при двух величинах натяга приведены на рис. 4.4.

Как видно из зависимости (4.16) и рис. 4.4 увеличение натяга к увеличению критической частоты вращения. Максимальный натяг определяется из условия отсутствия упругопластических деформаций. Величина максималь-

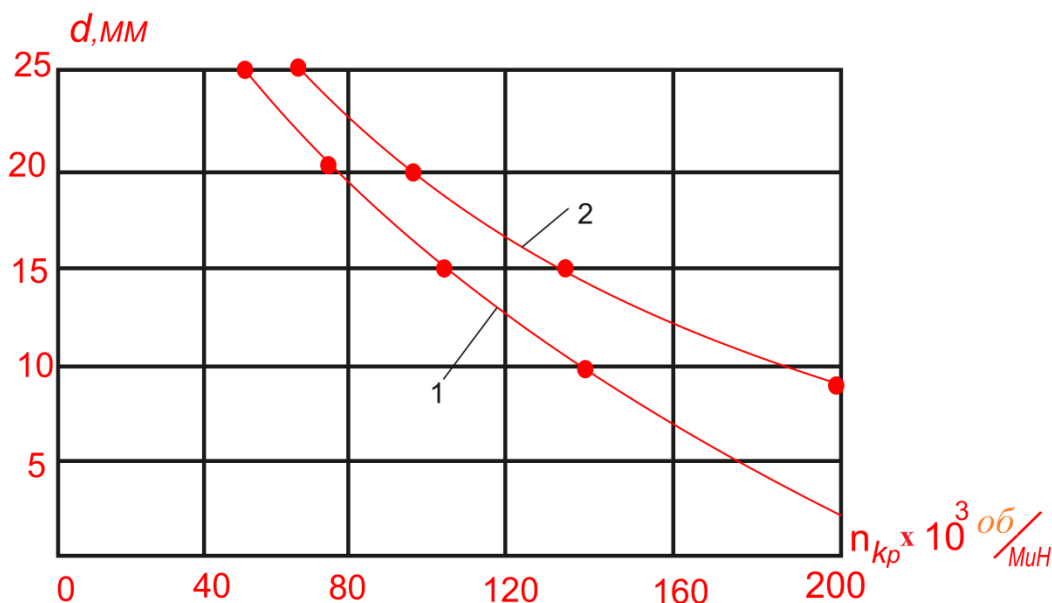


Рис. 4.4. Графики зависимости диаметра хвостовика инструмента от критической частоты вращения ИЗП при натягах  $\delta = 0,006 \text{ мм}$  (кривая 1) и  $\delta = 0,01 \text{ мм}$  (кривая 2)

ного допускаемого натяга, при котором еще отсутствует пластическая деформация определяется за зависимость [235]:

$$[\delta_{max}] = 0.58 \sigma_{T2} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right) \right] \cdot d \frac{C_2}{E_2} \cdot (\gamma_{кэ} + \gamma_{\phi} + \gamma_t), \quad (4.18)$$



где  $\sigma_{T2}$  – предел текучести материала патрона;  $D$  – наружный диаметр патрона;  $\gamma_\phi$  – поправка, учитывающая смятие шероховатостей контактных поверхностей при первичном закреплении [42, 213 220];  $\gamma_{кз}$  – коэффициент, учитывающий рост давления у торца патрона (краевой эффект) [21, 114, 213];  $\gamma_t$  – поправка, учитывающая различие рабочей температуры и температуры патрона [21];  $C_2 = 1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2 / \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]$ .

Пользуясь построенными по зависимости (4.17) динамическими силовыми характеристиками инструментальных патронов с тепловой посадкой инструмента разных типоразмеров (рис. 4.5), можно найти необходимые значения крутящих моментов, передаваемых инструменту в статике и при различных частотах вращения [108, 109]. Кроме того, они позволяют установить, исходя из требований безопасной работы, допустимые частоты вращения патронов с термозажимом разных размеров.

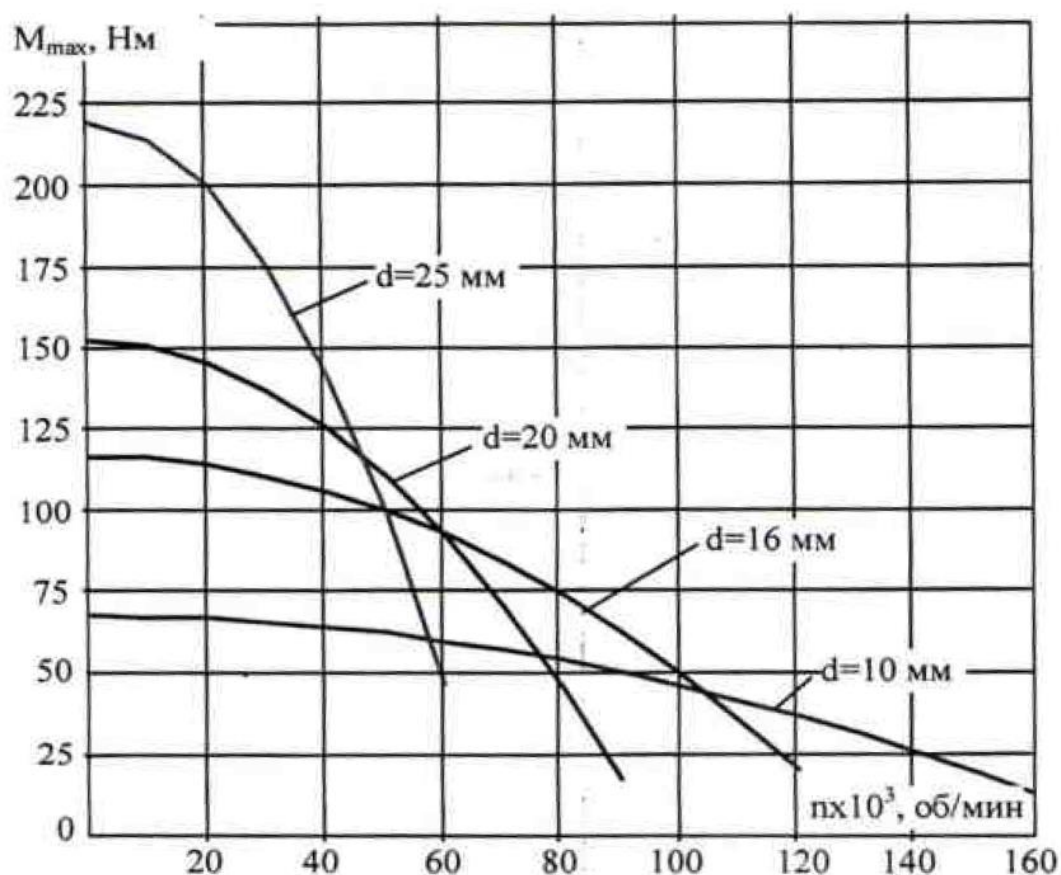


Рис. 4.5. Динамические характеристики инструментальных зажимных патронов с термозажимом

При натяге упругим ЗЭ хвостовика инструмента, как ОЗ, возникают напряжения, зависящие от наружных и внутренних параметров ИЗП [109].

$$\delta_\rho = \frac{mL}{2} \left( \ln \frac{R}{\rho} - \frac{r^2}{\rho^2} \cdot \frac{R^2 - \rho^2}{R^2 - r^2} \ln \frac{R}{\rho} \right) - \frac{m}{2\rho^3} \cdot \frac{(R^2 - \rho^2)(\rho^2 - r^2)}{R^2 + r^2} \cdot (C_3 \cos \theta + D_1 \sin \theta), \quad (4.19)$$

$$\tau_\rho = - \frac{m}{2\rho^3} \cdot \frac{(R^2 - \rho^2)(\rho^2 - r^2)}{R^2 + r^2} \cdot (C_3 \sin \theta + D_1 \cos \theta), \quad (4.20)$$

$$\delta_\theta = \frac{mL}{2} \left( \ln \frac{R}{\rho} - \frac{r^2}{\rho^2} \cdot \frac{R^2 - \rho^2}{R^2 - r^2} \ln \frac{R}{\rho} \right) - \frac{m}{2\rho^3} \cdot \frac{4r^2\rho^2 - (3\rho^2 - R^2)(\rho^2 + r)}{R^2 + r^2} \cdot (C_3 \cos \theta + D_1 \sin \theta), \quad (4.21)$$

где  $m = E_2/(1 - \mu_2)$ ;  $\rho$  – текущий радиус зажимной части патрона;  $L$  – длина окружности с радиусом  $r$ ;  $C_3$  и  $D_1$  – константы интегрирования;  $\theta$  – угол поворота текущего радиуса  $\rho$ .

В ИЗП с цельным упругим ЗЭ в виде пустотелого цилиндра ограниченный диапазон размеров (диаметров) ОЗ, что соответствует I схеме охвата (см. рис. 3.9 и табл. 3.6).

Это объясняется небольшими радиальными сужениями внутреннего диаметра ЗЭ согласно задаче Ляме (см. формулу 4.2) и требует высоких давлений.

При этом статический коэффициент усиления существенно зависит от радиального зазора  $\Delta$  (рис. 4.1, а) и соотношения жёсткостей со стороны патрона  $C_{II}$  и инструмента  $C_{II}$  (рис. 4.6).

Статический коэффициент усиления ИЗП:

$$k_{\text{пс}} = \frac{F_{r2}}{F_{r1}}, \quad (4.22)$$

где  $F_{r2}$  – выходная радиальная сила зажима инструмента, пропорциональная контактному сближению ЗЭ и ОЗ и равная  $F_{r1}^2$ ;  $F_{r1}$  – входная сила упругости

ЗЭ, расходуемая на выборку зазора  $\Delta(F_{r1}^1 = C_{3Э} \cdot \Delta)$  и натяг системы  $\delta_K(F_{r1}^2 = C_{3Э-И}^K \cdot \delta_K)$ ;  $C_{3Э}$  – жёсткость ЗЭ;  $C_{3Э-И}^K$  – приведенная контактная жёсткость в сопряжении ЗЭ и ОЗ (инструмент), равная,

$$C_{3Э-И}^K = \frac{C_{3Э}^K \cdot C_{И}^K}{C_{3Э}^K + C_{И}^K}. \quad (4.23)$$

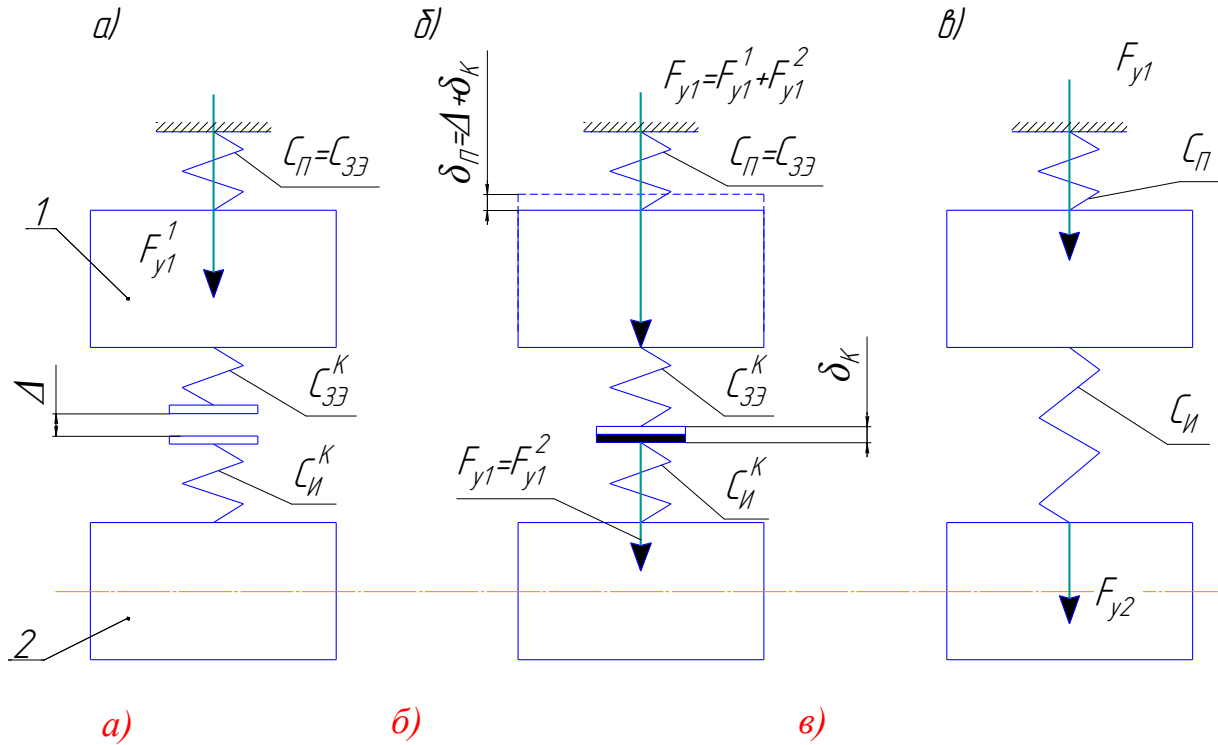


Рис. 4.6. Схемы (модели) взаимодействия ЗЭ и ОЗ: а – до выборки зазора; б – в процессе выборки зазора; в – после выборки зазора

В формуле (4.23)  $C_{3Э}^K$  – контактная жёсткость ЗЭ,  $C_{И}^K$  – контактная жёсткость ОЗ (инструмента).

Подставив значения сил в формулу (4.22), получим:

$$k_{пс} = \frac{F_{r1}^2}{F_{r1}^1 - F_{r1}^2} = \frac{1}{\frac{F_{r1}^1}{F_{r1}^2} + 1} \quad (4.24)$$

Выразив силы через жесткости, формула (4.37) преобразуется

$$k_{пс} = \frac{1}{\frac{C_{3Э} \cdot \Delta}{C_{3Э-И}^K \cdot \delta_K} + 1} = \frac{1}{\frac{C_{3Э} \cdot (C_{3Э}^K + C_{И}^K) \Delta}{C_{3Э}^K \cdot C_{И}^K \cdot \delta_K} + 1}. \quad (4.25)$$

Если приравнять  $C_{3Э}^K = C_{И}^K = C_{И}$ , то

$$k_{\text{пс}} = \frac{1}{\frac{C_{3Э} \cdot 2C_{И} \cdot \frac{\Delta}{\delta_K} + 1}{C_{И}^2}} = \frac{1}{2 \cdot \frac{C_{3Э}}{C_{И}} \cdot \frac{\Delta}{\delta_K} + 1}; \quad (4.26)$$

или

$$k_{\text{пс}} = \frac{1}{2 \cdot \alpha_C \cdot \frac{\Delta}{\delta_K} + 1} \quad (4.27)$$

Проанализируем три случая: 1)  $C_{3Э} < C_{И} \alpha_C = \frac{C_{3Э}}{C_{И}} < 1$ ; 2)  $C_{3Э} = C_{И} \alpha_C = \frac{C_{3Э}}{C_{И}} = 1$ ; 3)  $C_{3Э} > C_{И} \alpha_C = \frac{C_{3Э}}{C_{И}} > 1$ .

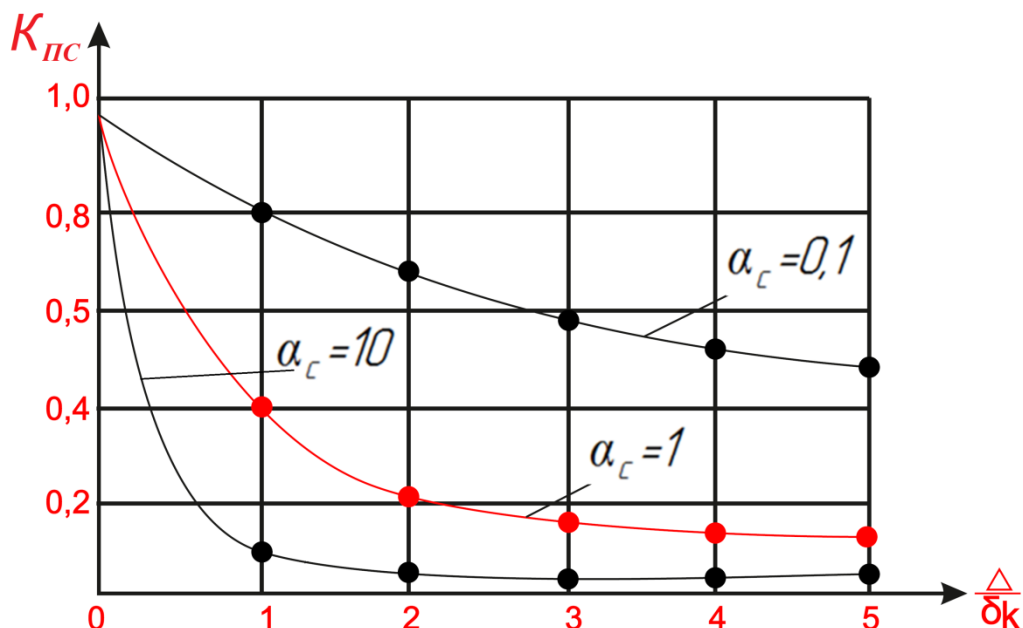


Рис. 4.7. Графики зависимости статического коэффициента усиления ИЗП от

$$\frac{\Delta}{\delta_K} \text{ для разных соотношений } \alpha_C = \frac{C_{3Э}}{C_{И}}$$

Для I случая примем  $\frac{C_{3Э}}{C_{И}} = \frac{1}{10}$ , для II случая  $\frac{C_{3Э}}{C_{И}} = 1$ , для III случая

$\frac{C_{3Э}}{C_{И}} = 10$ . Влияние различных случаев на статический коэффициент усиления

ИЗП при различных соотношениях  $\frac{\Delta}{\delta_K}$  представлено на рис. 4.7. При вращении

возникает центробежная сила  $F_{\omega}$ , действующая на ЗЭ, раздувая его на величину

$\delta = \frac{F_{\omega}}{C_{3Э}}$  (рис. 4.8) и снимая натяг в контакте ЗЭ с ОЗ (инструментом) на такую

же величину  $\delta = \frac{\Delta F_{y2\omega}}{C_{\text{И}}}$ , что уменьшает выходную радиальную силу зажима на величину  $\Delta F_{y2\omega} = \delta \cdot C_{\text{И}}$ .

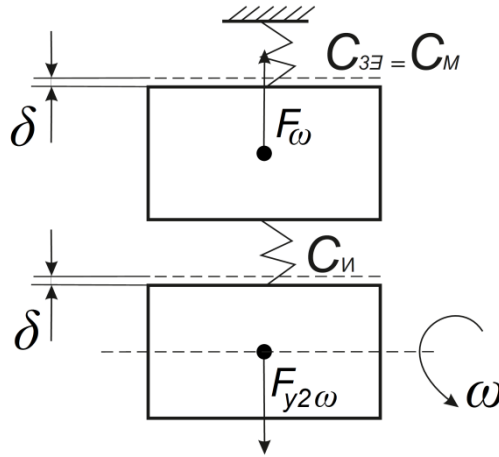


Рис. 4.8. Модель взаимодействия 3Э с ОЗ при вращении ИЗП

Таким образом, выходная динамическая радиальная сила зажима будет

$$F_{y2\omega} = F_{y2} - \Delta F_{y2\omega} = F_{y2} - F_{\omega} \frac{C_{\text{И}}}{C_{\text{ЗЭ}}} \quad (4.28)$$

или 
$$F_{y2\omega} = F_{y2} - \alpha_c \cdot F_{\omega}. \quad (4.29)$$

Характер влияния частоты вращения  $\omega(n)$  при разных соотношений  $\alpha_c = \frac{C_{\text{ЗЭ}}}{C_{\text{И}}} \left( \frac{C_{\text{П}}}{C_{\text{И}}} \right)$  показан на рис. 4.9.

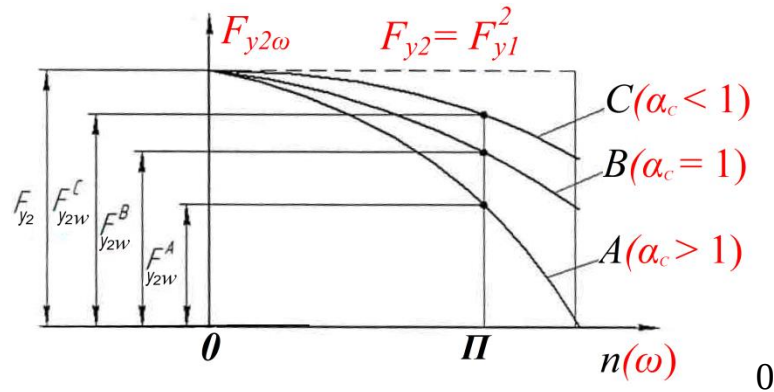


Рис. 4.9. Графики зависимости динамической радиальной силы зажима инструмента от частоты вращения шпинделя с ИЗП

Динамический коэффициент усиления ИЗП:

$$K_{\text{П}\omega} = \frac{F_{y2\omega}}{F_{y1}^1 + F_{y1}^2} = \frac{1 - \alpha_c \cdot \frac{F_{\omega}}{F_{y1}^2}}{1 + \frac{\Delta}{\delta}}. \quad (4.30)$$

## 4.2. Силовые характеристики ИЗП с силовым потоком $F_{x1} - F_{y2} (F_{a1} - F_{r2})$

Рассмотрим силовые характеристики ИЗП с силовым потоком – родительской хромосомой  $F_{x1} - F_{y2} (F_{a1} - F_{r2})$  в цилиндрической системе координат) с конусной упругой втулкой (WD), что соответствует генетической формуле ЗП на популяционном уровне:  $F_{x1} - WD - F_{y2}$  (в цилиндрической  $F_{a1} - WD - F_{r2}$ ).

Конструктивная схема представлена на примере гидромеханического ИЗП типа Cogo Grip (рис. 4.10).

Между хвостовиком инструмента 1 и упругой конусной втулкой 2 существует зазор  $\Delta$  для установки инструмента. Внешняя коническая поверхность упругой конусной втулки сопрягается с внутренней конической поверхностью приводной втулки 3. Угол наклона конических поверхностей  $\alpha = 1^\circ - 2^\circ$ . Торцевые поверхности упругой конической и приводной втулок образуют рабочие камеры 4, 5 для подачи жидкости, герметизированные уплотнениями 6, 7. Давление питания к камерам 4 и 5 подводится соответственно через каналы 8 и 9.

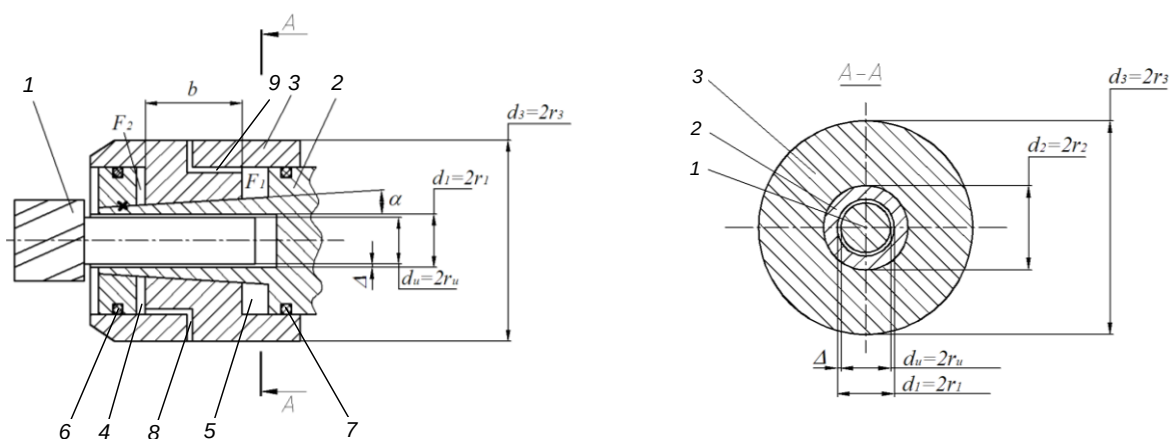


Рис. 4.10. Конструктивная схема гидромеханического инструментального зажимного патрона

При зажиме инструмента жидкость поступает в камеру 4. Под давлением масла приводная втулка перемещается и деформирует упругую коническую втулку, обеспечивая выборку зазора  $\Delta$ . Последующее перемещение приводной втулки приводит к созданию контактного давления на хвостовик инструмента, который удерживает инструмент в процессе обработки.

Для выборки зазора  $\Delta$  (рис. 4.11) без учёта потерь на трение в уплотнениях и в камере 4 площадью  $S_2$  необходимо создать давление, которое развивает осевую силу:

$$F_{a1}^1 = p_o \cdot S_2. \quad (4.31)$$

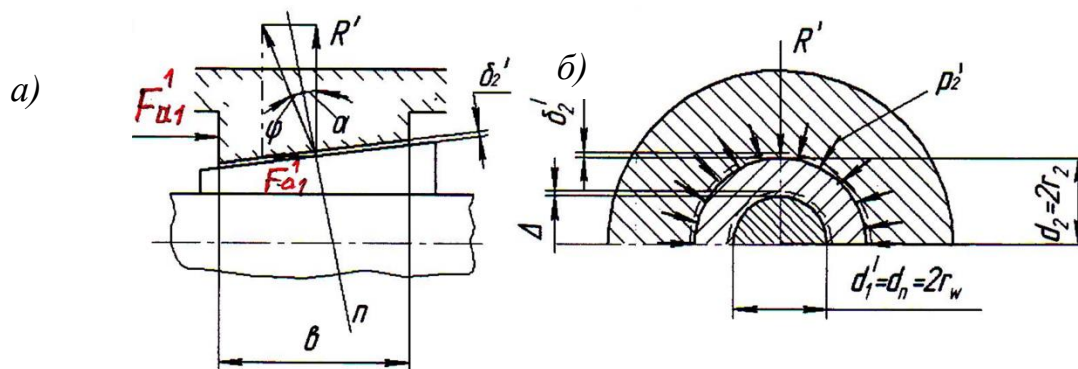


Рис. 4.11. Расчётная схема выборки зазора  $\Delta$  в гидромеханическом зажимном патроне в продольном (а) и поперечном (б) направлениях

За счёт использования конической поверхности радиальная сила зажима, созданная на конической поверхности со стороны приводной втулки:

$$R' = F_{a1}^1 \cdot \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi), \quad (4.32)$$

где  $\alpha$  – угол наклона конической поверхности;  $\varphi$  – угол трения.

Так как угол  $\alpha$  очень маленький, то упругую коническую втулку будем считать цилиндрической, по поверхности которой равномерно распределится давление равное:

$$p_2' = \frac{R'}{\pi d_2 b} = \frac{F_{a1}^1 \cdot \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi)}{\pi d_2 b}, \quad (4.33)$$

где  $d_2 = 2r_2$  – средний внешний диаметр упругой конической втулки;  $b$  – длина контакта втулок.

Так как толщина стенки упругой конической втулки  $t > 0,1 \cdot r_1$ , то её можно считать толстостенным цилиндром. Под воздействием давления  $p'_2$  перемещение внутренней поверхности упругой конической втулки на радиусе  $r_1$  определится за зависимость:

$$\Delta = - \frac{r_1}{E} \frac{2}{1-k^2} p'_2 \quad (4.34)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\frac{r_1}{r_2}$  – отношение диаметра хвостовика к среднему внешнему диаметру упругой конической втулки.

Из зависимости (4.34) давление, которое необходимо создать на поверхности упругой втулки для выборки зазора:

$$p'_2 = \frac{\Delta \cdot E(1-k^2)}{2r_1} \quad (4.35)$$

Приравняв правые части зависимостей (4.33) и (4.35) получим:

$$\frac{\Delta \cdot E(1-k^2)}{2r_1} = \frac{F_{a1}^2 \cdot \text{ctg}(\alpha + \varphi)}{\pi b d_2}. \quad (4.36)$$

Из зависимости (4.36) необходимая осевая сила зажима для выборки зазора  $\Delta$  между хвостовиком и упругой конической втулкой:

$$F_{a1}^1 = \frac{2\pi r_2 b \cdot \Delta \cdot E(1-k^2)}{2r_1 \cdot \text{ctg}(\alpha + \varphi)} = \frac{\pi b \cdot \Delta \cdot E(1-k^2)}{k \cdot \text{ctg}(\alpha + \varphi)}. \quad (4.37)$$

Для создания натяга, обеспечивающего зажим хвостовика инструмента, необходимо в камере 4 площадью  $F_2$  создать дополнительное давление, развивающее осевую силу (рис. 4.12):

$$F_{a1}^2 = p_1 \cdot S_2 \quad (4.38)$$

При этом радиальная сила зажима:

$$F_{r2} = F_{a1}^2 \cdot \text{ctg}(\alpha + \varphi) \quad (4.39)$$

Давление, которое создается на внешней поверхности упругой конической втулки от силы  $R''$ , определится за зависимость:

$$p''_2 = \frac{F_{r2}}{\pi d_2 b} = \frac{F_{a1}^2 \cdot \text{ctg}(\alpha + \varphi)}{\pi d_2 b}. \quad (4.40)$$



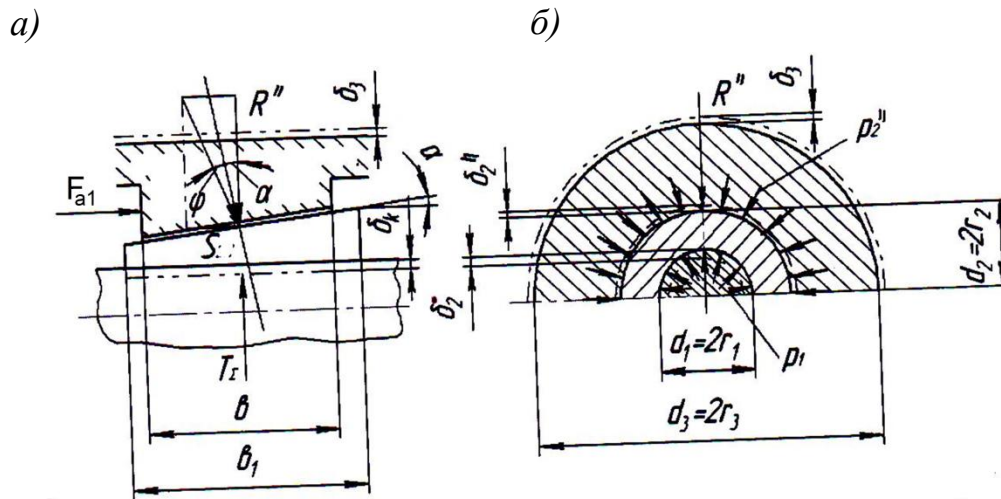


Рис. 4.12. Расчётная схема создания натяга для получения радиальной силы зажима в гидромеханическом зажимном патроне в продольном (а) и поперечном (б) направлениях

В результате действия давления  $p''_2$  и деформации упругой втулки создается удельное контактное давление на хвостовика инструмента  $p_1$  и на внутреннюю поверхность упругой втулки. Давление на хвостовика инструмента определяется из равенства перемещений хвостовика инструмента  $u_{\text{и}}$  и перемещение упругой конической втулки  $u_{\text{вн}}$ :

$$|u_{\text{и}}| = |u_{\text{вн}}|. \quad (4.41)$$

Радиальное перемещение хвостовика инструмента:

$$u_{\text{и}} = \frac{1+\mu_1}{E} p_1 r_1. \quad (4.42)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент Пуассона для материала хвостовика инструмента.

Радиальное перемещение внутреннего диаметра упругой конической втулки:

$$u_{\text{вн}} = \frac{1+\mu_2}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2''}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r_1 + \frac{1+\mu_2}{E} \cdot \frac{r_1^2 (p_1 - p_2'')}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r_1, \quad (4.43)$$

где  $\mu_2$  – коэффициент Пуассона для материала упругой конусной втулки.

Подставив зависимости (4.42) и (4.43), в зависимость (4.41) при условии, что,  $\mu_1 = \mu_1$  получим:

$$\frac{1+\mu}{E} p_1 r_1 = \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2''}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r_1 + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{r_2^2 (p_1 - p_2'')}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r_1. \quad (4.44)$$

Из зависимости (4.44) радиальное давление на хвостовик инструмента при зажиме:

$$p_1 = p_2'' \cdot \left[ 1 + \frac{1+\mu}{1-\mu} / \left( 2k^2 + \frac{1+\mu}{1-\mu} - 1 \right) \right]. \quad (4.45)$$

По радиальному контактному давлению можно найти статический крутящий момент, передаваемый зажимным патроном хвостовик инструмента:

$$M_{\text{ст}} = \frac{\pi \cdot f \cdot d_1^2 \cdot h \cdot p_1}{2} \quad (4.46)$$

Аналогично соображениям, изложенным в п. 4.1 и выражениям (4.14), (4.15), (4.17) при вращении ИЗП динамически крутящий момент уменьшится до величины

$$M(\omega) = \frac{\pi \cdot f \cdot d_1^2 \cdot h}{4} (1 - k^2) \left( \frac{\delta E}{d} - \frac{3+\mu}{16\mu} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 \frac{d_1^2}{k^2} \right), \quad (4.47)$$

а радиальная сила зажима до

$$F_{y2\omega} = F_{r2\omega} = \frac{2M(\omega)}{f \cdot d} \quad (4.48)$$

### 4.3. Синтез широкодиапазонных эксцентриковых ИЗП с ручным зажимом

ИЗП для инструментов с цилиндрическим хвостовикам (свёрл, фрез, метчиков и т.п.) имеют ручной зажим и один или два входа (основной – для выборки зазора, обеспечивающий предварительный зажим, дополнительный – для натяга системы, обеспечивающий окончательный зажим с одной или нескольких сторон).

Поскольку ручной зажим обеспечивается вращательным движением, то входом силового (энергетического) потока могут быть в полярной системе координат моменты  $M_{a1}$  и  $M_{r1}$ , а выход только радиальная сила зажима  $F_{r2}$ .

Таким образом, согласно рис. 2.14 на хромосомном уровне для ИЗП с ручным зажимом в качестве родительской хромосомы могут быть два силовых потока  $M_{a1}^1 - F_{r2}^1, M_{a1}^2 - F_{r2}^2$  (см. табл. 2.10).

В последнее время ИЗП с ручным зажимом получают широкое применение, среди которых самозажимные клиновые сверлильные патроны одностороннего (чаще правого) вращения [108, 109, 221], зубчато-клиновые патроны с ключом [236], эксцентрики сверлильно-фрезерные патроны с одними (двумя) входами – кинематическими цепями [221, 267].

Последние эксцентрики ИЗП имеют структуру со смешанной генетической информацией, которая может быть представлена морфологической моделью в виде морфологической матрицы двух входов силовых потоков и одного выхода:

$$M_{\text{сп}} = \begin{vmatrix} M_{a1}^1 \\ M_{r1}^1 \end{vmatrix} \Delta \begin{vmatrix} M_{a1}^2 \\ M_{r1}^2 \end{vmatrix} \Delta |F_{r2}^1| \quad (4.49)$$

Выходная радиальная сила  $F_{r2}$  в зависимости от вида моментов сил на входах в основной и дополнительный силовые потоки (рис. 4.13) ИЗП могут определяться по следующим ниже формулам.

Схема а, рис. 4.13

$$F_{r2} = \frac{M_{a1}^1}{R_1} \cdot K_{\Pi}^1 + \frac{M_{a2}^2}{R_2} \cdot K_{\Pi}^2 \quad (4.50)$$

Схема б, рис. 4.13

$$F_{r2} = \frac{M_{a1}^1}{R_1} \cdot K_{\Pi}^1 + \frac{M_{к1}^2}{R_2} \cdot K_{\Pi}^2 \quad (4.51)$$

Схема в, рис. 4.13

$$F_{r2} = \frac{M_{к1}^1}{R_1} \cdot K_{\Pi}^1 + \frac{M_{a1}^2}{R_2} \cdot K_{\Pi}^2 \quad (4.52)$$

Схема г, рис. 4.13

$$F_{r2} = \frac{M_{к1}^1}{R_1} \cdot K_{\Pi}^1 + \frac{M_{r1}^2}{R_2} \cdot K_{\Pi}^2 \quad (4.53)$$

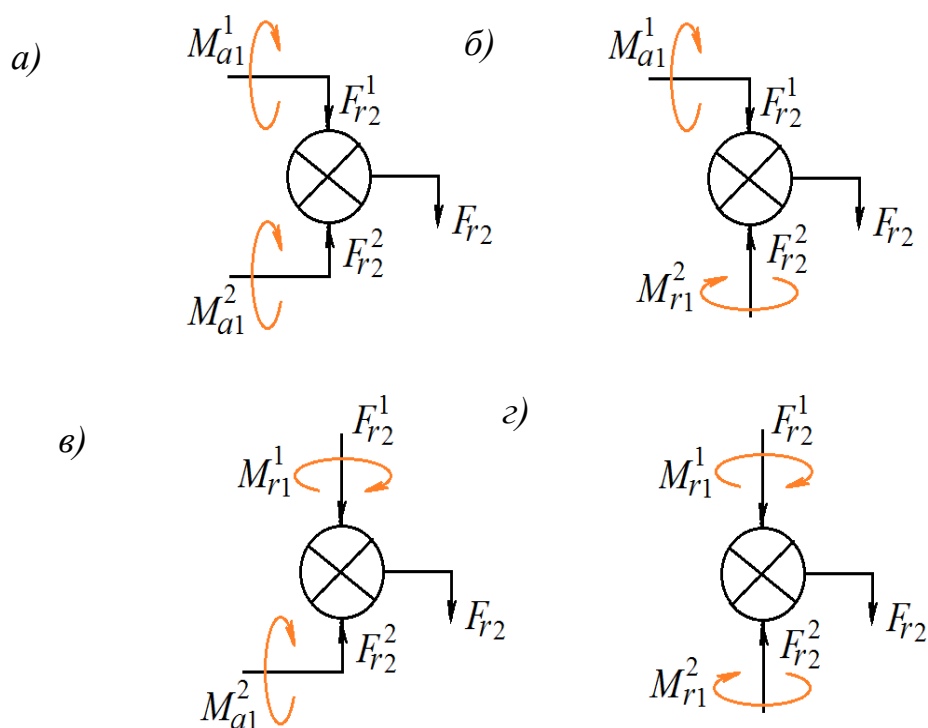


Рис. 4.13. Виды силовых потоков в ИЗП с ручным зажимом

В формулах (4.63) – (4.66) приняты обозначения:  $K_{\Pi}^1$  и  $K_{\Pi}^2$  – соответственно коэффициенты усиления в кинематических целях основного и дополнительного силовых потоков;  $R_1$  и  $R_2$  – соответственно радиусы приложения ручного усилия на входах основного и дополнительного силовых потоков.

На объектном уровне, учитывая тот факт, что ИЗП с ручным зажимом преимущественно имеют три ЗЭ различного конструктивного исполнения по форме, сходящихся к оси ИЗП или расходящихся от неё, элементарным силовым контуром (хромосомой – наследником) является замкнутый треугольник, в котором силы зажима от каждого кулачка  $F_{r2}^1$ ,  $F_{r2}^2$ ,  $F_{r2}^3$  образуют замкнутый треугольник сил.

Появляются целые популяции ИЗП, например, уже широко известные цанговые, клиновые и мало известные эксцентрикковые.

Для структурно-схемного синтеза ИЗП на популяционном уровне с использованием выше изложенных соображений предложена морфологическая модель (табл. 4.1), в которой в качестве основных морфологических

(функциональных) признаков выбраны:

1 – вход в основной поток; 2 – вид преобразователя в основном потоке;  
3 – вход в дополнительный поток; 4 – вид преобразователя в дополнительном потоке; 5 – выход потоков.

Общее количество вариантов:  $N = 2 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 1 = 252$ .

Для теоретического анализа силовых характеристик выбран один из синтезированных вариантов  $X_4$  (рис. 4.14) ИЗП, принципиальная и структурная схемы которого приведены на рис. 3.6.

Силы в ИЗП определяются, исходя из известного входного усилия зажима, вида ПУЗ и усилия на каждом из них.

Для расчета усилий в ИЗП необходимо воспользоваться их структурно-функциональными схемами [267].

Особое внимание при расчете сил зажима ИЗП надо обратить на расчет сил, действующих на оригинальный по своей конструкции эксцентриковый кулачок в эксцентриковых ИЗП, которые относятся к эксцентриковым сверлильно-фрезерным патронам (ЭСФП).

Таблица 4.1

Морфологическая таблица  
структур и схем ИЗП с ручным зажимом и тремя ЗЭ

| Основной силовой поток             |                                                                                        | Дополнительный силовой поток                 |                                                                            | Выход потоков |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Вход                               | Преобразователь                                                                        | Выход                                        | Преобразователь                                                            |               |
| 1.1. $M_{a1}^1$<br>1.2. $M_{r1}^1$ | 2.1. LV<br>2.2. WD<br>2.3. SL<br>2.4. PL<br>2.5. SC<br>2.6. GR<br>2.7. CB <sup>1</sup> | 3.1. $M_{a1}^2$<br>3.2. $M_{r1}^2$<br>3.3. 0 | 4.1. LV<br>4.2. WD<br>4.3. SL<br>4.4. SC<br>4.5. CB <sup>2</sup><br>4.6. 0 | 5.1. $F_{r2}$ |

Примечание: CB – комбинация ПУЗ.

При расчете сил, действующих на инструмент при зажиме

эксцентриковым кулачком сила зажима не одинакова для максимального диаметра зажимаемого инструмента и для диаметров меньше максимального.

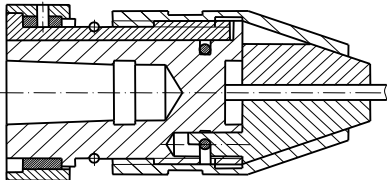
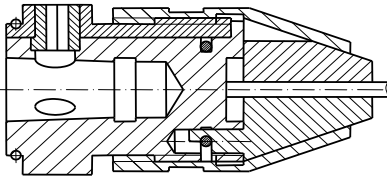
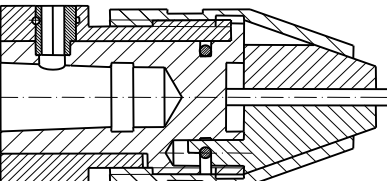
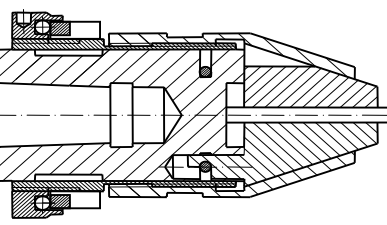
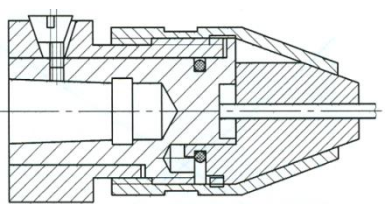
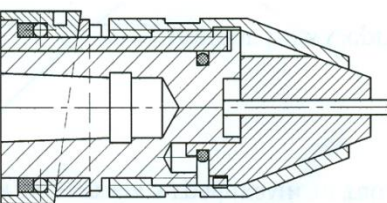
| п/п            | Тип эксцентрикового сверлильно-фрезерного патрона             | Конструктивная схема патрона                                                         | Генетико-морфологическая формула силового потока    |
|----------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1              | 2                                                             | 3                                                                                    | 4                                                   |
| X <sub>1</sub> | Без ключа                                                     |    | $M_{a1}^1 - CB^1 - 0 - 0 - 3F_{r2}$                 |
| X <sub>2</sub> | С ключом и несколькими входами от эксцентриков                |    | $M_{a1}^1 - CB^1 - M_{r1}^2 - 3SL - 3F_{r2}$        |
| X <sub>3</sub> | С ключом, рубашкой и двумя эксцентриками на входе             |   | $M_{a1}^1 - CB^1 - M_{r1}^2 - 2SL - 3F_{r2}$        |
| X <sub>4</sub> | Без ключа и дополнительной резьбой с шариками                 |  | $M_{a1}^1 - CB^1 - M_{a1}^2 - SC - 3F_{r2}$         |
| X <sub>5</sub> | С ключом, рубашкой и двумя входами от конических эксцентриков |  | $M_{a1}^1 - CB^1 - M_{r1}^2 - 2CB^2 - 3F_{r2}$      |
| X <sub>6</sub> | Без ключа с винтовой втулкой и шариками                       |  | $M_{a1}^1 - CB^1 - M_{a1}^2 - 1 \cdot SC - 3F_{r2}$ |

Рис. 4.14. Варианты синтезированных ИЗП согласно морфологической модели (табл. 4.1):  $n = 1, 2, 3$  – количество ПУЗ;  $z = 3$  – количество ЗЭ;  $CB^1 = WD + LV$ ;  $CB^2 = WD + SC$ ;

#### 4.4 Силовые характеристики синтезированных широкодиапазонных эксцентриковых ИЗП с ручным зажимом

Рассмотрим схемы действия этих сил (рис. 4.15).

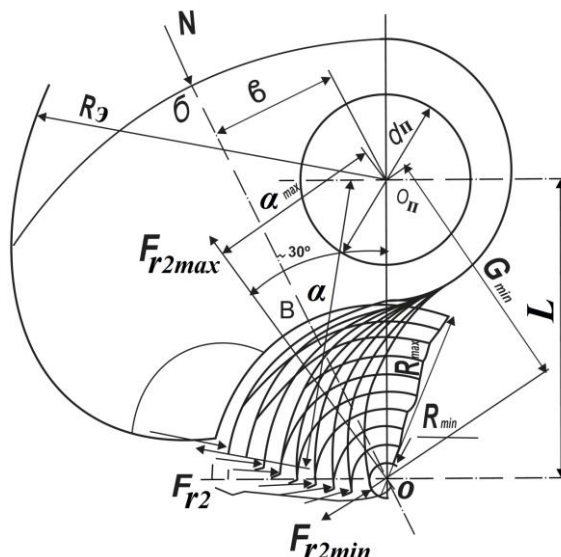


Рис. 4.15. Схема сил, действующих при зажим эксцентриковым зажимным кулачком инструмента различного диаметра

На рис. 4.15:  $N$  – сила, действующая на кулачок со стороны конусной втулки. Её равнодействующая приложена посередине дуги контакта наружной поверхности кулачка, и конусной втулки;  $F_{r2}$  – сила, действующая на инструмента.

При максимальном диаметре свёрла  $d_{max} = 2R_{max}$  внутренняя и наружная поверхности кулачка будет образовывать концентрические окружности и  $N$  будет проходить через ось свёрла:

$$F_{r2max} = N \cdot b / a_{max} \quad (4.54)$$

Патрон работает в 2 этапа:

- этап 1 – выборка зазора между эксцентриковыми зажимными кулачками (WD + LV) и цилиндрическим хвостовиком инструмента 10 с предварительным зажимом при повороте конусной втулки – резьбовой гайки 8 с коническим отверстием под углом  $\alpha$ ;

• этап 2 – окончательный зажим инструмента 10 за счет натяга системы с помощью поворота гайки 3, которая дополнительно затягивает конусную втулку 8 для создания необходимого усилия зажима.

Таким образом, ЭСФП предложенной конструкции, работая в 2 этапа, содержит, по меньшей мере, в соответствии с этапами работы 2 кинематические цепи (рис. 4.16).

По первой кинематической цепи (основной силовой потока) окружная сила  $F_{p1}$  от момента  $M_{a1}^1 = F_{p1} \cdot R_1$  с помощью преобразователя клинового (WD) и рычажного (LV) создаёт радиальную силу зажима  $F_{r2}^1$ .

В соответствии с расчётной схемой (рис. 4.16) коэффициент усиления ЭСФП по первой кинематической цепи будет:

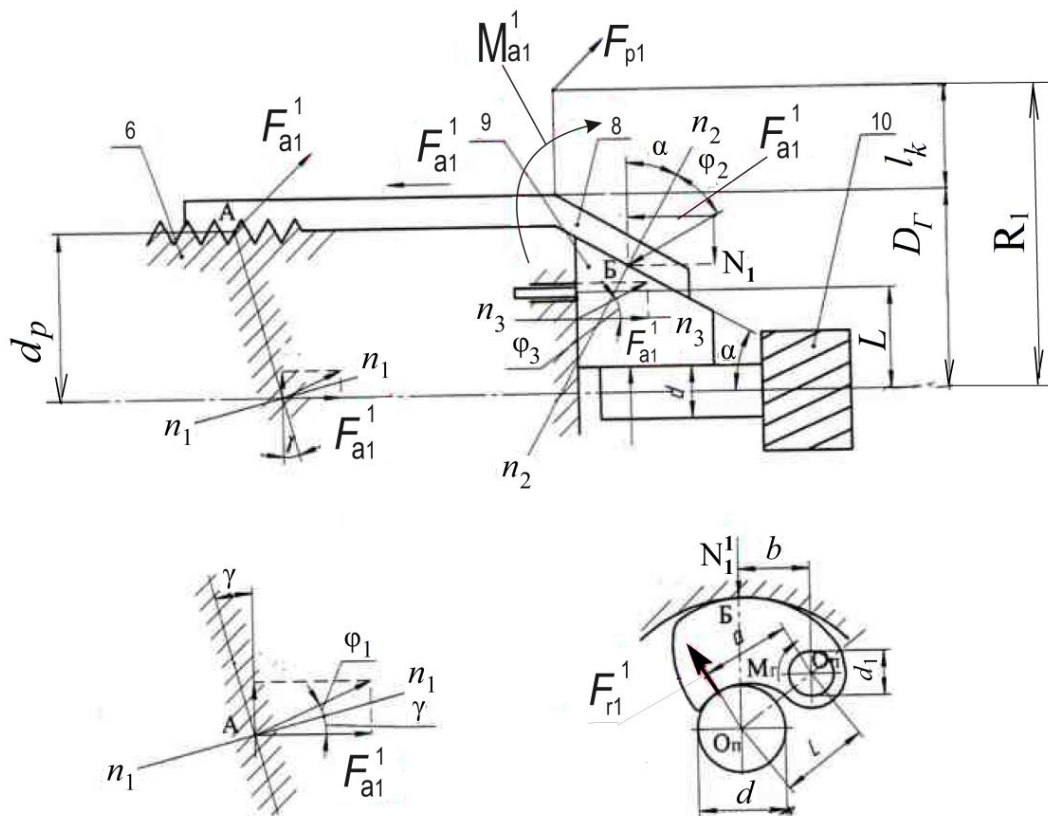


Рис.4.16. Расчётная схема передачи сил в ЭСФП (рис. 4.16) при выборе зазора:  
а – всей первой кинематической цепи основной потока; б – винтовой (резьбовой) пары; в – резьбовая (конусная) втулка – эксцентриковый кулачок – инструмент

$$K_{\Pi}^1 = \frac{F_{r2}^1}{F_{p1}} = K_{p1} \cdot K_{B1} \cdot K_K \cdot K_{\text{ЭК}}, \quad (4.55)$$



где  $K_{P1}$  – коэффициент усиления участка цепи рука – “конусная втулка 8”;  $K_{B1}$  – коэффициент усиления винтовой (резьбовой) пары “конусная втулка 8 – рубашка 6”;  $K_K$  – коэффициент усиления участка цепи “конусная втулка 8 – кулачок 9”;  $K_{ЭК}$  – коэффициент усиления рычажной передачи эксцентрикового зажимного кулачка 9 с осью поворота в виде цилиндрического ползуна – хвостовика.

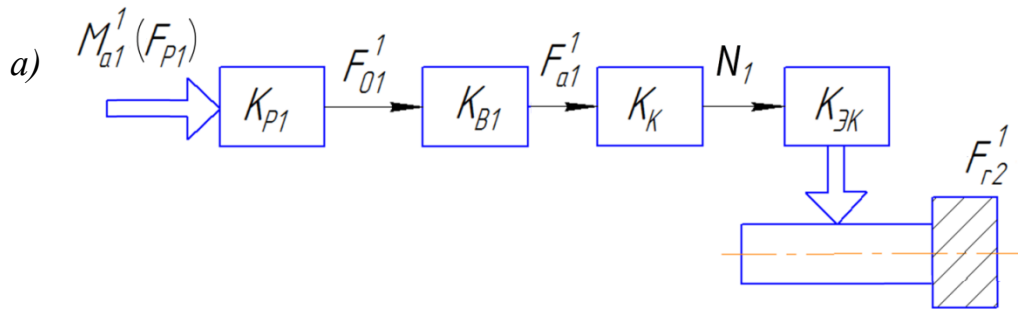


Рис. 4.17. Функционально-структурная схема ЭСФП с первой кинематической цепью

Из рис. 4.16, а

$$M_{P1} = F_{P1} \cdot \left( l_k + \frac{D_k}{2} \right) = F_{01} \cdot \frac{d_{P1}}{2} \quad (4.56)$$

где  $l_k$  – расстояние от оси вращения до места приложения силы на плеча гаечного ключа (при ручном зажиме);  $D_k$  – наружный диаметр конусной втулки 8;  $d_P$  – диаметр резьбы пары конусная втулка 8 – рубашка 6.

Из выражения (4.56),

$$K_{P1} = \frac{F_{01}}{F_{P1}} \cdot \frac{2l_k + D_k}{d_{P1}}. \quad (4.57)$$

Из рис. 4.16, б при приложении окружной силы  $F_{01}$  в результате наклона винтовой линии и угла трения возникает осевая сила, равная

$$F_{a1}^1 = F_{01} \cdot \operatorname{ctg}(\gamma + \varphi_1). \quad (4.58)$$

где  $\gamma = \operatorname{arctg} t_p / \pi \cdot d_{P1}$  – угол наклона винтовой линии ленточной резьбой рубашки 6 и конусной втулки 8;  $t_p$  – шаг резьбы;  $\varphi_1$  – угол трения в сопряжении ленточной резьбы.

Из выражения (4.58) получим

$$K_{B1} = \frac{F_{a1}^1}{F_{01}} = \operatorname{ctg}(\gamma + \varphi_1). \quad (4.59)$$

Из рис. 4.16, а рассмотрим равновесие сил, действующих в продольном сечении вертикально на кулачок 9

$$F_{a1}^1 \cdot ctg(\alpha + \varphi_2) - F_{a1}^1 \cdot tg\varphi_3 - N_1 = 0 \quad (4.60)$$

$$F_{a1}^1 \cdot [ctg(\alpha + \varphi_2) - tg\varphi_3] = N_1,$$

где  $N_1$  – вертикальная составляющая силы реакции, действующая в контакте (точка Б) кулачок 9 – конусная втулка 8;  $\varphi_2$  – угол трения в коническом сопряжении 8;  $\varphi_3$  – угол трения в плоском контакте кулачок 9 – корпус 2 при относительном проскальзывании во время поворота кулачка 9.

Из выражения (4.60)

$$K_k = \frac{N_1^1}{F_{a1}^1} = ctg(\gamma + \varphi_2) - tg\varphi_3. \quad (4.61)$$

Из рис. 4.17, а рассмотрим равновесие кулачка 9 от действия моментов сил в поперечной плоскости относительно оси  $O_{II}$  цилиндрического ползуна

$$N_1 \cdot b - F_{r2}^1 \cdot a - M_T = 0, \quad (4.62)$$

где  $a$  и  $b$  – соответственно плечи действия сил и  $N_1$  относительно точки  $O_{II}$ ;  $M_T = R_1 \cdot \frac{d_{II}}{2} \cdot f$  – момент трения в цилиндрическом ползуне диаметром  $d_{II}$ ;  $R_1$  – результирующая сила от  $F_{r2}^1$  и  $N_1$  действующая в месте контакта скольжения ползуна в корпусе патрона и в общем случае векторное равна  $\vec{R}_1 = \vec{F}_{r1}^1 + \vec{N}_1^1$ ;  $f$  – коэффициент трения скольжения цилиндрического ползуна в корпусе патрона.

Судя по рис. 4.15 направления сил  $F_{r2}^1$  и  $N_1^1$  (рис. 4.16) при зажиме инструмента максимального диаметра  $d_{max} = 2 \cdot R_{max}$  принимаем разнонаправленными, тогда  $R_1 \cong N_1 - T_1$ , а плечи  $a_{max} = L \cdot \sin 30^\circ = 0,5 \cdot L$  (где  $L$  – расстояние между осями инструмента в патроне  $O_{II}$  и цилиндрического ползуна  $O_{II}$ ) и  $b_{max} \cong const = 0,5 \cdot R_{\Sigma}$ . При зажиме инструмента минимального диаметра  $d_{min} = 2 \cdot R_{min}$  силы  $F_{r2}^1$  и  $N_1^1$  принимаем перпендикулярными, а плечи  $b_{min} \cong b_{max} = 0,5 \cdot R_{\Sigma}$  (где  $R_{\Sigma}$  – радиус торцевой части эксцентрикового кулачка).

Для решения выбираем случай зажима инструмента максимального диаметра, когда  $R_1 = N_1^1 - F_{r1}^1$  и решаем уравнение равновесия кулачка (4.62), преобразуя его

$$\begin{aligned} N_1^1 \cdot b - F_{r2}^1 \cdot a - (N_1^1 - F_{r2}^1) \cdot \frac{d_{\Pi}}{2} \cdot f &= 0 \\ N_1^1 \cdot \left(b - \frac{d_{\Pi}}{2} \cdot f\right) &= F_{r2}^1 \cdot \left(a - \frac{d_{\Pi}}{2} \cdot f\right) = 0 \\ K_{\text{ЭК}} = \frac{F_{r2}^1}{N_1^1} &= \frac{b - \frac{d_{\Pi}}{2} \cdot f}{a - \frac{d_{\Pi}}{2} \cdot f} = \frac{2b - d_{\Pi} \cdot f}{2a - d_{\Pi} \cdot f} \end{aligned} \quad (4.63)$$

Считая величину  $d_{\Pi} \cdot f \ll 2b$  и  $d_{\Pi} \cdot f \ll 2a$ , получим

$$K_{\text{ЭК}} \cong \frac{b}{a} \quad (4.64)$$

Таким образом, общий коэффициент усиления патрона после подстановки выражений (4.57), (4.58), (4.61), (4.64) в формулу (4.55)

$$K_{\Pi}^1 = \frac{2l_K + D_{\Gamma}}{d_{P1}} \cdot \text{ctg}(\gamma + \varphi_1) \cdot [\text{ctg}(\alpha + \varphi_2) - \text{tg}\varphi_3] \cdot \frac{b}{a}. \quad (4.65)$$

В соответствии с расчётной (рис. 4.18) и функционально-структурной (рис. 4.19) схемами коэффициент усиления ЭСФП по второй кинематической цепи будет

$$K_{\Pi}^2 = \frac{F_{r2}^2}{F_{p1}} = K_{p2} \cdot K_{B2} \cdot K_{\kappa} \cdot K_{\text{ЭК}}, \quad (4.66)$$

где  $K_{p2}$  – коэффициент усиления участка цепи “рука – гайка 3”;  $K_{B2}$  – коэффициент усиления второй винтовой (резьбовой) передачи – участка цепи “гайка 3 – рубашка 6”.

Из рис. 4.18

$$M_{P2} = F_{P2} \cdot R_2 = F_{O2} \cdot \frac{d_{P2}}{2}, \quad (4.67)$$

где  $R_2$  – радиус плеча рычага от руки человека при вращении гайки 3;  $d_{P2}$  – средний диаметр резьбы винтовой пары “гайка 3 – рубашка”.

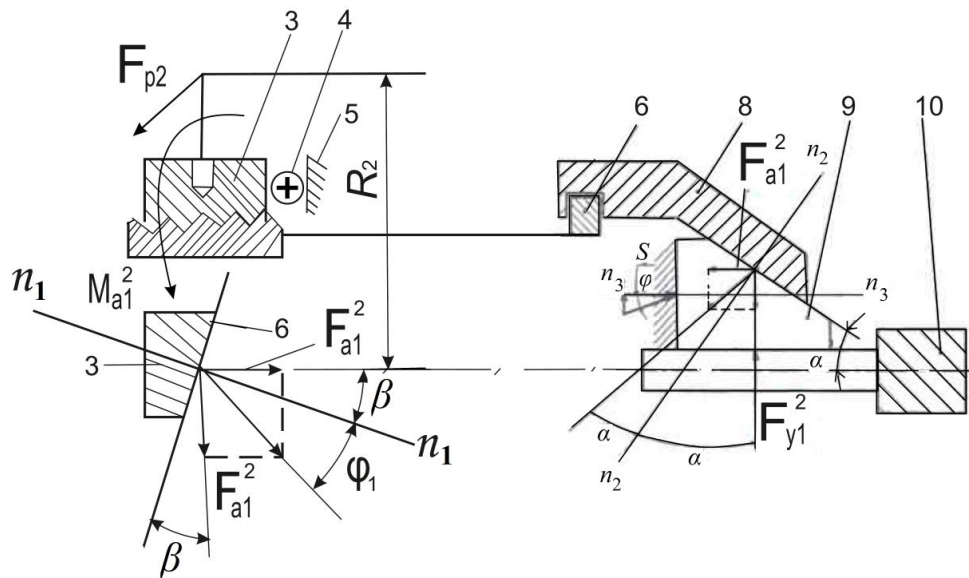


Рис. 4.18. Расчётная схема передачи сил в ЭСФП (рис. 4.16) по второй кинематической цепи (дополнительный поток) при окончательном зажиме

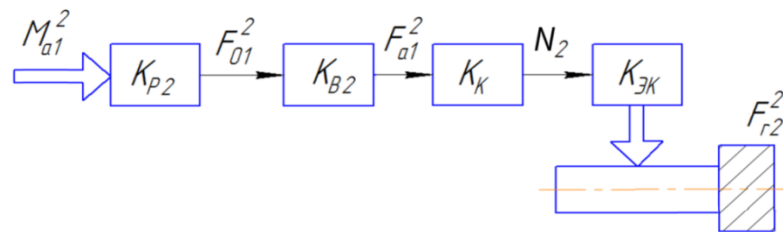


Рис. 4.19. Функционально-структурная схема ЭСФП с второй кинематической цепью (рис. 4.16)

Из выражения (4.67)

$$K_{P2} = \frac{F_{O2}}{F_{P1}} = \frac{2 \cdot R_2}{d_{P2}}. \quad (4.68)$$

При приложении окружной силы  $F_{O2}$  возникает осевая сила

$$F_{a1}^2 = F_{O2} \cdot \operatorname{ctg}(\beta + \varphi), \quad (4.69)$$

где  $\beta$  – угол наклона резьбы гайки 3.

Отсюда

$$K_{B2} = \frac{F_{a1}^2}{K_{O2}} = \operatorname{ctg}(\beta + \varphi) \quad (4.70)$$

Таким образом, коэффициент усиления второй кинематической цепи

$$K_{\Pi}^2 = \frac{2R_2}{d_{P2}} \cdot \operatorname{ctg}(\beta + \varphi_1) \cdot [\operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_2) - \operatorname{tg}\varphi_3] \cdot \frac{b}{a} \quad (4.71)$$

Согласно общей функционально-структурной схеме ЭСФП (рис. 4.20) после подстановки выражений (4.63) и (4.69) в (4.50) и преобразований получим суммарную радиальную силу зажима при условии, что  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$ :

$$F_{r2} = \frac{2 \cdot M_{a1}^1}{d_{p1}} \leftrightarrow \operatorname{ctg}(\gamma + \varphi) \cdot [\operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) - \operatorname{tg} \varphi] \cdot \frac{b}{a} + \\ + \frac{2 \cdot M_{a1}^2}{d_{p2}} \leftrightarrow \operatorname{ctg}(\beta + \varphi) \cdot [\operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) - \operatorname{tg} \varphi] \cdot \frac{b}{a} \quad (4.72)$$

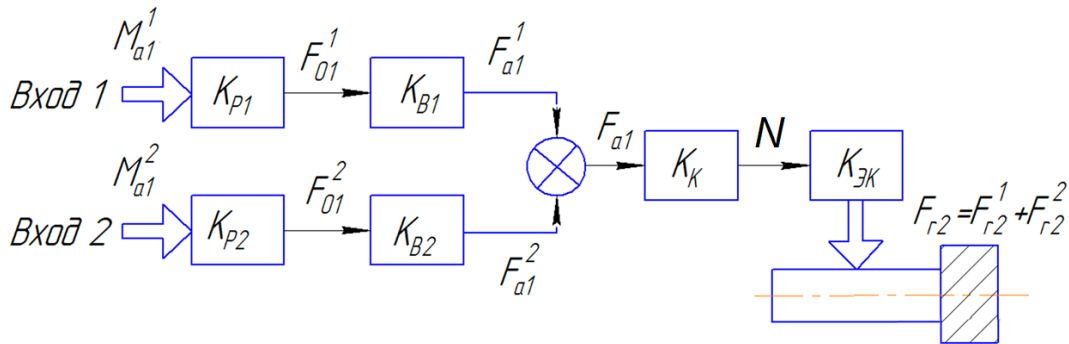


Рис. 4.20. Общая функционально-структурная схема ЭСФП с двумя кинематическими цепями (силовыми потоками)

Преобразовав (4.72), получим

$$F_{r2} = 2 \cdot \left[ \frac{M_{a1}^1}{d_{p1}} \cdot \operatorname{ctg}(\gamma + \varphi) + \frac{M_{a1}^2}{d_{p2}} \cdot \operatorname{ctg}(\beta + \varphi) \right] \times \\ \times [\operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) - \operatorname{tg} \varphi] \cdot \frac{b}{a} \quad (4.73)$$

Согласно формулы (4.73) выполним анализ влияния конструктивных параметров в виде соотношений  $\frac{b}{a}, \frac{\gamma}{\beta}, \alpha, \varphi$  на изменение статистической суммарной радиальной силы зажима  $F_{r2}$  при следующих условиях;  $d_{p1} = d_{p2} = 40 \text{ мм}$ ;  $M_{a1}^1 = 5 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ ;  $M_{a2}^1 = 10^4 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ ;  $\gamma = 5^\circ$ ;  $\beta = 1^\circ - 5^\circ$  (через  $1^\circ$ );  $\varphi = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ ;  $\alpha = 10^\circ - 30^\circ$  (через  $5^\circ$ );  $\frac{b}{a} = 0,8; 1,0; 1,2$ . Результаты анализа приведены на рис. 4.21.

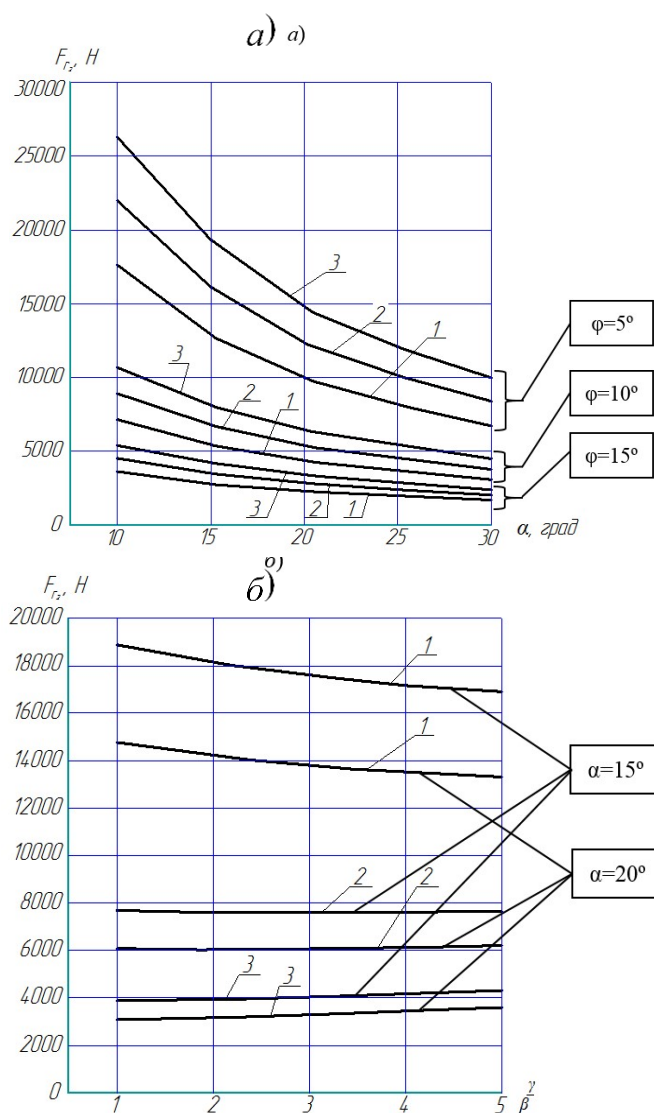


Рис. 4.21. Графики зависимости суммарной статической силы зажима от: а – соотношения  $\frac{\gamma}{\beta}$  для  $\frac{b}{\alpha} = 1$  при  $\varphi$ : 1 –  $5^\circ$ ; 2 –  $10^\circ$ ; 3 –  $15^\circ$ ; б – от угла конуса втулки при соотношении  $\frac{b}{\alpha}$ : 1 – 0,8; 2 – 1,0; 3 – 1,2;  $\gamma = 5^\circ$ ;  $\beta = 1^\circ$

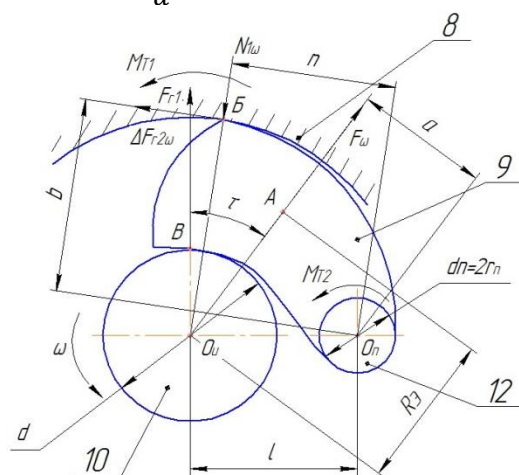


Рис. 4.22. Расчётная схема действия сил на зажимной элемент при вращении ИЗП скольжения в точке Б при повороте кулачка;  $M_{T2}$  – момент трения скольжения цилиндрического плунжера 12 в корпусе патрона 2

Моменты трения при коэффициенте трения скольжения  $f$  равны:

$$M_{T1} = F_{T1} \cdot b = N_{1\omega} \cdot b \cdot f, \quad (4.74)$$

$$M_{T2} = F_{T2} \cdot r_{\Pi} = (F_{\omega} \cdot a \cdot \cos\tau - N_{1\omega})r_{\Pi} \cdot f \quad (4.75)$$

После подстановки выражений (4.74), (4.75) в (4.73) и преобразований получим:

$$N_{1\omega} = F_{\omega} \cdot \cos\tau \cdot \frac{a(1 - r_{\Pi} \cdot f)}{l + bl - r_{\Pi}f}. \quad (4.76)$$

Считая кулачок абсолютно жёстким и учитывая жёсткость патрона  $C_{\Pi}$ , получим упругое смещение в точке Б (рис.4.22 и 4.23, а)

$$\delta = \frac{N_{1\omega}}{C_N}. \quad (4.77)$$

При смещении кулачка на величину  $\delta$  в контакте кулачка и инструмента (точка В) статическая радиальная сила зажима по формулам (4.72), (4.73) снизится с учётом жесткости инструмента  $C_{\Pi}$  (рис.4.23,а) на величину:

$$\Delta F_{r2\omega} = \delta \cdot C_N \quad (4.78)$$

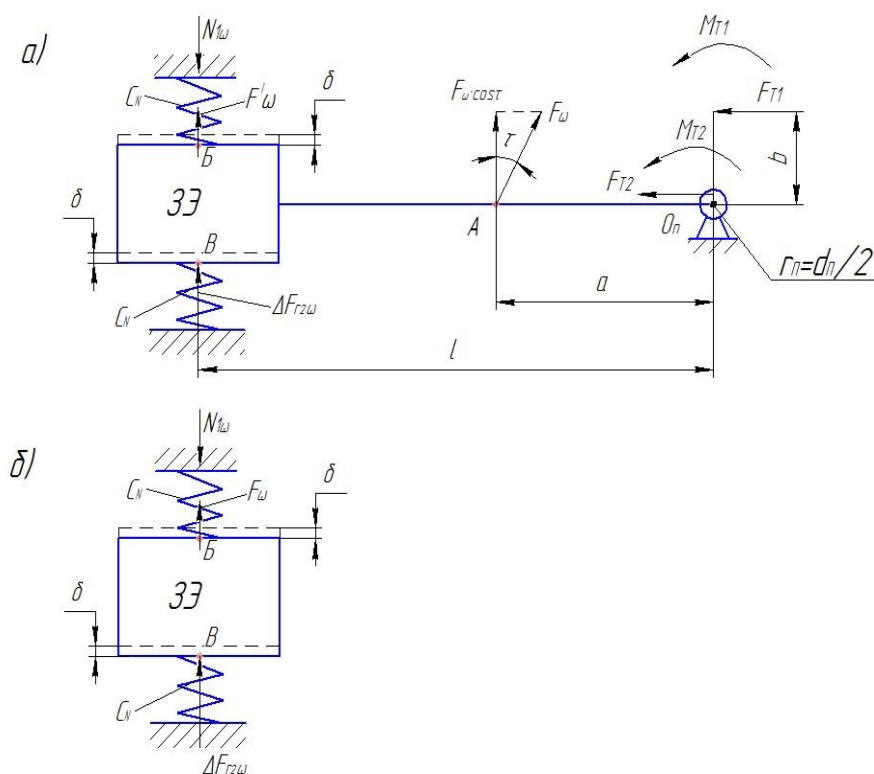


Рис.4.23. Расчётные схемы для сравнения потери динамической силы зажима в ИЗП: а – с эксцентриковым (клино-рычажным) кулачком; б – клиновым кулачком

После подстановки выражений (4.76) и (4.77) в (4.78) получим

$$\Delta F_{r2\omega} = F_{\omega} \cdot \cos\tau \frac{a(1 - r_{\Pi f})}{l + bf - r_{\Pi f}} \cdot \frac{C_N}{C_{\Pi}} \quad (4.79)$$

Учитывая, что  $r_{\Pi f}$  существенно малая величина, то потеря радиальной силы зажима будет:

$$\Delta F_{r2\omega} = F_{\omega} \cdot \frac{C_N}{C_{\Pi}} \cdot \frac{a}{l + bf} \cdot \cos\tau \quad (4.80)$$

При клиновом кулачке без оси поворота (рис.4.23,б):

$$\Delta F_{r2\omega}^I = F_{\omega} \cdot \frac{C_N}{C_{\Pi}} \quad (4.81)$$

Так как  $a < l + bf$  и  $\cos\tau < 1$ , то потеря силы зажима во вращающемся ЭСФПШ значительно меньше. Например, при  $C_N = C_{\Pi}$ ,  $l + bf = 2a$  и  $\cos\tau = 45^\circ \approx 0,7$   $\frac{\Delta F_{r2\omega}^I}{\Delta F_{r2\omega}} = \frac{1 \cdot 0,7}{2} = 0,35$ , (4.82) т.е. примерно в 3 раза меньше. Это значит, что сравнению со стандартными клиновыми сверлильными патронами с ключом максимальная частота вращения может быть увеличена в 3 раза и более раз, что подтвердили ранее выполненные исследования и расчеты для ИЗП с максимальным диаметром инструмента 16 мм (рис.4.24,4.25).

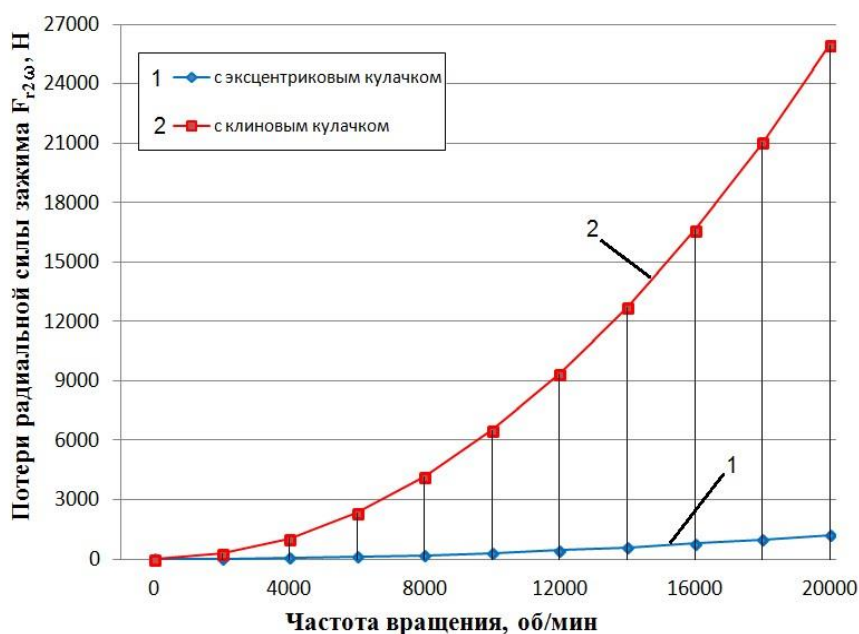


Рис.4.24. Графики зависимости потери динамической силы зажима от частоты его вращения



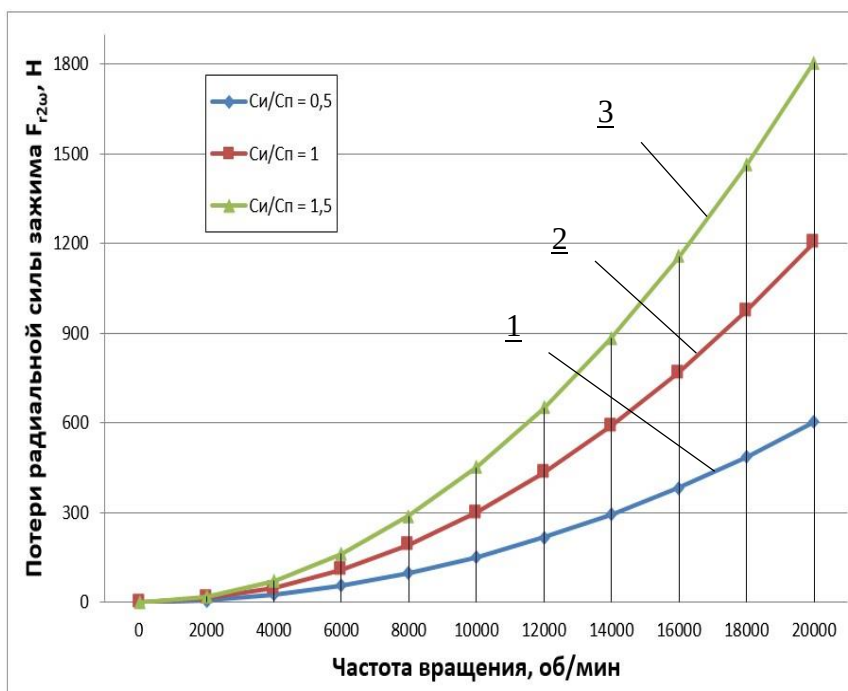


Рис.4.25. Графики зависимости потери радиальной силы зажима в эксцентриковом широкодиапазонном ИЗП от частоты его вращения для  $\frac{b}{\alpha} = 1$ ,  $\varphi = 15^\circ$  при разной жесткости хвостовика инструмента

Исследования показали, что помимо дополнительного повышения силы зажима введением второй кинематической цепи с винтовым преобразователем, применение универсальных генетических операторов скрещивания и кроссинговера позволяет реализовать принцип энерджентности (целостности) – получение новых свойств, а именно, уменьшение влияния центробежных сил неуравновешенных зажимных элементов при повышении широкодиапазонности и снижении диаметральных габаритов.

Синтезированные широкодиапазонные эксцентриковые инструментальные зажимные патроны без ключа целесообразно использовать при высокоскоростной обработке на сверлильных, фрезерных и многоцелевых станках с ЧПУ, в том числе с механизмами параллельной структуры.

#### 4.5. Передача сил в синтезированном цанговом патроне двойного зажима

Для зажимных патронов (ЗП) с двойным зажимом в радиальном направлении на хромосомной уровне морфологическая модель силовых потоков выглядим так (табл. 4.2).

Таблица 4.2

##### Морфологическая таблица

силовых потоков в зажимных патронах двойного зажима

| Входы силовых потоков |                                                    |                 | Выходы силовых потоков |                 |
|-----------------------|----------------------------------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|
| 1. Вход 1             | 2. Соединение                                      | 3. Вход 2       | 4. Выход 1             | 5. Выход 2      |
| 1.1. $F_{a1}^1$       | 2.1. Последовательное ( $\wedge$ )                 | 3.1. $F_{a1}^2$ | 4.1. $F_{r2}^1$        | 5.1. $F_{r2}^2$ |
| 1.2. $M_{a1}^1$       | 2.2. Параллельное ( $\vee$ )                       | 3.2. $M_{a1}^2$ | 4.2. $F_{r2}^1$        | 5.2. $F_{r2}^2$ |
| 1.3. $F_{r1}^1$       | 2.3. Последовательно-параллельное ( $\wedge\vee$ ) | 3.3. $F_{r1}^2$ |                        |                 |
| 1.4. $M_{r1}^1$       |                                                    | 3.4. $M_{r1}^2$ |                        |                 |

Примечание:  $\wedge$  – конъюнкция;  $\vee$  – дизъюнкция;  $\wedge\vee$  – конъюнкция/дизъюнкция

Морфологическая матрица силовых потоков двойного зажима

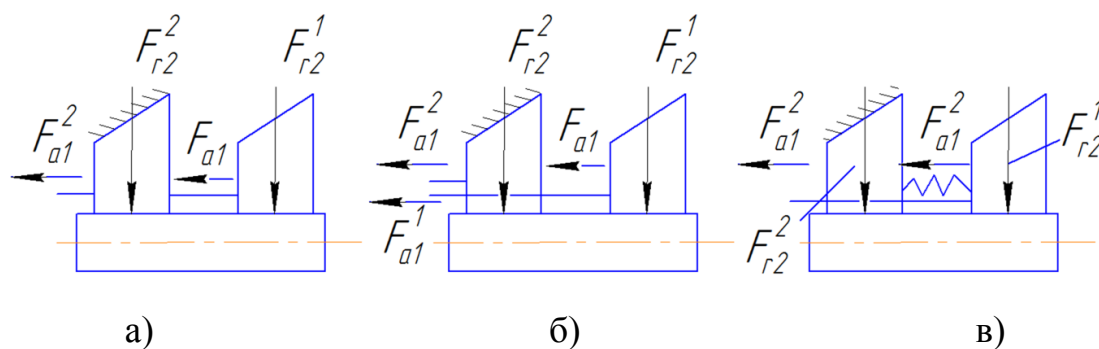
$$M_{дз} = \begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 & 5.2 \\ 1.3 & 2.3 & 3.3 & & \\ 1.4 & & 3.4 & & \end{vmatrix} \quad (4.83)$$

Общее количество вариантов  $N = 4.3.4.2.2 = 192$ .

Применительно к цанговым патронам двойного зажима (ЦПДЗ) снаружи матрица (4.83) будет усечённой

$$M'_{дз} = \begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 & & \\ & 2.3 & & & \end{vmatrix}, \quad (4.84)$$

в результате чего число вариантов уменьшится до  $N' = 2.3.2 = 12$  при выходе  $F_{r2} = F_{r2}^1 + F_{r2}^2$  (табл. 4.3). В этих патронах в качестве ПУЗ принят клиновой преобразователь (WD) в виде губок с наружной конической поверхностью. Примеры реализации матрицы (4.83) показаны применительно к ЦПДЗ тянущего типа (рис. 4.26).



а)

б)

в)

Рис.4.26. Варианты ЦПДЗ согласно формул (табл.4):

а –  $F_{a1}^1 \wedge F_{a1}^2 - F_{r2}$ ; б –  $F_{a1}^1 \vee F_{a1}^2 - F_{r2}$ ; в –  $F_{a1}^1 \vee \wedge F_{a1}^2 - F_{r2}$  ( $F_{r2} = F_{r2}^1 + F_{r2}^2$ )

Далее на примере синтезированного ЦПДЗ по патенту Украины №80489 будут детально исследованы силовые и точностные характеристики. Этот патрон может применяться для зажима прутков в многошпиндельных токарных автоматах с основной цангой тянущего типа (рис. 3.37 и 4.24, в) и в ИЗП с ручным зажимом (рис. 4.14).

Таблица 4.3

Варианты входов силовых потоков в ЦПДЗ

| № п/п | Силовые потоки | Формула                         | № п/п | Силовые потоки | Формула                         |
|-------|----------------|---------------------------------|-------|----------------|---------------------------------|
| 1     |                | $F_{a1}^1 \wedge F_{a1}^2$      | 7     |                | $F_{a1}^1 \wedge M_{a1}^2$      |
| 2     |                | $F_{a1}^1 \vee F_{a1}^2$        | 8     |                | $F_{a1}^1 \vee M_{a1}^2$        |
| 3     |                | $F_{a1}^1 \vee \wedge F_{a1}^2$ | 9     |                | $F_{a1}^1 \wedge \vee M_{a1}^2$ |
| 4     |                | $M_{a1}^1 \wedge M_{a1}^2$      | 10    |                | $M_{a1}^1 \wedge F_{a1}^2$      |
| 5     |                | $M_{a1}^1 \vee M_{a1}^2$        | 11    |                | $M_{a1}^1 \vee F_{a1}^2$        |
| 6     |                | $M_{a1}^1 \wedge \vee M_{a1}^2$ | 12    |                | $M_{a1}^1 \wedge \vee F_{a1}^2$ |

Примечание:  $\wedge$  – конъюнкция;  $\vee$  – дизъюнкция;  $\vee \wedge$  – конъюнкция / дизъюнкция

В качестве дополнительно ЗЭ выполнены упругие элементы 4'' (рис.4.27), объединенные направляющей втулкой 5 со шлицевыми пазами "с". В окнах "в" и шлицах "с" размещены упругие элементы 4, закрепленные винтами 3 изнутри.

Рабочая часть упругого ЗЭ выполнена в виде гофрированного элемента с внутренним радиусом  $r_v$  и наружным радиусом  $r_n$ .

Для исследования напряженно-деформированного состояния рассмотрим гофрированный элемент, как часть толстостенной цилиндрической оболочки (рис. 4.28), сжимаемой в направлении оси X равно по распределённой нагрузкой  $q$ , приложенной к торцам [235].

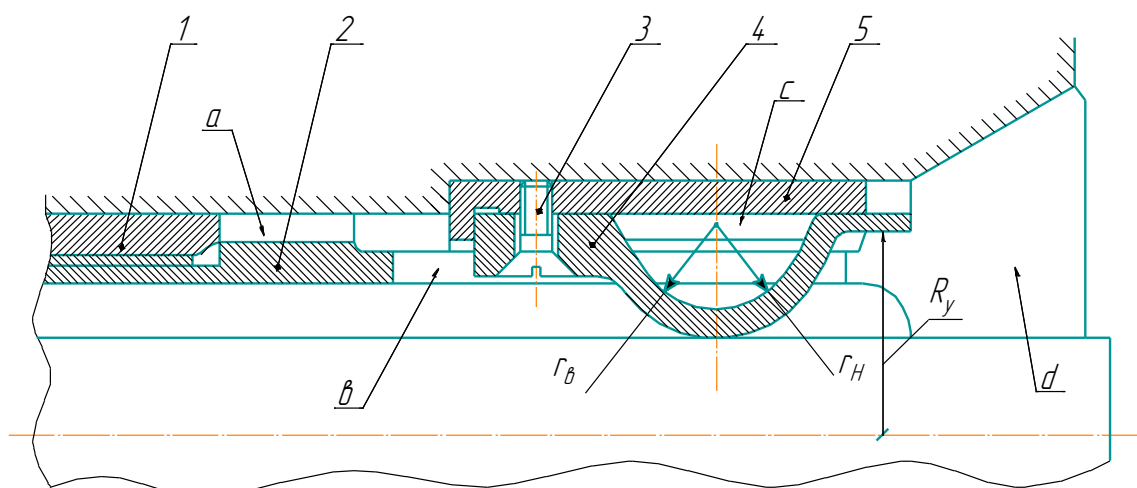


Рис. 4.27. Конструктивное выполнение дополнительных упругих зажимных элементов в ЦПДЗ (см. рис. 3.37, а): 1-труба зажима; 2-зажимная цанга; 3-винт; 4-упругий гофрированный элемент; 5-направляющая втулка с внутренними шлицами под элементы 4; а-наружные шлицы в направляющем пояске цанги 2; в-пронаправляющем пояске цанги 2; в-прорези, образующие лепестки цанги 2; с – внутренние шлицы во втулке 5; d – узкие прорези, образующие губки цанги 2

Для анализа упростим реальную схему, приведя к плоской (рис. 4.29 и 4.30) [125, 249].

В системе координат ZOY напряжённо – деформированное состояние кольца описывают уравнения теории упругости:

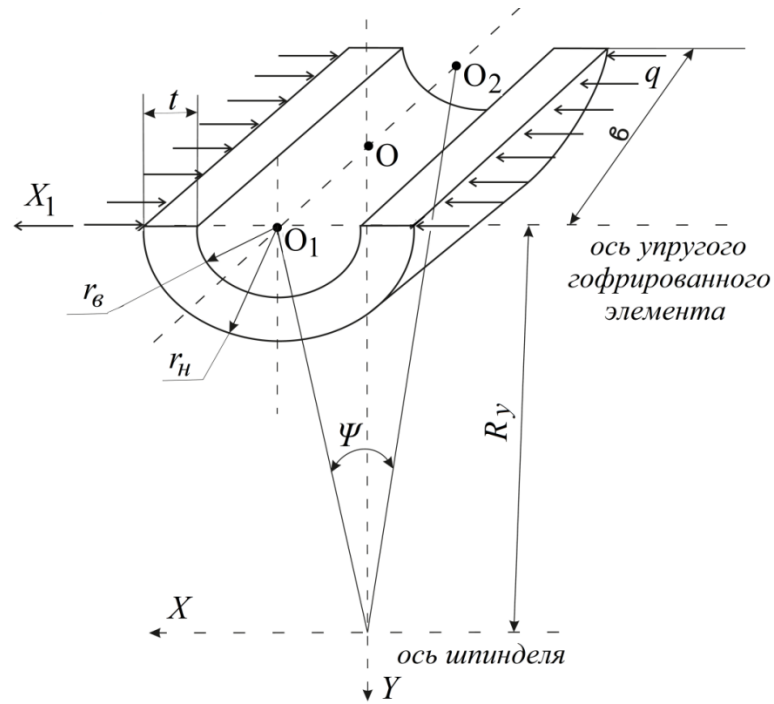


Рис. 4.28. Реальная схема нагружения упругого гофрированного элемента  
дополнительного зажима

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \end{aligned} \quad (4.85)$$

$$\Delta(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = 0$$

$$\Delta \tau_{xy} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x \partial y} \quad (4.86)$$

$$\Delta \tau_{xz} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x \partial y}$$

$$\Delta \tau_{zx} + \frac{1}{1+\nu} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x \partial y}$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (4.87)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$\begin{aligned}
 Y_{xy} &= \frac{1}{G} T_{xy} \\
 Y_{yz} &= \frac{1}{G} T_{yz} \\
 Y_{zx} &= \frac{1}{G} T_{zx}
 \end{aligned}
 \quad (4.88)$$

Интегрирование этих уравнений не представляется возможным, поэтому использовано приближённое решение задачи посредством рассмотрения вместо данного упругого кольца его упрощённой модели в виде толстостенной цилиндрической оболочки, нагруженной теми же силами (рис. 4.29).

Торцы оболочки не испытывают нагрузки, поэтому можно предположить, что осевые напряжения отсутствуют, то есть элемент находится в плоском напряжённом состоянии (рис. 4.30).

При введении функции напряжений  $\theta(\rho, \Theta)$  задача сводится к решению известного бигармонического уравнения относительно этой функции.

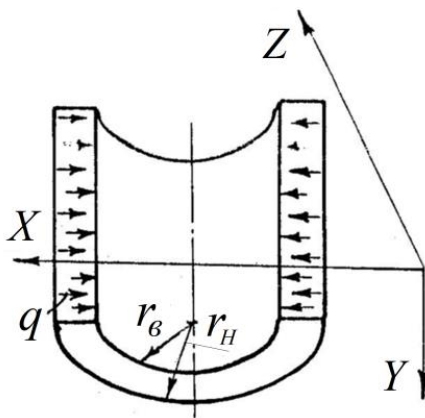


Рис. 4.29. Упрощённая схема нагружения гофрированного элемента

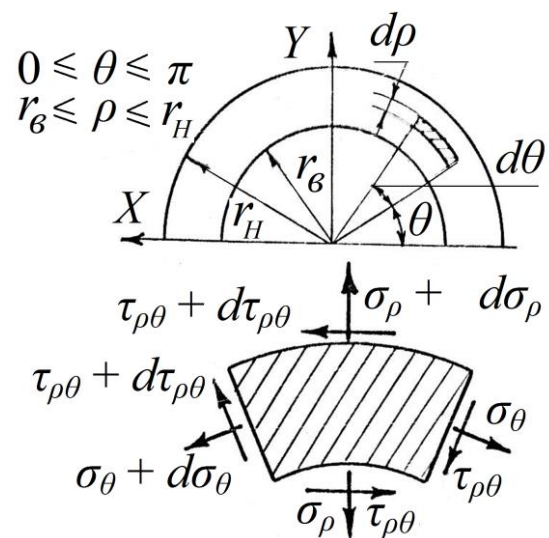


Рис. 4.30. Расчётная схема гофрированного элемента при плоском напряжённом состоянии

В полярной системе координат это уравнение имеет вид:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \Theta^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \Theta^2} \right) = 0 \quad (4.89)$$

Выражения для напряжений и деформаций имеют такой вид:

$$\begin{aligned}
\sigma_\rho &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \Theta^2} & \varepsilon_\rho &= \frac{1}{E} (\sigma_\rho - \nu \sigma_\Theta) \\
\sigma_\Theta &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho^2} & \varepsilon_\Theta &= \frac{1}{E} (\sigma_\Theta - \nu \sigma_\rho) \\
\tau_{\rho\Theta} &= -\frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \Theta} \right) & \gamma_{\rho\Theta} &= \frac{1}{G} \tau_{\rho\Theta} \\
\tau_{\rho z} &= \tau_{\Theta z} = \sigma_z = 0 & \gamma_{\rho z} &= \gamma_{\Theta z} = 0
\end{aligned} \tag{4.90}$$

где  $\nu = \frac{2E}{G} - 1$  – безразмерный коэффициент.

Решение аналогичной задачи получено С. П. Тимошенко [247], где функция Эри выбиралась в следующем виде:

$$\Phi(\rho, \Theta) = f(\rho) \sin \Theta. \tag{4.91}$$

Окончательные результаты представлены формулами:

$$\begin{aligned}
\sigma_\rho &= 2\alpha \left( \rho + \frac{m}{\rho^3} - \frac{n}{\rho} \right) \sin \Theta \\
\sigma_\Theta &= 2\alpha \left( 3\rho - \frac{m}{\rho^3} - \frac{n}{\rho} \right) \sin \Theta \\
\tau_{\rho\Theta} &= 2\alpha \left( -\rho - \frac{m}{\rho^3} + \frac{n}{\rho} \right) \cos \Theta
\end{aligned} \tag{4.92}$$

$$\text{где } \alpha = \frac{q(r_H - r_b)}{2 \left[ r_b^2 - r_H^2 + (r_b^2 + r_H^2) \sin \frac{r_H}{r_a} \right]} \quad m = r_b^2 \cdot r_H^2, \quad r_b^2 + r_H^2 - \text{константы.}$$

Для определения осевого сближения  $\Delta_0$  торцов упругого гофрированного элемента определим работу внешних сил, равную потенциальной энергии деформации:

$$A = \iiint (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{xz} \gamma_{xz} + \tau_{zy} \gamma_{zy}) dx dy dz \tag{4.93}$$

В случае плоского напряжённого состояния формула (4.89) в полярной системе координат  $(\rho, \theta)$  принимает вид:

$$A = \iiint \left[ \frac{1}{E} (\sigma_\rho^2 - 2\nu \sigma_\rho \sigma_\Theta + \sigma_\Theta^2) + \frac{1}{G} \tau_{\rho\Theta}^2 \right] \rho d\rho d\theta dx \tag{4.94}$$

Проинтегрировав выражение (4.94) и приняв, что  $A = \Delta_0 \iint q d\rho dx$ , получим следующее выражение для определения перемещения:

$$\Delta_0 = \frac{q(r_H^4 - r_b^4) \left( \frac{2}{G} - \frac{4}{E} \right) + (r_b^2 + r_H^2) \frac{1}{E} \ln \frac{r_H}{r_b}}{2 \left[ r_b^2 - r_H^2 + (r_b^2 + r_H^2) \ln \frac{r_H}{r_b} \right]^2} \tag{4.95}$$

ИЛИ

$$\Delta_o = \frac{\pi q}{2} t \frac{\left[ \frac{2}{G} + \frac{1}{E} (\xi \ln \delta - 4) \right] \xi}{(1 - \xi \ln \delta)^2} \quad (4.96)$$

где  $t = r_H - r_b$ ;  $\delta = \frac{r_H}{r_b}$ ;  $\xi = \frac{\delta^2 + 1}{(\delta + 1)^2}$  – постоянные.

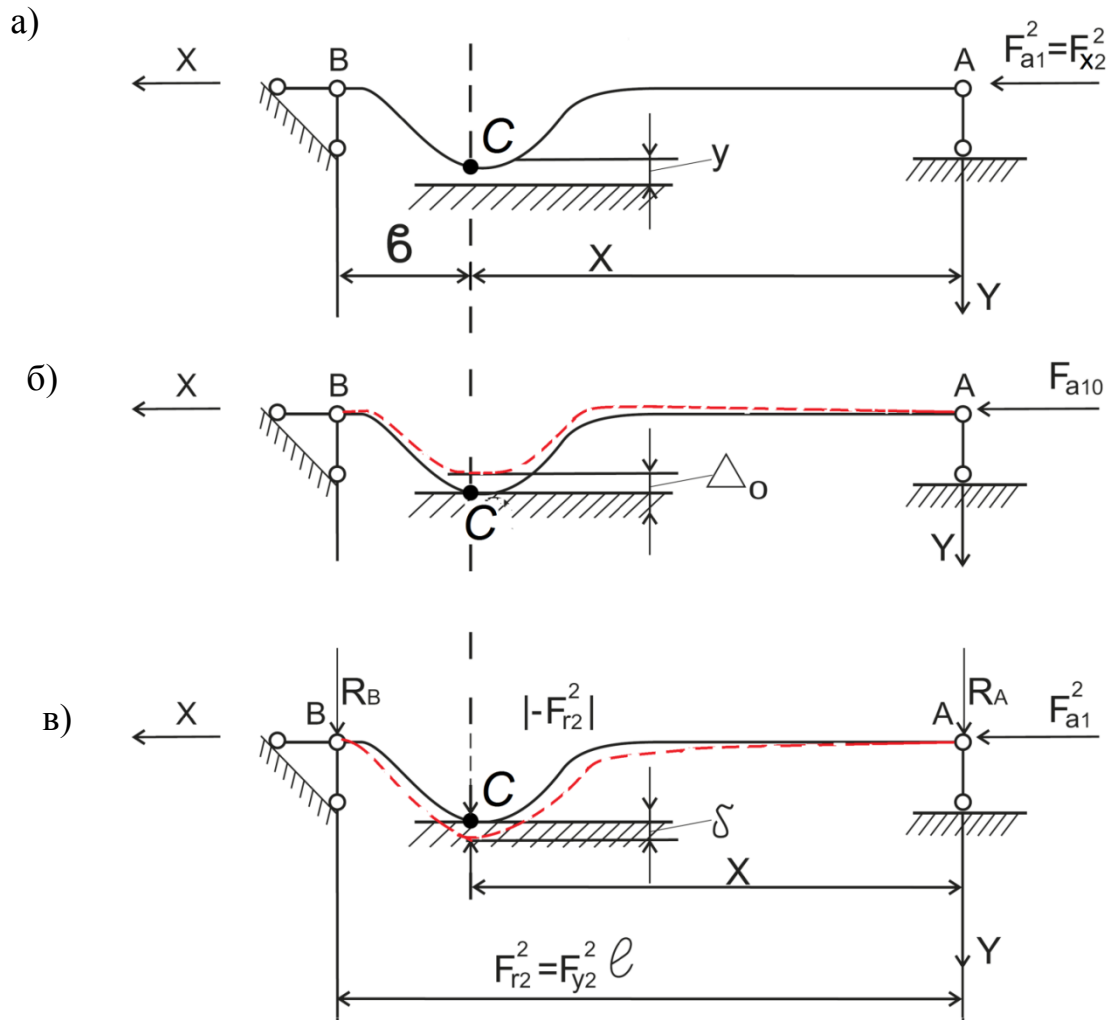


Рис. 4.31. Схемы передачи усилия зажима на дополнительный упругий 3Э при его продольно-поперечном изгибе: а – начало передачи силы при наличии зазора  $\Delta_o$  между 3Э и ОЗ; б – выбор зазора  $\Delta_o$ ; в – натяг системы на величину  $\delta$  при создании выходной радиальной силы  $F_{r2}^2$

Так как кроме рабочей части (упругого гофрированного элемента) в дополнительном 3Э имеется ещё упругая часть в виде лепестка, то необходимо рассматривать дополнительный 3Э как балку, испытывающую продольно-поперечный изгиб рис. 4.31 [235].



Пусть на балку АВ, равную длине  $l$  (рис. 4.31, а), действует только осевая сила  $F_{a1}^2$ , в результате которой происходит продольно-поперечный изгиб дополнительного упругого ЗЭ и возникает изгибающий момент

$$M_g = F_{a2}^2 \cdot y(x) \quad (4.97)$$

После выборки зазора  $\Delta_0$  (4.31, б) и дальнейшем натяге дополнительного ЗЭ возникает поперечная (радиальная) сила  $F_{r2}^2$ . В результате полный изгибающий момент в поперечном сечении

$$|M_{\Pi}| = |M| + |M_g|. \quad (4.98)$$

Вычисление полного изгибающего момента  $M_{\Pi}$  осложняется тем, что в данном случае принцип суперпозиции – независимости действия сил неприменим. Действительно полный прогиб  $y$  (рис. 4.31, в) можно рассматривать состоящим из прогиба  $\delta$ , возникающего от действия только поперечной нагрузки  $F_{r2}^2$ , и дополнительного прогиба  $y - \delta$ , вызванного силой  $F_{a1}^2$ .

В данном случае дифференциальное уравнения упругой линии будет:

$$\frac{d^2 y(x)}{dx^2} = \frac{M_{\Pi}(x)}{EJ}. \quad (4.99)$$

где  $M_{\Pi}(x)$  – полный изгибающий момент в произвольном сечении ЗЭ с координатой  $X$ .

При составлении выражения  $M_{\Pi}(x)$ , подставляемого в правую часть уравнения (4.99), для изгибающего момента, вызванного поперечной нагрузкой, сохраняется обычное правило знаков, а момент от сжимающей силы  $M_{a1}^2$  записывается со знаком “минус”, так как  $\frac{d^2 y}{dx^2}$  и  $y$  всегда имеют противоположные знаки. Тогда выражение (4.103) будет представлено так:

$$M_{\Pi}(x) = M(x) - F_{a1}^2 \cdot y = F_{r2}^2 \cdot x - F_{a1}^2 \cdot y. \quad (4.100)$$

Продифференцировав выражение (4.101) по  $X$  дважды, получим:

$$\frac{d^2 M_{\Pi}(x)}{dx^2} = -F_{a1}^2 \frac{d^2 y(x)}{dx^2}. \quad (4.101)$$

Введем обозначение

$$\frac{F_{a1}^2}{EJ} = \alpha^2, \quad (4.102)$$

получим дифференциальное уравнение для изгибающих моментов:

$$\frac{d^2 M_{\Pi}(x)}{dx^2} + \alpha^2 \cdot M_{\Pi}(x) = 0. \quad (4.103)$$

Общий интеграл уравнения (4.103) следующий

$$M_{\Pi}(x) = A \cdot \cos \alpha x + B \cdot A \cdot \cos \alpha \cdot \cos \alpha x \quad (4.104)$$

Продифференцировав уравнения (4.104) по  $X$ , получим уравнения для поперечных сил

$$Q_{\Pi}(x) = -A \cdot \alpha \cdot \sin \alpha x + B \cdot \alpha \cdot \cos \alpha x \quad (4.105)$$

Физический смысл постоянных интегрирования, рассматривая начальные условия:

при

$$X = 0 \quad M_{\Pi}(0) = A; \quad (4.106)$$

$$Q_{\Pi}(0) = B \cdot \alpha. \quad (4.107)$$

Эти начальные значения  $M_{\Pi}$  и  $Q_{\Pi}$  приняты начальными параметрами  $M_H$  и  $Q_H$  соответственно. Тогда уравнение изгибающих моментов при продольно-поперечном изгибе принимает вид:

$$M_{\Pi}(x) = M_H \cdot \cos \alpha x + \frac{Q_{\Pi}}{\alpha} \cdot \sin \alpha x. \quad (4.108)$$

Для практических расчётов целесообразно применять приближенные способы решения, основанные на допущении, что изогнутая ось упругого дополнительного ЗЭ при поперечной нагрузке принимает форму синусоиды, т.е.

$$\delta(x) \cong f \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{l}. \quad (4.109)$$

Кроме того принимаем допущение, что  $b = x = \frac{l}{2}$ , т.е. точке  $C$  (рис. 4.31) находится посередине упругого дополнительного ЗЭ.

При наличии продольной силы  $F_{a1}^2$  также приближенно принимают, что

$$y(x) \approx f_{\Pi} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{l}. \quad (4.110)$$

Это предположение позволяет получить практически достаточно точные результаты для упругого дополнительного ЗЭ при действии поперечной нагрузке, направленной в одну сторону при симметричной деформации относительно середины балки, где  $y\left(\frac{l}{2}\right) \cong f_{\Pi}$ .

Дифференциальное уравнение упругой линии  $\frac{d^2 \delta(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{EJ}$  (подобно 4.99) при продольно-поперечном изгибе ЗЭ с учетом (4.109) запишется так:

$$\frac{d^2 y(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{EJ} - \frac{F_{a1}^2 \cdot y}{EJ}. \quad (4.111)$$

Исключив из уравнений упругой линии  $M(x)$  и учтя допущения (4.109) и (4.110), находим

$$(f_{\Pi} - f) \frac{d^2}{dx^2} \left( \sin \frac{\pi x}{l} \right) = - \frac{F_{a1}^2}{EJ} f_{\Pi} \cdot \sin \frac{\pi x}{l}. \quad (4.112)$$

Тогда после дифференцирования будем иметь:

$$\frac{\pi^2}{l^2} (f_{\Pi} - f) = \frac{F_{a1}^2}{EJ} f_{\Pi}. \quad (4.113)$$

Введём обозначение  $\frac{\pi^2 \cdot EJ}{l^2} = F_{\Xi}$  и назовём Эйлеровой силой, эта сила

численно равна  $F_{kp}$ , определяемой по формуле

$$F_{kp} = \frac{\pi^2 \cdot EJ_{\min}}{l^2} = F_{\Xi}. \quad (4.114)$$

Из уравнения (4.113) найдём выражение для прогиба посередине пролёта дополнительного ЗЭ при совместном действии продольной и поперечной нагрузок:

$$f_{\Pi} = \frac{f}{1 - \frac{F_{a1}^2}{F_{\Xi}}}. \quad (4.115)$$

Наибольший момент при продольно-поперечной изгибе

$$M_{\Pi \text{Макс}} = \frac{M}{1 - \frac{F_{a1}^2}{F_{\Xi}}}. \quad (4.116)$$

Тогда для вычисления наибольших напряжений получим формулу:

$$\delta_{\text{Макс}} = \frac{F_{a1}^2}{S_{3Э}} + \frac{M}{W_{3Э} \cdot \left(1 - \frac{F_{a1}^2}{F_3^2}\right)}, \quad (4.117)$$

где  $S_{3Э}$  и  $W_{3Э}$  – соответственно площадь и момент сопротивления поперечного сечения дополнительного ЗЭ.

Считая  $\frac{M_{\text{ПМакс}}}{M} = \frac{f_{\text{П}}}{f} = \frac{\Delta + \delta}{\delta}$ , можно найти из выражения

$$M = F_{r2}^2 \cdot X = F_{r2}^2 \cdot \frac{l}{2} \quad (4.118)$$

радиальную силу дополнительного зажима

$$F_{r2}^2 = \frac{2 \cdot M}{l}. \quad (4.119)$$

Для определения коэффициента усиления ЦПДЗ с дополнительным упругим ЗЭ воспользуемся расчётной схемой (рис. 4.32), а вычисления можно выполнить согласно [109, 111, 249].

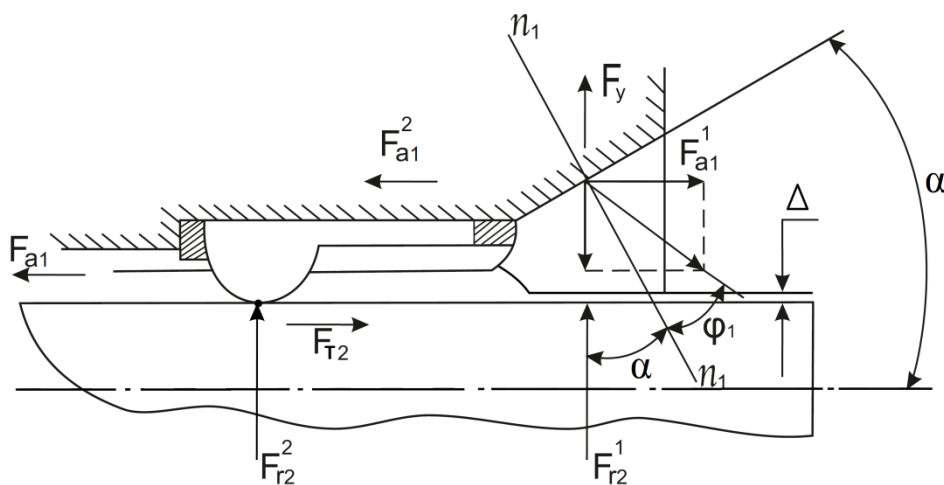


Рис. 4.32. Схема передачи сил в ЦПДЗ по патенту Украины №80489

## Выводы

1. При теоретическом исследовании силовых характеристик высокоскоростных ИЗП с цилиндрическим (хромосома-наследник ( $F_{r1} - SR - F_{r2}$ )) и коническим (хромосома-наследник ( $F_{r1} - WD - F_{r2}$ )) цельным упругим ЗЭ последний рассматривается как толстостенный цилиндр под давлением, а

его упругие перемещения определяются согласно задачи Ляме. Для данных ИЗП выведены значения статических и динамических радиальных сил зажима  $F_{r2}$  и  $F_{r2\omega}$  моментов  $M$  и  $M(\omega)$ , а также коэффициентов усиления.

2. Предложена аналитическая зависимость критических частот вращения ИЗП с упругой втулкой (см. п.1 выводов), при которых давление в месте контакта ЗЭ и ОЗ (инструмента) равно нулю с учетом натяга системы.

3. Установлено существенное влияние соотношения зазора-натяга в ИЗП с цельным упругим элементом и соотношения жесткости подсистем «ЗЭ-ОЗ» и «ЗЭ-ЗП», причем чем выше жесткость со стороны корпуса ЗП, тем меньше влияние центробежных сил неуравновешенных частей, а следовательно, меньше потеря радиальной силы зажима  $F_{r2\omega}$ .

4. Теоретические исследования силовых характеристик широкодиапазонных эксцентриковых ИЗП, реализующих генетическое алгоритмы скрещивания и кроссинговера, показали появление новых свойств согласно принципа энерджентности, а именно повышение широкодиапазонности и быстроходности вращения, что позволяет использовать такие ИЗП для высокоскоростной обработки.

5. Показана связь генетического описания зажимных патронов с построением их структурно-функциональных схем и переход к анализу их силовых характеристик для разных силовых потоков и их количества, а частности, входов.

6. Выполнены теоретические исследования синтезированного цангового патрона с двойным зажимом, в котором в качестве дополнительных ЗЭ использованы упругие гофрированные элементы, испытывающие продольно-поперечный изгиб при передаче входного усилия  $F_{a1}$  от основных ЗЭ к дополнительным.

7. Приведена морфологическая модель для зажимных патронов двойного зажима, согласно которой при различном соединении двух входов на хромосомном уровне возможно 192 вариантов наиболее работоспособными 12 вариантов.

## РАЗДЕЛ 5

### Теоретические исследования жесткостных характеристик известных и синтезированных зажимных патронов в системе шпиндельного узла

#### 5.1. Основные соображения по приведению жесткости системы “патрон-объект зажима” для различных конструкций зажимных патронов

В работах Ю.Н. Кузнецова и его учеников при расчёте жёсткости системы “патрон-деталь” для прутковых автоматов [36, 111, 155, 216, 249, 289] предложено в продольном направлении систему приводить к балке с местом закрепления в виде упруго-фрикционного шарнира, характеризуемого радиальной  $C_P$ , поворотной  $C_{\Pi}$ , осевой  $C_O$  жёсткостями и моментом трения  $M_T$  в условном шарнире. В поперечном направлении Ю.Н. Кузнецов предложил при действии крутящих моментов от резания рассматривать место закрепления как упруго-фрикционную подвеску [111], характеризуемую радиальной  $C_P$ , крутильной  $C_K$  жесткостями и моментом сопротивления  $M_C$  от сил трения. В основном такой метод приведения для дальнейших расчётов жесткости, точности и динамических параметров ЗМ и шпиндельного узла (ШУ) приводит к удобным и простым преобразованиям с учетом податливостей тел и стыков в системе “патрон-деталь”, что было показано на цанговых патронах одинарного и двойного зажима [111, 249], а для других видов зажимных патронов и оправок были сформулированы только тенденции, представлены модели и основные соображения [107-111, 225], куда не попали ЗП с другими преобразователями силовых потоков и силовых контуров. Это ограничило возможности отбора лучших решений при синтезе различных ЗП на стадии их синтеза.

Для приведении в общем случае жёсткости системы “зажимной патрон-объект зажима” ( $ЗП - ОЗ$ ), а иногда “оправка-инструментальный зажимной патрон - инструмент” ( $О - ИЗП - И$ ) необходимо расчеты выполнить в 3 этапа:

1 – составить реальную схему взаимодействия всех элементов ЗП и его взаимодействия с ОЗ, используя знания в области сопротивления материалов и контактных упруго-пластических деформаций с учётом действия внешних нагрузок со стороны резания (рабочей зоны) и привода зажима (источника энергии); 2 – определить все составляющие линейных и угловых деформаций тел и стыков между ними; 3 – с учётом переноса сил и моментов к месту закрепления определить приведенные к месту закрепления (заделки ОЗ) приведенные жесткости, моменты трения и сопротивления.

В общем случае жёсткость системы ЗП – ОЗ и (О – ИЗП – И) определяется податливостью тел звеньев  $\Delta_T$ , контактной податливостью стыков  $\delta_K$  и конструктивных зазоров  $\Delta_3$  в подвижных звеньях, что на определенном вылете нагружения при действии силы  $F_P$  приводит к суммарному радиальному отжатию  $y$ , представляющему нелинейную зависимость (рис. 5.1), так как после выборки зазоров при сравнительно коротких деталях ЗП, находящихся в натянутом состоянии, основными являются контактные сближения (деформации) [111, 114, 149, 150, 220].

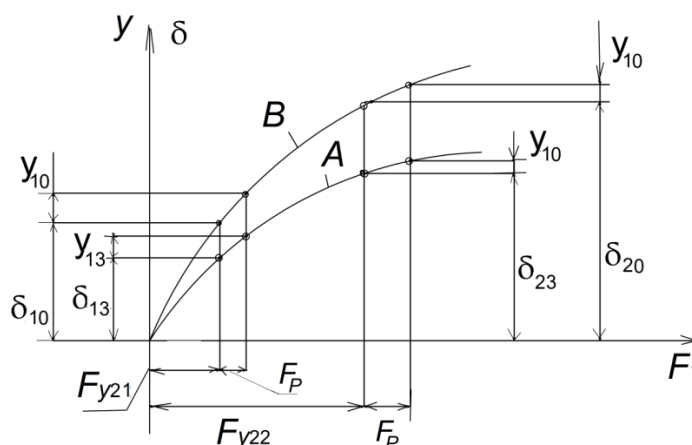


Рис.5.1. Типовые графики зависимости отжатий ОЗ ( $y$ ) и контактных сближений в системе ЗП – ОЗ ( $\delta$ ) от сил зажима  $F_{y2}$  и радиальной нагрузки  $F_P$  для замкнутых силовых контуров: А – закрытого; В – открытого

Из рис. 5.1 видно, что с увеличением силы зажима от  $F_{y21}$  до  $F_{y22}$  податливость системы ЗП – ОЗ независимо от вида силового контура уменьшается ( $y_{23} < y_{13}$ ,  $y_{20} < y_{10}$ ) при одной и той же силе резания  $F_P$ . Это





Отсюда

$$\delta = \frac{A_M \cdot F_{y2}^{0,5}}{\pi \cdot d \cdot b}. \quad (5.2)$$

При резании в месте зажима происходит перераспределение эпюры давления и радиального натяга (рис. 5.3, б) на кромках ЗЭ в точках А и В возникают реакции  $R_A$  и  $R_B$  при повороте балки на упругом основании на угол  $\vartheta$ . Используя принципа суперпозиции, суммарное радиальная деформация ОЗ (инструмента) в месте приложения силы резания  $F_p$  (рис. 5.3, в):

$$y = y_F + y_M + y_{\text{и}}, \quad (5.3)$$

где  $y_F$  – деформация от радиального контактного смещения при переносе силы  $F_p$  в центр базы зажима (точку  $O$ );  $y_M$  – деформация от поворота балки на упругом основании на угол  $\vartheta$  при действии момента сил резания  $M_p = F_p \cdot L$ ;  $y_{\text{и}}$  – деформация консольного хвостовика инструмента при условии абсолютно жёсткой заделки в точке  $O$ .

Выражение (5.3) можно записать как

$$y = \delta_p + \vartheta \cdot L + \frac{F_p L^3}{3EI}, \quad (5.4)$$

где  $E$  и  $J = \frac{\pi d^2}{64}$  – модуль упругости и момент инерции поперечного сечения хвостовика инструмента.

Значения  $\delta_F$  и  $\vartheta$  можно определить по формулам [150, 235]:

$$\delta_F = \frac{2\beta F_p k}{B} (1 + \beta L); \quad (5.5)$$

$$\vartheta = \frac{2\beta^2 F_p k}{B} (1 + 2\beta L), \quad (5.6)$$

где  $\beta = 10 \cdot \sqrt[4]{\frac{4}{d^3 E k (1 - \alpha_d^4)}}$  – показатель жёсткости стыка;  $B = \frac{\pi d}{4}$  –

приведенная ширина упругого основания;  $\alpha_d = \frac{d_B}{d}$  – коэффициент, учитывающий внутренний диаметр пустотелого хвостовика при  $d_B = 0$  для сплошного хвостовика  $\alpha_d = 0$ ;

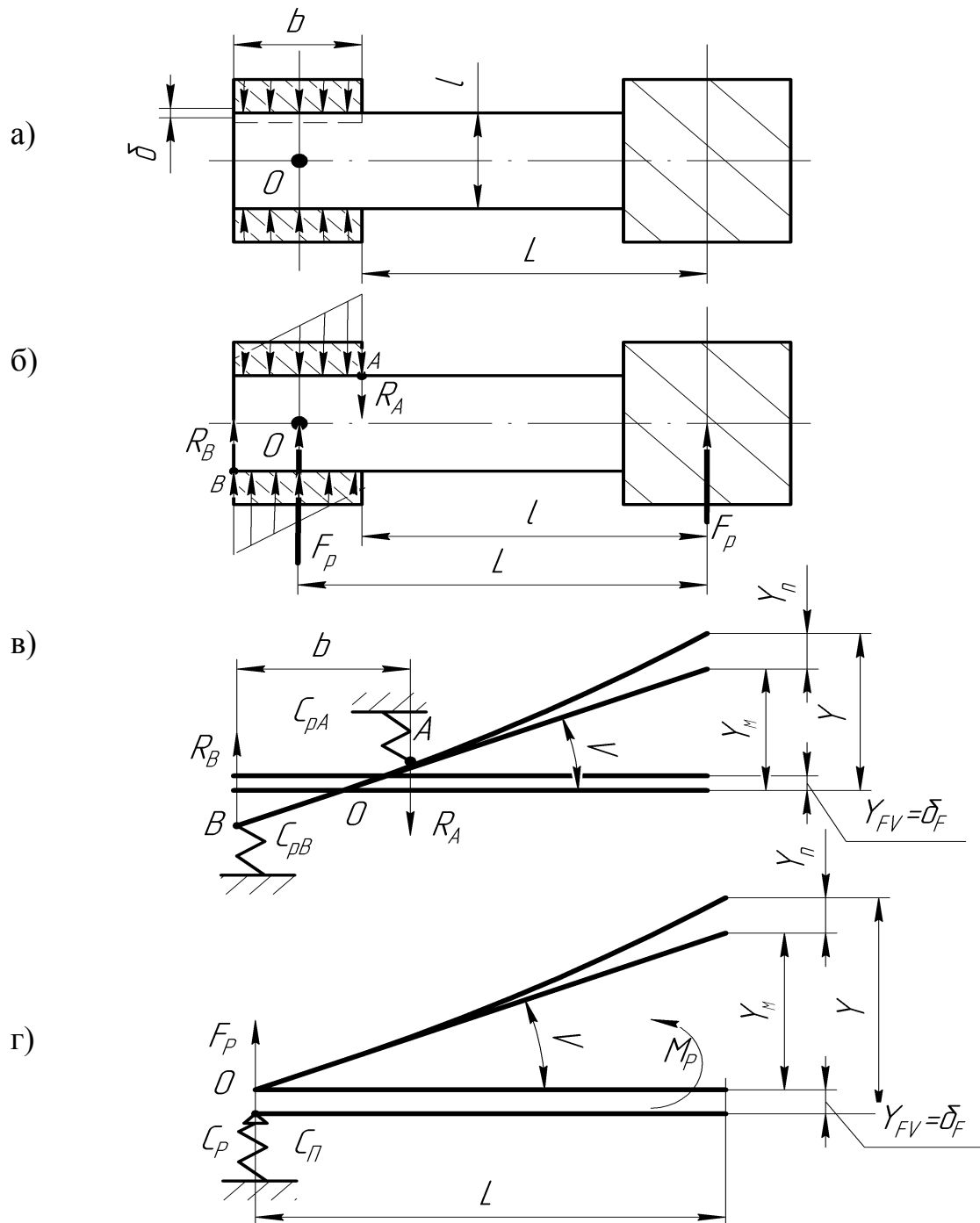


Рис. 5.3. Расчётные схемы (а-в) для приведения к упругому шарниру (г) системы ЗП-ОЗ

Для упрощения расчётов можно принимать линейную зависимость отжатий от нагрузки, а не так как показано на рис. 5.1, считая жёсткость стыка постоянной. В этом случае, можно принять допущение, что  $C_{PA} = C_{PB} = C_P$ , а упругие перемещения находить для балки на упругих опорах  $A$  и  $B$ , в которых действуют реакции от силы  $F_P$ , равные

$$R_A = F_P \frac{l+b}{l}; \quad (5.7)$$

$$R_B = F_P \frac{l}{b}. \quad (5.8)$$

При точных расчётах следует использовать формулы (5.5) и (5.6), в которых коэффициент контактной податливости  $k$  в зависимости от изменения силы зажима определяется по формуле:

$$k = \frac{\Delta\delta_F \cdot B \cdot b}{F_P}, \quad (5.9)$$

где  $\Delta\delta_F$  – дополнительные контактные сближения [111], возникающие при приложении силы  $F_P$  и заданной силе зажима  $F_{y2}$ ; в этом случае

$$\Delta\delta_F = \delta_F(F_{y2} + F_P) - \delta_F(F_{y2}), \quad (5.10)$$

где  $\delta_F(F_{y2} + F_P)$  и  $\delta_F(F_{y2})$  – контактные сближения в стыке ЗЭ – ОЗ при действии сил  $F_{y2}$  и  $F_{y2} + F_P$ .

В результате приведенных рассуждений и преобразований удобно пользоваться в дальнейших статических и динамических расчётах приведенной моделью (рис. 5.3, г), согласно которой формула (5.4) преобразуется в следующую:

$$y = \frac{F_P}{C_P} + \frac{M_P}{C_{\Pi}} \cdot L + \frac{F_P L^3}{3EI} \quad (5.11)$$

или

$$y = \frac{F_P}{C_P} + \frac{F_P \cdot L}{C_{\Pi}} + \frac{F_P L^3}{3EI}. \quad (5.12)$$

где  $\frac{F_P}{C_P} = \delta_P$ ,  $\frac{F_P L}{C_{\Pi}} = \vartheta$ .

**Случай 2.** Зажим инструмента с коническим хвостовиком в ШУ станка согласно генетической формулы (см. п. 3.2) (рис. 5.4):

$$F_{x1} - WD - F_{y2} - CN.$$

Согласно [235] конический хвостовок инструмента с углом  $2\alpha$  ( $\alpha$  – половина угла конуса) можно рассматривать как консольную балку на упругом основании. Диаметр соединения меняется по длине, поэтому жёсткость

хвостовика  $EJ_x$ , приведенная ширина  $B_x$  упругого основания также переменны по длине:

$$D_x = D(1 - \frac{2\alpha_x}{D}); EJ_x = \frac{E\pi D_x^4}{64}; B_x = \frac{\pi D_x}{4},$$

где  $D$  – больший диаметр соединения;  $D_x$  – диаметр в сечении на расстоянии  $x$  от кромки стыка. При полном контакте в коническом сопряженном дифференциальное уравнение упругой линии следующее:

$$\frac{d^2}{dx^2} (EJ_x \cdot \frac{d^2 y}{dx^2}) + \frac{D_x}{k} y = 0, \quad (5.13)$$

где  $y$  – прогиб в сечении с координатой  $X$ .

Граничные условия:

$$\text{при } X = 0 \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_P}{EJ}; \quad \frac{d^3 y}{dx^3} = \frac{F_P}{EJ};$$

$$\text{при } X = l \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = 0; \quad \frac{d^3 y}{dx^3} = 0,$$

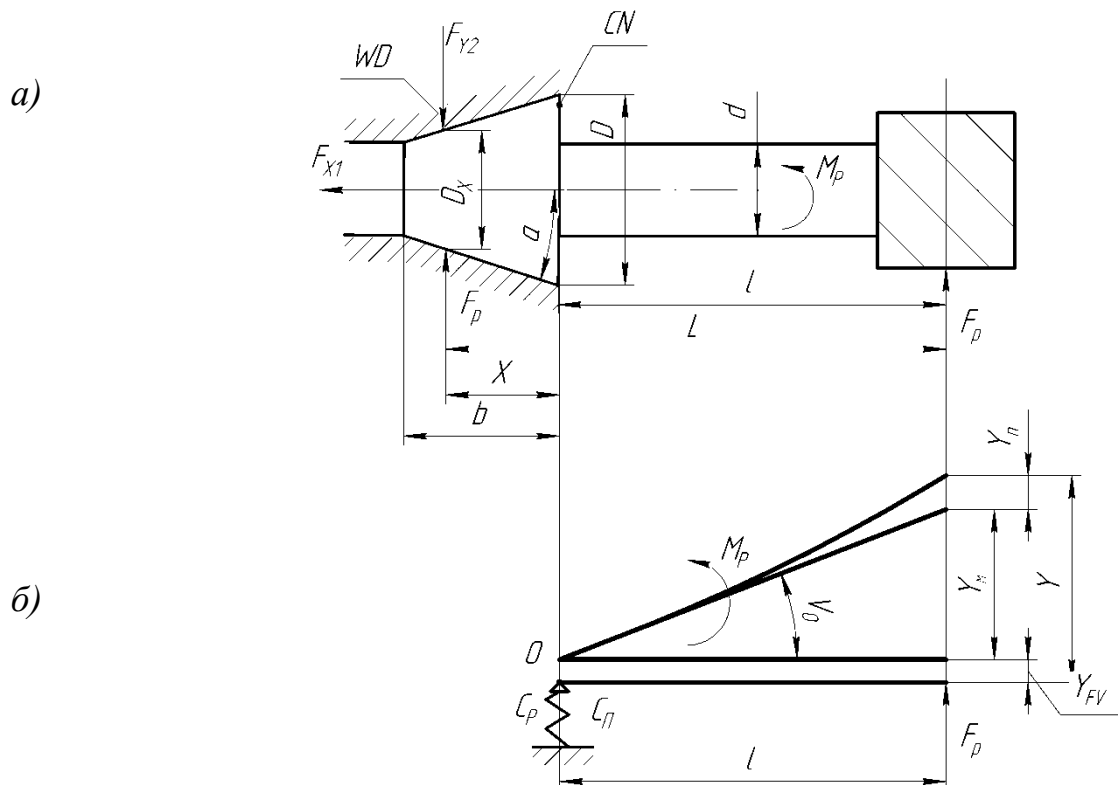


Рис. 5.4. Схема действия сил в зажатой оправке с коническим хвостовиком (а) с приведением к упругому шарниру (б)

где  $M_P = F_P \cdot l$  и  $F_P$  – момент к перерезывающая сила в начале конического стыка.

Упругое перемещение  $\delta_O$  и угол наклона  $\vartheta_O$  в начале стыка:

$$\delta_O = \frac{2F_P\beta^2k}{B}(\beta lc_1 + c_2). \quad (5.14)$$

$$\vartheta_O = \frac{2F_P\beta^2k}{B}(2\beta lc_3 + c_4). \quad (5.15)$$

Согласно [149, 150, 235] принимаем коэффициенты для самотормозящего конуса Морзе равными  $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 1$ , для несамотормозящего конуса 7:24 в зависимости от  $\lambda = \beta \cdot b$  (от 1,5 до 4)  $c_1 = c_2 = c_4 = 2,3 \div 1,3$ ;  $c_3 = 1,7 \div 1$ .

Коэффициент контактной податливости аналогично формуле (5.9) будет:

$$k = \frac{\Delta\delta_O \cdot B \cdot b}{F_P}, \quad (5.16)$$

где

$$\Delta\delta_O = \delta_O(F_{y2} + F_P) - \delta_O(F_{y2}) \quad (5.17)$$

Схема (рис. 5.4) тоже приводится к упругому шарниру ( $C_P$ ,  $C_{II}$ ) (рис. 4.31, 2), где

$$y = y_F + y_M + y_{II} = \delta_O + \vartheta_O \cdot l + y_{II} \quad (5.18)$$

или

$$y = \frac{F_P}{C_P} + \frac{F_P \cdot l^2}{C_{II}} + \frac{F_P l^3}{3EJ}. \quad (5.19)$$

**Случай 3.** Зажим в ШУ конической оправки с цанговым патроном (рис. 5.5), что соответствует двум параллельно действующим независимым силовым потокам, один из которых имеет генетическую формулу  $F_{x11} - WD - F_{y21} - CN$ , а другой  $F_{x12} - WD - F_{y22} - CL$ .

Для определения упругих перемещений в месте приложения силы  $F_P$  воспользуемся методом суперпозиции [235], считая что: 1. Зажимной патрон с инструментом представляет абсолютно жёсткую систему как продолжение оправки (рис. 5.6, а), которая в месте закрепления в шпинделе с коническим отверстием представляет упругий шарнир (рис. 5.4);

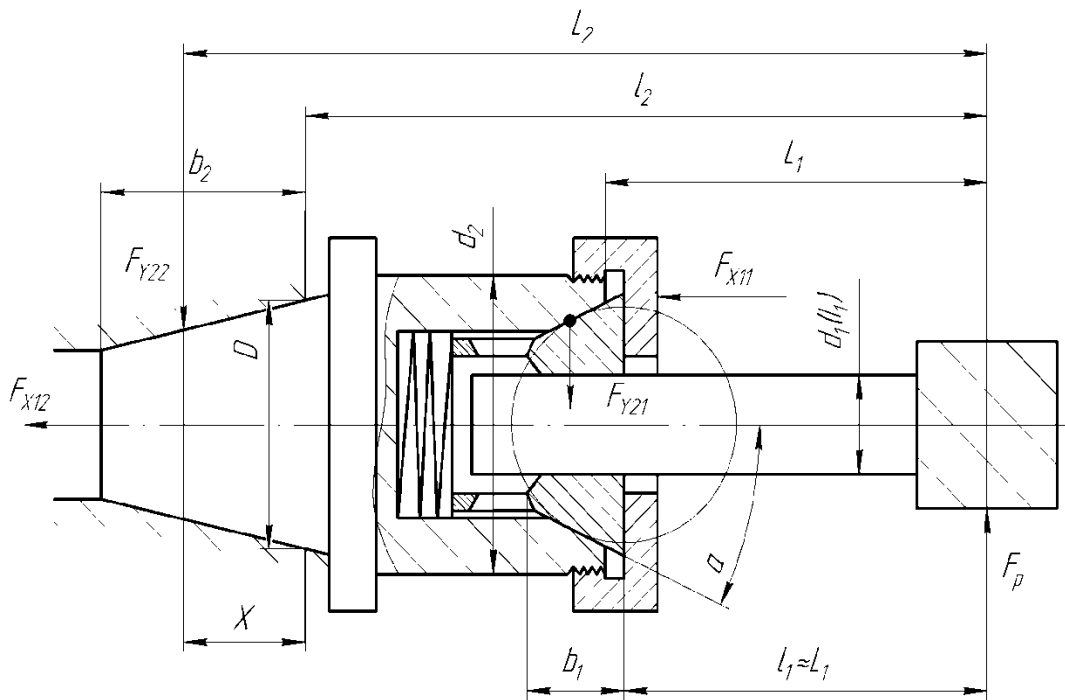


Рис. 5.5. Схема действия сил в зажатой оправке в шпиндельном узле с цанговым ИЗП

2. Оправка абсолютно жёсткая, а система “зажимной патрон – инструмент” в месте закрепления инструмента представляем податливую балку с заделкой в виде упруго-фрикционного шарнира (рис. 5.6, б).

Для схемы (рис. 5.6, а) отжатия в месте действия силы  $F_P$  будут:

$$y_2 = y_{F2} + y_{M2}, \quad (5.20)$$

где  $y_{F2}$  – упругое перемещение, определяемое аналогично формуле (5.14), а при приведении

$$y_{F2} = \frac{F_P}{C_P}, \quad (5.21)$$

$y_{M2} = \vartheta_2 \cdot L_2$  – упругое перемещение от упругого поворота оправки на угол  $\vartheta_2$ , определяемый аналогично формуле (5.15), а при приведении

$$y_{M2} = \frac{M_{P2}}{C_{П2}} = \frac{F_P \cdot L_2^2}{C_{П2}}. \quad (5.22)$$

Подставив (5.21) (5.22) в (5.20), получим

$$y_2 = \frac{F_P}{C_P} + \frac{F_P \cdot L_2^2}{C_{П2}}. \quad (5.23)$$

Для схемы (рис. 5.6, б) отжатия в месте действия силы  $F_P$  будут:

$$y_1 = y_{F1} + y_{M1} + y_{\text{и}}, \quad (5.24)$$

где  $y_{F1}$  – радиальное отжатие от силы  $F_P$ ;  $y_{M1}$  отжатие от проворота на угол  $\vartheta_1 = \frac{M_{P1} - M_{T1}}{C_{\Pi 1}}$ ;  $y_{\text{и}}$  – отжатие самого инструмента, как консольной балки с абсолютно жёсткой заделкой.

После преобразований получим

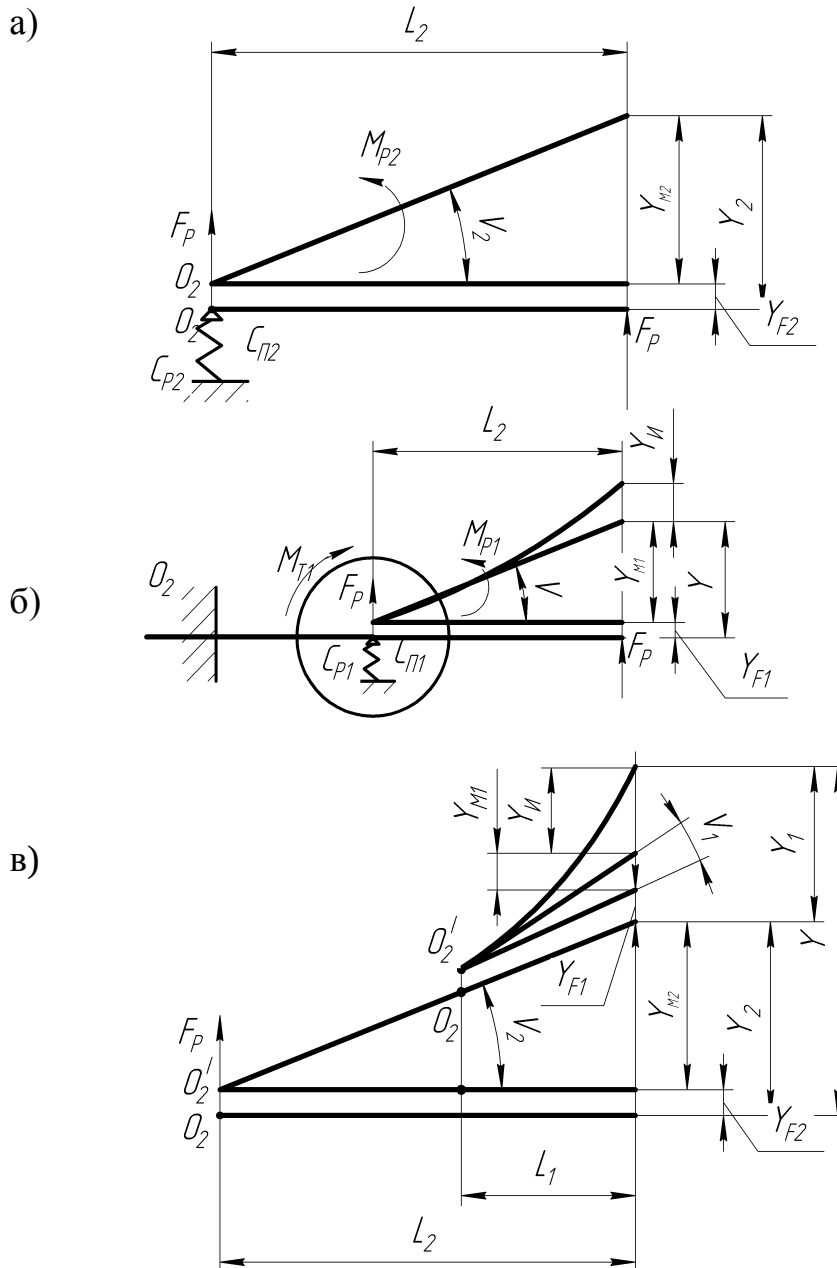


Рис. 5.6. Расчётные схемы для определения статической жесткости системы инструмент-цанговый патрон – оправка методом суперпозиции

где  $y_{F1}$  – радиальное отжатие от силы  $F_P$ ;  $y_{M1}$  отжатие от проворота на угол  $\vartheta_1 = \frac{M_{P1}-M_{T1}}{C_{П1}}$ ;  $y_{И}$  – отжатие самого инструмента, как консольной балки с абсолютно жёсткой заделкой.

После преобразований получим

$$y = \frac{F_P}{C_{P1}} + \frac{M_{P1}-M_{T1}}{C_{П1}} \cdot L_1 + \frac{F_P \cdot L_1^3}{3EJ}, \quad (5.25)$$

где  $M_{P1} = F_P \cdot L_1$ ;  $M_{T1} \cong F_{y21} \cdot f \cdot R_{Ш1}$ ; – момент трения в упруго-фрикционном шарнире-конического соединения губок цанги и отверстия шпинделя с половиной угла конуса  $\alpha$  (от  $10^\circ$  до  $20^\circ$ );  $f$  – коэффициент трения в коническом соединении, равный  $\arctg \varphi$  ( $\varphi$  – угол трения);  $R_{Ш1}$  – радиус условного шарнира при взаимодействии посередине губки цанги (определяется по конструктивным параметрам цангового патрона);  $F_{y21} = F_{x11} \cdot K_{П}$  ( $F_{x11}$  – осевая сила от привода зажима;  $K_{П}$  – коэффициент усиления патрона).

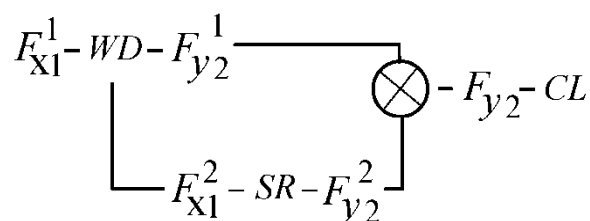
Таким образом суммарное отжатие

$$y = y_1 + y_2 = \frac{F_P}{C_{P1}} + \frac{M_{P1}-M_{T1}}{C_{П1}} \cdot L_1 + \frac{F_P \cdot L_1^3}{3EJ_1} + \frac{F_P}{C_{P2}} + \frac{F_P \cdot L_2}{C_{П2}} \quad (5.26)$$

или

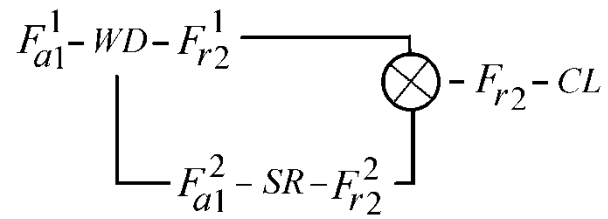
$$y = F_P \left( \frac{1}{C_{P1}} + \frac{1}{C_{P2}} + \frac{L_1^2}{C_{П1}} + \frac{L_2^2}{C_{П2}} + \frac{L_1^3}{3EJ_1} \right) - F_{y21} \cdot \frac{f \cdot R_{Ш1} L_1}{C_{П1}} \quad (5.27)$$

**Случай 4.** Зажим в цанговом патроне двойного зажима (ЦПДЗ) по патенту Украины №80489 с последовательно-параллельным соединением (рис. 5.7) двух входов 1 ( $F_{a1}^1$ ) и 2( $F_{a1}^2$ ) и двумя выходами – передним зажимом губками цанги ( $F_{r2}^1$ ) и дополнительным зажимом упругими элементами ( $F_{r2}^2$ ), что соответствует варианту входа силовых потоков  $F_{a1}^1 \wedge \vee F_{a1}^2$  (см. табл.4.3) и описывается генетической формулой в декартовой системе координат





или в цилиндрической системе координат



Расчётная схема данного ЦПДЗ приведена на рис. 5.7.

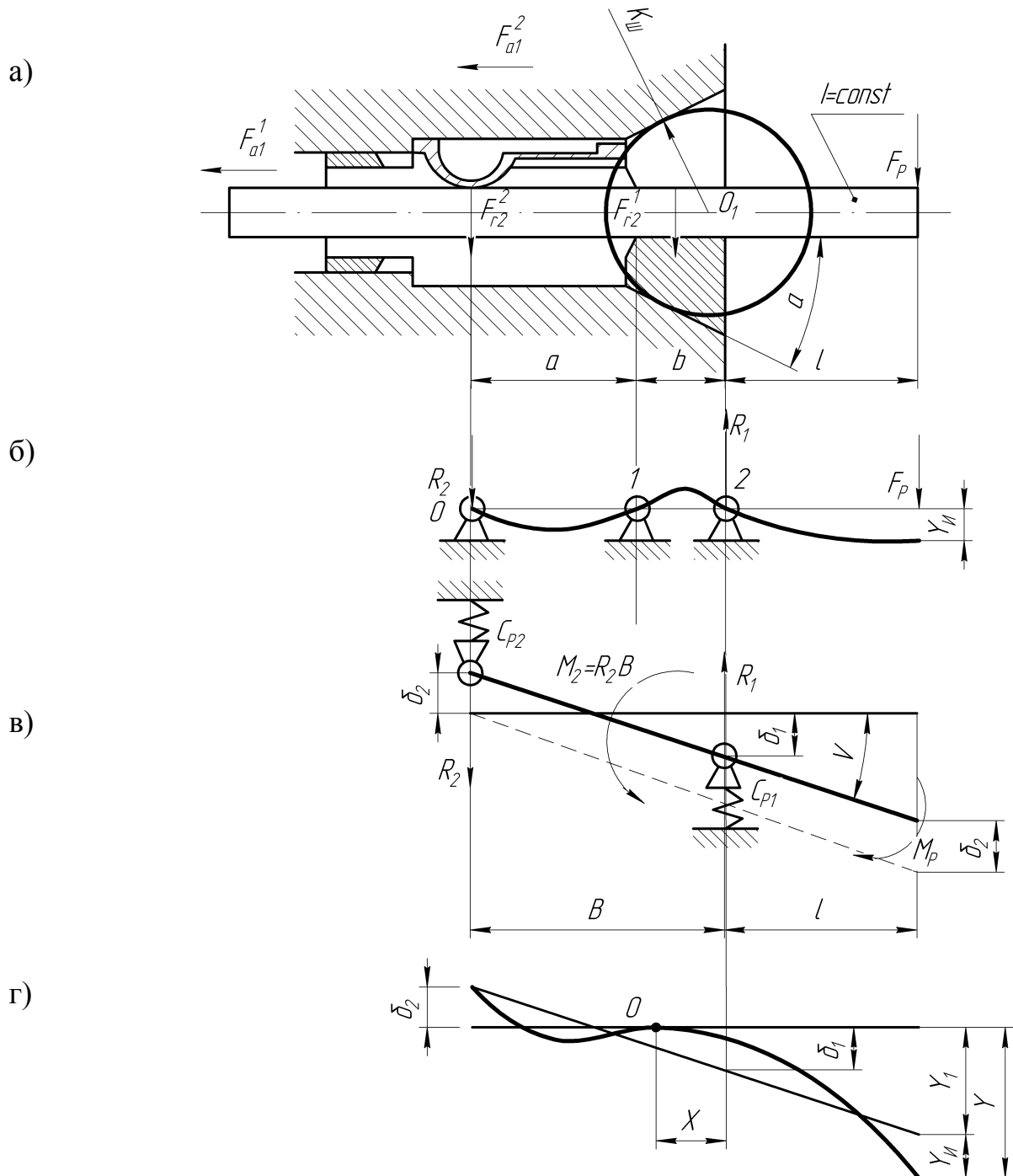


Рис. 5.7. Расчётные схемы сил и упругих отжятий в ЦПДЗ

Используя метод суперпозиции рассмотрим упругие отжатия в месте приложения силы  $F_p$  на вылете  $l$ , состоящие из двух составляющих: 1)  $y_u$  – при условии, что три опоры абсолютно жёсткие, а пруток деформируемый (рис. 5.7, б); 2)  $y_1$  – при условии, что пруток абсолютно жёсткий, а опоры податливые (рис. 5.7, в).

Составляющая  $y_u$  может быть найдена для статически неопределимой балки с помощью уравнения трёх моментов [235] при переносе силы  $F_p$  (рис. 5.8, а) к опоре 2 заменой на момент  $M = F_p \cdot l$  (рис. 5.8, б). В общем виде уравнение:

$$\begin{aligned} M_{n-1} \cdot l_n + 2M_n(l_n + l_{n+1}) + M_{n+1} \cdot l_{n+1} = \\ = -6 \left( \frac{\omega_n a_n}{l_n} + \frac{\omega_{n+1} b_{n+1}}{l_{n+1}} \right) \end{aligned} \quad (5.28)$$

При  $n = 1$  (один раз статически неопределима балка)

$$M_0 \cdot l_1 + 2M_1(l_1 + l_2) + M_2 \cdot l_2 = -6 \left( \frac{\omega_1 a_1}{l_1} + \frac{\omega_2 b_2}{l_2} \right) \quad (5.29)$$

В нашем случае  $M_0 = 0$ ,  $M_2 = F_p \cdot l$ , площади эпюр нагрузок  $\omega_1 = 0$ ,  $\omega_2 = 0$ ,  $l_1 = a$ ,  $l_2 = b$ .

Тогда уравнения (5.29) примет вид:

$$2M_1(a + b) - F_p \cdot l \cdot b = 0 \quad (5.30)$$

Отсюда

$$M_1 = \frac{F_p \cdot l \cdot b}{2(a+b)}. \quad (5.31)$$

Применяя способ Верещагина и полагая, что на протяжении каждого пролета балка имеет постоянное сечение, получим перемещение

$$y_u = \delta = \frac{1}{EJ} (\omega_1 \overline{M_{c1}} + \omega_2 \overline{M_{c2}} + \omega_3 \overline{M_{c3}} + \omega_4 \overline{M_{c4}}). \quad (5.32)$$

На рис. 5.8, в обозначены через  $C_1 - C_4$  соответственно центры тяжести эпюр моментов, а на рис. 5.8, г через  $\overline{M_{c1}} - \overline{M_{c4}}$  – величины единичных моментов в местах центров тяжести соответственно  $C_1 - C_4$ .

Отжатие  $y_1$  определяется по ранее изложенным соображениям.

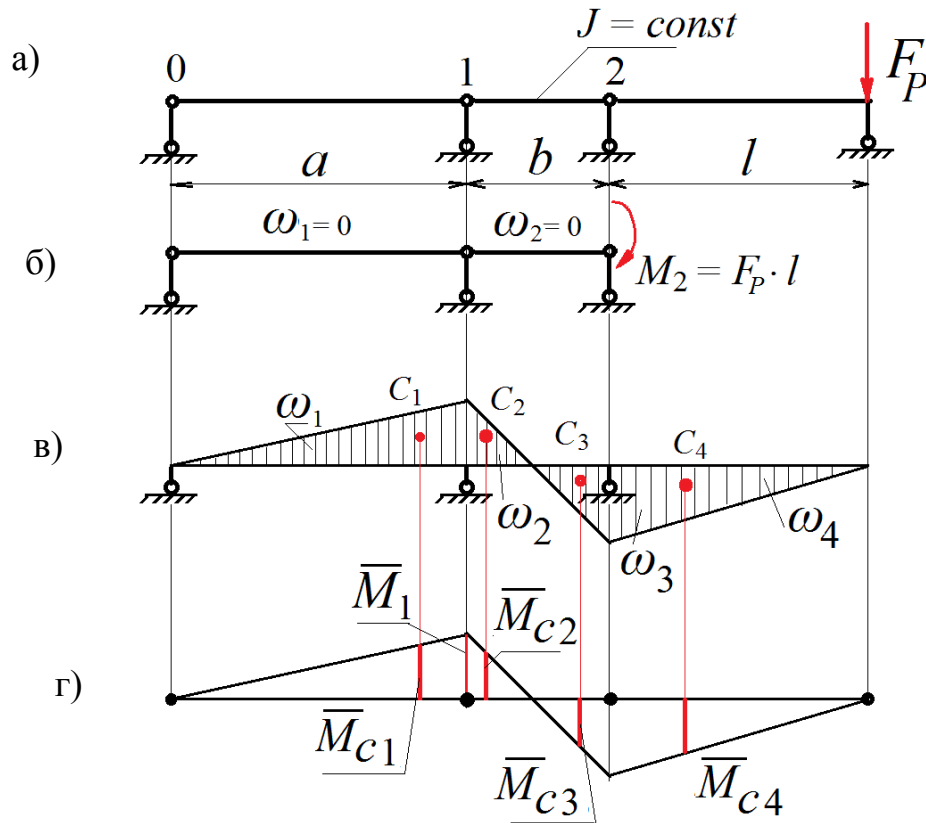


Рис. 5.8. Расчётные схемы (а, б) и эпюры моментов (в, г)

**Случай 5.** Зажим штучной цилиндрической заготовки (CL) в рычажно-кулачковом патроне (рис. 5.9, а) согласно генетической формулы в декартовой системе координат  $F_{x1} - LV - F_{y1} - PL - F_{y2} - CL$ .

В месте контакта ЗЭ с заготовкой рассматриваем контактную жёсткость на основе теории балок на упругом основании аналогично случаю 1 (рис. 5.9, б) по преобразованным формулам (5.5) и (5.6):

$$y_P = \delta = \frac{2\beta \cdot k \cdot F_P}{B} (1 + \beta \cdot b) \quad (5.33)$$

$$y_M = \vartheta_1 \cdot l = \frac{2\beta^2 \cdot F_P \cdot k \cdot l}{B} (1 + 2\beta \cdot b) \quad (5.34)$$

Тогда

$$y_1 = y_P + y_M + y_{\text{и}} = \frac{2\beta \cdot F_k \cdot K}{B} = [1 + \beta(b + l) + 2\beta^2 b] + \frac{F_k \cdot l^3}{3E \cdot J} \quad (5.35)$$



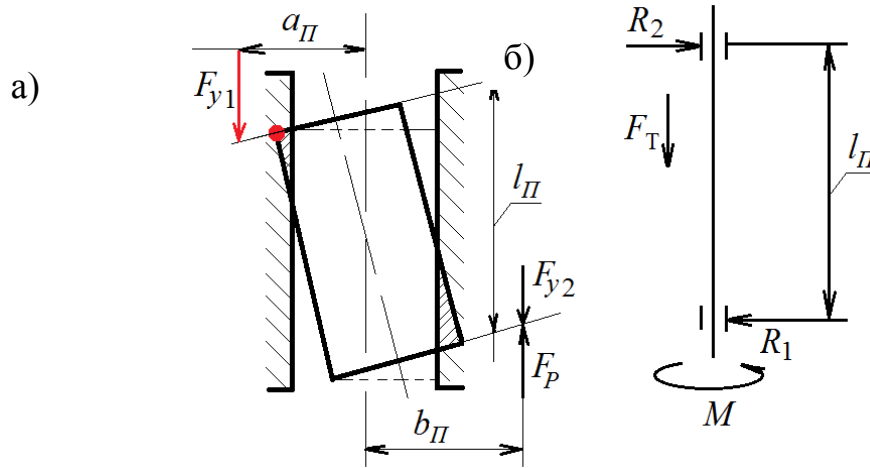


Рис. 5.10. Схема действия сил в ползуне

От момента  $M$  происходит поворот ползуна на угол  $\vartheta_2$  с выборкой зазора  $\Delta$  и натяга с контактными упругими перемещениями

$$\vartheta_2 = \vartheta_0 + \vartheta_k = \frac{\Delta}{l_{II}} + \frac{4\beta^3 \cdot k \cdot M}{B} \quad (5.36)$$

На вылете  $L + b_{II}$  от центра поворота (рис. 5.9, в) получим упругое отжатие в месте приложения силы  $F_p$

$$y_2 = \vartheta_2(L + b_{II}) = \frac{\Delta}{l_{II}} + \frac{4\beta^3 \cdot k \cdot M}{B}. \quad (5.37)$$

Для приведения к упруго-фрикционному шарниру (рис. 5.9, г) находим радиальную жёсткость

$$C_P = \frac{F_P}{y_P} = \frac{F_P \cdot B}{2\beta \cdot k \cdot F_P(1 + \beta \cdot b)} = \frac{B}{2\beta \cdot k(1 + \beta \cdot b)} \quad (5.38)$$

и поворотную жёсткость

$$C_{II} = \frac{M_P - M_T}{\vartheta_1 + \vartheta_2}, \quad (5.39)$$

где  $M_P = F_P \cdot l$  – момент от силы резания;  $M_T = F_T \cdot R_{III} = \frac{F_T \cdot d}{2}$  – момент

трения в условном шарнире;  $F_T = (R_1 + R_2)\mu$  – сила трения в направляющих ползуна;  $\mu$  – коэффициент трения (сцепления). Силы  $R_1$  и  $R_2$  находятся из условия равновесия ползуна (рис. 5.10, б) [187].

## 5.2. Влияние случайных факторов на жёсткостные характеристики зажимных патронов с различными силовыми потоками

Наиболее характерным и обобщенным случаем приведения системы “зажимной патрон-объект зажима” (ЗП – ОЗ) к упруго-фрикционному шарниру с учетом разброса параметров  $C_P$ ,  $C_{\Pi}$ ,  $M_T$  являются цанговые патроны одинарного зажима (рис. 5.11) [111]. Согласно рис. 5.11 математическое ожидание суммарных отжатий консольного ОЗ на вылете  $l$  действия силы  $F_P$ :

$$\bar{y}_{\Sigma} = \bar{y}_F + \bar{y}_M + y_{\text{и}} = \frac{F_P}{\bar{C}_P} + \frac{\bar{M}_P - \bar{M}_T}{\bar{C}_{\Pi}} \cdot l + \frac{F_P \cdot l}{3E \cdot J} \quad (5.40)$$

Поскольку отжатие  $\bar{y}_{\text{и}}$  при абсолютно жесткой заделке и постоянной силе  $F_P$  является величиной постоянной, то далее будут рассматривать (рис. 5.11, б):

$$\bar{y} = \bar{y}_F + \bar{y}_M = \frac{F_P}{\bar{C}_P} + \frac{\bar{M}_P - \bar{M}_T}{\bar{C}_{\Pi}} \cdot l, \quad (5.41)$$

где  $\bar{y}_F$  – математическое ожидание упругое отжатие в центре шарнира  $O$  при перенесении силы  $F_P$ ;  $\bar{y}_M$  – математическое ожидание упругого отжатия от поворота абсолютно жёсткого стержня – ОЗ на угол  $\vartheta$  при действии момента  $M_P$  и противодействия и противодействия момента трения  $\bar{M}_T$  в условном шарнире. При разбросе  $C_P$ ,  $C_{\Pi}$ ,  $M_T$  под действием влияния случайных факторов (характера контактного взаимодействия стыков с различной шероховатостью поверхностей, разброса сил трения и т.п.) и допущении, что изменяемые величины подчиняются закону нормального распределения Гаусса, будем иметь

$$C_P = \bar{C}_P \pm \Delta C_P, C_{\Pi} = \bar{C}_{\Pi} \pm \Delta C_{\Pi}, M_T = \bar{M}_T \pm \Delta M_T.$$

Поля рассеивания случайных величин будет соответственно:  $\Delta C_P = 3 \cdot \sigma_P$ ,  $\Delta C_{\Pi} = 3 \cdot \sigma_{\Pi}$ ,  $\Delta M_T = 3 \cdot \sigma_{M_T}$ .

Поле рассеяния упругого отжатия

$$\Delta y = y_{\max} + y_{\min}, \quad (5.42)$$

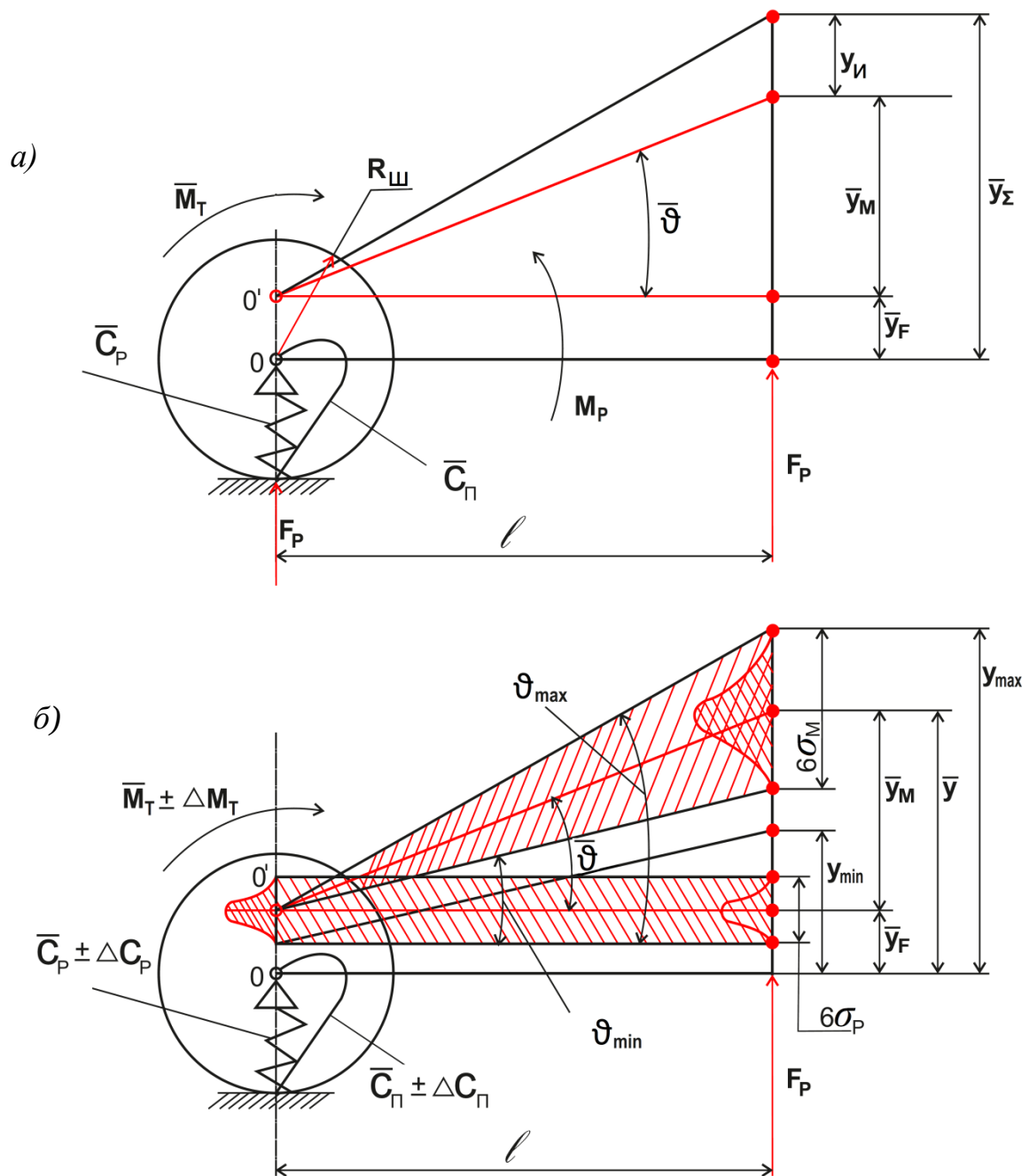


Рис. 5.11. Схема приведения системы 3П – ОЗ без учёта (а) и с учётом (б) разброса  $\bar{C}_P, \bar{C}_\Pi, \bar{M}_T$

где

$$y_{max} = \frac{F_P}{\bar{C}_P - 3 \cdot \sigma_P} + \frac{M_P - (\bar{M}_T - 3 \cdot \sigma_T)}{\bar{C}_\Pi - 3 \cdot \sigma_\Pi}; \quad (5.43)$$

$$y_{min} = \frac{F_P}{\bar{C}_P + 3 \cdot \sigma_P} + \frac{M_P - (\bar{M}_T + 3 \cdot \sigma_T)}{\bar{C}_\Pi + 3 \cdot \sigma_\Pi}; \quad (5.44)$$

После подстановки (5.43) и (5.44) в (5.42) и преобразований получим

$$\Delta y = F_P \frac{6 \cdot \sigma_P}{\bar{C}_P^2 - 9 \cdot \sigma_P^2} - \frac{6 \cdot (\sigma_{\Pi} \cdot M_P - \sigma_{\Pi} \cdot \bar{M}_T + 3 \cdot \sigma_{\Pi} \cdot \sigma_T)}{\bar{C}_{\Pi}^2 - 9 \cdot \sigma_{\Pi}^2} =$$

$$= 6 \cdot \left[ \frac{F_P \cdot \sigma_P}{\bar{C}_P^2 - 9 \cdot \sigma_P^2} - \frac{\sigma_{\Pi} \cdot (M_P - \bar{M}_T) + 3 \cdot \sigma_{\Pi} \cdot \sigma_T}{\bar{C}_{\Pi}^2 - 9 \cdot \sigma_{\Pi}^2} \right]. \quad (5.45)$$

При выполнении расчетов радиальной жесткости системы ЗП – ОЗ на стадии проектирования, пользуясь полями рассеяния при независимых случайных величинах, можно для различных силовых потоков определять  $\bar{y}_{\Sigma}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\Delta y$  и учитывать конкретные конструкции, их конструктивные параметры, условия взаимодействия элементов системы ЗП – ОЗ.

### 5.3. Частота собственных колебаний системы “патрон-объект зажима” для зажимных патронов различных конструкций

Динамическая характеристика системы “зажимной патрон - объект зажима” (ЗП - ОЗ) во многом определяет процесс резания и такие выходные параметры как стойкость вращающегося режущего инструмента, как объект зажима (ОЗ) и количество обработанной поверхности ОЗ в виде прутка или штучной заготовки.

Стойкость инструмента зависит не только от амплитуды колебаний, но и частоты колебаний, возникающих при резании. Рядом экспериментальных исследований доказано [24, 220, 279], что так называемые “высокочастотные вибрации” при резании возбуждаются именно на частотах собственных колебаний ОЗ или близких к ним. До настоящего времени нет инженерных методов расчёта частот собственных колебаний систем ЗП – ОЗ, которые бы обеспечивали приемлемую точность.

Применение известных формул теории упругости к теории колебаний для консольно закрепленных ОЗ (инструмента или детали) цилиндрической формы, дает ошибку в 2 ... 3 раза в сторону завышения частот, так как не учитывают особенностей граничных условий в месте закрепления ОЗ в зажимном патроне, а также изменение уравнения упругой линии при изгибе.

Рассмотрим случай закрепления инструмента (фрезы) в цанговом



зажимном патроне с генетической формулой (рис. 5.12, а)

$$F_{x1} - WD - F_{y2} - CL.$$

При анализе были приняты следующие допущения, соответствующие большинству встречающихся на производстве цилиндрических фрез: фрезы представляет собой стержень круглого сечения; сечение фрезы постоянное по всей длине; масса фрезы равномерно распределено по её длине; фреза не вращается.

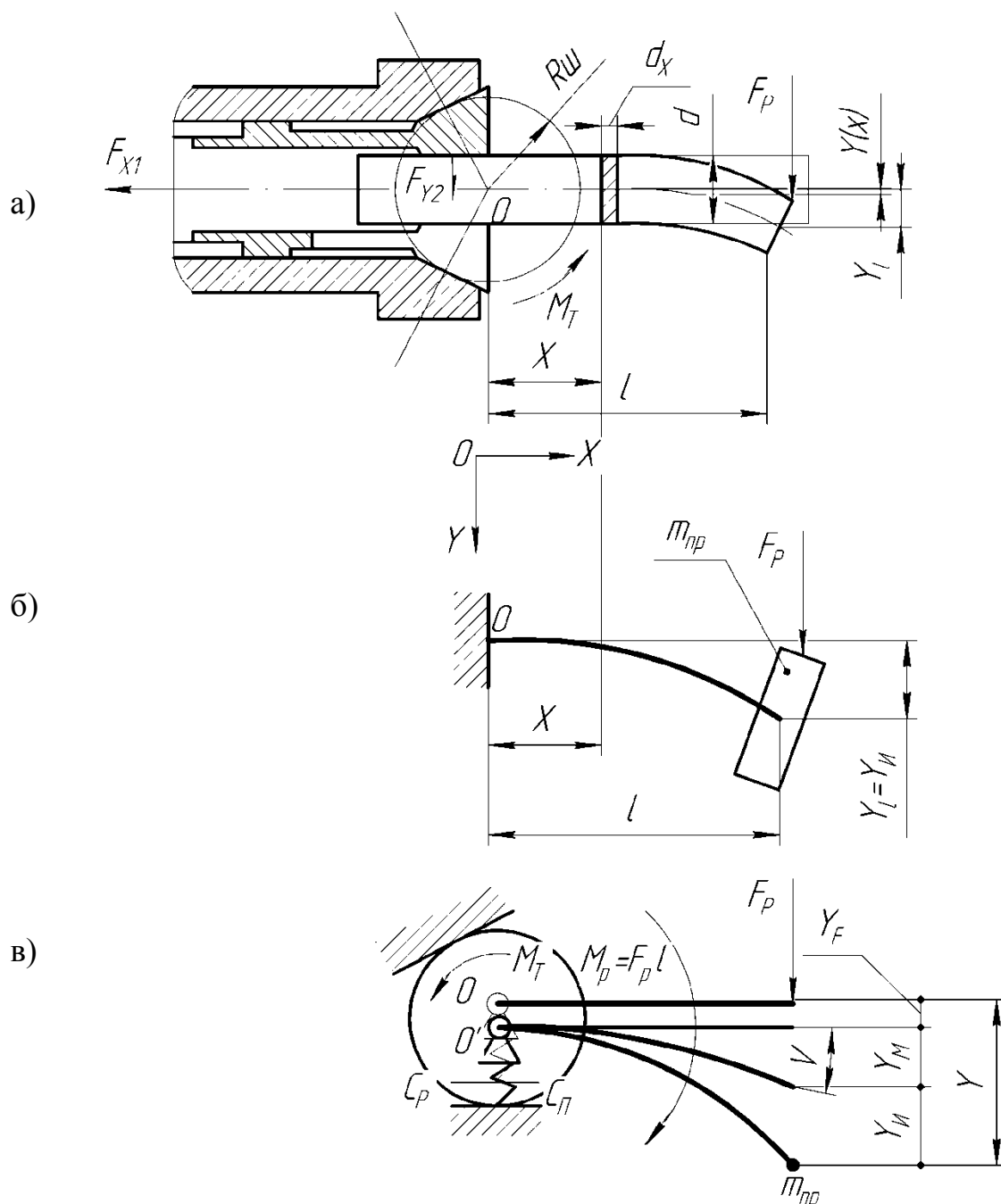


Рис. 5.12. Схемы перехода от реальной системы “фреза-цанговый патрон” (а) к одно-массовой динамической модели с абсолютно жёсткой консольной заделкой (б) и податливой заделкой в виде упруго-фрикционного шарнира (в)

Уточненная теория С.П. Тимошенко [247] изгибных колебаний стержней рассматривает нагруженное состояние, когда масштаб изменения напряжённо деформированного состояния вдоль оси стержня велик по сравнению с характерным размером поперечного сечения. В этом случае следует учитывать поперечные сдвиги и инерцию поворота сечений. Это теория строится на предположениях, что сечения остаются плоскими, но не перпендикулярными деформированной оси стержня, и нормальные напряжения на площадках, параллельных оси, равны нулю.

Свободные колебания стержня постоянного поперечного сечения по С.П.Тимошенко описываются следующим уравнением:

$$EJ \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - \rho J \left( 1 + \frac{E}{\alpha \cdot G} - \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \cdot \partial t^2} + \rho S \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\rho^2 J}{\alpha \cdot G} \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} \right) = 0, \quad (5.46)$$

где  $y$  – прогиб стержня;  $\rho$  – плотность;  $x$  – координата точки вдоль оси стержня;  $E$  – модуль упругости при растяжении-сжатии;  $G$  – модуль упругости при сдвиге;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $J$  – момент инерции;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от характера распределения сдвигов по сечению и определения среднего значения для угла сдвига ( $\alpha$  – для круглого сечения);  $t$  – время.

Использование уравнения (5.46) требует знания и умения решения уравнений в частных производных, либо использование компьютерных программ для численного решения в конкретных условиях. Вместе с тем, возникает проблема граничных условий, которая принимается по рекомендации некоторых исследователей, как классическая жёсткая заделка. Тем самым полагают в месте зажима цилиндрического хвостовика фрезы равенство нулю вертикального перемещения фрезы и отсутствие угла поворота его сечения.

#### **Вариант 1 (рис. 5.12, б)**

Теоретический анализ колебаний зажатой фрезы значительно упрощается, если рассматривать только форму колебаний, соответствующую первой гармонике спектра собственных колебаний. Такой подход оправдан тем, что второй гармонике соответствует форма колебаний, при которой свободный

конец фрезы, то есть место фрезерования не имеет перемещений, а собственная частота колебаний на третьей гармонике почти в 62 раза превышает частоту колебаний на первой гармонике и стандартной аппаратурой для измерения вибраций не фиксируется [162].

Для расчёта деформаций и частот колебаний системы “фреза – цанговый патрон” представим статическую и динамическую модели в виде упругого безынерционного стержня с сосредоточенной массой на свободном конце. Адекватность моделей и реального объекта обеспечивается тем, что параметры уравнения изогнутой оси при изгибе стержня рассчитываются по теории упругости, а приведенная масса фрезы – из условия равенства кинематической энергии при колебаниях объекта и модели.

Как известно, упругая линия изгиба стержня, жёстко заделанного с одной стороной, при приложении силы к свободному концу рассчитывается по следующей формуле теории упругости [235]:

$$y_i = F_P l \cdot x_i^2 \left(3 - \frac{x_i}{l}\right) \frac{1}{6EJ}, \quad (5.47)$$

где  $l$  – длина свободного конца фрезы;  $x_i$  – расстояние  $i$ -го сечения от заделки;  $y_i$  – перемещение  $i$ -го сечения в направлении оси  $Y$ ;  $F_P$  – сила, приложенная к концу стержня;  $E$  – модуль упругости материала стержня;  $J$  – момент инерции сечения стержня.

В соответствии с принятыми допущениями, при рассмотрении первой гармоники колебаний фрезы, то есть формы колебаний, соответствующей упругой линии при статическом нагружении (а именно на этой гармонике наблюдаются наибольшие амплитуды относительных колебаний, влияющих на стойкость фрезы), можно показать, что динамическую систему фрезы можно привести к одно массовой модели. Заменяем реальную фрезу с равномерно распределённой по длине массой расчётной одно массовой системой в виде невесомой упругой балки с сосредоточенной приведённой массой  $m_{пр}$  на её конце (рис. 5.12, б).

Длина расчётной балки и её жёсткость равны длине и жёсткости реальной фрезы. Положим, что уравнение упругой линии фрезы известно:

$$y = f(x), \quad (5.48)$$

где  $y$  – перемещение сечения державки при изгиб;  $x$  – расстояние этого сечения от края заделки.

Рассчитываем приведённую массу фрезы из условия равенства кинетических энергий в колебательном движении реальной фрезы и расчётной модели:

$$\frac{m_{\text{пр}} \cdot \dot{y}_{\text{И}}^2}{2} = \int_0^l \frac{S \cdot \gamma \cdot \dot{y}_{\text{И}}^2(x) \cdot dx}{2} \quad (5.49)$$

где  $m_{\text{пр}}$  – приведённая масса фрезы;  $\dot{y}_{\text{И}}$  – скорость крайней точки фрезы при колебаниях;  $S$  – площадь сечения хвостовика фрезы, равная  $\frac{\pi \cdot d^2}{4}$ ;  $\gamma$  – плотность материала фрезы;  $\dot{y}(x)$  – скорость участка  $dx$  в колебательном процессе.

Так как частоты собственных колебаний реальной фрезы и расчётной системы по условию равны, можно записать для амплитудных значений скорости:

$$\dot{y}(x)^2 = y(x)^2 \omega_0^2 \quad \text{и} \quad \dot{y}_{\text{И}}^2 = y_{\text{И}}^2 \omega_0^2 \quad (5.50)$$

Подставляя (5.50) в (5.49) и заменяя интегрирование суммированием по малым участкам  $\Delta X$ , после соответствующих преобразований получим

$$m_{\text{пр}} = \int_0^l \frac{S \cdot \gamma \cdot \dot{y}_{\text{И}}^2(x) \cdot dx}{y_{\text{И}}^2} = m \cdot \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{y_{\text{И}}^2} \cdot n, \quad (5.51)$$

где  $y_i$  – перемещение середины  $i$ -го участка  $\Delta X$  сечения фрезы;  $n$  – число расчетных участков фрезы ( $n = l / \Delta X$ ).

После преобразований (подстановки в (5.51) выражения для  $y(x)$  и  $y_i$  из (5.47) получим

$$m_{\text{пр}} = \frac{m}{4l^3} \int_0^l \left( 3x^2 - \frac{x^3}{l} \right)^2 \cdot dx \quad (5.52)$$

После интегрирования получим

$$m_{\text{пр}} = 0,2357 \cdot m \quad (5.53)$$

Используя известное выражение [162] для расчёта частоты собственных колебаний для одностепенной системы с линейной жёсткостью, можно записать:

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m_{\text{пр}}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EJ}{l^3 \cdot 0,2357 \cdot m}} = \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3E \cdot \pi \cdot d^4}{l^3 \cdot 0,2357 \cdot 64 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot l \cdot \gamma}} = \frac{0,14 \cdot d}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\gamma}}. \end{aligned} \quad (5.54)$$

где  $C$  – жёсткость консольной части фрезы в Н/м, равная  $\frac{3E \cdot J}{l^3}$ ; ( $d$  и  $l$  в мм)

Подставляя в (5.54) соответствующие модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^6$  кг/мм<sup>2</sup> и плотность  $\gamma = 7,8 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup> для стали, получаем следующее выражение:

$$f_0 = 5,12 \cdot 10^5 \cdot \frac{d}{l^2} \quad (5.55)$$

Полученное выражение для расчёта частоты первой гармоники собственных поперечных колебаний цилиндрического хвостовика фрезы более удобно для пользования, чем приводимые в литературе, и значения частот отличаются от теоретических только в четвёртом знаке. Однако, как отмечалось выше, формулой (5.54) можно пользоваться только для фрез с большим вылетом, но и при таких условиях полученные значения собственных частот будут завышенным, так как игнорируются контактная деформации между хвостовиком и губками зажимного цангового патрона.

Результаты анализа варианта 1 (рис. 5.12, а) наиболее близки для ИЗП с цельным упругим цилиндрическим (рис. 5.2 и 5.3) и коническим (см. рис. 4.10) зажимным элементом, у которых замкнутый силовой контур, высокие значения  $C_p$  и  $C_{\text{п}}$ . Для цанговых ЗП необходимо учитывать дополнительные контактные сближения в радиальном направлении и угловые смещения разделённых

разрезами губок зажимной цанги (особенно при одинарном зажиме), что существенно уменьшает поворотную жесткость  $C_{\Pi}$ . (вариант 2, рис. 5.12, в).

### **Вариант 2 (рис. 5.12, в)**

Поэтому рассмотрим уточненную схему одномассовой динамической модели с учётом податливости системы цанговый патрон – инструмент, представленной в месте закрепления в виде упруго-фрикционного шарнира, характеризуемого радиальной жёсткостью  $C_P$ , поворотной жёсткостью  $C_{\Pi}$ , моментом трения  $M_T$  в условном шарнире, радиусом  $R_{\Pi}$  (рис. 5.12, в).

Существует много методов расчета частот собственных изгибных колебаний [25, 162]: общий классический и приближенные (энергетический метод Релея, дальнейшее развитие – метод Релея-Ритца, метод динамических жесткостей), однако их применение целесообразно для уже известных конструкций ЗП, когда известны их конструктивные параметры, действующие нагрузки и характеристики объекта зажима (ОЗ). На уровнях схемного синтеза при рассмотрении большого количества вариантов ЗП с различными силовыми потоками, силовыми контурами и преобразователями речь может идти только о приближенных методах и оценочных относительных величинах с большими допущениями.

Согласно известной зависимости

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{J_{\Pi}}{m}} \quad (5.56)$$

для ЗП с определенной генетической формулой должен быть свой динамический портрет, зависящий от изгибной жесткости  $J_{\Pi}$  системы «патро-объект зажима» и размеров ОЗ, определяющих его массу  $m$ , приведенную к месту приложения нагрузок в процессе резания, когда возникают вынужденные колебания.

Полученные в п. 5.1 значения радиальных отжатий  $Y$  могут быть подставлены в (5.56) при известной силе  $F_p$ , как

$$J_{\Pi} = \frac{F_p}{Y}. \quad (5.57)$$

Например, для цангового патрона без учета момента трения в условном шарнире (рис. 5.12, а):

$$Y=Y_c + Y_M+Y_{\text{И}} = F_p \left( \frac{1}{C_p} + \frac{l^2}{C_{\Pi}} + \frac{l^3}{3EI} \right). \quad (5.58)$$

Подставив (5.58) в (5.57) и преобразовав, получим

$$J_{\text{И}} = \frac{3EIC_p C_{\Pi}}{3EI(C_{\Pi}+C_p l^2)+C_p C_{\Pi} l^3} \quad (5.59)$$

Тогда частота собственных колебаний будет

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EIC_p C_{\Pi}}{[3EI(C_{\Pi}+C_p l^2)+C_p C_{\Pi} l^3]m}} \quad (5.60)$$

Радиальная жесткость  $C_p$  определяется контактными сближениями стыков, а поворотная жесткость  $C_{\Pi}$  контактными сближениями стыков и угловыми зазорами в подвижных соединениях элементов ЗП. Для упрощения расчетов по определению жесткости и частоты собственных колебаний ЗП с упругим (цилиндрическим или коническим) цельным 37 и цангой можно пренебречь при коротких вылетах ОЗ соизмеримых с базой зажима в (длиной втулки или губок цанги) (рис. 5.13):

$$Y = Y_c + Y_M,$$

$$\text{где } Y_c = \delta_0 = \frac{2F_p \beta k}{B} (1 - \beta L); \text{ (формула 5.5)}$$

$$Y_M = \vartheta_0 \cdot L = \frac{2F_p \beta^2 k}{B} (1 + 2 \cdot \beta \cdot L) \cdot L \quad (\vartheta_0 \text{ по формуле 5.6}).$$

После подстановки в (5.57) и преобразования получим

$$J_{\text{И}} = \frac{F}{\frac{2F_p \beta^2 k}{B} (1 + \beta \cdot L) + \frac{2F_p \beta^2 k}{B} (1 + 2 \cdot \beta \cdot L) \cdot L} = \frac{B}{2\beta k [(1 + \beta L) + \beta (1 + 2\beta L)L]}; \quad (5.61)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B}{2\beta k m [(1 + \beta L) + \beta (1 + 2\beta L)L]}}. \quad (5.62)$$

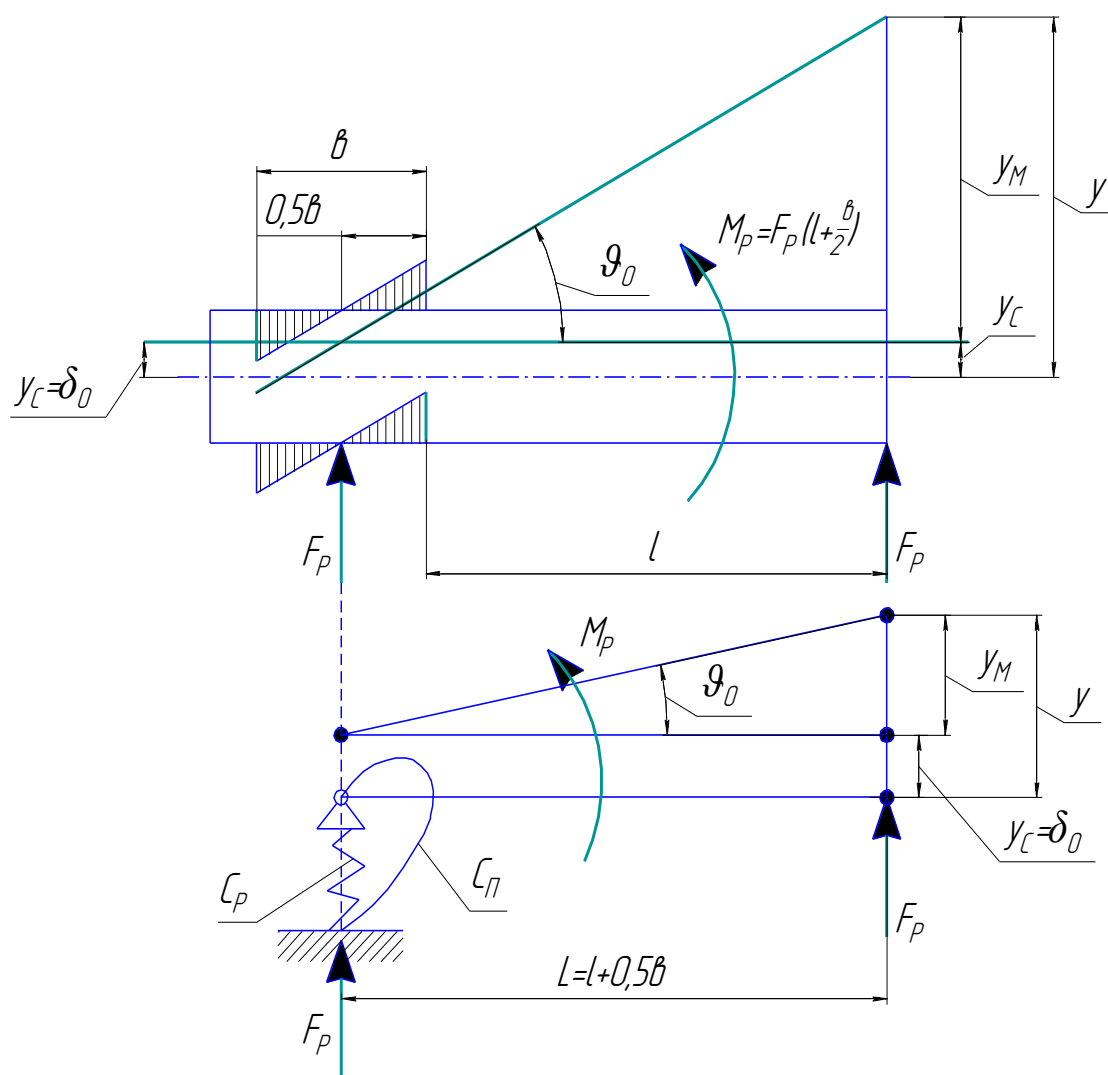


Рис. 5.13. Расчетная схема для приближенного определения изгибной жесткости  $J_M$  и частоты собственных колебаний  $f_0$  зажимного патрона

#### 5.4. Статическая жесткость синтезированных шпиндельных узлов с учетом податливости его элементов

Одним из основных направлений современного станкостроения является упрощение конструкции сложных обрабатывающих центров, уменьшения их габаритов и повышения точности обработки деталей. Этого можно достичь благодаря использованию новых конструкций ШУ типа «мотор-шпиндель», как основной структурной составляющей любого металлообрабатывающего станка.

Также в условиях современного станкостроения металлоёмкие станки теряют свою популярность и отходят на второй план. На их смену приходят станки ЧПУ, в том числе с параллельной кинематикой, в которых применяется



несущие системы каркасного типа и модульный принцип [4, 5, 99, 121]. На основе модульного принципа создано много компоновок, которые позволяют не только ускорить процесс изготовления, но и повысить ее технологичность. Такие станки состоят из самостоятельных функциональных единиц путем объединения их в единый комплекс с общей системой управления и контроля. К таким сборочным единицам относятся ШУ, к торцу шпинделей которых крепятся зажимные патроны или инструментальные оправки с режущим инструментом.

Разработка методов расчёта и оценки влияния конструктивно-технологических параметров на статические характеристики ШУ является актуальной проблемой при обеспечении качественных показателей функционирования станков.

К ШУ предъявляют следующие требования: 1. Точность вращения, измеряемая биением на переднем конце шпинделя в радиальном или осевом направлении; отклонение от идеального вращения является одной из основных причин погрешностей обработки. 2. Жёсткость ШУ, определяемая по упругим перемещениям переднего конца шпинделя и обусловлена податливостью собственно шпинделя, его опор и системы патрон-деталь (или инструмент). Радиальная и осевая жесткость ШУ существенно влияет на точность обработки. Допустимое радиальное перемещение переднего конца шпинделя под действием нагрузки не должно превышать  $1/3$  допуска на размер обрабатываемой на станке детали.

Уже известно много разновидностей конструктивных исполнений ШУ, в частности, мотор-шпинделей. Их разнообразие продолжает расти достаточно быстро.

Конструкции ШУ зависят от конфигурации обрабатываемой детали, построения технологического процесса обработки и компоновки станка. Эти особенности ШУ и повышенные технологические требования к ним обуславливают сложность проектирования и многообразие инженерных

расчетов, при этом используются, сложность дальнейшего изготовления и монтажа.

Для расширения функциональных возможностей подвижных ШУ на кафедре конструирования станков и машин ведутся работы по созданию и исследованию мотор-шпинделей, с координатой  $Z$ , то есть самодействующих мотор-шпинделей. В состав мотор-шпинделя входит асинхронный или частотно-регулируемый асинхронный электродвигатель, ротор которого закреплен на шпинделе между передней и задней опорой. В мотор-шпинделях, предназначенных для работы в широком диапазоне частот вращения, вал двигателя может быть связан механическими передачами, например в виде планетарного редуктора. Мотор-шпиндель в комплекте с электронным преобразователем частот вращения представляет собой унифицированный электропривод главного движения.

Такой ШУ содержит привод главного движения, состоящий из шпинделя 1 (рис. 5.14) на опорах – передней 2 и задней 3 [130, 330]. На конце шпинделя 1 расположен патрон или оправка 4 из закрепленным инструментом 5 шпиндель 1 расположенных внутри пиноли 6, которая при перемещениях вдоль оси шпинделя по координате  $Z$  удерживается от проворачивания шпонкой 7, скользящей по продольному пазу “а” в корпусе 8. Слева с пинолью 6 жёстко связан фланец 9, в котором расположена гайка 10, взаимодействующая с винтом 11. Свободный конец винта 11 расположен в отверстии “в” шпинделя 1, что уменьшает осевые габариты ШУ. С другой стороны корпуса 8 выполнен переходный фланец 14, который с помощью болтов 15 жёстко связан с корпусом 8. Внутри переходного фланца 14 размещена опора 16 для винта 11 к его торцу прикреплен привод подачи пиноли, например, в виде шагового электродвигателя 17, дискретные обороты которого с помощью системы ЧПУ превращаются через винтовую пару 10, 16 в поступательное движение пиноли 6 с подачей  $S$ . Вращение шпинделя 1 с частотой  $n$  осуществляется за счёт электромагнитного поля между неподвижным статором 18, жёстко

соединенным с пинолью 6, и подвижным ротором с двухслойной активной поверхностью 19, жестко соединенной со шпинделем 1.

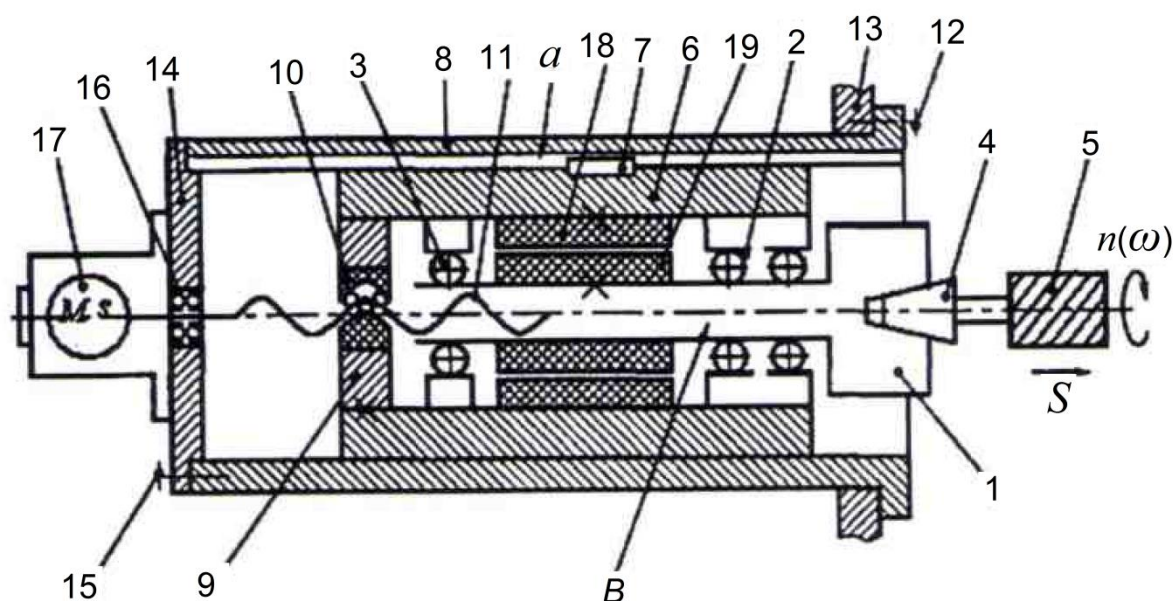


Рис. 5.14. Принципиальная кинематическая схема шпиндельного узла фланцевого типа с самодействующим мотор-шпинделем

Корпус 8 оснащен фланцем, который с помощью болтов 12 жестко связан с неподвижной частью 13 станка традиционной компоновки или подвижной платформой станка с механизмом параллельной структуры.

Исследования синтезированного ШУ выполнены в сравнении с традиционным. Для этого рассмотрены 5 схем:

1 – не самодействующий мотор-шпиндель с податливыми опорами без учета податливости системы ЗП – ОЗ (рис. 5.15, а);

2, 3 – самодействующий мотор-шпиндель в двух крайних положениях пиноли с её податливостью без учёта податливости системы ЗП – ОЗ (рис. 5.15, б, в);

4, 5 – самодействующий мотор-шпиндель в двух крайних положениях пиноли с её податливостью и податливостью системы ЗП – ОЗ (рис. 5.16, а, б).

Для схемы 1 радиальное перемещение шпинделя в заданном сечении (рис. 5.15, а):

$$Y_{и1} = Y_1 + Y_2 \quad (5.63)$$

где  $Y_1$  – перемещение, вызванное изгибом телом шпинделя;  $Y_2$  – перемещение, вызванное податливостью опор.

Величина  $Y_1$  равна

$$Y_1 = \frac{Pa^2}{3E} \left[ \frac{a}{J_2} + \frac{l(1-\xi)}{J_1} \right], \quad (5.64)$$

где  $F_p$  – сила, действующая на шпиндель,  $a$  – расстояние от переднего торца до середины передней опоры,  $l$  – расстояние между серединами передней и задней опоры,  $E$  – модуль упругости материала,  $J_2$  и  $J_1$  – осевые моменты инерции сечения шпинделя соответственно на консольной части и между опорами,  $\xi$  – коэффициент, учитывающий наличие в передней опоре момента, который ущемляет, если в ней расположено несколько рядов тел качения.

Реакции опоры от силы  $F_p$ :  $R_A = F_p \cdot \frac{a+l_p+l}{a+l_p}$ ;  $R_B = F_p \cdot \frac{l}{a+l_p}$

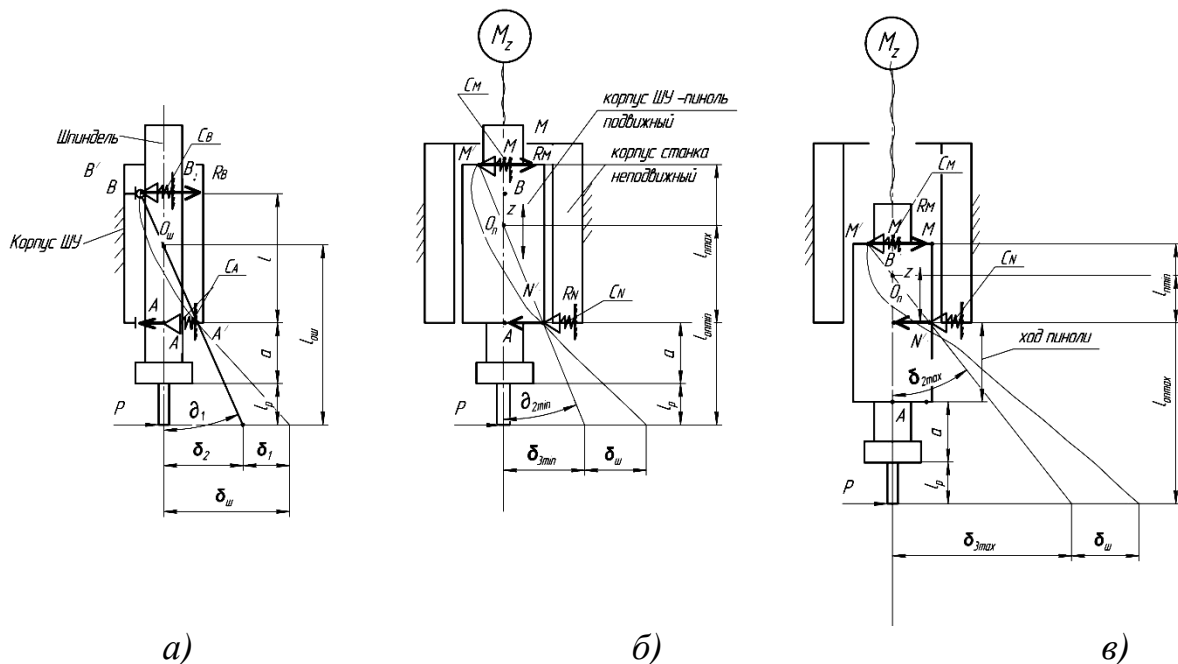


Рис. 5.15. Расчётная схема упругих перемещений шпиндельного узла без координаты  $Z$  (а) и с координатой  $Z$  (б, в) в крайних положениях без учета податливости зажимного патрона

Радиальное отжатие (или перемещение) в местах опор (точки  $A$  и  $B$ )

определяется по формулам:  $\delta_A = \frac{R_A}{C_A}$ ;  $\delta_B = \frac{R_B}{C_B}$ .

Определим длину хода пиноли:

$$AO = \frac{\delta_A}{\delta_A + \delta_B} \cdot l, \quad l_{OIII} = AO + a + l_p$$

Угол поворота пиноли  $\vartheta_2$ :

$$\operatorname{tg} \vartheta_2 \approx \vartheta_2 = \frac{\delta_A + \delta_B}{l}. \quad (5.65)$$

Перемещение, вызванное податливостью опор:

$$\delta_2 = l_{OIII} \cdot \operatorname{tg} \vartheta_2 \quad (5.66)$$

Для схемы 2 (рис.5.15, б), реакции в опорах от силы  $F_1$ :

$$R_N = P_p \frac{a + l_p + l_{nmax}}{a + l_p}; \quad R_M = F_p \cdot \frac{l_{nmax}}{a + l_p}$$

Радиальное отжатие (или перемещение) в опорах (точки  $N$  и  $M$ ) определяется

по формулам:  $\delta_N = \frac{R_N}{C_N}; \quad \delta_M = \frac{R_M}{C_M}.$

Определение длины хода пиноли:  $ON = \frac{\delta_N}{\delta_N + \delta_M} \cdot l_n \quad l_{on min} = ON + a + l_p.$

Минимальный угол поворота пиноли:

$$\vartheta_{2min} = \frac{\delta_N + \delta_M}{l_n}. \quad (5.66)$$

Перемещение, вызванное податливостью опор:

$$\delta_{3min} = l_{on min} \cdot \vartheta_{2min} \quad (5.67)$$

Радиальное перемещение шпинделя в заданном сечении:

$$Y_{IImin} = \delta_{III} + \delta_{3min} \quad (5.68)$$

Для схемы 3 (рис. 5.15, в), реакции в опорах от силы  $F_P$ :

$$R_N = F_P \frac{l_{n max}}{0,5l_{n max}}; \quad R_M = F_P \cdot \frac{0,5l_{n max} + l_{n max}}{0,5l_{n max}}$$

Определение длины хода пиноли:

$$NA = \frac{\delta_N}{\delta_N + \delta_M} \cdot 0,5l_{n max}, \quad l_{On max} + O_n N = NA + a + l_p + 0,5l_{min}$$

Минимальный угол поворота пиноли:

$$\vartheta_{2max} = \frac{\delta_N + \delta_M}{l_{min}}. \quad (5.69)$$

Перемещение, вызванное податливостью опор:

$$Y_{2max} = (l_{On max} + O_n N) \cdot \vartheta_{2max}. \quad (5.70)$$

Радиальное перемещение шпинделя в заданном сечении:

$$Y_{II\max} = Y_{\text{ш}} + Y_{2\max}. \quad (5.71)$$

При расположении подвижного корпуса ШУ (пиноли) в неподвижном корпусе возникают дополнительные радиальные перемещения конца шпинделя в месте действия силы  $F_p$ , которые изменяются в зависимости от положения шпинделя-пиноли (рис. 5.16) и податливости инструмента в патроне, рассматриваемого в виде условного упруго-фрикционного шарнира (см п.5.1). Во всех схемах всегда присутствует податливость системы патрон-инструмент, но они не были учтены в схемах 1 – 3, что сделано в схемах 4, 5 (рис. 5.16).

Отжатие в системе патрон-инструмент (П-Д) для схемы 4 (рис. 5.16. а, б)

$$Y_{\Sigma} = Y_p + Y_{\text{п}} + Y_u; \quad (5.72)$$

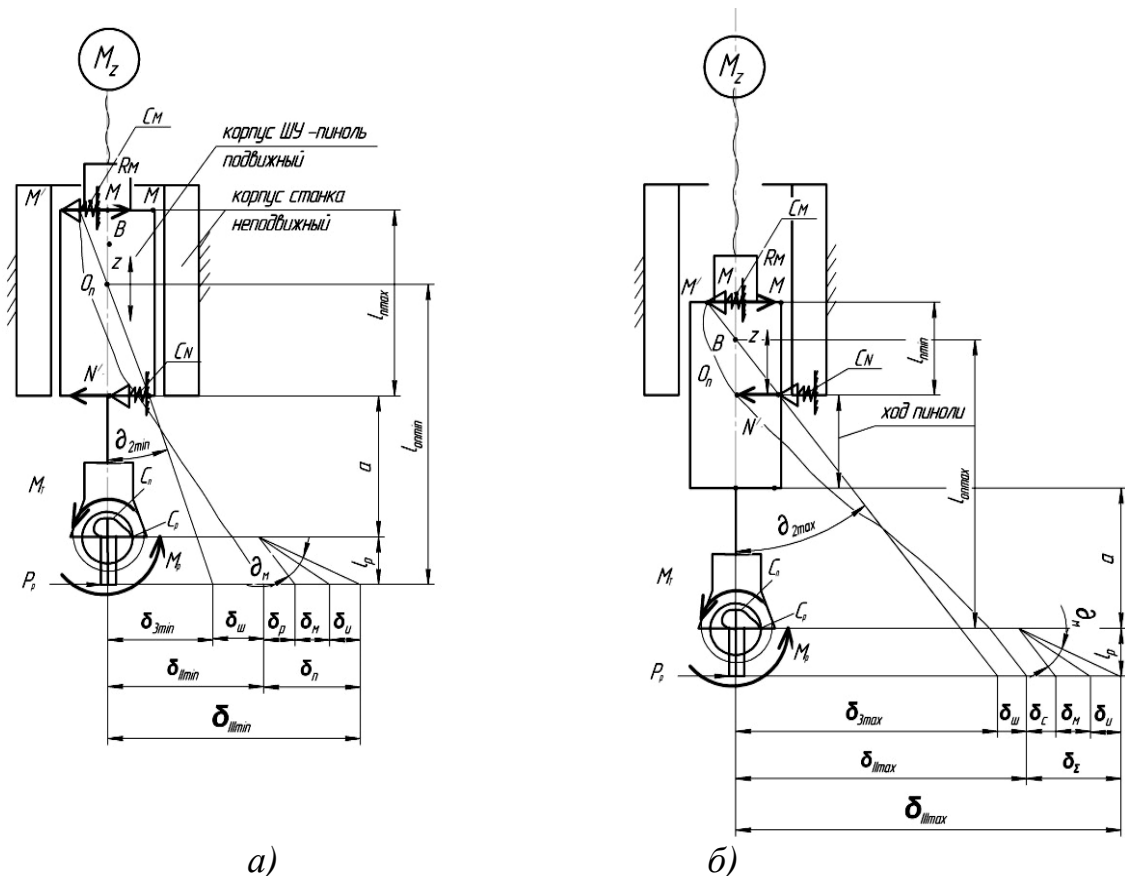


Рис. 5.16. Расчётная схема упругих перемещений шпиндельного узла с координатой  $Z$  в крайних положениях с учетом податливости зажимного патрона: а – минимальный вылет пиноли, б – максимальный вылет пиноли

$$Y_{\Sigma} = \frac{F_p}{C_p} + \frac{M_p - M_T}{C_{\text{п}}} l_u + \frac{F_p \cdot l_u^3}{3 \cdot E \cdot J}, \quad (5.73)$$

где  $J$  – осевой момент инерции инструмента;  $C_P$  – радиальная жёсткость патрона;  $C_{II}$  – поворотная жесткость патрона.

Отжатие самого инструмента при абсолютно жесткой консольной заделки:

$$\delta_u = \frac{P \cdot l_u^3}{3 \cdot E \cdot J} \quad (5.74)$$

Отжатие при повороте оси инструмента из-за контактных сближений:

$$\delta_{II} = \frac{M_p - M_T}{C_{II}} l_u. \quad (5.75)$$

Отжатие от силы  $F_P$  из-за контактных сближений в патроне:

$$Y_p = \frac{P_P}{C_P}.$$

Радиальное перемещение шпинделя в заданном сечении:

$$Y_{IIImin} = Y_{IImin} + Y_{\Sigma} \quad (5.76)$$

$$Y_{IIImax} = Y_{IImax} + Y_{\Sigma}. \quad (5.77)$$

Выполненные сравнительные расчёты показали, как увеличивается податливость ШУ при учете податливости опор, пиноли и зажимного патрона. (рис. 5.17).

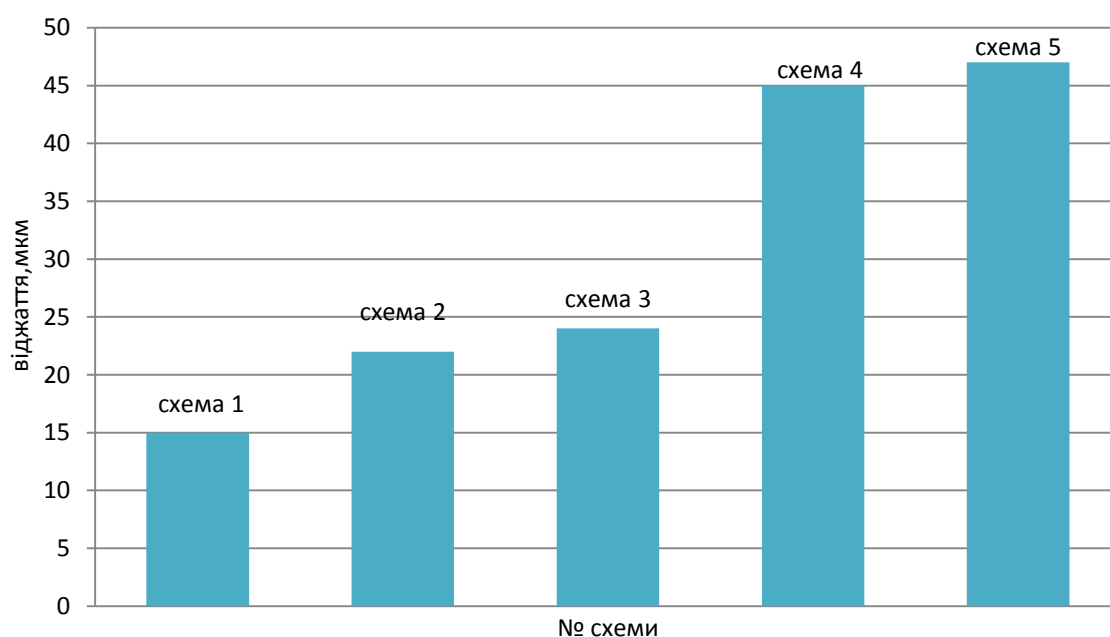


Рис. 5.17. Диаграмма податливости шпиндельного узла для различных схем (рис. 5.15, 5.16)

Предложенные методы расчета жесткости ШУ на базе мотор-шпинделя позволяют оценивать показатели функционирования при проектировании металлорежущих станков нового поколения.

### **Выводы**

1. Теоретически исследованы и жёсткостные характеристики инструментальных зажимных патронов и зажимных патронов для тел вращения (прутков, труб и заготовок) с различными силовыми (энергетическими) потоками, имеющими различные генетические формулы.

2. Получил развитие подход приведение жесткости в месте зажима к упругому и упруго-фрикционному шарниру не только цанговых, но и других конструкций зажимных патронов с применением принципа суперпозиции и рассмотрения мест сопряжения по длине в виде упругого основания.

3. Предложено по результатам расчета изгибной жесткости зажимных патронов с учетом контактной податливости стыков определять частоты собственных колебаний, которые могут характеризовать любой зажимной патрон динамическим портретом.

4. Жёсткость шпиндельного узла является показателем, от которого зависит точность и время обработки детали. Чем меньше отжатие в месте резания, которое вызвано податливостью опор, зажимного патрона и изгибом тела шпинделя, тем его жесткость выше и соответственно, выше точность обработки детали. Для уменьшения отжатий в ШУ с самодействующим мотор-шпинделем необходимо увеличивать длину пиноли и уменьшить вылет консольной части шпинделя.

5. Предложенные методы расчётов жесткости мотор-шпинделя дают возможность эффективно производить количественные и качественные оценки показателей функционирования проектируемых ШУ металлорежущих станков нового поколения.



## РАЗДЕЛ 6

### Сравнительные экспериментальные исследования известных и синтезированных зажимных механизмов

#### 6.1. Объекты экспериментальных исследований

Основными объектами для экспериментальных исследований являются:

- объект 1 – инструментальный зажимной патрон (ИЗП) с цельным упругим зажимным элементом в виде толстостенной конической втулки с генетическим кодом силовым потоком  $F_{x1} - F_{y2}(F_{a1} - F_{r2})$  (см. п. 4.2) и генетической формулой  $F_{a1} - WD - F_{r2}$  (хромосола-наследник);
- объект 2 – синтезированный широкодиапазонный эксцентриковый ИЗП с генетическим кодом  $M_{a1} - F_{r2}$  и двумя силовыми потоками-двумя входами и одним выходом (см. п. 4.3), что соответствует генетической формуле

$$\begin{array}{c} M_a^1 - SC_1 \\ M_a^2 - SC_2 \end{array} \begin{array}{c} \diagup \\ \diagdown \end{array} \begin{array}{c} \\ \end{array} - CB - F_{r2},$$

где  $CB = WD \times LV$  – гибридный вариант преобразователя с использованием генетического оператора скрещивания;

- объект 3 – синтезированный цанговый патрон двойного зажима (ЦПДЗ) с генетическим кодом  $F_{a1} - F_{r2}$  и двумя силовыми потоками- двумя выходами и одним входом (см. п.4.5), что соответствует генетической формуле

$$\begin{array}{c} F_{a1} - WD \\ F_{a1}^2 - SR \end{array} \begin{array}{c} \diagup \\ \diagdown \end{array} \begin{array}{c} \\ \end{array} - F_{r2}.$$

- объект 4 – синтезированный ШУ с самодействующим мотор-шпинделем (см.рис. 5.14) и цанговым патроном с ручным зажимом.

В качестве объекта 1 был выбран гидромеханический зажимной патрон Coro Grip фирмы Sandvic Coromant (рис. 6.1) [108].

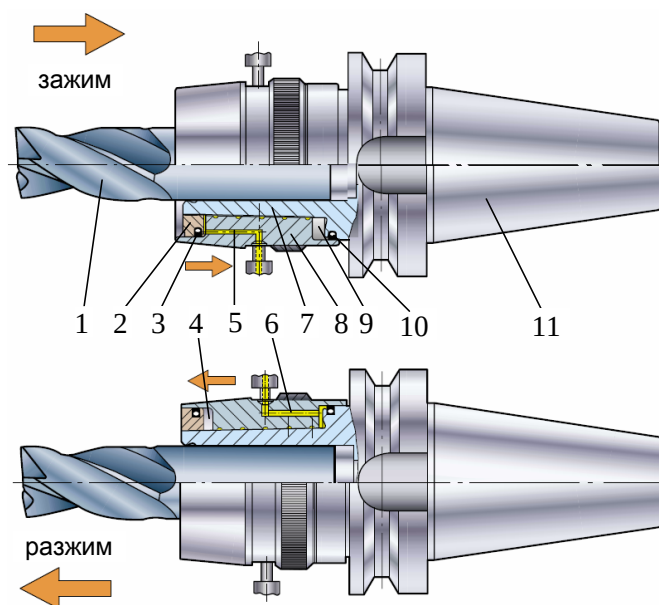
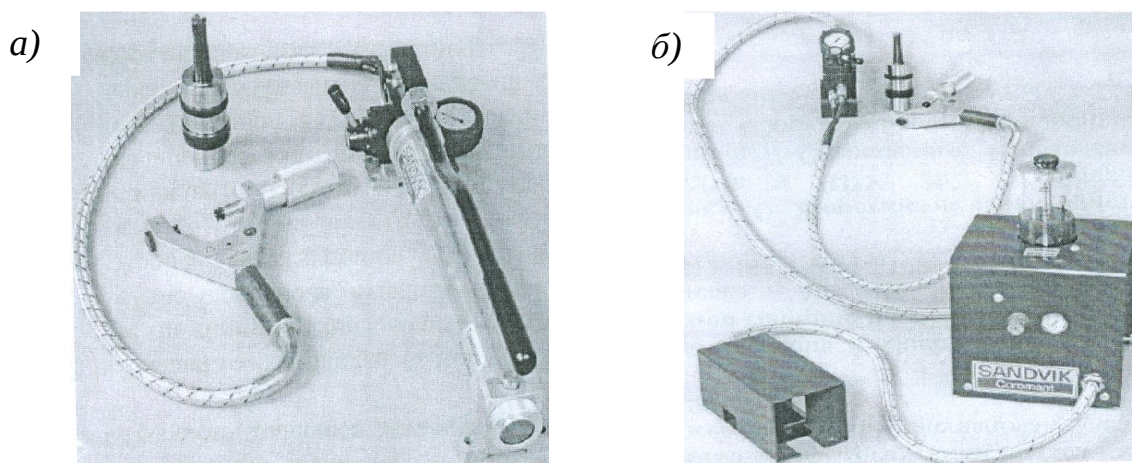


Рис. 6.1. Инструментальный зажимной патрон типа Coro Grip

Патрон состоит из хвостовика 11, выполненного вместе упругой конусной втулкой 7. Внешняя коническая поверхность упругой конусной втулки сопряжена с внутренней конической поверхностью приводной втулки 8. Угол наклона конических поверхностей составляет  $2^\circ$ . К переднему концу упругой конусной втулки жестко прикреплено кольцо 2. Торцевые поверхности кольца, упругой конической и приводной втулок образуют рабочие камеры 4, 9 для подачи жидкости, герметизированные уплотнениями 3, 10. Давление питания к камерам 4,9 подводится соответственно через каналы 5,6. При зажиме инструмента 1 жидкость через канал 5 поступает в камеру 3. Под давлением масла приводная втулка перемещается и деформирует упругую конусную втулку, обеспечивая выборку зазора между хвостовиком инструмента и упругой конусной втулкой. Дальнейшее перемещение приводной втулки приводит к созданию контактного давления на хвостовик инструмента, удерживающего инструмент в процессе обработки. При разжиме инструмента жидкость через канал 6 поступает в камеру 9. Под давлением масла приводная втулка перемещается в обратном направлении, снимая давление с другой конусной втулки. Под давлением сил упругости конусная втулка перемещается в исходное положение, обеспечивает разжим инструмента. Перемещение втулки проходит по масляному клину, что

значительно увеличивает ресурс работы патрона. Хвостовик инструмента должен выполняться по  $h6$  или  $h7$ . зажим хвостовиков разного диаметра одним патроном возможен за счет применения переходных цилиндрических цанг (в наборе). Патроны изготавливаются высокой степенью точности, благодаря чему радиальное биение, измеренное на расстоянии трех диаметров от торца патрона, составляет от 2 до 6 мкм. Высокие усилия зажима в патроне создаются внешним гидравлическим насосом, который обеспечивает давление зажима 50 Мпа и давление разжима до 80 Мпа. Фирма Sandvik Coromant предлагает два типа гидравлических насосов с приводом: ручным (рис. 6.2, а) и пневматическим (рис. 6.2, б). В экспериментальных исследованиях использовался гидравлический насос с ручным приводом.



*Рис. 6.2. Гидравлические насосы фирмы Sandvik Coromant:  
а) ручной; б) пневматический.*

В качестве объекта 2 выбраны синтезированные ИЗП под максимальные диаметры хвостовика инструмента 16 мм (рис. 6.3, а) и 13 мм (рис. 6.3, б).

Устройство и принцип работы рассмотрим на примере конструкции ЭСФПШ – 16 (рис. 6.3, а).

Патрон содержит корпус 1, с правого торца которого в отверстиях, параллельных оси патрона, установлены эксцентриковые поворотные кулачки 7 с наружными коническими и внутренними цилиндрическими поверхностями, конусную втулку 6 с ответным коническим отверстием и ленточной резьбой, взаимодействующей по аналогичной резьбе с передней частью рубашки 5. в корпусе 1 кольцевая канавка под пружинное разрезное кольцо 3 с отгибами для взаимодействия с выемками на шипах кулачков 7 для их разведения при свинчивании конусной втулки 6 при разжиме хвостовика инструмента. Задняя

часть рубашки 5 снабжена лепестками с мелкой резьбой, проходящими сквозь пазы в корпусе 1. мелкая резьба выполнена того же направления, что и ленточная резьба в передней части рубашки 5, и предназначена для гайки 2. в упор к корпусу 1 слева установлено кольцо 4, удерживаемое от поворота стопорным винтом (не показан).

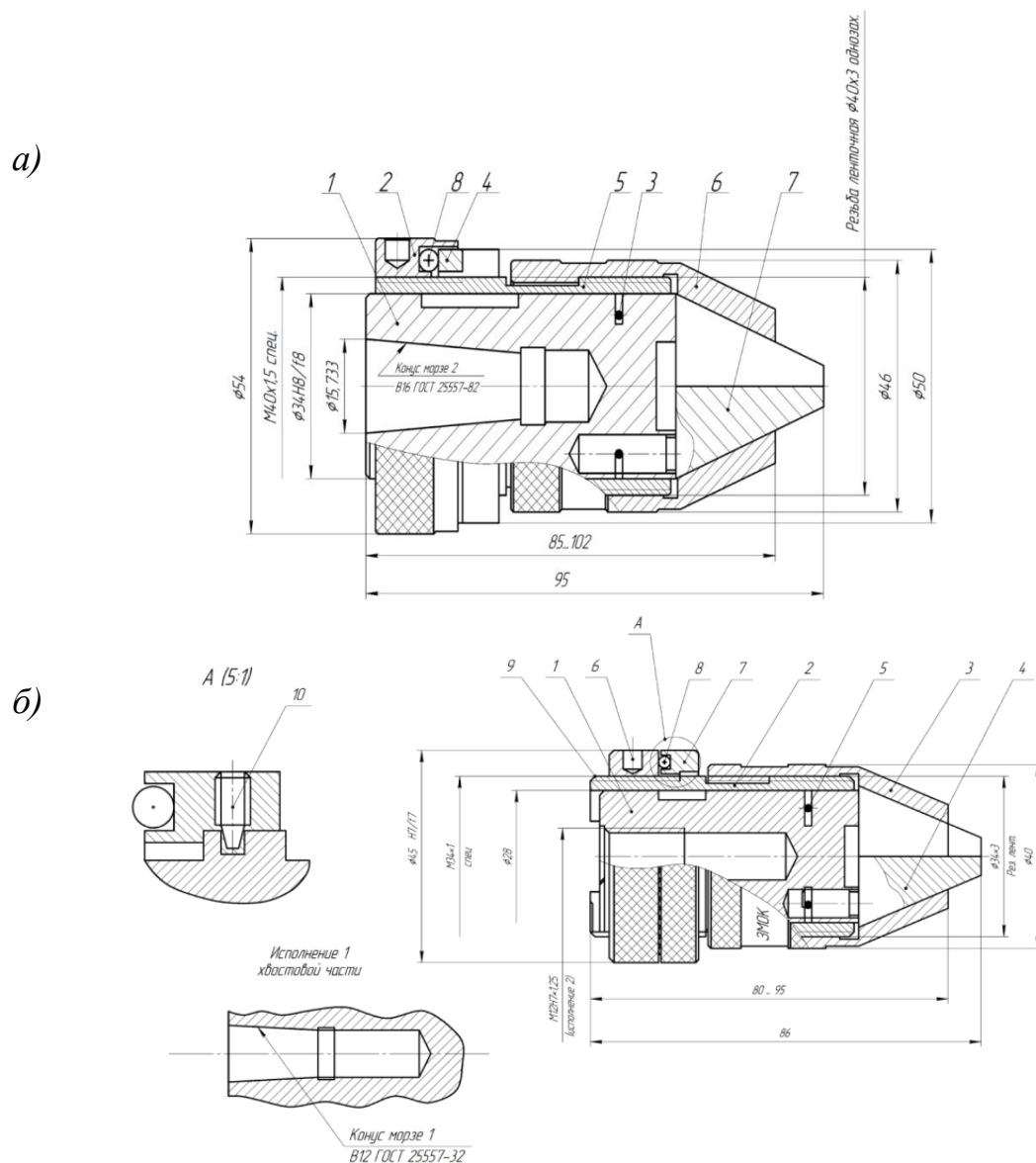


Рис. 6.3. Широкодиапазонные эксцентрики ИЗП с шариками и двумя силовыми потоками:

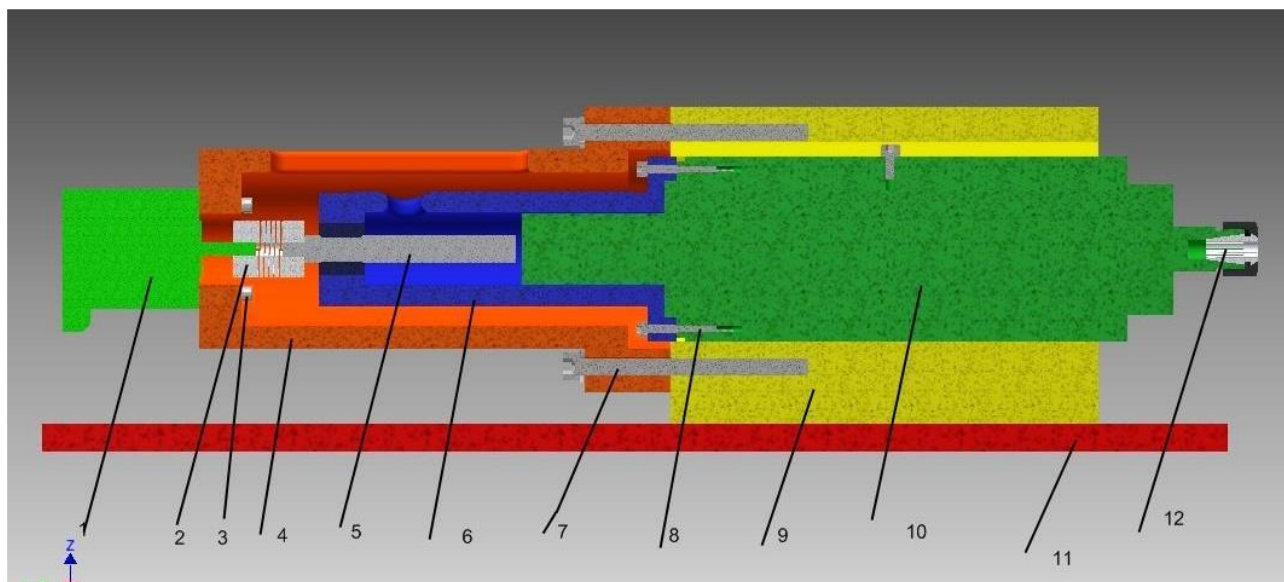
а) ЭСФШП – 16; б) ЭСФШП – 13

Между внутренним торцом гайки 2 и левым торцам кольца 4 размещены тела качения – шарики 8. вращение корпусной втулки 6 и гайки 2 осуществляется от руки, а для создания большего натяга в гайке 2 предусмотрены отверстия под вороток (не показан), а в конусной втулке 6 – лыски под ключ (не показаны). Патрон работает следующим образом. При

разжиме инструмента определенного диаметра из рабочего диапазона диаметров, зажимаемых в патроне (для данного патрона от 0,5 мм до 16мм) отпускают гайку 2 для снятия основного натяга и создания зазоров. После этого вывинчивают конусную втулку 6 для разведения кулачков 7, вынимают инструмент одного диаметра и вставляют инструмент другого диаметра. Далее вращают конусную втулку 6 в противоположном направлении для соприкосновения кулачков 7 зажимными поверхностями с поверхностью хвостовика инструмента и предварительно зажимают последний, выбрав зазоры. Затем завинчивают гайку 2, натягивая систему патрона за счёт вторичного звена натяга – рубашки 5 с мелкой резьбой (малым углом подъёма), тем самым создавая надежный зажим с самоторможением.

Для объекта 3 использована стандартная зажимная цанга применительно к МТА мод. 1А240-6, которая должна быть переделана на цанговый патрон двойного зажима (ЦПДЗ) по патенту Украины №80489 [331] (см. рис.4.23).

Для объекта 4 изготовлен модуль самодействующего мотор-шпинделя (рис. 6.4) с использованием приобретенного мотор-шпинделя фирмы IBAG и встроенной винтовой передачи.



*Рис.6.4 - Поперечный разрез самодействующего мотор –шпинделя*

*1 - электродвигатель; 2- сильфонная муфта; 3 –винты крепления электродвигателя к стакану 4; 5- ходовой винт; 6 - внутренний стакан; 7- шпилька крепления стакана к корпусу 9; 8- винты крепления внутреннего стакана к мотор-шпинделю 10; 11- плита, 12 –цанговый патрон*



## 6.2. Методика экспериментальных исследований

Основная цель экспериментальных исследований – установить влияние различных факторов на статические силовые и жесткостные характеристики зажимных патронов с различными силовыми (энергетическими) потоками, а также (энергетическими) потоками, а также изучить влияние высокоскоростного ИЗП на точность и шероховатость обработанных деталей в производственных условиях. Кроме того результаты экспериментальных исследований должны подтвердить качественно и количественно теоретические исследования.

### 6.2.1. ИЗП с цельной конусной втулкой

Для исследования ИЗП (объект 1) методика предусматривает определение силовых и жёсткостных характеристик.

Исследования силовых характеристик предусматривают измерение силы проталкивания и момента прокручивания зажатых цилиндрических оправок, имитирующих цилиндрические хвостовики (шлифованные, закаленные) режущих инструментов (свёрл, фрез). Для исследования силовых характеристик инструментального зажимного патрона (ИЗП) типа Cogo Grip нужно провести эксперименты на проталкивание и прокручивание оправки определенного диаметра, зажатой с определенным давлением в ИЗП.

Определение момента прокручивания  $M_{pr}$  проводилось на токарном станке согласно схемы (рис. 6.5).

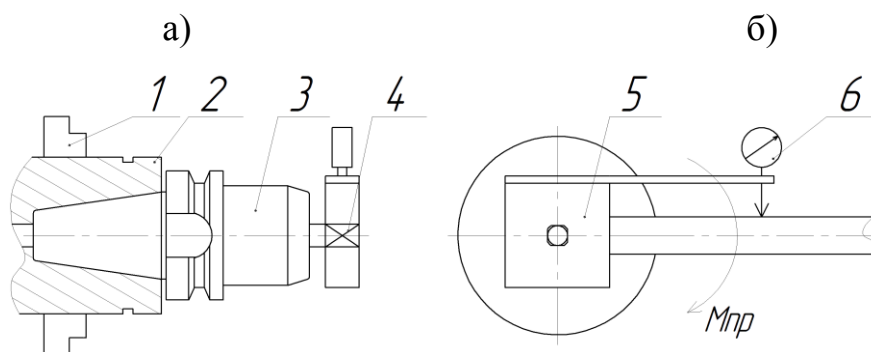


Рис. 6.5. Схема измерения момента прокручивания  $M_{pr}$

В патроне 1 станка через переходной цилиндрический элемент 2 был зажат ИЗП 3, а в сам ИЗП зажата оправка 4. Нагружение производилось с

помощью динамометрической рукоятки 5 (рис. 6.5, б). Измерения происходили при разных значениях  $p_c$  – давления зажима оправки (10, 20, 30, 40, 50, 60). Замеры по индикатору 6 проводятся трижды.

Измерение силы проталкивания проводилось на токарном станке согласно схемы (рис. 6.6). В патроне 1 станка с помощью переходного цилиндрического элемента 2 был закрепленный ИЗП 3. В ИЗП была зажата оправка 4 –  $\varnothing 12$  мм. Между оправкой и задним центром 6 был установлен динамометр 5. Нагрузка происходила по помощи передвижения заднего центра 6 и суппорта (рис. 6.6 не показан).

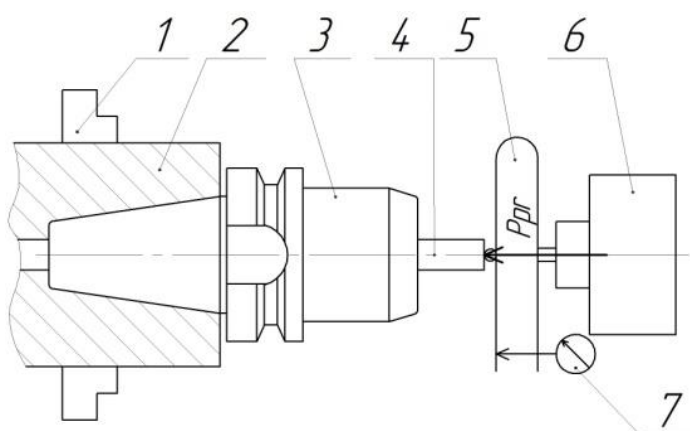


Рис. 6.6. Схема измерения силы проталкивания  $P_{pr}$

Для проведения экспериментов использовались индикатор часового типа 7 с ценой деления 0,01 мм. Для каждого из давления  $p_c$  (10, 20, 30, 40, 50, 60 Мпа) результат фиксировался после того, как оправка приходила в движение (проскальзывается). Опыт повторялся три раза и определялось среднее значение.

Определение упругих радиальных отжатий (радиальной жесткости) выполнялось на том же токарном станке согласно схемы (рис. 6.7). В патроне 1 станка с помощью переходного цилиндрического элемента 2 был закрепленный ИЗП 3. В ИЗП была закреплена оправка 4 ( $d = 12$  мм). Нагружение осуществлялось через динамометр 5 (рис. 6.8) на вылете 50 мм. С одной стороны прикладывалась радиальная сила  $P_r$  через динамометр (с индикатором

$I_r$  7) путем нагрузки от поперечного перемещения суппорта 6 станка, а с другой установлен индикатор  $I_{rs}$  8 для измерения радиальных отжатий.

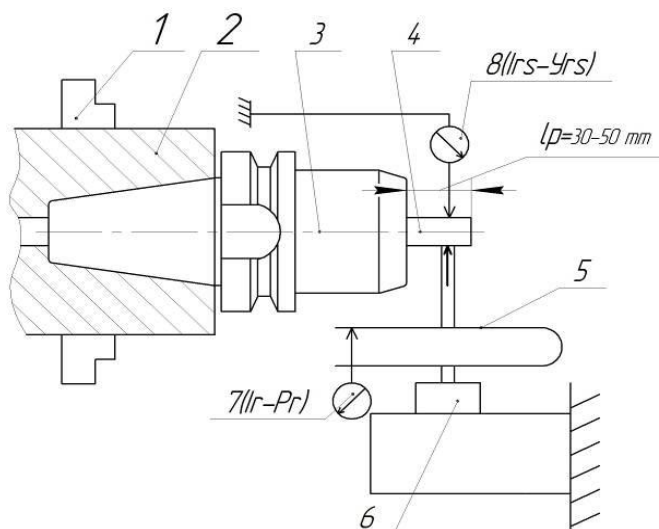


Рис. 6.7. Схема измерений упругих радиальных отжатий

Замеры выполнялись с повторением 3 раза. Измерения проводились при разных значениях  $p_c$  (10, 20, 30, 40, 50, 60 МПа). Радиальная сила нагружения создавалась от  $P_r = 200\text{Н}$  до  $1000\text{Н}$  (с интервалом  $200\text{Н}$ ). Показания индикатора  $I_{rs}$  фиксировались при ступенчатой нагрузке и разгрузке, а показатели индикатора  $I_r$  по тарировочному графику.

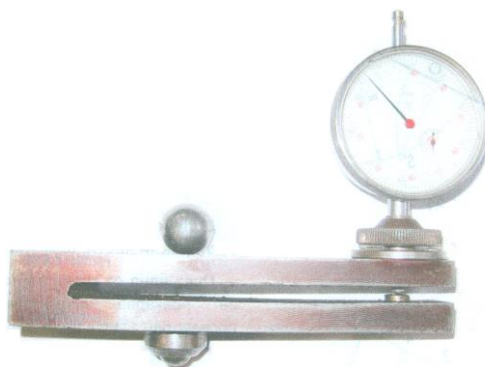


Рис. 6.8. Динамометр сжатия камертонного типа

### 6.2.2. Широкодиапазонные эксцентриковые ИЗП

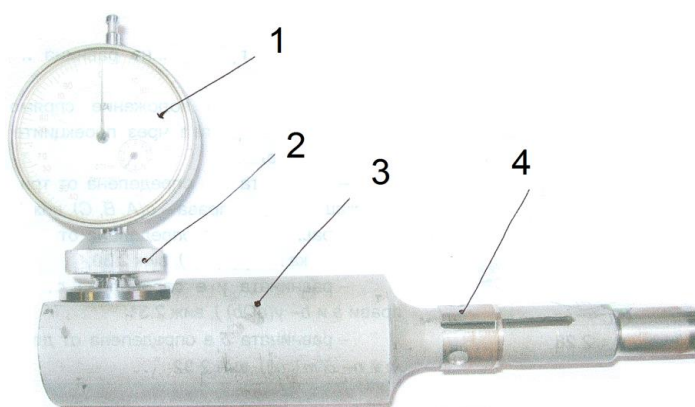
Для исследования ИЗП (объект 2) изготовлено 2 опытных образца (рис. 6.3), из них испытан ЭСФПШ-16 (макс.диаметр 16 мм.) (рис. 6.9), а внедрен ЭСФПШ-13 (макс.диаметр 13 мм.) (приложение В.1), на который разработан проект ТУ (приложение Б).





*Рис. 6.9. Широкодиапазонный ИЗП без ключа типа ЭСФПШ – 16*

Радиальная сила зажима измерялась цанговым динамометром (рис.6.10), тарировка которого проводилась при установке его на призму и нагружением упругой части силой  $F_y$  (рис. 6.9, б) с пересчетом суммарной  $F_{y\Sigma} = 3F_y$  по тарировочному графику.



*Рис.6.10. Цанговый диаметр 1 – индикатор; 2 – цанговый держатель индикатора; 3 – корпус с упругой частью; 4 – сменные накладки*

Момент прокручивания  $M_{a2} = M_{пр}$  (рис.6.11) определялся на токарном станке. В зажимном патроне 1 станка с помощью переходного элемента 2 с конусом Морзе крепили широкодиапазонный эксцентриковый ИЗП 3. Шпиндель станка стопорился от проворота за счет кинематического клина. В ИЗП зажимаются оправки 4 с квадратом на конус. Для измерения  $M_{пр}$  использовались динамометрическая рукоятка 5 с индикатором 6. Моменты зажима  $M_{a1}^1$  и  $M_{a1}^2$  настраивались за счет затягивания (вращения) гаек динамометрическим ключом с различными насадками от рожковых ключей (рис. 6.12).

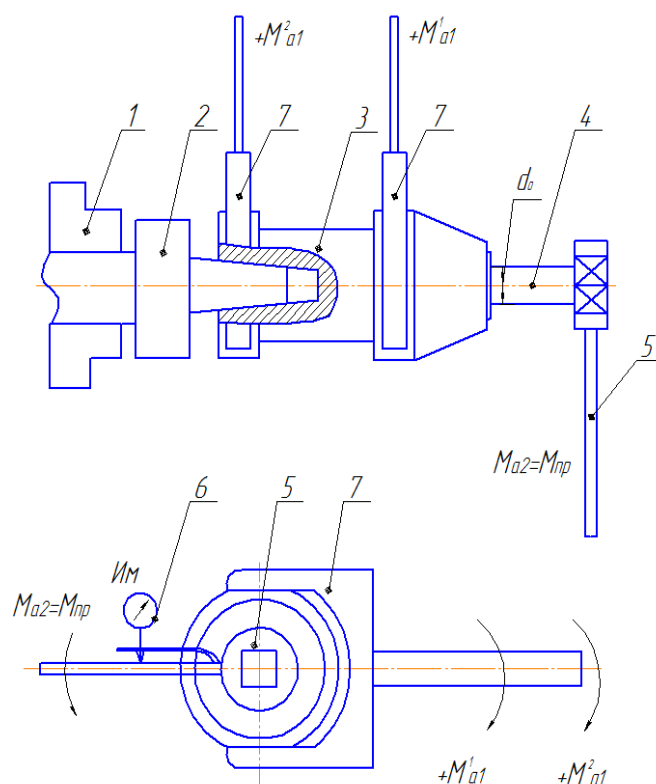


Рис. 6.11. Схема измерения момента прокручивания оправок при затягивании конусной втулки и гайки динамометрическим ключом



Рис.6.12. Динамометрический ключ с рожковыми насадками

Для испытаний двух ИЗП использовались различные диаметры оправок (табл. 6.1).

Диаметры оправок при исследовании двух патронов с разным максимальным диаметром отверстия

| ЭСФПШ16<br>( $d_{max} = 16\text{мм}$ ) | ЭСФПШ13<br>( $d_{max} = 13\text{мм}$ ) |
|----------------------------------------|----------------------------------------|
| Ø12                                    | Ø12                                    |
| Ø10                                    | Ø10                                    |
| Ø8                                     | Ø8                                     |
| Ø6                                     | Ø6                                     |

Для определения упругих отжатий ИЗП 3 устанавливается в патроне 1 станка с помощью оправки 2 с конусом Морзе, на который насажена ИЗП 3 (рис. 6.13). В ИЗП зажимают оправку 7 и нагружают радиальной силой  $F_y$  на вылете 60 мм. С одной стороны устанавливаются два индикатора 5 и 6 на расстояниях 10 и 60 мм от торца патрона ( $I_{y1} - Y_{p1}$ ,  $I_{y2} - Y_{p2}$ ) для измерения отжатия оправки. С другой стороны прикладывается радиальная сила  $F_p$  на вылете 60 мм от нагрузочного устройства 9 через камертонный динамометр с индикатором 8 ( $I_p - F_p$ ) (рис. 6.13, а). Измерения проводятся при разных значениях моментов на входе  $M_{a1}^1$  и  $M_{a1}^2$ , настроенных динамометрическим ключом (рис. 6.12). Радиальная нагрузка обеспечивается в диапазоне  $F_p = 100 - 500\text{Н}$  (через 100Н). Все заторы повторяются трижды и заносятся в таблицу (см. приложение Г.1).

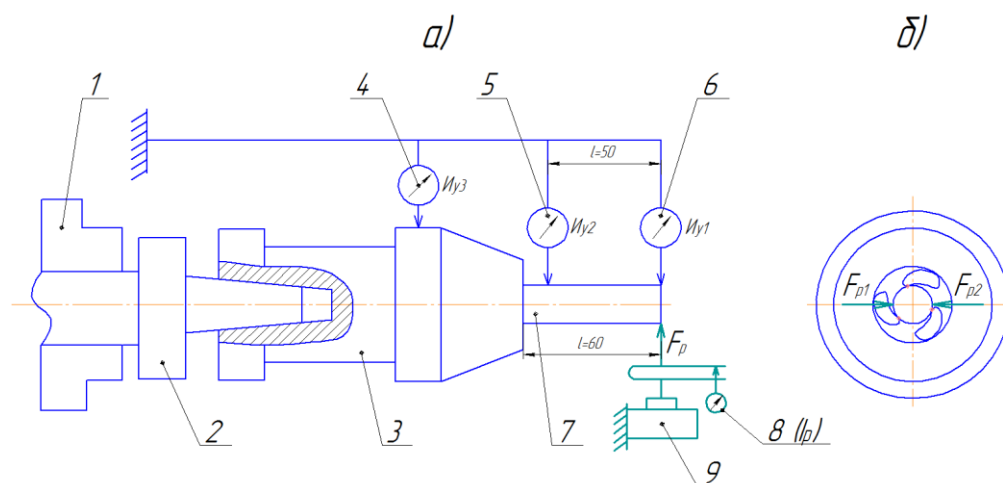


Рис. 6.13. Схема измерения упругих радиальных отжатий оправки на разных вылетах нагружения

### 6.2.3. Цанговые патроны с одинарным и двойным зажимом

Измерение упругих отжатий оправок с отклонениями диаметра от номинального ( $d_n = 30$  мм) выполняется на МТА мод. 1А240-6 для двух опытов:

1 – при нагружении сплошной оправки на вылете  $R=100$  мм от переднего торца цанги (рис. 6.14) с установкой нагрузочного устройства на поперечном суппорте, а магнитной стойки с индикатором на продольном суппорте (радиальная сила  $F_p = 0 - 10,0$  кН через 2,5 кН; диаметры оправок  $d=29,4; 29,6; 29,8; 30,0$  мм);

2 – при нагружении пустотелой трубы оправок с отверстием  $\varnothing 20$  на вылете  $l=50$  мм от переднего торца цанги (рис. 6.15) с установкой нагрузочного устройства на поперечном суппорте, а специальная стойка с «кляузником» на продольном суппорте с перемещением мест замера изнутри в шести точках ( $F_p = 2,5 - 10,0$  кН через 2,5 кН; диаметры оправок  $d=29,6; 30$  мм).

В опыте 2 точки замера от переднего торца оправки находятся на расстоянии 1 – 25 мм; 2 – 50 мм; 3 – 72,5 мм; 4 – 95 мм; 5 – 95 мм; 6 – 110 мм, а осевая сила затяжки в обоих опытах примерно одинаковая и составляет  $F_{x1} = 30,0$  кН.

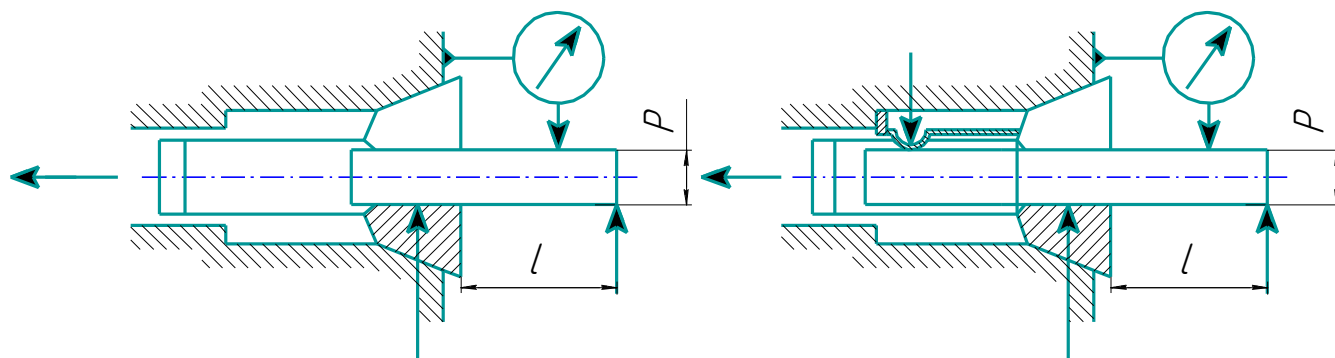
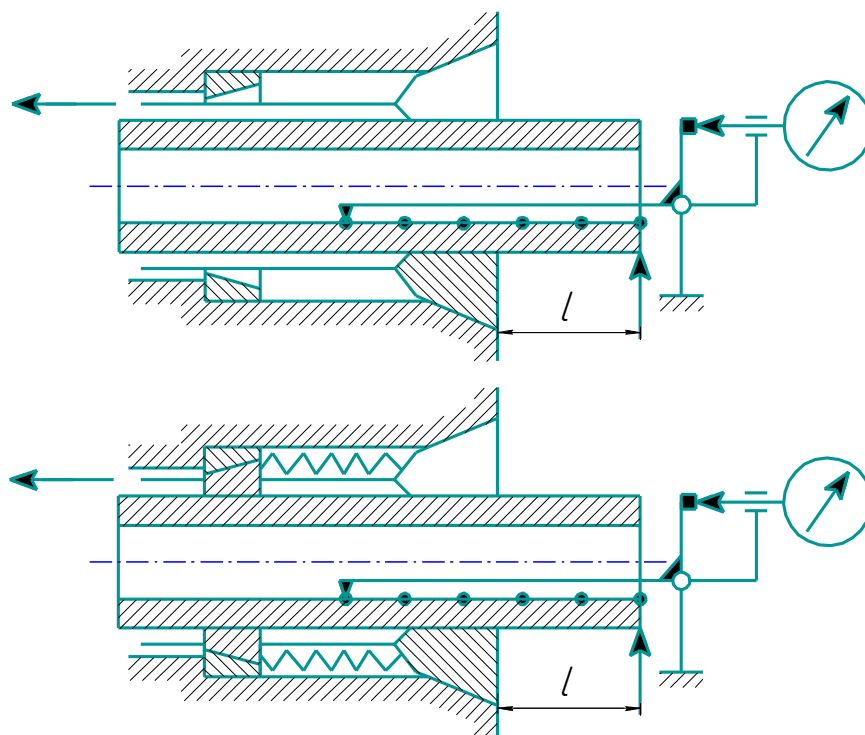


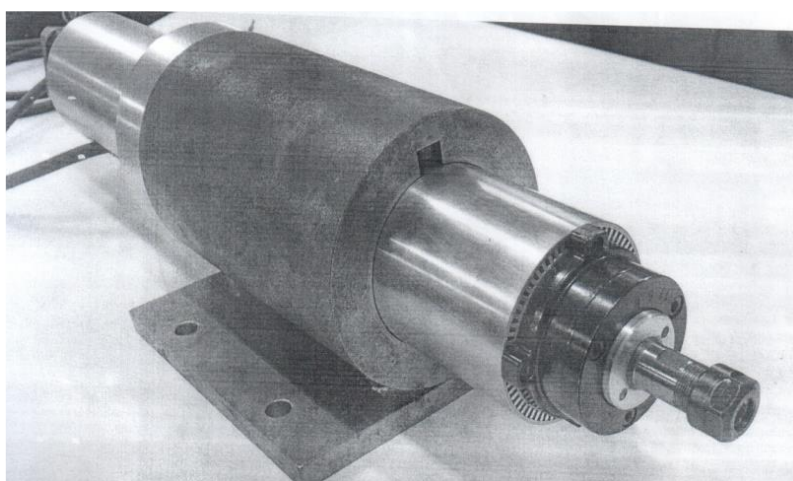
Рис. 6.14. Схемы измерения отжатия сплошной оправки на вылете  $l=100$  мм в цанговом патроне с зажимом: а – одинарным; б – двойным



*Рис. 6.15. Схема измерения отжатия пустотелой оправки в цанговом патроне одинарного (а) и двойного (б) зажима*

#### **6.2.4. Шпиндельный узел с самодействующим мотор-шпинделем**

Для исследования жесткостных характеристик ШУ с самодействующим мотор-шпинделем (рис. 6.16) использовался экспериментальный стенд (рис. 6.17) на базе вертикально-сверлильного станка, установленного на кафедре конструирования станков и машин КПИ имени Игоря Сикорского.



*Рис. 6.16. Самодействующий мотор-шпиндель горизонтального исполнения*

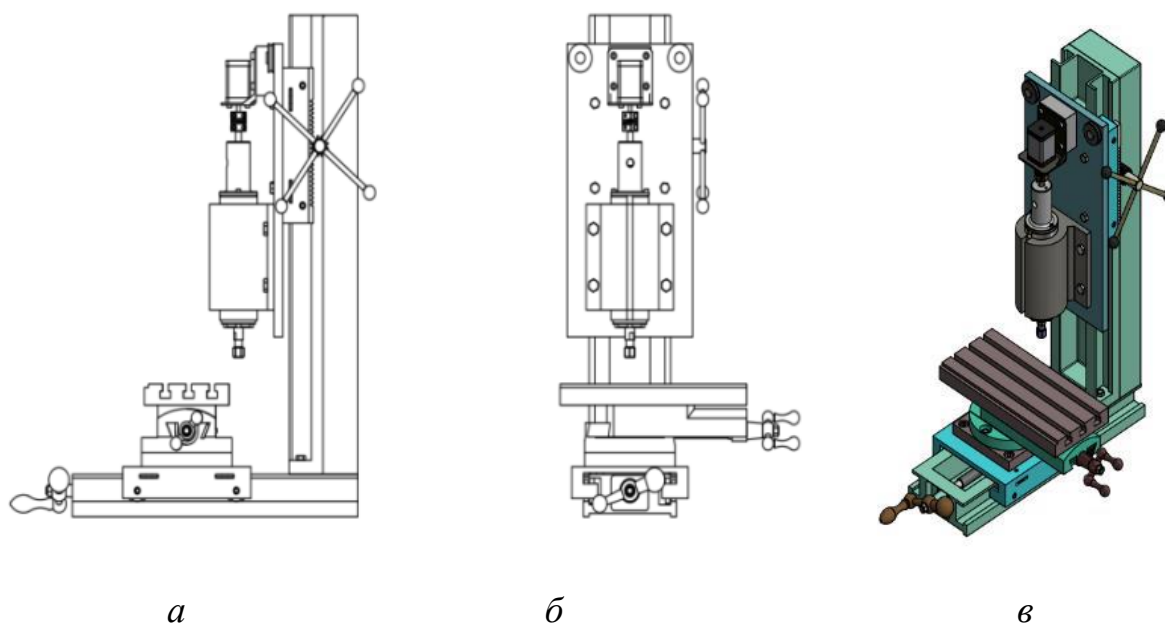


Рис. 6.17. Общий вид станка-стенда-с самодействующим мотор-шпинделем:  
а – вид сбоку; б – вид спереди; в – 3D вид

### 6.3. Экспериментальные исследования силовых и жесткостных характеристик высокоскоростного высокоточного ИЗП с цельным упругим зажимным элементом

В качестве объекта исследований выбран высокоскоростной ИЗП типа Coro Grip (рис. 6.18, а). Для проведения данного эксперимента на станке был осуществлен кинематический замок, поскольку для измерения  $M_{Pr}$  оправки ИЗП должен быть неподвижным (рис. 6.18, б).

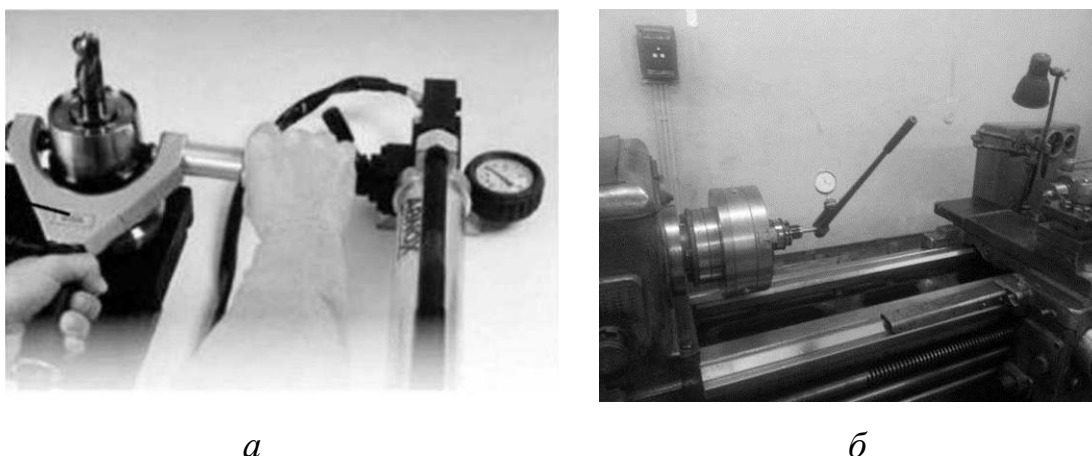


Рис. 6.18. ИЗП типа Coro Grip в комплекте со скобой и насосом высокого давления (а) и измерение момента прокручивания  $M_{Pr}$  в нем оправки  $d = 12$  мм (б)

По данным эксперимента получен коэффициент усиления патрона  $k'_{af}$ .

Момент прокручивания  $M_{pr}$  зависит от давления зажима  $p_c$ , площади гидроцилиндра  $S_2$  и коэффициента сцепления (трения)  $\mu_1$  оправки с зажимным элементом.

Для определения коэффициента усиления сначала нужно найти  $M_{pr}$ :

$$M_{pr} = \frac{F'_{y2} \cdot \mu_1 \cdot d}{2}, \quad (6.1)$$

где  $d$  – диаметр оправки,  $\mu_1$  – коэффициент трения (сцепления) при прокручивании.

Откуда

$$F''_{y2} = \frac{2M_{pr}}{\mu_1 \cdot d}, \quad (6.2)$$

а коэффициент усиления (табл. 6.2)

$$k'_{af} = \frac{F''_{y2}}{S_{\Sigma}} = \frac{2M_{pr}}{\mu_1 \cdot d \cdot p_c \cdot F_c}, \quad (6.3)$$

Данные подсчитаны помощью формулы (6.3) при разных коэффициентах трения (сцепления)  $\mu_1$ .

После обработки результатов построены графики зависимости:

$M_{pr} = f(p_c)$  – рис. 6.19, а;  $k'_{af} = f(p_c)$  для различных  $\mu_1$  – рис. 6.19, б.

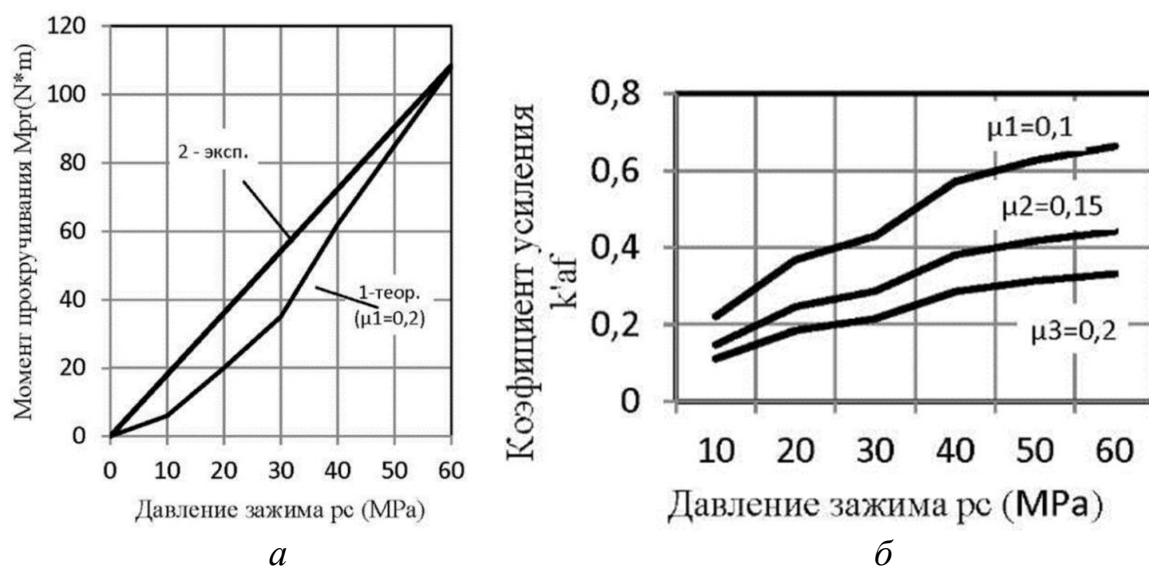


Рис. 6.19. Графики зависимости момента прокручивания  $M_{pr}$  (а) и коэффициента  $k'_{af}$  (б) от давления зажима  $p_c$ : 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная



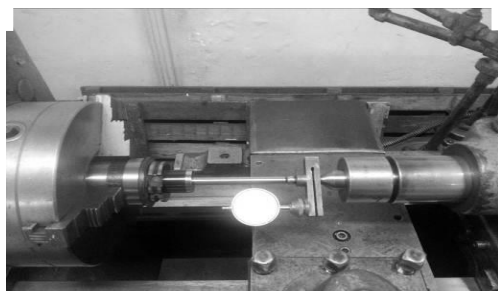
Для измерения силы проталкивания  $P_{pr}$  в ИЗП зажали оправку  $\varnothing 12$  мм. Между оправкой и задним центром был установлен динамометр, а нагрузка происходила по помощи передвижения заднего центра и суппорта (рис. 6.20). Для проведения экспериментов использовались индикаторы временного типа с ценой деления 0,01 мм.

Таблица 6.2

*Значение коэффициента усиления  $k'_{af}$*

| Давление зажима<br>$p_c$ , МПа | Коэффициент усиления $k'_{af}$ при $\mu_1$ |        |        |
|--------------------------------|--------------------------------------------|--------|--------|
|                                | 0,1                                        | 0,15   | 0,2    |
| 10,0                           | 0.2212                                     | 0.1474 | 0.1106 |
| 20,0                           | 0.3687                                     | 0.2458 | 0.1843 |
| 30,0                           | 0.4301                                     | 0.2867 | 0.2150 |
| 40,0                           | 0.5715                                     | 0.3810 | 0.2857 |
| 50,0                           | 0.6268                                     | 0.4178 | 0.3134 |
| 60,0                           | 0.6637                                     | 0.4424 | 0.3318 |

а)



б)



Рис. 6.20. Измерение силы проталкивания оправки  $d = 12$  мм в ИЗП:

*а – нагрузка задним центром; б – нагрузка суппортом*

Для каждого из давления  $P_c$  (10,20,30,40,50,60 МПа) результат фиксировался после того, как оправка приходит в движение. Опыт повторялся три раза, и определялось среднее значение. Для получения полных зависимостей опыт целесообразно повторить минимум три раза и определить среднее значение. Показатели индикаторов заносятся в таблицу. Имея тарированный график динамометра, значения индикатора пересчитывались в силу проталкивания  $P_{pr}$ . Сила проталкивания  $P_{pr}$  зависит от давления  $P_c$ , площади гидроцилиндра  $F_c$  и коэффициента сцепления (трение)  $\mu_2$  оправки с зажимным элементом.

На входе в ИЗП действует осевая сила



$$F_{x1} = p_c \cdot S_c, \quad (6.4)$$

а на выходе нормальная суммарная (радиальная) сила зажима

$$F''_{y2} = \frac{P_{pr}}{\mu_2}, \quad (6.5)$$

Тогда коэффициент усиления патрона будет (табл. 6.3):

$$k''_{af} = \frac{F''_{y2}}{F_{x1}} = \frac{P_{pr}}{\mu_2 \cdot p_c \cdot F_c}, \quad (6.6)$$

По полученным данным построены графики зависимостей  $P_{pr} = f(p_c)$  (рис. 6.21) и  $k''_{af} = f(p_c)$  при различных значениях  $\mu_2$  (рис. 6.22).

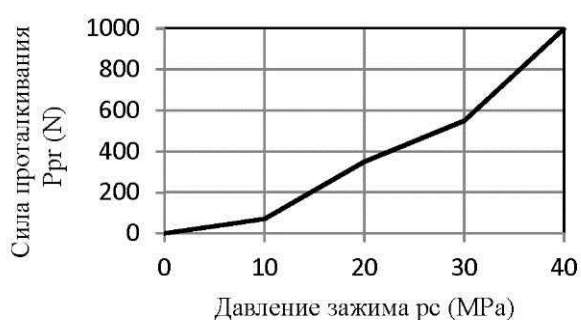


Рис. 6.21. График зависимости силы проталкивания  $P_{pr}$  от давления зажима  $p_c$

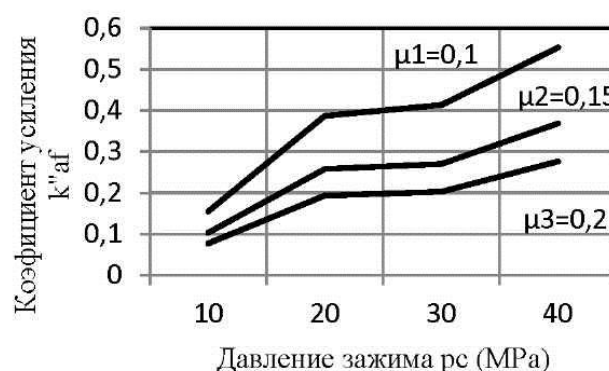


Рис. 6.22. График зависимости коэффициент усиления  $k''_{af}$  от давления зажима  $p_c$

Таблица 6.3

Значение коэффициента усиления  $k''_{af}$

| Давление зажима $p_c$ , МПа | Коэффициент усиления $k''_{af}$ при $\mu_2$ |        |        |
|-----------------------------|---------------------------------------------|--------|--------|
|                             | 0,1                                         | 0,15   | 0,2    |
| 10,0                        | 0,1548                                      | 0,1031 | 0,0774 |
| 20,0                        | 0,3871                                      | 0,2581 | 0,1935 |
| 30,0                        | 0,4136                                      | 0,2704 | 0,2028 |
| 40,0                        | 0,5530                                      | 0,3687 | 0,2765 |

Пересчёт коэффициента усиления патрона  $k'_{af}$  и  $k''_{af}$  по результатам экспериментов на силу проталкивания и момента прокручивания показал, что они почти совпадают по характеру изменения и величине, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Для измерения упругих отжатий в патроне станка с помощью переходного элемента был зажат ИЗП, а на станке был осуществлен

кинематический клин. В ИЗП была закреплена оправка ( $d = 12$  мм) с вылетом 50 мм. С одной стороны устанавливался индикатор для измерения радиальных отжатий, а с другой прикладывалась радиальная сила  $P_r$  через динамометр путем нагрузки от перемещения суппорта станка (рис. 6.23). Данные испытания выполнены с повторением 3 раза. Измерения проводились при разных значениях  $p_z$  (10, 20, 30, 40, 50, 60 МПа). Все измерения были занесены в таблицы. Радиальная сила нагрузки прикладывалась в диапазоне от  $P_r = 200$ Н до 1000Н (с интервалом 200Н). Показания индикатора  $I_y$  фиксировались при ступенчатой нагрузке и разгрузке, а показатели индикатора  $I_r$  по тарировочному графику  $P_r$ .



Рис. 6.23. Измерения радиальной жёсткости  $j_r$  оправки  $d = 12$  мм  
По результатам экспериментов построены графики зависимости  $j_r = f(p_c)$  (рис. 6.24), а также отжатий  $Y_{rs}$  от силы  $P_r$  при нагрузке и загрузке (рис.6.25).

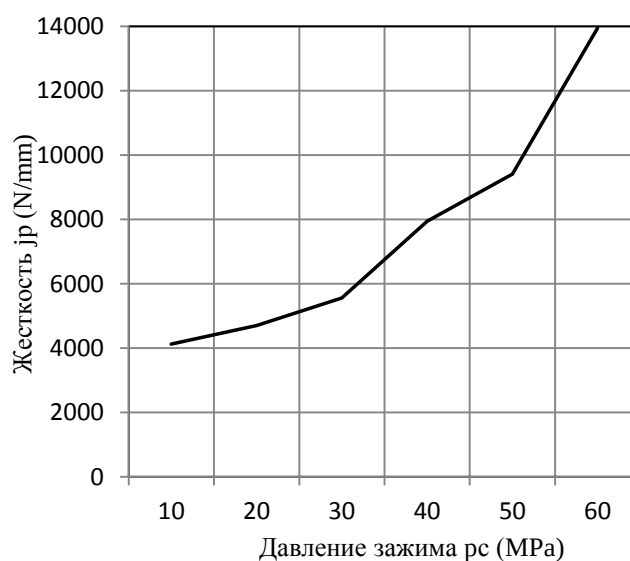


Рис. 6.24. График зависимости радиальной жёсткости  $j_r$  от давления зажима  $p_c$

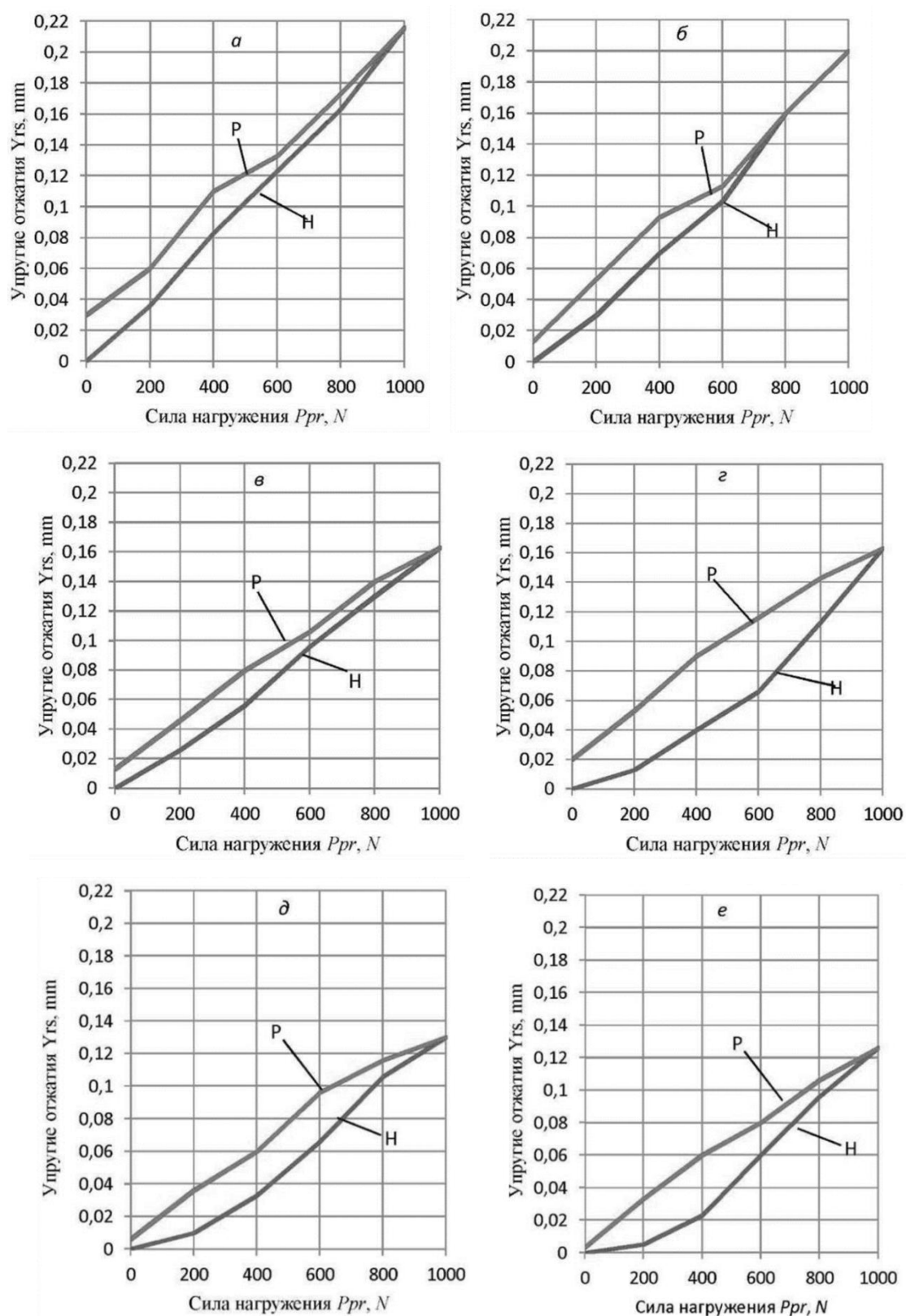


Рис. 6.25. Графики зависимости упругих отжятий  $Y_{rs}$  от силы  $P_r$  при нагрузке и разгрузке: *a* –  $p_c = 10$  МПа; *б* –  $p_c = 20$  МПа; *в* –  $p_c = 30$  МПа; *г* –  $p_c = 40$  МПа; *д* –  $p_c = 50$  МПа; *е* –  $p_c = 60$  МПа;

#### 6.4. Производственные испытания высокоскоростного высокоточного зажимного патрона при резании

Эксперимент предусматривал обработку деталей в производственных условиях при изменении четырех факторов: материал (М), давление зажима (р), глубина резания (t). Критериями качества в данном эксперименте приняты – точность обработки по размеру (геометрическая форма заготовки, в нашем случае круг или квадрат (рис. 6.26) ( $Y_1$ ) и шероховатость поверхности ( $Y_2$ ). Для снижения затрат и времени эксперимента принят план  $3^3/27$ , что содержит 27 опытов [129].

В формальном виде постановка задачи имеет вид:

$$\hat{Y}_j = f_j(X_1, X_2 \dots X_k),$$

где  $\hat{Y}_j$  – функции цели или критерий качества,  $X_1, X_2 \dots X_k$  – факторы, которые влияют на критерий качества; k – общее количество факторов.

В нашем случае выбраны три фактора на трех уровнях:  $X_1$  – материал: сталь (с), дюралюминий (д), латунь (л);  $X_2$  – давление зажима ИЗП: 40, 50, 60 Мпа;  $X_3$  – глубина резания: 1, 2, 3, мм.

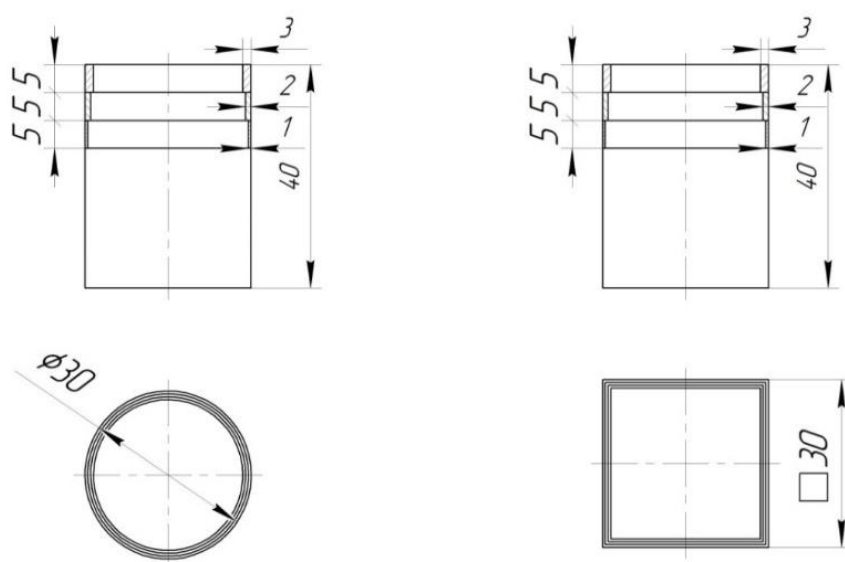


Рис. 6.26. Схемы обработки деталей

Все эксперименты проведены при обработке круглых и квадратных заготовок (рис. 6.26), на фрезерном станке с ЧПУ мод. HURCO VM50t

(рис. 6.27), поэтому приняты критерии качества  $Y_{1кр}$ ,  $Y_{2кр}$  для круглой заготовки и  $Y_{1кв}$ ,  $Y_{2кв}$ , квадратной заготовки. Эти критерии выражены через  $C_{кр}$  – геометрическая точность для круглой заготовки и  $C_{кв}$  – геометрическая точность для квадратной заготовки.

Таким образом:

– **для круглой заготовки:** – критерии геометрической точности ( $C_{кр}$ );  $Y_{2кр}$  – критерии качества шероховатости ( $R_z$ ).

– **для квадратной заготовки:**  $Y_{1кв}$  – критерии геометрической точности ( $C_{кв}$ );  $Y_{2кв}$  – критерии качества шероховатости ( $R_z$ ).

Кодированное обозначение уровней 1, 1, 2, факторов  $F_1 \dots F_3$  для каждого из опытов.

По выше упомянутым данным строится план эксперимента в виде матрицы [98, 123]

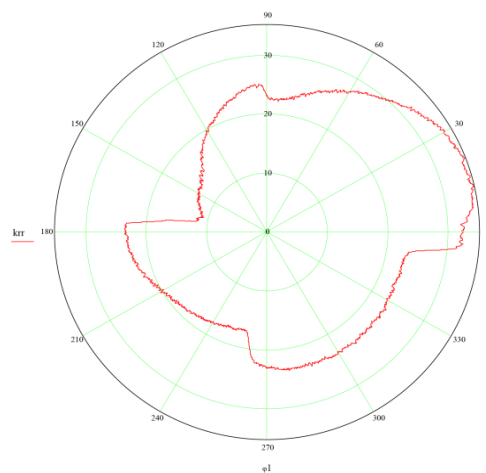


*Рис. 6.27. Фрезерный станок с ЧПУ мод. HURCO VMX50t (США)*

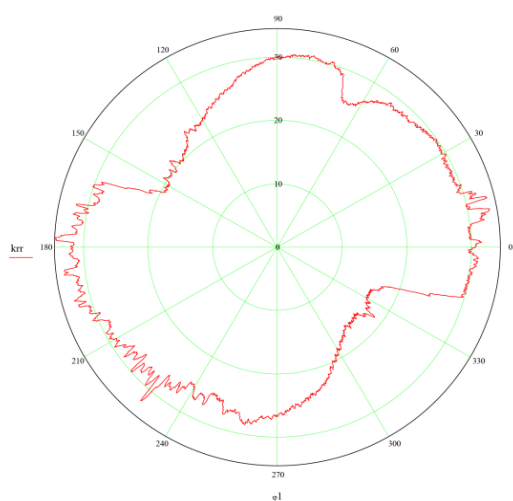
В качестве инструмента была выбрана пальцевая фреза 10 мм с использованием сменной четырехлепестковой цанги. При обработке изменялись параметры: давление зажима –  $P_z$ , глубина резания –  $t$  и материал детали –  $M$ . Измерение деталей круглого сечения производились на кругломере (рис.6.28).



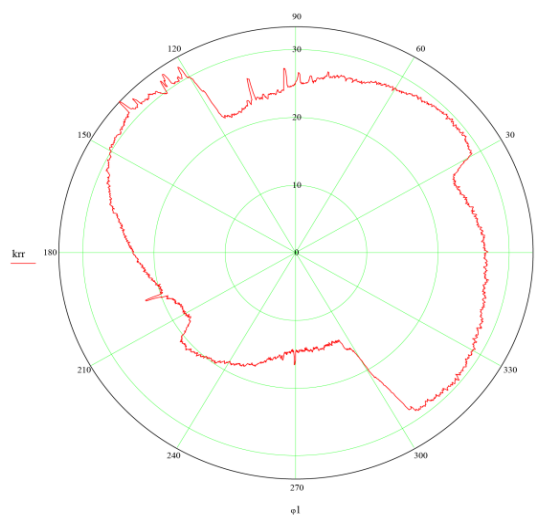
Рис. 6.28. Кругломер, на котором проводились измерения



а)



б)



в)

Рис. 6.29. Примеры круглограмм детали, обработанной при давлении зажима в ИЗП  $p_z = 60 \text{ МПа}$ , глубина резания  $t=1 \text{ мм}$ , первое сечение: а – из латуни ЛС59; б – из стали Ст45; в – из дюралюминия Д16Т

## 6.5. Экспериментальные исследования силовых и жёсткостных характеристик высокоскоростного широкодиапазонного эксцентрикового ИЗП

Общий вид используемого широкодиапазонного эксцентрикового ИЗП без ключа типа ЭСФПШ-16 на максимальный диаметр инструментов (сверл, фрез) приведен на рис.6.9, а на рис.6.30 он показан в разобранном виде вместе с оправками.



*Рис. 6.30. Опытный образец ИЗП типа ЭСФПШ-16 с оправками в разобранном виде*

Оправки были изготовлены стальными калеными и шлифованными трех диаметров  $d = 8, 10, 12$  мм с квадратным хвостовиком под динамометрическую рукоятку, которая использовалась для измерения момента прокручивания в ИЗП типа CoreGrip (см. рис.6.18, б).

Суммарная радиальная сила зажима для диаметра инструмента  $d = 16$  мм измерялась цанговым динамометром (см. рис.6.10).

При приложении с помощью динамометрического ключа к конусной втулке момента  $M_{a1}^1$  от 0 до 500 Н·мм (через 100 Н·мм), что соответствует окружной силе  $F_{p1}$  от 0 до 25 Н (через 5 Н) установлена зависимость между

первым входом и выходом на этапе 1 при выборке зазора и предварительном зажиме (рис.6.31).

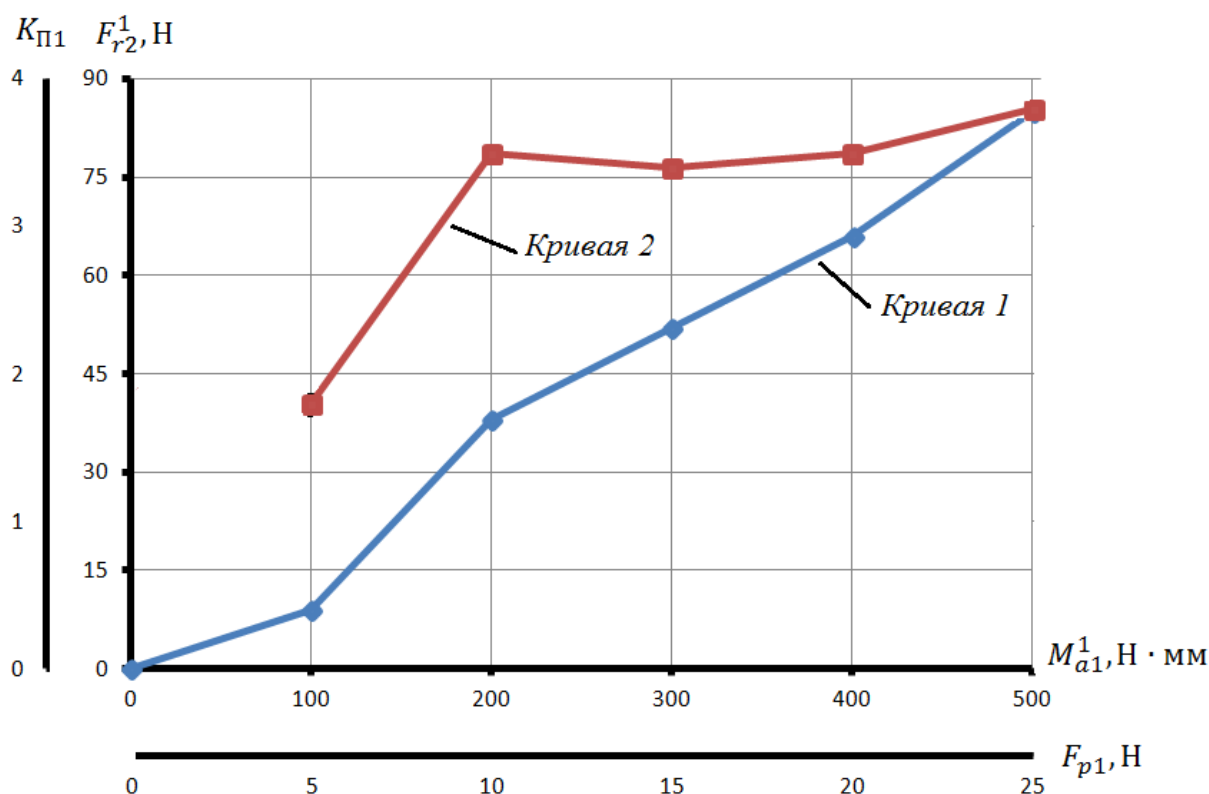


Рис. 6.31. Зависимость суммарной радиальной силы зажима (кривая 1) и коэффициента усиления (кривая 2) ИЗП типа ЭСФПШ-16 от выходной нагрузки от конусной втулки (предварительный зажим на этапе 1)

Средний коэффициент усиления на этапе 1 составит:

$$K_{п1} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^{n=5} K_{п1i} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^{n=5} \frac{F_{r2i}^1}{F_{p1i}} = \frac{1,8 + 3,5 + 3,4 + 3,5 + 3,8}{5} = 3,2$$

При приложении с помощью динамометрического ключа к гайке в конус патрона момента  $M_{a1}^2$  от 0 до 2000 Н·мм (через 500 Н·мм) установлена зависимость между вторым входом и выходом на этапе 2 при окончательном натяге – зажиме и выбранном зазоре (рис.6.32).



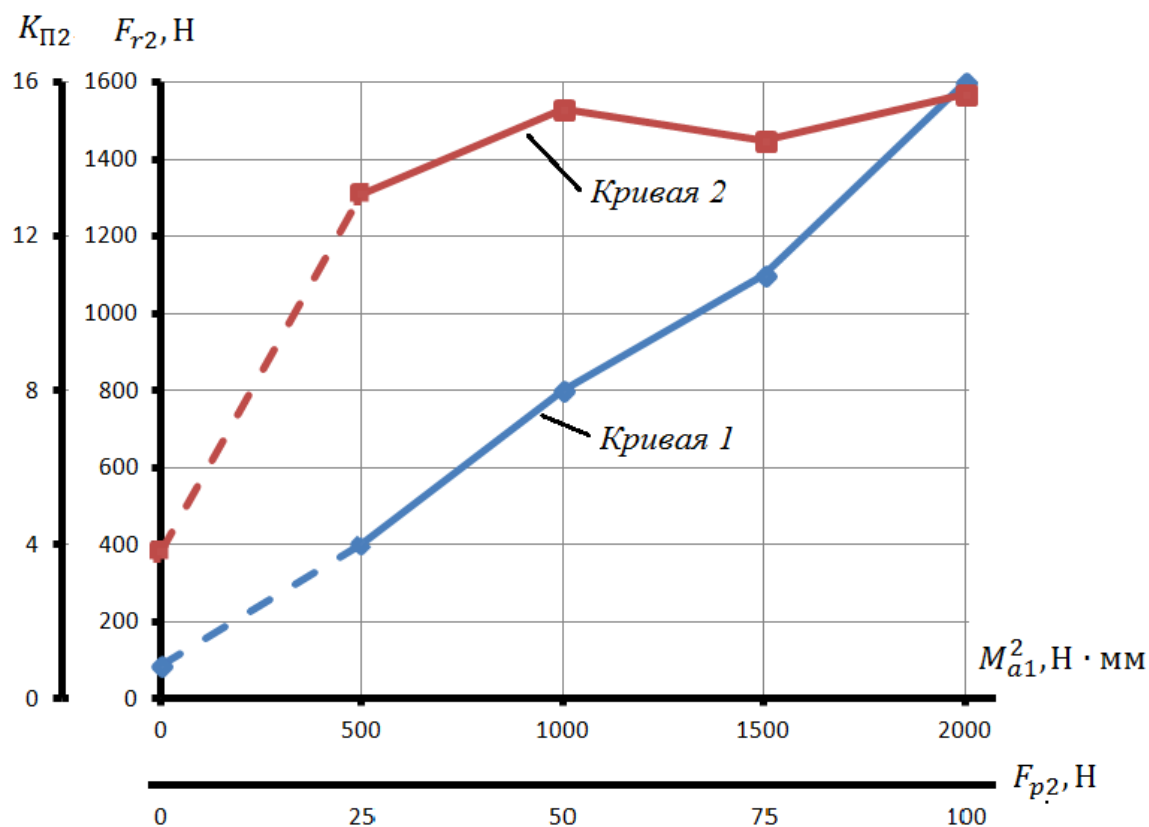


Рис. 6.32. Зависимость суммарной радиальной силы зажима (кривая 1) и коэффициента усиления (кривая 2) ИЗП типа ЭСФПШ-16 от дополнительной выходной нагрузки от гайки (окончательный натяг – зажим на этапе 2)

Средний коэффициент усиления на этапе 2 составит:

$$K_{\Pi 2} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n=4} K_{\Pi 2i} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^{n=4} \frac{F_{r2i}}{F_{p2i}} = \frac{13,1 + 15,3 + 14,5 + 15,7}{4} = 14,65$$

Таким образом благодаря второй кинематической цепи ИЗП обеспечивает высокий коэффициент усиления по сравнению со стандартными сверлильными и цанговыми патронами, имеющими  $K_{\Pi}$  от 1,5 до 3 [ 107, 108].

Согласно методики (см. п.6.2. и рис.6.11.) установлены экспериментальные зависимости момента прокручивания  $M_{\text{пр}}$  оправок диаметрами  $d = 8, 10, 12$  мм от разной настройки крутящего момента  $M_{a1}^2$  после выборки зазора на этапе 2 окончательного зажима (рис.6.33).

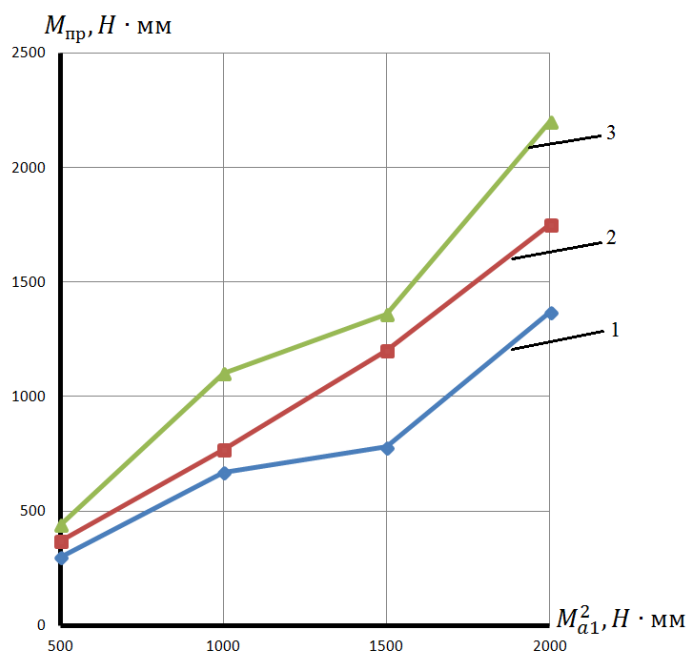


Рис. 6.33. Зависимость момента прокручивания оправок от момента ручного зажима на входе 2 (натяг системы) для диаметров: 1 – 8мм; 2 – 10мм; 3 – 12мм.

Для измерения радиальной жёсткости системы «оправка – патрон» испытания проведены на токарном станке в лаборатории кафедры КСМ (рис.6.34).



Рис. 6.34. Фотография установки для замера радиальной жесткости системы «патрон – инструмент – шпиндель» при нагружении оправок зажатых в ИЗП типа ЭСФПШ-16

Результаты замеров сведены в табл.6.4 (приложение Г.4), по которой построены графики отжатий от приложенной нагрузки  $F_p$  от 0 до 500 Н (через 100 Н) при разных моментах зажима  $M$  (рис.6.35).

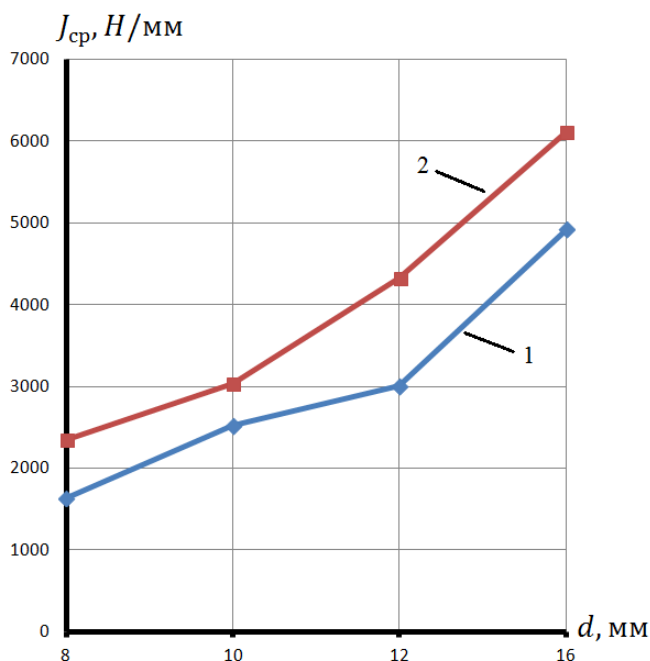


Рис. 6.35. Графики зависимости радиальной жёсткости системы «патрон – инструмент – шпиндель» от диаметра оправки (инструмента) при моментах ручного зажима  $M_{a1}^2$  на входе 2: 1 – 500 Н · мм; 2 – 1000 Н · мм

Экспериментальные исследования силовых и жёсткостных характеристик широкодиапазонного эксцентрикового ИЗП показали существенное повышение жесткости при увеличении силы зажима (рис. 6.32, 6.35), что способствует повышению эффективности использования предложенных ИЗП в производстве при сверлении и фрезеровании.

Таблица 6.4

Жесткость оправок различного диаметра  $d$  при различном моменте  $M_{a1}^2$  на вылете  $l = 60$  мм

| d, мм | Момент зажима $M_{a1}^2, Н\cdot мм$ | Сред. знач. $j_{cp}, Н/мм$ |
|-------|-------------------------------------|----------------------------|
| 8     | 500                                 | 1634                       |
|       | 1000                                | 2352                       |
| 10    | 500                                 | 2522                       |
|       | 1000                                | 3038                       |
| 12    | 500                                 | 3004                       |
|       | 1000                                | 4324                       |
| 16    | 500                                 | 4918                       |
|       | 1000                                | 6117                       |

### 6.6. Сравнительные экспериментальные исследования статических жесткостных характеристик цанговых патронов одинарного и двойного зажима

Эксперименты были проведены с цангами одинарного зажима применительно к МТА мод. 1А240-6 (цельная на  $d_{\max} = 29,4; 29,6; 29,8; 30,0$  мм) (рис. 6.36, а) и МТА мод. 1Б240-6 (со сменными вкладышами на  $d = 30$  мм, оправками на  $d = 29,4; 29,6; 29,8; 30,0$  мм и трубами  $d = 29,6$  и  $30,0$  мм) (рис. 6.36, б).



Рис. 6.36. Опытные образцы испытываемых цанговых патронов к МТА

Для замера деформаций прутка под воздействием радиальной силы  $F_p$  были изготовлены специальные справки с просверленным по всей длине отверстием. Через систему рычагов деформация замерялась индикатором, установленным на продольном суппорте. Результаты замеров сведены в табл.6.5.

Радиальная сила изменялась в тех же пределах: от 250 до 1000 кг через 250 кг. Деформация замерялась при вылете прутка, равном 50 мм (см. рис. 6.15).

Таблица 6.5

*Отжатия пустотелых оправок в цанговых патронах одинарного и двойного зажима МТА мод. 1А240-6*

| У, мм<br>F <sub>p</sub> , кг | Точки замера |     |       |    |       |      |                                |           |     |    |   |   |   |                                |
|------------------------------|--------------|-----|-------|----|-------|------|--------------------------------|-----------|-----|----|---|---|---|--------------------------------|
|                              | d=29,6 мм    |     |       |    |       |      |                                | d=30,0 мм |     |    |   |   |   |                                |
|                              | 1            | 2   | 3     | 4  | 5     | 6    | Координата центра поворота, мм | 1         | 2   | 3  | 4 | 5 | 6 | Координата центра поворота, мм |
| 250                          | 151          | 75  | 15    | 0  | 0     | 0    | 22,5                           | 48        | 12  | 0  | 0 | 0 | 0 | 5                              |
| 500                          | 348          | 180 | 58    | 6  | 0     | -7,5 | 45                             | 165       | 29  | 2  | 0 | 0 | 0 | 22,5                           |
| 750                          | 456          | 277 | 105   | 15 | -3    | -10  | 50                             | 278       | 98  | 26 | 0 | 0 | 0 | 22,5                           |
| 1000                         | 624          | 357 | 145,5 | 29 | -10,5 | -24  | 50                             | 391       | 151 | 43 | 0 | 0 | 0 | 22,5                           |
| 250                          | 35           | 12  | 0     | 0  | 0     | 0    | 5                              | 42        | 9   | 0  | 0 | 0 | 0 | 6                              |
| 500                          | 105          | 47  | 10    | 0  | 0     | 0    | 22,5                           | 105       | 22  | 0  | 0 | 0 | 0 | 5                              |
| 750                          | 180          | 77  | 36    | 0  | 0     | 0    | 22,5                           | 201       | 52  | 3  | 0 | 0 | 0 | 22,5                           |
| 1000                         | 277          | 117 | 42    | 0  | 0     | 0    | 22,5                           | 315       | 85  | 20 | 0 | 0 | 0 | 22,5                           |

По полученным данным построены графики упругих линий (рис. 6.37). Из графиков видна эффективность применения патрона с двойным зажимом – деформации в этом случае гораздо с двойным зажимом – деформации в этом случае гораздо меньше.

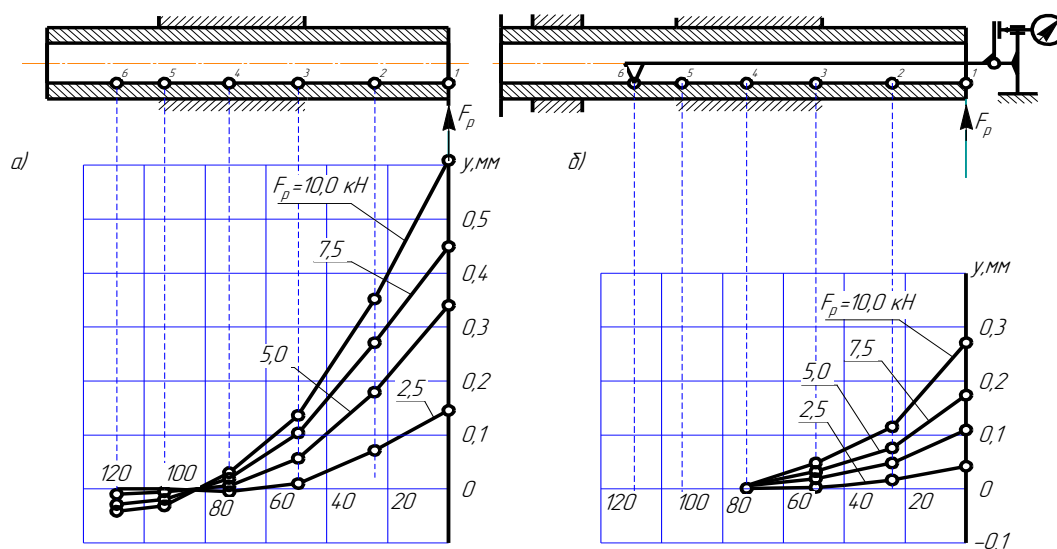


Рис. 6.37. Упругие линии деформации трубы по замерам согласно рис.6.15 при зажиме: а – одинарном; б – двойном

Например, при зажиме оправки  $\varnothing 27,6$  мм (равной номинальному диаметру рабочего отверстия основной цанги (деформация 1-й точки при зажиме одной цангой равна 0,624 мм, а при зажиме двумя цангами – 0,277 мм, т.е. в 2,25 раза меньше. Замер деформации прутков  $Y_p$  относительно шпинделя проводился на  $\Psi$  расстоянии 100 мм от торца патрона с помощью индикатора (см. рис.6.14) индикаторная стойка закреплялась на продольном суппорте. Радиальная сила  $P_p$  создавалась с помощью нагрузочного устройства, установленного на поперечном суппорте, через динамометр сжатия ДС-3000. Этим динамометром обеспечивалась радиальная нагрузка  $F_p$  от 250 до 1000 кг через 250 кг. На каждом шпинделе было произведено по 6 замеров для шести различных положений шпинделя (через  $60^\circ$ ). За начало отсчета взято положение, когда сила  $F_p$  действовал вдоль разрезки, расположенной с противоположной стороны. Радиальная жесткость подсчитывалась по формуле:  $J_p = \frac{F_p}{Y_p}$ . Полученные данные сведены в таблицу, по которым построены круговые диаграммы отжатий в стандартной цанге с вкладышами (рис. 6.38) в цанговом патроне с двойным зажимом с одной и двумя цангами (рис. 6.39).

Из анализа результатов проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы: 1. Максимальная жесткость наблюдается при зажиме оправки на 0,2 мм выше диаметра рабочего отверстия цанги зажима. 2. С увеличением диаметра зажимаемого прутка жесткость увеличивается, так как увеличивается радиальная сила зажима. Например, для патрона с двойным зажимом для  $\Psi = 60^\circ$  и  $E_p = 750$  кг жесткость изменяется от 680 кг/мм до 765 кг/мм. 3. Максимальная жесткость наблюдается, когда радиальная сила направлена вдоль разрезки лепестков цанги зажима. Например, для патрона серийного станка при зажиме прутка  $d = 30$  мм и  $F_p = 1000$  кг для  $\Psi = 300^\circ - Y_p = 0,94$  мм, а при  $\Psi = 300^\circ - Y_p = 120^\circ - Y_p = 1,23$  мм. 4. При зажиме прутка только основной цангой в патроне с двойным зажимом радиальная жесткость ниже в среднем на 30%. 5. Как видно из приведенных на рис. 6.38 и 6.39 круговых диаграмм жесткости, радиальная жесткость

изменяется и величина ее зависит от направления действия радиальной силы по отношению к положению разрезки лепестков. Максимальная жесткость наблюдается при действии радиальной силы вдоль разрезки, расположенной с противоположной стороны.

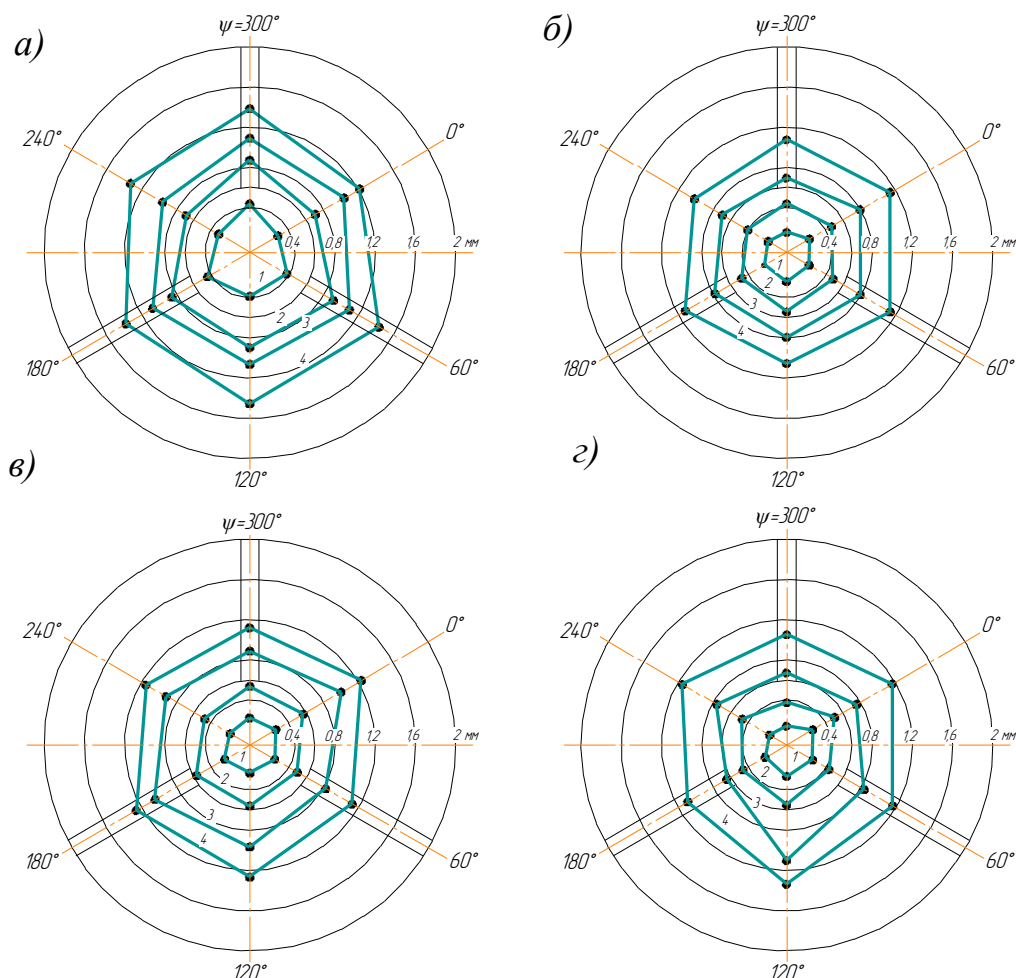


Рис. 6.38. Круговые диаграммы отжатий оправок диаметрами 29,4 (а), 29,6 мм (б), 29,8 мм (в), 30,0 мм (г) в стандартной цанге с вкладышами при нагружении силой  $F_p$ : 1 – 2,50 кН; 2 – 5,0 кН; 3 – 7,50 кН; 4 – 10,0 кН

### 6.7. Экспериментальные исследования статической жесткости высокоскоростного шпиндельного узла с ручным цанговым зажимом

Эксперименты проводились по методике, изложенной в п. 6.2 для разных вылетов пиноли самодействующего мотор-шпинделя (рис. 6.40, а) на станке-стенде (рис. 6.40, б).

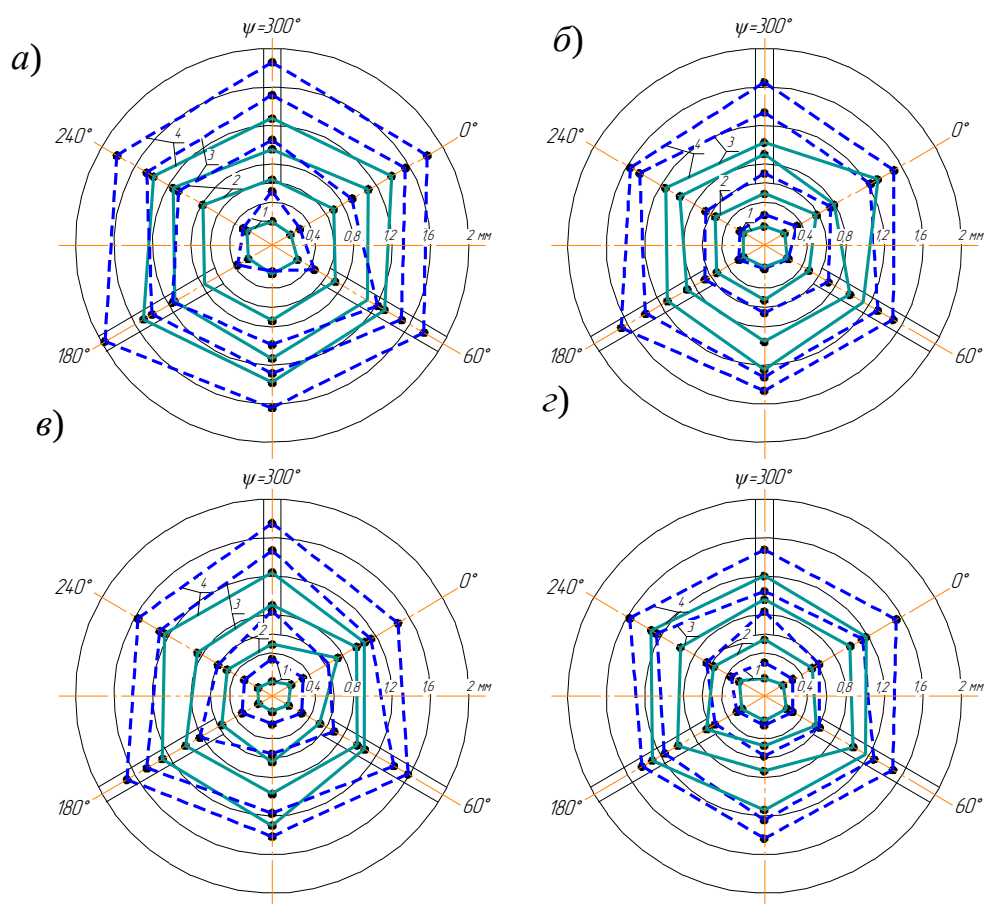


Рис. 6.39. Круговые диаграммы отжатий оправок диаметрами 29,4 (а), 29,6 мм (б), 29,8 мм (в), 30,0 мм (г) в цанговом патроне двойного зажима (сплошные линии с двумя цангами, пунктирные – с одной цангой) при нагружении силой  $F_p$ : 1 – 2,5 кН; 2 – 5,0 кН; 3 – 7,5 кН; 4 – 10,0 кН

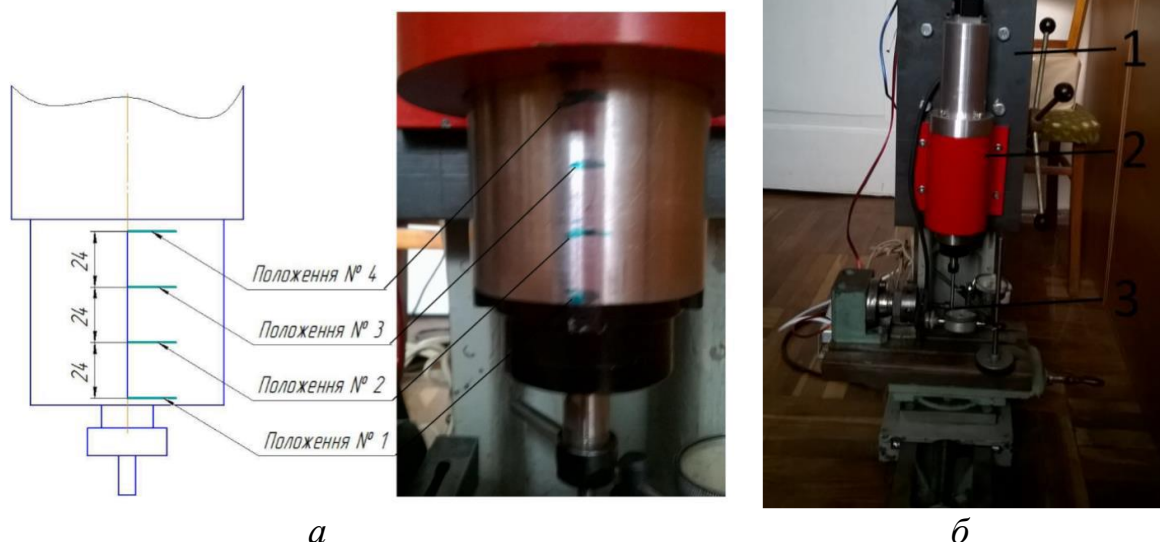


Рис. 6.40. Положения пиноли (а) и стенд (б): 1 – станок; 2 – мотор-шпиндель; 3 – система измерения жесткости; 4 – система управления координатой  $z$  шпинделя в пиноли



Измерения проводились с помощью динамометра камертонного типа, которым осуществлялись нагрузки от 0 до 800 Н с интервалом в 200 Н и индикатора  $I_y$  для определения отклонений  $U_p$  (рис. 6.41). Все измерения проводились на индикаторе с ценой деления 0,01 мм, поэтому все значения показаний индикатора  $I_y$  записаны в таблицах 6.5-6.8, соответственно умножаем на это число. Эксперимент проводился при циклических нагрузках и разгрузках.



Рис. 6.41. Фото измерения упругих радиальных отжатий

Таблица 6.5

Радиальные отжатия  $U_p$  и жесткости  $j_p$  системы в положении №1

| $F_p$ , Н | Показания индикатора $I_y$ |    |    |    |     |    |                  |      | Среднее значение, $j_p$ , Н/мм |
|-----------|----------------------------|----|----|----|-----|----|------------------|------|--------------------------------|
|           | I                          |    | II |    | III |    | Среднее значение |      |                                |
|           | Н                          | Р  | Н  | Р  | Н   | Р  | Н                | Р    |                                |
| 0         | 0                          | 1  | 0  | 0  | 0   | 2  | 0                | 1    | 0                              |
| 200       | 3                          | 6  | 4  | 3  | 2   | 5  | 3                | 4.6  | 6666                           |
| 400       | 8                          | 12 | 7  | 9  | 7   | 9  | 7.3              | 10   | 5479                           |
| 600       | 13                         | 16 | 12 | 12 | 12  | 13 | 12.3             | 13.6 | 4878                           |
| 800       | 19                         | -  | 16 | -  | 17  | -  | 17.3             | -    | 4624                           |
|           |                            |    |    |    |     |    |                  |      | $\Sigma j_p=4329$              |

Таблица 6.6

Радиальные отжатия  $U_p$  и жесткости  $j_p$  системы в положении №2

| $F_p, Н$ | Показания индикатора $I_y$ |    |    |    |     |    |                  |      | Среднее значение, $j_p, Н/мм$ |
|----------|----------------------------|----|----|----|-----|----|------------------|------|-------------------------------|
|          | I                          |    | II |    | III |    | Среднее значение |      |                               |
|          | Н                          | Р  | Н  | Р  | Н   | Р  | Н                | Р    |                               |
| 0        | 0                          | 3  | 0  | 5  | 0   | 4  | 0                | 4    | 0                             |
| 200      | 5                          | 7  | 4  | 8  | 5   | 10 | 4.6              | 8.3  | 4347                          |
| 400      | 10                         | 14 | 10 | 13 | 9   | 15 | 9.6              | 14   | 4040                          |
| 600      | 15                         | 18 | 17 | 18 | 18  | 19 | 16.6             | 18.3 | 3614                          |
| 800      | 21                         | -  | 20 | -  | 22  | -  | 21               | -    | 3809                          |
|          |                            |    |    |    |     |    |                  |      | $\Sigma j_p=3162$             |

Таблица 6.7

Радиальные отжатия  $U_p$  и жесткости  $j_p$  системы в положении №3

| $F_p, \text{ Н}$ | Показания индикатора $I_y$ |    |    |    |     |    |                  |      | Среднее значение, $j_p, \text{ Н/мм}$ |
|------------------|----------------------------|----|----|----|-----|----|------------------|------|---------------------------------------|
|                  | I                          |    | II |    | III |    | Среднее значение |      |                                       |
|                  | Н                          | Р  | Н  | Р  | Н   | Р  | Н                | Р    |                                       |
| 0                | 0                          | 4  | 0  | 9  | 0   | 7  | 0                | 6.6  | 0                                     |
| 200              | 6                          | 9  | 7  | 12 | 10  | 15 | 7.6              | 12   | 2631                                  |
| 400              | 12                         | 15 | 11 | 18 | 19  | 20 | 14               | 17.6 | 2857                                  |
| 600              | 20                         | 20 | 18 | 20 | 25  | 24 | 21               | 21.3 | 2857                                  |
| 800              | 23                         | -  | 27 | -  | 30  | -  | 26.7             | -    | 2926                                  |
|                  |                            |    |    |    |     |    |                  |      | $\Sigma j_p=2254$                     |

Таблица 6.8

Радиальные отжатия  $U_p$  и жесткости  $j_p$  системы в положении №4

| Таблица 1. Показания индикатора $I_y$ и жесткости $j_p$ системы в положении 1 и 2 |                            |    |    |    |     |    |                  |     |                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----|----|----|-----|----|------------------|-----|--------------------------------------|
| $F_p, \text{Н}$                                                                   | Показания индикатора $I_y$ |    |    |    |     |    |                  |     | Среднее значение, $j_p, \text{Н/мм}$ |
|                                                                                   | I                          |    | II |    | III |    | Среднее значение |     |                                      |
|                                                                                   | Н                          | Р  | Н  | Р  | Н   | Р  | Н                | Р   |                                      |
| 0                                                                                 | 0                          | 2  | 0  | 4  | 0   | 10 | 0                | 5.3 | 0                                    |
| 200                                                                               | 10                         | 14 | 8  | 11 | 13  | 17 | 10.3             | 14  | 1941                                 |
| 400                                                                               | 21                         | 26 | 14 | 22 | 21  | 27 | 18.6             | 25  | 2150                                 |
| 600                                                                               | 29                         | 39 | 24 | 36 | 29  | 39 | 27.3             | 38  | 2197                                 |
| 800                                                                               | 41                         | -  | 38 | -  | 40  | -  | 39.6             | -   | 2020                                 |
|                                                                                   |                            |    |    |    |     |    |                  |     | $\Sigma j_p=1661$                    |

По данным, полученным из эксперимента, были построены графики зависимостей:  $U_p = f(F_p)$  - упругих радиальных отжатий от силы  $F_p$  при циклических нагрузках и разгрузках (рис. 6.42)  $j_p = f(p\text{№})$ , где  $p\text{№}$  - номер положения шпинделя в пиноли (рис. 6.43).

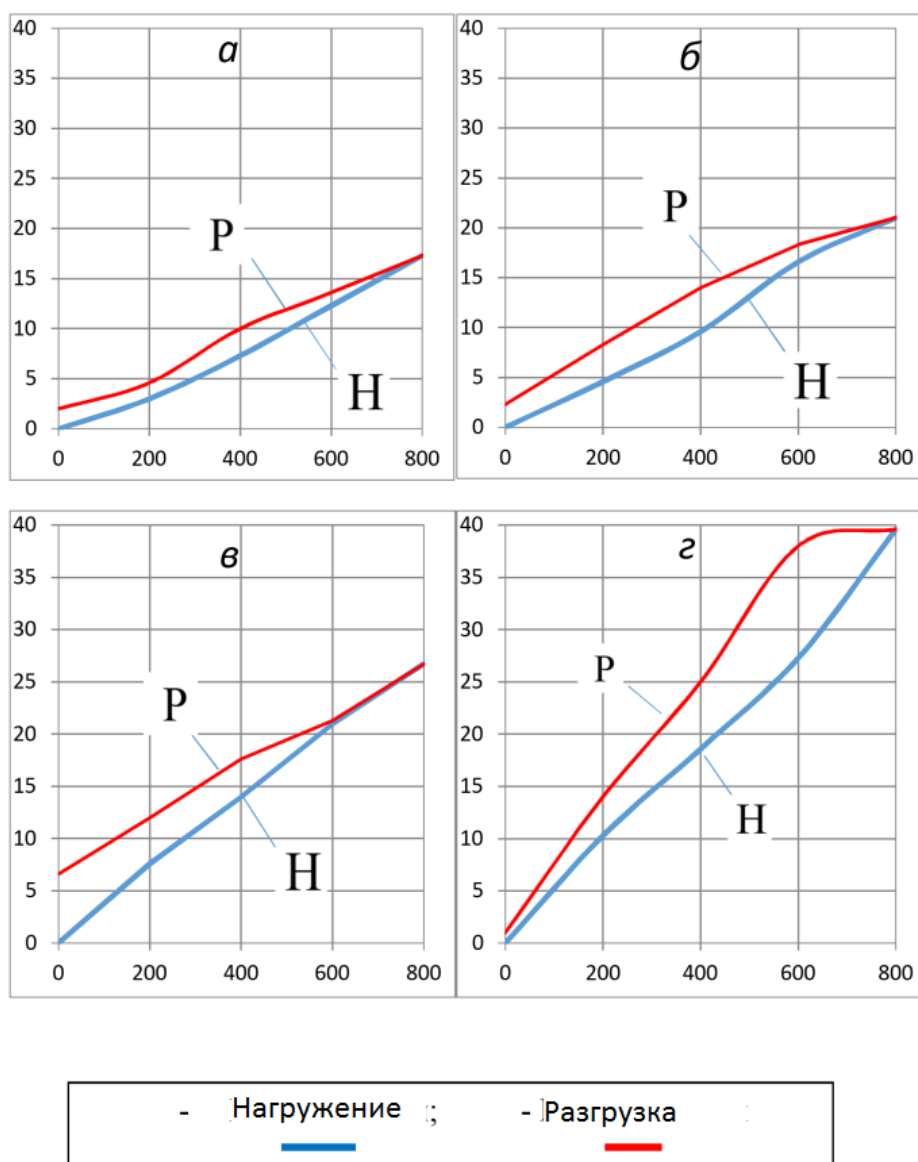
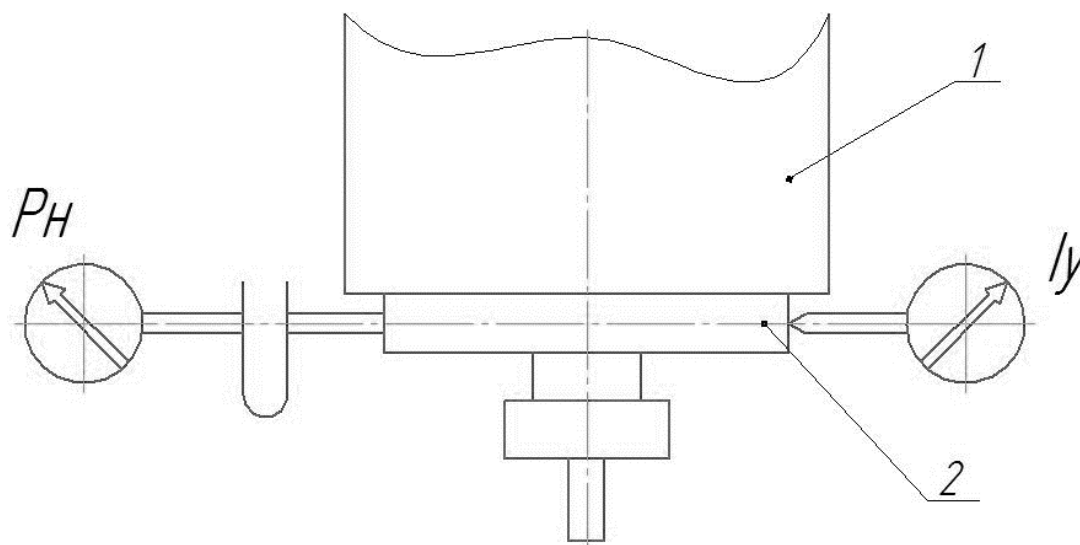


Рис. 6.42. График зависимости отжатий  $U_p$  от силы  $P_p$  при нагрузке и разгрузке: а - при положении №1 (П№1) шпинделя в пиноли; б - при положении №2 (П№2) шпинделя в пиноли; в - при положении №2 (П№2) шпинделя в пиноли; г - при положении №2 (П№2) шпинделя в пиноли



Рис. 6.43. График зависимости жесткости  $j_p$  от № положения шпинделя в пиноли

Отдельно были проведены отжатыя пиноли 2 относительно корпуса ШУ 1 (рис. 6.44).



*Рис. 6.44. Схема измерения отклонения пиноли относительно корпуса самодействующего мотор-шпинделя*

Измерения имеют место при большом ходе шпинделя в пиноли, поскольку в нашем случае ход малый и их можно не учитывать. Учитывается только люфт шпинделя в пиноли из-за несовершенства изготовления внутренней поверхности пиноли. Как показали испытания, люфт составляет около 1 мм. Поэтому опыты на жесткость проводились после выборки данного люфта, если этого не сделать, тогда весь эксперимент теряет смысл. Чтобы избежать данного эффекта пиноль должна быть изготовлена совершенно с соблюдением высокотехнологичного технологического процесса [1, 4, 6, 7]. Это требует доработки конструкции и дальнейших исследований.

## Выводы

1. Теоретические и экспериментальные исследования и показали, что силовые и жесткостные характеристики ИЗП типа SonoGrip напрямую зависят от давления зажима оправки (инструмента) в гидроцилиндре патрона, жесткости упругой приводной втулки и радиального зазора между ней и хвостовиком инструмента.

2. При увеличении силы зажима влияние центробежных сил будут уменьшаться, что приводит к увеличению силы зажима (давления зажима) и повышению жесткостных характеристик.

3. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований силовых характеристик по моменту прокручивания, силы проталкивания и коэффициента усиления патрона свидетельствует о достоверности предлагаемых теоретических зависимостей.

4. Минимальное расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований наблюдается при коэффициенте сцепления  $\mu_1 = 0,2$ , что должно учитываться при расчетах.

5. Приведенная методика многофакторного планирования эксперимента сокращает затраты и время испытаний, может использоваться во многих случаях при оценке эффективности применения ИЗП различных конструкций. Представленная обработка результатов испытания показала, что форма обработанной детали существенно зависит от давления, но мало изменяется при его высоком значении. Профиль обработанной поверхности во многом зависит от параметров цанги и глубины резания.

6. Экспериментальные исследования отжатий трубы в различных местах цанговых патронов показали, что в случае одинарного зажима центр условного упруго-фрикционного шарнира смещается к переднему торцу губок цанги, а при двойном зажиме отжатия трубы в противоположном направлении по мере удаления от переднего торца цанги исчезают и их значения уменьшаются при наружном диаметре трубы, разном диаметру отверстия губок цанги. Жесткость зажима в цанговом патроне двойного зажима в среднем увеличивается в 3 раза (при одинарном зажиме в цанге со сменными вкладышами) и в 1,5 – 2 раза (если стандартная цанга с цельными губками без вкладышей).

## РАЗДЕЛ 7

### Разработка рекомендаций и расширение области применения результатов исследований

#### 7.1. Примеры реализации генетико-морфологического подхода в зажимных патронах и захватных устройствах промышленных роботов с различными силовыми потоками

Различные принципы (способы) зажима определяются на хромосомном уровне, где в генетико-морфологической формуле описания присутствует: 1) вход в виде силы  $F_1$  в декартовой ( $F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}$ ) или цилиндрической ( $F_{a1}, F_{r1}, F_{t1}$ ) системе координат, момента  $M_1$  ( $M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}$ ) или ( $M_{a1}, M_{r1}, M_{t1}$ ); 2) выход в виде силы зажима, нормальной к цилиндрической ( $F_{y2}$  или  $F_{r2}$ ) и торцевой ( $F_{x2}$  или  $F_{a2}$ ) поверхности ОЗ; 3) преобразователь перемещения, силы, энергии в виде передаточного усилительного звена определенного исполнения или совокупности звеньев. К механическим преобразователям относится ограниченное количество видов (см. разделы 2 и 3 диссертации): 1) рычажные ( $LV$ ); 2) клиновые ( $WD$ ); 3) спиральные ( $SL$ ); 4) плунжерные ( $PL$ ); 5) винтовые ( $SC$ ); 6) зубчатые ( $GR$ ); 7) пружинные или упругие ( $SR$ ).

Преобразователи  $LV$  и  $GR$  характеризуются плечами рычага или радиусами зубчатых колес, преобразователи  $WD$ ,  $SL$  и  $PL$  – углом наклона (клина, спирали, плунжера), а упругие преобразователи  $SR$  – формой исполнения, которая может быть различной, а её изменения сложными в математическом описании с учётом физических явлений их напряженно-деформированного состояния.

Используя в генетико-морфологической модели обозначения сил (моментов) и преобразователей можно целенаправленно, исходя из поставленной задачи осуществлять структурно-схем синтез зажимных патронов захватных устройств и их приводов, реализующих различные силовые (энергетические) потоки, и источники

энергии и поля, определяющих различные принципы (способы) зажима, примеры которых будут приведены ниже в данном разделе.

Среди них могут оказаться до сих пор неизвестные структуры и схемы на уровне изобретений, что позволяет не только прогнозировать с вероятностью до 50%, но и предвидеть с 100% вероятностью (генетическое предвидение) [234].

По источнику передатчику и преобразователю энергии можно выделить следующие семь видов с комбинациями, которые, как показала практика, применяются в механизмах манипулирования объектах механизмах манипулирования объектах [86, 104, 107-111, 122, 130, 176, 186, 189-191, 225, 236] со следующими обозначениями:

**MSB** (mechanical solid body) – механические передачи и преобразователи с помощью твердых тел;

**EMF** (electromagnetic field) – электромагнитные поля, действующие непосредственно или в составе (структуре) электромеханических систем [281, 283] передачи и преобразования;

**LFM** (liquid flowing medium) – жидкотекучие и вязкие среды для передачи и преобразования (изменение параметров потока);

**AVM** (air and vacuum medium) – воздушные (газовые) среды для передачи, преобразования и притягивания, в том числе вакуум;

**CMF** (constant magnetic field) – магнитные поля притягивания и отталкивания;

**TRF** (thermal field heating) – тепловые потоки расширения при нагреве и сжатия при охлаждении;

**CFF** (centrifugal force) – центробежные силы при вращении неуравновешенных масс, сплошных тел и толстостенных цилиндров.

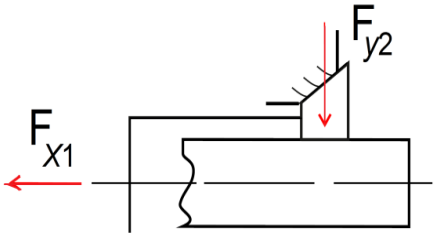
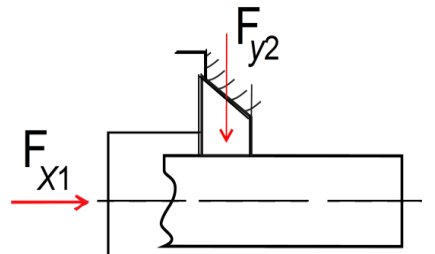
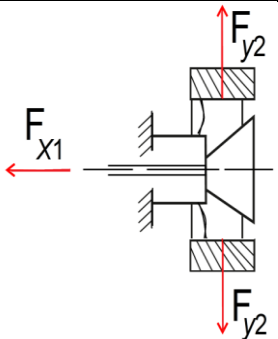
Примеры описания зажимных патронов с различными силовыми потоками и преобразователям приведены в табл. 7.1.

Анализ силовых характеристик ИЗП с генетической формулой  $F_{a1} - F_{r2}$  при вращении (см. п. 4.4) показал, что уменьшить влияние центробежной силы  $F_{\omega}$  на

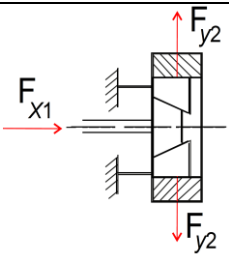
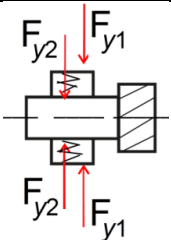
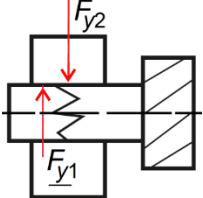
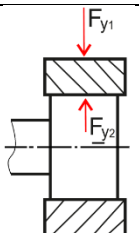
выходную радиальную силу зажима можно за счет уменьшения жесткости подсистемы «зажимной элемент – объект зажима», например, выполняя хвостовик инструмента пустотелым и дополнительно зажав его изнутри. Это можно достичь, используя центробежные силы губок цилиндрической цанги, введенной в отверстие хвостовика инструмента [338] (рис. 7.1, приложение Д).

Таблица 7.1

*Примеры описания принципов одинарного зажима на хромосомном уровне с различными силовыми потоками (фрагмент)*

| №<br>п/п | Схема зажима                                                                        | Генетическая<br>формула            | Комментарий                                                  |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1        | 2                                                                                   | 3                                  | 4                                                            |
| 1        |   | $F_{x1} - WD - F_{y2}$             | Наружный<br>цанговый<br>(клиновой)<br>зажим<br>тянущего типа |
| 2        |  | $\underline{F}_{x1} - WD - F_{y2}$ | Наружный<br>цанговый<br>зажим<br>нажимного<br>типа           |
| 3        |  | $F_{x1} - WD - \underline{F}_{y2}$ | Цанговый<br>зажим изнутри<br>тянущего типа                   |



|   |                                                                                    |                                                |                                                                 |
|---|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 4 |   | $\underline{F}_{x1} - WD - \underline{F}_{y2}$ | Цанговый зажим изнутри нажимного типа                           |
| 5 |   | $F_{y1} - SR - F_{y2}$                         | Ф. Shunck (Tribos)<br>Деформирование упругой втулки при разжиме |
| 6 |   | $\underline{F}_{y1} - SR - F_{y2}$             | Охлажденную деталь устанавливают в отверстие корпуса            |
| 7 |  | $F_{y1} - SR - \underline{F}_{y2}$             | Нагретое кольцо устанавливают на оправку                        |

Синтезированный патрон содержит неподвижный ЗЭ в виде тонкостенной втулки 1 с коническим хвостовиком 10 и цилиндрическим отверстием под фрезу 2 с торцами «а» и «в» по обе стороны и внешней конической поверхностью «с» с углом. По внешней поверхности «с» ЗЭ 1 взаимодействует с подвижной втулкой 3 с каналами для подвода масла 4 (зажим) и 5 (разжим). Между торцами «а» и «в» размещены две барокамеры 6 (зажим) и 7 (разжим), которые имеют входы (выходы 8, 9, размещенные с противоположных сторон втулки 3 патрона для связи с гидросистемой (не показано).

Генетическая формула синтезированного невращающегося ЗП ( $\omega = 0$ ) запишется так:

$$F_{a1} - WD - F_{r2}. \quad (7.1)$$

Для вращающегося ЗП ( $\omega \neq 0$ ) возникает еще один силовой поток (вход 2) при отсутствии цанги 11 с неуравновешенными губками 12, что изменяет генетическую формулу (рис. 7.1, б).



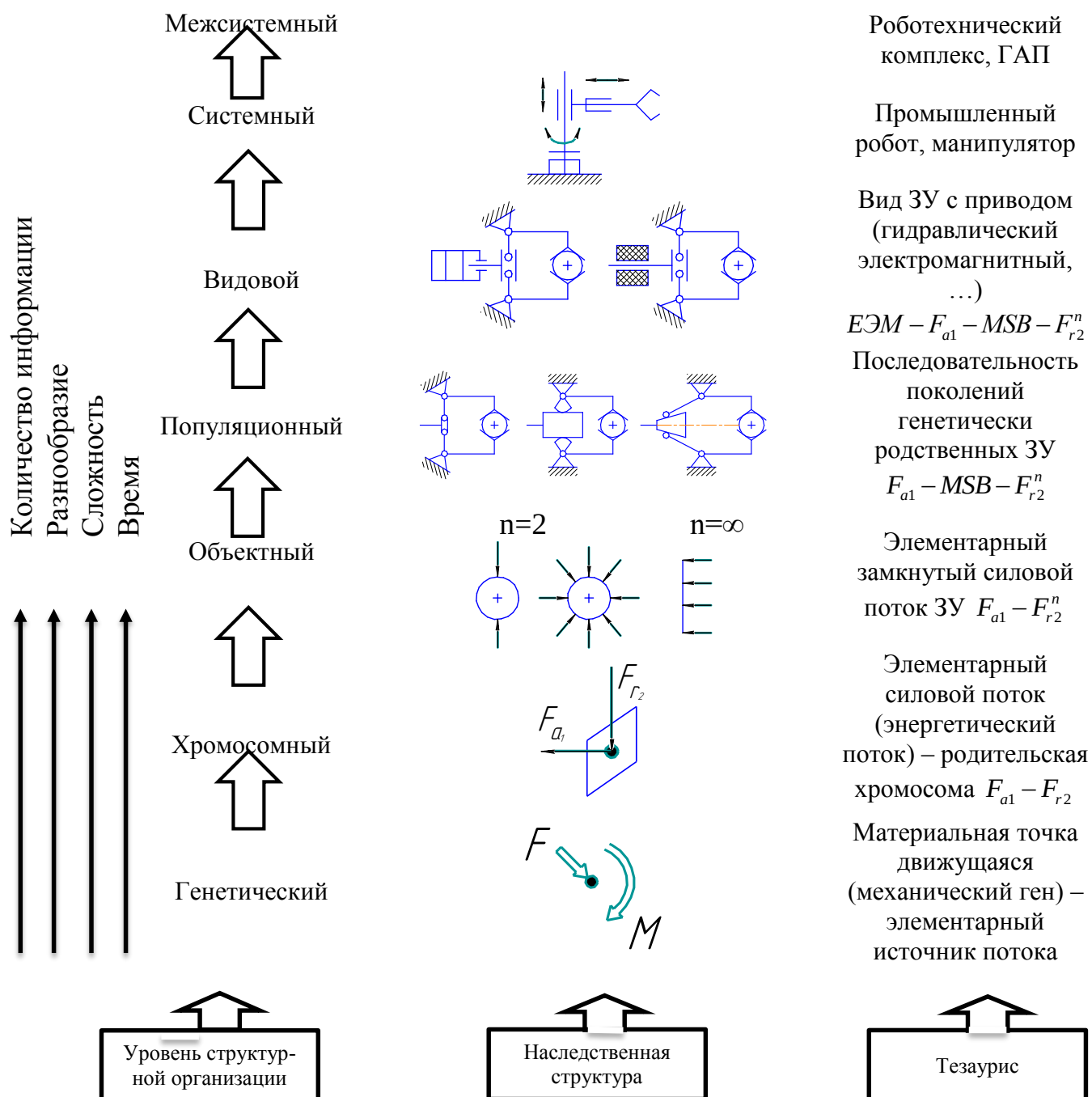


Рис. 7.2. Генетическая модель структурной организации и эволюции сложных робототехнических систем и комплексов в гибком автоматизированном производстве

Графическое изображение силовых потоков в ЗУ приведено на рис. 7.3.

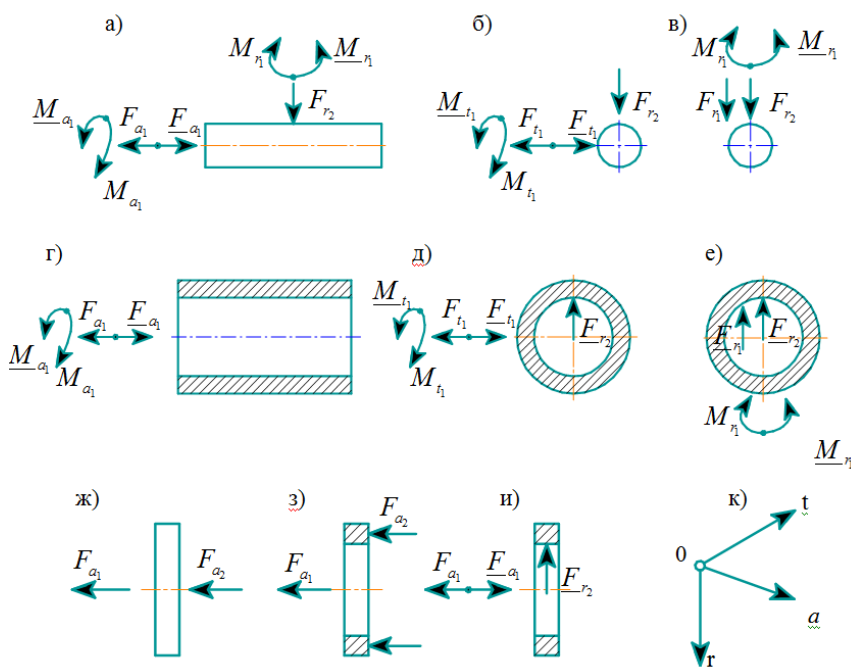
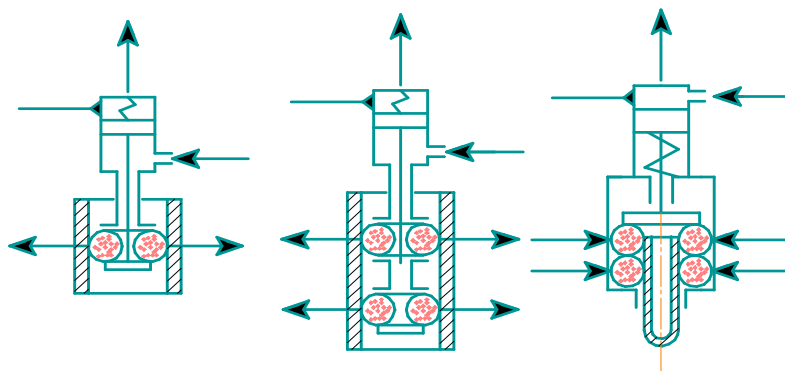


Рис. 7.3. Варианты возможных силовых потоков в захватных устройствах для манипулирования сплошными цилиндрическими (а-в) и пустотельными цилиндрическими (г-е) деталями, сплошными дисками (ж) и кольцами (з-и) в цилиндрической системе координат art (к)

Для манипулирования с хрупкими, мягкими, нежесткими и стеклянными объектами целесообразно использовать не механические твердотельные преобразователи (MSB), а жидкотечение, вязкие (LFM) и воздушные (AVM) среды (рис. 7.4, 7.5, г).



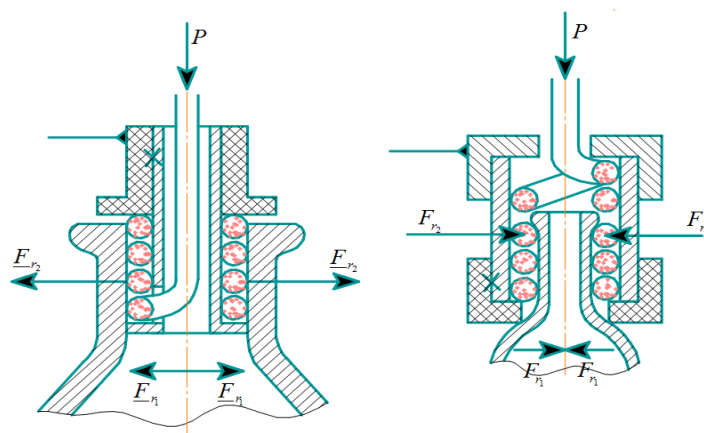


Рис. 7.4. Принципиальные схемы захватных устройств для хрупких и нежестких объектов и соответствующие им родительские хромосомы: а, б)  $F_{a1} - F_{r2}$ ; в)  $F_{a1} - F_{r2}$ ; г)  $F_{r1} - F_{r2}$ ; д)  $F_{r1} - F_{r2}$

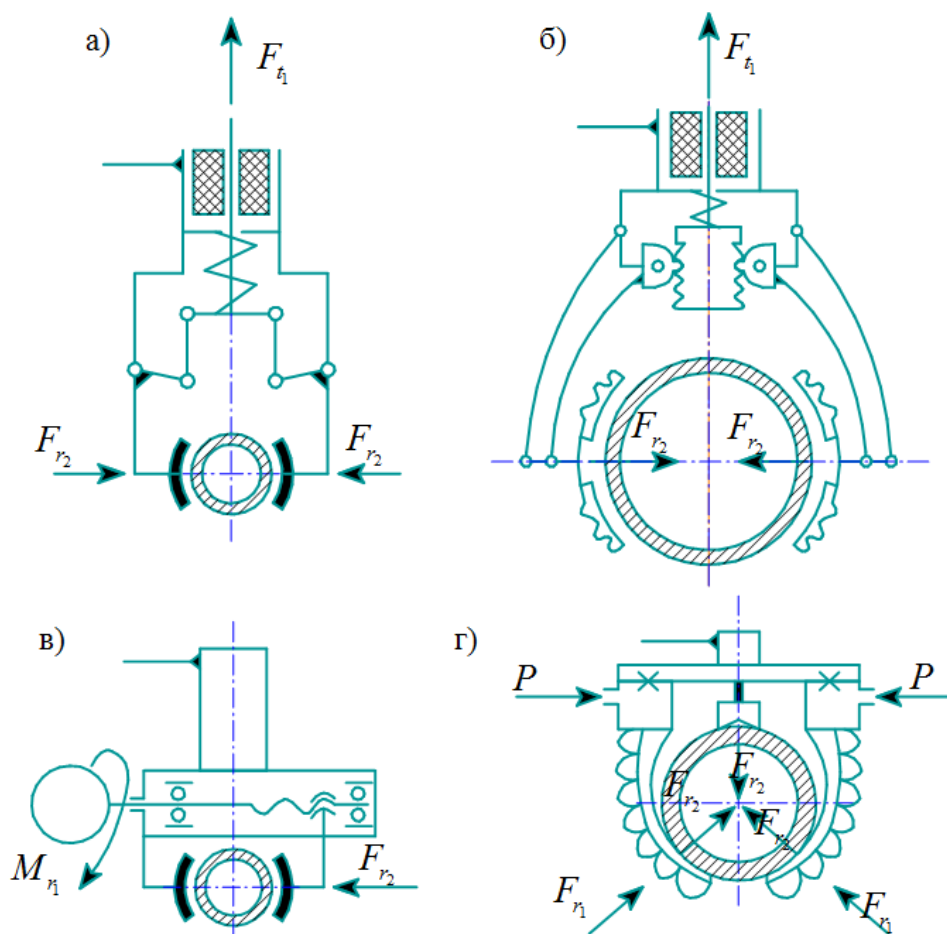


Рис. 7.5. Принципиальные схемы захватных устройств для жестких, хрупких, нежестких объектов и соответствующие им родительские хромосомы: а, б)

$F_{a1} - F_{r2}$ ; в)  $M_{r1} - F_{r2}$ ; г)  $F_{r1} - F_{r2}$

На хромосомном уровне появляются генетические коды, из которых только при дальнейшем усложнении структуры с применением преобразователей и сред появляются на хромосомном уровне различные схемы зажима, захвата, поддержки и направления.

Необходимость обеспечения высокоскоростной (HSP – High Speed Cutting) и высокопрецизионной (HSP – High Precision Cutting) обработки деталей на фрезерных станках с ЧПУ, в том числе с механизмами параллельной структуры, заставило ученых и производителей искать новые решения конструкций ИЗП [108]. Кроме генетического кода  $F_{a1} - F_{r2}$  с применением цельной конической втулки, реализованного в гидромеханических ИЗП типа Coro Grip фирмы Sandvic Coromant [107, 109] наладили искать решение, используя генетический код  $F_{r1} - F_{r2}$ . Так появились ИЗП с цельной цилиндрической втулкой – зажимным элементом (ЗЭ), представляющим упругий преобразователь SR (spring) силы и перемещений к ОЗ – инструменту с цилиндрическим хвостовиком. Методом запрессовки (табл. 7.2, позиция 1) или натяга. Эти ИЗП обеспечивают зажим инструмента за счет радиальной упругой деформации, предварительно напряженной при разжиге цилиндрической втулки (табл. 2, позиция 2). Принцип работы таких ИЗП сводится к тому, что сначала надо внешними радиальными силами сдеформировать (разжать) втулку, представляющую ЗЭ для получения зазора, позволяющего ввести хвостовик режущего инструмента в рабочее отверстие ЗЭ, а затем при снятии внешней нагрузки за счет упругой деформации обеспечить выборку зазора между ЗЭ и ОЗ и окончательный зажим (натяг системы ЗЭ – ОЗ). Так работают ИЗП фирмы Shunk GmbH типа TRIBOS и им подобные (с гидропрессом разжима) [108].

Использование различных физических эффектов и силовых полей позволяет создать различные ИЗП с цельной упругой цилиндрической втулкой. Например, применение ферромагнитных материалов с магнитострикционным эффектом (типа кобальта) за счет электромагнитного контура (ЭМК) (табл. 2, позиция 3) заменит применение гидропресса, как это осуществляется в ИЗП (табл. 7.2, позиция 5).

Использование температурных (тепловых) полей послужило созданию термопатронов (табл. 7.2, позиция 4), например, с системой «Safelosk» фирмы Haimer GmbH [108].

Генетический код  $F_{r1} - F_{r2}$  может быть использован при создании устройств различного функционального назначения:

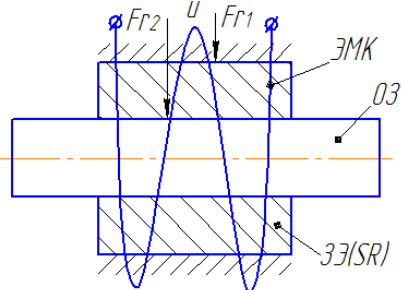
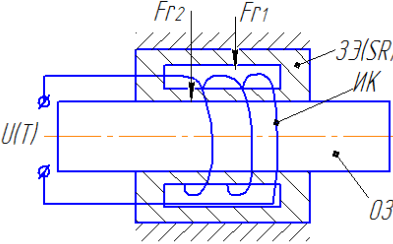
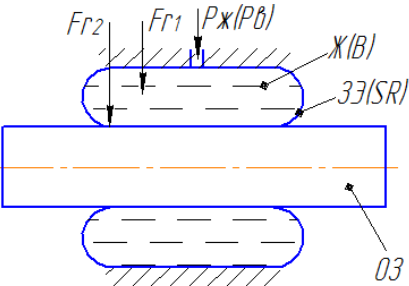
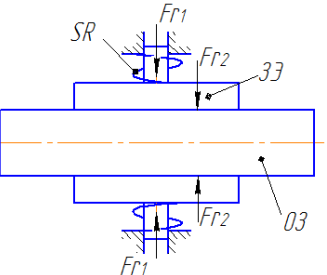
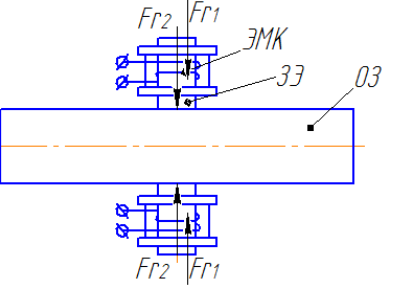
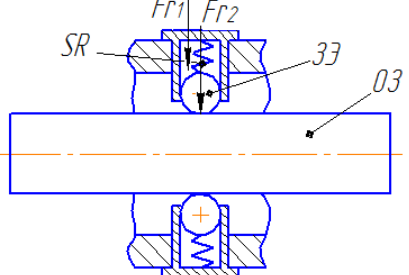
- в качестве захватных устройств (ЗУ) промышленных роботов (ПР) в виде упругой оболочки, заполняемой под давлением  $P_{ж}$  ( $P_{в}$ ) жидкостью или воздухом (табл. 7.2, позиция 5) [189-191];
- в зажимных патронах (ЗП) и ЗУ ПР с зажимом силами пружин и разжимом электромагнитами (табл. 7.2, позиция 6);
- в ЗП с зажимом электромагнитными силами и разжимом пружинами (табл. 7.2, позиция 7).

Таблица 7.2

*Примеры реализации генетического кода  $F_{r1} - F_{r2}$*

| № | Схема зажима | Способ реализации                                                                                                                                        | Область применения |
|---|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1 |              | Запрессовка ОЗ с приложением силы $F_{a1}$ (силовой поток $F_{a1} - F_{r2}$ ), после снятия силы $F_{a1}$ удержание от силового потока $F_{r1} - F_{r2}$ | Сборка, ИЗП        |
| 2 |              | Сжатие кольца (ЗЭ) силами упругости после его деформирования, например, гидропрессом с силой $F_{r1}$                                                    | ИЗП                |

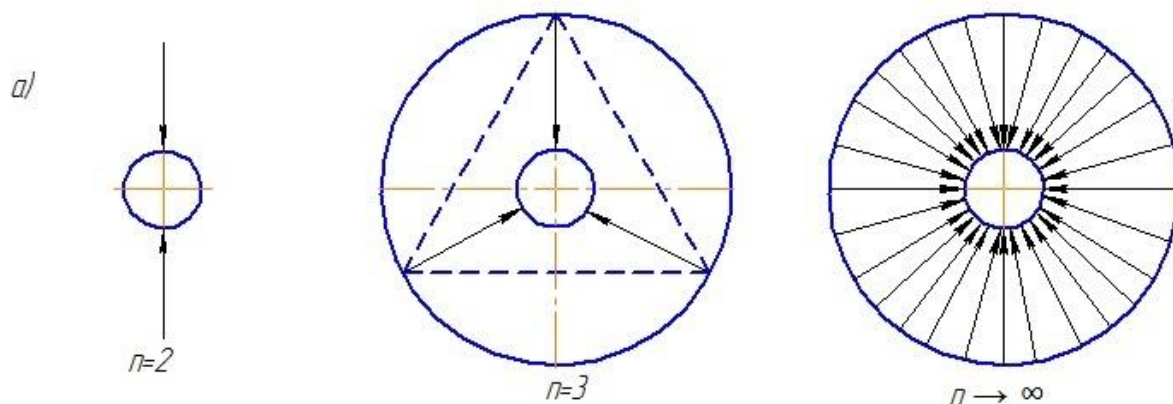
Продолжение табл. 7.2

|   |                                                                                     |                                                                                                                                          |                        |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 3 |    | Использование эффекта магнитострикции при подаче напряжения $U$ в электромагнитную катушку ЭМК и выполнения ЗЭ из специальных материалов | ИЗП                    |
| 4 |    | Нагрев ЗЭ с помощью индукционной катушки ИК.                                                                                             | ИЗП-термопатрон        |
| 5 |   | Подача под давлением жидкости (Рж) или воздуха (Рв) в полость ЗЭ в виде оболочки для захвата хрупких объектов при манипулировании ими.   | ЗУ в ПР                |
| 6 |  | Зажим под действием пружин, разжим электромагнитами (не показано)                                                                        | ЗП, ЗУ в ПР            |
| 7 |  | Зажим под действием сил в электромагнитных катушках (ЭМК), разжим под действием пружин                                                   | Электромеханический ЗП |
| 8 |  | Поддержка прутка в направляющей трубе (НТ) за счет подпружиненных тел вращения                                                           | НТ                     |

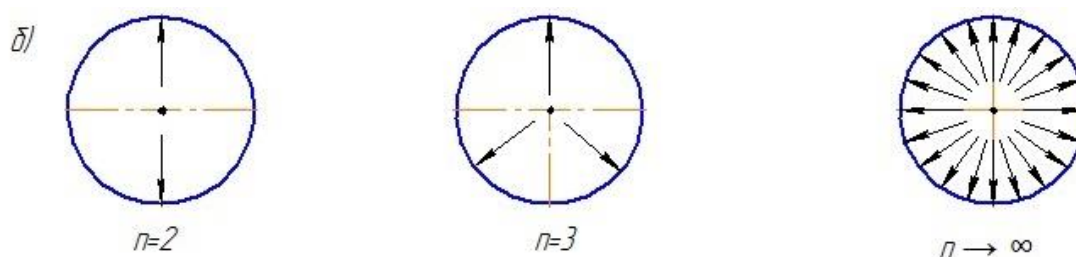


На объектном уровне для замыкания силового потока при радиальном зажиме в качестве хромосомы – наследника используется замкнутый элементарный силовой контур ЗП, который может быть открытым и закрытым в плоскости, перпендикулярной оси вращения шпинделя (ЗП, ОЗ) (рис. 7.6) при зажиме снаружи (рис. 7.6, а) и изнутри (рис. 7.6, б).

#### ЗАЖИМ СНАРУЖИ



#### ЗАЖИМ ИЗНУТРИ



*Рис. 7.6. Силовые контуры с различным замыканием сил ( $n$  – количество выходных элементарных сил замыкания, нормальных к поверхностям контакта зажимных элементов и объекта зажима)*

При описании ЗП на популяционном уровне между входом и выходом силового потока вводится упругий преобразователь силы, перемещения и энергии (SR), что соответствует генетической (структурной) формуле  $F_{г1}\text{-SR-}F_{г2}$  (без указания формы ОЗ). В ИЗП с цельной упругой цилиндрической втулкой радиальные перемещения небольшие (не более 0,1...0,2 мм). Поэтому при переходе на другой диаметр хвостовика режущего инструмента, например, фрезы используется сменный

(промежуточный) ЗЭ, чаще всего в виде цилиндрической цанги с четырьмя сквозными продольными разрезами с одной стороны, как в ИЗП типа Cogo Grip или TRIBOS. Однако конструкций сменного ЗЭ, кроме известных, может быть намного больше, если применять пять универсальных (генетических) операторов синтеза: репликации, инверсии, кроссинговера, скрещивания и мутации [283] с морфологическим анализом [94, 133].

Для построения морфологической модели выбраны следующие признаки (табл. 7.3):

- 1) количество разрезов от 1 до 6; 2) число сторон начала разрезов от 1 до 2;
- 3) вид разрезов (сквозные, несквозные, комбинированные); 4) направление разрезов (вдоль оси, поперек оси, вдоль и поперек оси, под углом в одном направлении, под углом в противоположных направлениях).

Таблица 7.3

*Морфологическая таблица конструкций промежуточной упругой цилиндрической втулки с разрезами в ИЗП*

| 1.Количество разрезов | 2.Число сторон разреза | 3. Вид разрезов | 4. Направление размеров относительно оси |
|-----------------------|------------------------|-----------------|------------------------------------------|
| 1.1. Один             | 2.1. Одна              | 3.1. Сквозные   | 4.1. Вдоль                               |
| 1.2. Два              | 2.2. Две               | 3.2. Несквозные | 4.2. Поперек                             |
| 1.3. Три              |                        | 3.3. Комбинация | 4.3. Вдоль и поперек                     |
| 1.4. Четыре           |                        |                 | 4.4. Под одним углом                     |
| 1.5. Пять             |                        |                 | 4.5. Под двумя                           |
| 1.6. Шесть            |                        |                 | углами                                   |

Морфологическая матрица  $M_p$  согласно табл. 3 дает общее число вариантов

$$N_p = 6 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 = 180.$$

$$M_p = \begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 \\ 1.3 & & 3.3 & 4.3 \\ 1.4 & & & 4.4 \\ 1.5 & & & \\ 1.6 & & & \end{vmatrix} \quad (7.4)$$

Из 180 вариантов реализуемых будет меньше, так как количество разрезов с одной стороны (альтернатива 2.1) согласно матрицы (7.5) составляет  $N_p' = 6 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 2 = 24$

$$M_p' = \begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 \\ 1.2 & — & 3.2 & 4.2 \\ 1.3 & & & — \\ 1.4 & & & — \\ 1.5 & & & — \\ 1.6 & & & — \end{vmatrix}, \quad (7.5)$$

а с двух сторон (альтернатива 2.1 и 2.2) только для четного количества разрезов (альтернатива 1.2, 1.4, 1.6) согласно матрице (7.6) составляет  $N_p'' = 3 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 = 60$

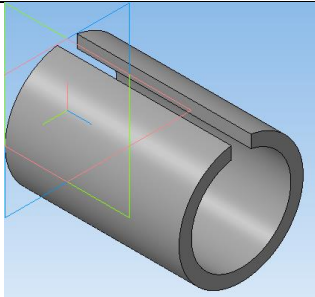
$$M_p'' = \begin{vmatrix} — & 2.1 & 3.1 & 4.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 \\ — & & 3.3 & 4.3 \\ 1.4 & & & 4.4 \\ — & & & 4.5 \\ 1.6 & & & \end{vmatrix}. \quad (7.6)$$

Итак, всего реализуемых вариантов будет  $N_p' + N_p'' = 24 + 60 = 84$ .

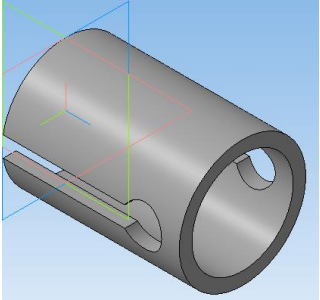
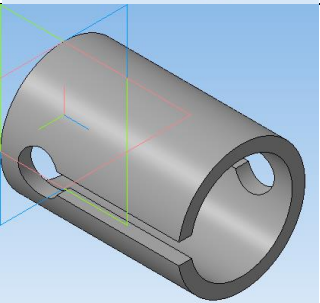
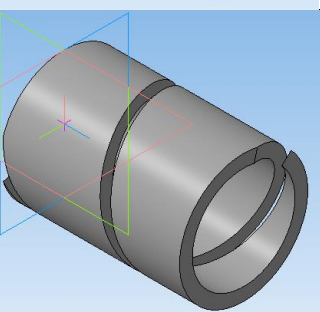
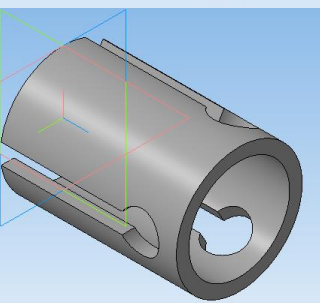
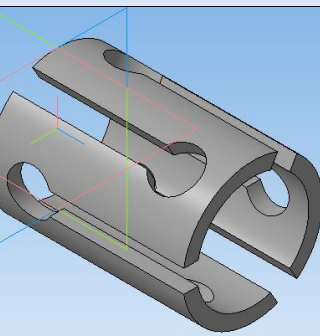
Примеры некоторых реализуемых вариантов конструкций упругой цилиндрической втулки с различным количеством и видом разрезов приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

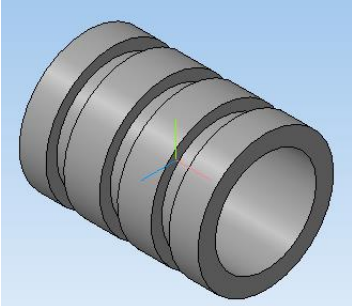
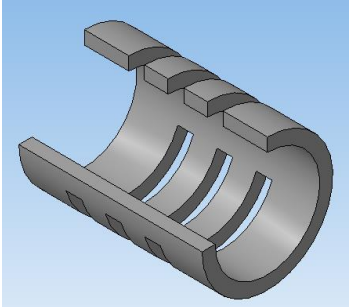
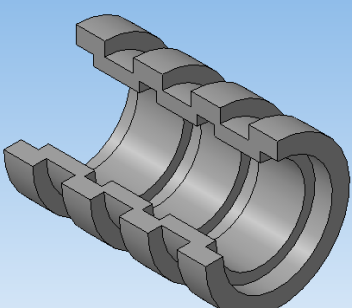
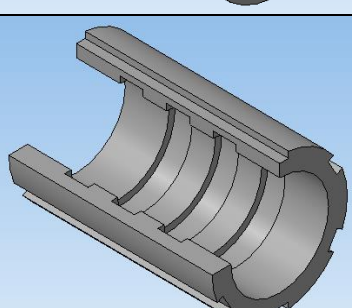
*Примеры реализации морфологической модели конструкций промежуточного ЗЭ согласно генетической формулы  $F_{r1}-SR-F_{r2}$ .*

| № | Конструкция или ее разрез                                                           | Морфологическая формула |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1 |  | 1.1 – 2.1 – 3.1 – 4.1   |

Продолжение табл. 7.4

|   |                                                                                     |                                                 |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 2 |    | $\underline{1.2} - 2.1 - 3.1 - 4.1$             |
| 3 |    | $\underline{1.2} - \underline{2.2} - 3.1 - 4.1$ |
| 4 |   | $1.1 - 2.1 - 3.1 - \underline{4.4}$             |
| 5 |  | $\underline{1.3} - 2.1 - 3.1 - 4.1$             |
| 6 |  | $\underline{1.6} - \underline{2.2} - 3.1 - 4.1$ |

Продолжение табл. 7.4

|    |                                                                                     |                                                                         |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 7  |    | $\underline{1.3} - 2.1 - \underline{3.2} - \underline{4.2}$             |
| 8  |    | $\underline{1.3} - 2.1 - 3.1 - \underline{4.2}$                         |
| 9  |   | $\underline{1.6} - \underline{2.2} - \underline{3.2} - \underline{4.2}$ |
| 10 |  | $\underline{1.6} - \underline{2.2} - \underline{3.2} - \underline{4.3}$ |

Примечание: Подчеркнутые альтернативы, отличные от варианта (позиция 1)

## 7.2. Рекомендации по реализации генетико-морфологического подхода в приводах зажимных механизмов

Структура привода зажима (ПрЗ) является трехмерной, что обеспечивает многовариантность возможных пространственных компоновок и разнообразие форм и количества активных элементов и силовых потоков. Таким образом структура ПрЗ

определяется пространственной геометрией и топологией взаимосвязанных силовых контуров и потоков. В соответствии с положениями генетико-морфологического подхода [113, 120, 129, 131, 134, 135, 137, 138, 143] к созданию и развитию ТС, ПрЗ можно описывать на различных уровнях сложности структуры: от генетического до межсистемного (см. разделы 2,3). Для описания ПрЗ на хромосомном уровне необходимо пользоваться элементарный силовой поток, учитывая следующее:

1. Силовых (энергетически) потоков может быть несколько по входам и выходам.
2. Входы и выходы силовых потоков могут быть одинаковыми и разными, складываясь из ограниченного количества их видов и ограниченного набора вариантов пространственного расположения (координатных движений).
3. Силовые потоки могут быть с внешним (преимущественно) и внутренним (реже) источником энергии.
4. Соединение отдельных силовых потоков может быть последовательным, параллельным, параллельно-последовательным.
5. Между входом и выходом силового потока ПрЗ имеются различные преобразователи, однако их количество ограничено (например, к механическим преобразователям относятся (рис. 7.7): рычажные (LV); клиновые (WD); спиральные (SP); зубчатые (GR); винтовые (SC); плунжерные (PL); упругие (SR)).
6. Возможна комбинация преобразователей в силовых потоках ПрЗ и ЗП, но возможен один преобразователь для ЗМ, когда функции ПрЗ выполняет сам ЗП.
7. Передача и преобразование (трансформация) силовых потоков может осуществляться в различных средах (твердых, текучих, сыпучих, жидких, воздушных, электромагнитных, магнитострикционных, биологических и др. пока нам неизвестных).

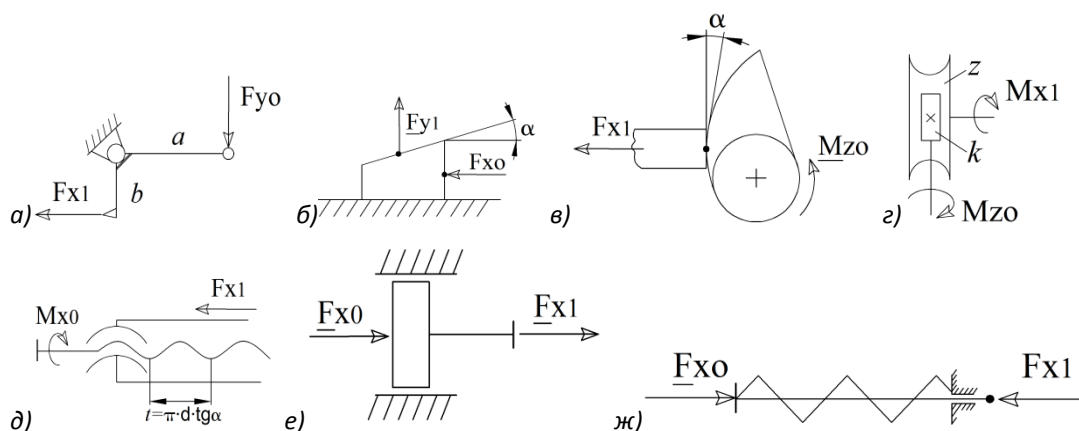


Рис. 7.7. Варианты механических преобразователей энергии ПрЗ токарного автомата: а - LV; б - WD; в - SP; г - GR; д - SC; е - PL; ж - SR

Если абстрактно представить ЗМ, которого еще не существует, но которого необходимо создать, то модель силовых (энергетических) потоков будет состоять из двух элементарных потоков: один у ПрЗ  $[F_0(M_0) - F_1(M_1)]$ , а другой у ЗП  $[F_1(M_1) - F_2]$ , без указания координатного направления сил (моментов) на входе и выходе. Тогда полный поток от источника энергии Э через преобразователи ПЭ к объекту зажима (ОЗ) запишется в виде генетической формулы ЗМ – взаимодействия трех материальных точек (генов  $O, O_1, O_2$ ) (рис. 7.8):

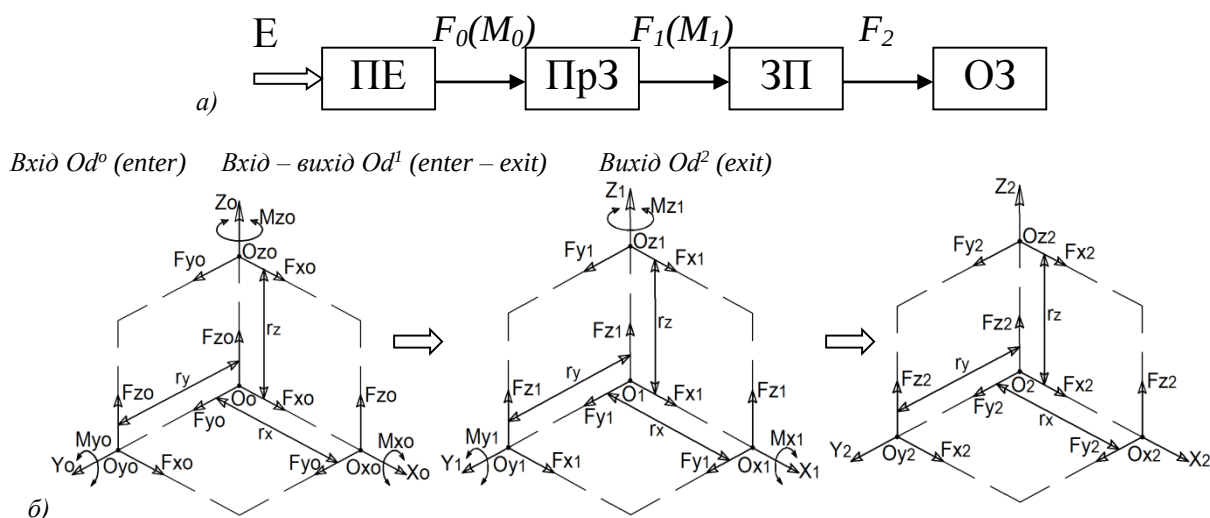


Рис. 7.8. Обобщенная структура (а) и модель силовых (энергетических) потоков (б) в ЗМ: Э – источник энергии; ПЭ – преобразователь энергии; ПрЗ – привод зажима; ЗП – зажимной патрон; ОЗ – объект зажима

В ПрЗ силовые контуры (виды замыкания) могут быть аналогичными силовым контурам ЗП (табл. 7.5).

Таблица 7.5

## Обозначение силовых контуров

| Зажимной патрон (ЗП)                   |             | Привод зажима (ПрЗ)                      |             |
|----------------------------------------|-------------|------------------------------------------|-------------|
| Вид контура                            | обозначение | Вид замыкания                            | обозначение |
| Замкнутый<br>закрытый                  | [1]         | Геометрическое                           | [1]         |
| Замкнутый<br>открытый                  | 1           | Фрикционное                              | 1           |
| Разомкнутый                            | 0           | Силовое<br>неупругое                     | 0           |
|                                        |             | Силовое упругое                          | [0]         |
| Замкнутый<br>открытый –<br>разомкнутый | [1], 0      | Геометрическое<br>– силовое<br>неупругое | [1], 0      |
| Замкнутый<br>открытый -<br>закрытый    | 1, 0        | Фрикционное –<br>силовое<br>неупругое    | 1, 0        |
|                                        | 1, [1]      | Силовое<br>неупругое –<br>геометрическое | 0, [1]      |
|                                        |             | Силовое упругое<br>- фрикционное         | [0], 1      |

На данном этапе развития ЗМ токарных автоматов и станков с ЧПУ наибольшее применение получили ЗМ механического и гидравлического исполнения, каждый из которых может быть описан различными способами (рис. 7.9).



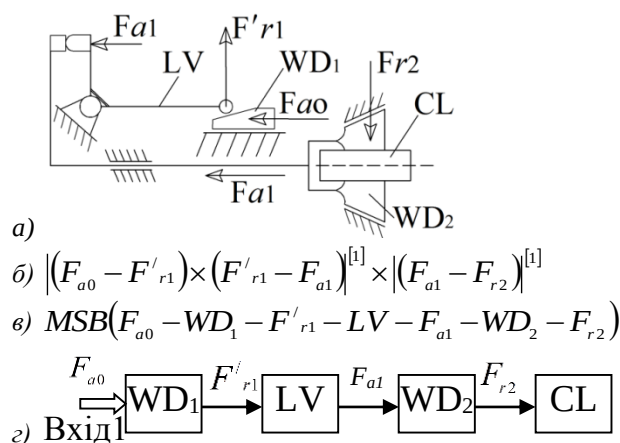


Рис. 7.9. Зажимной механизма МТА для цилиндрических деталей с цанговым ЗП и ПрЗ с клино-рычажным передаточно-усилительным механизмом геометрического замыкания: а – принципиальная схема; б – генетическая формула на хромосомном уровне; в – генетическая формула на популяционном уровне; г – структурная формула

### 7.3. Примеры реализации генетико-морфологического подхода при проектировании шпиндельных узлов на модульном принципе

Одним из основных узлов любого металлорежущего станка является шпиндельный узел ЗМ, который оказывает значительное влияние на точность и производительность обработки [4, 107-111]. ЗМ подолгу сохраняют традиционные конструкции с заложенной в них генетической информацией предыдущих поколений, что порой сдерживает развитие структуры станка в целом при требованиях современности, связанных с высокоскоростной и прецизионной обработкой, быстрой переналадкой и широкодиапазонностью, снижением энергосырьевых ресурсов и др. [4, 5, 122].

В предлагаемые шпиндельные узлы входят ЗМ, с электромеханическим зажимом и текучей средой [330].

Шпиндельный узел содержит привод главного движения, который состоит из шпинделя 1 (рис. 7.10) на опорах 2 в виде радиально-упорных шарикоподшипников. На шпинделе расположен ротор 3 главного движения, а в корпусе 4 статор 5, между которыми при подачи электрического тока возникает электромагнитное поле. Вне

задней опоры шпинделя 1 на резьбе расположенная гайка 6 винтовой передачи, которая с одной стороны связана с ротором 7 электромеханической системы, а с другой стороны через тело качения – упорный шарикоподшипник 8 с входными плунжерами 9 малого диаметра  $d$ , расположенными соосно в неподвижной конусной распределительной втулке 10, натянутой на конус шпинделя 1 гайкой 11. В роторе через электромагнитное поле разного направления взаимодействует статор 12, расположенный за задней опорой 2 в конусе 4. В передней части шпинделя 1 расположенный цанговый зажимный патрон для зажима объекта 13.

Цанговый зажимной патрон состоит из неподвижной зажимной цанги 14, жестко связанной со шпинделем 1 с помощью резьбы, и подвижной конусной втулки 15, которая по торцу связана с плунжерами 16 большего диаметра  $D$ . Между плунжерами 9 и 16 находится с жидкостью или гидропластом замкнутая гидравлическая система, образованная отверстиями и заглушками на периферии и торце шпинделя 1 и конусной распределительной втулки 10. Для возвращения конусной втулки 15 в исходное положение при разжипе объекта 13 предусмотрены пружины 17 между упорным диском 18 и конусной втулкой 15. Связь между плунжерами 9 и 16 возможны как через соосные отверстия в шпинделе 1, так и через центральное отверстие вдоль оси шпинделя 1. Шпиндельный узел работает следующим образом. При подачи тока на обмотку статора 12 возникает электромагнитное поле, которое взаимодействует с обмотками ротора 7, связанного жестко с гайкой 6. Возникает крутящий момент  $M_z$ , который оборачивает ротор 7 с гайкой 6, что перемещает вдоль шпинделя 1 по резьбе диаметром  $d_p$  с углом подъема  $\alpha_p$ . Крутящий момент  $M_z$  вызывает окружную силу  $P_{окр} = \frac{2 \cdot M}{d_p}$ , которая создает осевую силу  $Q$ , что действует через упорный подшипник 8 на соосно расположенные плунжеры 9 и равняется

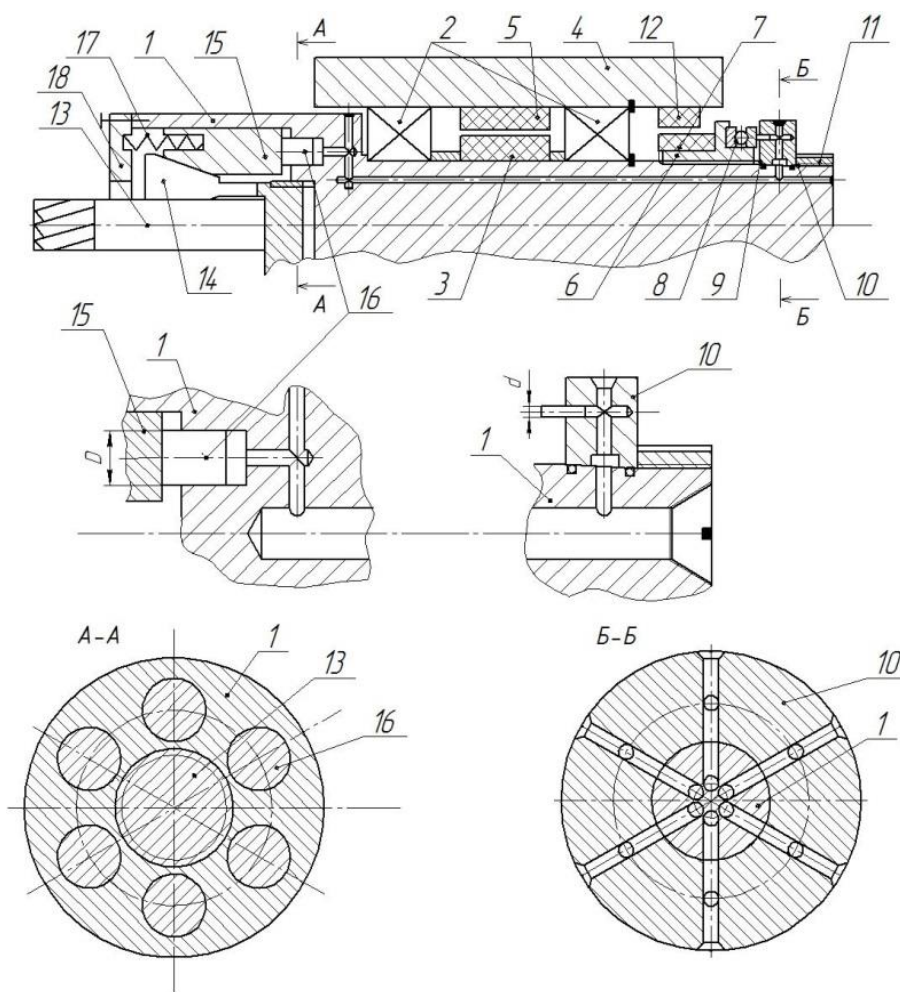


Рис.7.10. Шпиндельный узел станка с электрогидромеханическим зажимом и концентричным размещением замкнутой гидросистемы

$$Q = P_{окр} \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_p + \varphi) = \frac{2 \cdot M}{d_p} \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_p + \varphi), \quad (7.7)$$

где  $\varphi$  – угол трения.

В замкнутой гидравлической системе возникает давление  $p$ , которое равняется  $4 \cdot Q / (z \cdot \pi d^2)$  (где  $z$  – количество плунжеров малого диаметра  $d$ ) и передается на исходные плунжеры 16 большего диаметра  $D$ . Благодаря этому возникает исходная осевая сила  $S$ , которая равняется

$$S = z \cdot p \quad (7.8)$$

и становится больше за входную силу  $Q$ , пропорциональную квадрату отношения диаметров, то есть

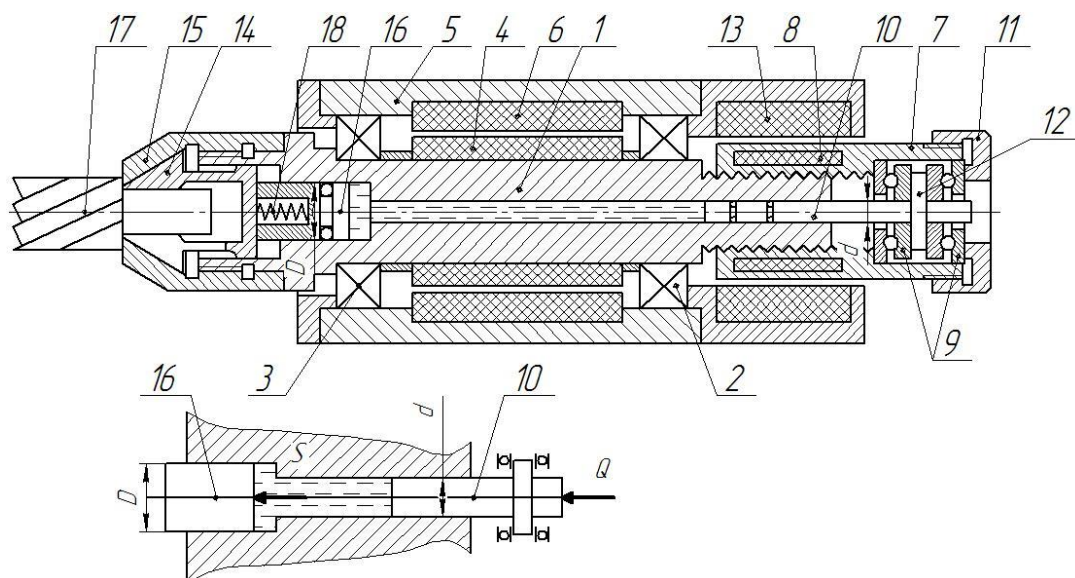
$$S = Q \left( \frac{D}{d} \right)^2. \quad (7.9)$$

Например,  $D = 2.d$ ,  $S = 4.Q$ , а если  $D = 4.d$ , то  $S = 16.Q$  и т.д.

После зажима ток подается на обмотку статора 5, возникает электромагнитное поле, которое взаимодействует с обмоткой ротора 3 и потому заставляет шпиндель 1 оборачиваться с необходимой частотой. Управление шпиндельного узла с механизмом зажима осуществляется от системы ЧПУ. Остановка шпинделя 1 осуществляется при снятии тока в обмотке статора 5, а разжим объекта 13 – при изменении полюсов на обмотке статора 12, что заставляет ротор 7 и гайку 6 вращаться в обратном направлении, передвигая гайку 6 в исходное положение и снимая давление жидкости в замкнутой гидравлической системе. С помощью пружин 17 конуса втулка 15, плунжера 16 и 9 возвращается в исходное положение.

Следующая конструкция представляет собою также шпиндельный узел с электромеханическим зажимом и текучей средой. В этой конструкции замкнутая гидравлическая система расположена по оси шпинделя (рис. 7.11)[329]. Шпиндельный узел содержит привод главного движения, который состоит из шпинделя 1 на опорах 2 и 3 в виде радиально-упорных шарикоподшипников. На шпинделе расположен ротор 4 главного движения, а в корпусе 5 статор 6, между которыми при подачи электрического тока возникает электромагнитное поле. Вне задней опоры 2 шпинделя 1 на резьбе расположенная гайка 7 винтовой передачи, которая с одной стороны связана с ротором 8 электромеханической системы, а с другой стороны через тело катания (например два упорных шарикоподшипников 9) с входным плунжером 10 малого диаметра  $d$ , расположенными соосно в отверстии шпинделя 1. Два шарикоподшипника 9 притянуты к гайке 7 упорной гайкой 11 через выступы 12. С ротором 8 через электромагнитное поле разного направления взаимодействует статор 13, жёстко расположенный за задней опорой 2 в корпусе 5. В передней части шпинделя 1 расположен цанговый ЗП для закрепления режущего инструмента, который состоит из зажимной цанги 14 нажимного типа,

взаимодействующей по конусу “а” с неподвижной конусной втулкой 15, жестко связанной со шпинделем 1 с помощью резьбы.



*Рис.7.11. Шпиндельный узел станка с электрогидромеханическим зажимом и центральным размещением замкнутой гидросистемы*

Зажимная гайка 4 по торцу взаимодействует с плунжером 16 большего диаметра. Между плунжерами 10 и 16 находится замкнутая гидравлическая система, которая заполнена жидкостью (маслом) или текучей средой (гидропластом) в осевом отверстии шпинделя 1. Объектом зажима 17 может быть режущий инструмент с цилиндрическим хвостовиком (сверло, фреза зенкер, и т.п.) или цилиндрическая заготовка. В отверстии плунжера 16 расположенная пружина 18 для него перемещения вправо. Для создания запертого пространства в гидравлической системе и предотвращения утечки жидкости или текучего среды в цилиндрических проточках плунжеров 10 и 16 установлены уплотнения соответственно 19 и 20. Шпиндельный узел работает следующим образом. При неподвижном шпинделе 1 и разомкнутой цанге 14 в ее отверстие вводится объект зажима 17. При подачи тока на обмотку статора 13 возникает электромагнитное поле, которое взаимодействует с обмотками ротора 8, связанного жестко с гайкой 7. Возникает крутящий момент  $M_z$ , который вращает ротор 8 с гайкой 7, перемещающейся вдоль шпинделя 1 по резьбе диаметром  $d_p$  с углом подъема  $\alpha_p$ . Крутящий момент  $M_z$  вызывает окружную силу

$P_{окр} = \frac{2 \cdot M}{d_p}$ , которая создает осевую силу  $Q$ , действующую через упорные подшипники 9 и соосно расположенный плунжер 10 и определяемую по формуле (7.7).

В замкнутой гидравлической системе возникает давление  $p$ , которое равняется  $4 \cdot Q / \pi d^2$  (где  $d$  – диаметр малого плунжера 10) и передается на исходный плунжер 16 большего диаметра  $D$ , создающим исходную осевую силу  $S$ ;

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \cdot p \quad (7.10)$$

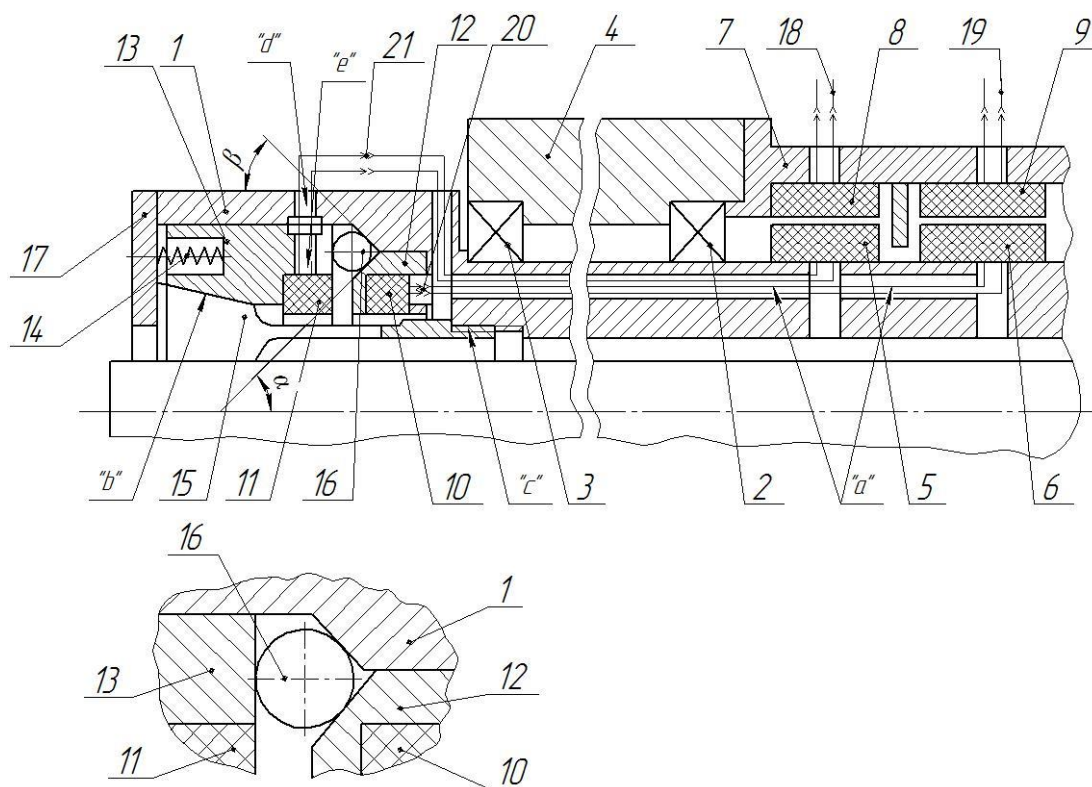
Сила  $S$  становится больше входной силы  $Q$  пропорционально квадрату отношения диаметров, и определяется по формуле (7.9) После зажима ток подается на обмотку статора 6, возникает электромагнитное поле, которое взаимодействует с обмоткой ротора 4 и потому заставляет шпиндель 1 вращаться с необходимой частотой. Управление шпиндельного узла с ЗМ осуществляется от системы ЧПУ. Остановка шпинделя 1 осуществляется при снятии тока в обмотке статора 4, а разжим объекта 17 – при изменении полюсов на обмотке статора 13, что заставляет ротор 8 и гайку 7 вращаться в обратном направлении, передвигая её в исходное положение и снимая давление жидкости в замкнутой гидравлической системе. С помощью пружины 18 плунжер 16 отходит назад, плунжер 10 возвращается в исходное положение. Саморазжим зажимной цанги 14 осуществляется за счет упругости её лепестков.

Две выше представленные конструкции, имеют ряд преимуществ перед существующими аналогами. Во-первых, простота конструкции, что облегчает их изготовление, во-вторых, использование замкнутой гидравлической системы с гидропластом (или подобной средой), что исключает использование дополнительной гидростанции, что в свою очередь удешевляет конструкцию и делает ее экономически выгоднее в сравнении с конкурентами.

Третья конструкция шпиндельного узла [327] отличается от двух выше представленных и базируется на использовании электромагнитов и их взаимодействии с механическими частями шпиндельного узла (рис.7.12). Шпиндельный узел содержит привод главного движения, который состоит из шпинделя 1 на опорах 2 и 3 в виде радиально-упорных шарикоподшипников, которые устанавливаются в корпусе 4. На шпинделе расположены катушки ротора 5 и 6, а в корпусе 7 - катушки статора 8 и 9, между которыми при подаче электрического тока возникает электромагнитное поле. Перед передней опорой 2 шпинделя 1 расположены два электромагнита 10 и 11. Электромагнит 10 вмонтирован в конусную втулку 12 и связан с катушкой ротора 6 электрической цепью в виде проводов, пропущенных в отверстии “а”, а электромагнит 11 вмонтирован в коническую втулку 13, которая подпружинена пружиной 14 и взаимодействует по конусу “b” с зажимной цангой 15. Цанга 15 с помощью резьбы “с” жестко связана со шпинделем 1. Электромагнит 11 связан с катушкой ротора 5 электрической цепью в виде проводов, проходящих через отверстия “а”, “d”, “e” соответственно в шпинделе 1 и конической втулке 13. В промежутке между втулкой 12 с углом  $\alpha$ , шпинделем 1 с углом  $\beta$  размещены шарики 16. К переднему торцу шпинделя 1 прикреплен винтами фланец 17, который служит одновременно защитой от попадания вглубь стружки и упором для пружины 14. Цанговый ЗП с неподвижной в осевом направлении цангой 15 предназначен для зажима режущего инструмента, например, концевой фрезы, или заготовки, например, прутка. Подача тока на катушки статоров 7 и 9 осуществляется через разъёмы 18 и 19 соответственно, а на катушки 10 и 11 – через разъёмы 20 и 21 соответственно.

Шпиндельный узел работает следующим образом. Вследствие появления электромагнитного поля на катушках 4, 5 и 7, 8 статора и ротора соответственно, шпиндель 1 начинает вращаться и возникает напряжение, которое через электрические цепи подается на электромагниты 10 и 11, что вследствие магнитного

взаимодействия приводит к их сближению с жестко прикрепленными к ним конусными втулками 12 и 13.



*Рис.7.12. Шпиндельный узел станка с электромеханическим зажимом и шариковым передаточно-усилительным звеном (патент Украины №84924)*

Это вызывает движение шариков 16 от оси вращения, вследствие их взаимодействия с фасонной поверхностью шпинделя 1. Шарiki вместе с конусной втулкой 13 перемещаются влево. При этом конусная втулка 13 взаимодействует с губками цанги по конусу “b” и происходит зажим. Зажим и разжим происходит путем подачи электрического тока соответствующей полярности на электрические разъемы 18 и 19. При изменении полярности и под действием пружины 14, упирающейся в фланец 17, конусная втулка 13 возвращается в исходное положение и происходит разжим. Возможность механизированного зажима-разжима с автоматическим управлением от системы ЧПУ позволяет достичь технический результат – расширение функциональных возможностей станка. Преимущества данной компоновки - простота конструкции всех ее узлов.



Возможности выше представленных шпиндельных узлов очень велики, их можно использовать как на станках традиционной компоновки, так и на станках с механизмами параллельной структуры.

В наше время ученые, конструкторы и технологи успешно решили проблемы с точностью и быстроходностью и на рынке появилось много высокоточных шпиндельных узлов с высокой частотой вращения при достаточно небольшой цене. Иная ситуация с ремонтоспособностью и универсальностью использования и сборки. В данной статье представлен модульный принцип сборки шпиндельных узлов, что делает их более ремонтоспособными и универсальными при использовании и организации их сборочного производства. Это очень важно, ведь ремонтоспособность повысит спрос на шпиндельные узлы, а универсальность сборочного процесса – спрос со стороны производства, так как это позволит сократить время и затраты на изготовление шпиндельных узлов.

Суть модульного принципа сборки заключается в использовании готовых и универсальных модулей для составления нескольких типов шпиндельных узлов, что позволяет уменьшить номенклатуру деталей на сборочной линии. Это упрощает весь процесс сборки, а также удешевляет его до максимума. Кроме того, модульный принцип позволяет уменьшить площади помещений, где стоят сборочные линии данного типа, так как уменьшается количество сборочных единиц, входящих в линию [308].

В данном методе сборки используется стандартный мотор-шпиндель, в котором замене подлежат только отдельные его узлы – сменные модули, которые являются отдельными сборочными единицами. Это могут быть автоматизированные механизмы зажима, гидравлические системы, зажимные механизмы и сами шпиндели, а также отдельные детали этих модулей. Более подробно показано основу данного принципа на рис. 7.13.

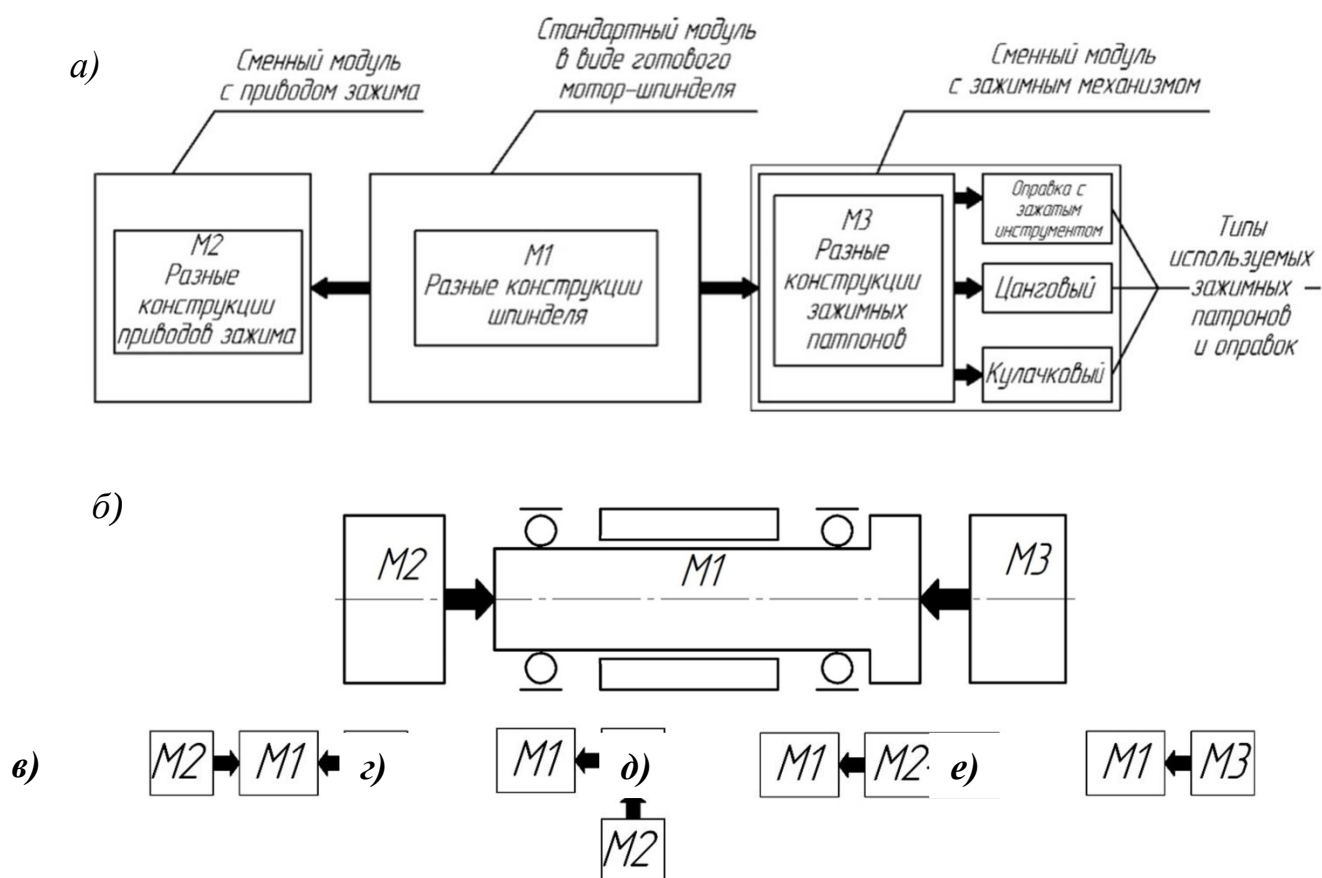


Рис. 7.13. Структура (а), схема (б) и варианты реализации (в-е) модульного принципа сборки шпиндельных узлов (б): M1 – модуль мотор-шпиндель, M2 – модуль с приводом зажима, M3-модуль с зажимным патроном (оправкой)

При использовании данного метода сборки возможно разное размещение сменных модулей, например, для прутковых автоматов (рис. 7.14) [120].

При такой организации сборочного производства значительно растёт его эффективность и повышаются технико-экономические показатели в условиях механизации и автоматизации. С учётом модульного принципа сборки предложены некоторые схемы шпиндельных узлов, в которых на основе готового мотор-шпинделя реализованы различные схемы зажима заготовки или инструмента.

В шпиндельном узле станка (рис. 7.15) содержится привод главного движения (модуль M1), электромеханический привод зажима (M2) и самоцентрирующийся патрон с кулачками (M3). Звено жесткой передачи усилия от привода зажима размещено соосно к шпинделю с возможностью вращения и снабжено крестовиной с роликами на концах, которые взаимодействуют с пазами, выполненными в кулачках

в форме спирали Архимеда [5]. Данное устройство предназначено для зажима штучных заготовок на токарном станке.

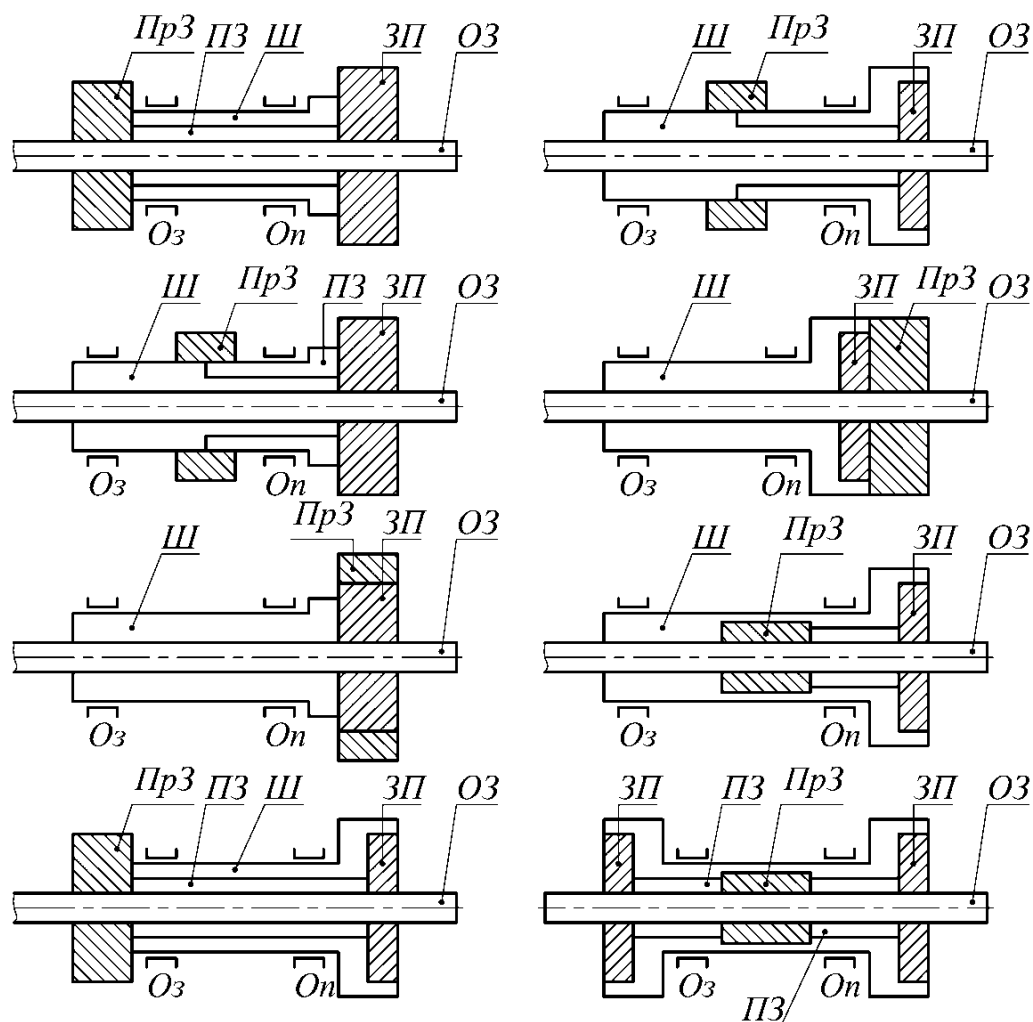


Рис. 7.14. Примеры размещения модулей  
Ш – шпиндель; ПрЗ – привод зажима; ЗП – зажимной патрон; ОЗ – объект зажима; Оп и Оз – передняя и задняя опоры

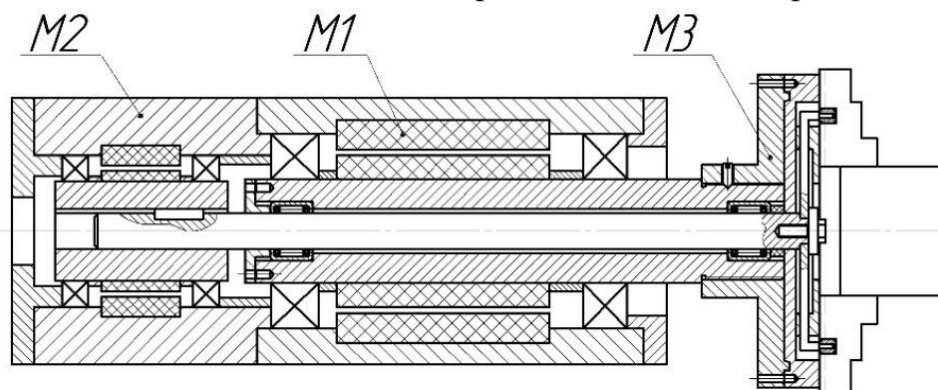
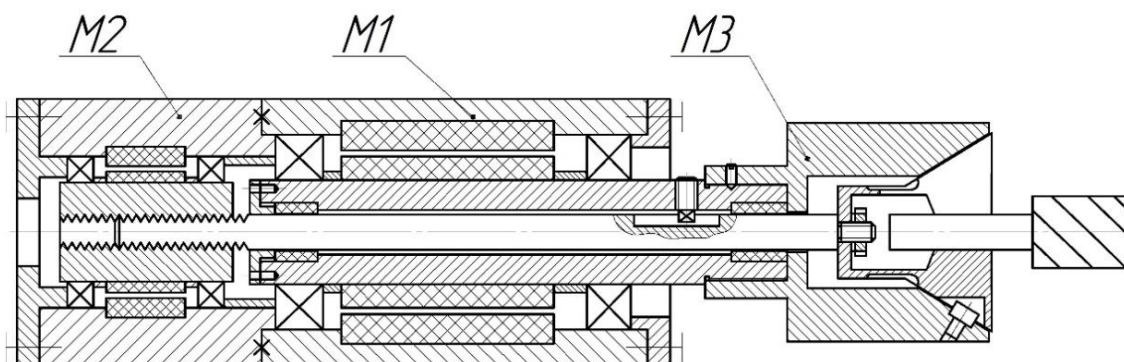


Рис. 7.15. Шпиндельный узел станка с электромеханическим зажимом и кулачковым патроном

В шпиндельном узле (рис. 7.16) содержится мотор-шпиндель (М1) с цанговым зажимным патроном М3 и электромеханический привод зажима М2 с возможностью передачи крутящего момента с помощью электромагнитного поля, при этом винт винтовой передачи с одной стороны связан с цангой в передней части шпинделя, а с другой стороны - по резьбе с гайкой, которая связана с ротором дополнительной электромеханической системы и расположена на опорах качения в дополнительном корпусе, соединенным жестко с корпусом шпиндельного узла [308].

Объектом зажима может быть режущий инструмент с цилиндрическим хвостовиком (сверло, фреза зенкер и т.д.).

В первом случае (рис.7.15) благодаря жесткой связи звена передачи с ротором привода зажима и дополнительного электромагнитного поля между этим ротором и статором возникает крутящий момент регулируемой величины, что вращает звено и приводит в действие механизм зажима кулачкового патрона,

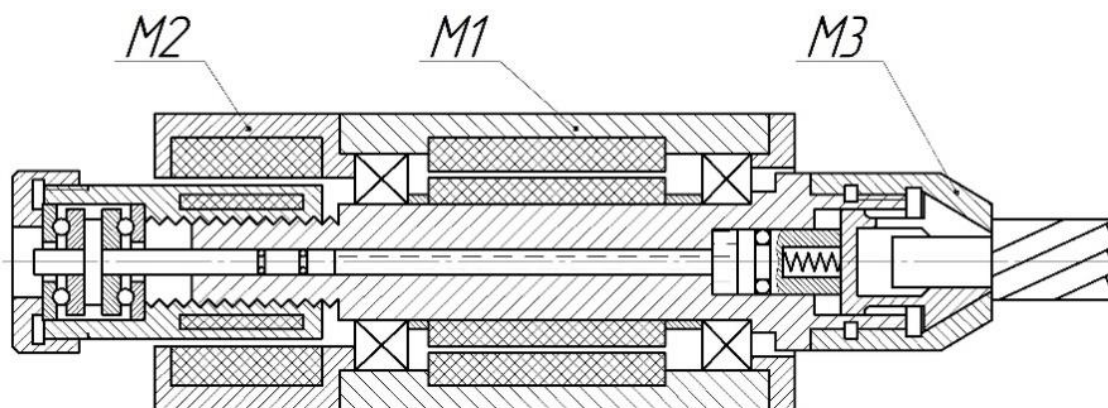


*Рис. 7.16. Шпиндельный узел станка с электромеханическим зажимом и цанговым патроном*

во втором случае (рис.7.16), благодаря связи винта с ротором-гайкой и дополнительного электромагнитного поля между этим ротором и статором возникает крутящий момент регулируемой величины, который вращает гайку, ввинчивая в нее винт и перемещая его в продольном направлении. Благодаря системе управления, при наличии датчиков достигается автоматическое регулирование силы зажима-разжима заготовки и обеспечение необходимого усилия зажима, пропорционального крутящему моменту на приводе зажима.

В первых двух случаях мотор-шпиндель является базовой деталью, к которому крепятся (рис. 7.13, в) сменные модули-фланцы, в которых содержатся ЗП и их приводы. Фланцы также являются универсальными узлами и содержат взаимозаменяемые детали.

В третьем варианте в шпиндельном узле (рис. 7.17) содержится мотор-шпиндель (М1), винтовая передача и ЗП (М3). Гайка винтовой передачи с одной стороны жёстко связана с ротором электромеханической системы (М2), расположенным соосно со шпинделем с возможностью вращения и продольного перемещения за счет поля разного направления, а с другой стороны через тела качения с исходным плунжером малого диаметра, расположенного соосно с плунжером большого диаметра со стороны цангового патрона М3. Между плунжерами образуется замкнутая гидравлическая система с давлением жидкости, действующего на выходной плунжер большого диаметра, развивая усилие на подпружиненную подвижную втулку цангового зажимного патрона, кратную пропорционален квадрату диаметров или площадям плунжеров [329].



*Рис. 7.17. Шпиндельный узел станка с текучей средой*

В данном случае основным является мотор-шпиндель, а сменными деталями являются задний фланец и шпиндель, который является ротором и содержит в себе ЗП и электрогидромеханическую систему зажима.

#### 7.4. Применение идеологии многоуровневого морфологического синтеза при создании станков каркасных компоновок

Изложенная в п. 2.1 идеология многоуровневого морфологического синтеза ЗМ реализована на примере создания малогабаритных фрезерных станков с компьютерным управлением [121, 132].

Сложный процесс оптимального проектирования станка как сложной ТС можно представить в виде итерационного процесса последовательного решения многовариантных (многоуровневых, многоциклических, многокритериальных, многоэкстремальных) задач синтеза, анализа и испытаний (рис. 7.18) [138].

При этом на каждом уровне, начиная от идей и заканчивая конструкцией, множество вариантов решения может быть представлено в виде морфологических моделей с последовательной их конкретизацией.

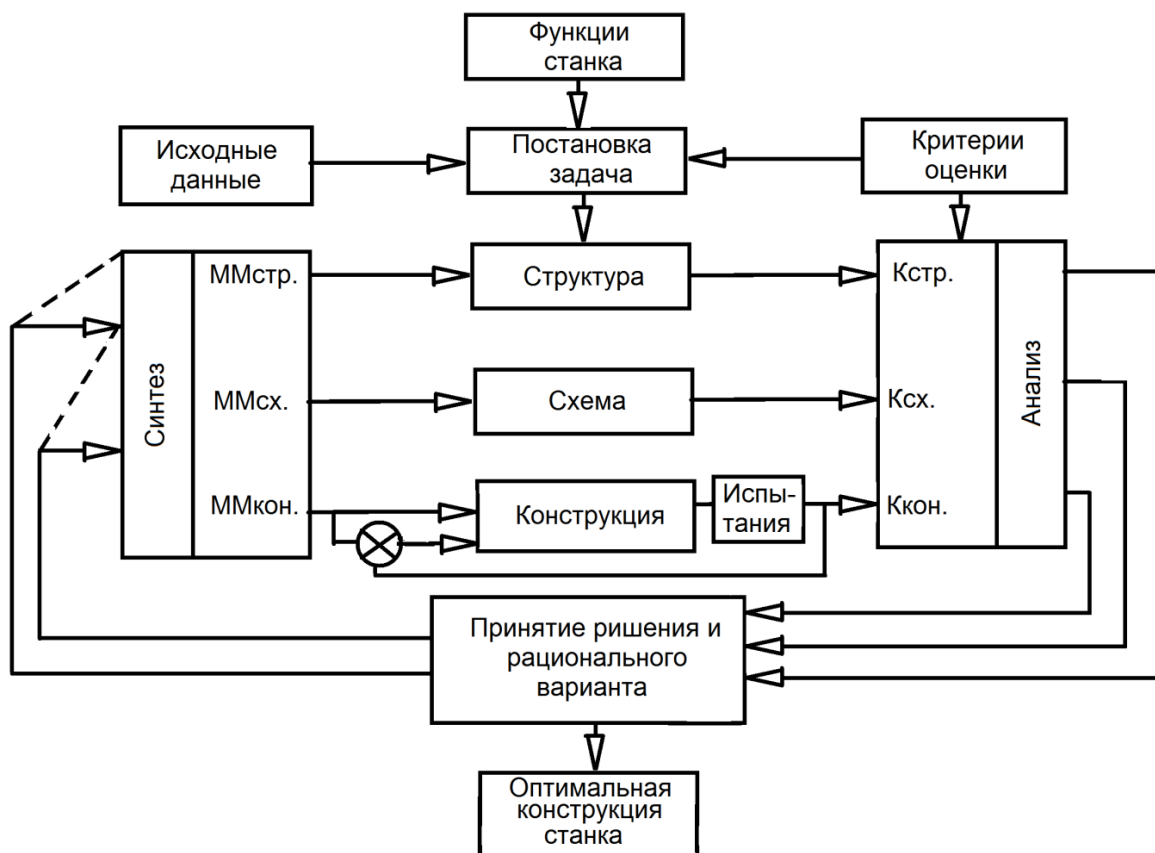


Рис. 7.18. Алгоритм многоуровневого морфологического синтеза станка

На уровне структурного синтеза задача сведена к поиску рациональных форм несущих систем в виде морфологической модели с тремя основными признаками: основание, каркас, верхняя траверса (рис. 7.19):

$$N_{стр} = N_{осн} \cdot N_{кар} \cdot N_{тр} = 4 \cdot 7 \cdot 4 = 112 \quad (7.11)$$

При помощи критериев отобраны каркасы, наиболее подходящие для использования в качестве несущей системы станка.

Весовые коэффициенты: 1) удобство обслуживания ( $K_{уо}$ ) – X1; 2) внутренний объём ( $K_{во}$ ) – X2; 3) металлоёмкость каркаса ( $K_{мк}$ ) – X3; 4) стойкость несущей системы ( $K_{ст}$ ) – X4;

По комплексному критерию произведена бальная оценка вариантов,

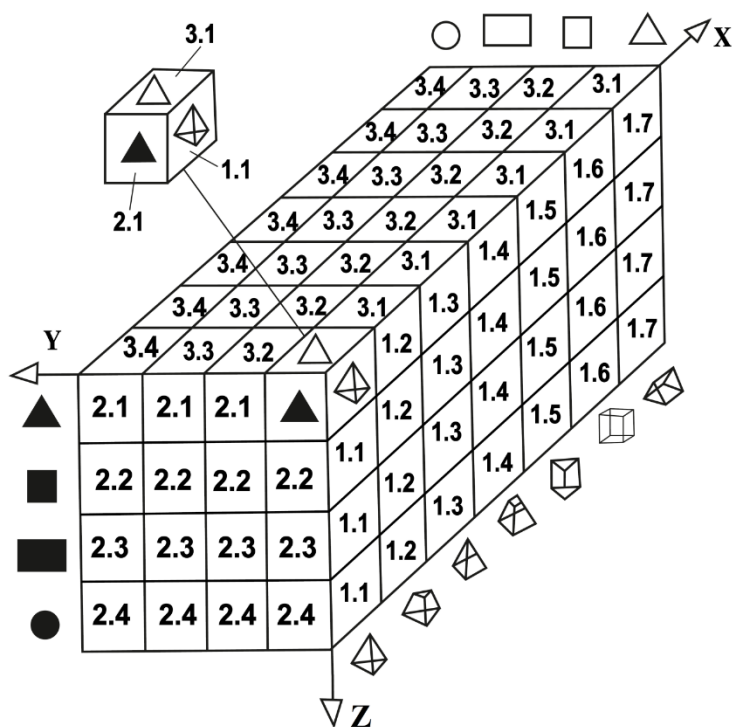


Рис. 7.19. Морфологическая матрица каркасных несущих систем (структур)

согласно которой наиболее подходящими являются каркасы на основе ниже приведенных фигур (рис. 7.20). По всем весовым коэффициентам наибольшее численное значение у четырехгранной пирамиды.



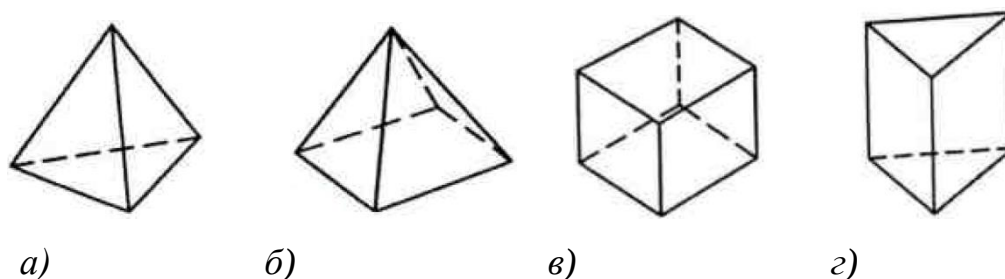


Рис. 7.20. Пространственные геометрические фигуры, выбранные для использования в качестве несущей системы станка: а) трёхгранная пирамида; б) четырёхгранная пирамида; в) куб; г) призма

На этапе схемного синтеза из морфологической таблицы схем отобрано ряд вариантов преобразования движения для полученных каркасов, среди которых имеются компоновки, как с механизмами параллельной структуры, так и без МПС. Варианты перебороч представлены в табл. 7.6.

Таблица 7.6

Морфологическая таблица перебороч вариантов

| 1. Несущая система               | 2. Метод преобразования рабочих движений                       | Координаты рабочих движений |                 |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------|
|                                  |                                                                | 3. Линейные                 | 4. Вращательные |
| 1.1 Трёхгранная пирамидальная    | 2.1 Без МПС                                                    | 3.1 X                       | 4.1 A           |
| 1.2 Четырёхгранная пирамидальная | 2.2 Смена координат опорных шарниров (штанги постоянной длины) | 3.2 Y                       | 4.2 B           |
|                                  |                                                                | 3.3 Z                       | 4.3 C           |
|                                  | 2.3. Смена длины штанга                                        | 3.4 X, Y                    | 4.4 A, B        |
|                                  |                                                                | 3.5 X, Z                    | 4.5 A, C        |
| 1.3 Призматическая               | 2.4. Принудительное вращение шарнира                           | 3.6 Y, Z                    | 4.6 B, C        |
|                                  |                                                                | 3.7 X, Y, Z                 | 4.7 A, B, C     |
| 1.4 Кубическая                   | 2.5 Смена угол между элементами кинематической цепи            |                             |                 |
|                                  | 2.6. Комбинированный                                           |                             |                 |

Общее количество возможных вариантов, исходя из данной матрицы

$$N = 4 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 7 = 1176.$$

При помощи весовых коэффициентов отобраны варианты, наиболее подходящие для использования.



Весовые коэффициенты: 1) степень подвижности ИО/заготовки ( $K_{сп}$ ) –  $X_1$ ; 2) продуктивность ( $K_{пр}$ ) –  $X_2$ ; 3) внутренний объём ( $K_{во}$ ) –  $X_3$ ; 4) сложность управления ( $K_{су}$ ) –  $X_4$ ; 5) технологические возможности ( $K_{тв}$ ) –  $X_5$ ; 6) стойкость несущей системы ( $K_{ст}$ ) –  $X_6$ ; 7) металлоёмкость каркаса ( $K_{мт}$ ) –  $X_7$ ; 8) удобство обслуживания ( $K_{уо}$ ) –  $X_8$ ;

По комплексному критерию произведена бальная оценка вариантов, согласно которой наиболее рациональными являются компоновки на основе четырёхгранного каркаса с мотор-трёхгранной пирамиды с МПС и штангами постоянной длины (рис. 7.21).

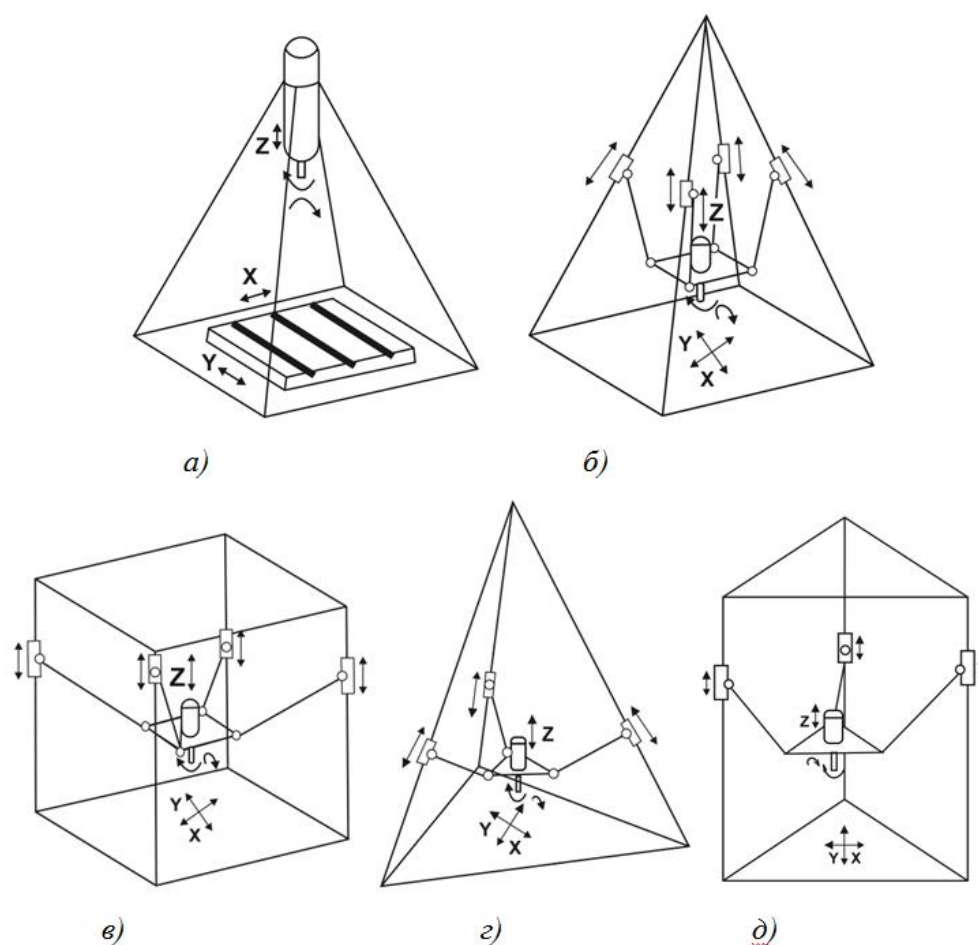


Рис. 7.21. Компоновки станков на основе отобранных каркасов: а) четырёхгранная пирамида; б) четырёхгранная пирамида с МПС; в) куб с МПС; г) трёхгранная пирамида с МПС; д) трёхгранная призма с МПС

На последнем этапе синтеза при помощи таблицы конструктивных элементов разработаны конструкции станков на основе четырёхгранной и трёхгранной пирамид, а также трёхгранной призмы (табл. 7.7). Общее количество возможных вариантов, исходя из данной матрицы,  $N = 4 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 = 61440$ .

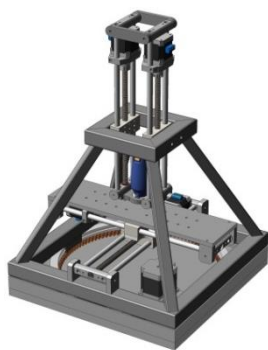
Таблица 7.7

*Морфологическая таблица переборов вариантов на последнем этапе синтеза*

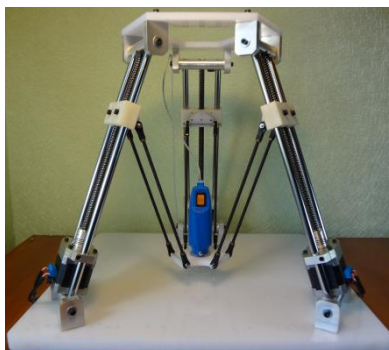
| 1. Привод главного движения | Координатные блоки рабочих движений (линейных) |                    | 4. Координаты вращательных движений (вокруг X, Y, Z) | 5. Тип штанг МПС | 6. Основание | 7. Несущая система | 8. Траверса |
|-----------------------------|------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------|------------------|--------------|--------------------|-------------|
|                             | 2. Координата Z                                | 3. Координата X, Y |                                                      |                  |              |                    |             |
| 1.1                         | 2.1                                            | 3.1                | 4.1                                                  | 5.1              | 6.1          | 7.1                | 8.1         |
| 1.2                         | 2.2                                            | 3.2                | 4.2                                                  | 5.2              | 6.2          | 7.2                | 8.2         |
| 1.3                         | 2.3                                            | 3.3                | 4.3                                                  | 5.3              | 6.3          | 7.3                | 8.3         |
| 1.4                         | 2.4                                            | 3.4                | 4.4                                                  |                  | 6.4          | 7.4                | 8.4         |
|                             | 2.5                                            |                    |                                                      |                  |              |                    |             |

При помощи весовых коэффициентов отобраны, варианты наиболее подходящие для использования станков.

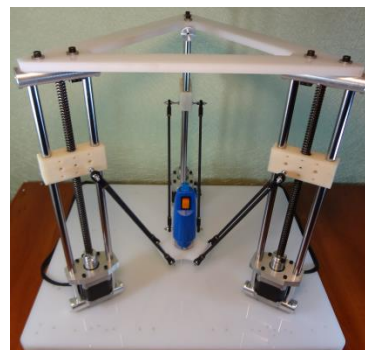
Определены конструкции основных модулей будущих станков. По комплексному критерию установлена иерархия полученных вариантов. Изготовленные малогабаритные фрезерные станки на основе отобранных компоновок и конструкций (рис. 7.22).



а)



б)



в)

Рис. 7.22. Конструкции станков на основе отобранных схем: а) четырёхгранная пирамида [337]; б) трёхгранная пирамида с МПС; в) трёхгранная призма с МПС

### **7.5. Прогнозирование мобильных станков для различных условий их применения методом морфологического анализа**

Сердцевиной машиностроения всегда было и остается станкостроение, где производимые станки являются машинами, создающими другие машины [122]. Уровень станкостроения во многом определяет независимость и авторитет страны в мировом сообществе [101, 102]. Поэтому станкостроению необходимо всегда отдавать приоритеты, чтобы не оказаться сырьевым придатком, рынком сбыта чужих товаров и страной продажи дешевой рабочей силы, которая из-за отсутствия собственного производства теряет квалификацию и не может конкурировать с производителями и квалифицированными специалистами других стран.

Станок как рабочая машина проникает во все сферы промышленного, аграрно-технического, ремонтно-восстановительного производства, а также в отдаленные от производства места и даже в космос. Необходимость проведения ремонтно-восстановительных работ, непосредственно в месте нахождения вышедшего из строя объекта требует мобильности станочного оборудования, которое, будучи оторванным от стационарного положения, должно нормально функционировать с учетом особенностей окружающей среды [128].

Введение дополнительных функций (мобильность, адаптация и подвижность) требует иного методического подхода к созданию станка, над чем уже сейчас надо задуматься проектировщику, предлагающего новые идеи и принципы, что всегда будоражило умы и фантазии людей, мечтающих расширить горизонты своего познания [269]. Потому предложена постановка новых задач для решения круга вопросов и проблем в области создания станков с учетом энергетического голода, глобализации и гуманизации. Для прогнозирования возможности появления новых идей и фантазий в области станкостроения использован системно-морфологический подход [97], рассматривающий станок как ТС с основными морфологическими признаками (рис. 7.23). В соответствии с выбранными признаками построена

морфологическая модель в виде табл. 7.8, где число альтернатив для каждого признака с учетом фантазий может увеличиваться, что расширит поле идей.

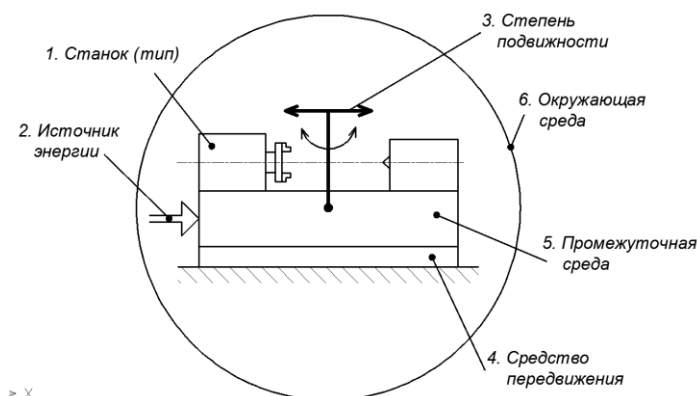


Рис. 7.23. Основные морфологические признаки станка различной мобильности

Таблица 7.8

Морфологическая таблица станков различной мобильности

| СТАНОК                  |                             |                                      | СВЯЗЬ                          | СРЕДА                             |                        |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 1. Тип                  | 2. Источник энергии         | 3. Степень подвижности (мобильности) | 4. Средства передвижения       | 5. Промежуточная                  | 6. Окружающая          |
| 1.1. Токарный           | 2.1. Человек                | 3.1. Стационарный                    | 4.1. Отсутствуют               | 5.1. Фундамент                    | 6.1. Помещение         |
| 1.2. Серлильнофрезерный | 2.2. Солнце                 | 3.2. Подвижный                       | 4.2. Ноги                      | 5.2. Платформа                    | 6.2. Земная территория |
| 1.3. Шлифовальный       | 2.3. Ветер                  | 3.3. Подвижный                       | 4.3. Автомобиль                | 5.3. Подушка                      | 6.3. Водный бассейн    |
| 1.4. Зуборезный         | 2.4. Вода                   | 3.4. Подвижный                       | 4.4. Железнодорожный транспорт | 5.4. Гидравлическая               | 6.4. Воздушный бассейн |
| 1.5. Протяжной          | 2.5. Пар                    | 3.5. Подвижный                       | 4.5. Морской транспорт         | 5.5. Подушка                      | 6.5. Космос            |
| 1.6. Многоцелевой       | 2.6. Электричество          | 3.6. Поворотный                      | 4.6. Воздушный транспорт       | 5.6. Платформа с электромагнитной | 6.6. Ледяной бассейн   |
| 1.7. Агрегатный         | 2.7. Горючее топливо        | 3.7. Подвижный                       | 4.7. Космический корабль       | 5.7. Подушка                      | 6.7. Иная планета      |
| 1.8. Специальный        | 2.8. Биотопливо             | 3.8. Подвижный                       | 4.8. Космический корабль       | 5.8. Платформа с электромагнитной | 6.8. Иная планета      |
| •                       | 2.9. Комбинация (2.6 + 2.7) | •                                    | •                              | 5.9. Подушка                      | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.10. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.11. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.12. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.13. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.14. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.15. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.16. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.17. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.18. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.19. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.20. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.21. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.22. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.23. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.24. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.25. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.26. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.27. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.28. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.29. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.30. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.31. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.32. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.33. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.34. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.35. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.36. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.37. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.38. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.39. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.40. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.41. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.42. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.43. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.44. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.45. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.46. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.47. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.48. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.49. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.50. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.51. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.52. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.53. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.54. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.55. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.56. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.57. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.58. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.59. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.60. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.61. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.62. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.63. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.64. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.65. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.66. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.67. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.68. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.69. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.70. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.71. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.72. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.73. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.74. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.75. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.76. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.77. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.78. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.79. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.80. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.81. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.82. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.83. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.84. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.85. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.86. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.87. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.88. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.89. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.90. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.91. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.92. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.93. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.94. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.95. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.96. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.97. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.98. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.99. Подушка                     | •                      |
| •                       | •                           | •                                    | •                              | 5.100. Подушка                    | •                      |

Морфологическую модель можно представить в виде морфологической матрицы станков различной мобильности:

свернутой

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{ИС}} \wedge M_{\text{СП}} \wedge M_{\text{СР}}, \quad (7.12)$$

где  $M_{\text{ИС}}$ ,  $M_{\text{СП}}$  и  $M_{\text{СР}}$  – морфологические матрицы соответственно исполнения станка, средств его передвижения и среды его пребывания при выполнении функций;

и развернутой

$$M_{\text{ст}} = \left| \begin{array}{ccc|c|c} 1 \cdot 1 & 2 \cdot 1 & 3 \cdot 1 & & \\ 1 \cdot 2 & 2 \cdot 2 & 3 \cdot 2 & & \\ 1 \cdot 3 & 2 \cdot 3 & 3 \cdot 3 & & \\ 1 \cdot 4 & 2 \cdot 4 & 3 \cdot 4 & & \\ 1 \cdot 5 & 2 \cdot 5 & & & \\ 1 \cdot 6 & 2 \cdot 6 & & & \\ 1 \cdot 7 & 2 \cdot 7 & & & \\ 1 \cdot 8 & 2 \cdot 8 & & & \\ & 2 \cdot 9 & & & \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{c} 4 \cdot 1 \\ 4 \cdot 2 \\ 4 \cdot 3 \\ 4 \cdot 4 \\ 4 \cdot 5 \\ 4 \cdot 6 \\ 4 \cdot 7 \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{cc} 5 \cdot 1 & 6 \cdot 1 \\ 5 \cdot 2 & 6 \cdot 2 \\ 5 \cdot 3 & 6 \cdot 3 \\ 5 \cdot 4 & 6 \cdot 4 \\ 5 \cdot 5 & 6 \cdot 5 \\ 5 \cdot 6 & 6 \cdot 6 \\ & 6 \cdot 7 \end{array} \right| \quad (7.13)$$

Общее число вариантов  $N = 8 \cdot 9 \cdot 4 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 7 = 84672$ . Даже при такой ограниченной морфологической модели имеется много решений, перебор которых даже с применением ЭВМ требует достаточного времени [38, 182-184]. Количество решений может быть ограничено при конкретизации задачи поиска идей. Например, поиск идей ограничивается созданием многоцелевого станка (альтернатива 1.6) с некоторыми источниками энергии (альтернативы 2.2, 2.3, 2.6, 2.7, 2.9) в условиях различной мобильности (альтернативы 3.2, 3.3, 3.4) при использовании различных средств передвижения (альтернативы 4.1, 4.3 – 4.7), наличии определенных промежуточных сред (альтернативы 5.2 – 5.4) и для заданных условий окружающей среды (6.1 – 6.5).

В этом случае усеченная морфологическая матрица выглядит так:

$$M_{\text{ст}} = \left| \begin{array}{ccc|c} & 2 \cdot 2 & & \\ & 2 \cdot 3 & 3 \cdot 2 & \\ 1 \cdot 6 & 2 \cdot 6 & 3 \cdot 3 & \\ & 2 \cdot 7 & 3 \cdot 4 & \\ & 2 \cdot 9 & & \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{c} 4 \cdot 1 \\ 4 \cdot 2 \\ 4 \cdot 3 \\ 4 \cdot 4 \\ 4 \cdot 5 \\ 4 \cdot 6 \\ 4 \cdot 7 \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{cc} & 6 \cdot 1 \\ 5 \cdot 2 & 6 \cdot 2 \\ 5 \cdot 3 & 6 \cdot 3 \\ 5 \cdot 4 & 6 \cdot 4 \\ 5 \cdot 5 & 6 \cdot 5 \end{array} \right|, \quad (7.14)$$

что даёт число вариантов идей  $N = 1 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 5 = 1800$ .

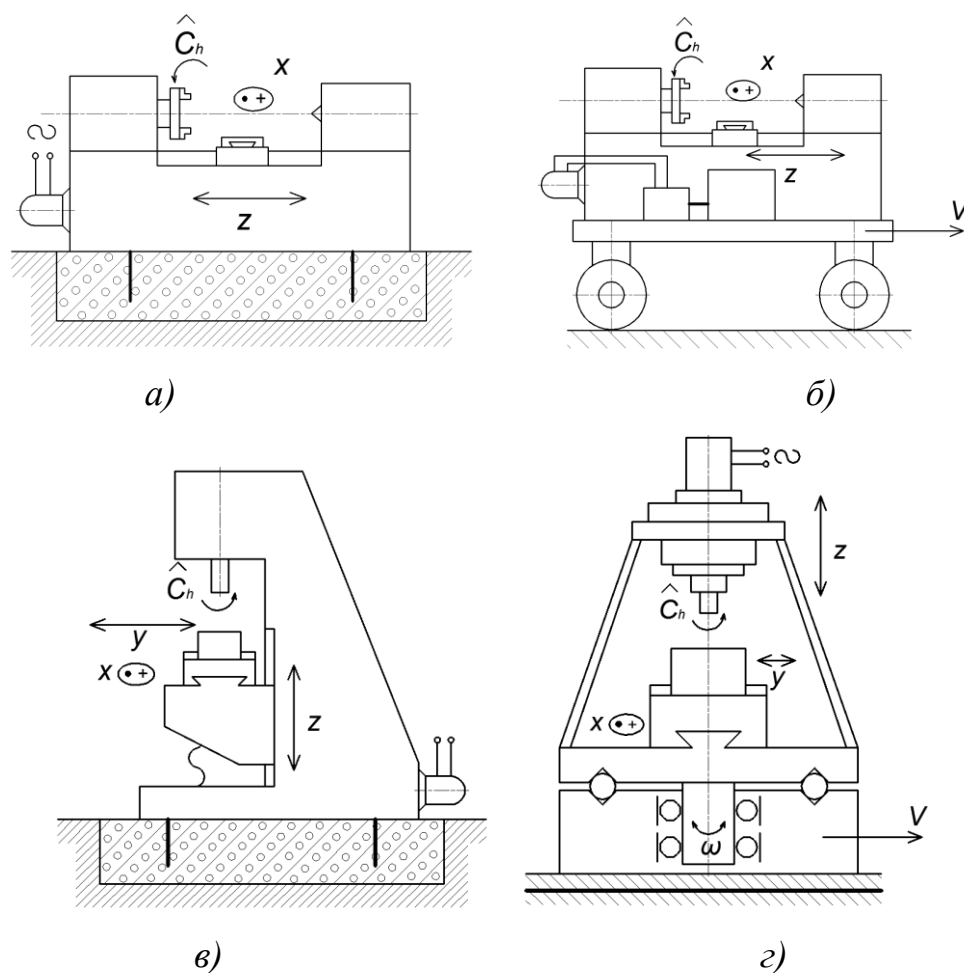


Рис. 7.24. Токарные (а, б) и сверлильно-фрезерные (в, г) разной мобильности: а, в – стационарные; б – подвижный передвижной; г – подвижный поворотно-передвижной;  $X, Y, Z$  – управляемые координаты;  $\hat{C}_h, \hat{C}_y$  – вращение шпинделя;  $V$  – скорость поступательного перемещения платформы;  $\omega$  – угловая скорость поворота станка

В качестве примеров на рис. 7.24 приведены станки различной мобильности согласно следующим морфологическим формулам:

$X_1 = |1.1 - 2.6 - 3.1| \wedge |4.1| \wedge |5.1 - 6.1|$  – традиционный вариант (рис. 7.24, а);

$X_2 = |1.1 - \underline{2.9} - \underline{3.3}| \wedge |4.3| \wedge |5.2 - \underline{6.2}|$  – для ремонта в полевых условиях с источником энергии от ДВС и генератора (рис. 7.24, б);

$X_3 = |\underline{1.2} - 2.6 - 3.1| \wedge |4.1| \wedge |5.1 - 6.1|$  – традиционный вариант (рис. 7.24, в);

$X_4 = |\underline{1.2} - 2.6 - \underline{3.4}| \wedge |\underline{4.1}| \wedge |\underline{5.5} - 6.1|$  – пирамидальная компоновка [328] с поворотом на основании-подушке, перемещаемом по электромагнитной трассе в гибком автоматизированном цехе (рис. 7.24, г).

В вариантах  $X_2 - X_4$  подчеркнуты альтернативы признаков, отличные от варианта  $X_1$ .

С использованием электромеханических систем в виде мотор-шпинделей, линейных и планарных электродвигателей предложен мобильный станок без механических передач, защищенный патентом Украины на изобретение №101447 и который совмещает функции робокара, а также станок с поворотной несущей системой в виде усечённой пирамиды-каркаса, защищённый патентом Украины на полезную модель №67317 [340] (рис. 7.25).

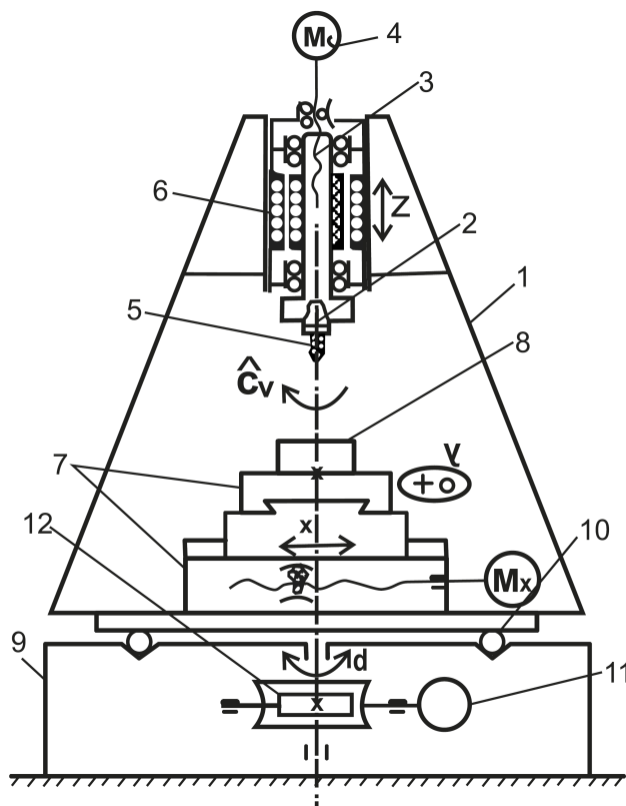


Рис. 7.25. Вертикально-фрезерный станок с ЧПУ высокой мобильности

В условиях гибкого автоматизированного производства мобильные (подвижные) станки (рис. 7.26, б, в) по сравнению с традиционными стационарными станками (рис. 7.26, а) позволяют сократить рабочие площади, уменьшить длину

трасс перемещения изделий, а в некоторых случаях и количество вспомогательного оборудования.

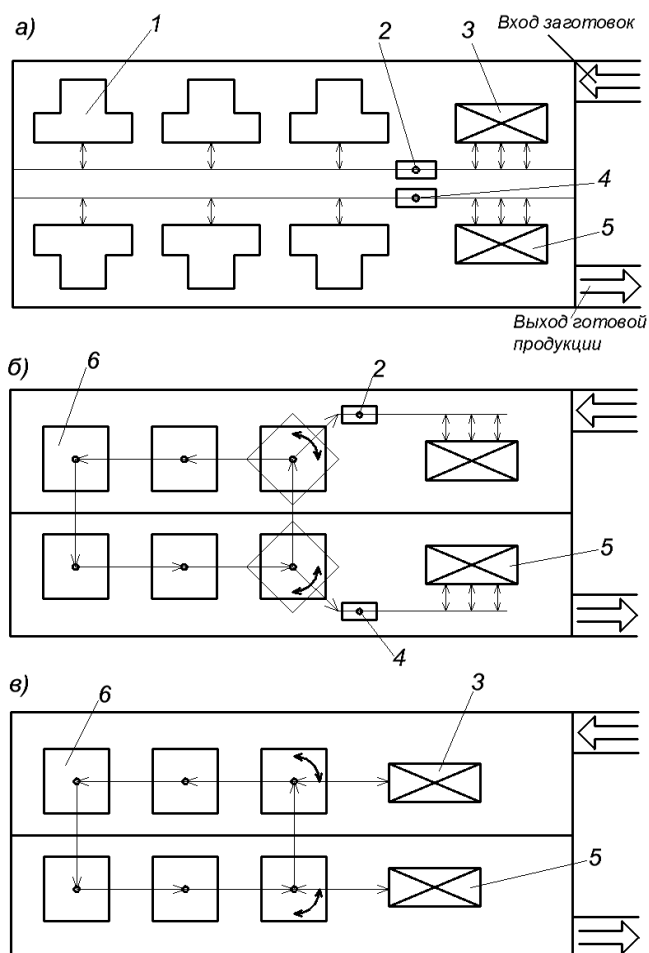


Рис. 7.26. Варианты планировки гибкого автоматизированного цеха: а – с традиционными станками с ЧПУ (вариант  $X_3$ ); б, в – с мобильными станками пирамидальной компоновки (вариант  $X_4$ ): 1 – традиционный станок; 2, 1 – робокары загрузки, разгрузки; 3, 5 – стеллажи заготовок, готовых деталей; 6 – станок пирамидальной компоновки

## Выводы

1. Показано, что генетико-морфологический подход может успешно применяться не только для описания и синтеза зажимных патронов, но и для приводов зажима, захватных устройств промышленных роботов и манипуляторов, а также для станков нового поколения и другого технологического оборудования.
2. Шпиндельные узлы с электрогидромеханическим зажимным механизмом отличаются простотой конструкции и использованием текучей среды (типа



гидропласт), что исключает использование дополнительной гидроаппаратуры, снижает цену и делает их экономически эффективными. Что касается шпиндельного узла с электромеханическим зажимом, с использованием электромагнитного взаимодействия, то основными преимуществами являются простота конструкции, дешевизна используемых компонентов и их изготовления.

3. Предлагаемый модульный принцип сборки шпиндельных узлов является перспективным. С помощью данного метода можно значительно повысить производительность сборочного производства и повысить его технико-экономические показатели. Примеры созданных шпиндельных узлов, собранных на модульном принципе, показывают его универсальность и простоту сборки, а взаимозаменяемость их отдельных деталей упрощает процесс организации сборочного производства и уменьшает площади помещений, где размещены сборочные линии.
4. Предложенная методология прогнозирования в области расширения сферы применения мобильных станков новых поколений на основе системно-морфологического подхода может быть использована применительно к другому технологическому оборудованию на этапе поиска новых идей и концепций.
5. Разработаны рекомендации по применению методологии многоуровневого морфологического синтеза и генетико-морфологического применительно к задачам создания сложных технических систем различного функционального назначения.
6. Предложенные практические рекомендации по повышению КПД., жесткости точности, широкодиапазонности и быстродействию ЗМ. Разработаны новые конструктивные схемы шпиндельных узлов с применением модульного принципа.
7. С использованием электромеханических систем в виде мотор-шпинделей, линейных и планарных электродвигателей предложен мобильный станок без механических передач, защищенный патентом Украины на изобретение №101447 (рис. 7.25), который совмещает функции робокара.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

**Основной научный результат** – впервые разработана и реализована методология многоуровневого генетико-морфологического синтеза и описания технологических систем (ТС) различного уровня сложности, которая прошла практическую апробацию применительно к созданию конкурентоспособных 3М различного функционального назначения и конструктивного исполнения, что позволит повысить технико-экономических показателей и расширить функциональные возможности металлорежущих станков.

1. Определены основные проблемы теории синтеза 3М, оказывающих существенное влияние на показатели качества работы станка как в процессе зажима-разжима, так и при резании. Выполнен анализ эволюции ТС различного происхождения, законов их развития и существующих методов поиска новых технических решений, а также ранее выполненных работ по применению системно-морфологического подхода при создании 3М и теории эволюции антропогенных систем.

2. Впервые разработаны теоретические основы многоуровневого морфологического синтеза 3М с применением положений генетической теории эволюции антропогенных систем с учетом наследственных принципов усложнения структуры и сохранения генетической информации на хромосомном, объектном, популяционном, видовом, системном и межсистемном уровнях.

3. Впервые предложено на хромосомном уровне моделирование и описание 3М, где объектом приложения энергетического (силового) поля принята материальная точка, движущаяся в пространстве под действием силы и (или) момента, что обеспечивает полноту решения задач и существенно упрощает поиск структур по заданной функции цели.

4. Показано, что передача энергии от одной материальной точки на входе к другой материальной точке на выходе осуществляется в виде множества силовых (энергетических) потоков на хромосомном уровне, представляющих морфологическую

модель (пар хромосом) входов и выходов с максимальным числом вариантов 144 для любых механизмов. 72 – для ЗМ, обеспечивающих закрепление невращающихся объектов сложной формы, 48 – при зажиме объектов типа тел вращения.

5. На основе периодической классификации первичных источников электромагнитного поля предложена генетическая классификация источников упруго-силового поля, в основу которой положены пространственные формы контактного взаимодействия зажимного элемента с объектом зажима, обобщенные 7-ю геометрическими классами (цилиндрическими, коническими, плоскими, призматическими, пирамидальными, сферическими, тороидальными) и 12-ю классами (видами) совместимых упруго-силовых полей из 32-х возможных.

6. Показано, что основу структурообразования популяций ЗМ определяют силовые (энергетические) потоки и вид преобразования энергии, которые в механическом исполнении сводятся к ограниченному количеству 7-ми типов: рычажные, клиновые, плунжерные, спиральные, винтовые, зубчатые и пружинные (упругие).

7. Впервые применительно к механическим устройствам разработан метод направленного синтеза ЗМ с использованием 5-ти генетических операторов: репликации, скрещивания, инверсии, кроссинговера и мутации. Результаты практической апробации метода стали основой для разработки оригинальных технических решений на уровне изобретений.

8. Предложены обобщенная и частные кубические модели энергетических процессов, происходящих в ЗМ при зажиме и поддержании объекта зажима в зажатом состоянии при вращении шпинделя и при резании, в соответствии с которыми сумма притекающих, утекающих и поглощающей (выделяемой) энергии равна нулю.

9. Предложено в силовых (энергетических) потоках ЗМ станков нового поколения использовать кроме и вместо механических передач и преобразователей в виде твердых тел, электромагнитные поля, действующие непосредственно в составе (структуре) электромеханических систем передачи и преобразования, жидкотекучие и вязкие среды, воздушные среды, магнитные поля притяжения и отталкивания силы.

10. Теоретически исследованы силовые и жесткостные характеристики инструментальных зажимных патронов и патронов для тел вращения (прутков, труб и заготовок) с различными силовыми (энергетическими) потоками, имеющими различные генетические формулы.

11. Получил развитие подход приведения к упругому и упруго-фрикционному шарниру не только цанговых, но и других конструкций зажимных патронов с применением принципа суперпозиции и рассмотрения мест сопряжения по длине в виде упругого основания. Показано, что произвольный ЗП можно характеризовать динамическим портретом с присущей ему частотой собственных колебаний.

12. Проведенные экспериментальные исследования в статике и в производственных условиях подтвердили теоретические исследования.

13. Разработаны конструкции и ТУ на широкодиапазонные эксцентриковые инструментальные зажимные патроны с двумя силовыми потоками и использованием гибридных клино-рычажных кулачков, реализующих эффект эмерджентности и позволяющих в 2,5-3 раза повысить частоту вращения патрона при фрикционном гашении влияния центробежных сил неуравновешенных кулачков.

14. Предложенные практические рекомендации по повышению КПД, жесткости, точности, широкодиапазонности и быстродействия ЗМ. Разработаны новые конструктивные схемы шпиндельных узлов с применением модульного принципа.

15. Разработаны рекомендации по применению методологии многоуровневого морфологического синтеза и генетико-морфологического подхода применительно к задачам создания сложных технических систем различного функционального назначения, что проиллюстрировано на станке высокой мобильности без механических передач.

16. Основные результаты, методы исследований и принципы генетико-морфологического подхода используются в учебном процессе кафедры конструирования станков и машин НТУУ «КПИ» (Украина) и факультета инженерии университета Августинью Нетто (Ангола).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ. – М.: Машиностроение, 1987. – 232с.
2. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / А.И. Половинкин, Н.К. Бобков, Т.Я. Буш и др.: под ред. А.И. Половинкина. – М.: Радио и связь. – 344с.
3. Аверченков В.Н., Малахов Ю.А. Методы инженерного творчества. – Брянск: БИТМ, 1994. – 110 с.
4. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: / Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Кириченко А.М. та ін. / Під ред. Ю.М. Кузнєцова. Навч. посібник для ВНЗ у 3-х част. – Кіровоград, 2003. – Частина II. Проектування та дослідження вузлів агрегатно-модульного технологічного обладнання. – 286 с
5. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: / Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Кириченко А.М. та ін. / Під ред. Ю.М. Кузнєцова. Навч. посібник для ВНЗ у 3-х част. – Кіровоград, 2003. – Частина III. Агрегатно-модульне технологічне обладнання нового покоління, його оснащення та інструментальне забезпечення. – 507 с.
6. Александров Л.В., Блинников В.И., Капова Н.Н. Алфавитный аннотированный справочно-библиографический указатель принципов, методов, правил и приемов инженерного творчества. – М.: ВНИИПИ НПО «Поиск», 1989. – 50 с.
7. Аль Рефо Ибрагим Фархан Салман. Повышение точности устройств автоматической смены зажимных элементов в токарном модуле. Дис....канд. техн. наук – К.: НТУУ «КПИ», 2002. – 168 с.
8. Альтшуллер Г.С. Алгоритм изобретения. – М: Московский рабочий, 1972. – 296 с.
9. Альтшуллер Г.С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. – Новосибирск: Наука, 1986. – 209 с.

10. Альтшуллер Г.С., Злотин А.В., Филатов В.И. Поиск новых идей: от озарения к технологии (Теория и практика решения изобретательских задач). – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1989. – 382 с.
11. Амиров Ю.Д. Стандартизация и проектирование технических систем. – М.: Изд-во Стандартов, 1985. – 312 с.
12. Анискин Ю.П., Моисеева Н.К., Проскуряков А.В. Новая техника: повышение эффективности создания и освоения. – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с.
13. Антонов А.В. Психология изобретательского творчества. – К.: Вища школа, 1978. – 176 с.
14. Атанасова М.Г. Синтез и анализ на методи за довършващо отработаване на отвори чрез ППД въз основа на диференциално-морфологичния метод / М.Г.Атанасова // Известия на Технически университет Габрово, т.46'2013. Университетско издателство «Васил Априлов», с. 3 – 9.
15. Ахрамович В.Н. Анализ и синтез клино-плунжерных широкодиапазонных зажимных патронов токарных автоматов. Дис... канд. техн. наук. – К.: 1991. – 206 с.
16. Ачкурин И.А. Симметрия как принцип динамической физики // Принцип ассиметрии / под ред. Б.М. Кедрова, Н.Ф. Овчинникова. – М.: Наука, 1987. – с. 122-162.
17. Ацюковский В.А. Философия и методология технического комплексирования. – М.: «Петит», 2005. – 221 с.
18. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
19. Базров Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1984 – 256 с.
20. Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.

21. Барабанов А.Б. Завгородний В.И., Маслов А.Р. Расчет конструкции патрона для фрезерования лопаток компрессоров // Вестник МГТУ "Станки" 2008, № 2. – с. 58-62.
22. Белкин А.Р., Левин М.Ш. Принятие решений: комбинаторные модели аппроксимации информации. – М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1990. – 160с.
23. Белый А.Р. Поиск и решение задач в инженерной электрофизике. – Харьков, 1980. – 84 с.
24. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. Учебное пособие для вузов. – М.; Высшая школа, 1972. – 416 с.
25. Блох А.Ш. Граф-схемы и алгоритмы. – Минск: Вышэйная школа», 1987. – 144 с.
26. Блюмберг В.А., Глущенко В. Ф. Какое решение лучше?: Метод расстановки приоритетов. – Л.: Лениздат, 1982. – 160с.
27. Большаков А.П., Якубов Ч.Ф., Абдулгазис А.У., Ваниев Э.Р. Основы теории изобретательства. – Симферополь: КРП «Издательство Крымучпедгиз», 2007. – 192 с.
28. Борисов В.И. Общая методология конструирования машин / В.И. Борисов. – М.: Машиностроение, 1978. – 120 с.
29. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1981. – 718 с.
30. Буш Г.Я. Методологические основы научного управления изобретательством. – Рига: Лиесма. 1974. – 168 с.
31. Буш Г.Я. Генезис эвристической мысли // IV семинар по проблемам методологии и теории творчества. – Симферополь, 1984. – с. 124-127.
32. Буш. Г.Я. Стратегии эврилогии. – Рига: О-во Знание, 1986. – 64 с.
33. Валид Али Хусейн Рамадан. Синтез широкодиапазонных подающих атроно повышенной долговечности для токарных автоматов. Дис. ... канд. техн. наук. -К.: 2002. – 187 с.

34. Валькман Ю.Р., Подчасова Т.П. Основы системного подхода. Учебно-методическое пособие / Под общ. ред. к.т.н. Г.Н. Сердюка. – К.: ЗАО "Институт интеллектуальной собственности и права", 2000. – 36 с.
35. Васильев А.Л. Модульный принцип формирования техники / А.Л. Васильев – М.: Изд-во Стандартов, 1989. – 240с.
36. Вачев А.А. Разработка и исследование метода и устройств для стабилизации силовых характеристик цанговых зажимных механизмов. Дис.... канд. техн. наук, Габрово – София: Болгария, 1983. – 142 с.
37. Веселовский О.Н., Шнейберг Я.А. Очерки по истории электротехники. – М.: Изд. МЭИ, 1992. – 220с.
38. Воинов Б.С. Принципы поискового конструирования радиоэлектронных устройств: Учеб. пособие. – Горький: ГГУ, 1982. – 75 с.
39. Волохонский А.Г. Генетический код и симметрия / А.Г.Волохонский // Симметрия в природе. – Л.: 1971. – с.75.
40. Волошин В.Н. Синтез затискних патронів з позиційними багатопрофільними затискними елементами для токарних верстатів. – Дис.... канд. техн. наук. – К.: НТУУ «КПІ», 2003. – 234 с.
41. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков (основы компонетики). – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
42. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости. – М.: Гостех-издат, 1953. – 264 с.
43. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. [Пер. с англ.] / Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
44. Гафт М.Г. Методы оценки технического уровня. Интерактивный подход / М.Г. Гафт // Проблемы информационных систем, 1987, №3. – с.12 – 17.
45. Гевко І.Б. Структурний синтез гвинтових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями методом морфологічного аналізу / І.Б. Гевко,



- А.Є. Дячун, Р.О. Любачівський // Вісник севНТУ, серія машинобудування і транспорт, вип.128. – Севастополь: 2012. – с.37 – 41.
46. Глазунов В. Н. Поиск принципов действия технических систем. – М.: Речной транспорт, 1990. – 111 с.
  47. Глушков В.М. Введение в АСУ. – Киев: Наук. Думка, 1974. – 317 с.
  48. Глушков В.М. Кибернетика, изобретательство и ЭВМ // Изобретатель и рационализатор. – 1973, №2. – с.5 – 7.
  49. Глушков В.М. О прогнозировании на основе экспертных оценок. – Наукоеведение – прогнозирование – информатика. – К.: Наукова думка, 1970. – с. 201 – 204.
  50. Гмошинский В.Г. Инженерное прогнозирование. – М.: Энергиздат, 1982. – 208с.
  51. Гмошинский В.Г., Флиорент Г.И. Теоретические основы инженерного прогнозирования. – М.: Наука, 1973. – 303 с.
  52. Голдовский В.И., Вайнерман М.И. Рациональное творчество о направленном поиске новых технических решений. – М.: речной транспорт, 1990. (Методы анализа проблем и поиска решений в технике). – 120 с.
  53. Грановский Г.И. Кинематика резания. – М.: Машгиз, 1948. – 200 с.
  54. Головин В.И. Повышение надежности сверления электроинструментом глубоких отверстий. Дис.... канд. техн. наук. – Севастополь: СевНТУ, 2008. – 165 с.
  55. Гумінов В.В. Супортні системи автоматизованих верстатів для обточування кристалів природних алмазів. Дис. ... канд. техн. наук. – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулля, 2011. – 145 с.
  56. Дальский А.М. Цанговые зажимные механизмы. – М.: Машиностроение, 1966. – 168с.
  57. Демкин Н.Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.

58. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа и приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
59. Джонс Дж К. Методы проектирования / Пер. с англ. 2-е изд. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
60. Диксон Дж. Проектирование систем: изобретательство, анализ и принятие решений. – М.: Мир, 1969. – 440 с.
61. Добровольский В.А., Эрлих Л.Б. Основные принципы конструирования современных машин. – М.: Машгиз, 1956. – 108 с.
62. Дружинский И.А. Слагаемые качества конструкторских работ. – Л.: Лениздат, 1977. – 119 с.
63. Дубинин Н.П. Молекулярная механика генетических процессов. Молекулярная генетика, эволюция и генетическая инженерия. – М.: 1982. – 262 с.
64. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н., Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
65. Дунчева Г.В. Синтез, механика и оптимизация на самозатягащи патронници. Автореферат дис... канд. техн. наук. София: 2005. – 24 с.
66. Дурнев В.Д., Талашкевич И.П. Симметрия в технологии. – СПб: Политехника, 1993. – 256 с.
67. Евланов А.Г. Теория и практика принятия решений. М.: Экономика, 1984. – 176 с.
68. Евтушенко А.А., Неня В.Г., Сапожников С.А., Твердохлеб И.Б. Сборник задач по курсу «Теория развития технических систем» – Сумы: СумГУ, 1985. – 107 с.
69. Жерардэн Л. Морфологический анализ – метод творчества // Руководство по научно-техническому прогнозированию. – М.: Прогресс, 1977. – с.221 – 234 с.

70. Заблонский К.И., Белоконов И.М., Щекин Б.М. Теория механизмов и машин: Учебник. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1989. – 376 с.
71. Зеленский К.В. Синтез збірних торцевих фрез з пружно-демпфуючими елементами. Дис. ... канд. техн. наук.- КПІ, 1995. – 143 с.
72. Иванов А.В. Обеспечение качественных показателей компоновки станка-манипулятора с параллельной кинематикой. Дис. ... канд.техн.наук 05.03.01, Хабаровск: Тихоокеанский гос. ун-т, 2006. – 115 с.
73. Иванов Ю.М. Модульное проектирование технологии механической обработки деталей на станках с ЧПУ. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1982. – 108 с.
74. Иванюк И.А. Быстродействующие зажимные механизмы токарных автоматов с гидравлическим приводом. Дис. ... канд. техн. наук. – К.: КПІ, 1984. – 135 с.
75. Каменев А.Ф. Технические системы: закономерности развития. – Л.: Машиностроение, 1970. – 246 с.
76. Капустян В.М. Махотенко Ю.А. Конструктору о конструировании атомной техники. – М.: Атомиздат, 1981. – 190 с.
77. Капустян В.М., Махотенко Ю.А., Шеверов В.Г. Комбинаторный метод прогнозирования и анализа систем – КОМПАС. – Электронная техника. Сер.9. Автоматизированные системы управления. ЦНИИ Электроника, 1972, вып.І(1). – с. 67-73.
78. Картавов С.А., Основы рационального проектирования машин. – К.: Гостехиздат, УССР, 1958. – 325 с.
79. Катренко А.В. Системний аналіз об'єктів та процесів комп'ютеризації: Навчальний посібник. – Львів: Новий світ, 2000. – 424 с.
80. Кедров Б.М. О творчестве в науке и технике. – М.: Молодая гвардия, 1987. – 192 с.
81. Китов А.И. Прогнозирование экономических и управленческих задач. – М.: Сов. Радио, 1971. – 467 с.

82. Князева Е.Н. Синергетика. Нелинейность времени и ландшафты коэволюции / Е.Н. Князева, С.П.Курдюмов. – М.:Изд-во «Комкнига», 2014. – 272 с. (серия «Синергетика: от прошлого к будущему»).
83. Князева Е.Н. Основы синергетики. Синергетическое мировидение / Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов. – М.: Комкнига, 2005. – 240с.
84. Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звеньями. / С.Н. Кожевников. – К.: Издательство АН УССР, 1961. – 160 с.
85. Колесников А.В., Кириков А.В. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных систем. – М.: ИПИ РАН, 2007. – 387с.
86. Константинов О.Я. Магнитная технологическая оснастка. Л.: Машиностроение, Ленинград. Отд-ние, 1974. – 384с.
87. Конструирование машин: Справочно-методическое пособие: В 2 т. Под ред. К.Ф. Фролова. – М.: Машиностроение, 1998. – 236с.
88. Косіюк М.М., Черменський Г.П. Практикум з курсу "Основи науково-технічної творчості". – Хмельницький: Поділля. – 1998. – 280 с.
89. Крайнев А.Ф. Идеология конструирования / А.Ф. Крайнев – М.: Машиностроение-1, – 2003. – 384с.
90. Краснощеков П.С., Морозов В.В., Федоров В.В. Декомпозиция в задачах проектирования. Известия АН СССР, Техническая кибернетика, 1979, 2. – с.7 – 18.
91. Краснощеков П.С., Федоров В.В., Флеров Ю.А. Элементы математической теории принятия проектных решений. Автоматизация проектирования, 1997, 1, с. 15 – 23.
92. Кузнєцов Ю.М. Патентознавство та авторське право: Підручник. – К.: Кондор, 2005. – 428 с.
93. Кузнєцов Ю.М. Дипломне проектування з інтелектуальної власності / Монографія-довідник. – К.: ТОВ «ГНОЗІС», 2007. – 364 с.

94. Кузнецов Ю.М., Хамуйела Герра Ж.А. Синтез цанговых зажимных патронов с применением генетико-морфологического подхода // Промислова гідравліка і пневматика, № 1(39), 2013. – с. 86 – 90.
95. Кузнецов Ю.М. Теорія розв'язання творчих задач. – К.: ТОВ «ЗМОК» – ПП «ГНОЗИС», 2003. – 294 с.
96. Кузнецов Ю.Н., Торба В.В., Проскуряков К.И., Дьяченко Ю.П. Высокоточные зажимные и подающие механизмы токарных автоматов // Прогрессивные технологии и передовые методы обработки металлов, Киев, 1979.
97. Кузнецов Ю.Н. Методические указания по применению системно-морфологического метода поиска новых технических решений. – К.: КПИ, 1985. – 60 с.
98. Кузнецов Ю.Н., Новоселов Ю.К., Луцив И.В. Теория технических систем. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2010. – 252 с.
99. Кузнецов Ю.М. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури під ред. Ю.М. Кузнецова / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.
100. Кузнецов Ю.М. Концепція створення технологічних систем нового покоління на модульному принципі // Науковий журнал "Технологічні комплекси". – №1. – 2010. – с.8 – 14.
101. Кузнецов Ю.М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування // Зб. наукових праць за матеріалами науково-методичної конференції «Вища освіта - 2006». – К.: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2007. – с. 45 – 55.
102. Кузнецов Ю.М. Сучасний стан, перспективи розвитку і виробництва металорізальних верстатів в Україні // Вісті академії інженерних наук України. №1(41), 2011. – с.2 – 10.
103. Кузнецов Ю.М., Склярів Р.А. Прогнозування розвитку технічних систем. [Під ред. Ю.М. Кузнецова] – К.: ПП «ГНОЗИС», 2004. – 242 с.

104. Кузнецов Ю.М. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах: Монографія [Упорядник Кузнецов Ю.М.] / Ю.М. Кузнецов, І.В. Луців, О.В. Шевченко, В.Н. Волошин – К. – Тернопіль: Терно-граф, – 2011.– 692с.
105. Кузнецов Ю.Н., Недобой В.А., Хамуйелла Ж.А. Герра Экспериментальные исследования высокоскоростного инструментального зажимного патрона // Вісник НТУ "ХПІ", № 60(1102). – с.117 – 124
106. Кузнецов Ю.Н. Генетико-морфологический принцип создания станков нового поколения (ч.1 и 2) // Труды международной научно-технической конференции UNITEN'10: Габрово, 2010, Том.2. – с.ІІ – 79...ІІ – 91.
107. Кузнецов Ю.Н., Волошин В.Н., Неделчева П.М., Эль-Дахаби Ф.В. Зажимные механизмы для высокопроизводительной и высокоточной обработки резанием. В 2-х ч. / Под общ.ред.Кузнецова Ю.Н., ч.І Основные сведения и принципы создания зажимных механизмов, - К.: ООО «ЗМОК» – ООО «ГНОЗИС», 2009. – 270 с.
108. Кузнецов Ю.Н., Волошин В.Н., Фиранский В.Б., Гуменюк О.А. Инструментальные зажимные патроны. – К.: ООО "ГНОЗИС". 2012. – 286с.
109. Кузнецов Ю.Н., Волошин В.Н., Неделчева П.М., Эль-Дахаби Ф.В. Зажимные механизмы для высокопроизводительной и высокоточной обработки резанием. / Под общ.ред. Ю.Н. Кузнецова – Габрово:Университетское издательство «ВасилАприлов», 2010. – 722 с.
110. Кузнецов Ю.Н., Кушик В.Г. Юрчишин О.Я. Широкодиапазонные и многофункциональные зажимные механизмы. – К.: ООО «ЗМОК» – ООО «ГНОЗИС», 2011. – 424 с.
111. Кузнецов Ю.Н. Синтез зажимных механизмов прутковых автоматов. Дис.... докт. техн. наук, Москва, МВТУ им. Баумана, 1984. – 515 с.
112. Кузнецов Ю.Н. Использование эвристических приемов в работе конструктора станочной оснастки. – М.: УТПМ, 1992. – 86 с.

113. Кузнецов Ю., Шинкаренко В. Генетический подход – ключ к инновационному синтезу сложных технических систем. Журнал «Fundamental sciences and applications», т.16, Пловдив (Болгария), к.2, 2011. – с.15 – 33.
114. Кузнецов Ю.Н. Контактные деформации зажимного элемента патронов с поверхностью круглой заготовки – Технология и автоматизация машиностроения. – Киев, 1979, вып. 23. – с. 30 – 37.
115. Кузнецов Ю.Н., Эль-Голам Ж.Н. Применение метода морфологического анализа для синтеза устройств автоматической системы зажимных элементов // Вестник КПИ, серия машиностроение, 1993. – №30
116. Кузнецов Ю.М., Мачуга Р.І. Морфологічний аналіз нових способів і пристроїв відрізання прокату із прутково-трубних заготовок // Машинознавство, 2001.
117. Кузнецов Ю.Н., Неделчева П.М. Системно-морфологический подход при синтезе высокоточных цанговых патронов фланцевого типа // Збірник наукових праць КДТУ. – 2004. – №14
118. Кузнецов Ю.Н., Эль-Дахаби Фарук. Системно-морфологический подход при синтезе высокоскоростных зажимных патронов // Наукові праці КНТУ. – 2004. – №15.
119. Кузнецов Ю.М., Крижанівський В.А., Хамуйєла Т.О. Системно-морфологічний підхід при створенні затискних пристроїв для затиску призматичних заготовок // Наукові праці КНТУ, 2004, №15.
120. Кузнецов Ю.Н., Хамуйєла А.Ж. Герра. Генетико-морфологический подход при синтезе цанговых патронов двойного зажима // Вісник СевНТУ.Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь, 2011, вип. 120. – с.106 – 112.
121. Кузнецов Ю.М., Диневич Г.Ю., Степаненко О.О., Хамуйєла А.Ж. Герра. Прогнозування розвитку фрезерних верстатів з ЧПК на модульному принципі методом морфологічного аналізу // Технологічні комплекси, №2(4), 2011. – с.3 – 7.

122. Кузнецов Ю.М. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення: Навч. посібник / Ю.М.Кузнецов, О.Ф.Саленко, О.О.Харченко, В.Т. Щетинін. – Київ-Кременчук-Севастополь: Вид-во «Точка», 2014. – 500 с.
123. Кузнецов Ю.Н., Недобой В.А., Хамуйела Ж.А. Герра Производственные испытания гидромеханического инструментального зажимного патрона // Труды UNITECH 2014, Габрово, т.3 – с.Ш101 – Ш106.
124. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Жоаким А.Г., Хамуйела Т.О. Морфологический синтез станков и их механизмов: Монография / Под ред. Кузнецов Ю.Н. – К.: ООО «Гнозис», 2012. – 416с.
125. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Жоаким А.Г., Хамуйела Т.О. Цанговые патроны двойного зажима: Монография «теория и практика» / Под ред. Кузнецов Ю.Н. – К.: ООО «ГНОЗИС», 2013. – 401с.
126. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Жоаким А.Г. Применение морфологического анализа для адаптации, расширения мобильности и сферы использования станков // Збірник Вісник СевНТУ №120, Серія: Механіка, Енергетика, Екологія. – Севастополь, 2011. – с.106 – 111.
127. Кузнецов Ю.Н., Самойленко А.В., Хамуйела Жоаким А.Г. Человек-аналог создания технических и биотехнических систем // Збірник Вісник СевНТУ №133, Серія: Механіка, Енергетика, Екологія. – Севастополь, 2012р. – с.195 – 203.
128. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Ж.А. Герра. Применение морфологического анализа для расширения мобильности станков // Всеукраїнський науково-технічний журнал. – Промислова гідравліка і пневматика. – Севастополь 2012р., №1(35). – с.111 – 114.
129. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Жоаким А.Г., Ангел Попаров. Генетико-морфологический подход к созданию и прогнозированию развития зажимных механизмов для вращающихся деталей // Journal of the Technical University –



- Sofia. – Plovdiv branch, Bulgaria “Fundamental Sciences and Applications”. – Bulgaria, vol. 19, Book 2, 2013. – pp. 117 – 13.
130. Кузнецов Ю.М., Хамуйела Жоаким А.Г., Недобой В.А., Придальний Б.І. Шпиндельные узлы с электромеханическим зажимом и текучей средой для станков нового поколения // Збірник Вісник СевНТУ №139, Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – г. Севастополь: Сев НТУ, 2013. – с.121 – 125.
  131. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Ж.А. Герра. Генетико-морфологический подход - ключ к созданию зажимных механизмов // Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем: Севастополь, №17. – с.7 – 14.
  132. Кузнецов Ю.Н., Степаненко А.А., Хамуйела Герра Ж.А. Многоуровневой морфологический синтез малогабаритных фрезерных станков с компьютерным управлением // Scientific Journal Technological Complexes, №2(8), Луцьк, ЛНТУ 2013. – с.19 – 26.
  133. Кузнецов Ю.Н., Хассан Аль-Даббас, Хамуйела Герра Ж.А. Генетическая-морфологический подход к созданию широко диапазонных сверлильно-фрезерных патронов // International Journal of Sciences: Basic and Applied Research, 2014, pp.186 – 196.
  134. Кузнецов Ю.Н., Герра Ж.А. Хамуйела, Аль-Рефо Ибрагим Фархан Салман. Описание и синтез зажимных механизмов станков на различных уровнях сложности структуры // Scientific Journal Technological Complexes, №1(9), Луцьк, ЛНТУ 2014. – с.12 – 20.
  135. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Жоаким А.Г., Хамуйела Т.О. Новый подход к синтезу зажимных патронов на примере цанговых // XIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП “Промислова Гідравліка і Пневматика: Матеріали конференції, 19 – 20 вересня 2012р., г. Чернігів. – с.81 – 82.

136. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Ж.А. Герра, Неделчева П.М. Многоуровневой морфологический синтез механизмов подачи и зажима прутка токарных автоматов // Труды Международной Научной Конференции УНИТЕХ'11, Том II, 18 – 19.11.2011г. – Габрово, Болгария. – с. II53 – 59.
137. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Жоаким А.Г. Синтез цанговых зажимных патронов с применением генетико-морфологического подхода // Les problèmes contemporains de la technosphère et de la formation des cadres d'ingénieurs // Recueil des exposés des participants de VII conférence internationale scientifique, sur L'île de Djerba (Tunisie) du 11 au 18 Octobre 2012. – Donetsk.: UNTD, 2012. – pp.161 – 167.
138. Кузнецов Ю.Н., Неделчева П.М., Ф.В. Эль-Дахаби, Хамуйела Жоаким А.Г., Хамуйела Т.О. Генетико-морфологическая модель строения и развития структуры зажимного механизма для тел вращения // Труды Международной Научной Конференции УНИТЕХ' 12, Том II, 16 – 17.11.2012г. – Габрово, Болгария. – с. II75 – 80.
139. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Жоаким А.Г., Недобой В.А., Волошин В.Н. Расчет и экспериментальные исследования статистических характеристик высокоскоростного инструментального зажимного патрона // Труды международной научной конференции УНИТЕХ' 13, Часть I, Том III, 22 – 23.11.2013г. – Габрово, Болгария. – с.II51 – 56.
140. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Жоаким А.Г., Недобой В.А., Волошин В.Н. Расчет и экспериментальные исследования статистических характеристик высокоскоростного инструментального зажимного патрона // Труды международной научной конференции УНИТЕХ' 13, Часть II, Том III, 22 – 23.11.2013г. – Габрово, Болгария. – с.II57 – 62.
141. Кузнецов Ю.М., Хамуйела Ж.А. Герра, Олійник К.О. Жорсткісні характеристики самодіючого мотор-шпинделя для верстатів з ЧПУ. Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XX

- международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16 – 21 сентября 2013г. В 3-х Томах. – Донецк: Дон НТУ, 2013. Т2. – с.44 – 52.
142. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Ж.А. Герра, Олійник К.О. Жорсткісні характеристики самодіючого мотор-шпинделя для верстатів з ЧПУ, №2 // Материалы международной научно-технической конференции // Современные Направления и Перспективы Развития Технологий обработки и оборудования в машиностроении «Механообработка. – Севастополь, 23 – 25.10.2013г. – с.64 – 73.
  143. Кузнецов Ю.Н., Герра Ж.А. Хамуйела, Аль-Рефо Ибрагим Фархан Салман. Опис та синтез затискних механізмів верстатів на різних рівнях складності структури // Збірник наукових праць // III Міжнародна науково-технічна конференція, ТК-2014, «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів» 28 – 30 травня 2014 року, Луцьк, ЛНТУ 2014. – с.40.
  144. Кун Т. Структура научных революций / Т.Кун. – М.:1975.
  145. Кушик В.Г. Аналіз і синтез широкодіапазонних цангових патронів пруткових токарних автоматів. Дис. ... канд. техн. наук. – К.: КПІ, 1993. – 165 с.
  146. Ларичев О.И. Наука и искусство принятия решений. – М.: Наука, 1979. – 200 с.
  147. Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. – М. Физматгиз, 1996. – 208 с.
  148. Левина З.М. Исследование и расчет контактной жесткости металлорежущих станков. Дис. ... докт. техн. наук. – М.: ЭНИМС, 1970. – 302, с.
  149. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 246 с.
  150. Левина З.М. Исследование и расчет контактной жесткости. Методические указания. –М.: ЭНИМС, 1976. – 146 с.
  151. Левин М.Ш. Комбинаторное проектирование систем. – Автоматизация проектирования №4. 1997.

152. Ли Кунву. Основы САПР (CAD/CAM/CAE)/ Пер. с англ. – СПб: Питер, 2004. – 560 с.
153. Литвак В.Г. Экспертная информация. Методы, получения и анализа – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.
154. Литвак Б.Г. Экспертные оценки и принятие решений. М.: Патент, 1996. – 271с.
155. Литвин А.В. Высокоточные зажимные патроны для кольцевых деталей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – КПИ, 1989. – 16 с.
156. Литвинов Б.В. Основы инженерной деятельности: 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 288 с.
157. Логика / Под ред. В.И.Кириллова. – М.: Высшая школа, 1967. – 312 с.
158. Луців І.В, Структурний синтез багатолезового оснащення з кінематичними між інструментальними зв'язками // Вісник ТДТУ, 1997, №1. – с.78-84.
159. Луців І.В. Основи створення багатолезового оснащення з між інструментальними зв'язками для обробки поверхонь обертання. Автореф. дис.. ...докт. техн.. наук: 05.03.01. – НТУУ «КПІ», 2006. – 39с.
160. Маквецов Е.Н. Модели из кубиков. – М.: Сов.радио, 1978. – 192 с.
161. Максимов Й.Т. Кинематичен и силов анализ на процесса сферично прошиване и дорноване на отвори. Автореф ... канд.техн.наук. – Габрово, 1990. – 192 с.
162. Маслов Г.С. Расчеты колебания валов: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 151с.
163. Мелешенко Ю.С. Техника и закономерности ее развития. Л.: Лениздат, 1970. – 248 с.
164. Методы поиска новых технических решений. Под ред. А.И. Половинкина. Йошкар-Ола: Маркнигоиздат, 1976 – 192 с.
165. Мигаль В.Д. Теорія і методи наукової творчості: Навч.посібник. – Х.: ВД «ІНЖЕК» 2007. – 424 с.
166. Мірошніченко С.В. Синтез компоновок багатолезових токарних верстатів і модулів. Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01, К., «КПІ», 1994, 192 с.

167. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного синтеза. – М.: Наука, 1981. – 486 с.
168. Моисеев Н.Н. Современное состояние исследования операций. – М.: Наука, 1979. – 464 с.
169. Моисеева Н.К, Выбор технических решений при создании новых изделий. – М.: Машиностроение, 1980. – 181 с.
170. Моляко В.А. Психология конструкторской деятельности. – М.: Машиностроение, 1983. – 134 с.
171. Мелещенко Ю.С. Техника и закономерности ее развития. – Л.: Лениздат, 1970. – 180с.
172. Муслин Е.С. Машины XX века. Прогнозы и перспективы, проекты, изобретения, оригинальные инженерные решения и конструкции. Машиностроение. 1971. – 296 с.
173. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений: Пер. с нем. – М.: Мир, 1990. – 208 с.
174. Мюллер И. Эвристические методы в инженерных разработках. – М.: Радио и связь, 1984. – 144 с.
175. Нагорняк С., Медюх М. Фізико-технічні ідеї Івана Пулюя. – Тернопіль: Джура, 1999. – 212 с.
176. Нагорняк С.Г., Луцив И.В. Предохранительные механизмы металлообрабатывающего оборудования. Справочник. К.: Техніка. 1992. – 72с.
177. Науковий твір. "Створення вузлів і механізмів для надшвидкісної і прецезійної обробки на верстатах нового покоління з паралельною кінематикою" // Кузнєцов Ю.М., Данильченко Ю.М., Шевченко О.В., Дмитрієв Д.О., Волошин В.Н. – Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 28940, 27.05.2009. – 576 с.

178. Неделчева П.М. Создание высокоточных цанговых патронов с упругим фланцем для металлорежущих станков. Дис. ... канд. техн. наук. – К.: НТУУ «КПИ», 2004. – 204с.
179. Недобой В.А., Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Герра Ж.А. Использование модульного принципа при сборке шпиндельных узлов станков на базе мотор-шпинделя // Технология и автоматизация сборки. – Жешув (Польша), №2, 2014. – с. 12 – 18.
180. Никифоров В.Е. Проблемная ситуация и проблема: генезис, структура, функции. Рига: Знание, 1988. – 183 с.
181. Нильсон Н. Искусственный интеллект. Методы поиска решений: Пер. с англ. - М: Мир, 1973. – 270 с.
182. Одрин В.М. Метод морфологического анализа технических систем. – М.: ВНИИПИ, 1989. – 312 с.
183. Одрин Б.М., Картавов С.С. Морфологический анализ систем. Построение морфологических матриц. К.: Наукова думка, 1977. – 183с.
184. Одрин В.М. Морфологический метод исследования систем: современное состояние, область применения и перспективы развития // Автоматизация проектирования в машиностроении. 1978. – Вып. 11. – с. 28 – 33.
185. Орликов М.Л. Динамика станков. Учебн. пособие для вузов. – К.: Высш.школа, 1980. – 256 с.
186. Орликов М.Л., Кузнецов Ю.Н. Проектирование зажимных механизмов автоматизированных станков. – М.:Машиностроение, 1977. – 142 с.
187. Орликов М.Л. Проектирование механизмов станков-автоматов. – М.: Машиностроение, 1968. – 248 с.
188. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечетной исходной информации. – М.: Наука. Главная редакция физ-мат. лит-ры, 1981. – 208 с.
189. Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технологічні комплекси: Навчальний посібник / І.І. Павленко, В.А.Можара; за ред. І.І. Павленко. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – 392 с.

190. Павленко І.І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування / І.І. Павленко. – Кіровоград, КНТУ, 2007. – 420 с.
191. Павленко І.І. Конструктивна та силова структура захватних пристроїв промислових роботів / І.І. Павленко, М.О. Годунко // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Вип. 36. –Кіровоград:КНТУ, 2006. – с.44 – 49.
192. Пальчевский Б.О. Дослідження технологічних систем: проектування, моделювання, оптимізація. – Львів. – 245 с.
193. Пальчевський Б.О. Принципи побудови і сучасні тенденції розвитку методів проектування технологічного обладнання // Науковий журнал «Технологічні комплекси» . – №1. – 2010. – с. 3 – 9.
194. Пальчевський Б.О. Технологія системного моделювання виробу в проектуванні технологічних машин // Науковий журнал «Технологічні комплекси» . – №2. – 2010 – с.15 – 24.
195. Пальчевський Б.О. Стратегія оптимізаційного синтезу технологічних машин // Науковий журнал «Технологічні комплекси». – №3. – 2011. – с.3 – 11.
196. Панова Н.С., Шрейдер Ю.А. О знаковой природе классификации // НТИ. Сер. 2. – 1974. – № 12. – с.3 – 10.
197. Пасічний В.А. Основи комп'ютерно-інтегрованого механоскладального виробництва . Дис.... докт. техн. наук 05.02.08, К., НТУУ»КПІ», 2009, 278 с.
198. Пашкевич М.Ф. и др. Исследования и изобретательство в машиностроении: Учебн. Пособие / Под общ.ред. М.Ф. Пашкевича. – Могилев: Бел.-рос. ун-т, 2005. – 294 с.
199. Петренко А.И. Основы автоматизации проектирования – К.: Техніка, 1982. – 295 с.

200. Петраков Ю.В. Направления развития CALS-технологий // Материалы Международной научной конференции Unitech'04, 18 – 192 November 2004, GABROVO (Болгария), V-II, P. 237 – 243.
201. Петров Ю.Ф. Разработка и исследование математической модели генетического алгоритма для применения в технических системах. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, спец. 05.13.18. Ставрополь, 2008. – 22 с.
202. Петухов С.В. Матричная генетика, алгебры генетического кода, помехоустойчивость. – М.: Изд-во «Регулярная и хаотическая динамика, 2008. – 316 с.
203. Пигоров Г.С., Козинец В.П., Махмудов А.Г. и др. Креатология и интеллектуальные технологии инновационного развития. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 502 с.
204. Повилейко Р.П. Инженерное творчество. – М.: Знание, 1977. – 64 с.
205. Повилейко Р.П. Рекламные игры. – Рига: Знание Латв. ССР. 1984. – 76 с.
206. Повилейко Р.П., Левицкий Л.В. Человек, машина, красота. Новосибирск: Западно-сибирское изд-во, 1969. – 198 с.
207. Подиновский В.В. Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям.- М.: «Сов. радио», 1975. – 192 с.
208. Подольский М.И. Обґрунтування параметрів стрижневої супортної системи багатоцільових токарних верстатів типу гексаглайд. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. К.: 2014. – 22 с.
209. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. Учеб. пособие для студентов втузов – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
210. Половинкин А.И. Законы строения и развития техники. Волгоград: изд-во ю ВолгПи, 1985. – 212 с.
211. Половинкин А.И. Методы инженерного творчества. Учеб. пособие. Волгоград: ВолгПи, 1984, - 364 с.



212. Поспелов Г.С., Ириков В.А. Программно-целевое планирование и управление. – М.: Сов.радио, 1976. – 358 с.
213. Подгорный А.Н., Марченко Г.А., Пустынников В.И. Основы и методы прикладной теории упругости. – К.: Вища школа, 1981. – 328с.
214. Применение метода морфологического анализа при решении инженерных задач: Методические указания по выполнению лабораторной работы / Сост.А.Н. Соболев. – Йошкар-Ола: МПИ, 1982. – 12 с.
215. Придальний Б.І. Створення приводів затиску для швидкохідних токарних автоматів. Дис. ... канд. техн. наук. – Тернопіль, 2011. – 168 с.
216. Проскуряков К.Н. Исследование и разработка методов повышения осевой точности цанговых патронов металлорежущих станков: Дис....канд.техн. наук: 05.03.01. – К., 1984. – 190 с.
217. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. /Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1977. – 384 с.
218. Раков Д. Применение метода морфологического синтеза при поиске перспективных технических решений. IEEE Aerospace and Electronic Systems magazine, декабрь, 1996. – с.3-8.
219. Рекомендации по подготовке и сравнительной оценке решений в задачах управление качеством продукции. / Авт.: Садовский В.Я., Березанский Н.А., Озерный В.М, и др. – М.: ВНИИС, 1973. – 128 с.
220. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
221. Ромашко А.С. Синтез високоточних клинових свердлувально-фрезерувальних патронів для металорізальних верстатів. Дис. ... канд.техн.наук. – К.: НТУУ «КПІ», 1997. – 153 с.
222. Руа Б. Теория выбора и принятия решений: Уч. пос. /Б.Руа. М.: Наука, 1982. – 328 с.

223. Саленко О.Ф. Ефективне гідрорізання: Монографія / О.Ф.Саленко, В.Б.Струтинский, М.В.Загірняк. – Кременчук: КДПУ, 2005. – 488 с.
224. Самойлович Б.Г. Прогнозирование оптимального технико-экономического уровня машин. Т.: Машиностроение, 1987. – 136 с.
225. Самонастраивающиеся зажимные механизмы: Справочник. / Ю.Н. Кузнецов, А.А. Вачев, С.П. Сяров, А.Й. Цървеников; под ред. Ю.Н. Кузнецова. – К.: Техника; София; Гос. изд-во "Техника", 1988. – 222 с.
226. Селюцкий А.Б. Как стать еретиком. Петозаводск: Карелия, 1991. – 365 с. – (Техника, молодежь, творчество).
227. Серебрянников О.Ф. Эвристические принципы и логические исчисления. – М.: Мысль, 1972. – 284 с.
228. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. Изд. 2-е стереотип. «Техніка», 1977. – 768 с.
229. Сидорко В.И. Динамическое качество системы патрон-деталь прутковых автоматов. Дис. ... канд. наук. 05.03.01. – К., 1986. – 139 с.
230. Скиба О.П. Синтез гвинтових затискних пристроїв для закріплення тонкостінних заготовок на металорізальних верстатах. Дис. ... канд. техн. наук. – Тернопіль: ТНТУ, 2010. – 120 с.
231. Смирнов В.А. Генетический метод построения научной теории / В.А.Смирнов // Философские вопросы современной формальной логики. – М.: 1962. – 283 с.
232. Соболев А.Н. Автоматизация синтеза технических решений: Учебное пособие. – Йошкар-Ола: МарГУ, 1983. – 125 с.
233. Соболев А.Н. Половинкин А.И. Автоматизация синтеза принципов действия технических систем: Учеб. Пособие.- Горький, ГТУ, 1979. – 98 с.
234. Создание современной техники: Основы теории и практики / В.Н. Автономов. – М.: Машиностроение, 1991. – 304 с.
235. Соппротивление материалов / Под. Общ. Ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа, 1971. – 672 с.

236. Сосновский Я.Ш., Ткаченко П.Г. Функционально-стоимостной анализ. – К.: Техника, 1986. – 143 с.
237. Степин В.С. Теоретическое знание / В.С. Степин. – М.: 1999. – 390 с.
238. Степин В.С. Становление научной теории / В.С. Степин. – Минск: 1976. – 216с.
239. Степаненко О.О., Хамуйела Ж.А. Герра, Манжола М.Ю., Кузнецов Ю.М. Концепція каркасних компоновок верстатів нового поколений // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні Задачі Сучасних Технологій», Сбірник тез доповідей, в г. Тернопіль: 19 – 20.12.2012р. – с.142 – 143.
240. Столяров А.М. Методологические основы изобретательского творчества. – М.ВНИИПИ, 1986. – 67 с.
241. Створення вузлів і механізмів для надшвидкісної кінематики [матеріали державної теми №2988] / № державної реєстрації теми 0106U007223. Кер. Ю.М.Кузнецов, 2008 р. – 420 с.
242. Стяжкин И.И. Становление идей математической логики. – М.: Наука, 1964. – 305 с.
243. Судьин Ю.А. Повышение точности обработки колец подшипников при установке на конической поверхности. – Дис. ... канд.. техн.. наук. – К.: 1983. – 135 с.
244. Сяров С.П. Исследование на силовите и контактните взаимодействия при установяване на заготовка та в электромеханична система за металоурежуци машини. – Дис. ... канд. техн. наук. – София (НРБ), 1983. – 154 с.
245. Теория прогнозирования и принятия решений / Под. Ред. С.А. Саркисяна. – М.: Высшая школа, 1977. – 351с.
246. Техническое творчество: теория, методология, практика: энциклопедический словарь-справочник /Под ред. А.И. Половинкина, В.В. Попова. – М.: НПО «Информсистема», 1995. – 408 с.

247. Тимошенко С., Юнг Д. Инженерная механика. Перев. с англ. Г.Г. Телепневой. – М.: Машгиз, 1960. – 507 с.
248. Титк Ю.С. Стандартизация как наука и ее место в системе наук, техники и производстве // Вопросы судостроения. – 1972. – с.7-14.
249. Торба В.В. Исследование и разработка методов повышения жесткости консольного закрепления заготовок на токарных автоматах. Дис. ... канд.техн.наук.-К.: 1983. – 162 с.
250. Тринг М., Лейтуэйт Э. Как изобретать? Пер. с англ. А.С. Доброславского / Под ред. И предисл. В.В. Патрикеева. – М.: Мир, 1980. – 172 с.
251. Тредер Г.Ю. Эволюция основных физических идей. – К.: Наук. Думка, 1989. – 368 с.
252. Турлапов В., Лукин Д. Моделирование и оптимизация кинематики пространственных механизмов в среде AutoCAD / САПР и графика. – 2003. – №2: Архитектура и строительство. – с. 68 – 71.
253. Урманцев Ю.А. Эволюционика, или общая теория развития систем природы, общества и мышления. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 240 с.
254. Урманцев Ю.А. Симметрия природы и природа симметрии. – М.: КомКнига / URSS, 2006. – 229 с.
255. Фіранський В.Б. Створення робочих органів з рухомою платформою для верстатів з механізмами паралельної структури. Дис. ... канд.. техн.. наук. –К.: НТУУ «КП», 2011. – 169 с.
256. Фоменко А.Т. Наглядная геометрия и типология. Математические образцы в реальном мире. – М.: Изд-ние МГУ, 1992. – 432 с.
257. Фролов К.В. Многокритериальный поход к оценке технического уровня промышленной продукции / К.В. Фролов, В.И. Сергеев, М.Г. Гафт // Машиноведение, 1986. № 6. – с.3 – 12.
258. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. – 406с.

259. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический поход к сложным системам. – М.: Мир, 1980. – 406с.
260. Хамуйела Жоаким А.Г. Многоуровневой морфологический синтез зажимных механизмов станков // Конференция посвященная 47-й годовщине создания факультета инженерии, Университета Авгуштиньо Нетто, 07 – 11 сентября 2013 года. – Инженерный факультет Университета Нетто. – Анголе 2013г.
261. Хамуйела Ж.А. Герра, Хамуйела Т.О. Многоуровневый механизм морфологического синтеза малогабаритного фрезерного станка пирамидальной конструкции / Презентация просвещенная 4-й Международной Выставке Образования – Место проведения – Помещения FILDA / 07 – 10 ноября 2013 – Ангола 2013 года.
262. Хамуйела Жоаким А.Г., Ковришкін М.О. Синтез нових черв'ячних передач // Збірник Кіровоградського національного технічного університету // Техніка в Сільськогосподарському Виробництві, Галузеве Машинобудування, Автоматизація. – Кіровоград 2006. – Вип. №17. – с.190 – 194.
263. Хамуйела Ж.А. Герра, Кузнецов Ю.М. Синтез безпроміжкових черв'ячних передач верстатного обладнання методом морфологічного аналізу // Науковий Журнал Технологічні Комплекси «Scientific Journal Technological Complexes», Луцьк. – ЛНТУ, №1(3), 2011р. – с.16 – 22.
264. Хамуйела Ж.А. Герра, Кузнецов Ю.М. Методи прийняття рішень при морфологічному синтезі технічних систем // Тезиси науково-технічної конференції ТНТУ, в м. Тернопіль: Матеріали Конференції “Матеріалознавство та Машинобудування”, 5 – 6.12.2012р., Том II, г. Тернопіль. – с.36.
265. Хамуєйла Т.О. Синтез машинних лещат з покращеними пружно-силовими характеристиками для металорізальних верстатів. Дис. ... канд.техн.наук. – Кіровоград: КНТУ, 2008. – 208 с.

266. Ханзен Ф. Основы общей методики конструирования. – М.: Машиностроение, 1969. – 166 с.
267. Хасан Аль Даббас. Повышение качества обработки за счет разработки и применения сверлильно-фрезерных патронов. Дис. ... канд. техн. наук. – М.: 2011. – 161 с.
268. Хачатуров В.Р., Аппроксимационно-комбинаторный метод декомпозиции и композиции систем и органические топологические пространства, решетки, оптимизация. – Ж. Вычислительной математики и математической физики. – 1985. – Том 25, №12. – с. 177 – 182.
269. Хилл П. Наука и искусство проектирования. Научное обоснование решений / Пер. с англ.- М.; Мир, 1973. – 203 с.
270. Холл А.Д. Опыт методологии для системотехники. – М.: Советское радио, 1975. – 448 с.
271. Холян А., Элюким С. Формализация составления вариантов в задачах конструирования. – Техническая эстетика, 1970, №7. – с. 3 – 5.
272. Хохлов С.С. Полвека закона гомологических рядов Н.И. Вавилова // Природа. – 1971, № 2. – с.58 – 61.
273. Хубка В. Теория технических систем. Пер. с нем. – М. Мир, 1987. – 208с.
274. Цой Е.В., Юдин А.Д., Юдин Д.Б., Проблемы дополнения и синтеза знаний. – Автоматика и телемеханика. – 1994, №7. – с. 3-36.
275. Чернов Л.Б. Основы методологии проектирования машин. Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1978. – 148 с.
276. Чус А.В., Данченко В.Н. Основы технического творчества. Учебное пособие. – Днепропетровск: ДМетИ, 1980. – 107 с.
277. Чяпяле Ю.М. Методы поиска изобретательских идей. – Л.: Машиностроение, Ленинград, отд – ние, 1990. – 96 с.
278. Шаракшанэ А.С., Железнов И.Г., Ивницкий В.А. Сложные системы. – М.: Высшая школа, 1977. – 247 с.

279. Шевченко О.В. Теорія інструментального оснащення з пружними напрямними та орієнтованою жорсткістю для токарної обробки. Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.03.01, К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 36 с.
280. Шевченко О.В. Повышение эффективности механизмов микроперемещения и закрепления инструментов токарных модулей. Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1990. – 123 с.
281. Шинкаренко В.Ф. Термінологічний словник з генетичної електромеханіки / В.Ф.Шинкаренко, А.А. Шиманська. – К.: НТУУ, «КПІ», 2014. – 75 с.
282. Шинкаренко В.Ф., Гайдаенко Ю.В. Генетические принципы структурообразования гибридных электромеханических систем. – Вісник. КДУ імені Михайла Остроградського. Випуск 3/2010 (62). Ч.2. – с. 47 – 50.
283. Шинкаренко В.Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
284. Шинкаренко В.Ф., Кузнецов Ю.Н. Генетические программы сложных развивающихся систем // Труды, межд. Научн.-техн. конференции UNITECH'11. – Габрово: т.2 (части 1 и 2).
285. Шубников А.В. Симметрия в науке и искусстве / А.В. Шубников, В.А. Кушик. – М.: Наука, 1972. – 340 с.
286. Элдоус М., Стэнсфилл Р. Методы принятия решений. М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997. – 587 с.
287. Эйрес Р., Научно-техническое прогнозирование и долгосрочное планирование. – М.: Мир, 1971. – 296 с.
288. Ейлоарт Т. Приемы настройки творческого коллектива – изобретатель и рационализатор, 1970, №5. – 28 – 40.
289. Эль Рашины Хусейн Али. Анализ и синтез многофункциональных подающих и зажимных механизмов прутковых автоматов. Автореф. дис... канд. техн. наук. – К.: КПИ, 1994. – 20с.

290. Эль-Дахаби Фарук Вахид. Синтез высокоскоростных зажимных патронов токарных станков. Дис. ... канд. техн. наук. – К.: НТУУ «КПИ», 2006. – 165 с.
291. Энциклопедический словарь-справочник / Под ред. Половинкина А.И. и Попова В.В. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.encyclopedia.ru/online/detail/39566/>.
292. Энциклопедия. Технологи России (машиностроение). Т.1. / А.Г. Суслов, В.В. Бушуев, В.А. Гричишников, В.П. Смоленцев // Технология машиностроения, станки и инструменты / Под общ.ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение – 1, 2006. – 412 с.
293. Юдин Е.Е. Системный подход и принцип деятельности. – М.: наука, 1978. – 392 с.
294. Юрчишин О.Я. Пружно-демпфуючі характеристики та прогнозування меж використання широкодіапазонних цангових патронів. Дис. ... канд. техн. наук. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 180 с.
295. Юшин В.П. Руководство по интенсивному развитию организаторских способностей руководителей. – Луцк: МП «Зоря», 1998. – 256 с.
296. Яглінський В.П., Гутиря С.С., Тихенко В.М. Моделювання кінематики промислових платформ шліфувальних роботів-верстатів // Вісник СевНТУ, Вип.110, Серія Механіка, енергетика, екологія: Зб. Наук. Пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – с. 13 – 19.
297. Янч Э. Прогнозирование научно-технического прогресса. – 2-е изд. – М.: Прогресс, 1970. – 586 с.
298. Кузнецов Ю.Н., Хасан Аль-Даббас, Хамуйела Герра Ж.А. Генетическая-морфологический подход к созданию широко диапазонных сверлильно-фрезерных патронов // International Journal of Sciences: Basic and Applied Research, IJSBAR, 2014, ISSN 2307-4531, pp.186 – 196.
299. Hamuyela J.A. Guerra, Kuznetsov Y.N., Ibrahim Al-Refo Farhan. Creation of new clamping mechanisms using genetic-morfological method // Journal of mechanical



- Engineering of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, №67, 2013. – pp.155 – 162.
300. Ibrahim Farhan Salman Al-Refo, Y.N. Kuznetsov, Joaquim A. Guerra Hamuyela. Effect of the clumping chuck structure on size extension clamping possibilities // Proceedings of the International Scientific-Technical Conference. – Australian Journal of Basic and Applied Sciences, ISSN 1991-8178, 2013, Edition 7(10), pp.484 – 489.
  301. Current trends in collect design. Austral. Mach. And product Engng, 1966. 19 N217.63.65.
  302. Handbook of fixture design. Apractical Reverence book of Warkhalding, Frank W.Wilim, New York, Taronto, London, 1962.
  303. Koller R. Konstruktsmethode fur den Mashinen – Gerate und Apparatenbau. Springen-Verlag. – Berlin. – New York. 1976. – 184 s.
  304. Koller R. Konstruktsmethode fur den Mashinen – Gerate und Apparatenbau. Berich – tigter Nachdrack. – Berlin [West]: Springen, 1979. – 191 s (mit 86 Abbildungen).
  305. Kuznecov Yu., Nedelcheva P., Hamuyela I. Application of multilevel morphological analysis to the synthesis of mechanisms of feeding and clamping in bar machines // International virtual journal for science, technics and innovations for the industry – MTM machines, technologies, materials, Yeary V, Issue 9/2011, p. 27 – 31.
  306. Iu.N. Kuznetsov, Joaquim A. Guerra Hamuyela, T.O. Hamuyela. Sintese morfologica de máquinas-ferramenta e seus mecanismos: Monografia / Sob redacção Yu.N. Kuznetsov. – Luanda: N’Zilua, 2013. – 441pag.
  307. Kuznietsov Y., Shinkarenko V. The Genetic approach is the key to innovative Synthesis of complicated Technical Systems. Journal of the Technical University at Plovdiv, Bulgaria Fundamental Sciences and Applications / Volume 16, book 2, 2011. pp. 15-33.

308. Kuzniecowa Yu., Niedoboj W., Guerra Hamuyela J.A. Wykorzystanie zasady modularyzacji przy montażu wrzecion obrabiarek na bazie elementów wrzecion. Materiały konferencyjne "Technika i technologia montażu maszyn TTMM 2014, Rzeszów-Berezka. 27 – 30.05.2014, str.28.
309. Odrin V.M. Method of morphological analysis systems. Moscow: VNIPI, 1989.
310. Rakov D.L. Applying of adaptation principle for design of landing spacecrafts. Moscow: Vestnik MAT. №1, 1995.
311. Rakov D.L., Kozliakov V.V. Application of hierarchy analysis method for system analysis of landing spacecrafts. Program of XX Corolev Readings. Moscow. MSU, 1996.
312. Lo R.V., Rakov D.L. Methodology of structure synthesis of space systems. Moscow: MSU, Thesis's of the report at XX Scientific readings, 1996.
313. Rossi, A. Fast genetic algorithm for roundness evaluation by the minimum zone tolerance (MZT) method / A. Rossi, M. Antonetti, M. Barloscio, M. Lanzetta // Measurement. – 2011. – vol. 44. – №7. – p.p. 1243 – 1252.
314. Shynkarenko V. Genetic Foresight in Science and Technology: from Genetic Code to innovative Project. 10<sup>th</sup> Anniversary International scientific Conference «Unitech' 10». 19-20 November 2010. Gabrovo, Bulgaria. Vol. II / p.p. 297 – 302.
315. Shynkarenko V., Kuznietsov Y. Genetic programs of complex evolutionary systems (Part 1,2). Технически университет Габрово. Международна научна конференция UNITECH'11. – P.33 – 52
316. F.Zwicky. Discovery, invention, research through the morphological approach. – Toronto, New York: McMillan, 1969.
317. Zwicky F. Morphology of justice in the space age and Boundaries at other space. – Automatica Acta, 1969. – №14, pp. 615 – 626.
318. Beasley D., Bull D.R. and Martin R.R. « An Overview of Genetic Algorithm: Part 1. Fundamentals», University Computing, Vol. 19. № 2. pp.58 – 59, Inter-University Committee. On Computing, 1993.

319. Goldberg D.E. Genetic Algorithm in Search. Optimization and Machine Jearning, Addison-Wesley. Reading, MA, 1989.
320. Holland J.H. «Adaptation in Natural and Artifical Systems», University of Michigan, Ann Arbor, 1975.
321. Chapman C.D. «Structural Topological Optimization vin the Genetic Algorithm», MS thesis, Dept of Mech. End. MIT, 1994.
322. Grefenstette I.I. User's Guide to Genesis Version 5.0, October, 1990.
323. <http://newsland.com/news/detail/1404560/> Самолеты стали подвластны законам эволюции.
324. <http://podrobnosti.ua/tech/2014/01/23/985989.htm/>.Американцы применили законы эволюции к гражданской авиации.
325. [http://sernam.ru/book\\_gen?id = 33](http://sernam.ru/book_gen?id = 33) классический генетический алгоритм.
326. <http://qai.narod.ru/GA/genoperators.html> генетические операторы.
327. <http://libed.ru/knigi-nauka/728344-2-chast-i-princip-dopolnitelnosti-i-genetica.php>. Электромагнитная картина мира.

#### **Патенты на изобретения, полезные модели и промышленные образцы**

328. Патент України на винахід №101447, МПК В23В 39/00, В23С 1/00 В23Q 1/00. Багатокоординатний свердлильно-фрезерний верстат / Кузнєцов Ю.М., Шинкаренко В.Ф., Неделчева П.М., Степаненко О.О., Гайдаєнко Ю.В., Хамуйєла Жоаким А.Г. №а201115691, заявлено 30.12.2011; опубл. 25.03.2013, бюл. №6.
329. Патент України на корисну модель №79495, МПК В23В 17/00, В23С 19/00 В23Q 3/00. Шпиндельний вузол верстата / Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І., Хамуйєла Жоаким А.Г., Недобой В.А. №u201211892, заявлено 15.10.2012; опубл. 25.04.2013, бюл. №8.
330. Патент України на корисну модель №80481, МПК В23В 19/00, В23В 17/00. Шпиндельний вузол верстата / Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І., Хамуйєла

- Жоаким А.Г., Недобой В.А. №u201300339, заявлено 10.01.2013; опубл. 27.05.2013, бюл. №10.
331. Патент України на корисну модель №80489, МПК В23В 31/20, Цанговий патрон /Кузнєцов Ю.М., Хамуйєла Ж.А. Герра, №u201300805, заявлено 23.01.2013; опубл. 27.05.2013, бюл. №10.
332. Патент України на корисну модель №84924, МПК В23В 17/00, В23В19/00, Шпиндельний вузол верстата / Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І., Хамуйєла Ж.А. Герра, Недобой В.А., №u201303687, заявлено 26.03.2013; опубл. 11.11.2013, бюл. №21.
333. Патент України на корисну модель №85840. МПК F16С 11/06 F16С 32/06 Шарнірно-стрижневий механізм / Кузнєцов Ю.М., Рожко О.І., Хамуйєла Ж.А. Герра. № u201210486, заявлено 05.09.2012; опубл. 10.12.2013, бюл. №23.
334. Патент України на корисну модель №85839, МПК В23В 3/00 В23В 5/00 Токарний багатоцільовий верстат / Кузнєцов Ю.М., Олійник К.О., Хамуйєла Ж.А. Герра. № u201210485; заявл.05.09.2012; опубл.10.12.2013, бюл. №23.
335. Патент України на корисну модель №91159. VGR D23D 17/00. Шпиндельний вузол верстата / Кузнєцов Ю.М., Недобой В.А., Хамуйєла Ж.А. Герра, заявлено 08.01.2014, опубл. 25.06.2014, бюл. №12.
336. Патент України на корисну модель №91163, МПК В23В 17/00 В23В 19/00. Шпиндельний вузол верстата / Кузнєцов Ю.М., Недобой В.А., Хамуйєла Ж.А. Герра. № u201400133, заявлено 09.01.2014, опубл. 25.06.2014, бюл. №12.
337. Патент України на промисловий зразок №27074. Малогабаритний фрезерний верстат пірамідальної конструкції / Кузнєцов Ю.М., Степаненко О.О., Хамуйєла Жоаким А.Г. № s201300693; заяв. 11.04.2013, опубл. 10.06.2014, бюл. №11.
338. Патент України на корисну модель № 90481, МПК В23В31/30, В23В31/10. Гідромеханічний затискний патрон / Кузнєцов Ю.М., Хамуйєла Ж.А. Герра, заявл. 13.01.2014, №U201400185, опубл. 26.05.2014, бюл. №10.

339. Патент України на корисну модель №91154, МПК В23В17/00. Шпиндельний вузол верстата / Кузнєцов Ю.М., Недобой В.А., Хамуйєла Ж.А. Герра, заявл. 8.01.2014, №U201400002, опубл. 25.06.2014, бюл. №12.
340. Патент України на корисну модель №67317, МПК В23В35/00, В23В 39/00, В23Q 1/00 Багатокоординатний фрезерний верстат / Кузнєцов Ю.М., Шинкаренко В.Ф., Фіранський В.Б., Хамуйєла Ж.А.Герра, заявл.15.08.2011, №u201110045, опубл. 10.02.2012, бюл.№3.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

**Приложение А.** Некоторые термины из генетики и синергетики для природных и антропогенных систем, использованные в диссертации

**Приложение Б.** Технические условия на синтезированный высокоскоростной широкодиапазонный эксцентриковый ИЗП типа ЭСФПШ-13

**Приложение В.** Документы по использованию результатов диссертационной работы:

***Приложение В.1.*** Акт внедрения ИЗП типа ЭСФПШ-13 в производстве (Украина, ООО «Техноэлектропласт», г. Полтава)

***Приложение В.2.*** Акт внедрения результатов работы в учебный процесс в Университете Августиньо Нето (Ангола, г. Луанда)

***Приложение В.3.*** Акт внедрения результатов работы в учебный процесс в КПИ им. Игоря Сикорского (Украина, г. Киев)

**Приложение Г.** Копия диплома конкурса на лучшую монографию. АН высшего образования Украины

**Приложение Д.** Примеры описания принципов одинарного зажима с различными силовыми потоками

## **Некоторые термины из генетики и синергетики для природных и антропогенных систем, использованные в диссертации [281]**

### **А**

**Антисимметрия** – свойство геометрических фигур и материальных объектов самосовмещаться с помощью операций симметрии с одновременным использованием операции изменения знака фигуры или объекта: изменения знака заряда, направления распространения волны поля, вида деформации (растяжение – сжатие), замены выпуклости (вогнутость – выпуклость), и тому подобное.

**Антропогенные системы** (греч.  $\alpha\theta\theta\rho\omicron\pi\omicron\chi$  – человек, genesis – происхождение) – системы, созданные в результате сознательно направленной деятельности человека (например, технические системы).

**Антропоморфизм** – (греч.  $\alpha\theta\theta\rho\omicron\pi\omicron\chi$  – человек и  $\mu\omicron\rho\phi\acute{\eta}$  – форма) – предание техническим объектам формы и свойств человека (например, антропоморфные роботы).

**Ассоциативное мышление** – 1) механизм правополушарного мышления человека, который позволяет воссоздать процесс (явление, структуру), при условии неполной информации; 2) способность человека целенаправленно генерировать и использовать ассоциации, то есть, аналогии с чем-то.

### **В**

**Вид неявный** – генетически допустимый вид, структурные представители которого еще отсутствуют в настоящее время эволюции. Неявные виды представлены в периодической структуре ГК соответствующими генетическими кодами первичных источников магнитного поля.

**Виды гомологические** – генетически родственные виды, принадлежащие к одному гомологическому ряду.

## Г

**Ген** (греч. *γενος* – род, происхождение) – 1) в общем случае, элементарный материальный носитель наследственной информации, созданный природой; 2) материальная единица наследственности. Термины «ген», «генотип» и «фенотип» ввел в научный оборот в 1909 г. датский биолог В.Л. Иогансен. Понятие гена междисциплинарное, а его природа напрямую связана с природой соответствующей генетически организованной системой (электромагнитный ген – движущийся заряд; лингвистический ген – звук; механический ген – материальная точка и т.д.).

**Ген электромагнитный** – 1) элементарный источник электромагнитного поля (движущийся заряд, микротоки Ампера); 2) начальная структурная и информационная единица наследственности в иерархии уровней генетической сложности электромагнитных систем.

**Генезис** (греч. *Γένεσις* и *γέννω* – порождает, создаю, лат. *Genesis* – происхождение) – 1) происхождение, возникновение; 2) процесс создания (образования).

**Генетика** – междисциплинарная область знаний, которая изучает законы наследственности и структурной изменчивости в природных и антропогенных системах, развивающихся во времени. Термин «генетика» впервые введено в биологию английским генетиком В. Бетсоном в 1907 г.

**Генетико-морфологический подход** – направление структурно-системных исследований в генетически организованных системах, основанный на методологии анализа и синтеза пространственных форм и их композиций.

**Генетическая электромеханика** – раздел электромеханики, предметом исследования которой являются принципы структурной организации и закономерности развития электромагнитных объектов и систем, которые определяются инвариантными свойствами элементного базиса генетической классификации (ГК).



**Генетическая информация** – наследственная информация произвольного объекта (структуры), которая представлена универсальным генетическим кодом.

**Генетическая классификация (ГК)** – 1) разновидность естественной классификации периодического типа, структурные элементы которой обладают генетической информацией; 2) классификация прогностического типа, которая упорядочивает генетическую информацию (генетические коды) первичных элементов; 3) произвольная классификация, которая упорядочивает объекты или их свойства по признаку генетической информации.

**Генетическая коэволюция** – взаимосвязанный процесс эволюции систем различной генетической природы.

**Генетическая систематика** – генетически организованная классификация объектов определенной физической или абстрактной природы, структура основных таксонов которой определяется периодической структурой генетической классификации первичных элементов.

**Генетическое моделирование** – направление структурно-системных исследований с использованием генетических моделей.

**Генетическое предвидение** – 1) научное предвидение на основе законов наследственности в генетически организованных системах; 2) технология предвидения, которая является результатом эмерджентности при условии совместного использования интеллектуального потенциала двух генетически организованных систем: человека разумного и прогностической функции периодической системы первичных элементов (ГК).

**Генетическое проектирование** – технология системного проектирования, методологическую основу которой составляют принципы и методы генетического предвидения и направленного синтеза объектов и систем по заданной функции цели.

**Генетический алгоритм** (англ. Genetic algorithm) – 1) формализованная последовательность процедур направленного синтеза электромеханических,

механических и других структур по заданной функции цели с использованием генетических операторов синтеза; 2) эвристический алгоритм, используемый в задачах параметрической оптимизации путем случайного подбора, комбинирования и варьирования поисковых параметров.

**Генетический код** – 1) универсальная форма представления генетической информации произвольного элемента в периодической системе; 2) форма записи генетической информации, которая кодирует координаты (местоположение) соответствующего первичного источника поля в периодической структуре ГК и определяет геометрические (морфологические), электромагнитные и топологические признаки структур-потомков, а также содержит информацию относительно их таксономического статусу.

**Генетический оператор** – функция, с помощью которой моделируются механизмы и определяются границы структурной изменчивости объекта в задачах направленного генетического синтеза.

**Генетически организованная система** – система произвольной физической или абстрактной природы, функционирование и структурная эволюция которой осуществляется на основе системных законов наследственности и генетической изменчивости.

**Геном** – хромосомный уровень структурной организации в генетически организованных системах. Термин впервые предложен в биологии в 1920 году немецким биологом Гансом Винклером.

**Геометрический оператор** – функция, с помощью которой осуществляется преобразование геометрической информации.

**Гомология** – 1) общесистемное свойство объектов в генетически организованных системах; 2) групповое свойство первичных элементов в периодической системе элементов физической или абстрактной природы; 3) системное свойство элементов произвольной подгруппы в структуре ГК и соответствующих объектов – потомков, которая определяется общностью двух составляющих генетической информации – симметрии и ориентированности.

## Э

**Эволюция** (лат. Evolvere – разворачиваю) – 1) общесистемное свойство развития сложных систем в живой и неживой природе; 2) непрерывное развитие явления, предмета, структуры при условии сохранения его качественной определенности в процессе качественно-количественных изменений; 3) реальные процессы расширения областей функционирования и структурного разнообразия технических объектов и систем во времени. Термин введен в научный оборот английским философом Гербертом Спенсером в середине XIX в.

**Эвристический синтез** – метод решения творческих задач с использованием профессионального опыта и творческих механизмов мышления человека.

**Эмерджентность** (англ. Emergence – возникновение, появление нового) – 1) в теории систем явление, которое связано с возникновением в любых системах особых свойств, не присущих ее подсистемам и элементам; 2) невозможность сведения свойств системы к сумме свойств ее компонентов. Синоним - «системный эффект». Термин «эмерджентность» впервые ввел английский мыслитель Джордж Генри Льюис (1817-1879 г.г.).

**Энтропия** – 1) мера степени неупорядоченности системы; 2) количественная мера дефицита информации в системе; 3) потерянная энергия, которую невозможно превратить в работу.

## Ж

**Жизненный цикл** – последовательность этапов развития технического объекта от идеи его создания до полного использования по назначению или его элиминации (деструкции).

## И

**Идея** – форма мышления, с помощью которой человек способен обнаруживать наиболее существенные, наиболее подчиняемые черты и законы

объективных процессов и создавать целостный, зрительный образ предмета в познании или творчестве.

**Иерархия** (греч. *ιεροζ* – священный и *αρχη* – власть) – упорядоченный способ представления системы абстракций на основе принципа соподчинения (от высшего к низшему).

**Изомерия** (греч. *ισοξ* – сходство, равенство и *μεροζ* – доля) – 1) системное свойство генетически организованных многоэлементных структур ( $N \geq 2$ ) образовывать варианты пространственных композиций, при неизменном количестве их элементов  $N$ ; 2) разновидность внутривидового структурного полиморфизма.

**Изотопия** (греч. *ισοξ* – сходство, сходство и *τοποζ* – место) – 1) системное свойство элементного базиса периодических классификаций генетического типа; 2) полиморфизм первичных источников поля в периодической структуре ГК. Явление изотопии в периодической системе химических элементов впервые предсказал В. Крукс, который в 1887 – 1889 г.г. выдвинул гипотезу существования метаэлементов (атомных разновидностей химического элемента).

**Инверсия** (лат. *Inversio* – перестановка) – 1) всякая пара элементов, которые размещены в данной перестановке в обратном порядке; 2) один из пяти генетических операторов синтеза. Термин в теорию преобразований ввел английский математик Джон Штуббс в 1843 г.

**Инженерия** – (от лат. способность, изобретательность; синоним: инжиниринг, инженерное дело, инженерство) – направление интеллектуальной деятельности человека, направленной на применение достижений науки для решения конкретных проблем человечества.

**Инновационный синтез** – генетический синтез объектов с использованием технологии генетического предвидения и гарантированным инновационным эффектом.

**Иновация** (лат. Innovatio – обновление) – всякое нововведение в области образования, техники, технологии, организации труда или управления, основанное на использовании достижений науки и передового опыта. Термин «инновация» как новую экономическую категорию ввел в научное обращение австрийский ученый Йозеф Шумпетер в первом десятилетии XX в.

**Интуиция** (п. Лат. Intuitio – созерцание) – 1) непосредственное постижение истины без логического анализа, основанное на воображении, эмпатии и предшествующих опыте, «чутьё», проницательность; 2) прозорливость, догадка, предчувствие; 3) в когнитологии – интегральная функция правополушарного мышления.

## К

**Кроссинговер** (англ. to cross – пересекать, переходить) – генетический оператор синтеза, который воспроизводит механизмы обмена (перекрещивания) элементарных структур на хромосомном и структурном уровнях. Различают двойное, тройное и групповое перекрещивания. Термин «кроссинговер» ввел американский биолог Томас Морган.

## М

**Макроэволюция** – 1) эволюция в генетически организованных системах на видовом и надвидовом уровнях. Термины «макроэволюция» и «микроэволюция» впервые ввел русский биолог и генетик Ю.А. Филипченко в 1913 году.

**Микроэволюция** – 1) уровень технической эволюции объектов, которая происходит на внутривидовом уровне (эволюция подвидов и популяций); 2) направленные человеком процессы функциональной адаптации, совершенствования и расширения структурного разнообразия технических объектов, принадлежащих к одному виду.

**Мутация** (лат. Mutatio – изменение) – 1) системный генетический принцип, лежащий в основе механизма наследственной изменчивости

структур-потомков; 2) процедура преобразования исходной структуры, которая непосредственно связана с нарушением пропорций, геометрических соотношений, путем применения относительных деформаций, например, в парной электромагнитной хромосоме. Термин «мутация» впервые предложил голландский ботаник Хуго Де Фриз в работе «Теория мутации» (1886 г.).

## П

**Первичная хромосома** – генетически определенная хромосома в предметной области ГК (синоним «родительская хромосома»).

**Поколение** – совокупность генетически определенных объектов (систем) одного технического уровня.

**Полигибрид** – гибридный объект, синтезированный по результатам скрещивания исходных родительских хромосом, отличающийся по всем составляющим генетической информации.

**Популяция** (лат. Populus – народ, население) – 1) структурная единица произвольного вида объекта; 2) группа генетически родственных структур, которая имеет общего генетического предка (парную хромосому).

**Порождающаяся периодическая система** (англ. Generative Periodical System) – высокоупорядоченная система генетически определенных элементов физической или абстрактной природы, которая является формой представления периодического закона.

**Порождающаяся система** (англ. Generative System) – обобщенное понятие системы, элементный базис которой наделен генетическими свойствами.

**Порождающаяся структура** – первичная структура, с появлением которой начинается эволюция функционального класса или определенной систематической категории электромеханических и механических систем.

**Принцип парности** – принцип, который определяет количество подгрупп в периодической структуре ГК.

**Р**

**Родительская хромосома** (в задачах генетического анализа или синтеза) - первичный источник поля (потока) в периодической структуре ГК.

**С**

**Симметрия** (греч. *συμμετρία* – соразмерность) – свойство геометрического объекта совмещаться с собой в результате некоторых пространственных преобразований. Термин «симметрия» сформулировал и ввел в кристаллографии французский минералог Рене-Жюст Гаюи в 1815 г.

**Симметрия подобия** – 1) закономерная повторяемость подобных (но не равных частей), из которых состоит структура; 2) вид симметрии, операции которой связаны с одновременным увеличением или уменьшением масштаба подобных частей фигуры и расстояний между ними. Учение о симметрии подобия оновал в 1960 акад. А.В. Шубников.

**Синергетика** – междисциплинарное направление научных исследований, которое изучает процессы самоорганизации и возникновения, поддержки устойчивости и распада структур (систем) в открытых нелинейных окружениях (средах) разной природы. Основателем синергетики считается Герман Хакен, который ввёл понятие в своей книге «Синергетика».

**Системное мышление** – механизм правополушарного мышления, который обеспечивает способность человека эффективно использовать системный подход в различных сферах своей деятельности.

**Системное проектирование** – междисциплинарное направление в проектировании сложных технических объектов (систем, технологических процессов) на основе положений системного подхода.

**Структурная формула** – 1) формализованное представление структурной организации и уровня сложности конкретной структуры; 2) формализованное представление результатов расшифровки генетической программы произвольного объекта.

**Структурный синтез** – 1) совокупность процедур поиска, генерации и оптимизации структур по заданной функции; 2) основная задача поискового проектирования сложных технических систем.

**Структурно-системный подход** – направление в системной методологии научного познания, предметом исследования которого являются периодические системы первичных элементов (структур), инвариантные свойства которых определяют принципы структурной организации и разнообразие сложных систем-потомков, развивающихся во времени.

**Совместимость** – способность элементов (объектов, систем) различной генетической природы к образованию структур высшего уровня сложности для реализации данной функции. Различают генетическую, пространственную (геометрическую), электромагнитную (энергетическую), параметрическую, функциональную и информационную совместимость.

**Скрещивание** – 1) системный принцип структурообразования гибридных объектов в генетически организованных системах; 2) генетический оператор синтеза и процедура синтеза структуры на основе использования двух и более хромосом с различной генетической информацией.

**S-образная кривая** (логистическая кривая, кривая жизненного цикла) – упрощенное, обобщенное графическое представление основных этапов развития произвольной системы, эволюционирующей в пределах жизненного цикла. Впервые предложена биологом А. Волхорстом в 1856г.

## Т

**Таксон** (греч. *ταξις* – порядок, размещение) – генетически определенная группа дискретных классов объектов, объединенных общностью признаков и свойств, на которые распространяется понятие соответствующей таксономической категории.

**Техногенез** – процесс изменения природной среды под влиянием технической (главным образом промышленной) деятельности человека.



**Технологическая наследственность** – свойство заготовки (детали, изделия) менять свои структурные, физико-механические и электрохимические свойства в процессе технологической обработки.

**Топология** (греч. *τοποζ* – место и *λογος* – учение) – раздел математики, изучающий свойства топологических пространств, которые не изменяются при взаимно однозначных и взаимно непрерывных преобразованиях. Термин «топология» впервые предложил Иоганн Бенедикт Листинг. Методы топологии впервые привлек в теорию электрических машин в 1930-х г.г. известный инженер-электротехник Габриэль Крон.

## X

**Хромосома** (родительская) – первичный источник электромагнитного, силового и другого поля в периодической структуре ГК. Хромосомы в живых организмах впервые были открыты в 1894 г. немецким ботаником Вильгельмом Гофмейстером.

**Хромосома-потомок** – хромосома более высокого уровня сложности, которая синтезирована на основе родительской хромосомы.

**Хромосома-репликатор** – хромосома информационного типа в процедурах репликации.

**Хромосомная инверсия** – разновидность обращенной хромосомной структуры.

## **Технические условия на синтезированный высокоскоростной широкодиапазонный эксцентриковый ИЗП типа ЭСФПШ - 13**

Данные технические условия на синтезированный широкодиапазонный эксцентриковый ИЗП типа ЭСФПШ – 13 включают:

1. Назначение, область применения и достоинства
2. Технические требования
3. Требования к безопасности и охраны окружающей среды
4. Правила приёмки
5. Методы контроля
6. Транспортировка и хранение
7. Указания по эксплуатации
8. Гарантии изготовления

Приложение Б.1.

Перечень документов, на которые даны ссылки.

Приложение Б.2

Перечень применяемых средств измерений, инструментов и материалов, необходимых для контроля.

### **1. НАЗНАЧЕНИЕ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ДОСТОИНСТВА**

#### **1.1. Назначение**

Эксцентриковый сверлильный патрон предназначен для быстрого и надёжного зажима инструмента с цилиндрическим хвостовиком (свёрла, зенкеры, развёртки, фрезы и др.) правого и левого вращения в заданном диапазоне. Патрон может устанавливаться в ручных, электрических и пневматических дрелях, сверлильных, расточных, фрезерных, токарных, многоцелевых, деревообрабатывающих и других станках.

1.2. Область применения – металлообработка, слесарно-монтажные работы, деревообработка, медицина, быт и др.

1.3. Способ присоединения – внутренний или наружный конус Морзе, хвостовик с конусом Морзе или несамотормозящим конусом 7:24, резьбовое отверстие или хвостовик, байонетный замок и др.

1.4. Достоинства:

1.4.1. Быстрый и легкий зажим-разжим от руки или с помощью простого ключа с наружным шестигранником.

1.4.2. Удобство и надёжность работы при левом и правом вращении зажимаемого инструмента, причём при правом вращении появляется дополнительный эффект – зажим от внешней нагрузки в процессе работы (чем больше крутящий момент от сил резания, тем больше сила зажима).

1.4.3. Широкий диапазон зажимаемых инструментов (практически от нуля до максимального диаметра патрона).

1.4.4. Точность и жёсткость зажима инструмента.

1.4.5. Простота изготовления деталей патрона (кроме кулачков по “ноу-хау” механической обработкой на металлорежущих станках, точным литьём, штамповкой (горячей, холодной или комбинированной), прессованием или спеканием из порошков и т.п.).

1.4.6. Работа на высоких частотах вращения (в 2 ... 3 раза выше, чем у аналогов).

1.4.7. Простота сборки-разборки и технического обслуживания.

1.4.8. Высокая долговечность и возможность быстрой замены изношенных деталей.

1.4.9. Возможность обработки труднодоступных мест благодаря малым габаритам и острого конического переднего конца, плавно переходящего от корпуса в кулачок, а от него в инструмент.

1.4.10. Модульный принцип конструирования патрона, позволяющий из ограниченного набора деталей собирать патроны разного исполнения по способу зажима-разжима (с ключом, без ключа и др.).

1.4.11. Широко универсальность и неограниченная область применения (в производстве и быту).

Настоящие технические условия распространяются на патрон сверлильно-фрезерный эксцентриковый (далее патрон) без ключа ЭСФПШ.13, предназначенный для металлорежущих и деревообрабатывающих станков, а также для комплектации ручных сверлильных машин промышленного и бытового назначения.

Патрон должен изготавливаться в климатическом исполнении У категории размещения 2 по ГОСТ 15150 – 69.

Пример условного обозначения сверлильного эксцентрикового патрона с ключом исполнения У2:

*Патрон 13 У2 ЭСФПШ.13.99 ТУ*

По присоединительной части патроны изготавливаются двух исполнений:

*А* – с присоединительным конусным отверстием по стандарту СТ СЭВ 148 - 75;

*В* – с присоединительным резьбовым отверстием с метрической резьбовой по стандарту СТ СЭВ 182 – 75.

## 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

2.1. Патроны должны соответствовать требованиям п. 2.2 – 2.6 настоящих ТУ и комплекта документации ЭСФПШ.13.00.

2.2. Требования к конструкции.

2.2.1. Габаритные размеры не должны превышать (Ø45 x 90).

2.2.2. Масса патрона не должна превышать 0,40 кг.

2.2.3. Твёрдость зажимной части кулачков должна быть не менее 48 HRC<sub>Э</sub>, а корпуса – 52 HRC<sub>Э</sub>.

2.2.4. Покрытия металлические и неметаллические неорганические по ГОСТ 9.303 – 84, группа эксплуатации 3.

2.2.5. Перемещение кулачков в корпусе патрона должно быть плавным, без заеданий.

2.2.6. Максимальная величина радиального биения патрона не должна превышать 0,08 мм для класса точности I и 0,08 мм для класса точности II по СТ СЭВ 6148 – 87 (исполнения А); 0,35 мм по СТ СЭВ 5910 – 87 (исп. В).

2.3. Требования к надёжности.

2.3.1. Средний эксплуатационный срок службы должен быть не менее 3 лет.

2.3.2. Крутящие моменты оправки  $8H \times M$ , по СТ СЭВ 5910 – 87.

2.4. Требования к маркировке.

2.4.1. На каждом патроне должны быть нанесены:

- наименование патрона ЭСФПШ.13;
- диапазон диаметров зажимаемых инструментов 0,5 ... 13. Способ нанесения маркировки должен обеспечивать её сохранность на весь срок службы патрона.

2.5. Требования к упаковке.

2.5.1. Упаковку патронов производить в дощатые ящики по ГОСТ 2991 – 85, тип 1.

2.5.2. Перед упаковкой патрон и ключ должны быть законсервированы по ГОСТ 9.014 – 78. Вариант защиты ВЗ – 1, вариант внутренней упаковки ВУ – 1. Срок защиты без консервации – 3 года для условий хранения группы 2.

2.5.3. После консервации патрон и ключ должны быть завернуты во влагонепроницаемый упаковочный материал в один сверток и уложен в ящик.

2.5.4. В каждый ящик должен быть вложен упаковочный лист.

2.5.5. Упаковочный лист должен содержать следующие сведения:

- товарный знак или наименование завода изготовителя;
- наименование патрона и номер настоящих технических условий;
- количество патронов в ящике;
- срок сохранения без консервации;
- штамп ОТК, дату упаковки.

2.5.6. Транспортная маркировка по ГОСТ 14192 – 77.

2.5.7. Масса брутто не более 35 кг.

2.5.8. При розничной продаже возможна упаковка в картонную коробку или футляр (деревянный или пластмассовый).

2.6. Комплектность.

2.6.1. В комплект поставки должны входить:

- патрон ЭСФПШ.13.00 1 шт.

### 3. ТРЕБОВАНИЯ К БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

3.1. Элементы конструкции патрона не должны иметь острых углов, кромок и поверхностей с неровностями, представляющих источник опасности.

3.2. Патрон не должен проворачиваться в присоединительной части и спадать со шпинделя станка или ручной сверлильной машины.

3.3. На высоких частотах вращения дисбаланс патрона не должен приводить к вибрациям.

### 4. ПРАВИЛА ПРИЁМКИ

4.1. Общие положения.

4.1.1. Для проверки соответствия патронов требованиям ТУ вг предприятии-изготовителе должны быть установлены следующие категории испытаний: приёмо-сдаточные, периодические, на надёжность, приёмочные (квалификационные). Приёмо-сдаточные испытания проводят с целью контроля качества каждой предъявляемой партии.

Периодические испытания проводят с целью периодического контроля качества патронов, проверки стабильности технологического процесса их производства, а также подтверждения возможности продолжения изготовления патронов по действующей конструкторской и технологической документации и их приёмки.

Испытания на надёжность проводят с целью подтверждения установленных значений показателей надёжности патронов.

#### 4.2. Приёмо-сдаточные испытания.

4.2.1. Приёмо-сдаточные испытания включают в себя проверку на соответствие п.п. 2.2.6, 2.2.7, 2.6.

4.2.2. Приёмку готовых изделий необходимо производить партиями.

4.2.3. Партией считается количество изделий, одновременно предъявляемых по одному документу.

4.2.4. Приёмо-сдаточные испытания проводить методом выборочного контроля при объёме выборок, указанных в табл. 1\*.

Таблица 1\*

| Объём партии, шт. | Объём выборок при проверке требований<br>п.п. 2.2.6, 2.2.7, 2.6. |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|
| до 50             | 8%, но не менее 3 шт.                                            |
| св. 50 до 150     | 6%, но не менее 6 шт.                                            |
| св. 150 до 500    | 4%, но не менее 12 шт.                                           |
| св. 500 до 1500   | 2%, но не менее 20 шт.                                           |
| св. 1500 до 5000  | 1%, но не менее 32 шт.                                           |
| св. 5000          | 0,5%, но не менее 50 шт.                                         |

4.2.5. При неудовлетворительных результатах испытаний хотя бы по одному из показателей производят повторное испытание на удвоенном количестве патронов из той же партии.

При неудовлетворительных результатах производится проверка 100% предъявленной партии.

4.3. Периодические испытания проводится не реже одного раза в год на 10 патронах, отобранных методом случайных чисел по ГОСТ 18321 – 73 из партии 100 шт., прошедших приёмо-сдаточные испытания и включают в себя проверку по п.п. 2.1, 2.2.1 – 2.2.7, 2.4, 2.5, 2.6.

4.3.2. Проверку работоспособности патрона проводят рассверливанием предварительно просверленных отверстий Ø2,5 мм в образце из стали по ГОСТ 1050 - 88.

\* В данном п. 4.3.2 нумерация рисунков и таблиц своя по ГОСТ 1050 – 88 сверлами из быстрорежущей стали по ГОСТ 886 -77 и с режимами, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

| Диаметр сверла,<br><i>мм</i> | Скорость<br>резания, <i>м/мин</i> | Глубина<br>сверления, <i>мм</i> | Количество<br>просверленных<br>отверстий |
|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|
| 13                           | $25 \pm 5$                        | $35 \pm 5$                      | 3                                        |

После проведения испытаний патрон должен сохранить величину радиального биения, соответствующую п. 2.2.7 настоящих ТУ.

4.3.3. Если при испытаниях хотя бы у одного патрона при измерении любого параметра будет установлено несоответствие требованиям настоящих ТУ, то по пунктам несоответствия необходимо проводить испытания на удвоенном количестве патронов, взятых из той же партии. Если при испытании удвоенного числа патронов хотя бы одно несоответствие первой выборки повторится, то результаты испытаний считают неудовлетворительными по пунктам несоответствия. В этом случае приёмку патронов, а также отгрузку ранее принятых, но не отгруженных партий, прекращают и возобновляют после устранения причин дефектов, получение положительных результатов и устранение дефектов в ранее принятых патронах.

До получения положительных результатов испытаний допускается осуществить приёмку патронов при условии сплошного контроля по пунктам несоответствия.

4.4. Испытания на надёжность.



4.4.1. Испытания на надёжность патронов проводят для определения показателей надёжности, заданных в подразделе 2.3 настоящих ТУ.

4.4.2. Средний срок службы патрона определяется при обработке статических данных, полученных по результатам эксплуатации.

4.5. Приемочные (квалификационные) испытания.

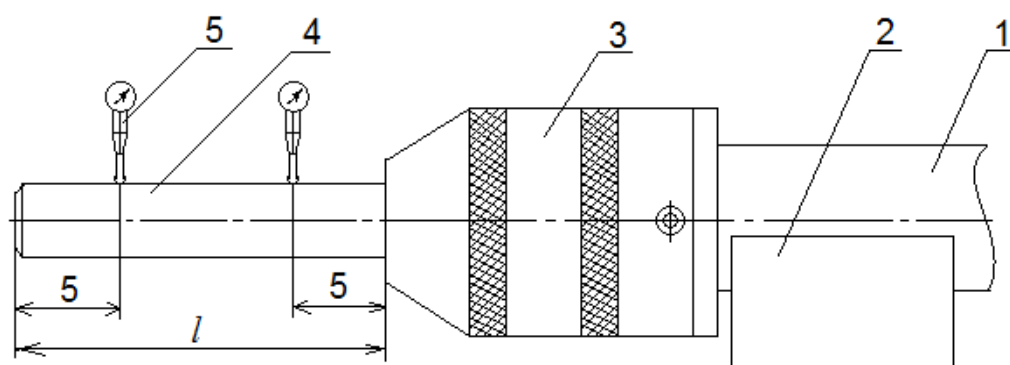
4.5.1. Приемочные (квалификационные) испытания проводят по ГОСТ 15.009 – 91 комиссией с целью определения качества документации и готовности производства к серийному выпуску на не менее чем 5 образцах в объёме требований и ПИ настоящих ТУ.

## 5. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

5.1. Методы контроля должны соответствовать требованиям, изложенным в данном разделе ТУ.

5.2. Проверку по п.п. 2.4, 2.5, 2.6, 3.1 проводят внешним осмотром на соответствие документации.

5.3. Габаритные размеры патрона (п. 2.2.1) контролируются штангенциркулем с отсчётом по нониусу 0,1.



$l = 125$  мм для  $\varnothing 13$ ;  $l = 75$  мм для  $\varnothing 6$

1 – оправка (рис. 2); 2 – призма (рис. 3); 3 – испытуемый патрон (рис. 5, 6); 4 – контрольная оправка (рис. 4); 5 – индикатор

*Рис. 1. Приспособление для проверки точности патрона*

5.4. Контроль массы патрона (п. 2.2.2) производить на лабораторных весах ВЛК – 500Г – М ГОСТ 24104 – 88.

5.5. Проверку твёрдости кулачков, корпуса и ключа (п. 2.2.3, 2.2.4) производить прибором Роквелла тип ТР ГОСТ 23677 – 79.

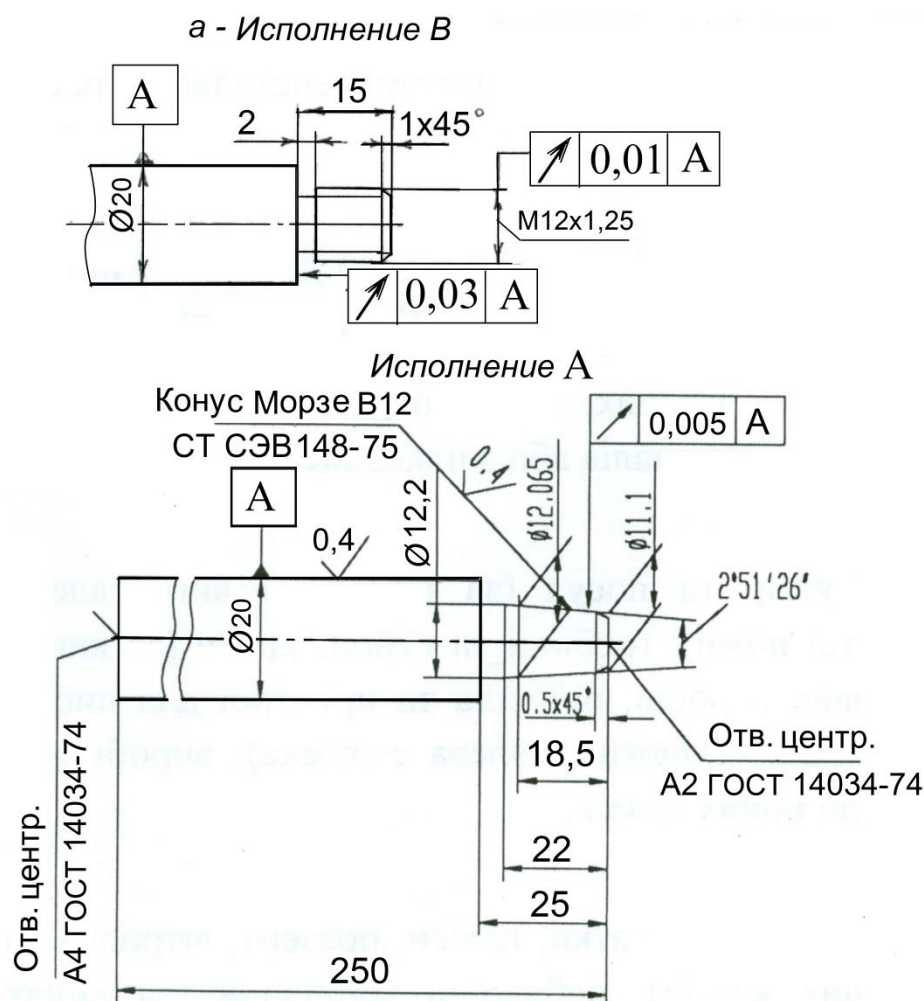
5.6. Контроль качества покрытий (п. 2.2.5) по ГОСТ 9.302 – 88.

5.7. Проверка плавности хода кулачков (п. 2.2.6) осуществляется ручным опробованием без помощи ключа.

5.8. Проверка радиального биения патрона (п. 2.2.7) производится при помощи приспособления (рис. 1). Патрон насаживается на конусную часть оправки (рис. 2). Свободный конец оправки устанавливают на примере (рис. 3).

Сталь 40Х ГОСТ 4543-71

HRC<sub>Э</sub> 58 ... 61



*Рис. 2. Оправка*

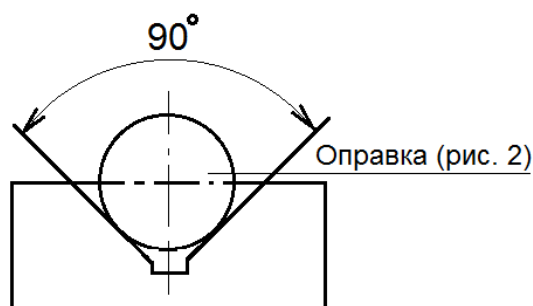
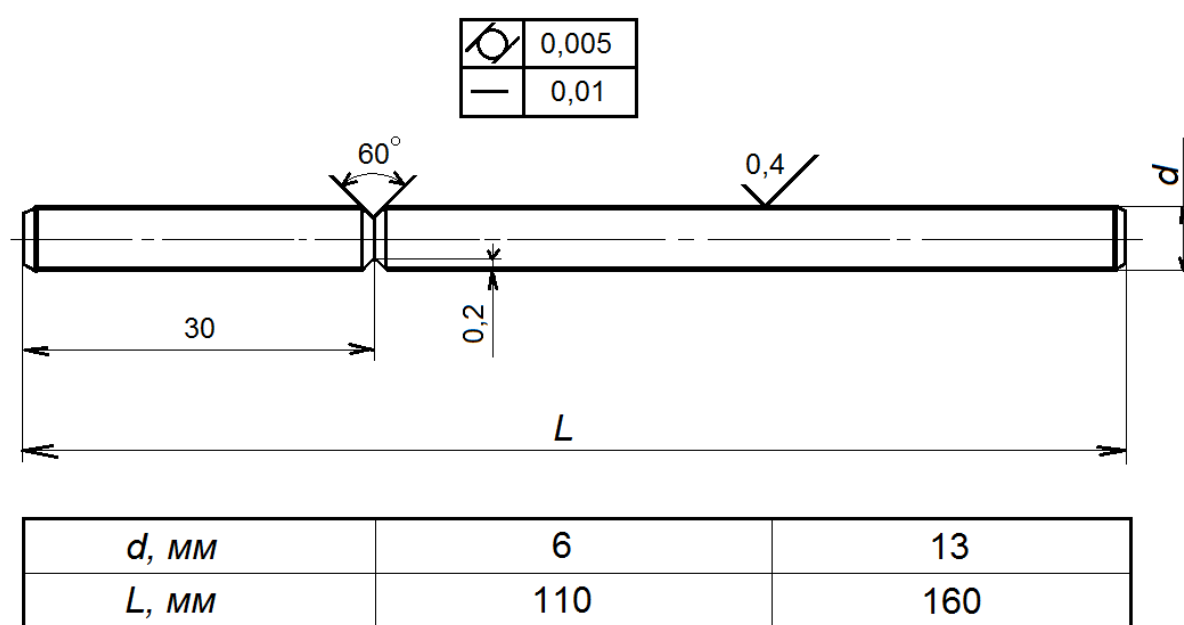


Рис. 3. Призма по ТУ 2-034-439-88



Сталь 40Х ГОСТ 4543-71

HRC<sub>Э</sub> 58 ... 61

Рис. 4. Контрольная оправка к патрону ЭСФПШ.13

На контрольной оправке (рис. 4) должна быть риска на расстоянии 30 мм от торца. Измерение радиального биения проводить на противоположном от риски конце оправки на одном (двух) вылетах.

Установка контрольной оправки. Контрольная оправка вводится в кулачки патрона до совпадения контрольной риски с торцом корпуса патрона. Затем следует равномерный зажим оправки с помощью ключа от руки до жёсткого закрепления оправки в патроне.

Определение биения производится индикатором, который устанавливается так, чтобы его измерительный наконечник касался поверхности контрольной оправки и был направлен перпендикулярно оси образующей. Предварительное нажатие индикатора должно соответствовать 0,5 мм. Затем оправку с патроном приводят во вращение на призме. Патрон считается годным, если значение радиального биения контрольной оправки при трёх последовательных установках не превышает 0,08 мм для класса точности I и 0,18 мм – II.

5.9. Контроль массы ящика с патронами (п. 2.5.7) производить на весах РП – 150Ц – 13 ГОСТ 23711 – 79.

5.10. Перечень приборов, инструментов и материалов, необходимых при испытаниях, приведены в приложении Б.

5.11. Проверка крутящего момента патрона.

5.11.1. Средства контроля для проведения проверки применяют:

- контрольную оправку диаметром 13 мм с отверстием под переходник или с переходной частью для динамометра со стороны риски (рис. 4);

- оправку с конусом для патронов исполнения А (рис. 2) и резьбой – исполнения В (рис. 2, а);

- прибор для измерения крутящего момента (динамометр).

5.11.2. Проведение проверки.

Испытуемый патрон закрепляют на оправке (рис. 2 и 2, а). Контрольная оправка (рис. 4) равномерно зажимается соответствующим шестигранным ключом 5, вставляемым во все три отверстия эксцентрикков при крутящем моменте, величина которого указана в п. 2.3.2. (до 10 Н хм). К контрольной оправке (рис. 4) прикладывается крутящий момент, величина которого указана в п. 2.3.2 (более 8 Н хм). Контрольная оправка не должна прокручиваться в патроне.

## 6. ТРАНСПОРТИРОВКА И ХРАНЕНИЕ

6.1. Упакованные патроны должны транспортироваться всеми видами транспорта при температурах от минус 50 С до плюс 50 С при защите их от прямого воздействия атмосферных осадков и механических повреждений по правилам, соответствующим требованиям ГОСТ 23170 – 78.

6.2. Патроны должны храниться в условия группы 1.2 по ГОСТ 15150 – 69.

6.3. Возможно хранение патронов для розничной продажи или в инструментальной кладовой в отдельных упаковках (см. п. 2.5.4) или многосекционных ящиках-кассетах.

## 7. УКАЗАНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

### 7.1. Подготовка ЭСФПШ.13 к работе и порядок работы.

При разжатых кулачках (рис. 6, а) инструмент (сверло или фреза), устанавливается в патрон до упора в торец корпуса (рис. 5), а затем выдвигается приблизительно на 2 мм, чтобы обеспечить плотное прилегание кулачков к инструменту без перекоса. Удерживая за корпус, вращением конусной втулки (правая кинематическая цепь) обеспечивается поворот и сведение кулачков до соприкосновения их рабочих поверхностей с цилиндрической поверхностью инструмента (предварительный зажим).

Затем гайку с мелкой резьбой поворачивают вручную до определённой силы натяга системы.

При этом происходит окончательный и надёжный зажим инструмента.

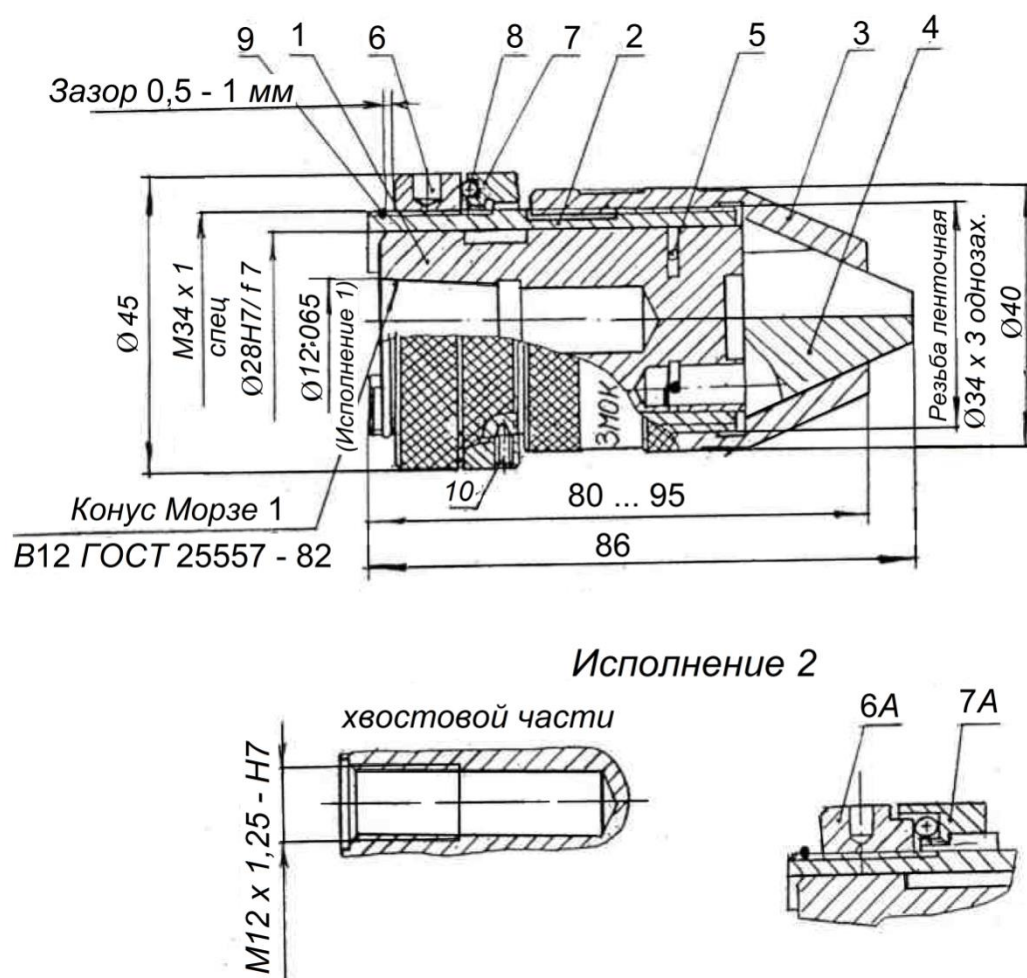


Рис. 5. Широкодиапазонный эксцентриковый ИЗП типа ЭСФПШ.13

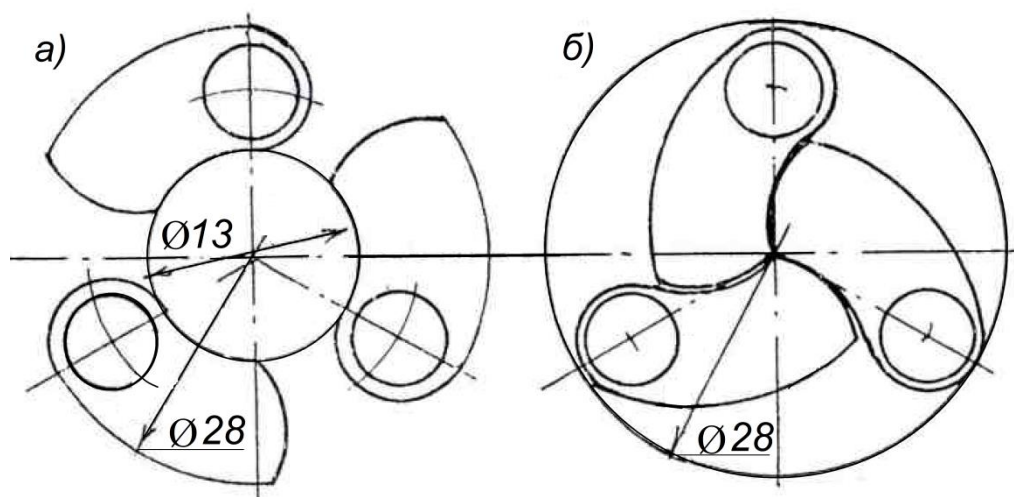


Рис. 6. Положение кулачков при зажиме хвостовика инструмента диаметра: а – максимального 13 мм; б – минимального 0,5 мм

7.2. Подготовка патрона к работе и порядок работы. При разжатых кулачках 4 (рис. 6, а) инструмент (сверло или фреза) устанавливается в патрон до упора в торец корпуса (рис. 5). Удерживая патрон за корпус, вращением втулки 3 обеспечивается поворот и сведение кулачков 4 до соприкосновения их рабочих поверхностей с цилиндрической поверхностью инструмента (предварительный зажим). Затем вращением гайки относительно втулки (корпуса) обеспечивается натяг (окончательный зажим).

При последующем сверлении под действием крутящего момента от сил резания происходит дополнительный зажим инструмента.

| Возможная неисправность                      | Вероятная причина                             | Метод устранения                                                                                                                |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Увеличение биения инструмента                | Попадание во внутрь патрона грязи или стружки | Промыть патрон в солярке (керосине), а затем окунуть в масло (индустриальное или ему подобное)                                  |
| Неравномерный зажим                          | Износ клиньев 7                               | Развести на максимальный диаметр и шлифовать на 0,1 ... 0,2 мм по диаметру; при невозможности добиться точности сменить кулачки |
| Тугой зажим или разжим                       | Износ или загрязнение деталей патрона         | Промыть патрон в солярке (керосине), а затем окунуть в масло (индустриальное или ему подобное)                                  |
| Неполное и неравномерное разведение кулачков | Ослабла или сломалась пружина 5               | Заменить на более жёсткую пружину                                                                                               |

Независимо от диаметра инструмента контакт зажимных кулачков с конической поверхностью втулки и цилиндрической поверхностью инструмента осуществляется по линии. Таким образом поворотом гайки обеспечивается надежный зажим цилиндрических хвостовиков инструментов в диапазоне диаметров 0,5 ... 13,0 мм (рис. 6). Разжим происходит в обратной последовательности, а раскрытие кулачков пружиной.

7.3. Возможные неисправности опытных конструкций ЭСФПШ.13 и методы их устранения.

## 8. ГАРАНТИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

8.1. изготовитель гарантирует соответствие патронов требованиям настоящих технических условий при соблюдении потребителем условий эксплуатации, транспортирования и хранения.

8.2. Гарантийный срок – 12 месяцев со дня ввода патрона в эксплуатацию.



## ПЕРЕЧЕНЬ ДОКУМЕНТОВ, НА КОТОРЫЕ ДАНЫ ССЫЛКИ

| Обозначение НД | Наименование НД                                                                                                                                                                                                      | Наименование НД, в котором дана ссылка на НД |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1              | 2                                                                                                                                                                                                                    | 3                                            |
| ГОСТ 15.009-91 | Система разработки постановки продукции на производстве.<br>Непродовольственные товары народного потребления                                                                                                         | 3.5.1                                        |
| ГОСТ 23170-78  | Упаковка для изделий машиностроения.<br>Общие требования.                                                                                                                                                            | 5.1                                          |
| ГОСТ 15150-69  | Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнение для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения, транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. | 5.2                                          |
| ГОСТ 9.303-84  | Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору.                                                                                                                                  | 2.2.5                                        |
| ГОСТ 14192-77  | Маркировки грузов.                                                                                                                                                                                                   | 2.5.6                                        |
| ГОСТ 2991-85   | Ящики дощатые неразборные для грузов массой до 500 кг. Общие технические условия.                                                                                                                                    | 2.5.1                                        |
| ГОСТ 18321-73  | Статистический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции.                                                                                                                                | 3.3.1                                        |
| ГОСТ 23677-79  | Твердомеры для металлов. Общие технические требования.                                                                                                                                                               | 4.5<br>Приложение Б                          |
| ГОСТ 24104-88  | Весы лабораторные общего назначения и образцовые. Общие технические условия.                                                                                                                                         | 4.4<br>Приложение Б                          |
| ГОСТ 9.302-88  | Покрытия металлические и неметаллические неорганические.<br>Методы контроля.                                                                                                                                         | 4.6                                          |
| ГОСТ 886-77    | Сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком. Длинная серия. Основные размеры.                                                                                                                                     | 3.3.2<br>Приложение Б                        |
| ГОСТ 23711-79  | Весы для статического взвешивания. Общие технические требования.                                                                                                                                                     | 4.9                                          |

| 1                               | 2                                                                                                                                                | 3                     |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| ГОСТ 1050-88                    | Прокат сортовой калиброванный со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия. | 3.3.2<br>Приложение Б |
| ГОСТ 1577-68                    | Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия.                                                                           | Приложение Б          |
| ГОСТ 1577-81                    | Прокат листовой и широкополосный из конструкционной качественной стали. Технические условия.                                                     | Приложение Б          |
| ГОСТ 166-89                     | Штангенциркули. Технические условия.                                                                                                             | Приложение Б          |
| ГОСТ 10197-70                   | Стойки и штативы для измерительных головок. Технические условия.                                                                                 | Приложение Б          |
| ТУ2-034-439-88                  | Призмы проверочные и разметочные с одной призматической выемкой и накладкой типа III. Технические условия.                                       | Приложение Б          |
| ГОСТ 9.014-78                   | Временная противокоррозионная защита изделий. Общие требования.                                                                                  | 2.5.2                 |
| ГОСТ 19903-74                   | Прокат листовой горячекатаный. Сортамент.                                                                                                        | Приложение Б          |
| ГОСТ 12.2.003-74                | Оборудование производственное. Общие требования безопасности.                                                                                    | 3.1                   |
| СТ СЭВ 1605-79                  | Машины ручные сверлильные электрические. Технические требования и методы испытаний.                                                              | 1.1, 1.2, 1.4         |
| СТ СЭВ 5910-87                  | Патроны сверлильные трёхкулачковые с ключом.                                                                                                     | 1.4, 2.2, 2.3, 2.4    |
| СТ СЭВ 6143-87<br>ГОСТ 15935-88 | Патроны сверлильные трёхкулачковые без ключа.                                                                                                    | 1.4, 2.2, 2.3, 2.4    |
| ГОСТ 8522-79                    | Патроны сверлильные трёхкулачковые с ключом. Основные размеры.                                                                                   | 1.4, 2.2, 2.3, 2.4    |
| ГОСТ 22993-78                   | Патроны трёхкулачковые с ключом для сверлильных машин. Основные размеры.                                                                         | 1.4, 2.2, 2.3, 2.4    |
| СТ СЭВ 148-75<br>ГОСТ 9953-87   | Укороченные конусы инструментов.                                                                                                                 | 1.3                   |
| СТ СЭВ 182-75                   | Резьбовые присоединения инструментов.                                                                                                            | 1.3                   |

Перечень применяемых средств измерений, инструментов и материалов,  
необходимых для контроля

| Наименование                 | Обозначение НД            |
|------------------------------|---------------------------|
| Весы ВЛК-500Г-М              | ГОСТ 24104-88             |
| Весы РП-150Ц-13              | ГОСТ 23711-79             |
| Индикатор ИЧ-10              | ГОСТ 577-68               |
| Сверло 0 2,5                 | ГОСТ 886-77               |
| Сверло 0 13                  | ГОСТ 886-77               |
| Штангенциркуль ШЦ-1-12,5-0,5 | ГОСТ 166-80               |
| Роквелл тип ТР               | ГОСТ 23677-81             |
| Стойка СТ-4                  | ГОСТ 10197-70             |
| Призма                       | ТУ2-034-439-88            |
| Образец                      | Лист Б-ПН-25ГОСТ 19903-74 |
|                              | 20-3-ТГОСТ 1577-81        |
| Оправка                      | ГОСТ 24104-88             |
| Контрольная оправка          | ГОСТ 2.4104-88            |

Примечание: При контроле допускается использовать другие средства измерения, имеющие аналогичные параметры.

# ТОВ «Техноелектропласт»

36008 Україна м. Полтава вул. Комарова, 5

ЄДРПОУ 37386691

р/рах. № 26005799975186(ІАН) МФО 380838, з ПАТ КБ «ПриватБанк»

Тел./факс +38(0532)508-863, факс 0532-508-863

Вих. № 12 від 10.07.15

## АКТ

призначення широкодіапазонного ексцентрикового інструментального  
затискного патрона типу ЕСФП.13

Кафедрою конструювання верстатів та машин НТУУ «Київський політехнічний інститут» був переданий разом з технічною документацією для виробничих випробувань – впровадження інструментального затискного патрона, розроблений докторантом дисципліни к.т.н. Якимовою Ж.А. Гердой.

Патрон є результатом науково – дослідної роботи по доробленості теми В2652 – п «Оптимізація багатопільових токарних і паралексординатних свердильно-фрезерних верстатів нового покоління з механізмами паралельної структури»; науковий керівник професор, д.т.н. Кузнецов С.М.;

Синоніми технічні характеристики інструментального затискного патрона:

Припускний розмір внутрішнього жорна Морзе – В16

Діапазон діаметрів застосованого інструмента (свердл, фрез), мм 0,5 – 13

Максимальна частота обертання, об/хв 10 000

Роздільна сила контрольного справки, мм, не більше 0,08

Габаритні розміри, мм, не більше

– Довжина (мін – макс) 65 – 100

– Діаметр 45

Маса, кг, не більше 3,4.

Патрон використовується на свердильному верстаті моделі Intertool ST – 2130 на частотах обертання при свердлінні 2000 – 2600 об/хв і фрезерному верстаті з чпк моделі Opti BK 46 Vario на частотах 3000 – 8000 об/хв.

Деталі – різної конфігурації, з різних матеріалів (сталь, дюралюміній, латунь, дерево, пластик), що вимагало координатив і контурну обробку. Якість обробки деталей відповідає технічним вимогам.

Директор ТОВ «Техноелектропласт»



Біленько С.В.



УНИВЕРСИТЕТ АВГУСТИНЬО НЕТТО  
ФАКУЛЬТЕТ ИНЖЕНЕРИИ

ОТДЕЛ КАДРОВ

**СПРАВКА**

Справка дана гражданину Анголы, к.т.н. Хамуйела Жоаким Аугушто Герра в том, что он является доцентом данного вуза, прикреплен за кафедрой инженерной механики в категории профессор ассоциад, в данное время занимает должность зам. декана по учебной работе.

Действительность этой справки которая была запрошена является верной и подтверждается подписью и мокрой печатью даного учреждения,

ОТДЕЛ КАДРОВ ФАКУЛЬТЕТА ИНЖЕНЕРИИ В ЛУАНДЕ, 21 ОКТЯБРЯ 2016 ГОДА.

Начальник отдела кадров

**ПОДПИСЬ С ШТАМПОМ**

Мария Антониета С.М. да Силва.







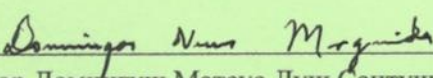
РЕСПУБЛИКА АНГОЛА  
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
УНИВЕРСИТЕТ АВГУШТИНЬО НЕТТО



**ИНЖЕНЕРНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ**

"Об утверждении"

Проректор по Учебной Работе и Студенческой Жизни  
Университет Авгуштиньо Нетто (ПУР-СЖ УАН)

  
Профессор Домингуш Матеус Душ Сантуш Маргарида, к.т.н.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

Результаты докторской диссертационной работы Хамуйела Жоаким Аугушто Герра "Генетический-морфологический синтез зажимных патронов".

Комиссия поручила представить полезность и применение результатов диссертационной работы, ведущей к докторской степени, состоящей из следующих членов: декан инженерного факультета университета Авгуштиньо Нетто, *проф. Алис Фатима Пинто Сэита и Алмейда, к.т.н.*; Заместитель декана по учебной работе инженерный факультет, *Проф. Хамуйела Жоаким Аугушто Герра, к.т.н.*; начальник департамент механика *проф. Вальтера де Хесус да Коста Лоуренсу, маг. наук; проф. Филипе Липе, к.т.н. (профессор департамента механики); проф. Татьяна Олеговна, к.т.н. (профессор департамента механики); проф. Жоау Филипе Кидимуена, к.т.н. (профессор департамента механики)* разработав представленный акт внедрения об применении результатов, полученных в докторской работе реализуя их в учебно-образовательном процессе обучения в департаменте механика инженерного факультета Университета Авгуштиньо Нетто.

Методология многоуровневого синтеза и генетико-морфологический подход к описанию и синтез технических систем на примере зажимных механизмов,



захватывающих устройств роботов и манипуляторов, компоновок станков нового поколения, использованные в дисциплинах “Станки с ЧПУ и станочные комплексы”, “Технологическое оборудования с параллельной кинематикой”, “Элементы станочные органы”, “Основы технического творчества”.

Теоретические и экспериментальные исследования характеристик синтезированных зажимных патронов и шпиндельных узлов, а также рекомендации для повышения технико-экономических характеристик токарных многоцелевых и сверлильно-фрезерных станков с ЧПУ, в том числе, с механизмами параллельной структуры, используемые при выполнении госбюджетных тем №2267-р(№0109U000817) и №2652-р(№0106U007223).

Декан инженерного факультета Университета Аугуштиньо Нетто

проф. Алис Фатима Пинто Сэита и Алмейда

*Alice Fatima Pinto Saita*



Заместитель декана по учебной работе инженерный факультет

проф. Хамуйела Жоаким Аугушито Герра, к.т.н.

*João Filipe Augusto Gomes Hamuyela*

Начальник департамент механика

проф. Вальтера де Хесус да Коста Лоуренсу, маг. наук

*Valter de Jesus da Costa Lourenço*

проф. Филипе Липе, к.т.н.; (профессор департамента механики)

*Filipe Lipe*

проф. Татьяна Олеговна, к.т.н.; (профессор департамента механики)

*Tatiana Olegovna*

проф. Жоау Филипе Кидимуена, к.т.н.; (профессор департамента механики)

*João Filipe Kudimuena*





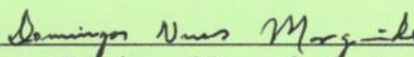
REPÚBLICA DE ANGOLA  
MINISTÉRIO DO ENSINO SUPERIOR  
UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO



### FACULDADE DE ENGENHARIA

#### "Homologação"

Vice-Reitor para os Assuntos Académicos e Vida Estudantil da  
Universidade Agostinho Neto (UAN)

  
Prof. Doutor Domingos Mateus dos Santos Margarida, Ph.D.

#### ACTO DE APLICABILIDADE

Resultados da tese de pós-doutoramento de Joaquim Augusto Guerra Hamuyela  
"Síntese Genético-Morfológica de Porta-Placas de Fixação".

A Comissão encarregue em apresentar a utilidade e aplicação dos resultados da tese de dissertação conducente ao grau de pós-doutoramento, é integrada pelos seguintes membros: Decana da Faculdade de Engenharia da Universidade Agostinho Neto, *Prof. Doutora Alice de Fátima Pinto Ceita e Almeida, Ph.D.*; Vice-Decano para os Assuntos Académicos da Faculdade de Engenharia da UAN, *Prof. Doutor Joaquim Augusto Guerra Hamuyela, Ph.D.*; Chefe de Departamento de Engenharia Mecânica da FE UAN., *Prof. Eng. Valter de Jesus da Costa Lourenço, M.Sc.*; *Prof. Doutor Filipe Lipe, Ph.D.*, *Prof. Doutora Tatiana Olegovna, Ph.D.*; *Prof. Doutor João Filipe Kudimuena, Ph.D.*, elaboraram o presente acto de aplicabilidade pelos resultados produzidos na tese de pós-doutoramento que está sendo implementada no processo de Ensino-Educação-Aprendizagem no Departamento de Ensino e Investigação de Engenharia Mecânica da FE UAN.

A Metodologia de *Síntese Genético-morfológica do Porta-placas de fixação* e a sua abordagem genético-morfológica foram explícitas em descrições com expereiências abrangentes de sistemas técnicos tais como: Mecanismos de fixação; Dispositivos de fixação para robôs e manipuladores; Configurações de Estruturas de Máquinas-ferramenta de Nova Geração.

|                         |                |
|-------------------------|----------------|
| UNIVERSIDADE A. NETO    |                |
| Faculdade de Engenharia |                |
| Sector de Arquivo       |                |
| Entrada N.º             | 703            |
| Data                    | 29 / 09 / 2016 |



Alguns fundamentos estão sendo explorados e utilizados nas disciplinas de “Máquinas-ferramenta CNC”; “Tecnologia de Máquinas com Cinemática Paralela”; “Elementos de Órgãos de Máquinas”; “Metodologia de Investigação Científica”.

O estudo teórico e experimental das características dos Portas-Mandris de fixação, sintetizados e Unidades Eixo-árvore de Fixação, bem como suas recomendações para o melhoramento das características técnico-econômicas multifacetadas, estão sendo programadas nas Máquinas Perfuradoras e Fresadoras CNC, incluindo os Mecanismos de Estruturas Paralelas com execuções Orçamentadas pelo Estado sob registros Nº2267-p (Nº0109U000817) e Nº2652-p (Nº0106U007223).

Decana da Faculdade de Engenharia da Universidade Agostinho Neto

**Prof. Doutora Alice de Fátima Pinto Ceita e Almeida, Ph.D.**

*Alice de Fátima Pinto Ceita e Almeida*

Vice-Decano para os Assuntos Acadêmicos da Faculdade de Engenharia (VDAAC FE UAN)

**Prof. Doutor Joaquim Augusto Guerra Hamuyela, Ph.D.**

*Joaquim Augusto Guerra Hamuyela*

Chefe de Departamento de Engenharia Mecânica da FE UAN

**Prof. Eng. Valter de Jesus da Costa Lourenço, M.Sc.**

*Valter de Jesus da Costa Lourenço*

**Prof. Doutor Filipe Lipe, Ph.D.** (Docente de Depart. Eng. Mecânica)

*Filipe Lipe*

**Prof. Doutora Tatiana Olegovna, Ph.D.** (Docente de Depart. Eng. Mecânica)

*Tatiana Olegovna*

**Prof. Doutor João Filipe Kudimuena, Ph.D.** (Docente de Depart. Eng. Mecânica)

*João Filipe Kudimuena*



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37; тел. 236-79-89

18.02.2018 № 0380/64  
на № \_\_\_\_\_

«Затверджую»

проректор НТУУ «КПІ»

по зарубіжним зв'язкам

проф. Сидоренко С. І.

Акт

**про використання результатів дисертаційної роботи Хамуйели Жоакіма  
Аугушто Герра «Багаторівневий морфологічний синтез затискних механізмів  
для тіл обертання»**

Комісія у складі директора механіко-машинобудівного інституту (ММІ) проф. д.т.н. Бобиря М.І., заступника директора ММІ проф. д.т.н. Шевченка О.В., зав. кафедри конструювання верстатів та машин (КВМ) проф. д.т.н. Струтинського В.Б., наукового консультанта проф. д.т.н. Кузнєцова Ю.М., доцентів кафедри КВМ к.т.н. Литвина О.В. і к.т.н. Ковальова В.А. склали цей акт в тому, що нижчеперераховані результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес і науково-дослідницьку роботу кафедри.

Методологія багаторівневого синтезу і генетико-морфологічний підхід до опису і синтезу технічних систем на прикладі затискних механізмів, захватних пристроїв роботів і маніпуляторів, компоновок верстатів нового покоління, використані в дисциплінах «Основи технічної творчості», «Верстати с ЧПК та верстатні комплекси», «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою».



Теоретичні та експериментальні дослідження характеристик синтезованих затискних патронів і шпиндельних вузлів, а також рекомендації для підвищення техніко-економічних характеристик токарних багатоцільових і свердлильно-фрезерних верстатів з ЧПК, в тому числі, з механізмами паралельної структури, використані при виконанні держбюджетних тем №2267-ф (реєстраційний №0109U000817) і №2652-п (реєстраційний №0106U007223).

Директор ММІ, проф. д.т.н.

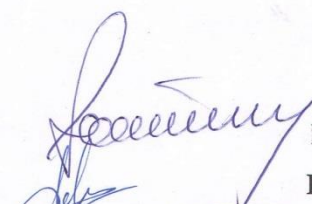
Заст. директора ММІ, проф. д.т.н.

Зав. кафедри КВМ, проф. д.т.н.

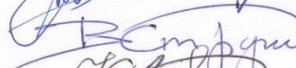
Наук. консультант, проф. д.т.н.

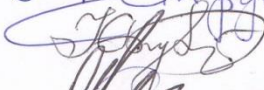
Доц. кафедри КВМ, к.т.н.

Доц. кафедри КВМ, к.т.н.

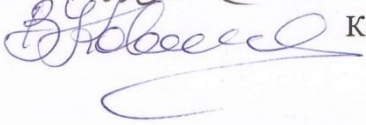
 Бобир М.І.

 Шевченко О.В.

 Струтинський В.Б.

 Кузнецов Ю.М.

 Литвин О.В.

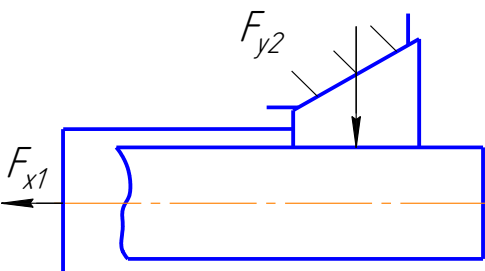
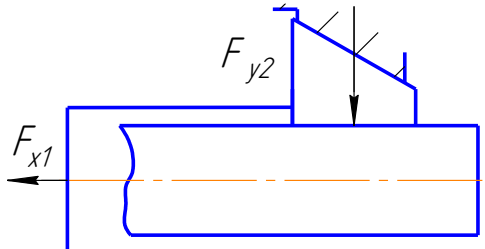
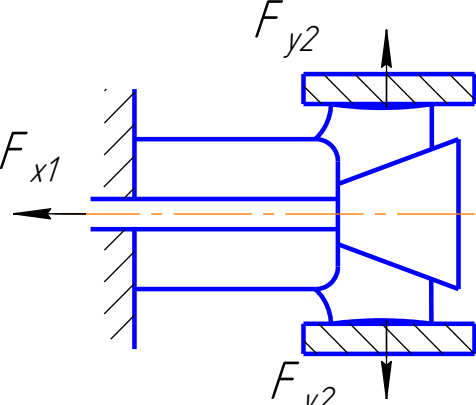
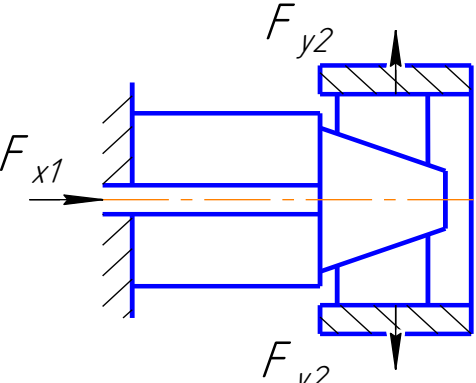
 Ковальов В.А.

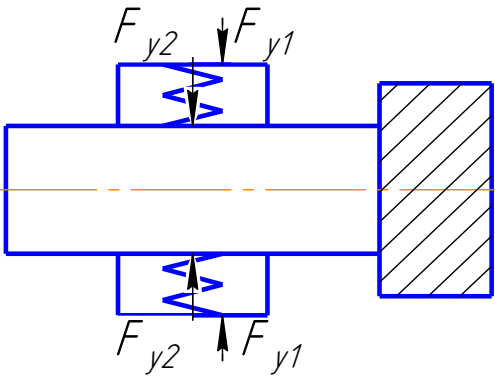
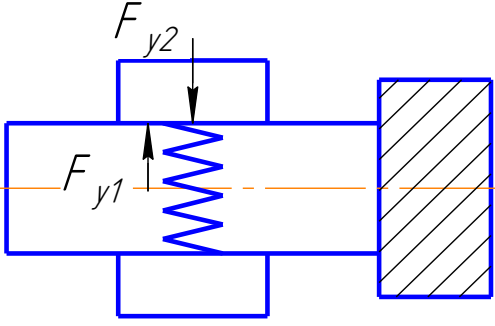
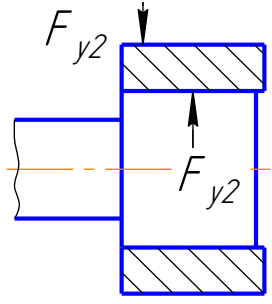
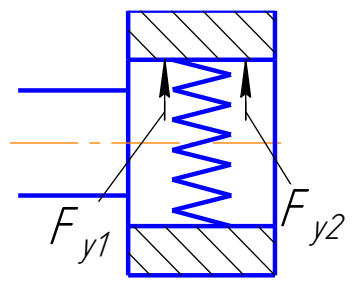
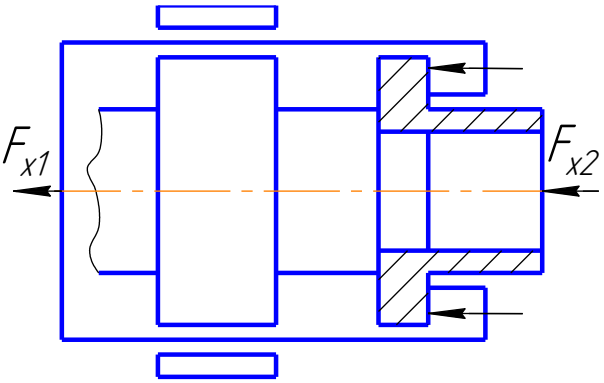


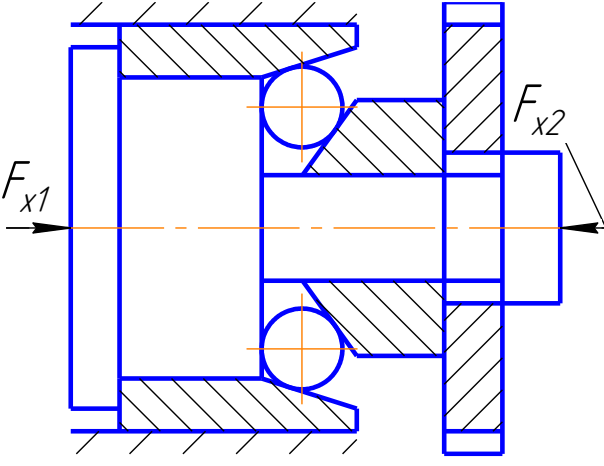
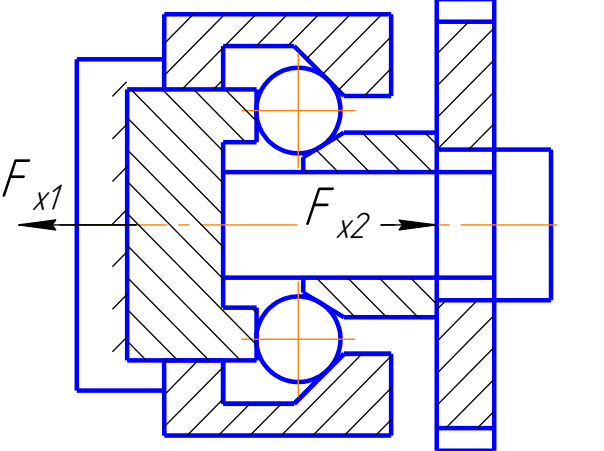
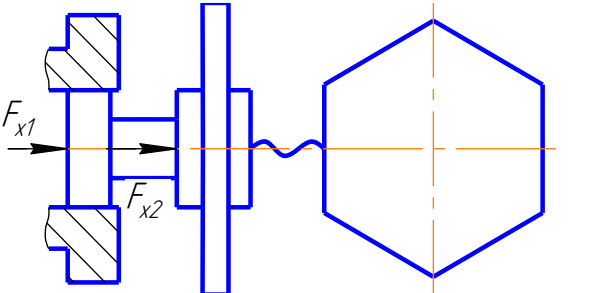
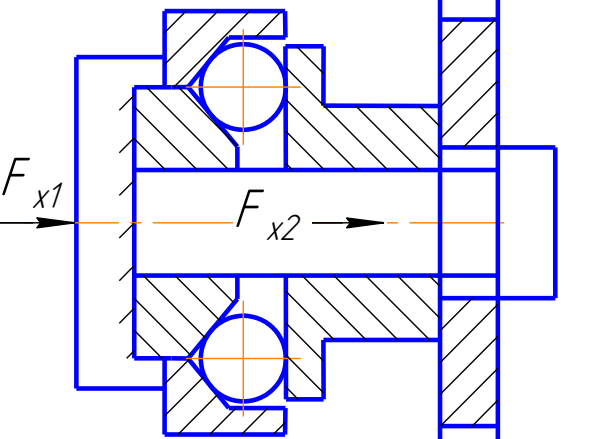


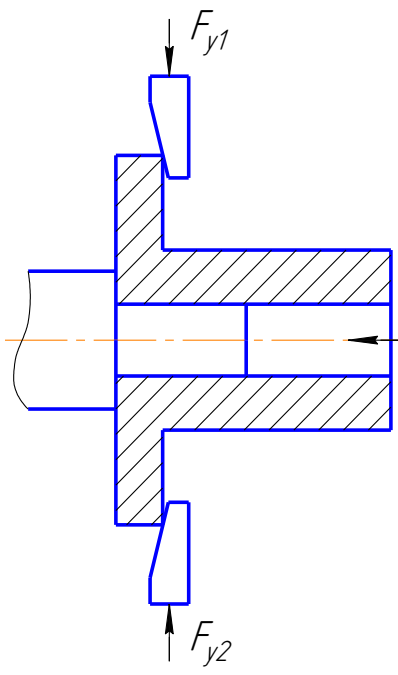
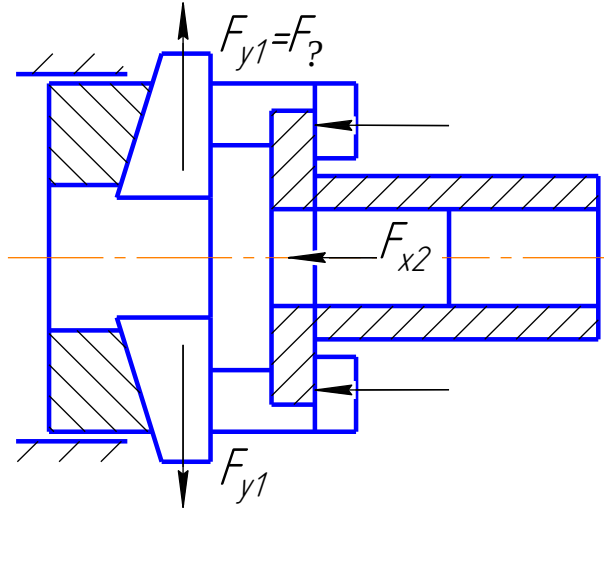
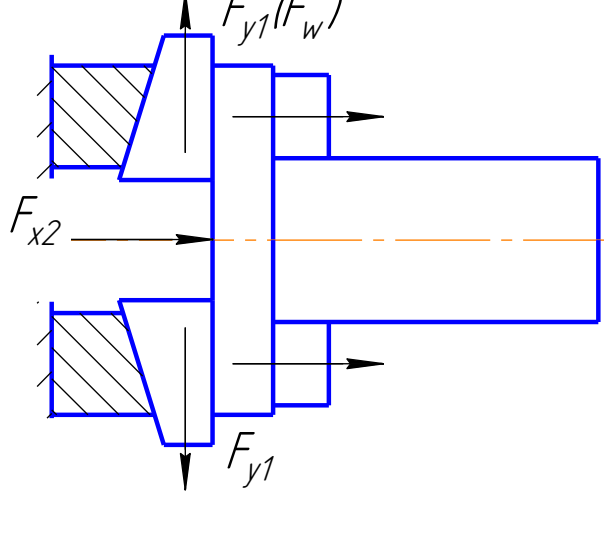
Примеры описания принципов одинарного зажима с различными  
силовыми потоками

Таблица 7.1

| №<br>п/п | Схема зажима                                                                        | Генетико-<br>морфологическая<br>формула | Комментарий                                                     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1        | 2                                                                                   | 3                                       | 4                                                               |
| 1        |    | $F_{x1} - WD - F_{y2}$                  | Наружный<br>цанговый<br>(клиновой)<br>зажим<br>тянущего<br>типа |
| 2        |   | $F_{x1} - WD - F_{y2}$                  | Наружный<br>цанговый<br>зажим<br>нажимного<br>типа              |
| 3        |  | $F_{x1} - WD - F_{y2}$                  | Цанговый<br>зажим<br>изнутри<br>тянущего<br>типа                |
| 4        |  | $F_{x1} - WD - F_{y2}$                  | Цанговый<br>зажим<br>изнутри<br>нажимного<br>типа               |

|   |                                                                                     |                        |                                                              |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 5 |    | $F_{y1} - SR - F_{y2}$ | ф. Shunck (Tribos) деформирование упругой втулки при разжиме |
| 6 |    | $F_{y1} - SR - F_{y2}$ | Охлажденную деталь устанавливают в отверстие корпуса         |
| 7 |   | $F_{y1} - SR - F_{y2}$ | Нагретое кольцо устанавливают на оправку                     |
| 8 |  | $F_{y1} - SR - F_{y2}$ | Кольцо устанавливают на охлажденную оправку                  |
| 9 |  | $F_{x1} - PL - F_{x2}$ | Торцевой плунжерный зажим фланца на оправке                  |

|    |                                                                                     |                                 |                                                                                        |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 |    | $F_{x1} - WD_1 - WD_2 - F_{x2}$ | <p>Торцевой зажим диска на шлицевой оправке с геометрическим замыканием при нажиме</p> |
| 11 |   | $F_{x1} - WD_1 - WD_2 - F_{x2}$ | <p>Торцевой зажим диска на оправке с геометрическим замыканием при затягивании</p>     |
| 12 |  | $F_{x1} - PL - F_{x2}$          | <p>Торцевой прижим заготовки на оправке к задней бабке или револьверной головке</p>    |
| 13 |  | $F_{x1} - WD_1 - WD_2 - F_{x2}$ | <p>Торцевой зажим диска на шлицевой оправке с нажимом от привода</p>                   |

|    |                                                                                     |                                         |                                                                                                      |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 14 |    | $F_{y1} - WD - F_{x2}$                  | <p>Клиновой<br/>зажим<br/>фланца на<br/>оправке</p>                                                  |
| 15 |   | $F_{y1}(F_{\omega}) - WD - PL - F_{x2}$ | <p>Центробеж-<br/>ный<br/>клиноплун-<br/>жерный<br/>торцевой<br/>зажим<br/>фланца на<br/>оправке</p> |
| 16 |  | $F_{y1}(F_{\omega}) - WD - F_{x2}$      | <p>Центро-<br/>бежный<br/>клиновой<br/>торцевой<br/>зажим</p>                                        |