

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

## **АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СТРУКТУР СОВРЕМЕННЫХ МНОГООПЕРАЦИОННЫХ СТАНКОВ**

**Методические указания**  
к проведению практических занятий  
по дисциплине «Современное состояние и перспективы  
развития оборудования машиностроительных производств»  
для студентов всех форм обучения  
по направлению подготовки  
15.04.05 «Конструкторско-технологическое  
обеспечение машиностроительных производств»

Севастополь  
СевГУ  
2018

УДК 658.52.011.56

**Р е ц е н з е н т:**

**Ю.К. Новоселов** - д-р. техн. наук, профессор кафедры  
«Технология машиностроения»

*Составители:* А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая,  
С.И. Рощупкин

**Анализ и синтез структур современных многооперационных станков:** метод. указания / Сост. А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая, С.И. Рощупкин. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 121 с.

Методические указания предназначены для учебно-методического обеспечения дисциплины «Современное состояние и перспективы развития оборудования машиностроительных производств». Целью методических указаний является оказание помощи студентам при выполнении практических занятий. Материал изложен в форме, удобной для практического использования, в следующей последовательности: исследование иерархии технической системы; применение морфологического анализа для структурного синтеза технологического оборудования; применение задач синтеза гибких производственных модулей (ГПМ) на уровне структурно-компоновочной оптимизации; системный анализ процессов конструирования нового оборудования; структурно-компоновочный синтез многооперационного станка на основе морфологического анализа его компоновок; структурно-компоновочный синтез устройств автоматической смены инструмента; применение структурных формул для описания компоновок технологического оборудования; преобразование компоновок технологического оборудования с применением алгебраических законов; анализ и строение механизмов параллельной структуры (МПС) в компоновках современных станков.

УДК 658.52.011.56

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Технология машиностроения», протокол № 11 от 16 марта 2018 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет», 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                       | 5  |
| Практическое занятие 1.<br>ИССЛЕДОВАНИЕ ИЕРАРХИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ<br>СИСТЕМЫ.....                                                                        | 7  |
| Практическое занятие 2.<br>ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ<br>СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО<br>ОБОРУДОВАНИЯ.....                    | 14 |
| Практическое занятие 3.<br>ПРИМЕНЕНИЕ ЗАДАЧ СИНТЕЗА ГИБКИХ<br>ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МОДУЛЕЙ (ГПМ) НА УРОВНЕ<br>СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ..... | 19 |
| Практическое занятие 4.<br>СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ<br>КОНСТРУИРОВАНИЯ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....                                                   | 28 |
| Практическое занятие 5.<br>СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫЙ СИНТЕЗ<br>МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА НА ОСНОВЕ<br>МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЕГО КОМПОНОВОК.....   | 36 |
| Практическое занятие 6.<br>СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫЙ СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ<br>АВТОМАТИЧЕСКОЙ СМЕНЫ ИНСТРУМЕНТА.....                                       | 49 |
| Практическое занятие 7.<br>ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ<br>ОПИСАНИЯ КОМПОНОВОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО<br>ОБОРУДОВАНИЯ.....                           | 65 |
| Практическое занятие 8.<br>ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КОМПОНОВОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО<br>ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ<br>АЛГЕБРАИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ.....                  | 74 |
| Практическое занятие 9.<br>АНАЛИЗ И СТРОЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ<br>СТРУКТУРЫ (МПС) В КОМПОНОВКАХ<br>СОВРЕМЕННЫХ СТАНКОВ.....                   | 78 |

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Практическое занятие 10.                                                    |     |
| ПРОЕКТНЫЕ КРИТЕРИИ СИНТЕЗА НОВОГО<br>ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ..... | 103 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....                                       | 108 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А.....                                                           | 111 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....                                                           | 114 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В.....                                                           | 115 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....                                                           | 118 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Цель изучения дисциплины** – формирование у студентов профессиональных компетенций, системы теоретических и экспериментальных знаний о современном состоянии и перспективах развития технологических машин и систем, об особенностях технических и эксплуатационных требований, о методах оценки и эффективности их использования, а также – помощь студентам направления «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в изучении многооперационных станков, в том числе и с механизмами параллельной структуры (МПС).

**Задачи дисциплины** – систематизация, анализ и обобщение знаний о современном состоянии и перспективах развития оборудования машиностроительного производства, выявление путей повышения производительности и надежности технологических систем в производстве.

В результате изучения дисциплины «Современное состояние и перспективы развития оборудования машиностроительных производств» студент может получить в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего (профессионального) образования по направлению подготовки 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (уровень магистратуры), утвержденным Приказом Минобрнауки РФ от 21 ноября 2014 г. № 1485 следующие компетенции:

**общекультурные компетенции (ОК):**

- ОК-1 – способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу;

**общепрофессиональные компетенции (ОПК):**

- ОПК-1 – способность формулировать цели и задачи исследования в области конструкторско-технологической подготовки машиностроительных производств, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки;

- ОПК-2 – способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы;

**профессиональные компетенции (ПК):**

- ПК-1 – способность формулировать цели проекта (программы), задач при заданных критериях, целевых функциях, ограничениях, строить структуру их взаимосвязей, разрабатывать технические задания на создание новых эффективных технологий изготовления машиностроительных изделий, производств различного служебного назначения, средства и системы их инструментального, метрологического, диагностического и управленческого обеспечения, на модернизацию и автоматизацию действующих в машиностроении производственных и технологических процес-

сов и производств, средства и системы, необходимые для реализации модернизации и автоматизации, определять приоритеты решений задач;

- ПК-15 – способность осознавать основные проблемы своей предметной области, при решении которых возникает необходимость в сложных задачах выбора, требующих использования современных научных методов исследования, ориентироваться в постановке задач и определять пути поиска и средства их решения, применять знания о современных методах исследования, ставить и решать прикладные исследовательские задачи;

- ПК-16 – способность проводить научные эксперименты, оценивать результаты исследований, сравнивать новые экспериментальные данные с данными принятых моделей для проверки их адекватности и при необходимости предлагать изменения для улучшения моделей, выполнять математическое моделирование процессов, средств и систем машиностроительных производств с использованием современных технологий проведения научных исследований, разрабатывать теоретические модели, позволяющие исследовать качество выпускаемых изделий, технологических процессов, средств и систем машиностроительных производств;

- ПК-17 – способность использовать научные результаты и известные научные методы и способы для решения новых научных и технических проблем, проблемно-ориентированные методы анализа, синтеза и оптимизации конструкторско-технологической подготовки машиностроительных производств, разрабатывать их алгоритмическое и программное обеспечение.

## Практическое занятие 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИЕРАРХИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Цель работы:** составление иерархического описания, исследование эволюции развития и уровней проектирования технических систем (ТС).

#### 1.1. Общие сведения

Процесс проектирования ТС является многовариантным, многоуровневым и многоэкстремальным в многосвязной области. ТС – оптимальна, если для её реализации выбрана оптимальная (рациональная) техническая идея. Любая техническая задача имеет множество (дерево) конкретных решений (вершин) (рис. 1.1).

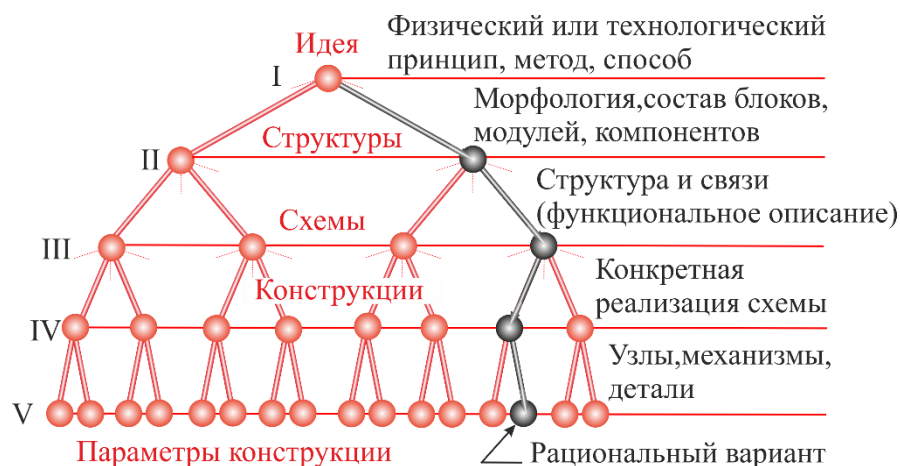


Рис. 1.1. Дерево поиска рациональных технических решений

В вопросах прогнозирования и создания новых станков должен быть использован фреймовый подход, согласно которому цепочка поиска, разветвляющаяся в виде дерева альтернатив, рассматривается последовательно на нескольких уровнях [18, 25]:

- функция;
- альтернативные варианты модели физических или технологических принципов действия, реализующих рассматриваемую функцию;
- альтернативные варианты модели технических решений, реализующих рассматриваемый принцип действия.

#### 1.2. Методы описания ТС

Для описания технических систем используют различные методы, основными из которых являются:

- **параметрический** – описание свойств, признаков и отношений исследуемого объекта, основанное на эмпирических наблюдениях; простейшая форма и исходный уровень исследования станка как ТС – основные технические характеристики (технологические, размерные, кинематические, силовые, динамические) и показатели (производительность, точность, жесткость, мощность, габариты и т.д.);

- **морфологический** – переход к определению поэлементного состава строения объекта и взаимосвязи параметров, выявленных на предыдущем уровне (для станка – источник энергии, двигателя, передаточно-преобразовательные и исполнительные механизмы, система управления);

- **функциональный** – переход к определению функциональной зависимости между параметрами (функционально-параметрическое описание, например, зависимость точности обработки от жесткости станка), между элементами объекта (функционально-морфологическое описание, например, уравнение кинематического баланса цепи, формула настройки) или между параметрами и строением объекта;

- **поведения объекта** – выявление целостной картины «жизни» объекта и механизмов, обеспечивающих смену направлений и режимов его работы (самая сложная форма научного исследования); поведение станка при этом описывается такими фундаментальными законами, как закон сохранения энергии, количества вещества, импульса, силы и т.д.

Системный подход позволяет рассматривать объект как систему с учетом внутренних (между элементами) и внешних (со средой) связей. Отдельные элементы ТС можно, в свою очередь, рассматривать как подсистемы.

При исследовании ТС необходимо учитывать, что данная ТС может рассматриваться как часть надсистемы, с элементами которой она взаимосвязана (рис. 1.2) [17, 25]. Надсистема также является частью надсистемы более высокого порядка и т.д. С другой стороны, элементы ТС могут рассматриваться как подсистемы, которые, в свою очередь также состоят из подсистем другого порядка.

Выявляемые в процессе решения технических задач противоречия разделяют на три типа:

- **административные** – присутствуют первоначально в изобретательской задаче (надо что-то сделать, но неизвестно как);

- **технические** – возникают между частями и параметрами системы при попытке их изменения (если известными способами улучшить её одну часть (параметр), то недопустимо ухудшается другая часть);

- **физические** – заключаются в предъявлении к одной и той же части системы взаимно-противоположных требований (в такой ситуации физические противоречия становятся причиной технических противоречий).



Рис. 1.2. Взаимосвязи систем с надсистемами и подсистемами

Изучение проблемной ситуации – это выявление технических противоречий. Результатом разрешения технического противоречия становится создание новой ТС, представляющей органический синтез нового технического решения и элементов прежнего (известного) решения в новом целом.

Жизнь ТС можно изобразить в виде S-образной кривой (рис. 1.3), показывающей, как изменяются во времени главные показатели (мощность, производительность, скорость и т.д.). На участке 1, называемом «детством», ТС развивается медленно.

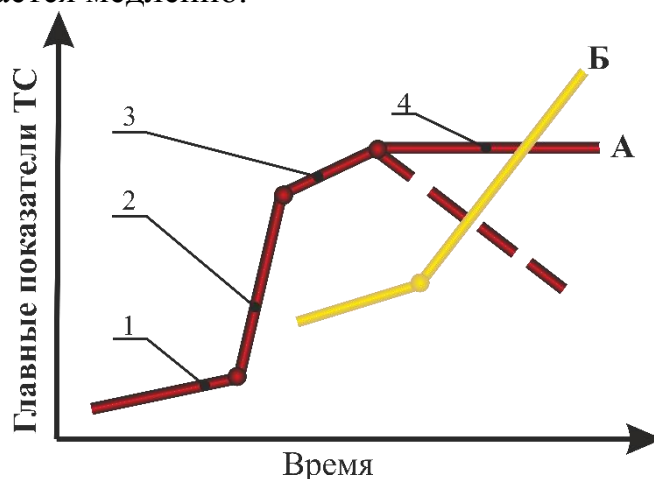


Рис. 1.3. Жизненный цикл технической системы

Затем ТС быстро совершенствуется, наступает пора «зрелости» (участок 2). На участке 3 темпы развития уменьшаются, система исчерпывает свои возможности, наступает «старость». Далее система либо деградирует (пунктирная кривая вниз), либо надолго сохраняет достигнутые показатели – **A** (участок 4), либо сменяется принципиально другой системой – **B**.

Развитие описывается **законами**:

- **статики (начало жизни);**
- **кинематики (развитие);**
- **динамики (главные современные тенденции развития).**

#### **Законы статики:**

- полноты частей – наличие и минимальная работоспособность основных частей ТС;
- энергетической проводимости – сквозной проход по всем частям ТС;
- согласование «ритмики» частей – частоты колебаний, периодичности работы всех частей.

#### **Законы кинематики:**

- увеличение степени идеальности – затраты на изготовление и функционирование ТС стремятся к нулю, хотя работоспособность её не уменьшается;
- неравномерности развития частей – чем сложнее ТС, тем неравномернее их развитие;
- перехода в подсистему – исчерпав возможности развития, система включается в подсистему в качестве одной из частей.

#### **Законы динамики:**

- переходов с макроуровня на микроуровень;
- увеличения степени вепольности – увеличивается число элементов и связей между ними (веполь, от сочетания «вещество» и «поле» – это модель минимально работоспособной технической системы, состоящей, как минимум, из трех элементов: двух веществ и поля).

Главной движущей силой развития ТС является противоречие между растущими потребностями общества и возможностями самих ТС. Диалектический характер творчества состоит в том, что в новом объекте сочетаются новые и известные технические решения. Так, в начале развития металлорежущие станки получали вращение от общего привода – локомобиля через трансмиссионные валы (что влекло за собой сложность управления, низкую производительность, представляло высокую опасность) или от ручного привода. В начале XVIII века родоначальник отечественного станкостроения, «личный токарь Петра I» – Андрей Константинович Нартов (1693 - 1756 г.) изобрел первый в мире токарный станок с механическим суппортом (рис. 1.4, а). Затем появились станки с индивидуальным приводом – от электродвигателя через ременные и зубчатые передачи (рис. 1.4, б). Тенденция развития современных станков – снабжение каждого узла собственным приводом в виде шагового электродвигателя, высокомоментного двигателя (рис. 1.4, в) и создание на агрегатной основе многооперационных станков с ЧПУ (рис. 1.4, г), а также – модульный принцип построения компоновок, позволяющий расширить технологические воз-

возможности станков с параллельной кинематикой. Неравномерность развития частей ТС наблюдается в появлении регулируемых электродвигателей различных типов и сохранении обычных зубчатых передач, в быстром прогрессе систем управления и медленном развитии собственно приводов. С целью расширения технологических возможностей и повышения производительности обработки возможны различные исполнения многоцелевого токарного станка на основе механизмов параллельной структуры (МПС), примеры которых показаны на рис. 1.4, *д, е* [12, 23].

Варианты заданий для описания ТС представлены в табл. 1.1.

### **1.3. Последовательность выполнения работы**

1. Получить задание от руководителя и уточнить его в соответствии с выданным вариантом.

2. Применительно к конкретной модели станка (робота) или устройства начертить его принципиальную (или структурную кинематическую) схему.

3. Выполнить иерархическое описание ТС (параметрическое, морфологическое, функциональное, поведение в действии), поясняя эскизами, блок-схемами, структурными изображениями, формулами и т.д.

4. В соответствии с системным подходом выделить для заданного объекта надсистему, систему и подсистему (изобразить графически по аналогии с рис. 1.2).

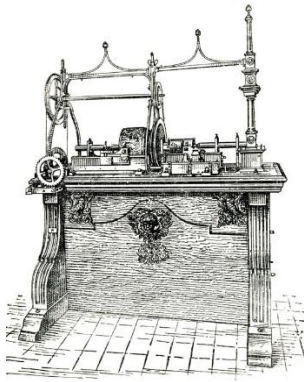
5. Выявить технические и физические противоречия в ТС.

6. Проследить по одному или нескольким основным показателям жизнь ТС с указанием всех этапов и рождения новой ТС (см. рис. 1.3).

7. Указать, как проявляются законы диалектики в законах статики, кинематики и динамики ТС; изложить главные тенденции развития ТС в будущем.

8. Показать (по аналогии с рис. 1.1) содержание и иерархию проектирования по уровням.

9. Привести примеры развития заданной преподавателем ТС (по аналогии с рис. 1.4) с подробным описанием меняющихся признаков.



*а*



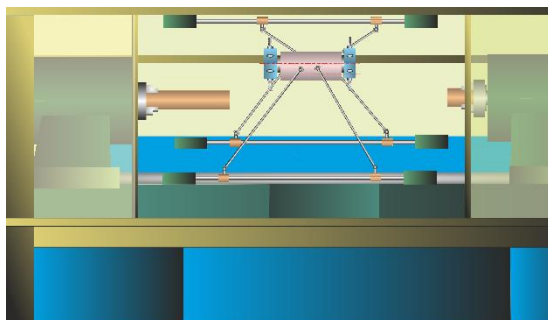
*б*



*в*



*г*



*д*



*е*

Рис. 1.4. Примеры развития ТС металлорежущего токарного станка:  
*а* – первый в мире токарно-копировальный станок Андрея Нартова (1712 г.);  
*б* – токарно-винторезный станок 16К20 (1973 г.); *в* – токарный станок с ЧПУ 16К20Ф30 (1980 г.); *г* – многооперационный токарный центр 1П420ПФ40 с ЧПУ NC-201 (1990 г.);  
*д* – токарный многоцелевой станок на базе МПС с шестью штангами постоянной длины (2006 г.); *е* – станок VerticalLine V100 (Германия) на основе дельта-робота для трехкоординатной обработки (токарной, фрезерной, лазерной закалки, лазерной сварки, шлифования, операции сборки) (2015 г.)

Т а б л и ц а 1.1

**Варианты ТС**

|   |                                     |                                                       |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1 | Металлорежущий станок:              | 1.1 – токарный                                        |
|   |                                     | 1.1 – зуборезный                                      |
|   |                                     | 1.1 – фрезерный                                       |
|   |                                     | 1.1 – резьбонарезной                                  |
|   |                                     | 1.1 – сверлильный                                     |
| 2 | Механизм главного движения станка:  | 2.1 – вращательный                                    |
|   |                                     | 2.2 – поступательный                                  |
| 3 | Механизм подачи:                    | 3.1 – суппорта                                        |
|   |                                     | 3.2 – прутка                                          |
| 4 | Зажимной механизм:                  | 4.1 – прутка                                          |
|   |                                     | 4.2 – для штучной заготовки                           |
|   |                                     | 4.3 – для вращающегося режущего инструмента           |
| 5 | Шпиндельный узел станка:            | 5.1 – токарного                                       |
|   |                                     | 5.2 – сверлильного                                    |
|   |                                     | 5.3 – фрезерного                                      |
|   |                                     | 5.4 – шлифовального                                   |
| 6 | Промышленный робот или манипулятор: | 6.1 – стационарный                                    |
|   |                                     | 6.2 – передвижной                                     |
| 7 | Станочное приспособление:           | 7.1 – для токарных станков                            |
|   |                                     | 7.2 – для фрезерных станков                           |
|   |                                     | 7.3 – для многооперационных станков                   |
| 8 | Транспортно-загрузочные системы:    | 8.1 – для автоматической загрузки и разгрузки станков |
|   |                                     | 8.2 – транспортно-накопительные                       |
|   |                                     | 8.3 – межоперационные транспортные системы            |
| 9 | Конвейер для удаления стружки:      | 9.1 – механический                                    |
|   |                                     | 9.2 – пневматический                                  |
|   |                                     | 9.3 – гидравлический                                  |

**1.4. Вопросы для самоконтроля**

1. Охарактеризовать процесс проектирования ТС на примере дерева поиска рациональных решений.
2. Привести примеры методов описания ТС.
3. Проиллюстрировать жизненный цикл ТС.
4. Какими законами описывается развитие системы?
5. Что выступает главной движущей силой развития ТС?

## Практическое занятие 2

### ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Цель работы:** анализ множества вариантов способов обработки заданной детали, ознакомление с методом морфологического анализа (МА) и синтеза новых технических решений, выбор лучшего варианта по заданному критерию (показателю) качества.

#### 2.1 Метод морфологического анализа и его особенности

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

Сущность метода МА состоит в том, что в совершенствуемой ТС выделяют несколько характерных для нее структурных морфологических признаков, по каждому из которых составляют список различных конкретных вариантов (альтернатив) технического выражения. Каждый признак может характеризовать какой-либо конструктивный узел (элемент структуры) системы, какую-то ее функцию (связь между элементами), режим работы системы, форму взаимодействия узлов, т.е. параметры системы, от которых зависит решение проблемы. Признаки этих альтернатив можно располагать в форме таблицы, называемой морфологической матрицей (картой или таблицей), что позволяет лучше представить поисковое поле [17, 21, 25, 26].

Область применения метода – решение технических задач, относящихся к объекту в целом при наличии полной информации об объекте и заключающихся в усовершенствовании объекта. Наиболее целесообразная область применения метода МА – решение конструкторских задач общего плана (проектирование комплексов, станков, их узлов и механизмов, поиск технологических принципов, схем, способов формообразования и т.д.) [21].

Существует 5 последовательных **этапов МА**:

1) **формулировка задачи**, отражающая основное требование к объекту (способу или устройству) для выяснения направления усовершенствования, доработки, модернизации и т.п.;

2) **разделение объекта** на функциональные элементы с составлением списка всех морфологических признаков и требований к ним, т.е. наиболее важных характеристик (параметров) объекта, от которых зависит решение проблемы и достижение основной цели;

3) **независимое рассмотрение всех элементов и выбор для каждого различных вариантов реализации**, т.е. составление возможных вариантов по каждой характеристике независимо от построения морфологической модели;

4) **анализ решений**, возникающих из матрицы с определением ценности всех полученных вариантов, т.е. синтез всех вариантов объекта;

5) **выбор наиболее рациональных вариантов** конкретных решений, т.е. выбор лучших сочетаний по заданному критерию.

Последовательность применения метода рассмотрим на конкретном примере изготовления двухступенчатой цилиндрической стальной детали с минимальным расходом металла [18, 25].

Технологический процесс разделим на три функциональных элемента ТС: обрабатываемая среда (заготовка), обрабатывающая среда (инструмент), взаимодействие сред (рабочий процесс). Рассмотрим все элементы процесса по признакам: заготовка (1 – вид; 2 – движение); рабочий процесс (3 – характер взаимодействия; 4 – состояние); режущий инструмент (5 – количество режущих кромок и тип; 6 – движение). Составим для всех элементов и признаков технологического процесса морфологическую матрицу, сведя её в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

**Морфологическая матрица**

| Заготовка                   |                                    | Рабочий процесс            |                         | Режущий инструмент                              |                                    |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|
| 1. Вид                      | 2. Движение                        | 3. Характер взаимодействия | 4. Состояние            | 5. Кол-во режущих инструментальных кромок и тип | 6. Движение                        |
| 1.1. Круглый прут           | 2.1. Поступательное                | 3.1. Точечный              | 4.1. Холодное твердое   | 5.1. Один резец                                 | 6.1. Поступательное                |
| 1.2. Профильный прут        | 2.2. Поступательное и вращательное | 3.2. Линейный              | 4.2. Горячее            | 5.2. Несколько резцов                           | 6.2. Поступательное и вращательное |
| 1.3. Одна штучная заготовка | 2.3. Вращательное                  | 3.3. Поверхностный         | 4.3. Холодное и горячее | 5.3. Фреза                                      | 6.3. Вращательное                  |
| 1.4. Две штучные заготовки  | 2.4. Нет                           | 3.4. Объемный              | 4.4. Тягучее            | 5.4. Нет                                        | 6.4. Нет                           |

Учитывая требования минимального расхода металла, выбираем 4 варианта сочетаний:

**I:** 1.1. – 2.3. – 3.2. – 4.1. – 5.2. – 6.1.  
**II:** 1.4. – 2.2. – 3.3. – 4.3. – 5.4. – 6.2.  
**III:** 1.2. – 2.3. – 3.2. – 4.1. – 5.3. – 6.2.  
**IV:** 1.2. – 2.3. – 3.2. – 4.1. – 5.1. – 6.1.

Реализация вариантов приведена в табл. 2.2.

Т а б л и ц а 2.2

Реализация вариантов

| № вар-та | Обозначение    | Элементы способа обработки | Схема и вид обработки    |
|----------|----------------|----------------------------|--------------------------|
| I        | X <sub>1</sub> |                            | <p>Фасонно-отрезная</p>  |
| II       | X <sub>2</sub> |                            | <p>Сварка трением</p>    |
| III      | X <sub>3</sub> |                            | <p>Фрезерно-отрезная</p> |
| IV       | X <sub>4</sub> |                            | <p>Токарно-отрезная</p>  |

Применительно к станкам известных конструкций подходит вариант 1 (фасонно-отрезной токарный станок). Нетрадиционные и перспективные варианты – 2 (машина сварки трением) и 3 (фрезерно-отрезной автомат).

По критерию минимального расхода металла проведем парные сравнения и построим граф турнира вариантов:

$$\begin{aligned} X_1 < X_2 & \quad ! \quad X_2 > X_3 & \quad ! \quad X_3 > X_4 \\ X_1 < X_3 & \quad ! \quad X_2 > X_4 & \quad ! \\ X_1 < X_4 & \end{aligned}$$

Принимаем систему количественных соотношений:

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1,5 & \alpha_i > \alpha_j \longrightarrow X_1 \longleftarrow X_2 \\ 1 & \alpha_i = \alpha_j \longleftrightarrow \uparrow \swarrow \searrow \downarrow \\ 0,5 & \alpha_i < \alpha_j \longleftarrow X_4 \longleftarrow X_3 \end{cases}$$

Проводим построение и заполняем матрицу смежности (табл. 2.3).

Т а б л и ц а 2.3

Матрица смежности

| $i$      | $j$   |       |       |       | $\sum \alpha_{ij}$ | $P_i^{отн} (1)$ | $P_i (2)$ | $P_i^{отн} (2)$ | Место<br>вари-<br>анта |
|----------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-----------------|-----------|-----------------|------------------------|
|          | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ |                    |                 |           |                 |                        |
| $X_1$    | 1     | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 2,5                | 0,156           | 9,25      | 0,157           | 4                      |
| $X_2$    | 1,5   | 1     | 1,5   | 1,5   | 5,5                | 0,344           | 21,25     | 0,360           | 1                      |
| $X_3$    | 1,5   | 0,5   | 1     | 1,5   | 4,5                | 0,281           | 16,25     | 0,275           | 2                      |
| $X_4$    | 1,5   | 0,5   | 0,5   | 1     | 3,5                | 0,219           | 12,25     | 0,208           | 3                      |
| $\Sigma$ | –     | –     | –     | –     | 16                 | 1               | 59        | 1               | –                      |

$P_i^{отн} (1)$  – относительный вес  $i$ -го варианта при первом приближении;  
 $P_i (2)$  и  $P_i^{отн} (2)$  – соответственно абсолютный и относительный вес  $i$ -го варианта при втором приближении:

$$(P_i (2) = \alpha_{1i} \sum \alpha_{1j} + \alpha_{12} \sum \alpha_{2j} + \alpha_{13} \sum \alpha_{3j} + \alpha_{11} \sum \alpha_{4j});$$

где  $\sum \alpha_{ij}$  – сумма сравнения весов  $i$ -го варианта с  $j$ -ми вариантами.

Таким образом, лучшим является вариант II ( $X_2$ ), так как его относительный вес  $P_2^{отн} (2) = 0,360$  что соответствует 1-му месту по минимальному расходу металла при изготовлении ступенчатой детали.

Варианты заданий приведены в табл. 2.4.

Т а б л и ц а 2.4

## Варианты заданий

| Вариант |   | Процесс                                              | Деталь                                    |
|---------|---|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1       | а | Изготовить цилиндрическую деталь                     | Одноступенчатая типа ролик                |
|         | б |                                                      | Двухступенчатая                           |
|         | в |                                                      | Наружное кольцо шарикоподшипника          |
|         | г |                                                      | Внутреннее кольцо шарикоподшипника        |
| 2       | а | Изготовить зубчатое колесо из заготовки с отверстием | Цилиндрическое прямозубое                 |
|         | б |                                                      | Цилиндрическое косозубое                  |
|         | в |                                                      | Коническое прямозубое                     |
|         | г |                                                      | Червячное колесо                          |
| 3       | а | Отрезать деталь                                      | Цилиндрическая на однопозиционном станке  |
|         | б |                                                      | Цилиндрическая на многопозиционном станке |
|         | в |                                                      | Профильная не вращающаяся                 |
| 4       | а | Разрезать тонкий листовой материал                   | Полоса                                    |
|         | б |                                                      | Прямоугольной (квадратной) формы          |
|         | в |                                                      | Фасонная                                  |
|         | г |                                                      | Круглая                                   |
| 5       | а | Изготовить резьбу                                    | Гайка                                     |
|         | б |                                                      | Винт                                      |
|         | в |                                                      | Шпилька                                   |
|         | г |                                                      | Крышка                                    |
|         | д |                                                      | Корпус                                    |

## 2.2. Последовательность выполнения работы

1. Получить задание в соответствии с одним из вариантов (табл. 2.4).
2. На основе анализа составить морфологическую матрицу, выбрать критерий оптимальности, используя систему количественных соотношений.
3. Выбрать лучший вариант обработки, предложить структуру и схему станка для его реализации.

## 2.3. Вопросы для самоконтроля

1. Пояснить сущность метода морфологического анализа.
2. Охарактеризовать область применения метода МА.
3. Сколько этапов включает реализация метода? Перечислить этапы.
4. Пояснить правила построения морфологической матрицы.
5. Какие критерии используют для выбора рациональных вариантов?

## Практическое занятие 3

### ПРИМЕНЕНИЕ ЗАДАЧ СИНТЕЗА ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МОДУЛЕЙ (ГПМ) НА УРОВНЕ СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

**Цель занятия:** на основе использования метода морфологического анализа научиться выполнять синтез компоновок ГПМ для заданных обрабатываемых деталей и выбирать лучший вариант, используя комплексный (смешанный) критерий качества.

#### 3.1. Комплексный критерий качества

В безразмерном виде комплексный критерий качества  $K$  для каждого технологического элемента ГПМ можно представить в виде [25]:

$$K = I - \sum_{i=1}^n (I - K_i) / n,$$

где  $K_i$  – качественные показатели, характеризующие возможность ГПМ адаптироваться к изменению номенклатуры деталей и к различным производственным ситуациям;  $n$  – число качественных показателей.

#### 3.2. Выбор оптимальной структуры ГПМ

В общем случае задача синтеза оптимальной системы состоит в определении принципов  $P$  ее построения, совокупности технологических элементов  $C = \{C_i, i=1, n\}$  (станки, приспособления, загрузочные устройства, инструменты) ГПМ, связей  $\mathbb{Z}$  между ними и функцией  $g = (g_1, \dots, g_n)$  таких, что обеспечивается экстремум показателей  $g_0$ , то есть

$$(P, C, \mathbb{Z}, g) = \operatorname{argext} g_0 (P, c, \mathbb{Z}, g).$$

Принцип построения  $P$  системы модуля заключается в следующем:

- модуль представляет собой систему с открытыми границами, когда число составляющих системы и их вариантов заранее неизвестно, переход от одного варианта к другому дискретен и трудноформализуем (не может быть выражен функционально);
- множество вариантов может быть установлено только на основе априорной информации, опыта проектировщика;
- часть вариантов остается за границами требуемых технических решений, управление системой осуществляется от других иерархически более общих технических систем;
- методы и средства управления модулей могут быть заранее заданы;

- управляющие сигналы на изменение объекта производства и связанная с этим перестройка подсистем выполняется в заранее известные случайные интервалы времени.

С учетом рассмотренных особенностей синтез структур может быть выполнен на основе использования методов структурной и параметрической оптимизации (синтеза) технических систем. На рис. 3.1 представлена укрупненная блок-схема последовательности решения задачи синтеза, выявления «слабых» мест (элементов и узлов, существенно снижающих надежность и перенастраиваемость системы) и совершенствования элементов технологической системы оборудования [].

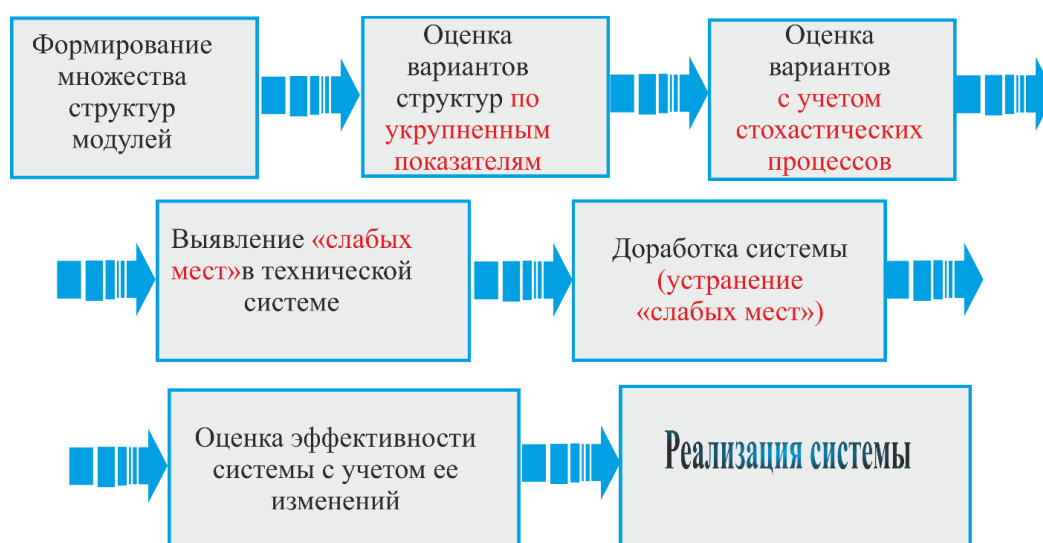


Рис. 3.1. Укрупненная блок-схема последовательности решения задач синтеза модуля

На первом этапе производится формирование множества структур. На втором – оценка вариантов структур по укрупненным показателям, на третьем этапе выполняется оценка вариантов с учетом стохастических процессов. Четвертый этап синтеза сопровождается выявлением «слабых» мест в технологической системе модуля, пятый – разработкой и совершенствованием этих «слабых» мест. На шестом этапе осуществляется оценка эффективности системы с учетом ее изменений, а на последнем – реализация системы.

Выполним декомпозицию модуля на подсистемы: **станок «С», приспособление – загрузочное устройство «П», инструмент «И», заготовка «З»** [25, 28].

На примере ГПМ резьбообработки построим морфологическую матрицу (табл. 3.1), альтернативы которой формируем исходя из рассмотрения признаков и характеристик подсистемы и элементов, выявляя связи между ними.

Т а б л и ц а 3.1

## Морфологическая матрица ГПМ для внутренней резьбообработки

| Подсистема ГПМ – станок «С»         |                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| №                                   | Узел (признак)                         | Характеристика узла (признака)                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 1                                   | Привод главного движения – $X_1$       | Электрический – $X_{11}$ ; пневматический – $X_{12}$ ; гидравлический – $X_{13}$ ; комбинированный – $X_{14}$ .                                                                                                                                                                                                       |
| 2                                   | Привод подачи – $X_2$                  | Равномерная – $X_{21}$ ; прерывистая – $X_{22}$ ; самозатягиванием – $X_{23}$ ; принудительная – $X_{24}$ ; копирная пара – $X_{25}$ ; гитара – $X_{26}$ ; программное управление – $X_{27}$ .                                                                                                                        |
| 3                                   | Направляющие элементы – $X_3$          | Качения – $X_{31}$ ; скольжения – $X_{32}$ ; гидростатические – $X_{33}$ .                                                                                                                                                                                                                                            |
| 4                                   | Шпиндельный узел – $X_4$               | Предохранительное устройство – $X_{41}$ ; без предохранительного устройства – $X_{42}$ .                                                                                                                                                                                                                              |
| 5                                   | Револьверная головка – $X_5$           | Ось головки $\perp$ оси инструмента – $X_{51}$ ; Ось головки // оси инструмента – $X_{52}$ ; Ось головки под $\angle$ к оси инструмента – $X_{53}$ ; четыре позиции – $X_{54}$ ; шесть позиций – $X_{55}$ ; восемь позиций – $X_{56}$ .                                                                               |
| 6                                   | Многошпиндельная головка – $X_6$       | Два шпинделя – $X_{61}$ ; три шпинделя – $X_{62}$ ; четыре шпинделя – $X_{63}$ ; более 4-х – $X_{64}$ ; разное расположение шпинделей – $X_{65}$ ; диаметрально расположенные шпиндели – $X_{66}$ ; сложное расположение шпинделей – $X_{67}$ ; переналадка ручная – $X_{68}$ ; переналадка механическая – $X_{69}$ . |
| 7                                   | Стол – $X_7$                           | Неподвижный – $X_{71}$ ; продольный – $X_{72}$ ; продольно-поперечный – $X_{73}$ ; круглый – $X_{74}$ .                                                                                                                                                                                                               |
| Подсистема ГПМ – приспособление «П» |                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 1                                   | Для зажима деталей – $Y_1$             | Механизированное – $Y_{11}$ ; автоматическое – $Y_{12}$ .                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 2                                   | Для позиционирования деталей – $Y_2$   | Вручную – $Y_{21}$ ; автоматически – $Y_{22}$ .                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 3                                   | Накопитель – $Y_3$                     | С палетами – $Y_{31}$ ; магазинного типа – $Y_{32}$ ; бункерный – $Y_{33}$ ; лотковый – $Y_{34}$ .                                                                                                                                                                                                                    |
| 4                                   | Манипулятор – $Y_4$                    | Есть – $Y_{41}$ ; нет – $Y_{42}$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Подсистема ГПМ – инструмент «И»     |                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 1                                   | Количество инструментов – $Z_1$        | Один – $Z_{11}$ ; несколько – $Z_{12}$ .                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 2                                   | Тип инструмента – $Z_2$                | Метчик – $Z_{21}$ ; бесстружечный метчик – $Z_{22}$ ; комбинированный метчик – $Z_{23}$ .                                                                                                                                                                                                                             |
| 3                                   | Схема заборной части – $Z_3$           | Профильная – $Z_{31}$ ; генераторная – $Z_{32}$ ; прогрессивная – $Z_{33}$ .                                                                                                                                                                                                                                          |
| 4                                   | Геометрия зубьев рабочей части – $Z_4$ | Незатылованная – $Z_{41}$ ; радиальное затылование – $Z_{42}$ ; осевое затылование – $Z_{43}$ ; пересечением резьб – $Z_{44}$ .                                                                                                                                                                                       |
| 5                                   | Расположение рабочих вершин – $Z_5$    | Равномерное – $Z_{51}$ ; шахматное – $Z_{52}$ ; сложное – $Z_{53}$ .                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 6                                   | Количество рабочих граней – $Z_6$      | Три – $Z_{61}$ ; четыре – $Z_{62}$ ; шесть – $Z_{63}$ .                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 7                                   | Стружечные канавки – $Z_7$             | Прямые – $Z_{71}$ ; винтовые – $Z_{72}$ ; криволинейные – $Z_{73}$ .                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 8                                   | Материал рабочей части – $Z_8$         | Инструментальная часть – $Z_{81}$ ; быстрорежущая сталь – $Z_{82}$ ; твердый сплав – $Z_{83}$ .                                                                                                                                                                                                                       |

Зададимся конкретными свойствами такого элемента, как заготовка:

1. Размер резьбы –  $M4 \dots M6$ ;

2. Тип заготовки – цилиндр;
3. Количество отверстий – 4 (расположение – диаметрально, см. рис. 3.2,  $D = 60 \dots 90 \text{ мм}$ );
4. Класс точности –  $4H5H$ ;
5. Материал – сталь нержавеющая, титановые сплавы, алюминиевые сплавы.

Вначале выбираем технологический элемент «станок», проводя выбор требований на основе качественных показателей  $K_i^1$ :

1. Настройка режимов обработки –  $K_1^1$ : (0,5 – ручная, 0,75 – механизированная; 1,0 – автоматическая);
2. Способ смены инструмента –  $K_2^1$ : (0,5 – ручной; 0,75 – механизированный; 1,0 – автоматический);
3. Наличие предохранительных устройств –  $K_3^1$ : (0,5 – нет, 1,0 – есть);
4. Возможность многооперационной обработки –  $K_4^1$ : (0,5 – нет; 1,0 – есть);
5. Система управления –  $K_5^1$ : (0,5 – программное управление по циклу; 0,75 – ЧПУ (NC), 1,0 – ЧПУ типа CNC);
6. Возможность реализации на базе известных конструкций –  $K_6^1$ : (0,5 – нет; 0,75 – частично; 1,0 – полностью).

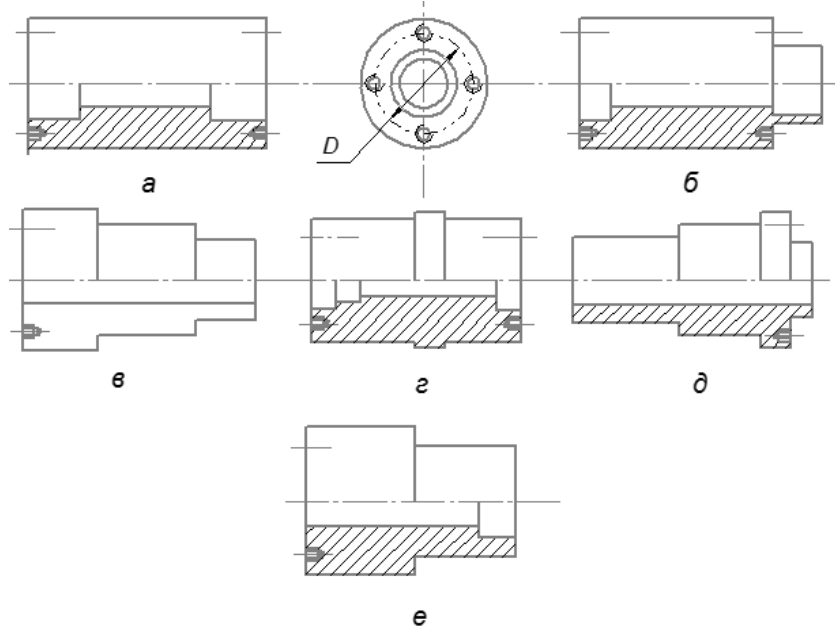


Рис. 3.2. Примеры деталей типа тел вращения с диаметрально расположением резьбовых отверстий на торцевых поверхностях:  $a, б, г$  – двустороннее расположение;  $в, д, е$  – размещение с одной стороны

По формуле для определения комплексного критерия качества определяем суммарный качественный показатель для каждой из возможных структур. Наибольшее значение  $K_c = 0,8$  принадлежит варианту станка:

$$C = X_{11} \rightarrow \begin{bmatrix} X_{21} \\ X_{24} \\ X_{25} \end{bmatrix} \rightarrow X_{32} \rightarrow X_{42} \rightarrow \begin{bmatrix} X_{63} \\ X_{66} \\ X_{69} \end{bmatrix} \rightarrow X_{72}$$

Выбранная структура «С» содержит узлы и характеристики, позволяющие создавать ГПМ на агрегатной основе, т.е. с электрическим приводом главного движения, приводом равномерной принудительной осевой подачи, продольным столом и многошпиндельной головкой [2] с механической настройкой межцентрового расстояния (рис. 3.3).

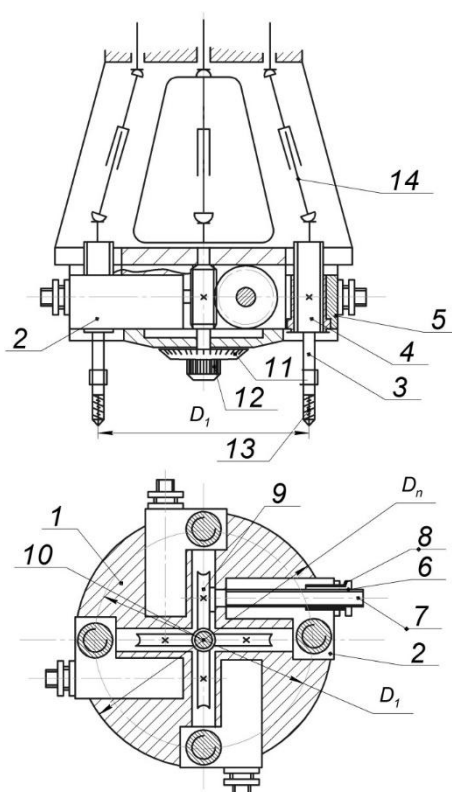


Рис. 3.3. Многошпиндельная резбонарезная головка с регулируемым межцентровым расстоянием (авт. свид. SU 1126396)

Качественные показатели  $K_i''$  «приспособления» выбирали в соответствии со следующими техническими требованиями:

1. Способ загрузки и базирования –  $K_1^{11}$ :  
(0,5 – ручной; 0,75 – механизированный; 1,0 – автоматический);
2. Позиционирование –  $K_2^{11}$ :  
(0,5 – ручное; 0,75 – механизированное; 1,0 – автоматическое);
3. Возможность реализации на базе известных конструкций –  $K_3^{11}$ :

(0,5 – нет; 0,75 – частично; 1,0 – полностью).

По аналогии определяем суммарный качественный показатель для приспособления, наибольшую величину которого ( $K_{II} = 1,0$ ) имеет структура:

$$II = Y_{12} \rightarrow Y_{22} \rightarrow Y_{34} \rightarrow Y_{41}.$$

Структура «II» включает в себя автоматические устройства зажима и позиционирования деталей, а также манипулятор для загрузки и разгрузки заготовок.

После этого выбираем по наибольшему качественному показателю  $K_i^{III}$  структуру «инструмента» на основании технических требований:

1. Стойкость  $K_1^{III}$  (0,75 – нормативная; 1,0 – повышенная);
2. Прочность  $K_2^{III}$  (0,75 – нормативная прочность стандартного инструмента; 1,0 – повышенная);
3. Регулирование геометрических параметров, переналадка  $K_3^{III}$  (0,5 – нерегулируемые; 0,75 – регулировка вручную; 1,0 – автоматическая).

Максимальный качественный показатель  $K_{II} = 0,75$  получили три варианта «И» инструмента:

$$I_1 = Z_{12} \rightarrow Z_{21} \rightarrow Z_{32} \rightarrow Z_{42} \rightarrow Z_{51} \rightarrow Z_{61} \rightarrow Z_{71} \rightarrow Z_{82}$$

$$I_2 = Z_{12} \rightarrow Z_{21} \rightarrow Z_{32} \rightarrow Z_{42} \rightarrow Z_{51} \rightarrow Z_{61} \rightarrow Z_{74} \rightarrow Z_{82}$$

$$I_3 = Z_{12} \rightarrow Z_{21} \rightarrow Z_{31} \rightarrow Z_{42} \rightarrow Z_{53} \rightarrow Z_{61} \rightarrow Z_{73} \rightarrow Z_{82}$$

Структуры  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  имеют принципиальные конструктивные отличия прежде всего по способу формообразования резьбы ( $I_1$  – методом снятия стружки;  $I_2$  – методом пластической деформации;  $I_3$  – сочетанием резания и пластического деформирования). В условиях ГПС широкий диапазон обрабатываемых материалов не позволяет однозначно выбрать оптимальную структуру инструмента. Для выявления конструкций, приемлемых для широкого диапазона обрабатываемых материалов, необходимы дополнительные экспериментальные исследования и более точные критерии, учитывающие надежность и переналаживаемость. На рис. 3.4 приведены конструкции некоторых типов метчиков, из числа которых наиболее рациональными представляются варианты, разработанные в СевГУ (рис. 3.4, е, ж, з), рабочая часть которых получена пересечением многозаходных резьб с основной резьбой (авт. свид. SU 630036, 952490, 927426, патенты UA 64950, 64951, 66082).

На этапе структурно-компоновочного синтеза можно ограничиться применением качественного критерия. Морфологический анализ позволил

выявить из сформированного множества вариантов ГПМ для резьбообработки три рациональных варианта (рис. 3.5):

- 1)  $C \rightarrow П \rightarrow И_1$ .
- 2)  $C \rightarrow П \rightarrow И_2$ ;
- 3)  $C \rightarrow П \rightarrow И_3$ ;

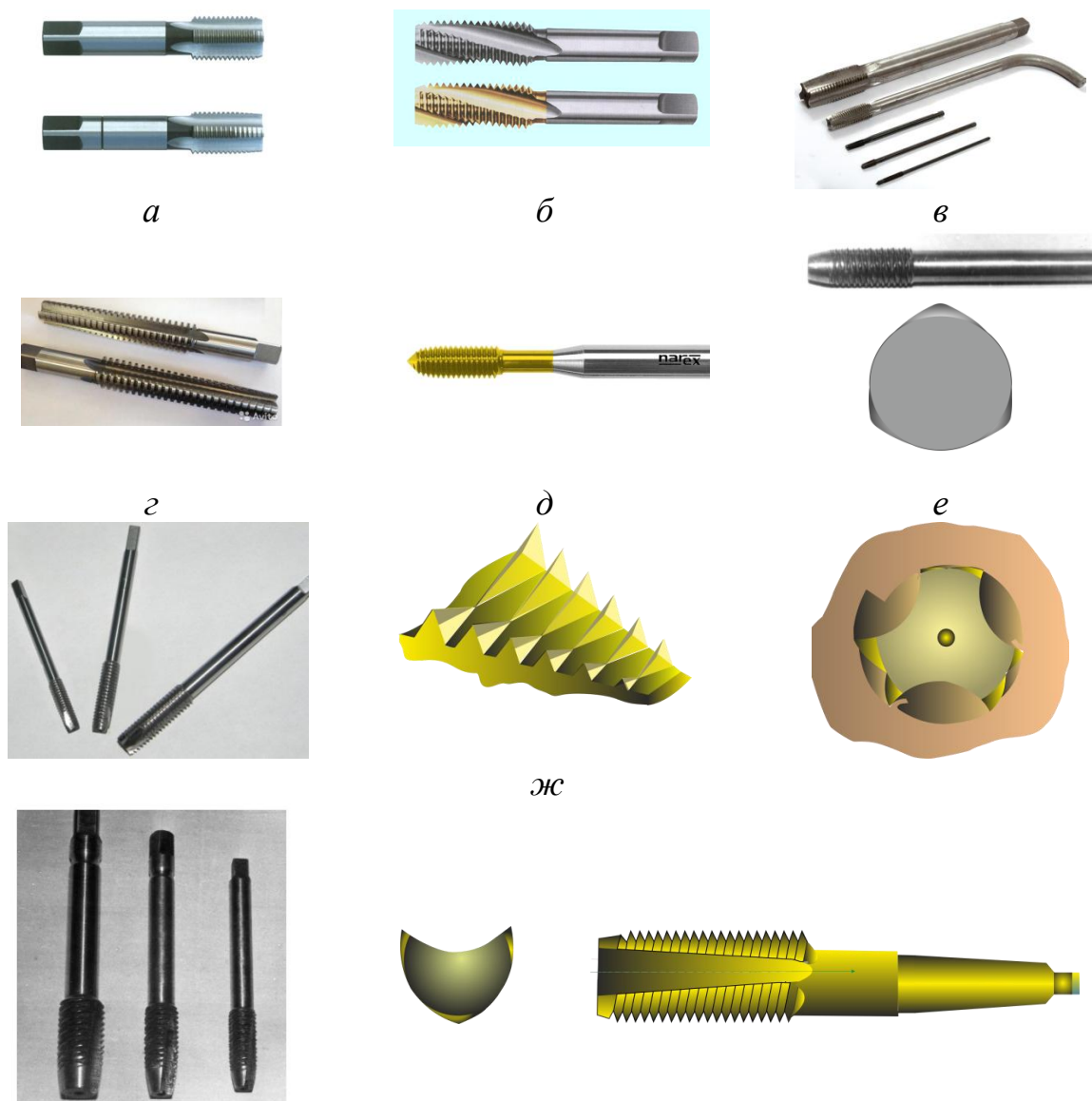


Рис. 3.4. Конструкции некоторых типов метчиков: *а* – режущие (слесарные); *б* – с винтовыми стружечными канавками; *в* – гаечные; *г* – для трапецеидальных резьб; *д* – деформирующие; *е* – деформирующие с рабочей частью, выполненной пересечением многозаходных резьб с основной резьбой (авт. свид. SU 630036, патент UA 64951); *жс* – деформирующе-режущие с интегрированными зубьями (авт. свид. SU 952490, патент UA 64950); *з* – деформирующе-режущие с дифференцированными зубьями (авт. свид. SU 927426, патент UA 66082)

Для полной информации и объективной оценки предварительного варианта необходим учет стохастических процессов, происходящих в реальных условиях функционирования. Вариант возможной компоновки ГПМ показан на рис. 3.6.

Приведенный выше пример показывает возможность решения задачи синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации, что значительно ускоряет процесс реализации наиболее эффективной системы [25, 34].

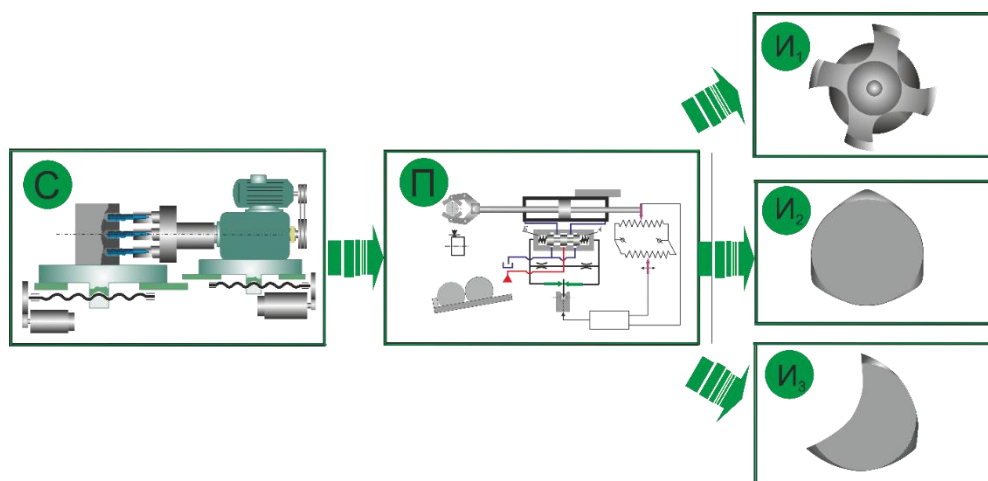


Рис. 3.5. Рациональные варианты ГПМ для резбообработки

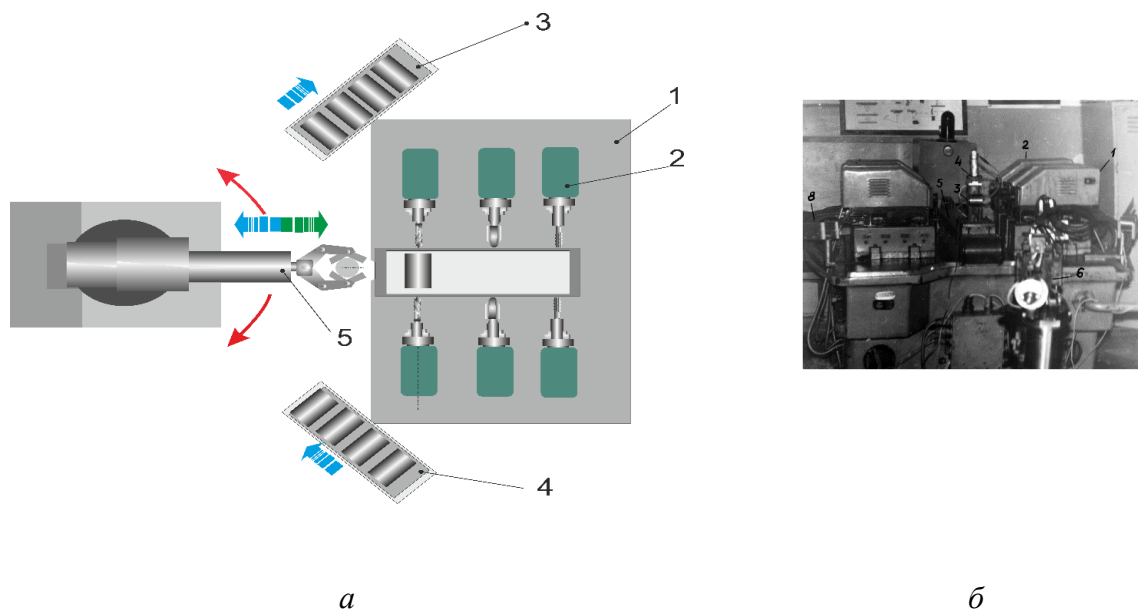


Рис. 3.6. ГПМ для резбообработки отверстий на торцах цилиндрической детали (а): 1 – агрегатный станок А-26в (б); 2 – многошпиндельные переналаживаемые головки; 3, 4 – накопители; 5 – промышленный робот «Бриг-10Б»

### 3.3. Последовательность выполнения работы

1. Составить морфологическую матрицу, выбрать качественные показатели и представить лучший вариант компоновки приведенных в табл. 3.2 типов ГПМ.

2. Критерии, количество сторон обработки и чертежи деталей задает руководитель.

3. Изобразить структурно-компоновочную схему синтезированного варианта ГПМ.

Т а б л и ц а 3.2

Варианты заданий

| Вариант |   | ГПМ                       | Деталь                               |
|---------|---|---------------------------|--------------------------------------|
| 1       | а | Токарный                  | Вал                                  |
|         | б |                           | Ступица                              |
|         | в |                           | Фланец                               |
|         | г |                           | Втулка                               |
| 2       | а | Токарный многошпиндельный | Кольцо подшипника                    |
|         | б |                           | Палец                                |
|         | в |                           | Ступица                              |
|         | г |                           | Стакан                               |
| 3       | а | Фрезерный                 | Вал со шпоночным пазом               |
|         | б |                           | Плита с параллельными пазами         |
|         | в |                           | Корпус с фигурным профилем           |
| 4       | а | Сверлильный               | Втулка со ступенчатым отверстием     |
|         | б |                           | Плита с отверстиями разного диаметра |
|         | в |                           | Корпус с глубокими отверстиями       |
|         | г |                           | Крышка с несколькими отверстиями     |
| 5       | а | Многоцелевой              | Корпусная деталь                     |
|         | б |                           | Плита с пазами и отверстиями         |
|         | в |                           | Крышка с криволинейными пазами       |
|         | г |                           | Крышка с отверстиями и пазами        |
|         | д |                           | Корпус ступенчатый с отверстиями     |

### 3.4. Вопросы для самоконтроля

1. Как в общем случае формулируется задача синтеза оптимальной структуры?

2. Охарактеризовать принципы построения системы модуля.

3. Как определяется комплексный критерий качества синтезируемой структуры?

4. Как проводится построение морфологической матрицы объекта?

5. Принципы выработки критериев качественных показателей при выборе подсистем и элементов.

## Практическое занятие 4

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ КОНСТРУИРОВАНИЯ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Цель занятия:** освоение методов системного анализа творческих процессов при конструировании заданной технической системы (ТС) с использованием основной комбинаторной концепции.

#### 4.1. Теоретическое описание

Каждая ТС проходит жизненный цикл, состоящий из цепочки фаз [21, 26], представленных в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Фазы жизненного цикла ТС

| Фа-<br>зы | Содержание фазы                                                                                           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ф1        | Постановка цели при формировании задачи                                                                   |
| Ф2        | Разработка замысла ТС (ГПМ, станка, механизмов)                                                           |
| Ф3        | Проведение целевых исследований в рамках программ                                                         |
| Ф4        | Опытно – конструкторские работы (ОКР)                                                                     |
| Ф5        | Создание и исследование опытного образца                                                                  |
| Ф6        | Выпуск в экономическую сферу – внедрение (подготовка производства, собственно производство, эксплуатация) |
| Ф7        | Прекращение выпуска и эксплуатации                                                                        |
| Ф8        | Уничтожение (утилизация)                                                                                  |

На всех фазах жизненного цикла происходит непрерывное приобретение новых знаний и постоянное их применение не только в конструкции машин, но и в технологии, регламентах и технологической документации, патентных, научных публикациях и т.д.

Основные состояния формы машин (материальные уровни конструирования) следующие:

- **концептуальное (понятийное, текстовое, документальное);**
- **имитационное (числовое, записанное на машинный носитель);**
- **визуально-графическое;**
- **материальное воплощение.**

Все фазы жизненного цикла образца (кроме фазы промышленной эксплуатации машин) убыточны. На всех фазах наблюдаются немалые затраты и лишь на одной из них происходит возврат вложенных средств при получении прибыли (рис. 4.1): кривая 1 – при своевременном внедрении образца; 2 – при преждевременном; 3 – при запоздалом.

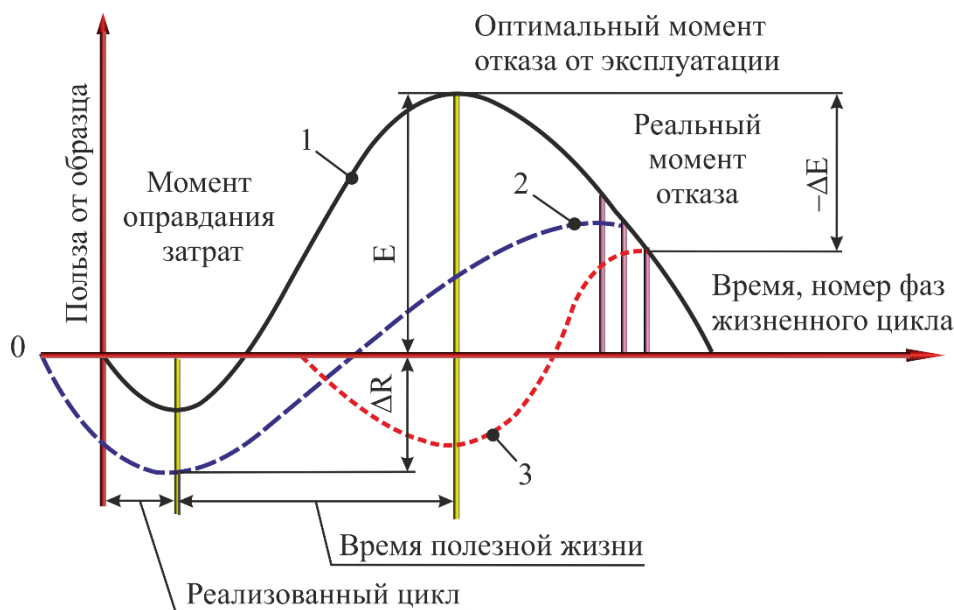


Рис. 4.1. График жизненного цикла образца ТС

Если начать разработку внедрения образца с отставанием, то прибыль от его эксплуатации будет меньше максимально возможной прибыли  $E$ . Как видно из графика (рис. 4.1), важно предсказать наиболее выгодные моменты начала и завершения эксплуатации машин заданного образца, поскольку при преждевременном внедрении требуются повышенные затраты  $\Delta R$ , а при запоздалом — теряется часть прибыли  $\Delta E$ . Сокращение реализационного периода разработки может быть достигнуто за счет применения агрегативного конструирования, поискового или графического макетирования (в частности с использованием систем электронной графики), стандартизации.

На стадии разработки замысла особое значение имеют процессы заимствования технических решений при тщательной оценке и согласовании трех основных источников знаний при проектировании:

- **архив факторов машиностроения;**
- **реальные ресурсные и творческие возможности коллектива разработчиков;**
- **прогностический массив технических решений.**

В соответствии с источниками знаний, введем следующие классы технических решений: *Пр* — прошлые; *Тек* — текущие (современные); *Буд* — будущие (прогнозируемые), составляющие матрицу (табл. 4.2).

Матрица дает представление о тематических разделах, на которые должны обратить внимание и обязательно обсудить разработчики замысла.

Из нее можно получить 9 характерных процессов заимствования:

- 1) **Тек-Тек** — кооперирование;
- 2) **Пр-Тек** — вовлечение прошлых решений;

- 3) **Буд-Тек** – выжидание (откладывание разработки);
- 4) **Пр-Пр** – поиск опоздавших изобретений;
- 5) **Тек-Пр** – модернизация (горизонтальное движение технологии);
- 6) **Буд-Пр** – футуризация;
- 7) **Пр-Буд** – парадоксальное конструирование;
- 8) **Тек-Буд** – подбор базы;
- 9) **Буд-Буд** – опережающее конструирование.

Т а б л и ц а 4.2

| Классы подбора | Фиксируемая группа |                              |                            |                                |
|----------------|--------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
|                |                    | <b>Пр</b>                    | <b>Тек</b>                 | <b>Буд</b>                     |
|                | <b>Буд</b>         | футуризация                  | выжидание                  | опережающее конструирование    |
|                | <b>Тек</b>         | модернизация                 | кооперирование             | подбор базы                    |
|                | <b>Пр</b>          | поиск опоздавших изобретений | вовлечение прошлых решений | парадоксальное конструирование |

Существует два подхода к решению задач анализа (*A*) и синтеза (*C*), связанных с поиском и созданием нового технологического оборудования [21, 22].

Внутреннее состояние объекта (станка) характеризуется вектором его состояния или структуры ( $X_i$ ), поведение объекта характеризуется выполнением требуемых функций, т.е. вектором его выходных параметров ( $Y_i$ ), которые в конечном счете определяют вектор обобщенного показателя качества ( $K_i$ ). Если имеется аналог или прототип, то процесс начинается с анализа (рис. 4.2, *a*), если аналог (прототип) отсутствует, то процесс создания начинается с синтеза (рис. 4.2, *б*). Чаще всего преобладает первый подход, однако инновационные решения, сопровождаемые открытиями и изобретениями высших уровней, связаны с решением начальной задачи синтеза, что обычно сопровождается рождением нового поколения станков и их механизмов. Задачи анализа и синтеза (рис. 4.2, *в*) объединены таким образом, что образуется непрерывный итерационный процесс.

Используются три основных направления решения задач синтеза:

- **традиционное (полный перебор вариантов – дискретный синтез);**
- **современное (неполный перебор);**
- **перспективное (неполный перебор на новых принципах).**

Выбор того или иного метода исследования зависит в основном от степени сложности проектируемого объекта, определяемой числом  $n$  заданных свойств функционирования с частными показателями их качества

из всего множества, а также их взаимосвязью. Различные ТС условно разделены на 3 основных класса:

- **I – относительно высокой сложности ( $n > 10$ );**
- **II – средней сложности ( $n \sim 10$ );**
- **III – малой сложности ( $n < 10$ ).**

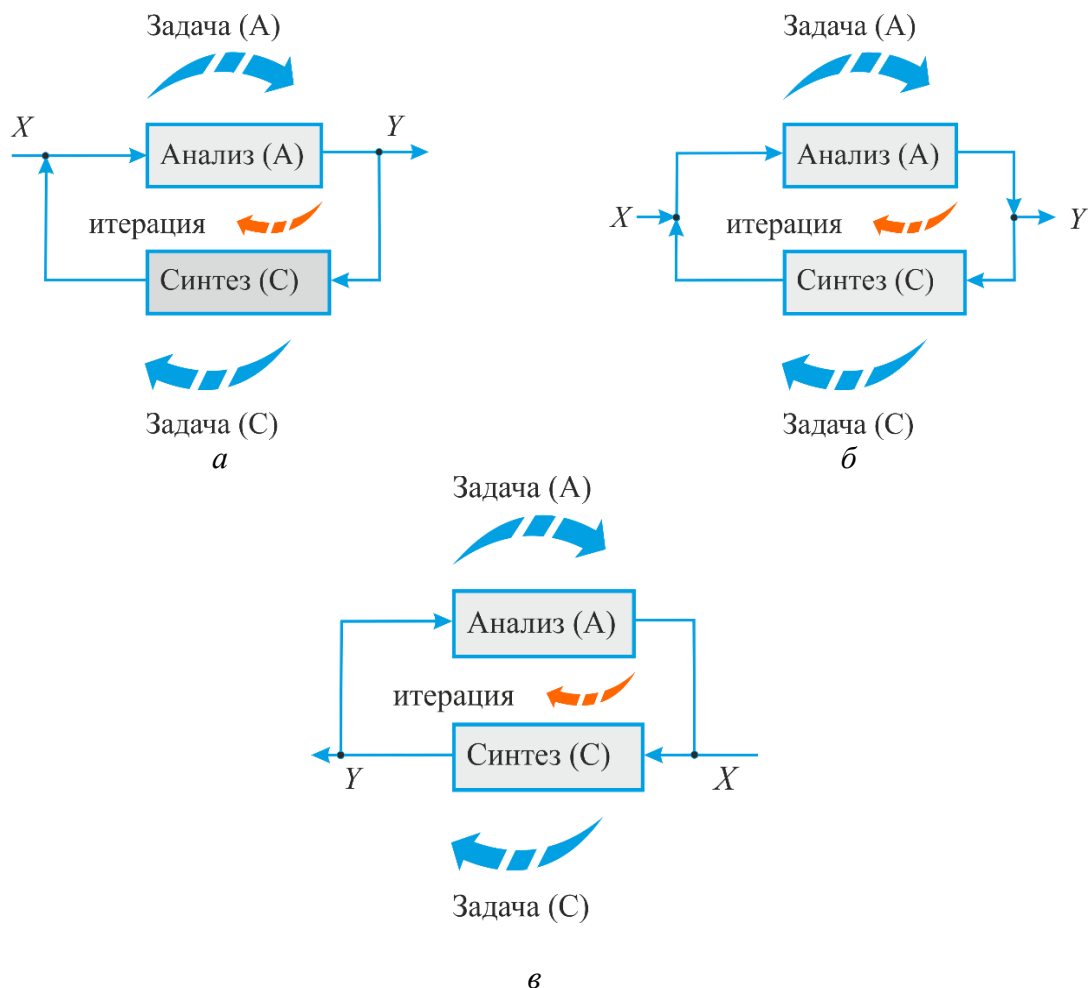


Рис. 4.2. Типы задач, решаемых при проектировании технической системы:  
 а – при наличии аналога (или прототипа) процесс начинается с анализа;  
 б – в отсутствие аналога (или прототипа) процесс начинается с синтеза;  
 в – задачи анализа и синтеза образуют непрерывный итерационный процесс

Перечисленные процессы – своеобразные базисные векторы, комбинируя которые, можно описать конкретную тактику заимствования.

В некоторых коллективах принята доктрина – добиваться минимума технологической преемственности, то есть избегать вовлечения прошлых решений (парадоксальное конструирование, поиск опоздавших изобретений, модернизации), предпочитать подбор базы, футуризацию, кооперирование и даже, в некоторых случаях, опережающее конструирование.

Каждая идея может окупать себя, если она использована в промышленном образце машин. Однако существуют механизмы посторонних применений того, что составило техническую сущность данного образца, позволяющие более интенсивно окупать затраты на протяжении реализационного цикла. Если при разработке замысла заимствовать результаты, то с момента выпуска первого промышленного экземпляра стремятся распространить технические решения и полезно использовать их. Процессы распространения технических решений и непрямого извлечения выгоды из разработки, когда она завершена, могут называться процессами рекуперации (рис. 4.3) [26].

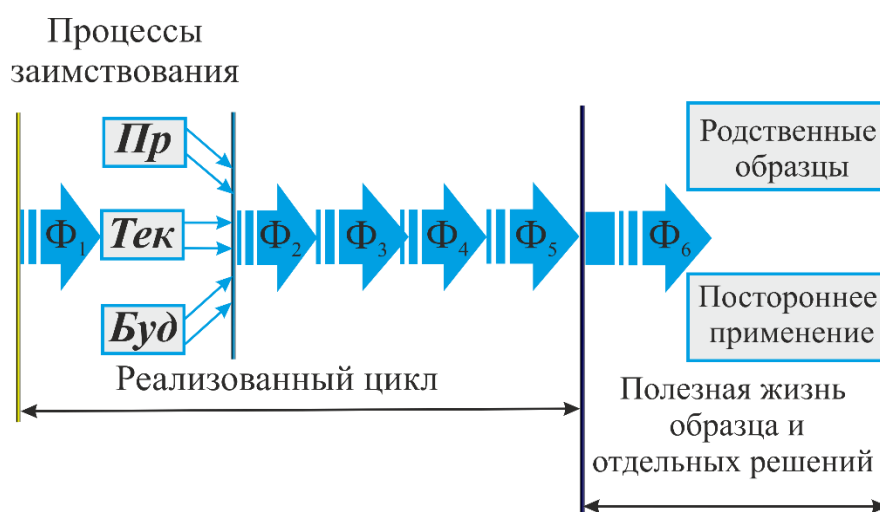


Рис. 4.3. Процессы рекуперации технологической системы

ТС можно представить (графически) в виде дерева блоков наложением друг на друга различных оснований членения – факторов, из-за которых приходится по-разному делить объект на части. Членения могут быть функциональными, технологическими и др. ТС можно изобразить графически в виде дерева признаков строения объекта (рис. 4.4, а, в) или в виде списка иерархии спецификации (рис. 4.4, б).

Для систематизации той или иной предметной области удобно применять картотеки (файлы), в любое место которых можно легко вставить новую карточку, отыскать нужную, изъять её и т.д. Это свойство используют в процессе проектирования при обработке больших массивов с построением комбинаторного файла – списка лексикографически упорядоченных записей. Таким образом комбинаторный файл – это списковая структура, в которой учтены её альтернативы и комбинации признаков строений: оно описывает некоторое свойство объектов в целом и ни один объект в отдельности.

В качестве примера рассмотрим фрагмент комбинаторного файла **металлорежущего станка**:

1. Рабочий орган.
2. Привод главного движения.
3. Привод подач.
4. Привод вспомогательного движения.
5. Направляющие элементы.
6. Устройство для замены заготовки.
7. Система управления.

#### 1. Рабочий орган:

- 1.1. Инструмент;
- 1.2. Приспособление для крепления инструмента;
- 1.3. Связь с направляющим элементом;
- 1.4. Связь с приводом;
- 1.5. Связь с системой управления.

##### а. Инструмент:

- і. Количество инструментов;
    - 1.1.1. А.1. Один; 1.1.1. А.2. Два; 1.1.1. А.3. Несколько;
    - 1.1.2. Тип инструмента; 1.1.2. А.1. – резец; 1.1.2. А.2. – сверло и т.д.
- («А» обозначает альтернативу, вариант реализации).

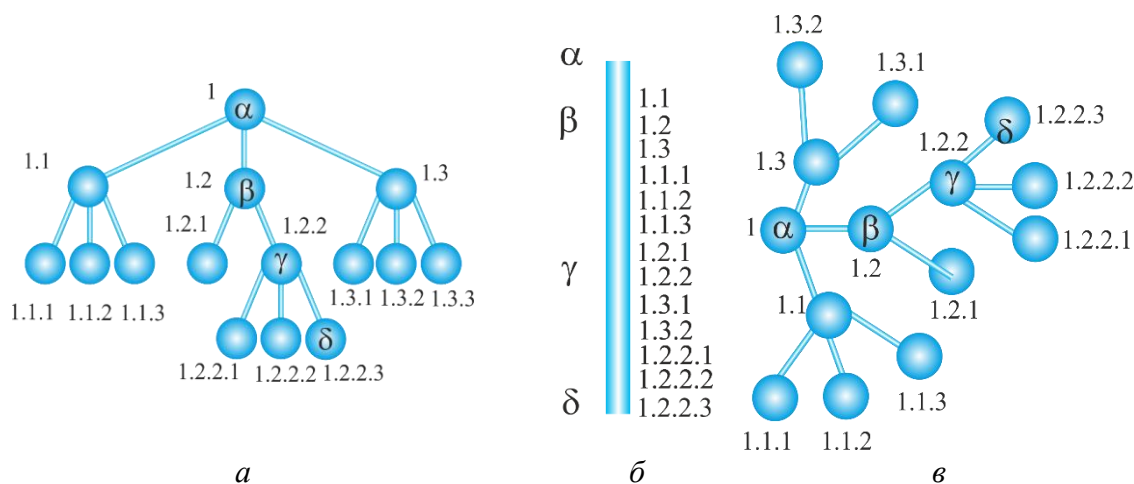


Рис. 4.4. Графическое представление ТС

Совокупности, с которыми имеют дело конструктора, существенно комбинаторны, т.е. переход сопровождается быстрым ростом возможных вариантов. Если каждую из  $K$  деталей станка изготавливают из  $N$  материалов, то число различных комбинаций –  $N^K$ .

При выпуске новейших станков необходимо учитывать следующие факторы:

- целесообразна не модернизация, а создание принципиально нового;
- время жизненного цикла станка должно быть ограничено с начала проектирования до снятия с производства 6...8 годами;

- создаваемые станки должны быть конкурентоспособны на рынках развитых стран;
- срок освоения нового станка не должен превышать 1 года.

Реализация этих факторов возможна при широком применении современных методов поиска новых технических решений и с использованием ЭВМ на различных этапах создания новых станков.

#### **4.2. Последовательность выполнения работы**

1. По заданному в табл. 4.3 варианту выбрать из справочных источников модель станка.

2. На примере заданного узла (механизма) показать создание новой конструкции для станка с ЧПУ с использованием процессов заимствования.

3. С использованием процесса рекуперации (см. рис. 4.3) показать применение новой конструкции в других типах и моделях станков (родственные образцы и постороннее применение).

4. Изобразить заданный вариант станка в виде дерева блоков (см. рис. 4.4, а) или концентрических окружностей (см. рис. 4.4, в) по цепочке уровней: станок – кинематические цепи – приводы – передаточный механизм (механизмы рабочих, холостых ходов и управления) – узлы;

5. Для заданной и новой конструкции узла (механизма) записать комбинаторный файл, проиллюстрировав в нем выделенный список иерархии спецификации для новой конструкции.

#### **4.3. Вопросы для самоконтроля**

1. Перечислить фазы жизненного цикла ТС.
2. Охарактеризовать виды состояния формы машин.
3. Изобразить и пояснить график жизненного цикла образца ТС.
4. Назвать основные источники знаний при проектировании ТС.
5. Охарактеризовать три основных направления решения задач синтеза.
6. Перечислить классы технических решений и характерные процессы заимствования при проектировании.
7. Что понимают под процессами рекуперации ТС?
8. Привести пример комбинаторного файла ТС.

Т а б л и ц а 4.3

## Варианты заданий

| п/п | Тип станка                        | Узел, механизмы                              |
|-----|-----------------------------------|----------------------------------------------|
|     | Токарный                          | 1а – шпиндельный узел                        |
|     |                                   | 1б – коробка скоростей                       |
|     |                                   | 1в – поперечный суппорт с приводом           |
|     | Токарно-револьверный              | 2а – шпиндельный узел                        |
|     |                                   | 2б – механизм зажима прутка                  |
|     |                                   | 2в – механизм подачи прутка                  |
|     |                                   | 2г – револьверная головка                    |
|     | Многошпиндельный токарный автомат | 3а – шпиндельный узел                        |
|     |                                   | 3б – механизм поворота шпиндельного барабана |
|     |                                   | 3в – механизм зажима                         |
|     |                                   | 3г – механизм подачи прутка                  |
|     |                                   | 3д – привод продольного суппорта             |
|     |                                   | 3е – механизм шпиндельного барабана          |
|     | Сверлильный станок                | 4а – коробка скоростей                       |
|     |                                   | 4б – шпиндельный узел                        |
|     |                                   | 4в – коробка подач                           |
|     | Универсальный фрезерный станок    | 5а – шпиндельный узел                        |
|     |                                   | 5б – коробка скоростей                       |
|     |                                   | 5в – вертикальная головка                    |
|     | Многооперационный станок          | 6а – электрошпиндель                         |
|     |                                   | 6б – привод подач                            |
|     |                                   | 6в – инструментальная система                |
|     |                                   | 6г – система стружкоудаления                 |
|     |                                   | 6д – система управления                      |

## Практическое занятие 5

### СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫЙ СИНТЕЗ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА НА ОСНОВЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЕГО КОМПОНОВОК

**Цель занятия:** синтезировать вариант компоновки станка с ЧПУ (или ГПМ) по агрегатно-модульному принципу для заданной обрабатываемой детали на основе использования метода морфологического анализа (МА).

#### 5.1. Теоретическое описание

Противоречия между растущими требованиями к производительности и мобильности технологического оборудования можно устранить путем создания машин, сочетающих высокую производительность с широкими технологическими возможностями, короткими сроками проектирования и освоения. Это достигается в том случае, если новые станки не проектируются каждый раз заново, а komponуются на базе типовых механизмов и устройств, которые можно унифицировать. В последние годы широко применяются многооперационные агрегатные станки, которые komponуют из различных функциональных узлов (рис. 5.1, 5.2) [16, 31].

**Агрегатирование** – это метод компоновки технологического оборудования из комплекта унифицированных самодействующих узлов разных типоразмеров, имеющих размерную или функциональную взаимозаменяемость. Между агрегатированием и унификацией существует определенная количественная связь [22].

**Унификация** отличается от агрегатирования степенью использования одинаковых деталей, элементов, узлов. Если узел полностью унифицирован, то он становится агрегатным и именно при использовании таких узлов в компоновке технологического оборудования реализуется метод агрегатирования.

Существует **три типа агрегатирования** по конструктивным признакам:

- **параметрически размерное** – при создании модификаций оборудования из узлов, отвечающих разным значениям его характеристик (форма и размеры крепления инструмента и заготовок, мощность главного привода, подачи, длины хода инструментов, диапазоны частот вращения шпинделя и подач и т.п.);

- **модификационное** – учитывает степень концентрации операций (многоинструментальная, многошпиндельная, многопозиционная или многосторонняя обработки), уровень автоматизации оборудования (цикл обработки, замена инструментов и заготовок, контроль инструмента и т.п.);

- **компоновочное** – учитывает расположение исполнительного органа в рабочем пространстве, количество исполнительных органов одинакового или разного функционального назначения, компоновку из агрегатных узлов.

Создание многофункционального (многоцелевого) оборудования для реализации комбинированных и разнохарактерных методов обработки основано на агрегатно-модульном принципе его построения с использованием унифицированных узлов – модулей. **Модуль** – повторяемый унифицированный узел, выполняющий самостоятельную функцию в разного рода технических системах. В машиностроении различают технологические и конструкционные модули.

**Технологический модуль** – это структурная единица компоновки или минимальный состав блоков компоновки, необходимый для выполнения операций формообразования.

**Конструкционный модуль** – это функционально и конструктивно независимая единица унификации оборудования, которая может использоваться как индивидуально, так и в комбинациях с другими модулями. Конструкционные модули в свою очередь состоят из **конструктивных (КМ)** и **функциональных (ФМ)** модулей. **КМ** предназначен для формирования конструкций несущей системы станка и размещения оборудования, а **ФМ** с установленным оборудованием – для выполнения одной или нескольких функций технической системы. **КМ** относится к стационарным блокам, а **ФМ** – к координатным блокам, приводам и оборудованию для выполнения вспомогательных, контрольных и других перемещений [22].

Модульная компоновка, основанная на принципе агрегатирования, позволяет создать станок из нормализованных узлов и деталей, достигая высокой производительности при достаточной технологической оснащённости и значительным уровнем автоматизации.

Основными достоинствами агрегатирования являются удешевление производства станков за счёт повышения серийности, сокращение сроков их изготовления, повышение надёжности. Для обеспечения переналадки при обработке деталей широкой номенклатуры станки оснащают инструментальным магазином, который может обеспечивать также смену многошпиндельных коробок.

Принцип агрегатирования широко используется при создании многооперационных станков (рис. 5.3) [31]. Реализация подобных принципов позволяет осуществить поузловую специализацию станкостроительных заводов и организовать централизованное производство комплектующих изделий и вспомогательных устройств (прил., рис. Б.1, Б.2).

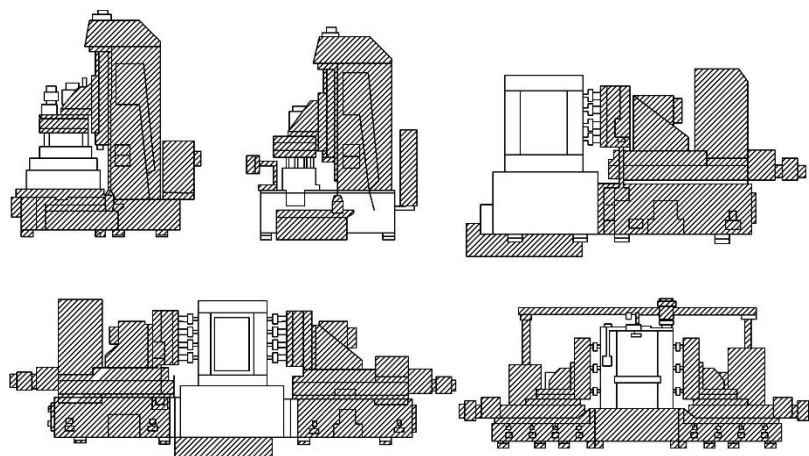


Рис. 5.1. Схемы компоновок агрегатных станков для автоматических линий

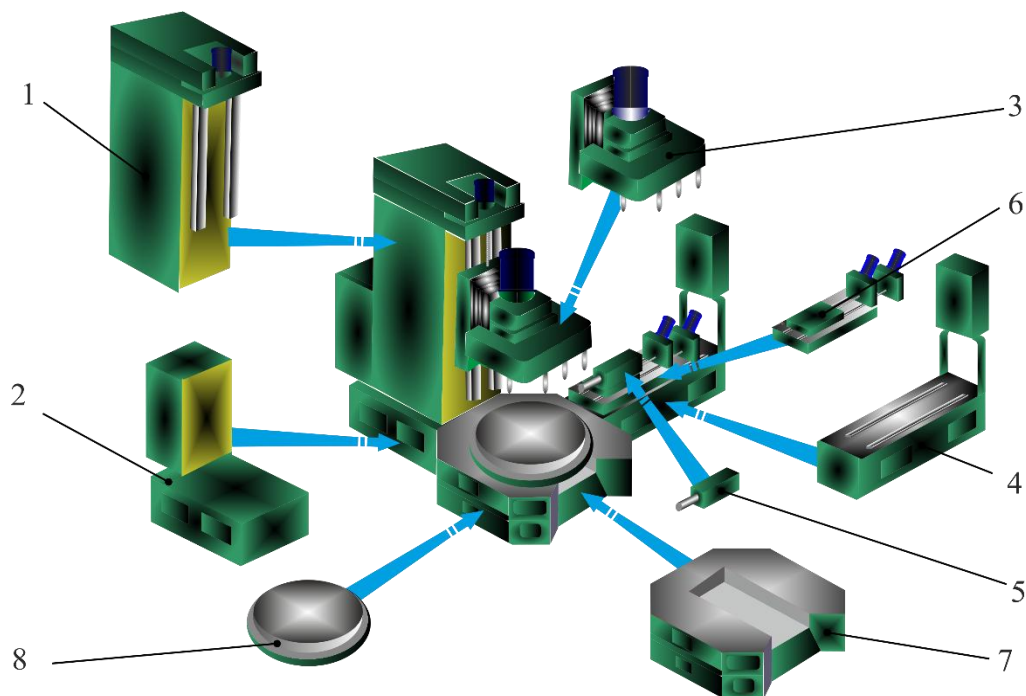


Рис. 5.2. Пример многооперационного агрегатного станка: 1 – стойка; 2 – тумба;  
3 – силовая многшпindleльная головка; 4 – боковая станина;  
5 – одношпindleльная расточная головка; 6 – силовой стол;  
7 – опорная плита; 8 – поворотный делительный стол

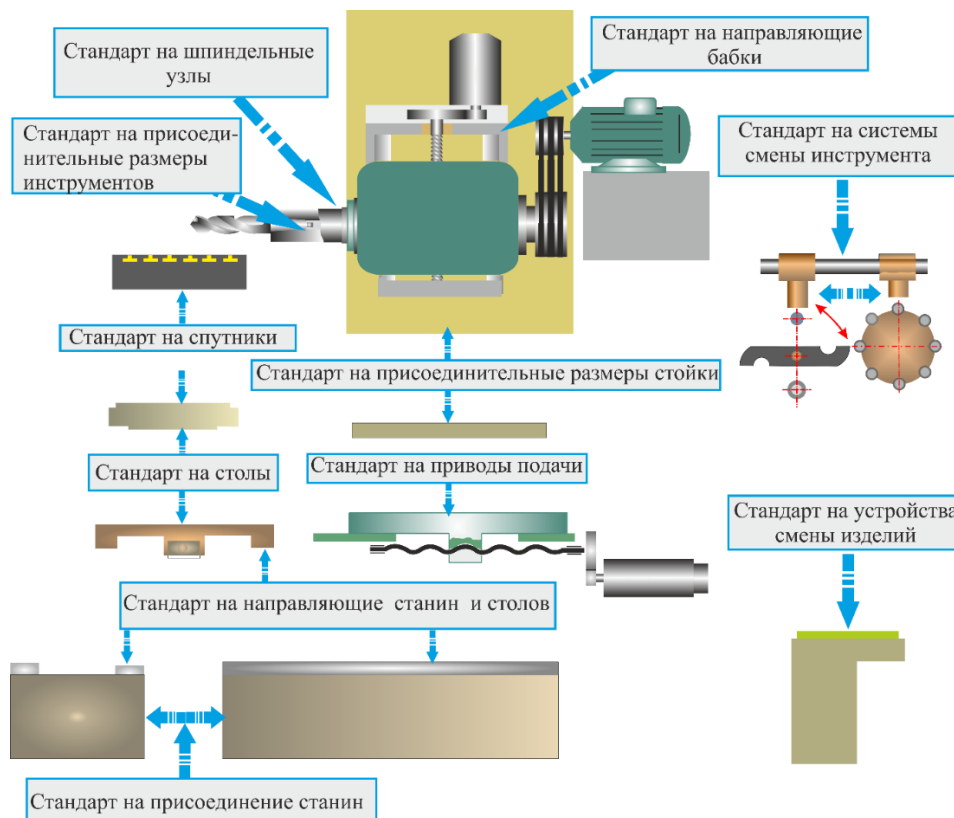


Рис. 5.3. Схема нормализованных агрегатных узлов для многооперационного станка

При синтезе технологических схем и компоновок многооперационных станков эффективным, дающим большое количество вариантов, является метод морфологического анализа и синтеза, сводимый к перебору сочетаний альтернатив основных признаков, образующих морфологическую матрицу.

При выборе в качестве варианта задания для синтеза компоновок многооперационного станка можно руководствоваться материалами из табл. 5.1.

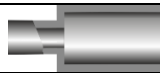
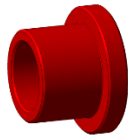
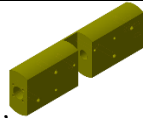
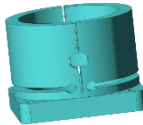
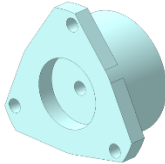
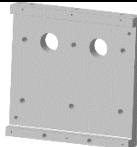
Цель проектирования – выбор такого состояния системы (её вариантов), при котором достигается возможно большее значение обобщенного показателя качества системы  $K$ , пример расчета которого ( $K = I - \sum_{i=1}^n (I - K_i) / n$ ) подробно рассмотрен ранее в разделе 3.1. В качестве критериев (показателей) оценки качества вариантов компоновки принимаем:

- $K_1$  – минимальное количество комплектов блоков;
- $K_2$  – максимальная жесткость;
- $K_3$  – максимальная производительность;
- $K_4$  – количество сторон обработки деталей: 1, 2, 3, 4, 5.

Т а б л и ц а 5.1

## Варианты заданий

| № п/п | Тип станка                                            | Деталь                                                                                    | Рисунок |
|-------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 1     | Токарный одношпиндельный                              | 1а – шток                                                                                 |         |
|       |                                                       | 1б – стакан                                                                               |         |
| 2     | Токарный двухшпиндельный                              | 2а – ступица                                                                              |         |
|       |                                                       | 2б – шестерня                                                                             |         |
|       |                                                       | 2в – ступенчатый вал                                                                      |         |
| 3     | Токарный многошпиндельный (число шпинделей – 4, 6, 8) | 3а – эксцентрик                                                                           |         |
|       |                                                       | 3б – палец                                                                                |         |
|       |                                                       | 3в - ступица                                                                              |         |
| 4     | Фрезерный                                             | 4а – плита с наружным фигурным профилем                                                   |         |
|       |                                                       | 4б – плита                                                                                |         |
|       |                                                       | 4в – кронштейн с фигурным отверстием                                                      |         |
|       |                                                       | 4г – корпус с наружным фигурным профилем                                                  |         |
| 5     | Сверлильный                                           | 5а – крышка с центральным отверстием и несколькими диаметральными одинаковыми отверстиями |         |
|       |                                                       | 5б – плита с несколькими разными отверстиями                                              |         |
|       |                                                       | 5в – плита с несколькими одинаковыми отверстиями                                          |         |
| 6     | Агрегатный                                            | 6а – корпус с отверстиями                                                                 |         |
|       |                                                       | 6б – корпус                                                                               |         |
|       |                                                       | 6в – цанга                                                                                |         |

|   |              |                                       |                                                                                       |
|---|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|   |              | 6г – втулка со ступенчатым отверстием |    |
|   |              | 6д – втулка со сквозным отверстием    |    |
| 7 | Многоцелевой | 7а – корпус                           |    |
|   |              | 7б – корпус                           |    |
|   |              | 7в – корпус                           |    |
|   |              | 7г – плита                            |   |
|   |              | 7д – корпус                           |  |

Для графического изображения компоновки станка предлагается использовать условные обозначения блоков и модулей, приведенные в табл. 5.2 [26].

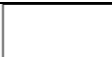
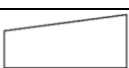
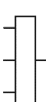
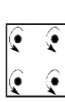
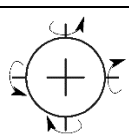
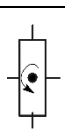
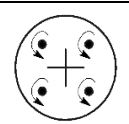
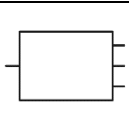
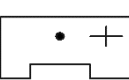
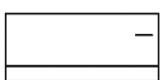
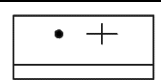
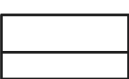
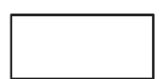
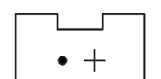
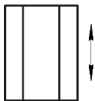
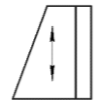
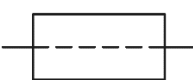
Большую наглядность компоновки станка дает её представление в аксонометрии, при котором вводят дополнительные изображения блоков, модулей, а для многоцелевых станков не показывают накопители инструментов.

Рассмотрим выполнение работы на примере варианта 7г – обработка одной стороны корпусной детали в виде высокого параллелепипеда, критерий качества – минимум комплектов модулей.

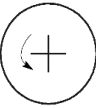
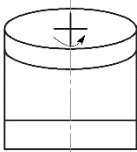
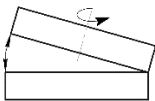
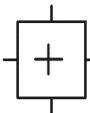
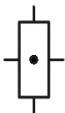
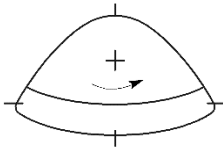
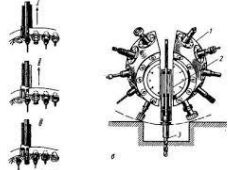
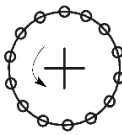
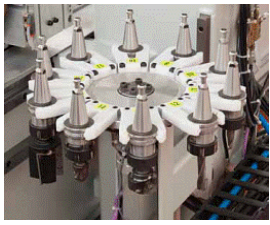
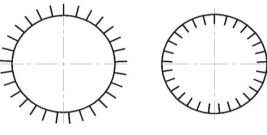
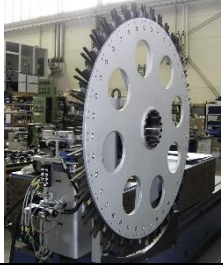
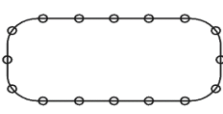
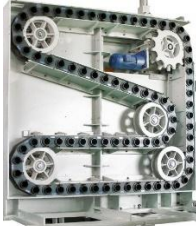
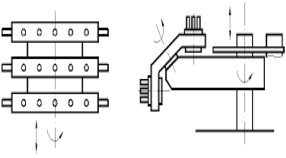
Уточняем задание, вычерчивая в координатах эскиз детали с изображением её положения и поверхности обработки (рис. 5.4) – с несколькими отверстиями небольшого диаметра, одним центральным отверстием и двумя пазами (горизонтальным и вертикальным).

Т а б л и ц а 5.2

## Элементы многооперационного станка

| Код<br>блока | Наименование                  |                                                | Графическое условное обозначение                                                    |                                                                                       |                                                                                       |
|--------------|-------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|              | блока                         | модуля                                         | Вид спереди                                                                         | Вид сбоку/фото                                                                        |                                                                                       |
| 0            | Неподвижный                   | Станина                                        |    |    |                                                                                       |
|              |                               | Основание                                      |    |    |                                                                                       |
|              |                               | Вертикальная стойка                            |    |    |                                                                                       |
|              |                               | Переходной корпус                              |    |    |                                                                                       |
| 1            | Шпиндельный                   | Шпиндельная бабка                              |   |    |                                                                                       |
|              |                               | Многошпиндельная головка с параллельными осями |    |    |                                                                                       |
|              |                               | Многошпиндельная головка с расходящимися осями |   |   |                                                                                       |
|              |                               | Шпиндельный барабан                            |  |  |                                                                                       |
| 2            | Координатный (поступательный) | Крестовый стол                                 | Каретка верхняя                                                                     |    |  |
|              |                               |                                                | Каретка нижняя                                                                      |    |  |
|              |                               | Каретка дополнительная                         |                                                                                     |    |  |
|              |                               | Координатная станина крестового суппорта       |                                                                                     |   |  |
|              |                               | Вертикальная координатная стойка               |                                                                                     |    |  |
|              |                               | Бабка задняя                                   |                                                                                     |   |  |

Продолжение табл. 5.2

|   |                           |                               |                 |                                                                                      |                                                                                       |
|---|---------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 3 | Координатный (поворотный) | Поворотный стол               |                 |     |    |
|   |                           | Универсальный поворотный стол |                 |    |    |
| 4 | Накопитель инструмента    | Поворотный резцедержатель     |                 |     |    |
|   |                           | Угловая револьверная головка  |                 |    |    |
|   |                           | Магазин инструментов          | Барабанный      |    |   |
|   |                           |                               | Дисковый        |  |  |
|   |                           |                               | Цепной          |  |  |
|   |                           |                               | Многосекционный |  |  |

Чертеж конкретной детали студент может выбрать сам или по заданию преподавателя.

Согласно принципам компоновки разбираем (табл. 5.2) многооперационный станок на блоки и их элементарные движения (конструктивные признаки):

- 0 – неподвижный блок;
- 1 – шпиндельный блок;
- 2 – координатный поступательный;
- 3 – координатный поворотный;
- 4 – накопители инструментов.

Составляем морфологическую матрицу (табл.5.3).

Т а б л и ц а 5.3

**Морфологическая матрица**

| Блоки                   |                                      |                                      |                            |                                  |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 0 – неподвижный         | 1 – шпиндельный                      | 2 – координатно-поступательный       | 3 – координатно-поворотный | 4 – накопитель инструмента       |
| 0.1 Станина             | 1.1 Шпиндельная бабка горизонтальная | 2.1 Станина крестового суппорта      | 3.1 Поворотный стол        | 4.1 Барабанный магазин           |
| 0.2 Основание           | 1.2 Шпиндельная бабка вертикальная   | 2.2 Коробка нижняя                   | 3.2 Универсальный          | 4.2 Цепной магазин               |
| 0.3 Вертикальная стойка | 1.3 Многошпиндельная головка         | 2.3 Вертикальная координатная стойка | 3.3. Нет                   | 4.3 Дисковый магазин             |
| 0.4 Сочетание 0.2 и 0.3 | –                                    | 2.4. Сочетание 2.1, 2.2, 2.3         | –                          | 4.3 Угловая револьверная головка |
| –                       | –                                    | –                                    | –                          | 4.4 Сочетание 4.2, 4.3           |
| –                       | –                                    | –                                    | –                          | 4.5 Нет                          |

В таблице матрицы не оговорено расположение координат и осей блоков, которые студент при выборе сочетания выбирает сам (горизонтальное, вертикальное, наклонное).

Принимая во внимание критерий минимума количества комплекта модулей для заданной детали, выбираем 3 – 4 варианта компоновки.

Пример выбора варианта по сочетанию: 0.2–1.1–2.4–3.3–4.3 дает компоновку (рис. 5.5), где 2.4 является сочетанием признаков 2.1, 2.2 и 2.3. Таким образом, компоновка станка предусматривает установку деталей (*D*) вертикально на основании 0.2, вынесенном отдельно.

Перемещение горизонтальной шпиндельной бабки 1.1 с угловой 4- позиционной револьверной головкой 4.3 (первая позиция – сверло для 8-ми одинаковых отверстий; 2-я позиция – борштанга для растачивания центрального отверстия; 3-я и 4-я позиции – фрезы концевые с диаметра-

ми, равными ширине пазов) осуществляется по координатам  $X$  и  $Z$  крестовым суппортом в виде каретки 2.2 и станины крестового суппорта 2.1. Вертикальное шпиндельное перемещение по координате  $Y$  осуществляется за счет использования вертикальной координатной стойки 2.3.

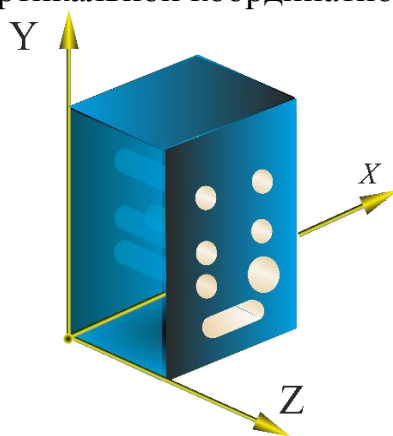


Рис. 5.4. Эскиз детали с её положением и поверхностями обработки

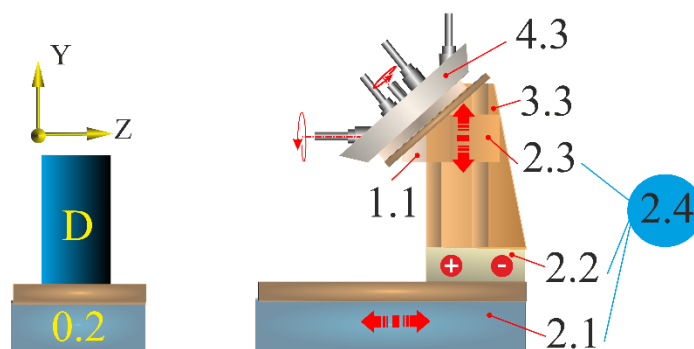


Рис. 5.5. Компоновка многооперационного станка

Для повышения жесткости и виброустойчивости многооперационных станков при снижении трудоемкости их изготовления, сокращения сроков проектирования необходимо учитывать **следующие особенности** [22]:

- Модульный принцип, предусматривающий агрегатно-блочное построение и позволяющий при минимальном количестве блоков (неподвижных, шпиндельных, координатных поступательных и поворотных, накопителей инструментов и других элементов станка) получать большое количество модификаций в зависимости от обрабатываемой детали и требований технологического процесса.
- Вертикальные перемещения целесообразно сообщать более легкому блоку, что позволяет уменьшить изменения положения центра тяжести станка.
- Блок, несущий шпиндель и совершающий главное движение, для повышения виброустойчивости и улучшения теплообмена желательно

располагать на стационарном блоке или на блоке, движущемся по этому звену.

- Блок, осуществляющий наибольшее перемещение, следует преимущественно размещать на неподвижном блоке и не в крайних положениях.

- При встраивании станка в автоматическую станочную систему обрабатываемые детали желательно располагать на неподвижном блоке (на крайнем звене).

- Нежелательно наличие больших и изменяющихся в процессе работы «вылетов» инструментов, «свешивающихся» столов и других подвижных частей.

- Одновременно с выбором расположения блоков должен решаться вопрос о расположении и схеме работы механизма автоматической смены инструмента (АСИ).

Примеры компоновок станков из восьми наименований модулей приведены на рис. 5.6 [1]. Полученные компоновки необходимо проанализировать с позиций технологических возможностей для решения задач заказчика. В общем случае – это сравнение известных или вновь предлагаемых компоновок по определенным признакам, например, общим критериям точности, жесткости, производительности, удобства обслуживания рабочей зоны, ремонтпригодности, возможности встраивания в транспортно-накопительную систему, возможности отвода стружки.

Процесс формирования компоновок находится в стадии постоянного развития и относительно устойчивое их многообразие формируется под влиянием опыта создания и эксплуатации производственных систем с использованием многооперационных станков.

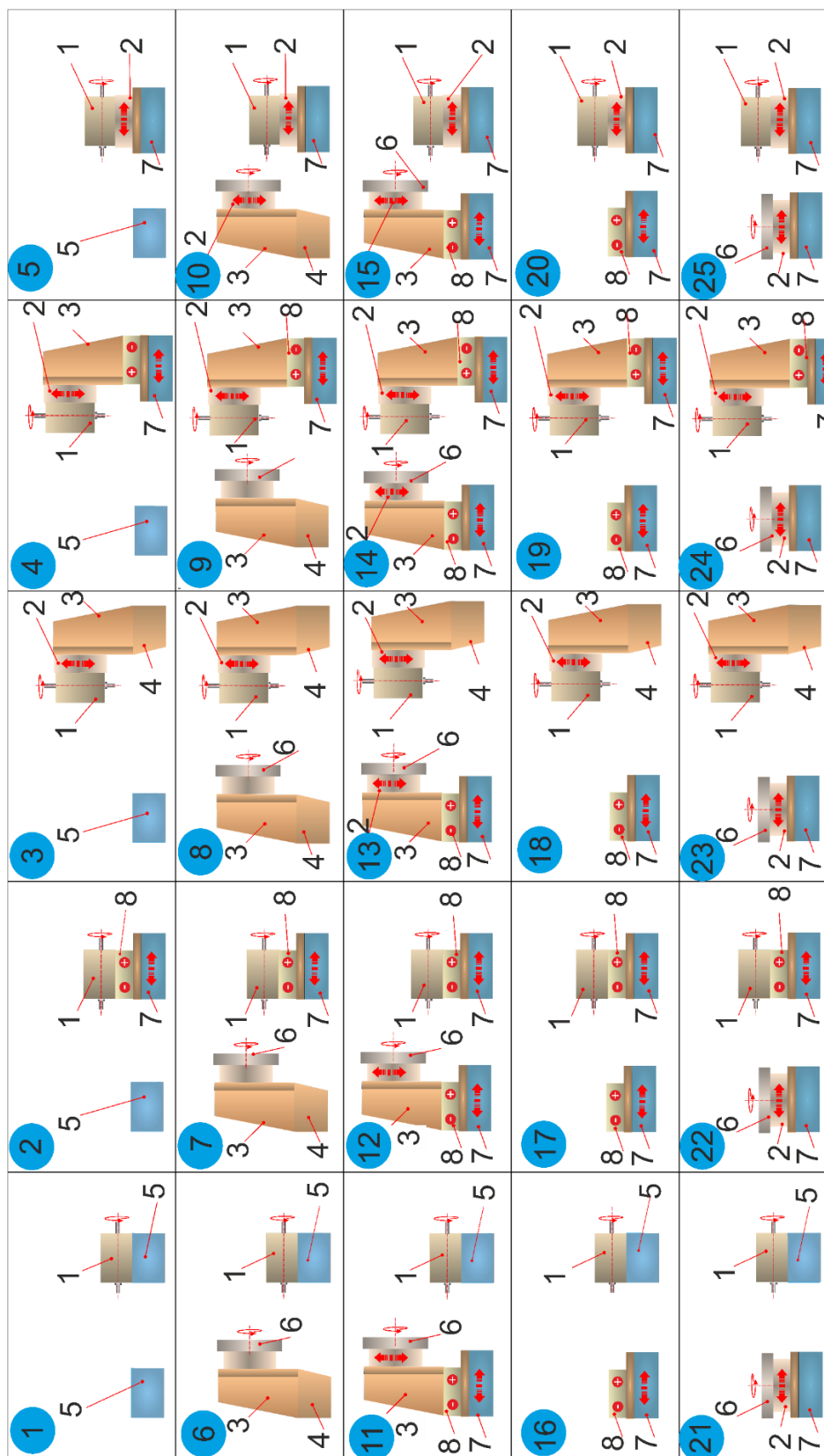


Рис. 5.6. Возможные варианты компоновок многооперационных станков из комплекта модулей: 1 – шпиндельная бабка; 2 – каретка с направляющими в нижней части; 3 – вертикальная стойка с направляющими для каретки; 4 – станина для крепления стойки; 5 – основание под обрабатываемые детали; 6 – поворотный стол; 7 – станина крестового стола с приводом подачи вдоль направляющих; 8 – верхняя каретка крестового стола с приводом подачи

### 5.3. Последовательность выполнения работы

1. Получить вариант задания для синтеза компоновки многооперационного станка (можно руководствоваться материалами из табл. 5.1 и Прилож. – рис. Б.1, Б.2, В.1, В.2, В.3), уточнить и доработать эскиз обрабатываемой детали.

2. Согласно принципам компоновки разделить (согласно табл. 5.2) многооперационный станок на блоки и их элементарные движения (конструктивные признаки).

3. Составить морфологическую матрицу станка с альтернативами исполнения необходимых блоков.

4. Используя в качестве критериев (показателей) оценки качества вариантов компоновки коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ , осуществить выбор рационального варианта с учетом выполнения требований при проектировании.

5. Изобразить эскиз синтезированного варианта модуля с обозначением осей координат и признаков блоков (из морфологической матрицы).

### 5.4. Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель и критерии при синтезе многооперационного станка?
2. Охарактеризовать принципы агрегатирования при создании станков.
3. Привести примеры графического изображения условных обозначений блоков и модулей компоновки станка.
4. Как составляется морфологическая матрица станка?
5. Какие основные особенности необходимо учитывать при проектировании многооперационного станка?

## Практическое занятие 6

### СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫЙ СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СМЕНЫ ИНСТРУМЕНТА

**Цель занятия:** освоение этапов системного анализа устройств автоматической смены инструмента (АСИ) для заданного многооперационного станка, синтеза новых технических решений, выбора лучшего варианта по заданному критерию качества.

#### 6.1. Теоретическое описание

От типа и конструкции устройств АСИ зависят точность установки инструмента (следовательно, и точность обработки детали), время смены инструмента (производительность), а также строение общей компоновки многооперационного станка. К устройствам АСИ предъявляются следующие основные требования [26]:

- быстроедействие;
- высокая надежность, точность и безударность перемещения;
- большая емкость магазина при минимальной занимаемой площади;
- компактное расположение в пределах общих габаритов станка;
- удобство обслуживания;
- безотказный контроль износа инструмента и его поломок, предотвращение инструмента от загрязнения и запыления;
- возможность ручной смены инструмента.

Конструктивное и компоновочное использование устройств АСИ зависит от типа станка, расположения шпинделя, количества и типов применяемого инструмента [18, 23, 36, 37]. Классификация устройств АСИ поясняется рис. 6.1. Револьверные шпиндельные головки (рис. 6.2, *а*) в последние годы применяются реже из-за ограниченного количества размещаемого в них инструмента и неточностей, вносимых индексацией головок, а также недостаточной их жесткостью. Сменные многошпиндельные головки (рис. 6.2, *б*) используют в многооперационных станках при изготовлении крупных серий деталей. Магазины шпиндельных гильз (рис. 6.2, *в*) лишены недостатков, свойственных револьверным шпиндельным головкам, но имеют высокую стоимость вследствие необходимости изготовления большого числа прецизионных шпиндельных узлов. Револьверные магазины с постоянным положением относительно шпинделя (рис. 6.2, *г*) содержат большее количество инструмента, чем револьверные шпиндельные головки, и позволяют размещать шпиндель любой длины. К их недостаткам следует отнести ограниченную емкость магазина, большой вылет шпинделя, снижающий точность обработки, а также существенное загро-

можение рабочей зоны станка. Магазины инструментов без автооператоров (рис. 6.2, *д*) требуют дополнительного радиального перемещения, что ограничивает их емкость и количество вариантов компоновок. Устройства с одним загрузочным оператором (рис. 6.2, *е*) получили широкое распространение. При повороте автооператор захватывает одновременно оправки с предыдущим и последующим инструментом, затем осевым перемещением выталкивает их из магазина и шпинделя, поворотом на  $180^0$  меняет местами и обратным осевым движением посылает предыдущий инструмент в магазин, который в компоновке нельзя располагать далеко от шпинделя. Магазин с автооператором на каждый инструмент (рис. 6.2, *ж*) имеет ограниченную емкость или же получается громоздким. Обслуживание устройства, расположенного в рабочей зоне, затруднено. Магазины с загрузочными и транспортными автооператорами (рис. 6.2, *з*) могут быть размещены на достаточном удалении от шпинделя, в удобном для обслуживания месте. Усложнение, связанное с дополнительным автооператором, компенсируется возможностью изготовления магазинов в виде независимых агрегатных узлов различной емкости. Устройства с автооператором-накопителем инструмента (рис. 6.2, *и*) применяют с целью исключения использования большого магазина и ускорения смены инструмента при повторяющемся применении наиболее характерного для данной детали режущего инструмента. В комбинированном устройстве (рис. 6.2, *к*) револьверную шпиндельную головку используют в сочетании с магазином *М*, из которого легкие инструменты автоматически загружаются поочередно в два противоположных шпинделя. В остальных шпинделях устанавливают тяжелые инструменты, закрепляемые вручную. В комбинированном устройстве со специализированными шпинделями (рис. 6.2, *л*) двухшпиндельная револьверная головка для легких инструментов автоматически загружается из магазина *М*, а шпиндель, предназначенный для тяжелых инструментов, загружают вручную или из особого магазина. Сочетание револьверной головки и магазина позволяет время смены инструмента свести к времени индексации головки, поскольку поиск и загрузка-разгрузка инструментов совмещены с работой станка. Специализация шпинделей позволяет приспособить их к условиям работы и уменьшить размеры магазина.

Классификация устройств АСИ по укрупненным признакам в зависимости от компоновки многооперационного станка и расположения инструментального магазина приведена в табл. 6.1 [1].

Из конструктивных разновидностей магазинов наиболее распространены дисковые и цепные (вследствие большой емкости и возможности различного размещения при компоновке на станке).

Условные изображения элементов и механизмов АСИ с обозначением движений приведены в табл. 6.2 [26].

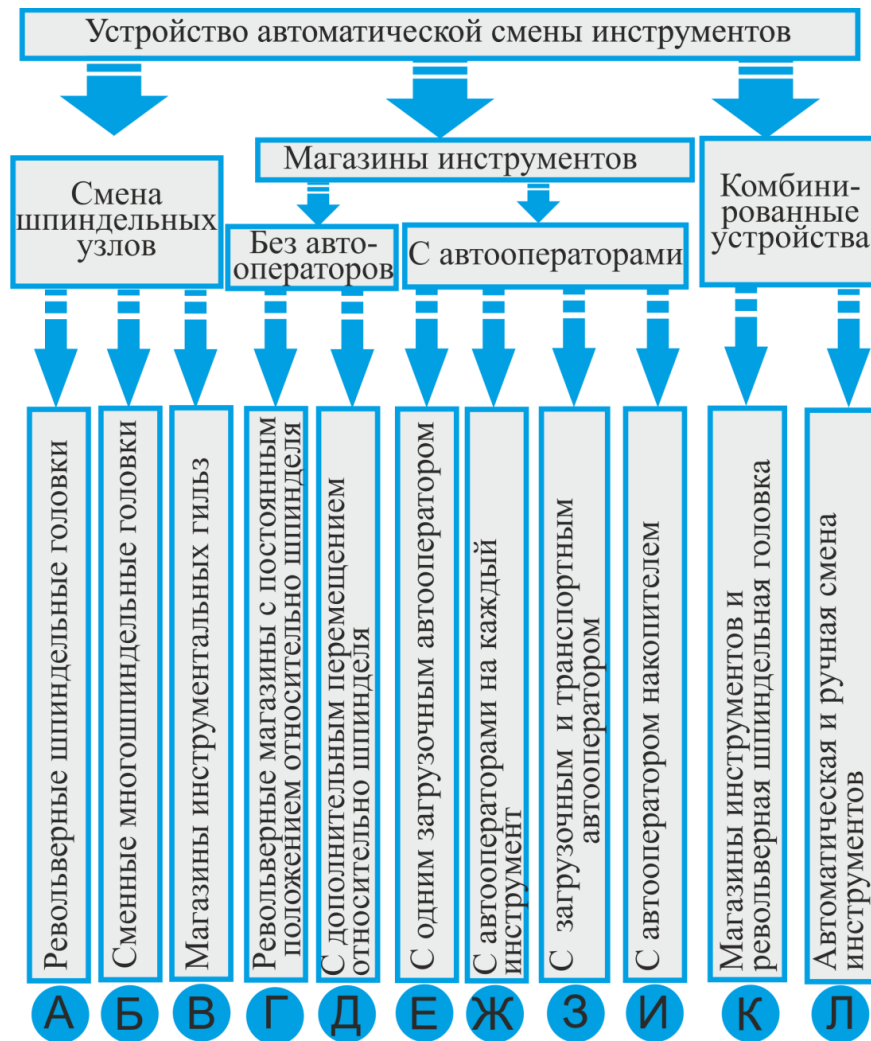


Рис. 6.1. Схема классификации устройств автоматической смены инструмента

Для решения задачи синтеза необходимо выделить основные конструктивные элементы – признаки накопителей устройств АСИ и рабочей зоны:

- Э1 – магазинный накопитель (МН);
- Э2 – промежуточный накопитель (ПН);
- Э3 – рабочий накопитель (РН);
- Э4 – рабочая позиция (РП).

Структурную схему устройства АСИ (рис. 6.3, а) представим графом (рис. 6.3, б).

Таким образом, структура устройства АСИ характеризуется множеством элементов  $C_T = Э1 + Э2 + Э3 + Э4 = \sum_{i=1}^4 Э_i$  и связей между ними

$C_B = C_{1-2} + C_{1-3} + C_{1-4} + C_{2-3} + C_{2-4} + C_{3-4} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=2}^4 C_{ij}$  , что в сочетании дает множество схем  $C_x$ .

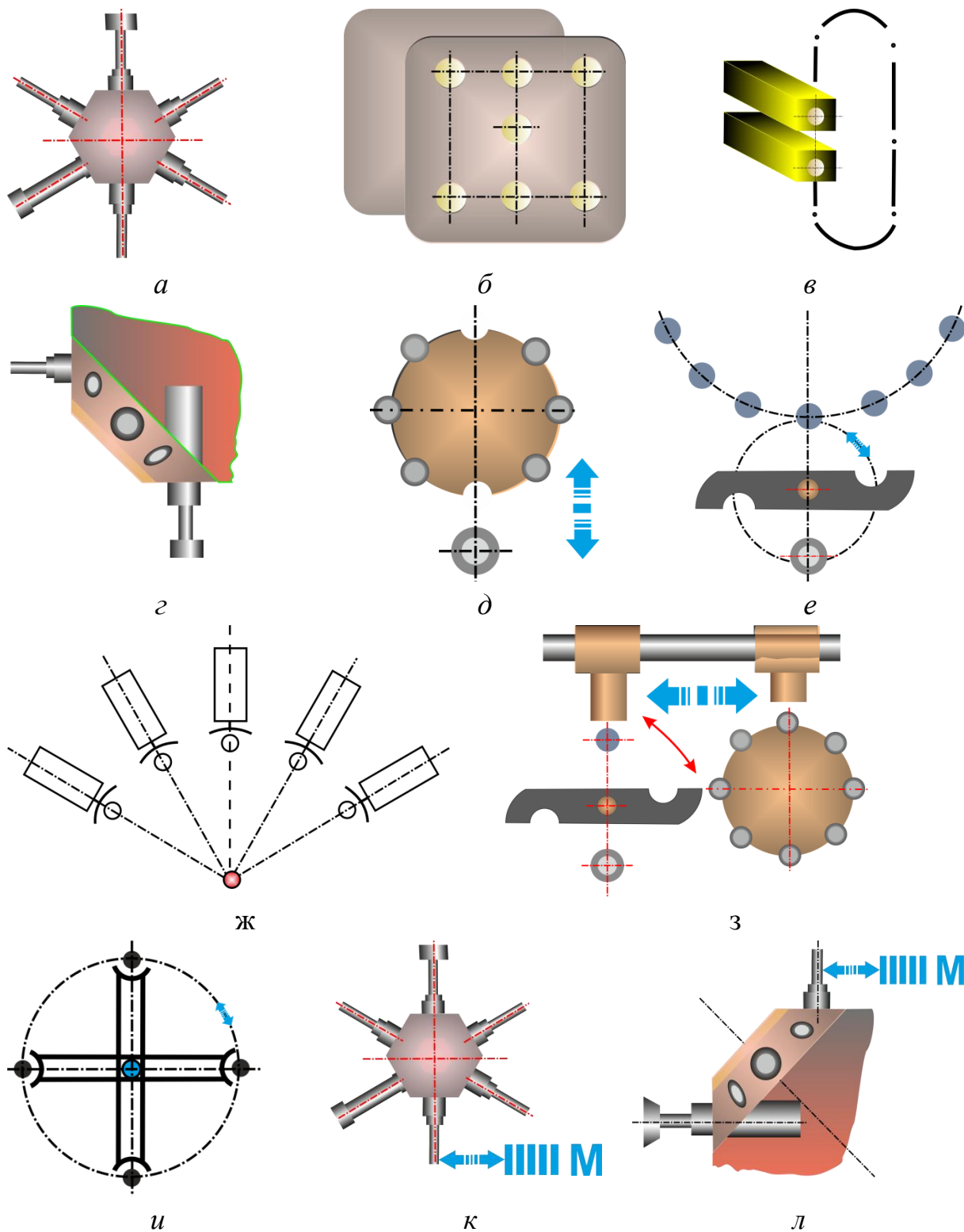
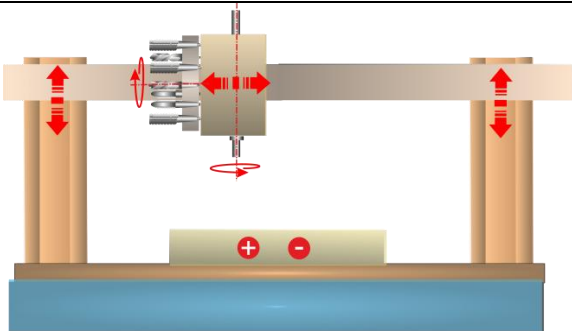
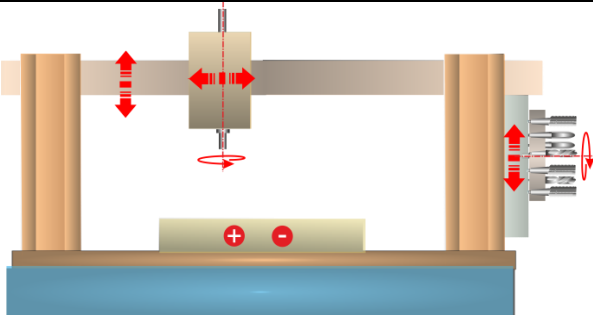
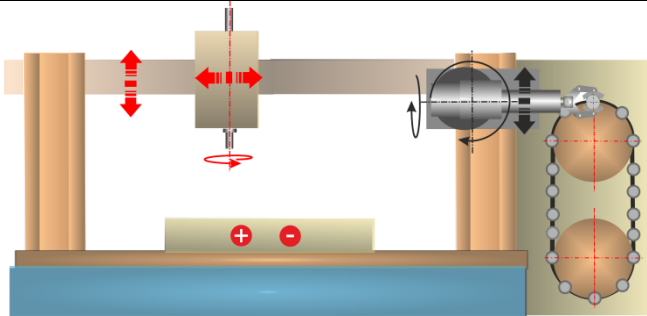


Рис. 6.2. Иллюстрации к схеме на рис. 6.1

Т а б л и ц а 6.1

Классификация устройств АСИ по укрупненным признакам

| Расположение<br>магазина | Станки с горизонтальным<br>шпинделем |       | Станки с вертикальным<br>шпинделем |       |
|--------------------------|--------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
|                          | Компоновки                           | Схема | Компоновки                         | Схема |
| На шпиндельной бабке     | 1.1                                  |       | 2.1                                |       |
| На стойке сверху         | 1.2                                  |       | 2.2                                | —     |
| На стойке сбоку          | 1.3                                  |       | 2.3                                |       |
| Рядом со станком         | 1.4                                  |       | 2.4                                |       |

| Расположение<br>магазина | Станки двухстоечные |                                                                                      |
|--------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                          | Компоновки          | Схема                                                                                |
| На шпиндельной<br>бабке  | 3.1                 |    |
| На<br>стойке<br>сверху   | 3.2                 | —                                                                                    |
| На стойке сбоку          | 3.3                 |  |
| Рядом со станком         | 3.4                 |  |

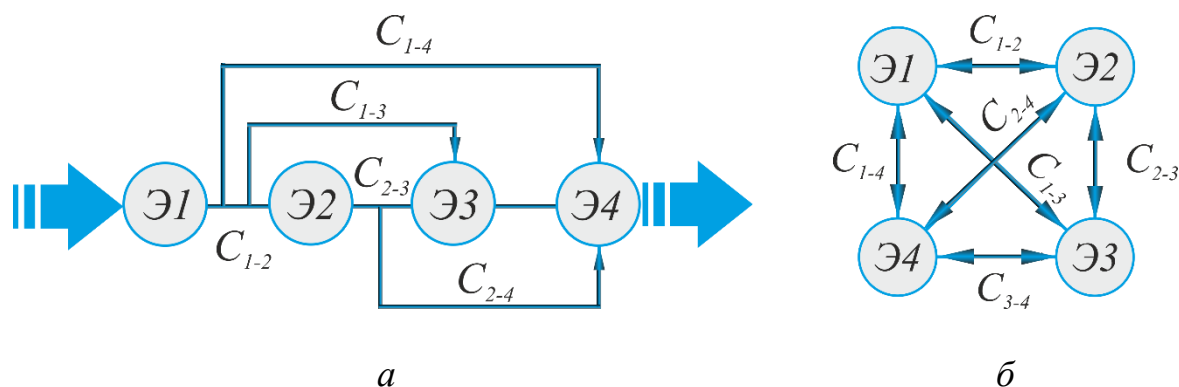


Рис. 6.3. Структурная схема компоновки (а) и граф (б) устройства автоматической смены инструментов

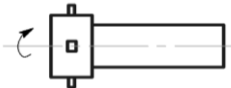
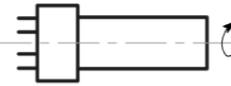
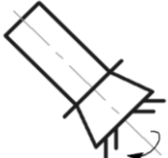
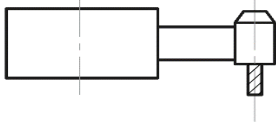
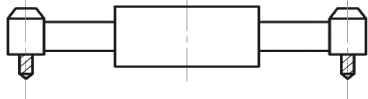
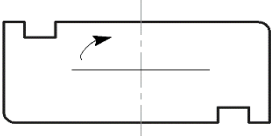
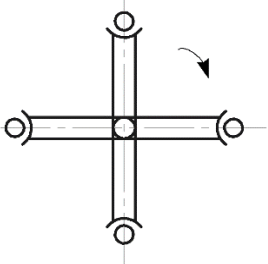
Составляем морфологическую матрицу структур (элементов) и связей (отношений) с различными альтернативами реализации каждой из них (табл. 6.3), включая не менее пяти вариантов (альтернатив) для каждого признака. При синтезе можно сократить количество признаков либо ввести дополнительные в зависимости от вида станка, для которого устройство АСИ синтезируется.

Т а б л и ц а 6.2

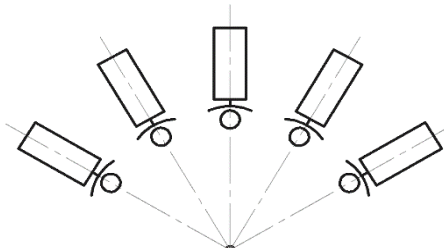
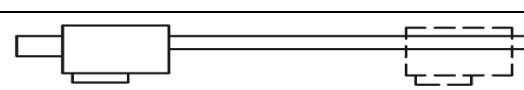
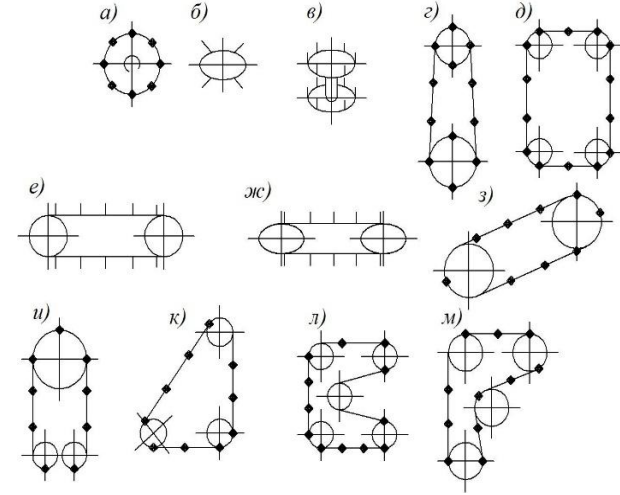
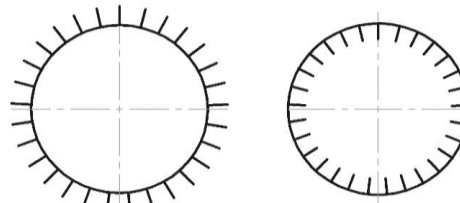
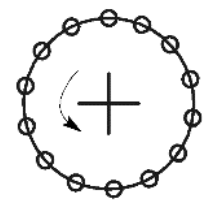
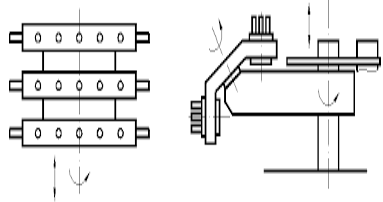
**Условные изображения элементов и механизмов АСИ**

| №<br>п/п | Условное изображение | Наименование        |                    |
|----------|----------------------|---------------------|--------------------|
| 1        |                      | Резцедержатель (РД) | Индивидуальный     |
| 2        |                      |                     | Четырехпозиционный |
| 3        |                      |                     | Двухпозиционный    |
| 4        |                      |                     | Шестипозиционный   |

Продолжение табл. 6.2

|    |                                                                                     |                           |                                |                             |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 5  |    | Револьверная головка (РГ) | Двухшпиндельная                | Тангенциальная              |
| 6  |    |                           | Многошпиндельная               | Радиальная                  |
| 7  |    |                           |                                | Аксиальная                  |
| 8  |   |                           |                                | Коническая<br>(типа короны) |
| 9  |  | Автооператор (АО)         | Однозахватный (с одной рукой)  |                             |
| 10 |  |                           | Двухзахватный (с двумя руками) |                             |
| 11 |  |                           |                                |                             |
| 12 |  |                           | Накопитель                     |                             |

Продолжение табл. 6.2

|    |                                                                                     |                           |                           |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 13 |    |                           | На каждый инстру-<br>мент |
| 14 |    |                           | Транспортный              |
| 15 |   | Магазин инструментов (МИ) | Цепной                    |
| 16 |  |                           | Дисковый                  |
| 17 |  |                           | Барабанный                |
| 18 |  |                           | Многосекционный           |

Т а б л и ц а 6.3

**Морфологическая матрица структур и связей  
с различными альтернативами реализации**

| Структура (элементы)                 |                                           |                                          |                           | Связи (отношения)                        |                                |                                |                                |                                |                          |
|--------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1-МН                                 | 2-ПН                                      | 3-РН                                     | 4-РП                      | МН ( $\Theta_1$ ) <sub>i</sub>           |                                |                                | ПН ( $\Theta_2$ ) <sub>c</sub> |                                | 10-РН с РП( $\Theta_4$ ) |
|                                      |                                           |                                          |                           | 5-ПН( $\Theta_2$ )                       | 6-РН( $\Theta_3$ )             | 7-РП( $\Theta_4$ )             | 8-РН( $\Theta_3$ )             | 9-РП( $\Theta_4$ )             |                          |
| $\Theta_1$                           | $\Theta_2$                                | $\Theta_3$                               | $\Theta_4$                | $C_{1-2}$                                | $C_{1-3}$                      | $C_{1-4}$                      | $C_{2-3}$                      | $C_{2-4}$                      | $C_{3-4}$                |
| 1.1 Магазин инструментов дисковый    | 2.1 Магазин инструментов дисковый         | 3.1 Резцедержатель 4-х позиционный       | 4.1 Конус шпинделя        | 5.1 Автооператор портный                 | 6.1 Автооператор однозахватный | 7.1 Автооператор однозахватный | 8.1 Автооператор однозахватный | 9.1 Непосредственно            | 10.1 Непосредственно     |
| 1.2 Магазин многошпиндельных головок | 2.2 Револьверная головка многошпиндельная | 3.2 Револьверная головка 2-х шпиндельная | 4.2 Гнездо резцедержателя | 5.2 Автооператор на карточный инструмент | 6.2 Автооператор двухзахватный | 7.2 Толкатель                  | 8.2 Автооператор двухзахватный | 9.2 Автооператор двухзахватный | 10.2 Толкатель           |
| 1.3 Нет                              | 2.3 Нет                                   | 3.3 Нет                                  | 4.3 Нет                   | 5.3 Нет                                  | 6.3 Нет                        | 7.3 Нет                        | 8.3 Нет                        | 9.3 Нет                        | 10.3 Нет                 |

В Севастопольском государственном университете (СевГУ) с целью повышения производительности за счет сокращения времени смены инструмента на основе приведенной методики синтеза разработан многооперационный станок (рис. 6.4) [3, 38]. В стойке 1 такого станка расположены шаговый двигатель  $M_1$ , а в верхней части – барабанный инструментальный магазин 2 на круговых направляющих 3. Электродвигатель  $M_1$  посредством зубчатой передачи (например, планетарной) обеспечивает поворот инструментального магазина 2, в нижней торцевой части которого с возможностью вращения от электродвигателя  $M_2$  установлены дисковые секции 4. Инструменты 5 размещены в пазах гильз 6 с ползунами 7, которые находятся в радиальных пазах нижней части 8 дисковой секции 4 с возможностью радиальных перемещений от шагового двигателя  $M_3$  посредством вращения червяка 10, кинематически связанного с четырьмя червячными

колесами 13 через пару винт 11 – гайка 12 с гильзами 6, в которых зафиксированы инструменты 5. Инструменты 5 рабочими частями обращены внутрь секции 4 магазина 4 под прямым углом к оси ее вращения и могут извлекаться из открытого снизу паза гильзы 6. Шпиндельный узел 9 расположен на стойке 1 с возможностью вертикальных перемещений. Приводы главного движения и подачи стола условно не показаны.

Установка инструмента в шпиндель осуществляется посредством поворота магазина 2 и секции 4 таким образом, чтобы необходимый инструмент 5 расположился хвостовиком к шпинделю, который при этом переводится в крайнее верхнее положение. Включается от  $M_3$  вращение червяка 10 и через червячные колеса 13 и ходовой винт 11 – гайку 12 ползуны 7 синхронно расходятся в радиальных направлениях, а требуемый инструмент устанавливается в отверстие шпинделя, где производится его автоматическая затяжка. После этого шпиндельный узел 9 опускается в рабочую зону для осуществления технологических операций. По окончании обработки шпиндельный узел перемещается в крайнее верхнее положение, при котором инструмент цилиндрической частью хвостовика устанавливается в ползуне 7 дисковой секции 4, где происходит его фиксация. Инструмент освобождается в шпинделе, а реверсивное движение от червяка 10 синхронно сводит ползуны 7 в радиальных направлениях. Шпиндель освобождается для установки другого инструмента, необходимого для осуществления технологического процесса.

Другая конструкция синтезированного в СевГУ многооперационного станка (патент UA 21763 A) содержит инструментальную систему, сочетающую в себе преимущества известных конструкций дисковых инструментальных магазинов и револьверных головок – достаточно большую емкость и быструю смену инструмента [29, 39]. Такой станок (рис.6.5) содержит станину 1, стол 2, колонну 3 со шпиндельной бабкой 4. Инструментальный блок выполнен в виде гильзы 5, в которой радиально по винтовой линии установлены в опорах 6 ведомые шпиндели 7 с инструментами 9 и приводными элементами 8 в виде конических зубчатых колес. Гильза 5 с возможностью винтового движения размещена внутри закрепленного на шпиндельной бабке цилиндрического копира 10 со сквозным винтовым пазом 11, угол подъема которого равен углу винтовой линии установки ведомых шпинделей 7 в гильзе 5. Ведомые шпиндели 7 взаимодействуют с поверхностями указанного паза копира 10.

Ведомый шпиндель 7 в рабочей позиции коническим зубчатым колесом 8 взаимодействует с конической шестерней 13 ведущего вала 12, связанного через компенсирующее устройство 14 с двигателем **М1**. Гильза 5 посредством шлицевого соединения связана с червячным колесом 15 и через червяк 16 – с шаговым двигателем **М2**, обеспечивающим поворот ука-

занной гильзы 5 на требуемый угол с одновременным осевым перемещением для установки необходимого инструмента в рабочую позицию.

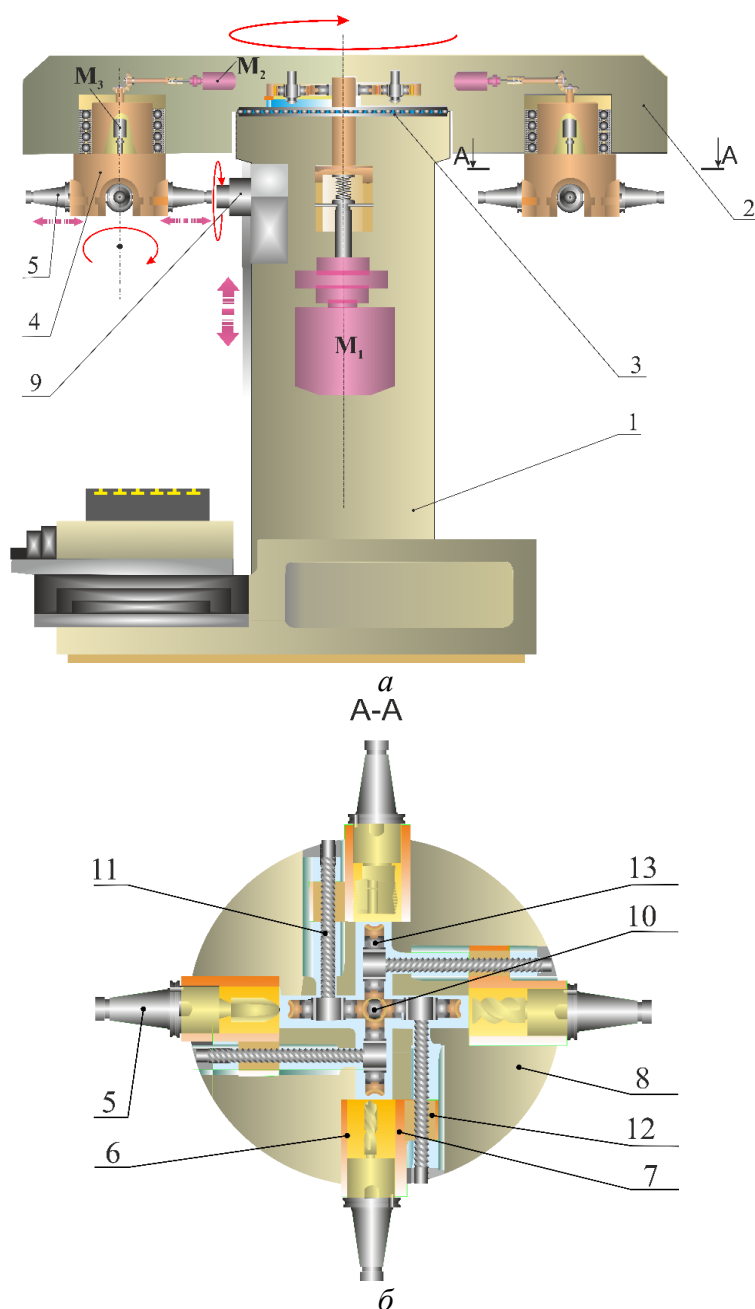


Рис. 6.4. Многооперационный станок с инструментальным барабанно-дисковым магазином (авт. свид. SU 1748990): *а* – общий вид; *б* – сечение А-А дисковой секции с ползунами

Такое выполнение инструментальной системы обеспечивает значительную емкость инструментов при сравнительно небольших габаритах, высокое быстродействие, простоту конструкции и надежность.

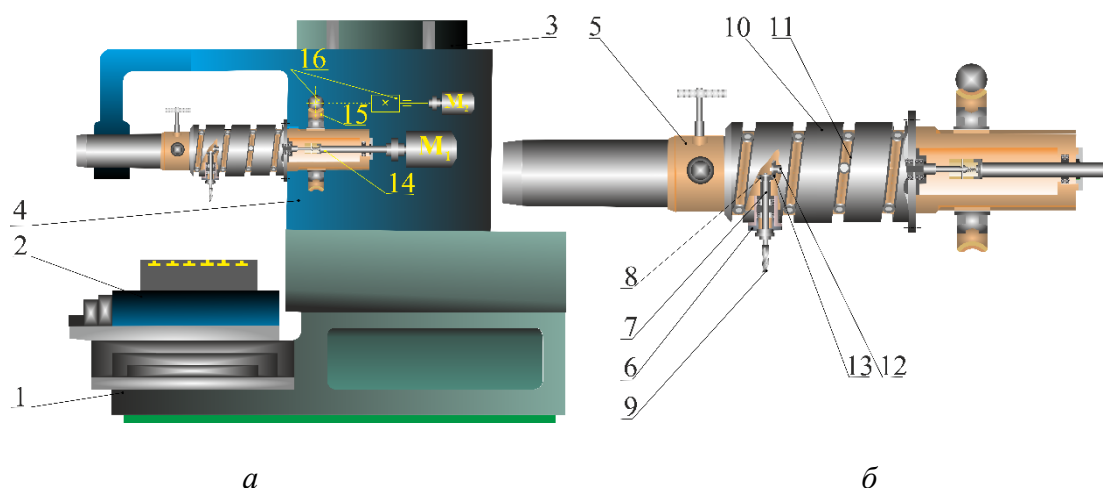


Рис. 6.5. Многооперационный станок с инструментальным блоком в виде гильзы (патент 21763 UA): *а* — общий вид; *б* — гильза с расположенными по винтовой линии ведомыми шпинделями с инструментами

В СевГУ также разработан многоцелевой станок (патент 53965 UA), содержащий станину, шпиндельную бабку, магазин в виде инструментальной цепи со звездочками и поддерживающими роликами, привод цепи, механизм автоматической смены инструмента [30, 37]. Инструментальная цепь со звездочками, поддерживающими роликами и приводом цепи размещается на торцевой поверхности поворотного диска и выполнена в виде укороченной гипоциклоиды с числом звездочек у её вершин не менее четырех и с тем же числом поддерживающих роликов у её впадин. Указанный поворотный диск установлен на станине станка и соосно соединен с мальтийским механизмом, связанным с приводом вращения поворотного диска, причем, число пазов в мальтийском механизме равно числу звездочек инструментальной цепи.

Станок (рис. 6.6) работает следующим образом. По команде на смену инструмента манипулятор 14 извлекает из шпинделя 4 отработавший инструмент 5. При этом находящийся в одной из ячеек инструментальной цепи 9 новый инструмент, который должен быть использован в технологическом процессе обработки, идентифицируется с помощью системы носителя кода с датчиком его считывания и посредством включения привода цепи ( $M_2 - 12$ ) через вал 13 вращает звездочку 10 ( $S_{ш}$ ) до тех пор, пока новый инструмент по кратчайшей траектории не окажется в одной из перегрузочных позиций (*A*, *B*, *C* или *D*). В случае нахождения его в позиции *A* манипулятор 14 извлекает инструмент из ячейки цепи 9, устанавливает в неё отработавший инструмент, а новый помещает в шпиндель 4 шпиндельной бабки 3, которая после этого опускается в рабочую зону для обработки детали, закрепляемой на продольно-поперечном столе 2.

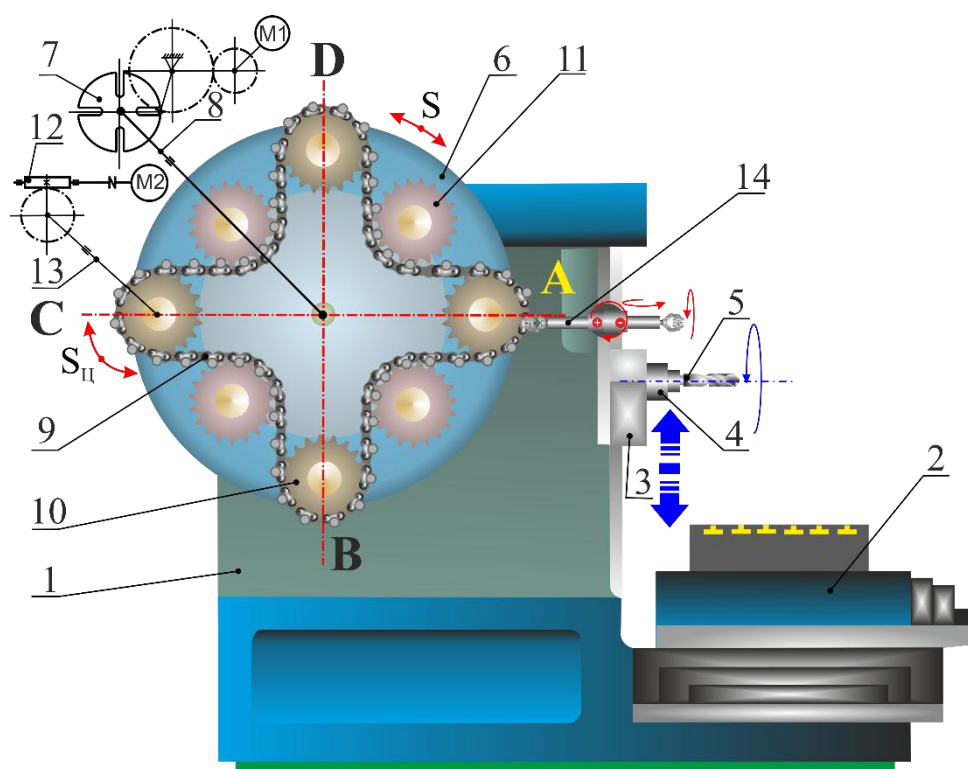


Рис. 6.6. Многооперационный станок с барабанно-цепным инструментальным магазином (патент 53965UA)

Если новый инструмент при поиске оказывается в перегрузочных позициях *B*, *C* или *D*, то подается сигнал на соответствующее включение привода вращения поворотного диска 6 ( $M_1$ , мальтийский механизм 7, вал 8) соответственно на 1/4, 2/4 или 3/4 оборота (*S*), чтобы указанный инструмент был перемещен в перегрузочную позицию, доступную для манипулятора 14 (при этом позиции *B*, *C* или *D* соответственно совпадут с позицией *A* на рис. 6.5). Дальнейшие действия по извлечению нового инструмента из ячейки инструментальной цепи 9 и установке его в шпиндель 4 аналогичны описанному выше.

Такое выполнение инструментального магазина позволяет повысить производительность и упростить поиск инструмента, уменьшить габариты при достаточно высокой емкости за счет возможности размещения его на колонне станка, а также (при необходимости) и в верхней части над станком. Имеется возможность выполнения инструментального магазина с разным количеством вершин гипоциклоиды (например, 5 или 6), что позволит значительно увеличить емкость при тех же внешних габаритах.

Вышеописанные примеры разработанных структур устройств АСИ многооперационных станков подтверждают возможность продолжения творческого поиска в данном направлении с достижением успешных результатов при использовании системно-морфологических методов проектирования.

## Варианты заданий

| № п/п | Вид обработки                 | Критерии оценки качества вариантов          |
|-------|-------------------------------|---------------------------------------------|
| 1     | Токарная                      | <i>a</i> – Точность установки и обработки   |
|       |                               | <i>b</i> – Быстродействие                   |
|       |                               | <i>v</i> – Минимальное рабочее пространство |
| 2     | Токарно-фрезерная             | <i>a</i> – Точность установки и обработки   |
|       |                               | <i>b</i> – Быстродействие                   |
|       |                               | <i>v</i> – Минимальное рабочее пространство |
|       |                               | <i>z</i> – Большая емкость магазина         |
| 3     | Токарно-сверлильно-фрезерная  | <i>a</i> – Точность установки и обработки   |
|       |                               | <i>b</i> – Быстродействие                   |
|       |                               | <i>v</i> – Минимальное рабочее пространство |
|       |                               | <i>z</i> – Большая емкость магазина         |
| 4     | Сверлильно-расточная          | <i>a</i> – Точность установки и обработки   |
|       |                               | <i>b</i> – Быстродействие                   |
|       |                               | <i>v</i> – Минимальное рабочее пространство |
|       |                               | <i>z</i> – Большая емкость магазина         |
| 5     | Фрезерно-сверлильно-расточная | <i>a</i> – Точность установки и обработки   |
|       |                               | <i>b</i> – Быстродействие                   |
|       |                               | <i>v</i> – Минимальное рабочее пространство |
|       |                               | <i>z</i> – Большая емкость магазина         |
| 6     | Шлифовальная                  | <i>a</i> – Точность установки и обработки   |
|       |                               | <i>b</i> – Быстродействие                   |
|       |                               | <i>v</i> – Минимальное рабочее пространство |
|       |                               | <i>z</i> – Большая емкость магазина         |

## 6.3. Последовательность выполнения работы

1. Получить вариант задания на синтез устройств АСИ и компоновки станка для предложенного вида механической обработки (табл. 6.4) и критерия оценки качества вариантов.

2. Составить структурную схему устройства АСИ для заданного варианта.

3. Составить морфологическую матрицу структур элементов устройства АСИ и связей с различными альтернативами реализации каждой из них.

4. Используя заданный критерий оценки качества вариантов компоновки, осуществить выбор рационального варианта устройства АСИ с учетом особенностей выбранной компоновки станка (прилож. – рис. В.1, В.2, В.3).

5. Изобразить эскиз синтезированного структурного варианта многооперационного станка с рациональным вариантом устройства АСИ.

### **5.5. Вопросы для самоконтроля**

1. Какие основные требования предъявляются к устройствам АСИ многооперационных станков?
2. По каким признакам классифицируют устройства АСИ?
3. Пояснить структурную схему и граф устройства АСИ.
4. Привести примеры условных изображений элементов и механизмов устройств АСИ.
5. Охарактеризовать принцип действия устройств АСИ в новых многооперационных станках (рис. 6.4, 6.5, 6.6).

## Практическое занятие 7

### ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ ОПИСАНИЯ КОМПОНОВОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Цель занятия:** освоение методики применения структурных формул для описания компоновок технологического оборудования.

#### 7.1. Теоретическое описание

Структурная формула – это определенная последовательность символов, обозначающих блоки компоновки, раскрывающая координатную принадлежность и способ сочетания блоков.

Для технологического оборудования с ЧПУ применяется система обозначения осей координат ISO (рис. 7.1, а). Особенность ее в том, что ось координат  $Z$  принимают всегда параллельной оси главного движения станка независимо от того, как она расположена – вертикально или горизонтально. Эта особенность позволяет системе ЧПУ для наиболее распространенной плоской обработки использовать в программах обозначение координат через  $X$  и  $Y$  независимо от расположения оси шпинделя (рис. 7.1, б, в). При положительном направлении оси принимают направление от заготовки к инструменту. Ось  $X$  – всегда горизонтальна. Дополнительные движения, параллельные осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , обозначают соответственно  $U$ ,  $V$ ,  $W$  (вторичные) и  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  (третичные). Вращательные движения вокруг осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  обозначают соответственно  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , а дополнительные –  $D$  и  $E$ . Вращение главного шпинделя обозначают буквой  $C$  (иногда через  $S$  – spindle). Если в компоновке одновременно есть шпиндели заготовки и инструмента, то первый считают главным ( $C$ ), а вращения второго –  $A$  (ось  $X$ ),  $B$  (ось  $Y$ ),  $D$  (ось  $Z$ ). Главное движение помечают знаком  $\wedge$  над соответствующей буквой, например,  $C^\wedge$  или  $D^\wedge$ . Стационарный блок помечают знаком 0 (отсутствует движение) [18, 23, 36, 37].

Основное правило записи расположения блоков: от заготовки (крайний слева) – к инструменту (крайний справа). Индексами  $h$  и  $v$  обозначают соответственно горизонтальную и вертикальную оси, горизонтальную ось можно обозначить подчеркиванием знака блока ( $\underline{Z}$  или  $\underline{C}$ ). Нижний индекс  $v/h$  при знаке шпиндельного блока проставляют, если ось шпинделя поворотная. Если ось имеет только два крайних положения, то обозначают –  $v$ ,  $h$ . При последовательном соединении блоков (рис. 7.2, а, в) используется знак « $\times$ », который для упрощения записи опускается или заменяется точкой « $\cdot$ », параллельно соединенные блоки (рис. 7.2, г) записывают в кавычках со знаками «+», если блоки одинаковы, то вместо скобок их число записывают цифрой перед соответствующим обозначением [18, 23].

Структурные формулы компоновок могут иметь разнообразные степени уточнения:  $K_1$  – координатная;  $K_2$  – базовая;  $K_3$  – конструкционная [18, 23].

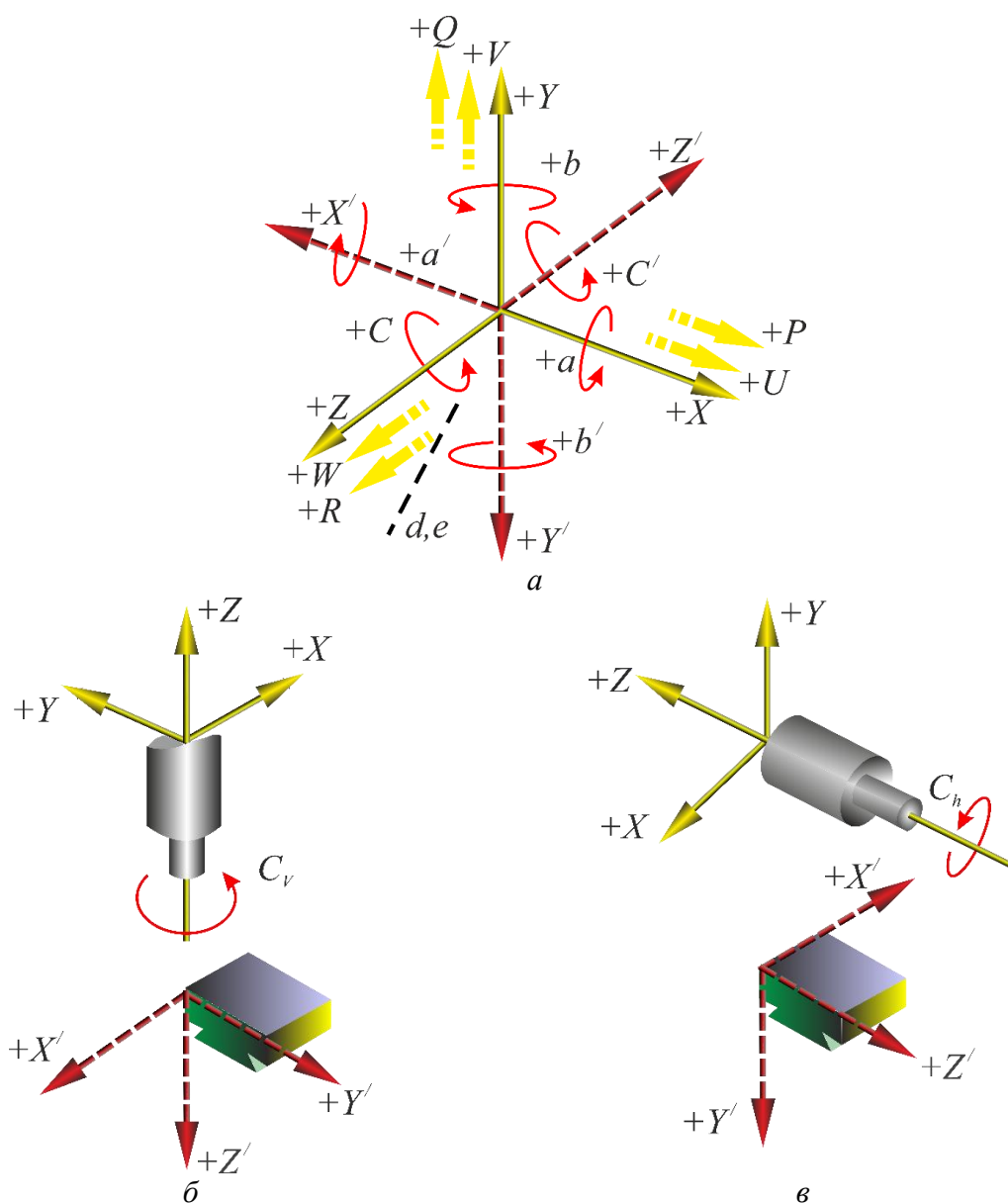


Рис. 7.1. Обозначения координатных осей и движений многооперационных станков:  $a$  – поступательных и вращательных;  $b$  и  $b'$  – направления осей для компонок с горизонтальным и вертикальным шпинделем

Например, для фрезерного модуля (рис. 7.2,  $a$ ) с общей формулой структуры  $XYZ0C$ , чаще всего пользуются обозначением координатной компоновки  $K_1 - XYZ0C_v$ .

Агрегатное построение компоновки может быть отображено в формуле взятием в квадратные скобки конструктивных модулей, которые представляют собой агрегатные узлы и другие единицы унификации, и включают один, два или более блоков компоновки. Конструктивными моду-

лями могут быть, например, стол и станина продольно фрезерного станка, шпиндельные бабки, агрегатные силовые головки и т.д. Разделение компоновки на конструкционные модули в отличие от деления на координатные блоки может проходить не только по направляющим, но и по разъемам частей блоков.

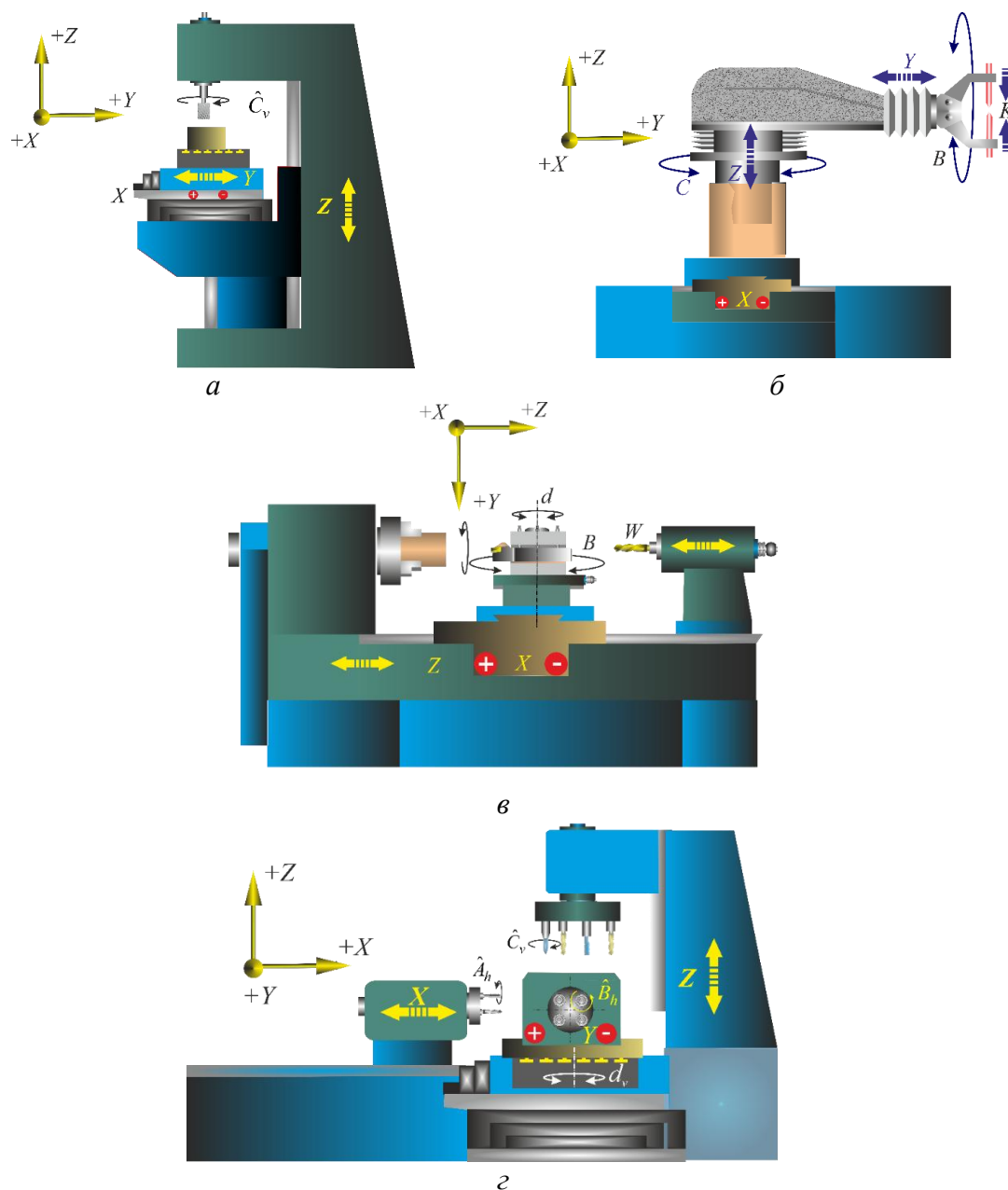


Рис. 7.2. Компоновка технологического оборудования с указанием координатных осей и движений: *a* – фрезерного станка; *б* – промышленного робота; *в* – токарного станка; *г* – агрегатно-сверлильного станка

Следовательно, части одного блока, например, стационарного, могут принадлежать разным модулям [22, 23]. Например, если формула координатной компоновки агрегатно-сверлильного станка (рис. 7.2, *г*)

$d_v 0(Z4\hat{C}_v + Y4\hat{B}_h + X2\hat{A}_h)$ , то формула базовой компоновки с обозначением конструкционных модулей будет:

$$d_v 0 \left[ 0Z4\hat{C}_v \right] + \left[ 0Y4\hat{B}_h \right] + \left[ 0X3\hat{A}_h \right] .$$

Съемную оснастку, которая развивает кинематическую структуру обрабатывающего модуля, такую, как накладные головки и столы, делительные устройства, можно рассматривать как конструкционные модули и в случае необходимости записывать в квадратных скобках на соответствующем конце формулы компоновки.

В формулах конструкционных компоновок многопозиционного технологического оборудования принадлежность блоков тем или другим позициям может быть намечена при знаках блоков или в скобках римскими цифрами в виде индексов, например:

$$\left[ d_v^{I-IV} 0 \right] \left[ 0Z \ 2\hat{C}_v^{II} + 2\hat{C}_v^{III} \right] + \left[ 0Y4\hat{B}_h \right]^{III} + \left[ 0X3\hat{A}_h \right]^{IV} .$$

Способ обозначения компоновок технологического оборудования может быть распространен на другие машины, действие которых связано с координатными перемещениями узлов: контрольно-измерительные машины, промышленные работы и др.

Например, формула координатной компоновки промышленного робота (рис. 7.2, б):

$$KY / B_h ZC_v X 0 ,$$

где  $K$  – движение схвата промышленного робота.

Для станочных систем целесообразно использовать сокращенную запись, в которой станок и агрегаты системы обозначают одной буквой с указанием номера позиции ( $P^I, P^{II}, \dots$ ). Каждое из таких обозначений может быть расшифровано отдельно с помощью структурных формул компоновок. При этом продольную ось обозначают через  $X$ , поперечную –  $Y$ , вертикальную –  $Z$  (они могут не совпадать с осями координат станков). Положительным считают направление оси  $X$  по направлению последовательности операций в начале системы; оси  $Z$  – вверх, оси  $Y$  – влево, если смотреть вдоль  $+X$ . Отрицательные направления обозначают знаком «–». Прописными буквами  $x, y, z$  и  $a, b, c$  без индексов обозначают только направления движений.

Для обозначения станочных систем из двух параллельных участков (рис. 7.3, а) и трех многопозиционных станков (рис. 7.3, б) запишем структурные формулы компоновок:

$$BC_1 = xP^I P_h^{II} \left[ x(P^{III} P^{IV} P^V P^{VI} P^{VII}) + x(P^{VIII} P^{IX} P^X P^{XI} P^{XII}) \right] P_h^{XIII} P^{XIV};$$

$$BC_2 = P_3^I xP^{II-V} P^{VI-IX} P^{X-XIII} xP_p^{XIV} .$$

Возможна и другая запись структурных формул компоновок технологического оборудования, если систему  $X, Y, Z$  заменить системой  $X_3, X_2, X_1$  а поворотные блоки ( $a, b, c$ ) обозначить через  $X_{01}, X_{02}, X_{03}$ , например, вместо  $XYZ0C_v$  и  $XZY0C_h$  (изменены места расположения знаков  $Y$  и  $Z$ ) получим  $X_3X_2X_10X_{01}$  и  $X_3X_1X_20X_{02}$ . Если перейти к цифровой системе, поставив цифровые индексы вместо букв  $X$ , то получим для вертикального и горизонтального консольно-фрезерного оборудования такую запись: 3.2.1.0.01 и 3.1.2.0.02, где блоки 1 – вертикально-подвижный; 2 – поперечно-подвижный; 0 – стационарный; 01 и 02 – вертикальный и горизонтальный шпиндели оборудования.

Для обозначения режимов работы обрабатывающих модулей можно использовать табл. 7.1. Количественный анализ структуры компоновок основан на определении числа блоков и элементарных движений, которые содержатся в компоновке, его целью является универсальность структуры и степень ее возможного использования.

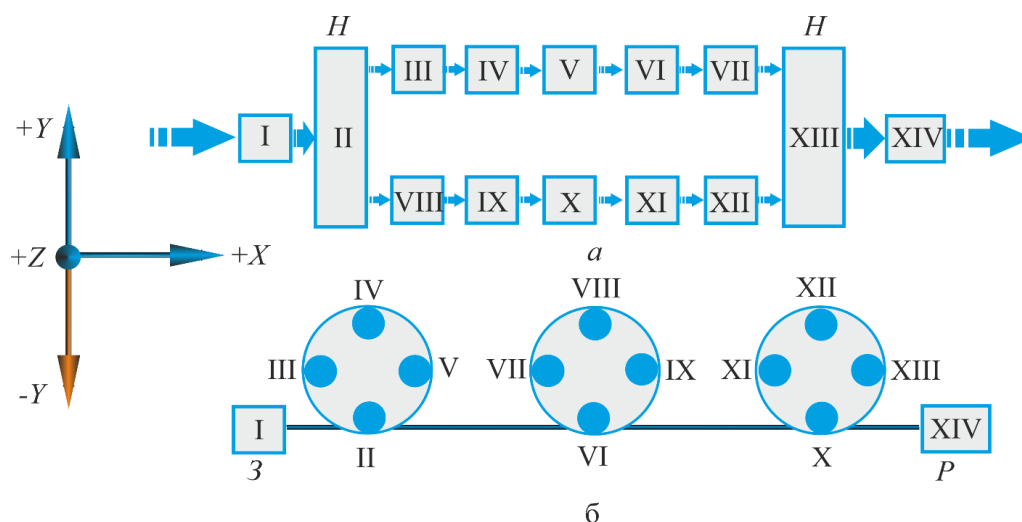


Рис. 7.3. Компоновка обрабатывающих гибких производственных систем:  
З – загрузочная позиция; Р – разгрузочная позиция; Н – накопитель

Формула компоновки позволяет определить:

- общее число движений  $d$ ;
- общее число блоков  $u$ ;
- число подвижных блоков  $u_d = u - 1$  (причем в отдельных случаях  $u_d < d$  за счет совмещения в одном блоке двух движений).

Если исключить из  $d$  число дублирующих движений  $d_{дубл}$ , то получим  $k_d = d - d_{дубл}$  – количество степеней свободы (относительных координатных перемещений инструмента и заготовки) [22].

Т а б л и ц а 7.1

## Режимы подвижных блоков многооперационных станков

| Условное наименование  | Обозначение | Применение в станках                            | Пример обозначения     |
|------------------------|-------------|-------------------------------------------------|------------------------|
| Независимый            | 0           | Главное движение независимое                    | $\hat{X}^0, \hat{A}^0$ |
|                        |             | Осциллирующая подача                            | $X^{0C}, A^{0C}$       |
|                        |             | Установочный отскок                             | $x^{0M}, a^{0M}$       |
| Периодический          | 1           | Главное движение однократное                    | $\hat{X}^i, \hat{A}^i$ |
|                        |             | Подача и отрезание периодическое                | $X^1, A^1$             |
|                        |             | Установочная индексация и раздел                | $x^1, a^1$             |
| Позиционный (ЧПУ – Ф2) | 2           | Главное движение формообразования равномерное   | $\hat{X}^2, \hat{A}^2$ |
|                        |             | Позиционная подача и врезание равномерные       | $X^2, A^2$             |
|                        |             | Позиционная координатная установка              | $x^2, a^2$             |
| Контурный (ЧПУ – Ф3)   | 3           | Главное движение формообразования неравномерное | $\hat{X}^3, \hat{A}^3$ |
|                        |             | Подача контурная неравномерная                  | $X^3, A^3$             |
|                        |             | Вспомогательная контурная установка             | $x^3, a^3$             |

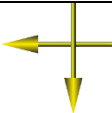
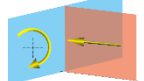
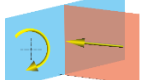
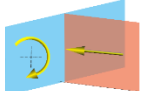
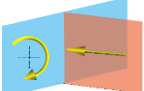
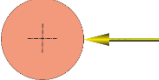
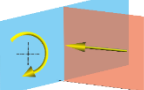
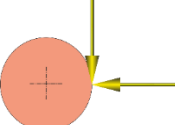
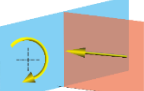
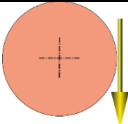
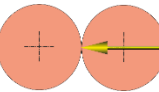
Об универсальности структуры компоновки можно косвенно судить по размерам  $d$ ,  $u_d$ , и  $k_d$ , однако более действенная оценка нуждается в анализе возможных соединений движений при обработке деталей, а для этого используем понятие технологического модуля (ТМ), как наименьшего состава блоков компоновки, необходимых для выполнения операций формообразования. ТМ должен состоять по меньшей мере из двух блоков – подвижного и стационарного, потому что без этого невозможно относительное движение заготовки и инструмента. Для определения и обозначения ТМ можно воспользоваться кинематическими схемами резания по Г.И. Грановскому (табл. 7.2) [23]. Например, технологический модуль  $TM_{401} = 0Z\hat{C}_h$  имеет поступательное движение  $Z$ , направленное вдоль оси вращательного движения  $C$ .

Различные распределения движений создают варианты технологических модулей, реализуемых в станках различных компоновок и типов. При этом число  $n$  перестановок из  $r$  элементов ( $n = r$ ) будет  $P_n^r = n!$ . В нашем примере для  $TM_{401} = 0Z\hat{C}$  число перестановок будет  $P(3.3) = 3! = 6$ .

На практике известны четыре компоновки, отвечающие приведенным в табл. 7.3. Во всех этих вариантах являются неизменными характер относительного движения и кинематические схемы резания.

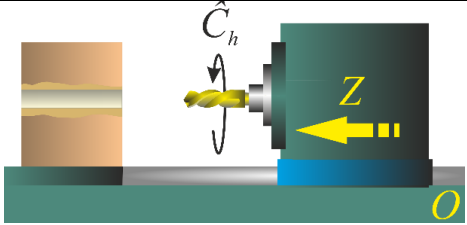
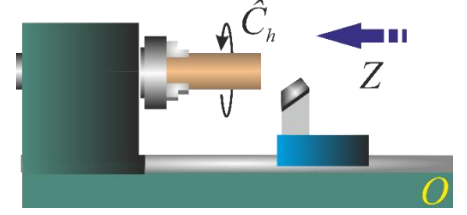
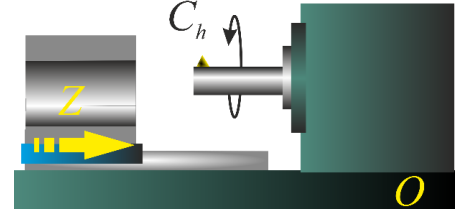
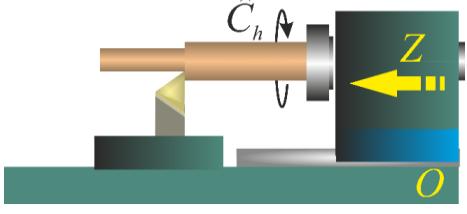
Т а б л и ц а 7.2

**Кинематические схемы резания**

| Схема резания                                                                       | Код схемы | Вид обработки                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------|
|    | 101       | Строгание, протягивание                                     |
|    | 203       | Резка ленточными пилами                                     |
|    | 402       | Конусное точение                                            |
|    | 501       | Фрезерование тел вращения                                   |
|    | 503       | Кромочное фрезерование тел вращения                         |
|  | 701       | Объемное фрезерование дугowymi строками                     |
|  | 301       | Протягивание круговых сегментов                             |
|  | 401       | Сверление, точение, растачивание                            |
|  | 403       | Торцевое фрезерование и точение                             |
|  | 615       | Объемное фрезерование пальцевыми фрезами, контурное точение |
|  | 619       | Контурное цилиндрическое фрезерование                       |
|  | 703       | Фрезерование барабанных кулачков                            |
|  | 405       | Цилиндрическое фрезерование                                 |
|  | 719       | Фрезерование дисковых кулачков                              |

Т а б л и ц а 7.3

Структуры компоновок станков по  $TM401=0Z\hat{C}_h$ 

| Вариант технологического модуля | Структура компоновки                                                                | Тип станка                           |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| $0Z\hat{C}_h$                   |    | Горизонтально-сверлильный            |
| $\hat{C}_h0Z$                   |    | Токарный                             |
| $Z0\hat{C}_h$                   |   | Горизонтально-расточный              |
| $\hat{C}_hZ0$                   |  | Токарный автомат продольного точения |

Примеры вариантов и структурных формул компоновок многооперационных станков для обработки корпусных деталей, полученные на основе комплектов модулей (рис. 5.7), представлены на рис. 7.4 [1, 10].

## 7.2. Последовательность выполнения работы

1. Получить вариант заданной компоновки многооперационного станка (комплекса, ГПС, промышленного робота) [36, 37] (прил. – рис. В.1, В.2, В.3).
2. Обозначить координатные оси и все движения для заданного варианта.
3. Записать структурную формулу заданной компоновки либо сделать эскиз компоновки технологического оборудования по заданной структурной формуле.
4. Сформулировать выводы по выполненной работе.

|                            |                           |                            |                            |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                            |                           |                            |                            |
| <b>AYXZOC<sub>h</sub></b>  | <b>AYZXOC<sub>h</sub></b> | <b>DYOZXC<sub>h</sub></b>  | <b>AYOXZC<sub>h</sub></b>  |
|                            |                           |                            |                            |
| <b>BDZXOYC<sub>h</sub></b> | <b>BZXOYC<sub>h</sub></b> | <b>BAZOXYC<sub>h</sub></b> | <b>BDXOZYC<sub>h</sub></b> |
|                            |                           |                            |                            |
| <b>BXOZYC<sub>h</sub></b>  | <b>OXZYC<sub>h</sub></b>  | <b>XYOZC<sub>v</sub></b>   | <b>DAXYOZC<sub>v</sub></b> |
|                            |                           |                            |                            |
| <b>DXYOZC<sub>v</sub></b>  | <b>OXYOZC<sub>v</sub></b> | <b>OXYOZC<sub>v</sub></b>  | <b>OZXYC<sub>h</sub></b>   |

Рис. 7.4. Варианты компоновок и структурные формулы многооперационных станков для обработки корпусных деталей

### 7.3. Вопросы для самоконтроля

1. Дать определение структурной формуле компоновок станков.
2. Охарактеризовать систему обозначений осей координат ISO.
3. Пояснить основные правила записи расположения блоков в компоновках многооперационных станков.
4. Охарактеризовать систему обозначений компоновок станочных систем.
5. Перечислить кинематические схемы резания, используемые для обозначения технологических модулей.

## Практическое занятие 8

### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КОМПОНОВОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ

**Цель занятия:** получение практических навыков преобразования компоновок технологического оборудования с использованием алгебры логики и теории множества чисел.

#### 7.2. Теоретическое описание

Для решения задач по компоновке технологического оборудования необходимо использовать алгебру логики и теорию множеств, которые позволяют рассматривать компоновку, как упорядоченное множество блоков, а разнообразные сочетания блоков – как логические отношения элементов этого множества [22, 23, 40]. Среди указанных отношений конъюнкция (логическое умножение – функция *И*) соответствует последовательному соединению элементов (блоков), а дизъюнкция (логическое сложение – функция *ИЛИ*) – параллельному соединению. Относительно блоков компоновки технологического оборудования конъюнкция (обозначаемая « $\wedge$ », « $\wedge$ » или знаком умножения « $\cdot$ », причем точка может не ставиться) заключается в том, что для получения сложного перемещения конечного блока в системе координат  $X$ – $Y$ – $Z$  станка требуется перемещение одного блока по оси  $X$ , другого – по  $Y$  и третьего – по  $Z$ , что достигается последовательным соединением блоков (рис. 8.1, а).

Дизъюнкция (знаки « $\cup$ », « $\vee$ » или знак сложения « $+$ ») соответствует параллельному соединению элементов, при котором действие функции элементов проявляется при условии действия одного из них: первого, *ИЛИ* второго, *ИЛИ* при действии вместе обоих.

В случаях, когда два элемента, объединенные дизъюнкцией, вступают в отношение конъюнкции к третьему, в алгебре логики допускают скобки, например,  $(X + Y) Z$ , которые относительно блоков компоновки могут означать, что блоки  $X$  и  $Y$ , порознь последовательно соединенные с блоком  $Z$ , между собой параллельны, то есть могут перемещаться одновременно или каждый в отдельности (рис. 8.1, б).

Математический характер структурных формул может быть подтвержден возможностью применения к ним законов алгебры:

• **коммутативный** (перестановочный) – сложное формообразующее движение не нарушается при разнообразных соединениях его элементов (рис. 8.1, а, б) типа:

$$XYZ = YXZ = \dots;$$

- **дистрибутивный** (распределительный) – позволяет объединять блоки, совершающие одинаковые движения, или наоборот, разделять, если синхронное движение является неприемлемым (рис. 8.1, в, з), типа:

$$XY + XZ = X(Y + Z);$$

- **ассоциативный** (сочетательный) – объединение движений в одном блоке с целью повышения жесткости и точности, упрощения конструкции (рис. 8.1, д, е), типа:

$$(XY)Z = X(YZ);$$

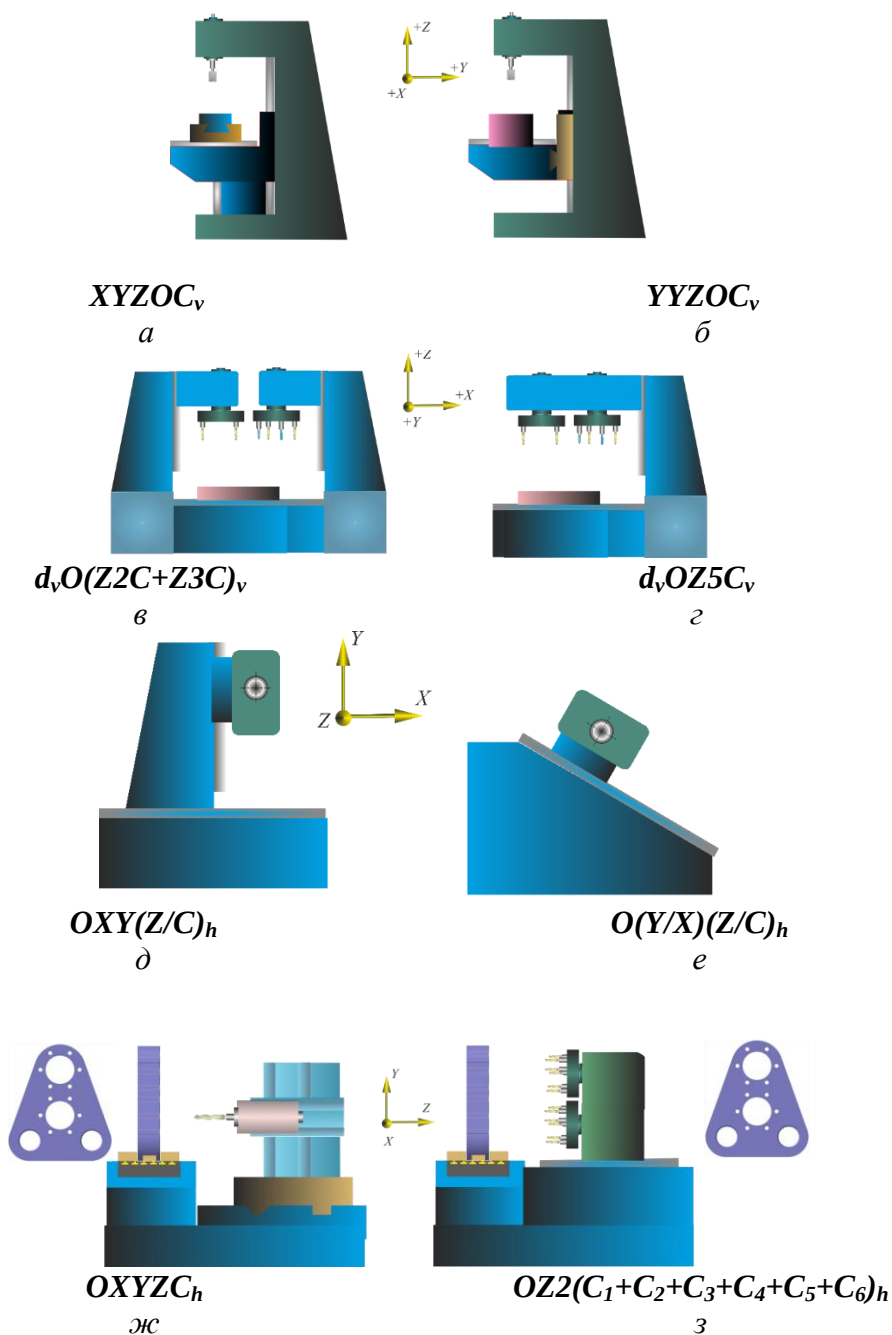


Рис 8.1. Преобразование компоновок технологического оборудования с применением алгебраических законов

- **идемпотентности** – позволяет дублировать движение вдоль одной оси путем распределения общего перемещения между двумя блоками, соединенными последовательно, типа:

$$XX = X;$$

- **специфический (Де Моргана)** – устанавливает возможность перехода от конъюнкции к дизъюнкции и наоборот, что означает возможность перехода от последовательного соединения блоков к параллельному (рис. 8.1, ж, з).

Важным свойством структурных формул является возможность оперировать ими как множествами и как элементами более крупных множеств. В соответствии с разнообразной степенью конкретизации структурных формул конструкционная компоновка  $K_3$  является одним из элементов базовой компоновки  $K_2$ , а последняя – элементом множества, которое представляет собой координатная компоновка  $K_1$ :

$$K_3 \subset K_2 \subset K_1,$$

где знак « $\subset$ » означает – «является элементом».

В описанных структурных формулах вместе с ранее принятыми обозначениями используют еще одну функцию алгебры логики – инверсии или отрицания (функция  $HE$ ). Функцию помечают черточкой над отрицаемым обозначением и относительно множества блоков, ограниченного определенным составом, она является дополнением к данному блоку до полного состава. Например,  $\bar{0}$  («не 0») означает все подвижные блоки, которые входят в состав компоновки.

Если при этом состав блоков определяется множеством  $M\{\bar{0}, X, Y, Z, C\}$ , то блоком 0 могут быть  $X, Y, Z$  и  $C$ , то есть  $\bar{0} = X + Y + Z + C$ .

Обобщенные формулы позволяют совершать математические операции:

- разворачивание обобщенных формул (множеств) в конкретные формулы компоновок;
- находить соответствия конкретной формулы обобщенной (обратная операция);
- выполнять сложение и пересечение множеств.

Например, обобщенная формула  $X0\bar{X}\bar{X}C$  разворачивается в две конкретные формулы:

$$X0\bar{X}\bar{X}C = X0YZC + X0ZYC$$

Обобщенную формулу  $\bar{0}\bar{0}\bar{0}\bar{0}C$  при том же составе блоков  $M\{0, X, Y, Z, C\}$  можно развернуть в множество из шести компоновок:

$$\bar{0} \rightarrow \bar{0}\bar{0}\bar{0} = YX0ZC + YZ0XC + ZY0XC$$

### 7.3. Последовательность выполнения работы

1. Получить вариант задания у преподавателя в виде структуры компоновки (примеры – на рис. 8.2, прил. – рис. В.1, В.2, В.3).
2. Записать структурную формулу заданной компоновки либо сделать эскиз компоновки технологического оборудования по заданной структурной формуле.
3. Выполнить преобразование компоновки и структурной формулы.
4. Описать применённые методы преобразования структурной формулы.
5. Представить выводы по результатам работы.

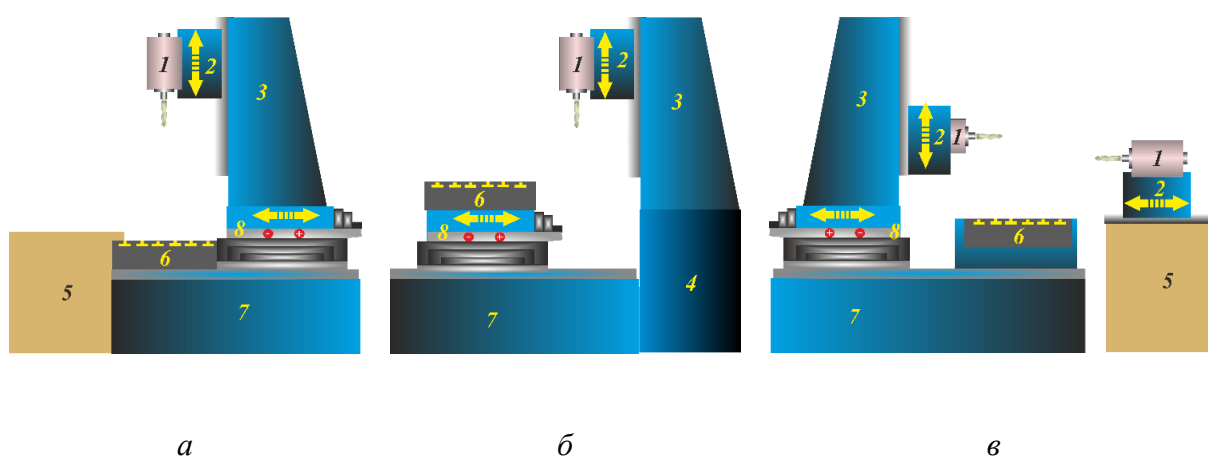


Рис. 8.2. Примеры вариантов заданий для преобразования структур компоновок многооперационных станков: *a* –  $OYXZC_v$ ; *б* –  $XYOZC_v$ ; *в* –  $DZXYOC_h$

### 7.4. Вопросы для самоконтроля

1. Какие логические отношения элементов множества могут использоваться для компоновок станков?
2. Охарактеризовать алгебраический коммутативный закон.
3. Особенности дистрибутивного (распределительного) закона.
4. Сформулировать суть ассоциативного (сочетательного) закона.
5. Охарактеризовать алгебраический закон идемпотентности.
6. В чем особенность специфического закона Де Моргана?

## Практическое занятие 9

### АНАЛИЗ И СТРОЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ (МПС) В КОМПОНОВКАХ СОВРЕМЕННЫХ СТАНКОВ

**Цель занятия:** получение практических навыков в исследовании компоновок технологического оборудования с использованием механизмов параллельной структуры.

#### 9.1. Сравнительный анализ традиционных механизмов и МПС

Основные особенности механизмов или кинематических цепей с последовательным соединением состоят в том, что положение, скорость и ускорения выходного звена предыдущего механизма совпадают с соответствующими величинами входного звена следующего механизма, но силы в них одинаковы по величине и противоположны по направлению. Передаточное отношение совокупности последовательно соединенных механизмов равняется произведению передаточных отношений всех механизмов системы. Аналогично определяется и коэффициент полезного действия механизмов.

Такие механизмы, как правило, имеют только одно функциональное назначение: передача потока движений и сил одной кинематической цепью, поэтому необходимое количество функций технологического оборудования, а также потоков движений и сил реализуется аналогичным количеством кинематических цепей или механизмов [4, 5, 15, 22, 23]. Схема совокупности механизмов для реализации трехкоординатного перемещения исполнительного органа (ИО) приведена на рис. 9.1.

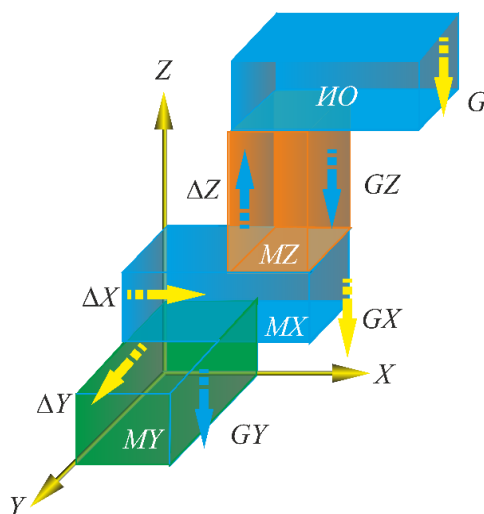


Рис. 9.1. Схема совокупности механизмов для реализации трехкоординатного перемещения ИО

ИО и каждая из составляющих механизмов характеризуется массой  $G$  и  $G_Y$ ,  $G_X$ ,  $G_Z$ , а также погрешностью позиционирования ( $\Delta Y$ ,  $\Delta X$  и  $\Delta Z$ ). При перемещении ИО в заданную точку определенные механизмы во время функционирования перемещают соответствующие массы: механизм  $M_Y$  перемещает массы механизмов  $M_X$ ,  $M_Z$  и ИО, механизм  $M_X$  перемещает массу механизмов  $M_Z$  и ИО, а механизм  $M_Z$  – массу ИО, что обуславливает появление больших подвижных масс и влияет на динамические характеристики технологического оборудования.

Точность позиционирования ИО зависит от суммарной погрешности системы последовательно соединенных механизмов (чем больше кинематических звеньев имеет механизм перемещений, тем больше погрешность позиционирования).

Также при перемещении механизмов и ИО в крайние положения возникают дополнительные силы вследствие смещения их центров масс, которое обуславливает появление напряжений изгиба в соответствующих элементах кинематических звеньев, а также перекоса подвижных элементов на направляющих.

Таким образом, последовательное соединение механизмов отрицательно влияет на основные характеристики технологического оборудования; точность, жесткость и динамические характеристики.

Повышение эффективности технологического оборудования осуществляется как путем усовершенствования конструкций существующих механизмов, так и поиском новых нетрадиционных решений их построения.

Одним из перспективных направлений усовершенствования механизмов технологического оборудования является их построение на основе:

- передачи потока движений и сил несколькими кинематическими цепями путем рационального перераспределения движений и нагрузок между ними;
- реализации параллельной передачи энергии несколькими кинематическими цепями и механизмами;
- создания замкнутых кинематических цепей, которые воссоздают замкнутый контур повышенной жесткости;
- построения бесконсольных конструкций механизмов.

Рассмотрим влияние соответствующего соединения механизмов на КПД механической системы технологического оборудования [13, 22, 23].

Для последовательного соединения механизмов  $M_1, M_2 \dots M_n$  (рис. 9.2, а) с КПД  $\eta_1, \eta_2 \dots \eta_n$ :

- первый механизм  $M_1$  расходует работу подвижных сил  $A_1$  и выполняет полезную работу:  $A_2 = A_1 \cdot \eta_1$ ;
- второй механизм  $M_2$  расходует работу подвижных сил  $A_2$  и выполняет полезную работу.

Исходя из подобных рассуждений, получаем уравнение для определения полезной работы  $A_n$  системы механизмов:

$$A_n = A_1 \prod_{i=0}^n \eta_i. \quad (9.1)$$

Общий КПД системы механизмов с последовательным соединением определяется (относительно энергетического потока) по формуле:

$$\eta = \frac{A_n}{A_1} = \prod_{i=1}^n \eta_i. \quad (9.2)$$

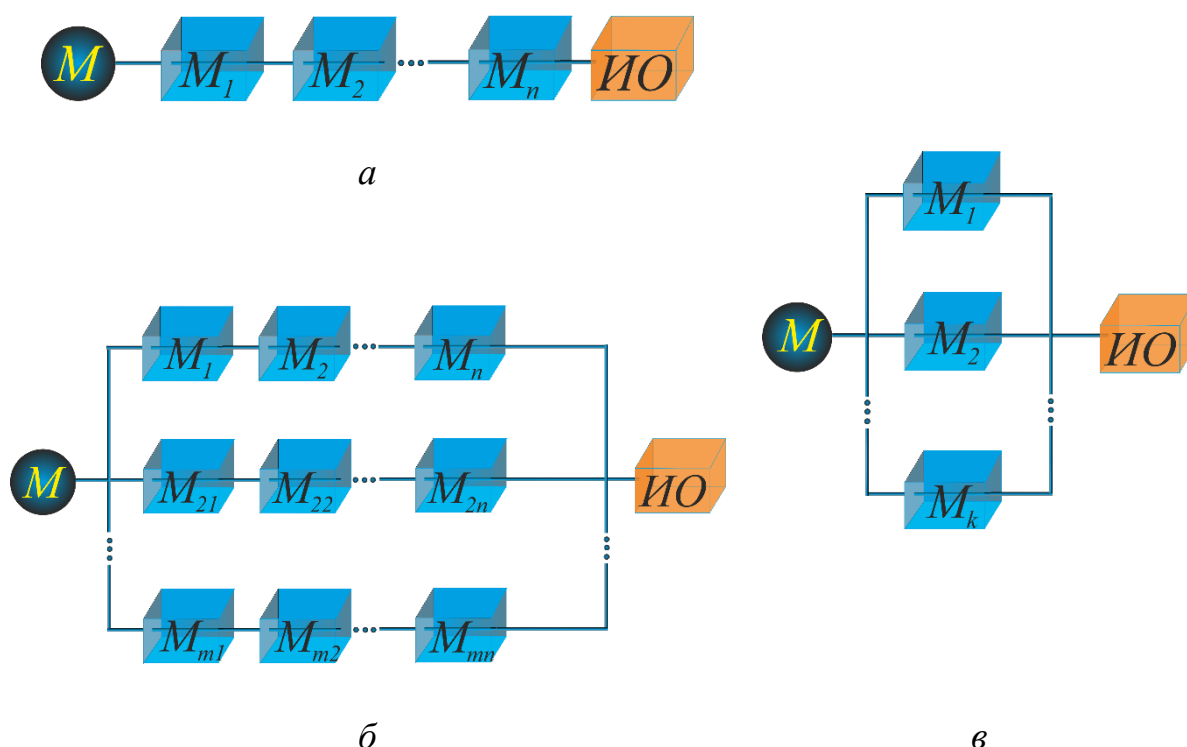


Рис. 9.2. Структурные схемы соединения механизмов: *а* – последовательное; *б* – параллельно-последовательное; *в* – параллельное

При параллельном соединении механизмов  $M_1, M_2, \dots, M_k$  (рис. 9.2, *в*) каждый  $k$ -й механизм системы расходует работу подвижных сил  $A_k$  и выполняет полезную работу:  $A_{mk} = A_k \cdot \eta_k$ . Общая работа подвижных сил, которая расходуется всеми механизмами, определяется как  $A = \sum_{k=1}^m A_k$ .

Полезная работа, которую выполняют все механизмы:

$$A_n = \sum_{k=1}^m A_k \eta_k. \quad (9.3)$$

Общий КПД системы механизмов с параллельным соединением определяется как:

$$\eta = \frac{A_n}{A} = \frac{\sum_{k=1}^m A_k \eta_k}{\sum_{k=1}^m A_k}. \quad (9.4)$$

При параллельно-последовательном соединении механизмов (рис. 9.2, б) рассматривают отдельные участки цепей, которые имеют параллельное или последовательное соединения, КПД которых следует рассчитывать по соответствующим формулам. После чего, в зависимости от структуры соединений механизмов определяется общий КПД.

Общий КПД системы механизмов, соединенных последовательно определяется по формуле:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^m A_{nk}}{\sum_{k=1}^m A_k} = \frac{\sum_{k=1}^m A_k \prod_{i=1}^n \eta_{ki}}{\sum_{k=1}^m A_k}, \quad (9.5)$$

где  $n$  – количество механизмов, соединенных последовательно в параллельных цепях;  $m$  – количество параллельных цепей.

Исходя из вышеизложенного, КПД системы механизмов параллельного соединения будет большим по величине, чем системы механизмов, соединенных последовательно и параллельно-последовательно. Подобные соображения можно привести для других параметров функционирования технологического оборудования, в результате которых также получим аналогичные выводы.

Таким образом, указанным требованиям полностью отвечает создание МПС, основным свойством которых является передача энергетических потоков и движений несколькими параллельными путями.

Подобные механизмы имеют определенные преимущества в сравнении с традиционными механизмами, основными из которых являются:

- использование кинематических звеньев в виде стрижней, которые работают как на растяжение, так и на сжатие при отсутствии напряжений изгиба;
- возможность расположения ИО на неподвижных элементах или на элементах, которые медленно перемещаются;
- применение подвижных элементов минимальной массы, расходуящих незначительные затраты энергии для перемещения ИО;
- использование замкнутых стержневых систем при параллельной передаче нагрузки создает жесткую пространственную ферму;

- рационализация распределения направлений и величин нагрузок позволяет снизить энергетические затраты и обеспечить минимальную нагрузку на кинематические звенья и приводы;

- минимизация количества соединений элементов и кинематических звеньев механизма, обеспечивающая уменьшение упругих деформаций, повышение жесткости системы, а также высокую точность позиционирования ИО и улучшенные динамические характеристики технологического оборудования.

Наряду с преимуществами МПС имеют и некоторые недостатки, связанные с использованием сложных и дорогостоящих информационных систем для получения информации о состоянии всех элементов энергетической системы, устройств программного управления, а также для задания управляющих импульсов отдельным приводам по координатным осям. Опорные точки траектории в рабочем пространстве должны быть пересчитаны в соответствии с изменением длины штанг или координат опорных шарниров относительно направляющих. Преобразование координат должно выполняться в такте интерполяции устройства управления соответствующей технологической машины, что требует мощного программного обеспечения.

Кроме того, кинематическая структура механизма независимо от фактического положения ИО принципиально допускает возможность столкновения отдельных кинематических звеньев, поэтому вместе с преобразованием координат необходимо контролировать такт интерполяции зоны возможного столкновения.

## **9.2. Структуры, кинематические схемы и классификационные признаки оборудования на основе МПС**

В самом общем виде в МПС можно выделить выходное звено и основание, которые соединены некоторым количеством  $n$  кинематических цепей параллельно в понимании передачи движения и усилий. В каждой кинематической цепи устанавливается один или несколько приводов. На выходном звене устанавливается инструментальная или измерительная головка. МПС позволяет обеспечить до шести степеней свободы выходного звена.

На рис. 9.3 приведена одна из классических схем получивших распространение МПС – шестикоординатная «платформа Стюарта» [5, 22, 23].

Механизм состоит из подвижного ИО  $ABC$ , который шарнирно связан с неподвижным элементом механизма  $EFG$  с помощью шести одноподвижных кинематических звеньев –  $EA$ ,  $EB$ ,  $FB$ ,  $FC$ ,  $GC$  и  $GA$ , каждое из которых имеет индивидуальный привод  $D1...D6$ , предназначенный для изменения длины кинематического звена.

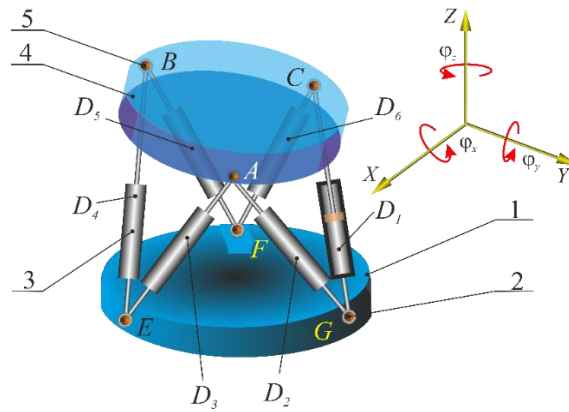


Рис. 9.3. Шестикоординатный механизм параллельной структуры

Выходное звено 5 связано с основанием 1 шестью кинематическими цепями в виде штанг 3 переменной длины. Каждая штанга соединена с выходным звеном сферическими шарнирами 4, а с основанием – карданными шарнирами 2. Изменяя длину штанг 3, можно ориентировать выходное звено 5 в пространстве по шести координатам (трем линейным –  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и вращательным –  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ ,  $\varphi_z$ ). Если установить на выходном звене 5 инструментальную головку, то можно получить станок, который позволит обрабатывать сложные фасонные поверхности.

Для обеспечения работоспособности МПС необходимо проверить степени подвижности и неподвижности механизма [22, 23].

Количество степеней подвижности выходного звена относительно основания (неподвижной)  $W_{сн}$ , которую может обеспечить механизм, определяется по формуле Малышева:

$$W_{сн} = 6(n_{зв} - 1) - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1, \quad (9.6)$$

где  $n_{зв}$  – количество звеньев механизма;  $(n_{зв}-1)$  – количество подвижных звеньев механизма;  $P_1, P_2, \dots, P_5$  – количество кинематических пар 1-го, 2-го, ..., 5-го класса.

Степень неподвижности механизма  $W_{сн}$ , которая определяется как степень подвижности механизма при зафиксированных парах с управляемыми приводами, должна равняться нулю:

$$W_{сн} = 6(n_{зв} - n_в - 1) - 5(P_5 - P_{5B}) - 4(P_4 - P_{4B}) - 3(P_3 - P_{3B}) - 2(P_2 - P_{2B}) - (P_1 - P_{1B}), \quad (9.7)$$

где  $n_в$  – количество входных звеньев с расположенными на них управляемыми приводами в кинематических цепях;  $P_{1B}, P_{2B}, \dots, P_{5B}$  – количество управляемых кинематических пар 1-го, 2-го, ..., 5-го класса.

Если для МПС  $W_{сн} \neq 0$ , то такой механизм неработоспособен и выходное звено будет иметь неуправляемые движения. Поэтому для обеспечения работоспособности МПС необходимо обеспечить условия:

$$W_{cn} > 0, \quad W_{ch} = 0. \quad (9.8)$$

Существует значительное количество разнообразных классификаций технологического оборудования и их компонок на основе:

- типизации технологических процессов;
- анализа структур времени обработки;
- уровня автоматизации технологического оборудования;
- уровня агрегатирования технологического оборудования;
- расположения инструмента относительно заготовки.

Вследствие специфических свойств технологического оборудования параллельной структуры существующие классификации к нему не могут быть применены.

Все МПС, которые используются для компонок технологического оборудования, несмотря на разнообразие их кинематических структур и конструктивного исполнения подразделяются на две группы:

- полнопараллельные – механизмы, в которых количество степеней свободы ИО равняется количеству кинематических цепей с индивидуальными приводами, с помощью которых создаются перемещение ИО относительно осей координат;
- неполнопараллельные – механизмы, в которых количество степеней свободы ИО больше, чем количество кинематических цепей, каждая из которых имеет два и более индивидуальных приводов.

Следовательно, есть логическая связь между количеством кинематических звеньев соответствующего МПС и степенями свободы ИО технологического оборудования. Каждый МПС преобразует движение его входных звеньев в заданное движение ИО.

По методу преобразования движений МПС подразделяются на механизмы, в которых движение ИО происходит разными путями (рис. 9.4).

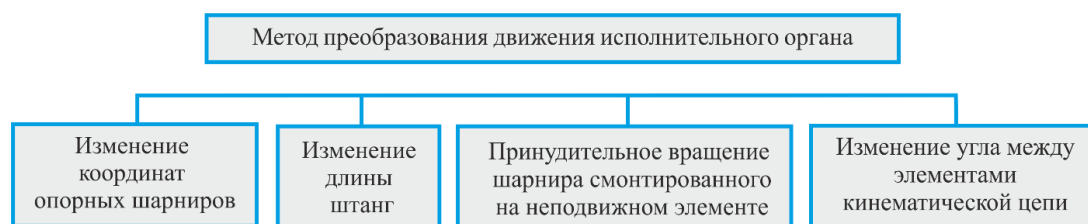


Рис. 9.4. Классификация МПС по методу преобразования движений исполнительного органа

При изменении координат опорных шарниров механизмы имеют кинематические звенья 2 постоянной длины (рис. 9.5, а). ИО 1 изменяет свое положение в пространстве в зависимости от координат опорных шарниров

4 относительно оси штока гидроцилиндра 3. Если левый шарнир 4 затормозить, а правый перемещать вправо, то ИО будет расположен под углом к горизонтальной оси. В случае, когда два шарнира (левый и правый) перемещаются одновременно и на одинаковую величину, ИО перемещается относительно вертикальной оси.

При изменении длин кинематических звеньев – штанг 2 ИО 1 может занимать разное вертикальное и угловое положения (рис. 9.5, б). Каждое кинематическое звено механизма, которое выполнено в виде штанги 2 переменной длины, имеет привод поступательного действия (гидроцилиндр или линейный электропривод). При одновременном изменении длин всех кинематических звеньев на одинаковую величину ИО перемещается в вертикальном направлении, а при изменении их на разную величину – ИО поворачивается относительно соответствующей оси координат.

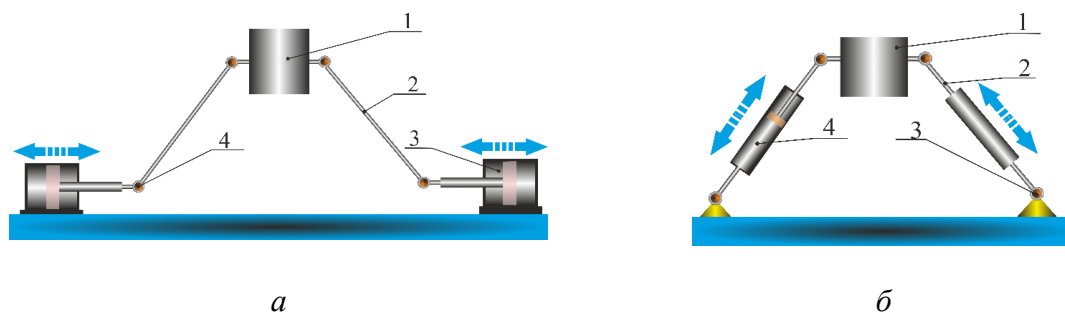


Рис. 9.5. Механизмы с кинематическими звеньями постоянной (а) и переменной (б) длины

Механизм с принудительным вращательным движением опорных шарниров 2, смонтированных на неподвижном элементе 1 (рис. 9.6, а), состоит из четырех кинематических звеньев 3 постоянной длины, выполненных в виде параллельно соединенных штанг аналогично параллелограммному механизму. Положение ИО 1 в пространстве зависит от угла поворота шарнира 2. При одновременном повороте двух шарниров 2 на одинаковый угол, ИО 1 перемещается относительно вертикальной оси координат, а при их вращении на разные углы, ИО поворачивается относительно соответствующей оси координат.

Для изменения угла между кинематическими звеньями 2 постоянной длины (рис. 9.6, б) создан механизм, состоящий из двух кинематических звеньев, выполненных в виде двух шарнирно связанных пластин (V-образный механизм), одна из которых соединена с неподвижным стационарным блоком 5 дополнительным кинематическим звеном 4 переменной длины с индивидуальным приводом. Положение ИО 1 в пространстве зависит от величины угла между пластинами основных кинематических звеньев 2. Изменение угла реализуется с помощью дополнительных кинематических звеньев 4 с индивидуальным приводом. При одновременном

изменении углов на одинаковую величину ИО перемещается относительно вертикальной оси координат, а при изменении углов на разную величину – ИО перемещается в горизонтальном направлении.

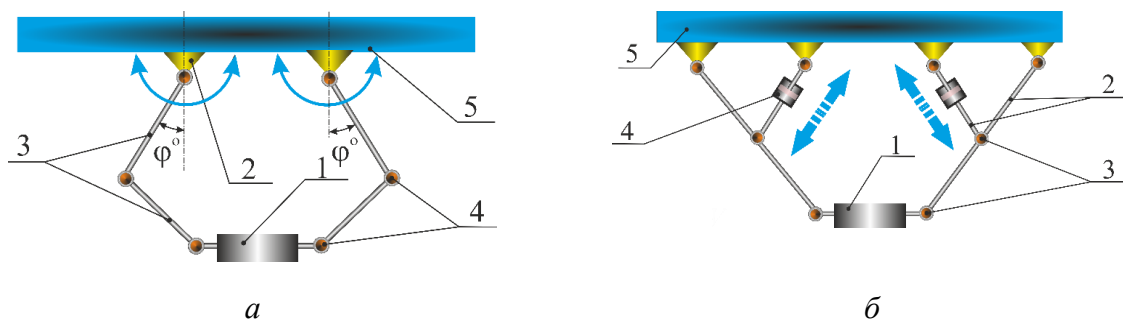


Рис. 9.6. Механизмы с кинематическими звеньями постоянной длины:  
*а* – параллелограммными; *б* – с дополнительным звеном переменной длины

В зависимости от количества степеней свободы ИО технологического оборудования с параллельной кинематикой и от количества кинематических звеньев механизма, на основе которого оно построено, используют его соответствующую классификацию (рис. 9.7, табл. 9.1).

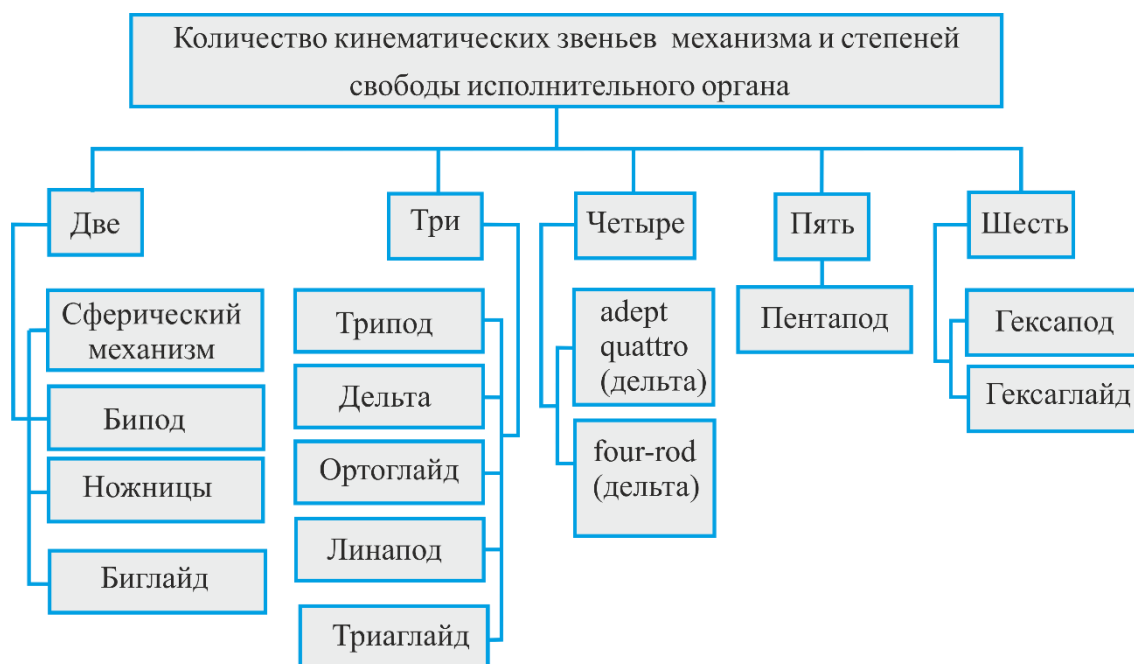
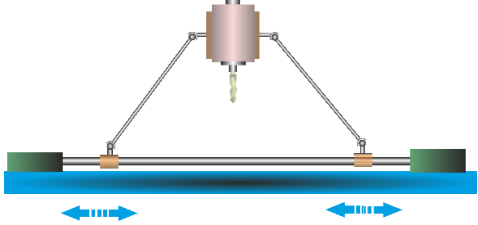


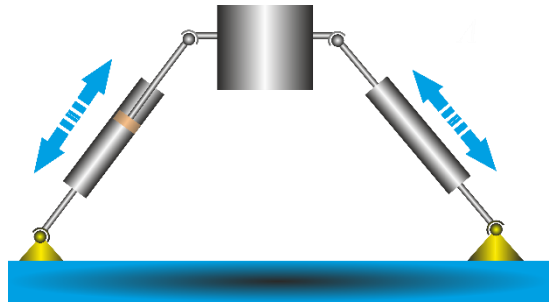
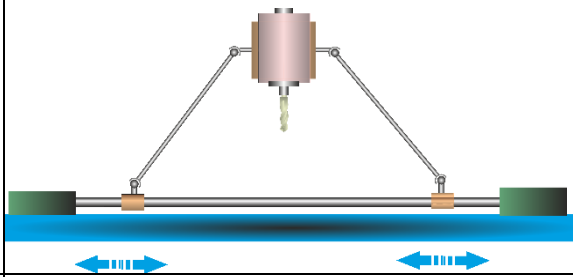
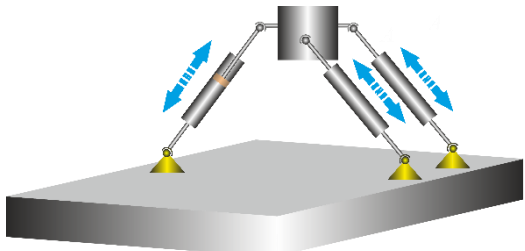
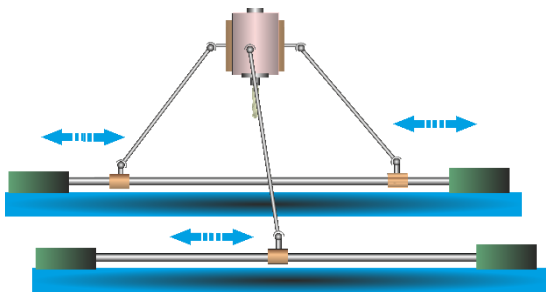
Рис. 9.7. Классификация технологического оборудования с МПС по количеству кинематических звеньев и степеней свободы

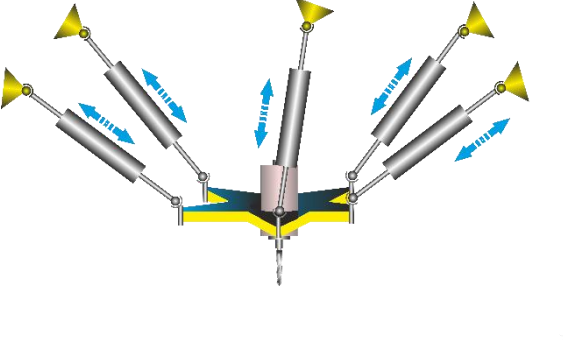
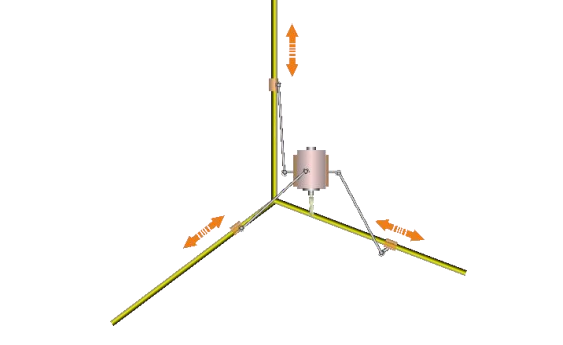
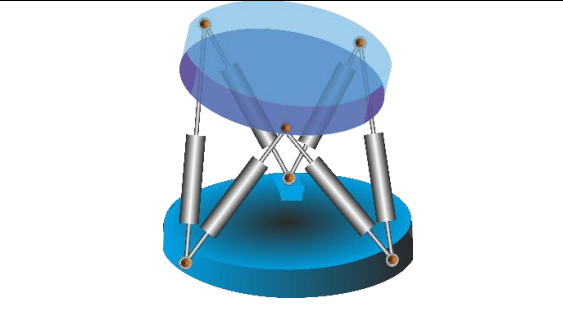
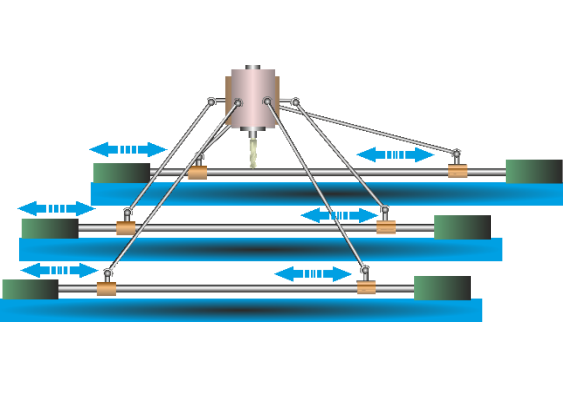
Т а б л и ц а 9.1

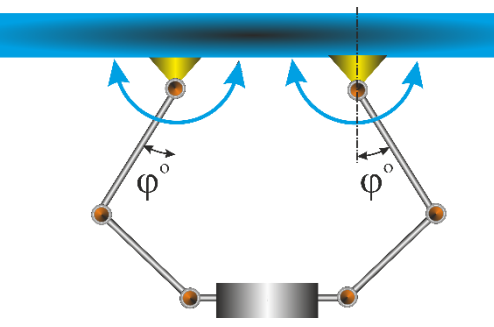
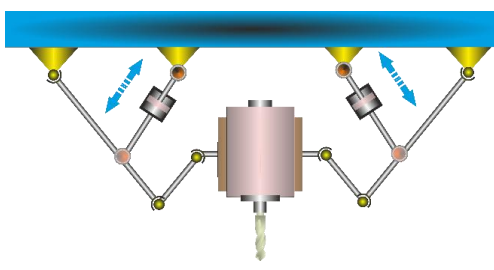
## Основные термины и определения МПС

| Термин                                                  | Определение                                                                                                                                                                                                     | Схема                                                                                |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Механизм параллельной структуры (МПС)                   | Механизм, в котором подвижный ИО шарнирно связан с неподвижным элементом кинематическими цепями, каждая из которых имеет индивидуальный привод или накладывает определенное количество связей на перемещение ИО | —                                                                                    |
| Технологическое оборудование с параллельной кинематикой | Технологическое оборудование, построенное на основе МПС                                                                                                                                                         | —                                                                                    |
| Опорный шарнир                                          | Пространственная кинематическая вращательная пара, которая соединяет неподвижный элемент механизма с кинематическим звеном                                                                                      | —                                                                                    |
| Сферический шарнир                                      | Пространственная кинематическая вращательная пара, элементы которой выполнены в виде сферы                                                                                                                      | —                                                                                    |
| Универсальный шарнир                                    | Приспособление для передачи вращательного движения между штангой и неподвижным элементом механизма, оси которого не лежат на одной прямой и имеют относительное перемещение                                     | —                                                                                    |
| Замкнутая кинематическая цепь                           | Кинематическая цепь, каждое звено которой соединено с двумя кинематическими парами и образует замкнутый контур                                                                                                  |  |

|                                                                 |                                                                                                                                                  |   |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Незамкнутая кинематическая цепь                                 | Система соединенных кинематическими парами звеньев, которые не образуют замкнутый контур                                                         |   |
| Параллельное соединение механизмов (звеньев)                    | Совокупность механизмов (кинематических звеньев), входящие и выходные звенья которых соединены                                                   |   |
| Последовательное соединение механизмов (кинематических звеньев) | Совокупность механизмов (кинематических звеньев), в которых каждое выходное звено предыдущего механизма соединено с входным следующего механизма |   |
| Штанга                                                          | Стержень, который в МПС является основным кинематическим звеном для передачи движений и нагрузок:<br>• переменной длины –                        |   |
|                                                                 | • постоянной длины –                                                                                                                             |   |
| Сферический механизм параллельной структуры                     | Механизм, в котором все постоянные и мгновенные оси вращения звеньев пересекаются в одной точке                                                  | — |

|                                                     |                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                      |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Метод преобразования координат опорных шарниров МПС | Определение положения звеньев и ИО МПС путем использования зависимостей аналитической геометрии (переноса начала координат и поворота осей) с учетом размеров звеньев, вида и относительного положения элементов кинематических пар | —                                                                                    |
| Бипод                                               | Технологическое оборудование с параллельной кинематикой, построенное на основе кинематического соединения двух штанг переменной длины                                                                                               |    |
| Биглайд                                             | Технологическое оборудование с параллельной кинематикой, построенное на основе кинематического соединения двух штанг постоянной длины                                                                                               |   |
| Трипод                                              | Технологическое оборудование с параллельной кинематикой, построенное на основе кинематического соединения трех штанг переменной длины                                                                                               |  |
| Триаглайд                                           | Технологическое оборудование с параллельной кинематикой, построенное на основе кинематического соединения трех штанг постоянной длины                                                                                               |  |

|            |                                                                                                                                                                                  |                                                                                      |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Пентапод   | Технологическое оборудование с параллельной кинематикой, построенное на основе кинематического соединения трех основных и двух дополнительных штанг переменной длины             |    |
| Ортоглайд  | Технологическое оборудование с параллельной кинематикой, построенное на основе кинематического соединения трех штанг постоянной длины с ортогональным расположением направляющих |    |
| Гексапод   | Технологическое оборудование с параллельной кинематикой, построенное на основе кинематического соединения шести штанг переменной длины                                           |   |
| Гексаглайд | Технологическое оборудование с параллельной кинематикой, построенное на основе кинематического соединения шести штанг постоянной длины                                           |  |

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                     |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Дельта  | Технологическое оборудование с параллельной кинематикой, построенное на основе кинематического соединения штанг, выполненных в виде параллелограммного механизма, а преобразование движения реализуется принудительным вращением опорных шарниров, смонтированных на неподвижном стационарном блоке                                                   |   |
| Ножницы | Технологическое оборудование с параллельной кинематикой, построенное на основе кинематического V-образного соединения двух прямоугольных пластин, а преобразование движения реализуется путем использования дополнительных кинематических звеньев со штангами переменной длины, шарнирно соединенных с подвижными и неподвижными элементами механизма |  |

Каждая разновидность технологического оборудования с параллельной кинематикой имеет свое название, которое в основном характеризует его специфические свойства.

МПС, которые используются в технологическом оборудовании, имеют разные по конструктивным исполнениям кинематические звенья, а именно:

- шарнирно-рычажные – состоят из определенного количества штанг постоянной длины, каждая из которых на концах имеет соответствующие шарниры (универсальные или сферические);
- штанги переменной длины – состоят из телескопических или другого конструктивного исполнения штанг, на концах которых смонтированы шарниры (они имеют возможность изменять длину в зависимости от заданного закона движения ИО);
- параллелограммный механизм – состоит из двух штанг постоянной длины, размещенных параллельно, на каждом конце которых смонтированы соответствующие шарниры;

- сферический механизм — каждое кинематическое звено выполнено из двух последовательно соединенных полуколец;
- V-образный механизм — состоит из двух шарнирно соединенных прямоугольных плоских элементов, на концах которых смонтированы шарниры.

Станки с параллельной кинематикой, которые имеют четыре или пять кинематических звеньев (и аналогичное количество степеней свободы) принципиально построены на основе трехкоординатного МПС. Дополнительные (одно или два) кинематических звенья обеспечивают лишь расширение технологических возможностей подобного оборудования аналогично применению многоинструментальных головок или поворотных рабочих столов в традиционном технологическом оборудовании. Наиболее интересные разработки основных компаний, занятых в производстве прогрессивного станочного оборудования, показаны на рис. 9.8 и 9.9 [22, 23].

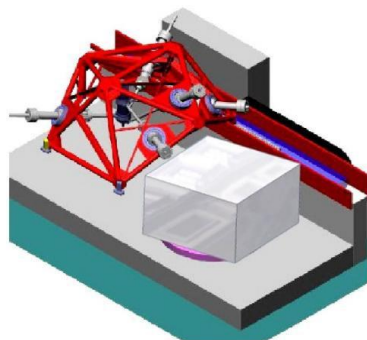


*а*

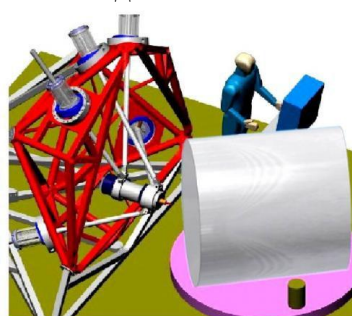


*б*

Рис. 9.8. Многооперационные станки с МПС ведущих производителей (фирма METROM): *а* — мобильный на подвижных палетах; *б* — мобильный на основе механизма типа пентапод



*а*



*б*

Рис. 9.9. Схемы мобильной компоновки МПС фирмы METROM: *а* — на существующей несущей системе с линейной осью перемещения; *б* — с круглым поворотным столом и способом токарно-фрезерной обработки без закрепления на основании станка

### 9.3. Структурный анализ и строение МПС

Кинематику МПС и их динамику целесообразно описывать с помощью матричного аппарата, основанного на матрицах  $[4 \times 4]$ , которые широко применяются в робототехнике при рассмотрении разомкнутых кинематических схем.

Существующие методики синтеза кинематических схем МПС не позволяют однозначно выбрать его кинематическую схему, так как одни и те же перемещения выходного звена могут быть выполнены с использованием разных кинематических схем.

Для условной записи кинематических схем технологического оборудования с параллельной кинематикой вводятся следующие обозначения [22,23]: « $K$ » – карданный шарнир, « $C$ » – сферический шарнир, « $B$ » – вращательная пара, « $\Pi$ » – поступательная пара, « $B3$ » – выходное звено, « $PC$ » – рабочий стол или стол для заготовки, « $B$ » – основание или база. Пара с приводом подчеркивается снизу. Элементы конструкции между шарнирными соединениями обозначаются чертой. Используя такой подход, форму структуры штанги переменной длины для МПС с шестью степенями свободы (гексапод) можно записать следующим образом (рис. 9.10):  $B-K-\underline{\Pi}-C-B3$  (т.е. «база – карданный шарнир – поступательная пара с приводом – сферический шарнир – выходное звено»).

Эту же запись можно выполнить, используя только обозначение одноступенчатых пар и отделением скобками пар, образующих группы, а именно:

$$B - (BB) - \underline{\Pi} - (BBB) - B3,$$

где  $(BB)$  обозначают карданный шарнир  $K$ ;  $(BBB)$  – сферический шарнир  $C$ .

Если записать:  $B - (B - B) - \underline{\Pi} - (BBB) - B3$ , то это обозначает, что две выделенные скобками вращательные пары не образуют карданный шарнир.

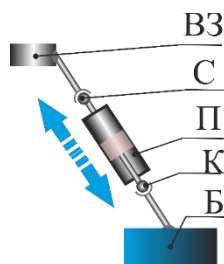


Рис. 9.10. Фрагмент штанги переменной длины в гексапode

Можно использовать матрицы или векторы для записи структур механизмов. Например, можно в виде вектора записать структуру шестиступенчатого механизма. Тогда каждый элемент вектора будет содержать форму структуры каждой кинематической цепи. Это целесообразно ис-

пользовать, когда структуры цепей различаются. Если они одинаковые, то указывается количество цепей, например:

$$(B - K - \underline{II} - C - B3)_6.$$

Структурная формула станка модели SKM400 фирмы Heskert (Германия) (рис. 9.11, а, б) записывается таким образом:

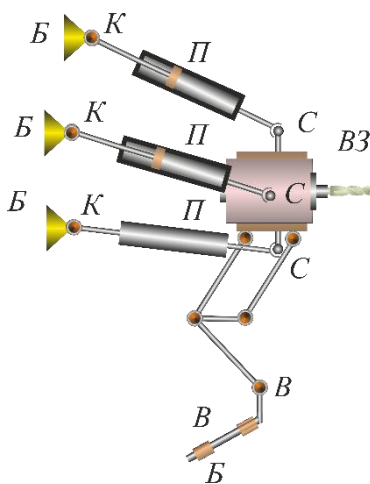
$$\left( \begin{array}{c} (B - K - \underline{II} - C - B3)_3 \\ B - B - B - \underline{II} - B3 \end{array} \right).$$

Если прибавить поворотный рабочий стол  $PC$  с приводом поворота (рис. 9.11, в), кинематическая формула будет выглядеть следующим образом:

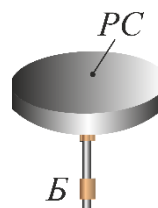
$$\left( \begin{array}{c} (B - K - \underline{II} - C - B3)_3 \\ B - B - B - \underline{II} - B3 \\ B - \underline{B} - PC \end{array} \right).$$



а



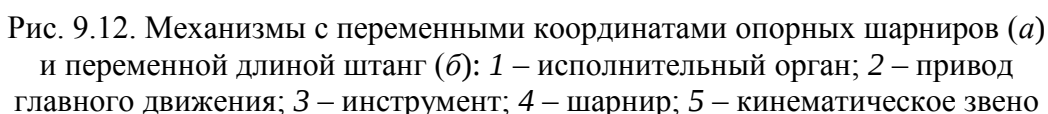
б



в

Рис. 9.11. Станок SKM400 Heskert (а) и кинематика МПС станка (б) и его рабочего стола (в)

- изменения координат опорных шарниров (рис. 9.12, *а*);
- изменения длины штанг (рис. 9.12, *б*);
- принудительного вращательного движения опорного шарнира (рис. 9.13, *а*);
- изменения угла между элементами V-образного механизма (рис. 9.13, *б*).



**Механизм со штангами переменной длины** состоит из трех унифицированных модулей:

- *МГД* – модуль главного движения;
- *МИД* – модуль изменения длины штанг;
- *МСБ* – модуль стационарного блока неподвижного элемента (неподвижного элемента), который выполняет роль несущей системы технологического оборудования.

Эти модули используются в технологическом оборудовании с параллельной кинематикой типа бипод, трипод, пентапод, гексапод.

**Механизм с переменными координатами опорных шарниров** состоит из следующих модулей:

- *МГД* – модуль главного движения;
- *МПД* – модуль штанг постоянной длины;
- *МИК* – модуль изменения координат опорных шарниров;
- *МСБ* – модуль стационарного блока (неподвижного элемента);

- *МН* – модуль направляющих.

Эти модули используются в технологическом оборудовании с параллельной кинематикой типа биглайд, триаглайд, гексаглайд.

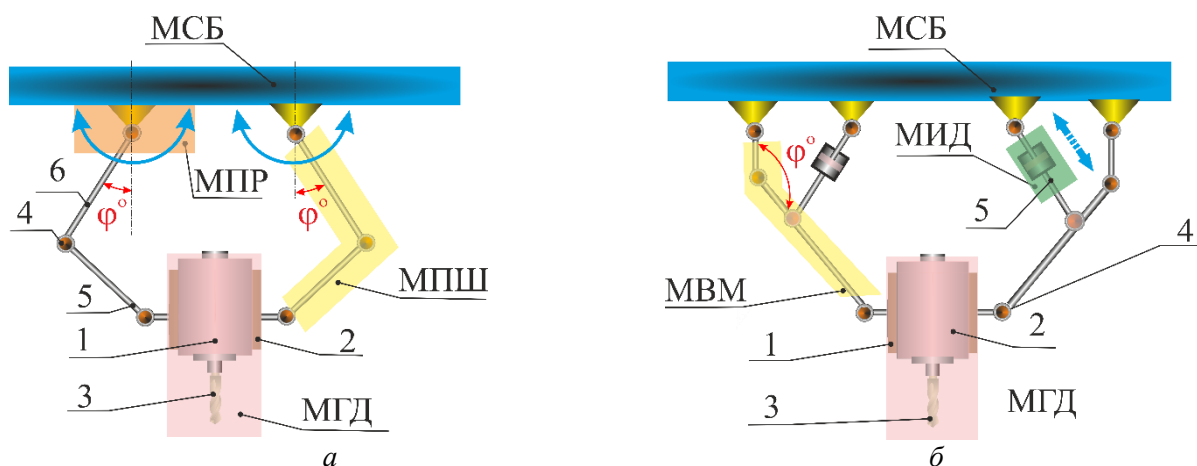


Рис. 9.13. Механизмы с принудительным вращательным движением опорного шарнира (а) и с V-образным МПС (б): 1 – ИО; 2 – привод главного движения; 3 – инструмент; 4 – шарнир; 5,6 – штанги

**Механизм с принудительным вращательным движением опорного шарнира** состоит из следующих модулей:

- *МГД* – модуль привода главного движения;
- *МПР* – модуль принудительного вращательного движения опорных шарниров;
- *МПШ* – модуль параллелограммных штанг;
- *МСБ* – модуль стационарного блока.

Эти модули используются в технологическом оборудовании с параллельной кинематикой типа дельта.

**Механизм V-образного типа** состоит из модулей:

- *МГД* – модуль главного движения;
- *МВМ* – модуль V-образного механизма;
- *МСБ* – модуль стационарного блока;
- *МИД* – модуль изменения длины штанги.

Эти модули используются в технологическом оборудовании с параллельной кинематикой типа ножницы.

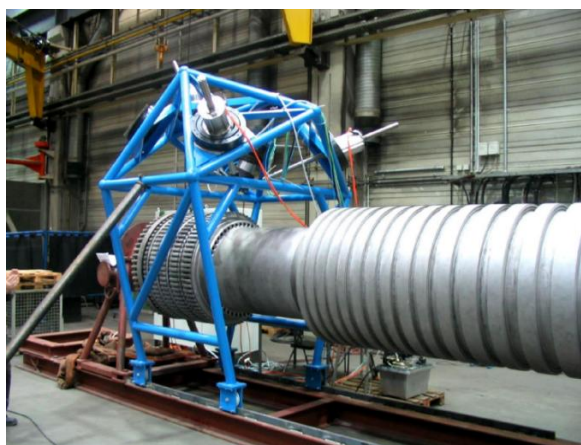
Каждый МПС состоит из модулей, которые отвечают основным требованиям агрегатно-модульного принципа построения технологического оборудования: законченность и конструктивная самостоятельность компонента; обеспечение прочности и жесткости компонента в пределах одного типоразмера в соответствии с проектными нормативами; обеспечение оптимальной компоновки модулей в разных их соединениях и положениях;

простой и надежный монтаж и демонтаж модулей; унификация присоединительных элементов модулей аналогичного назначения.

Многооперационные станки «Краних 800» и «METROM Pentapod 7» с МПС (рис. 9.14) для обеспечения 5-осевой обработки показывают широкие возможности нового оборудования при изготовлении крупных деталей с точностью и производительностью на уровне стационарных станков высокого класса, обеспечивают простой и быстрый монтаж узлов на рабочей позиции и характеризуются небольшой общей потребляемой мощностью [22, 23].



*а*



*б*

Рис. 9.14. Мобильные многооперационные станки «Краних 800» (*а*) и «METROM Pentapod 7» при обработке пазов на турбинах (*б*)

Следует отметить дополнительные возможности использования представленного оборудования с МПС:

- точение некруглых деталей;
- шлифование;
- фрезерование закаленных деталей (62HRC);
- обработка сложных материалов: карбид кремния (SiC), формовочный песок, композитные материалы (CFK, GFK) и т. д.;
- сварка трением с перемешиванием (FSW);
- лазерная сварка с подачей материала;
- раскатка труб.

Анализ существующих схем МПС показывает, что все они, независимо от метода преобразования движений ИО, кинематической структуры, конструктивного исполнения основных компонентов и их компоновки:

- состоят из ограниченного количества унифицированных модулей конкретного функционального назначения;

- определенные модули используются почти во всех МПС.

Модели основных мировых производителей многооперационных станков с МПС приведены в Приложении (табл. Г.1).

В качестве примера в табл. 9.2 приведены технические характеристики усредненного образца многооперационного станка с МПС.

Т а б л и ц а 9.2

**Технические характеристики усредненного образца станка с МПС**

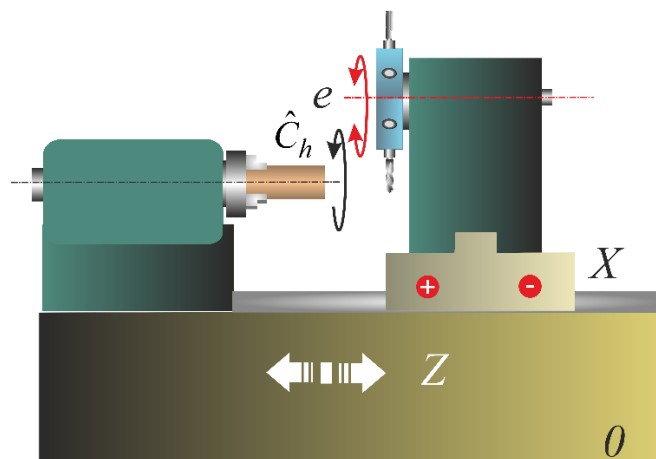
| Характеристика                            | Значение           |
|-------------------------------------------|--------------------|
| Максимальная рабочая зона, мм             | 1000 x 1000 x 1200 |
| Максимальный угол наклона шпинделя, град  | $\pm 45^\circ$     |
| Точность, мкм                             | 4                  |
| Максимальная скорость подачи, мм/с        | 120                |
| Максимальное ускорение, мм/с <sup>2</sup> | 20                 |

В настоящее время в практике станкостроения при создании новых станков существует три компоновочных подхода:

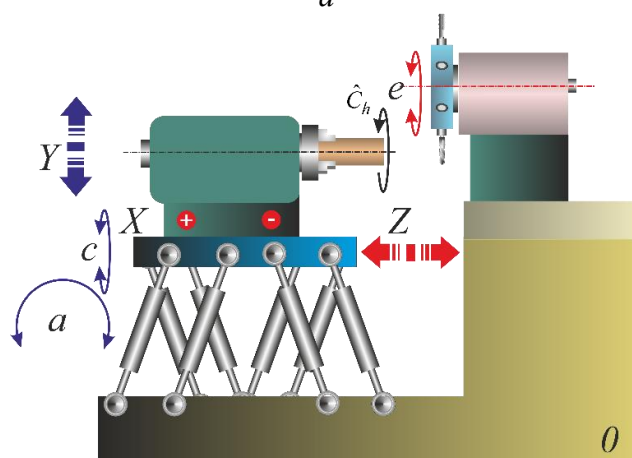
- традиционный – последовательное соединение блоков, механизмов и кинематических звеньев;
- нетрадиционный – параллельное соединение блоков, механизмов и кинематических звеньев за счет применения МПС;
- гибридный – сочетание первого и второго подходов на агрегатно-модульном принципе построения компоновок с отдельными компонентами станков с МПС.

На рис. 9.15 приведены примеры компоновок (традиционной, нетрадиционной, гибридной) и структурных схем токарных станков с ЧПУ, на рис. 9.16 – сверлильно-фрезерных станков с ЧПУ, которые наглядно показывают возможность применения гибридного подхода и другого технологического оборудования с МПС, например, многооперационных станков, ГПМ, станков для лазерной и других физико-технических методов обработки [22, 23]. Именно такие гибридные компоновки по количеству управляемых координат не уступают станкам с МПС типа гексапод.

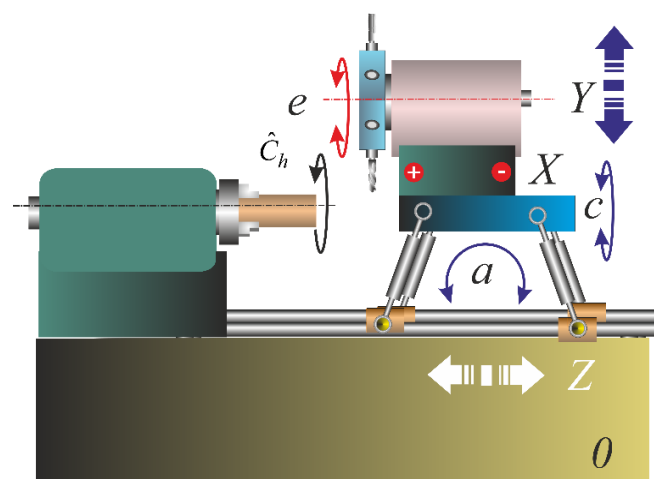
Обзор современного состояния многооперационных станков с МПС показывает, что оборудование этого класса активно производится многими ведущими российскими и иностранными компаниями и востребовано на мировом рынке, а его технические характеристики превосходят соответствующие характеристики станков традиционной компоновки.



*a*



*б*



*в*

Рис. 9.15. Примеры компоновок и схем традиционной (*a*), нетрадиционной (стержневой типа гексапод) (*б*) и гибридной (со штангами постоянной длины) (*в*) токарных станков с ЧПУ

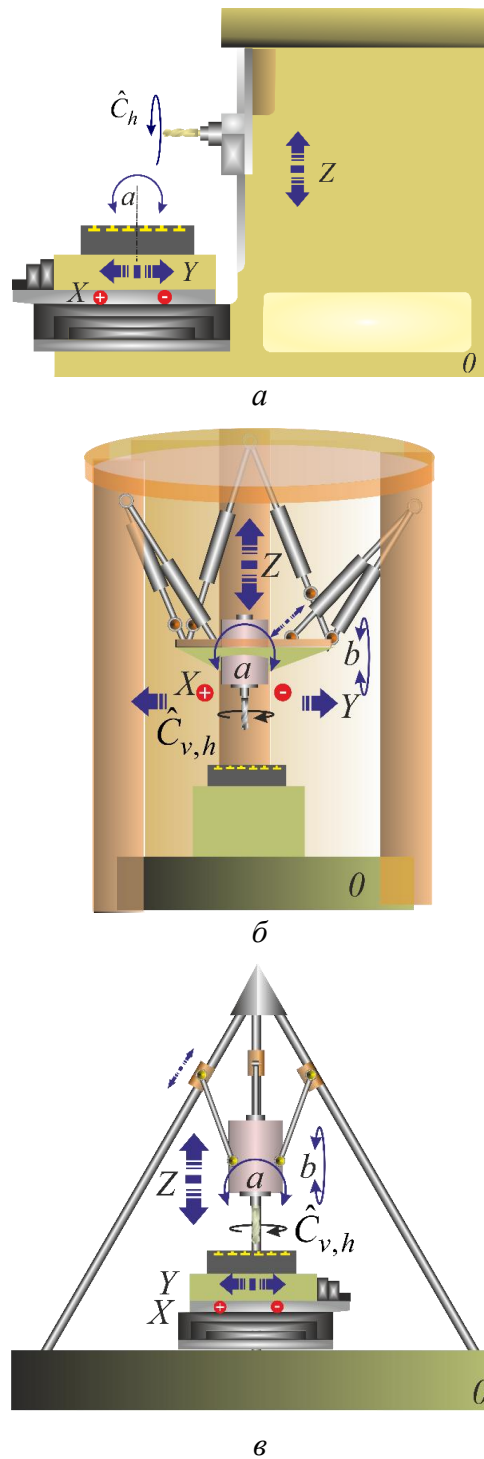


Рис. 9.16. Примеры компонок и схем традиционной (*a*), нетрадиционной (стержневой типа гексапод) (*б*) и гибридной (со штангами постоянной длины) (*в*) сверлильно-фрезерных станков с ЧПУ

#### 9.4. Последовательность выполнения работы

1. Изучить основные термины и определения МПС.
2. Получить в качестве варианта задания наименование модели многооперационного станка традиционной компоновки у преподавателя.

Кинематические схемы и характеристики станков (табл. 9.3) приведены в учебном пособии [37] (Харченко А.О. Металлообрабатывающие станки и оборудование машиностроительных производств. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2015. – 260 с., <http://www.znaniium.com/catalog.php?bookinfo=502151>).

10. Записать структурную формулу заданной компоновки и сделать эскиз компоновки технологического оборудования по заданной структурной формуле.

11. Выполнить преобразование традиционной компоновки с использованием гибридной схемы на основе применения МПС (примеры – на рис. 9.15, 9.16).

12. Описать применённые методы преобразования структурной формулы.

13. Представить выводы по результатам работы.

Т а б л и ц а 9.3

### Варианты заданий

| № п/п | Вид станка                             | Критерии оценки качества вариантов |
|-------|----------------------------------------|------------------------------------|
| 1     | Токарно-револьверные с ЧПУ             | $a - 1B340\Phi30$                  |
|       |                                        | $b - 1E365П\Phi30$                 |
|       |                                        | $v - 1П426\Phi3$                   |
| 2     | Токарные обрабатывающие центры         | $a - ИРТ180ПМ\Phi4$                |
|       |                                        | $b - МР315 (ГПМ МРК50)$            |
| 3     | Токарные патронно-центровые            | $a - 16K20T1$                      |
|       |                                        | $b - 16K30\Phi3$                   |
| 4     | Токарные автоматы и полуавтоматы с ЧПУ | $a - 11Б16В\Phi4$                  |
|       |                                        | $b - АТ320МС$                      |
|       |                                        | $v - 1720П\Phi30$                  |
|       |                                        | $z - 1740Р\Phi3$                   |
|       |                                        | $d - 1П756Д\Phi331$                |
| 5     | Фрезерно-сверлильно-расточные с ЧПУ    | $a - ИР320ПМ\Phi4$                 |
|       |                                        | $b - 6906ВМ\Phi2$                  |
|       |                                        | $v - СМ400\Phi4.5$                 |
| 6     | Фрезерные с ЧПУ                        | $z - ИР500ПМ\Phi4$                 |
|       |                                        | $a - 6P13\Phi3$                    |
|       |                                        | $b - \Phi П-7МН$                   |
|       |                                        | $v - \Phi П-27Н3$                  |
|       |                                        | $z - 2\Phi П-231$                  |
| 6     | Шлифовальные с ЧПУ                     | $d - \Phi СМ-1$                    |
|       |                                        | $a - 3M151\Phi2$                   |
|       |                                        | $b - 3K151В\Phi20 (ГПМ ХШК-001)$   |

### **9.5. Вопросы для самоконтроля**

1. Перечислить основные особенности механизмов и кинематических цепей с последовательным соединением.
2. Основные особенности механизмов и кинематических цепей параллельной структуры.
3. Как влияет вид соединения механизмов на КПД механической системы технологического оборудования?
4. Как классифицируют МПС по методу преобразования движений исполнительного органа?
5. Как классифицируют МПС по количеству кинематических звеньев и степеней свободы?
6. Каковы правила условной записи кинематических схем технологического оборудования с параллельной кинематикой?
7. Перечислить виды унифицированных модулей, применяемых в МПС.
8. Привести примеры многооперационных станков с МПС ведущих мировых производителей.

## Практическое занятие 10

### ПРОЕКТНЫЕ КРИТЕРИИ СИНТЕЗА НОВОГО ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Цель занятия:** привитие навыков студентам в использовании новых критериев по анализу и синтезу для оценки нового технологического оборудования.

#### 10.1. Общие сведения

При проектировании нового станочного оборудования основной целью является обработка необходимого количества деталей соответствующего качества с минимальными расходами по принятой технологии. Поэтому для сравнительной оценки технического уровня станков и комплектов станочного оборудования, а также для выбора станков в соответствии с решением конкретной производственной задачи используют набор показателей, которые характеризуют качество как отдельных станков, так и наборов станочного оборудования.

Необходимым условием осуществления автоматизации с использованием современного технологического оборудования является повышение **эффективности производства**, которое можно оценить по выражению [22, 23, 31]:

$$A = \frac{PK}{3},$$

где  $P$  – параметр производительности;  $K$  – параметр качества обработки;  $3$  – суммарные затраты на обработку.

Параметр производительности  $P$ :

$$P = \frac{T_{ш} - T_{п}}{T_{м}},$$

где  $T_{ш}$  – штучное время;  $T_{п}$  – потери времени на обработку;  $T_{м}$  – среднее значение машинного времени.

Параметр **качества**  $K$  может быть определен на основе сравнения требуемого и фактического качества по отдельным критериям – размерам, форме, массе, качеству обработанной поверхности, и т.п. При этом для каждого критерия выбирают свой весовой коэффициент  $a_i$ :

$$K = \sum_{i=1}^j a_i \frac{K_i}{[K_i]},$$

где  $K_i$  – фактический критерий;  $[K_i]$  – необходимый критерий;  $j$  – число принятых критериев качества.

Суммарные затраты на обработку  $Z$  состоят из капитальных затрат  $Z_K$ , временных затрат  $Z_B$  и затрат  $Z_H$ , отнесенных к изготавливаемой детали:

$$Z = Z_K + Z_B + Z_H.$$

**Эффективность** – комплексный (интегральный) показатель, наиболее полно определяющий главное назначение станочного оборудования – повышение производительности труда и соответственно снижения расходов при обработке деталей. Его можно представить в виде

$$E = \frac{N}{\sum c},$$

где  $N$  – годовая программа выпуска деталей;  $\sum c$  – сумма годовых затрат на изготовление.

Годовой выпуск деталей можно определить по формуле

$$N = \frac{T_0 \eta}{T},$$

где  $T_0$  – годовой фонд времени;  $\eta$  – коэффициент использования фонда времени;  $T$  – среднее время цикла обработки одной детали.

Проектируемое технологическое оборудование – техническая система (ТС) должно отвечать требованиям эксплуатации (это определяет эффективность ее использования), а также требованиям производства. Эти требования неоднозначны. Каждая их категория может содержать отдельные виды конкретных требований к проектируемым моделям ТС.

На уровне методологических разработок можно рассматривать и анализировать только отдельные виды требований относительно определенного класса машин. Требования эксплуатации, как и требования производства, в большинстве случаев неоднозначны и могут быть представлены несколькими вариантами.

Аналогичная ситуация имеет место при рассмотрении каждого варианта требований, потому что ему может отвечать несколько вариантов конструкции машины, из которых выбирают оптимальный. Между отдельными видами требований эксплуатации и производства есть взаимосвязи, что может быть представлено в виде системной модели (рис.10.1) [21, 22, 23].

Требования эксплуатации могут иметь некоторое число вариантов ( $\mathcal{E}_{B1}, \mathcal{E}_{B2}, \dots, \mathcal{E}_{Bj}$ ), как и требования производства ( $\Pi_{B1}, \Pi_{B2}, \dots, \Pi_{Bj}$ ). Каждому варианту требований эксплуатации может отвечать некоторое число вариантов конструкции ( $M_{\mathcal{E}11}, M_{\mathcal{E}12}, \dots, M_{\mathcal{E}1k}; M_{\mathcal{E}21}, M_{\mathcal{E}22}, \dots, M_{\mathcal{E}2n}; M_{\mathcal{E}11}, M_{\mathcal{E}12}, \dots, M_{\mathcal{E}1q}$ ). Каждому варианту требований производства соответствует некоторое число вариантов конструкции ( $M_{\Pi11}, M_{\Pi12}, \dots, M_{\Pi1k}; M_{\Pi21}, M_{\Pi22}, \dots, M_{\Pi2n}; M_{\Pi11}, M_{\Pi12}, \dots, M_{\Pi1q}$ ).

В вариантах конструкции машины  $M_{\mathcal{E}}$  кроме требований эксплуатации учтены в некоторой степени и требования производства, а в вариантах конструкции  $M_{\Pi}$  требования производства учтены наиболее полно. Комплекс требований зависит от стадии разработки проекта.

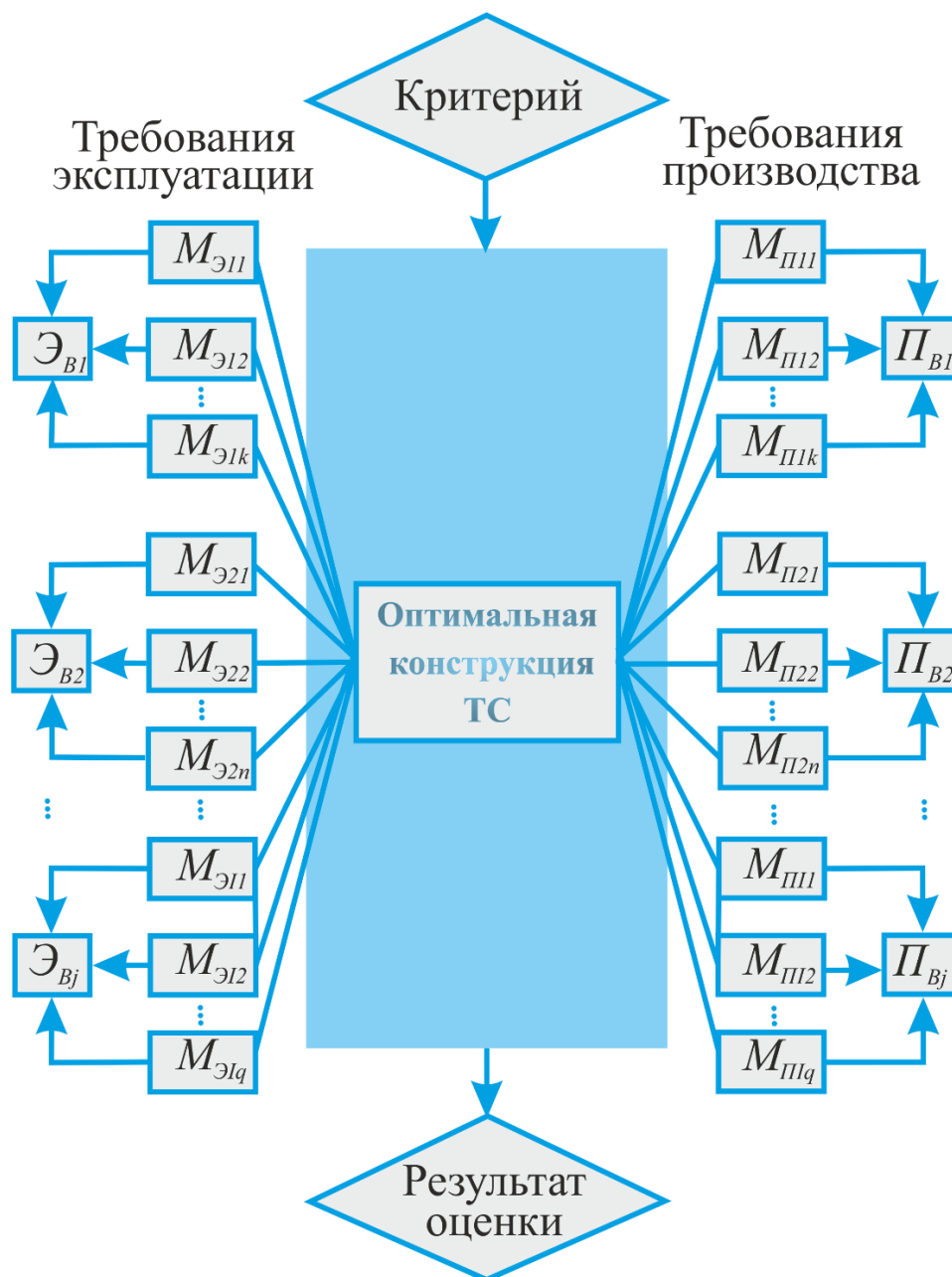


Рис.10.1. Системная модель конструирования технологического оборудования в зависимости от производственных и эксплуатационных требований

Каждое свойство объекта проектирования можно определить тремя численными характеристиками:

- абсолютным значением единичного показателя качества  $K_i$ , определенным метрологическим методом;
- относительным показателем качества:

$$K_i^* = K_i / [K_i],$$

где  $[K_i]$  – нормативный показатель качества, характеризующий степень удовлетворения потребителей в данном объекте;

- весовым коэффициентом  $a_i$ , который определяет важность данного свойства среди других свойств, при условии, что сумма  $a_i=1$  для  $n$  единичных показателей.

Общие положения об оценке эффективности средств производства обуславливают следующие предпосылки:

- целесообразность использования высокоэффективной технологии обработки, обеспечивающей минимум основного времени и среднего машинного времени;
- необходимость применения рациональной конструкции станочного оборудования, реализующего продуктивную технологию при высоком уровне автоматизации (снижение капитальных затрат и уменьшение основного и вспомогательного времени с соответствующими ему затратами);
- соответствие манипуляторов, транспорта и накопителей структуре всей системы (сокращение капитальных затрат и подготовительно-заключительного времени);
- высокая технологическая и эксплуатационная надежность при организации профилактического обслуживания (обеспечение должного качества обработки и увеличение времени технического использования системы);
- системный подход к выбору вспомогательного оборудования и дополнительных устройств (снижение капитальных затрат и сведение к минимуму ручного обслуживания);
- надежное управление и соответствующее математическое обеспечение для реализации наивысшей загрузки станочного оборудования, автоматизированной смены заготовок и инструмента, автоматизированного контроля деталей, процесса обработки, состояния станка, инструментов и приспособлений при развитой системе диагностики.

## 10.2. Последовательность выполнения работы

1. Изучить основные положения и ознакомиться с набором показателей, характеризующих эффективность производства и качество станочного оборудования.
2. Получить в качестве варианта задания наименование модели многооперационного станка (табл. 9.3).
3. Записать структурную формулу и сделать эскиз компоновки заданного технологического оборудования.

2. На основе системной модели (рис.10.1) сформулировать перечень производственных и эксплуатационных требований к заданному варианту многооперационного станка.

3. Предложить критерии качества для оценки заданного варианта.

4. По результатам оценки выработать предложения по совершенствованию заданного технологического оборудования с учетом конкретной задачи и общих предпосылок на основе рекомендаций по оценке эффективности средств производства.

### **10.3. Вопросы для самоконтроля**

1. Что является необходимым условием осуществления автоматизации производства?

2. По какой формуле оценивается повышение эффективности производства?

3. Как определяют параметр производительности?

4. По какой зависимости может быть определен параметр качества?

5. Как определить суммарные затраты на обработку и интегральный показатель эффективности?

6. Охарактеризовать взаимосвязи между эксплуатационными и производственными требованиями при проектировании станочного оборудования.

7. Привести численные характеристики для определения свойств объекта проектирования.

8. Каковы предпосылки повышения эффективности производства изделий в машиностроении?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аверьянов, О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О.И. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
2. А. с. 1126396 SU, МКИ<sup>4</sup> В 23G 3/00. Многошпиндельная головка/ Ф.Н. Канареев, А.О. Харченко. – Бюл. №44// Открытия. Изобретения. – 1984.
3. А. с. 1748990 SU, МКИ<sup>4</sup> В 23Q 3/155. Многоцелевой станок с автоматической сменой инструмента/ А.О. Харченко, А.В. Белозуб. – Бюл. №27// Открытия. Изобретения. – 1992.
4. Афонин, В.Л. Обработкающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / В.Л. Афонин, А.Ф. Крайнев, В.Е. Ковалёв и др.; Под общ. ред. В.Л. Афолина. – М.: Машиностроение, 2001. – 256 с.
5. Афонин, В.Л. Обработкающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры / В.Л. Афонин, П.В. Подзорнов, В.В. Слепцов. Под общ. ред. В.Л. Афолина. М.: Изд-во МГТУ «Станкин», 2006. – 452 с.
6. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
7. Бейко, И.В. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации / И.В. Бейко, Б.Н. Бублик, П.Н. Зинько. – К.: Вища школа, 1983. – 512 с.
8. Братан, С.М. Повышение точности формообразования мелкогазмерных резб метчиками в алюминиевых сплавах: монография/ С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
9. Волчкевич, Л.И. Автоматизация производственных процессов: Учеб. пособие / Л.И. Волчкевич. – М.: Машиностроение, 2005. – 380 с.
10. Врагов, Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков / Ю.Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
11. Джонс, Дж. К. Методы проектирования / Дж. К. Джонс – М.: Мир, 1986. – 326 с.
12. Дмитриев, Д.А. Кинематика, компоновка и формообразующие движения токарных многоцелевых станков с механизмами параллельной структуры//Д.А. Дмитриев, Ю.Н. Кузнецов/ Нові технології в машинобудуванні. – Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського. Випуск 2/2008 (49). – С. 66-75.
13. Долгин, В.П. Надежность технических систем: Учеб. пособие / В.П. Долгин, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 167 с.
14. Крижанівський, В.А. Агрегатно-модульне технологічне обладнання / В.А. Крижанівський, Ю.М. Кузнецов та ін. – Кіровоград: Імекс ЛТД, 2004. в 3-х ч. – I ч. – 442с.; II ч. – 286 с.; III ч. – 507 с.

15. Крижанівський, В.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою / Ю.М. Кузнецов, І.А. Валявський, Р.А. Складов. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
16. Кузнецов, М.М. Проектирование автоматизированного производственного оборудования: Учеб. пособие/ М.М. Кузнецов, Б.А. Усов, В.С. Стародубов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
17. Кузнецов, Ю.Н. Повышение эффективности токарных автоматов / Ю.Н. Кузнецов, Л.Н. Срибный. – К.: Техніка, 1986. – 168 с.
18. Кузнецов, Ю.Н. Станки с ЧПУ / Ю.Н. Кузнецов. – К.: Вища школа, 1991. – 278 с.
19. Кузнецов, Ю.Н. Агрегатно-модульное технологическое оборудование нового поколения / Ю.Н. Кузнецов, В.А. Крыжановский – К.– Кіровоград: ООО «ЗМОК»-ПП «ГНОЗИС», 2001. – 258 с.
20. Кузнецов, Ю.М. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: Навч. посібник Ч.1. Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання / Під ред. Ю.М. Кузнецова. – Кіровоград: Вид-во КДТУ, 2003. – 360 с.
21. Кузнецов, Ю.Н. Теория технических систем: Учебник / Ю.Н. Кузнецов, Ю.К. Новоселов, И.В. Луцев. – Севастополь: Изд-во СевНТУ. – 2010. – 252 с.
22. Кузнецов, Ю.Н. Компоновка станков с механизмами параллельной структуры: Монография / Ю.Н. Кузнецов, Д.А. Дмитриев, Г.Е. Диневич. – Херсон: ЧП Вышемирский. – 2010. – 471 с.
23. Кузнецов, Ю.М. Технологічне обладнання с ЧПК: механізми і оснащення: навч. посібник / Ю.М. Кузнецов, О.Ф. Саленко, А.О. Харченко, В.Т. Щетинін. – Київ-Кременчук-Севастополь: Вид-во «Точка», 2014. – 500 с.
24. Мушик, Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер. Пер. с нем. – М.: Мир, 1990. – 208 с.
25. Методические указания к практическим занятиям «Системно-морфологические методы в проектировании станочного оборудования». Ч.1 / Разраб. Ю.К. Новоселов, Ю.Н. Кузнецов, А.О. Харченко, С.М. Братан. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1992. – 23 с.
26. Методические указания к практическим занятиям «Системно-морфологические методы в проектировании станочного оборудования». Ч. 2 / Разраб. Ю.К. Новоселов, Ю.Н. Кузнецов, А.О. Харченко, С.М. Братан. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1997. – 20 с.
27. Методические указания к практическим занятиям «Надежность в машиностроении» / Разраб. А.О. Харченко, В.П. Долгин, Е.А. Владецкая. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2014. – 28с.
28. Новоселов, Ю.К. Выбор оптимальной структуры ГПМ / Ю.К. Новоселов, А.О. Харченко. – М.: Станки и инструмент, 1987, № 2. – С. 5-7.

29. Пат. UA 21763 А, МПК В 23Q 3/155. Багатоцільовий верстат/ А.О. Харченко, С.В. Торлин, А.П. Фалалеев. – Бюл. №2. – 1998.
30. Пат. UA 53965 А, МПК В 23Q 3/155. Багатоцільовий верстат/ А.О. Харченко, С.М. Федоренко, Ю.Л. Рапацкий. – Бюл. №20. – 2010.
31. Пуш, В.Э. Автоматические станочные системы / В.Э. Пуш, Р. Пигерт, В.Л. Сосонкин. – М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.
32. Соломенцев, Ю.М. Роботизированные технологические комплексы и гибкие производственные системы в машиностроении: Альбом схем и чертежей / Ю.М. Соломенцев, К.П. Жуков, Ю.А. Павлов. – М.: Машиностроение, 1989. – 192 с.
33. Хартли, Дж. ГПС в действии: Пер. с англ. / Дж. Хартли. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
34. Харченко, А.О. Разработка ГПМ с учетом надежности технологических систем / А.О. Харченко. – К.: О-во «Знание», 1989. – 20 с.
35. Харченко, А.О. Атлас кинематических схем и конструкций станков с ЧПУ и оборудования гибких производственных систем/ А.О. Харченко, И.Ю. Леснинов. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000. – 65 с.
36. Харченко, А.О. Станки с ЧПУ и оборудование гибких производственных систем: Учеб. пособие / А.О. Харченко. – К: ВД «Професіонал», 2004. – 304 с.
37. Харченко, А.О. Металлообрабатывающие станки и оборудование машиностроительных производств: Учеб. пособие / А.О. Харченко – М: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 260 с.: ил. + Доп. материалы [Электронный ресурс; Режим доступа <http://www.znaniium.com>]
38. Харченко, А.О. Модульные конструкции многооперационных станков с ЧПУ /А.О. Харченко//Technologia i automatizacja montazu.–Rzeszow; Smerek, 1999. – Nr.4 – S. 22-23.
39. Харченко, А.О. Новые конструкции многооперационных станков с ЧПУ/ А.О. Харченко// Technologia-1999. Сб. тр. VI Междунар. науч.-тех. конф. – Bratislava, 1999. – С. 515-517.
40. Хомяков, В.С. Кодирование компоновок станков при их автоматизированном проектировании / В.С. Хомяков, И.И. Давыдов. – М.: Станки и инструмент, 1989. – 8-11 с.
41. Хубка, В. Теория технических систем / В. Хубка. Пер. с нем. – М.: Мир, 1987. – 208 с.
42. Чернов, Л.Б. Основы методологии проектирования машин: учебное пособие для вузов / Л.Б. Чернов. – М.: Машиностроение, 1978. – 148 с.
43. Charczenko, A. Obrabiarki i urzadzenia technologiczne w produkcji elastycznej / A. Charczenko, A. Swic, W. Taranenko – Lublin: Wydawnictwo-Drukarnia «Liber Duo», 2011. – 299 p.

## Приложение А

### А.1 ВОПРОСЫ ДЛЯ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ

1. Классификация и обозначение станков с ЧПУ.
2. Обозначение осей координат и направлений перемещений исполнительных органов на схемах станков с ЧПУ.
3. Виды ГПС и их состав.
4. Условные обозначения для кинематических схем.
5. Жизненные циклы технологий.
6. Что включает в себя понятие – технологическая система станка?
7. Какие основные движения выполняет токарный станок?
8. Какие основные движения выполняет сверлильный станок?
9. Какие основные движения выполняет шлифовальный станок?
10. Какие основные движения выполняет фрезерный станок?
11. Какие основные движения выполняет расточный станок?
12. Какие основные узлы и системы содержит токарный станок?
13. Какие основные узлы и системы содержит сверлильный станок?
14. Какие основные узлы и системы содержит фрезерный станок?
15. Какие основные узлы и системы содержит шлифовальный станок?
16. Какие основные узлы и системы содержит расточный станок?
17. Охарактеризовать понятие «надежность».
18. Охарактеризовать свойство надежности – безотказность.
19. Охарактеризовать свойство надежности – долговечность.
20. Охарактеризовать свойство надежности – ремонтпригодность.
21. Охарактеризовать свойство надежности – сохраняемость.

### А.2 ВОПРОСЫ ДЛЯ РУБЕЖНОГО КОНТРОЛЯ

1. Современное станкостроение: общие сведения и тенденции развития.
2. Сравнительная оценка автоматизированного станочного оборудования при проектировании новых образцов.
3. Агрегатно-модульная структура компоновки оборудования.
4. Токарные станки и комплексы.
5. Многооперационные станки для обработки корпусных деталей.
6. Шлифовальные станки, обрабатывающие центры и ГПМ шлифования.
7. Обрабатывающее оборудование, построенное с использованием механизмов параллельной структуры (МПС).
8. Анализ построения МПС.

9. Типовые структуры МПС.
10. Типовые виды технологического оборудования с МПС.
11. Компоновка и конструкции станочного оборудования с МПС и штангами постоянной длины.
12. Компоновка и конструкции станочного оборудования с МПС и штангами переменной длины.
13. Концепция гибридных каркасных компоновок станков с МПС.
14. Особенности гибридных каркасных компоновок и принципы их создания.
15. Использование станков с ЧПУ в РТК и в составе гибких производственных систем (ГПС).
16. Виды ГПС их состав.

### А.3 ВОПРОСЫ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

1. Структурные формулы компоновок и формализованное описание узлов.
2. Модульный принцип компоновки традиционного технологического оборудования.
3. Агрегатно-модульная структура компоновки оборудования.
4. Многооперационные станки для обработки корпусных деталей.
5. Принципы встраивания в состав автоматизированных модулей и участков
6. Шлифовальные станки, обрабатывающие центры и ГПМ шлифования.
7. Станки для физико-технической обработки.
8. Электроискровые и электроэрозионные станки.
9. Станки для ультразвуковой и лазерной обработки.
10. Станки для гидроабразивной обработки.
11. Терминология и области использования МПС.
12. Типовые виды технологического оборудования с МПС.

### А.4 ВОПРОСЫ ДЛЯ ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ

1. Современное станкостроение: общие сведения и тенденции развития.
2. Мехатронные системы в технологическом оборудовании.
3. Сравнительная оценка автоматизированного станочного оборудования при проектировании новых образцов.
4. Модульный принцип компоновки традиционного технологического оборудования.
5. Агрегатно-модульная структура компоновки оборудования.

6. Структурные формулы компоновок и формализованное описание узлов.
7. Токарные станки и комплексы.
8. Адаптация станков с ЧПУ для работы в роботизированных модулях.
9. Многооперационные станки для обработки корпусных деталей.
10. Принципы встраивания в состав автоматизированных модулей и участков
11. Шлифовальные станки, обрабатывающие центры и ГПМ шлифования.
12. Станки для физико-технической обработки.
13. Электроискровые и электроэрозионные станки.
14. Станки для ультразвуковой и лазерной обработки.
15. Станки для гидроабразивной обработки.
16. Обрабатывающее оборудование, построенное с использованием механизмов параллельной структуры (МПС).
17. Терминология и области использования МПС.
18. Анализ построения МПС.
19. Типовые структуры МПС.
20. Рабочие пространства станков с МПС.
21. Типовые виды технологического оборудования с МПС.
22. Компоновка и конструкции станочного оборудования с МПС и штангами постоянной длины.
23. Компоновка и конструкции станочного оборудования с МПС и штангами переменной длины.
24. Компоновка и конструкции станочного оборудования с МПС с гибридной кинематикой.
25. Концепция гибридных каркасных компоновок станков с МПС.
26. Особенности гибридных каркасных компоновок и принципы их создания.
27. Прогнозирование, перспективы развития и расширение области применения технологического оборудования с МПС.
28. Использование станков с ЧПУ в РТК и в составе гибких производственных систем (ГПС).
29. Виды ГПС их состав.
30. Автоматизированные складские системы.
31. Транспортно-накопительные системы.
32. Компоновки ГПС.

## Приложение Б

### Варианты модульного исполнения многооперационных станков

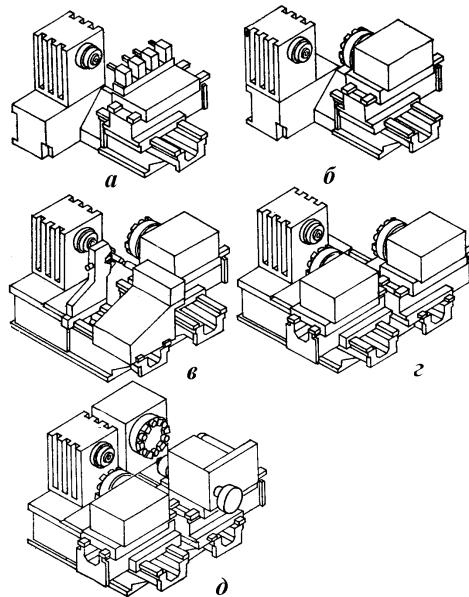


Рис. Б.1. Токарные многооперационные станки фирмы «Boley»: *a* – двухкоординатный с системой неврещающихся инструментов; *б* – двухкоординатный с 12-позиционной револьверной головкой; *в* – двухкоординатный с 12-позиционной револьверной головкой и задней бабкой; *г* – четырехкоординатный с 12-позиционными револьверными головками и шпиндельной бабкой; *д* – четырехкоординатный с 12-позиционными револьверными головками и двумя шпиндельными бабками

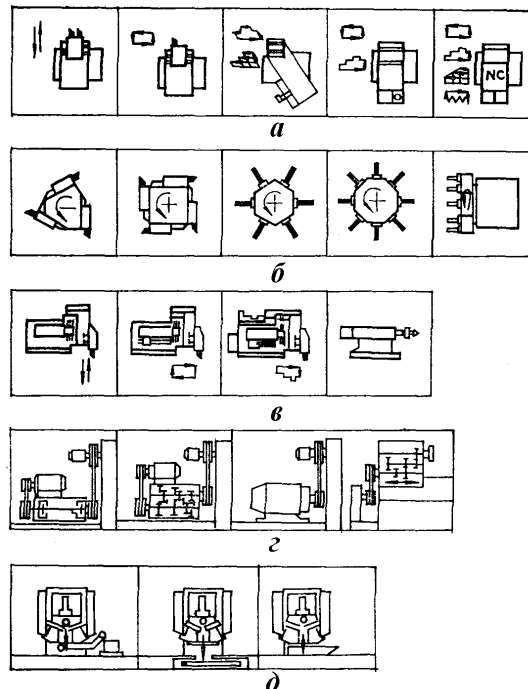


Рис. Б.2. Унифицированные модули токарных автоматов с ЧПУ фирмы «Emag»: *a* – нижние салазки; *б* – инструментальные системы; *в* – верхние салазки; *г* – приводы шпинделей изделий; *д* – стружкоуборочные устройства

## Приложение В

### Обозначение осей координат и направлений движений на схемах станков с ЧПУ

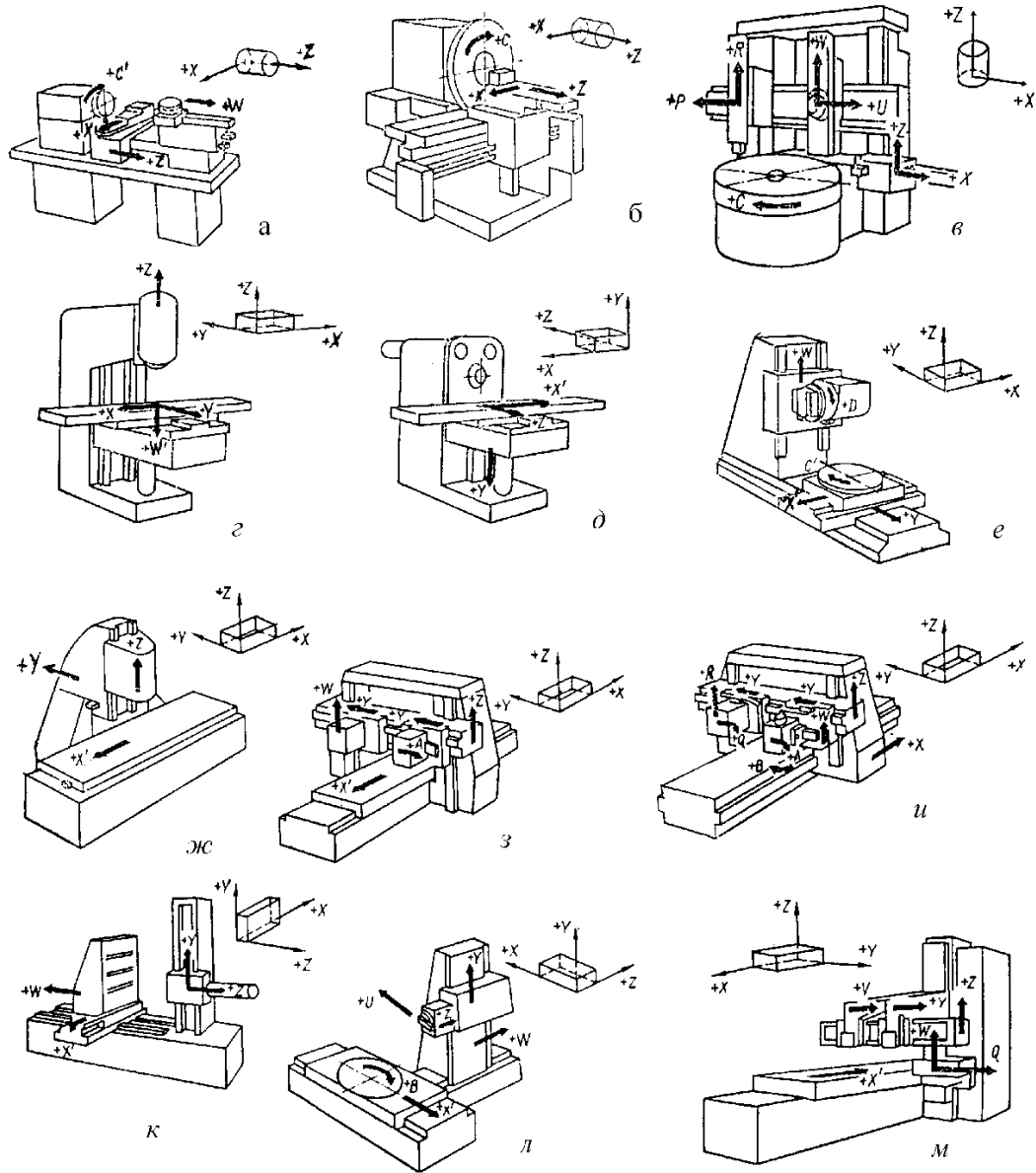


Рис. В.1. Обозначение осей и направлений перемещений станков:  
*а* – токарно-револьверного; *б* – лоботокарного; *в* – токарно-карусельного;  
*г* – вертикально-фрезерного; *д* – горизонтального консольно-фрезерного;  
*е* – фрезерного с поворотным столом и поворотной бабкой; *ж* – вертикального  
 портально-фрезерного; *з* – двухстоечного портально-фрезерного; *и* – двухстоечного  
 с подвижным порталом; *к* – горизонтально-расточного с неподвижной передней  
 бабкой; *л* – с продольно-подвижной передней бабкой; *м* – продольно-строгального

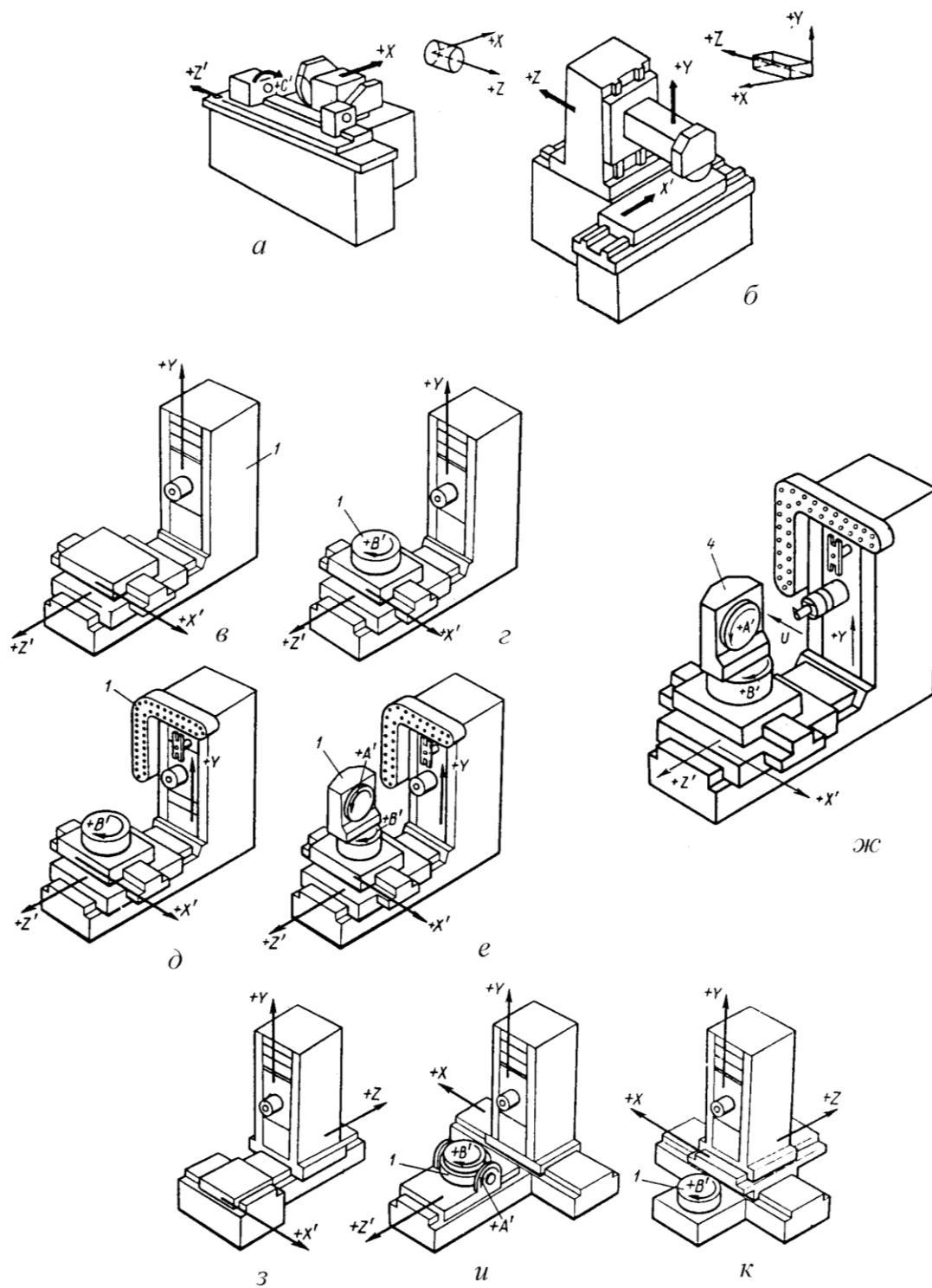


Рис. В.2. Обозначение осей координат станков с ЧПУ: *а* – круглошлифовального; *б* – плоскошлифовального; *в, г, д, е, ж* – многооперационных станков средних габаритов; *з, и, к* – многооперационных станков различных компоновок

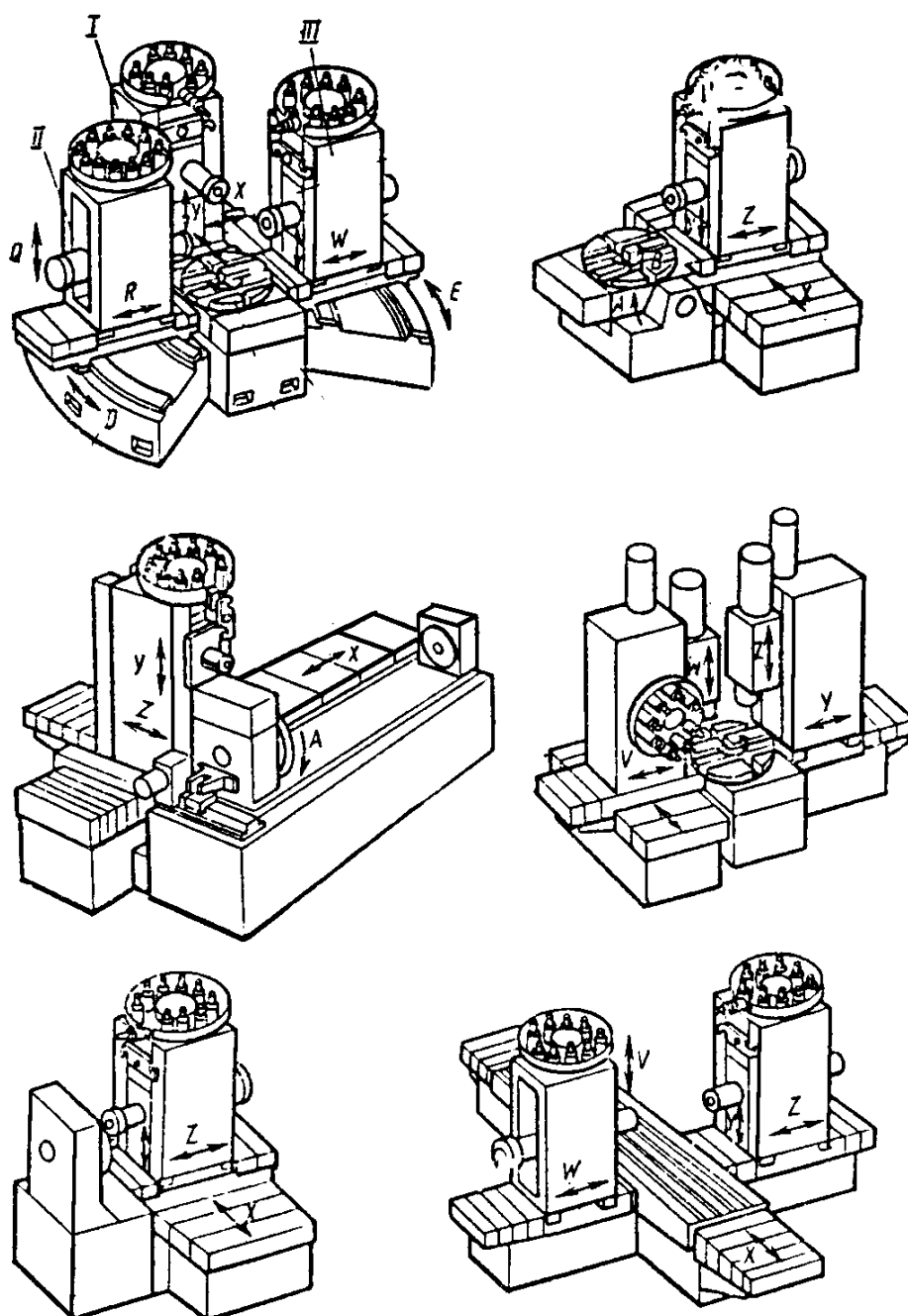


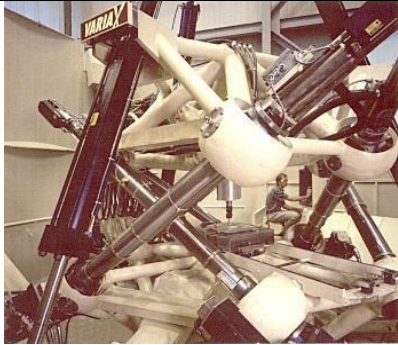
Рис. В.3. Обозначение осей координат и направлений движений агрегатных станков с ЧПУ

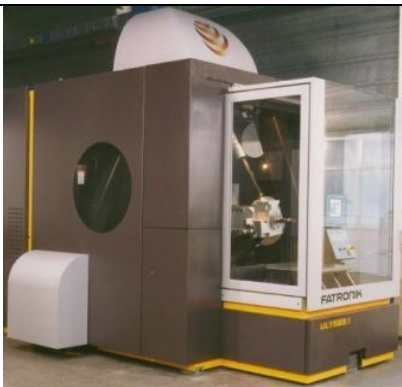
## Приложение Г

### Основные мировые производители многооперационных станков с МПС

Т а б л и ц а Г.1

#### Модели производителей многооперационных станков с МПС

| №<br>п/п | Общий вид                                                                           | Основные<br>характеристики                                                                                                                                           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        |    | Модель <b>Variax</b><br>Производитель: <b>Giddings &amp; Lewis</b> (США)<br>Шестикоординатный высокопрецизионный обрабатывающий центр с МПС класса гексапод          |
| 2        |   | Модель <b>Hexapod HON-600</b><br>Производитель: <b>Ingersoll Cutting Tools</b> (Германия, США)<br>Станок-гексапод для горизонтального пятикоординатного фрезерования |
| 3        |  | Модель <b>Tornado</b><br>Производитель: <b>Hexel</b> (США)<br>Станок-гексапод для горизонтальной пятикоординатной обработки                                          |

|   |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                  |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4 |    | <p>Модель <b>HexaM</b><br/>         Производитель: <b>Toyota Machine Works</b> (Япония)<br/>         Пятикоординатный вертикальный фрезерный станок-гексаглайд с несущим модулем в виде трехгранной пирамиды</p> |
| 5 |   | <p>Модель <b>Ulysses</b><br/>         Производитель: <b>Fatronik</b><br/>         Трехкоординатный многоцелевой станок с четырьмя кинематическими цепями в виде трипода и V-образного механизма</p>              |
| 6 |  | <p>Модель <b>Quickstap HS500</b><br/>         Производитель: <b>Krauseco and Mauser</b> (Австрия)<br/>         Многооперационный станок с МПС на основе дельта-структуры</p>                                     |
| 7 |  | <p>Модель <b>SEYANKA</b><br/>         Производитель: <b>Tekniker</b><br/>         Многооперационный станок-пентапод для пятикоординатной обработки</p>                                                           |

|    |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8  |    | <p>Модель <b>Eclipse</b><br/>         Производитель: <b>Daeyong Mashine</b> (Китай)<br/>         Пятикоординатная обработка с помощью 8 рабочих элементов на основе RP-технологии (быстрое прототипирование)</p>                                                        |
| 9  |   | <p>Модель <b>Cosmo center PM-600</b><br/>         Производитель: <b>Okuma</b> (Япония)<br/>         Шестикоординатный станок-гексапод для обработки сложных объемных поверхностей штампов</p>                                                                           |
| 10 |  | <p>Модель <b>VerticalLine V100</b><br/>         Производитель: <b>INDEX-Werke</b> (Германия)<br/>         Станок с МПС на основе дельта-робота для трехкоординатной обработки (токарной, фрезерной, лазерной закалки, лазерной сварки, шлифования, операции сборки)</p> |
| 11 |  | <p>Модель <b>METROM Pentapod P 800</b><br/>         Производитель: <b>METROM</b> (Германия)<br/>         Многооперационный станок с МПС типа пентапод на основе 3-х основных и 2-х дополнительных штанг переменной длины</p>                                            |

|    |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12 |    | <p>Модель <b>Delta Robot</b><br/>         Производитель: <b>Hitachi Seiki</b> (Япония)<br/>         Многооперационный станок для сверлильно-расточных операций</p>                                                                                                                                                                |
| 13 |   | <p>Модель <b>ТМ-1000</b> Производитель: ООО «Лапик», г. Саратов (Россия). Многофункциональные технологические модули серии ТМ - это шестиосевое обрабатывающее оборудование, объединяющие возможность обработки и измерения детали на одном рабочем месте.</p>                                                                    |
| 14 |  | <p>Модель <b>ГЕКСAMEX-1</b><br/>         Производитель: ОАО «САВМА» г. Савеловск (Россия). Пятикоординатный обрабатывающий центр с МПС класса гексапод для многооперационной обработки изделий сложной пространственной формы (балки, рамы, нервюры, лонжероны, шпангоуты, панели, литейные модели, формообразующая оснастка)</p> |



**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ  
СТРУКТУР СОВРЕМЕННЫХ  
МНОГООПЕРАЦИОННЫХ СТАНКОВ**

*Методические указания  
к проведению практических занятий*

*Составители:* **Харченко** Александр Олегович, **Братан** Сергей Михайлович,  
**Владецкая** Екатерина Александровна, **Рощупкин** Станислав Иванович

*Редактор – О.В. Дмитриева*

Изд. № 46/18. Объем 7,75 п.л.  
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»