

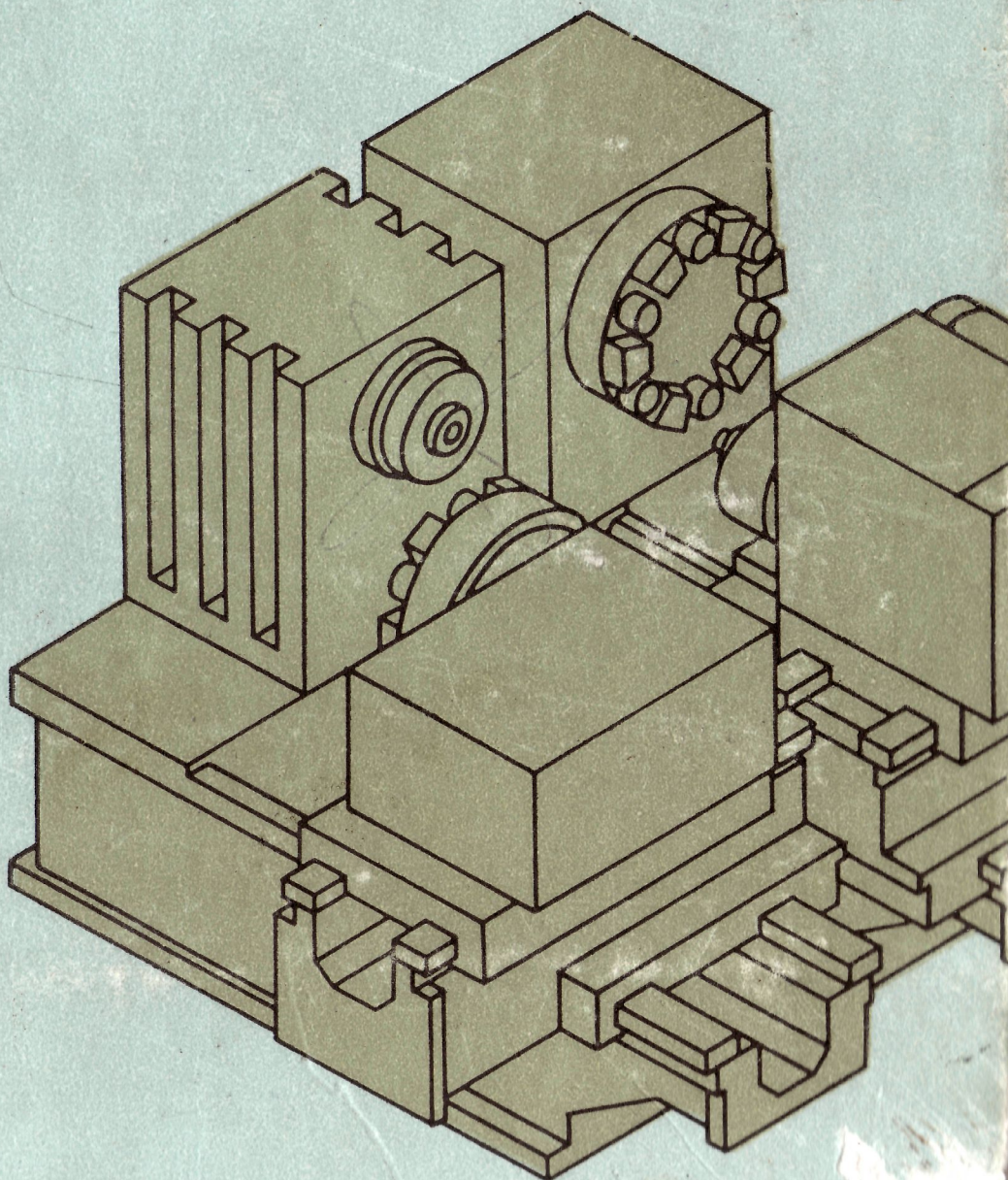
621.9

К89

Ю.Н.Кузнецов

Станки

с ЧПУ



ББК 34.63—5я73

К 89

УДК 621.9-529:681.322(07)

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А. И. Федотов (Ленинградский политехнический институт), д-р техн. наук, проф. Ю. В. Тимофеев (Харьковский политехнический институт)

Редакция литературы по машиностроительному комплексу
Редактор И. П. Якимец

Кузнецов Ю. Н.

К89 Станки с ЧПУ: Учеб. пособие.— К.: Выща шк., 1991.— 278 с.: ил.

ISBN 5-11-001906-1

Приведены основные понятия и определения по автоматическим системам управления технологическими процессами, станками с различной степенью автоматизации и производительности. Дана классификация станков с ЧПУ по различным признакам. Освещены вопросы компоновки, расчета и конструирования этих станков, станочных модулей, их типовых механизмов и устройств. Показана возможность применения ЭВМ на различных этапах создания новых станков, а также эффективность применения на верхних уровнях проектирования современных методов поиска новых технических решений.

Для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты».

К 2705020000-122
М211(04)-91 129-90

ББК 34.63—5я73

ISBN 5-11-001906-1

© Ю. Н. Кузнецов, 1991

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
1. Общие сведения и принципы оптимального проектирования станков с ЧПУ	7
1.1. Основные направления развития советского станкостроения	7
1.2. Основные понятия и определения	11
1.3. Классификация станков с ЧПУ	18
1.4. Техничко-экономические показатели станков с ЧПУ	21
1.5. Точность и жесткость станков с ЧПУ	25
1.6. Эволюция конструкций и конструктивные погрешности станков с ЧПУ	32
1.7. Эволюция и конструктивные погрешности систем ЧПУ	40
2. Особенности проектирования станков с ЧПУ	44
2.1. Этапы процесса создания новых станков	44
2.2. Основные предпосылки оптимального проектирования станков как технической системы	49
2.3. Выбор принципиальной схемы станков с ЧПУ	56
2.4. Особенности проектирования станков с адаптивным управлением	59
2.5. Структура компоновок станков с ЧПУ	67
2.6. Математические свойства структурных формул компоновок	75
2.7. Выбор оптимального решения при проектировании станков	78
3. Принципы построения станков с ЧПУ	83
3.1. Общие принципы построения однопозиционных станков с ЧПУ	83
3.2. Тенденции построения токарных станков с ЧПУ	89
3.3. Особенности построения сверлильных, расточных и фрезерных станков с ЧПУ	93
3.4. Особенности построения зубообрабатывающих станков с ЧПУ	99
3.5. Особенности построения шлифовальных станков с ЧПУ	103
3.6. Принципы построения многооперационных станков для плоских и корпусных деталей	106

3.7. Особенности построения многооперационных станков для тел вращения	114
3.8. Принципы построения и расчет числа позиций многопозиционных станков с ЧПУ	119
3.9. Компоновка двухшпиндельных токарных автоматов с ЧПУ	127
3.10. Особенности построения многошпиндельных токарных автоматов с ЧПУ	133
4. Проектирование приводов и расчет характеристик рабочих органов станков с ЧПУ	150
4.1. Структура привода станка	150
4.2. Выбор и расчет привода главного движения	154
4.3. Выбор и расчет привода подачи	159
4.4. Расчет точности конечных положений рабочего органа поступательного действия	162
4.5. Расчет точности конечных положений рабочего органа поворотного и вращательного действия	165
4.6. Расчет податливости шпиндельных узлов	169
4.7. Расчет податливости шариковой винтовой передачи	181
5. Конструирование и расчет механизмов и устройств автоматического манипулирования заготовками	183
5.1. Типовые механизмы и устройства станков с ЧПУ	183
5.2. Способы автоматической загрузки заготовок	186
5.3. Конструирование и расчет механизмов автоматической подачи прутка	190
5.4. Конструирование устройств автоматической смены заготовок	210
5.5. Общие принципы конструирования механизмов автоматического зажима заготовок	212
5.6. Конструирование и основные характеристики зажимных патронов	227
6. Конструирование и расчет механизмов и устройств автоматического манипулирования инструментом и рабочими органами.	249
6.1. Конструирование и расчет устройств автоматической смены инструмента	243
6.2. Механизмы автоматической смены зажимных патронов и их элементов	255
6.3. Конструирование и расчет механизмов автоматического закрепления режущего инструмента	261
6.4. Конструирование и расчет механизмов автоматического зажима подвижных рабочих органов	269
Список использованной и рекомендуемой литературы	274
Предметный указатель	278

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитию народного хозяйства предстоит придать такое ускорение, которое обеспечит выход его на высокие рубежи.

Для решения основной задачи повышения производительности труда и качества выпускаемой продукции при минимальных затратах необходимо широкое внедрение машин и оборудования со встроенными средствами микропроцессорной техники, однооперационных и многооперационных станков с числовым программным управлением (ЧПУ), робототехнических комплексов и гибких производственных систем.

В последнее время машиностроительный комплекс приобретает такие новые качества, как гибкость и экономичность, высокий уровень автоматизации производственных процессов и минимальный расход энергии и сырья. Использование станков-автоматов и станков с ЧПУ делает труд рабочего и инженера творческим, свободным от рутинных действий.

Современный станок с ЧПУ представляет собой самоуправляющуюся рабочую машину, органически связанную с вычислительной машиной, работающей в реальном масштабе времени и преобразующей дискретные сигналы информации в дискретные сигналы управления.

Материал учебного пособия построен на основе многолетнего опыта преподавания спецкурса «Станки с ЧПУ» в Киевском политехническом институте, а также с учетом качественных изменений, происшедших в области отечественного и мирового станкостроения в последнее десятилетие.

Основное внимание в учебном пособии уделено системному подходу к проектированию станков с ЧПУ и их механизмов. В нём сформулированы принципы построения и компоновки однооперационных и многооперационных станков, однопозиционных и многопозиционных станков.

Приведены основы конструирования и методики расчета приводов станков с ЧПУ, механизмов и устройств рабочих и вспомогательных движений. Последний материал, к сожалению, ограничен небольшим объемом книги.

Цель настоящего учебного пособия — помочь студентам вузов, обучающимся по специальности 1202 «Металло-режущие станки и инструменты», в изучении основ конструирования и расчета станков с ЧПУ и станочных комплексов.

При подготовке рукописи к печати автор учел ценные критические замечания рецензентов, за которые выражает им глубокую благодарность.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ПРИНЦИПЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ

1.1. Основные направления развития советского станкостроения

В настоящее время большое внимание уделяется совершенствованию структуры выпускаемых станков, станочных комплексов, и в первую очередь — станков с ЧПУ, многооперационных станков типа «обрабатывающий центр», тяжелых станков, станков высокой и особо высокой точности, автоматизированных и роботизированных комплексов и линий, гибких производственных систем.

Основные направления развития отечественного станкостроения подчинены следующим главным целям: 1) повышению производительности обработки; 2) повышению качества обработки; 3) снижению затрат на обработку; 4) улучшению условий труда; 5) интеллектуализации производства; 6) расширению технологических возможностей оборудования. Достижение первых трех целей позволит решить технико-экономические проблемы за счет максимальной автоматизации производства, эффективность которой можно

оценить по выражению [4] $\Theta = \frac{\Pi \cdot K}{3}$, где Π — параметр производительности [$\Pi = (T_{\text{ш}} - T_{\text{п}})/T_{\text{м}}$, $T_{\text{ш}}$ — штучное время; $T_{\text{п}}$ — время на обработку; $T_{\text{м}}$ — среднее машинное время]; K — параметр качества, который может быть определен на основе сравнения требуемого и фактического качеств по отдельным критериям — размерам, форме, массе, шероховатости обработанной поверхности с учетом весовых коэффициентов [17]; 3 — суммарные затраты на обработку, состоящие из капитальных, временных и отнесенных к изготавливаемой детали затрат. Достижение четвертой и пятой целей позволит решить социально-экономические проблемы путем широкого внедрения комплексной автоматизированной системы научных исследований, проектирования новых технических систем подготовки и освоения производства. Достижение шестой цели

позволит решить многие технические, экономические и социальные проблемы.

На современном этапе развития машиностроительного комплекса, и в частности в станкостроении, наметились следующие главные тенденции: 1) широкое применение концентрации (совмещения) операций, что ведет к повышению производительности при снижении ее трудоемкости; 2) применение ресурсосберегающих малоотходных и безотходных технологий, повышающих коэффициент использования металла и сокращающих расход энергии; 3) совмещение в одном станке нескольких методов обработки (шлифования и электрохимической, механической и термической, резания и тонкого пластического деформирования, зубофрезерования и зубошлифования, точения и протягивания и т. д.), что сокращает количество оборудования и снижает трудоемкость изготовления; 4) агрегатно-модульный принцип построения станков, станочных комплексов и другого технологического оборудования, что повышает степень его унификации, качество изготовления и сборки, надежность работы, сокращает сроки и затраты на проектирование и изготовление; 5) стремление к прецизионной и ультрапрецизионной обработке (например, таких деталей, как барабаны и диски памяти, элементы интегральных схем, зеркальные поверхности телескопов) путем сокращения кинематических цепей и замены механических цепей электрическими, что повышает качество обработки и снижает металлоемкость оборудования; 6) стремление к безлюдной технологии за счет гибкой комплексной автоматизации, широкой роботизации, применения диагностических систем, что повышает коэффициенты сменности и использования оборудования; 7) миниатюризация систем управления и возможность наращивания управляющих координат систем ЧПУ; 8) применение станков с ЧПУ даже в крупносерийном и массовом многономенклатурном производстве наряду с высокопроизводительными станками-автоматами.

Первые две тенденции определяют работы, связанные с поиском новых технологических принципов, заменой дробной технологии обработки на отдельных однопозиционных и однооперационных станках совмещением операций на многопозиционных и многооперационных станках и автоматических станочных системах.

Актуальность вопросов экономного использования материальных ресурсов и энергии обусловлена ростом производства продукции машиностроения, который вызывает

необходимость вовлечения в производство огромных сырьевых, топливно-энергетических и других материальных ресурсов. В решении этих вопросов возникает необходимость применения заготовок, приближающихся по форме к готовым деталям, что во многих случаях требует замены резания другими видами малоотходной обработки и для простых деталей делает эффективным использование роторной и роторно-конвейерной обработки.

Планируется взамен ежегодного выпуска 200 тыс. одноцелевых станков выпускать примерно 75 тыс. многоцелевых станков, уменьшая при этом расход чугуна в 2 раза.

Третья, четвертая и пятая тенденции требуют изменения структуры, компоновочных и схемных решений станков с ЧПУ, станочных комплексов и другого технологического оборудования. В станке или в системе устанавливается исходная единица (modul — мера) для данного типоразмера, обеспечивающая соизмеримость взаимосвязи отдельных частей (узлов, агрегатов, блоков и т. д.) создаваемой технической системы. Эти тенденции наблюдаются на эволюции отдельных станков, систем ЧПУ, промышленных роботов, различных средств станочных систем и другого технологического оборудования.

Шестая тенденция в настоящее время особенно четко просматривается в том, что на смену и в развитие механизации, жесткой автоматизации пришли роботизация и компьютеризация управления, позволяющие существенно сократить и облегчить физический, а также умственный труд человека в эпоху ускорения технического прогресса, интенсификации машинного и интеллектуального труда. Особую роль должны сыграть гибкие автоматизированные производства (ГАП), оснащенные самым современным технологическим оборудованием, вычислительной техникой и робототехническими системами.

Модульная, многоуровневая структура ГАП включает три основных компонента: 1) производство и сборку (станки с ЧПУ, станочные модули, роботы-манипуляторы, транспортные средства, автоматизированные складские комплексы); 2) систему автоматизированного управления с широким применением микропроцессорной техники и адаптивных коммутационных устройств; 3) технологическую подготовку, содержащую маршруты, режимы обработки деталей, номенклатуру инструмента. Все эти компоненты объединены единой системой планирования и управления производством, оснащенной мощной вычислительной техникой с бан-

ком данных и устройствами автоматизированного контроля, диагностики, подготовки и обработки информации.

Эффективность ГАП во многом зависит от вида оборудования, причем наибольший эффект могут дать многопозиционные обрабатывающие центры с большой интеграцией операций. Как показывает опыт эксплуатации, ГАП по сравнению с участками, оснащенными универсальными станками, позволяют в 5 раз снизить трудоемкость обработки деталей, в 3 раза сократить обслуживающий персонал, почти в 2 раза — сроки и стоимость подготовки производства.

Главная задача гибкой автоматизации в едином производственном цикле — эффективное использование интеллектуального труда в сочетании с роботизацией и компьютеризацией управления.

Развитие перспективных технологий на основе ГПС сформировало новое научное направление, которое получило название — мехатроника (механика и электроника). Недалеко то время, когда от ЭВМ будут управляться не только участки и цеха-автоматы, но и заводы-автоматы с минимальным составом производственного персонала.

Седьмая тенденция характеризуется тем, что, согласно прогнозам, каждые десять лет системы управления по габаритам должны уменьшаться в 10 раз при снижении их стоимости, что стало реальным с появлением микропроцессоров, позволяющих сократить габариты узлов управления при увеличении объема памяти и расширении их возможностей.

На базе усовершенствования технологии производства микроэлементов большой степени интеграции как вычислительно-логических (микропроцессоры), так и запоминающих (БИС-память) решительно проявляется тенденция так называемой «компьютеризации» систем ЧПУ, т. е. построение их по структуре вычислительных машин на микропроцессорных комплектах и полупроводниковой памяти (БИС) расширенного объема; решение функций управления обработкой на станке средствами математического обеспечения в виде программ функционирования, вводимых в память системы.

Примером восьмой тенденции является применение станков с ЧПУ и гибких станочных модулей в основных механических цехах подшипниковой отрасли.

1.2. Основные понятия и определения

С точки зрения автоматизации важной характеристикой оборудования, в частности станков, является степень их универсальности, так как от этого зависят способы, формы и уровень автоматизации.

Под *автоматизацией* понимают совокупность мероприятий по разработке технологических процессов и созданию высокопроизводительных автоматически действующих средств производства, освобождающих человека от всех работ, связанных с выполнением технологического процесса и оперативного управления им (автоматизация — это самоуправление). Автоматизация может быть частичной и полной (или комплексной). Иногда комплексная автоматизация, включающая полную обработку изделия (от заготовки до готовой продукции), может быть осуществлена на одном автомате, например, изготовление из прутка винта со шлицем на одношпиндельном токарно-револьверном автомате при наличии шлицефрезерного устройства. Чаще всего для комплексной автоматизации требуется создание автоматических линий, цехов и заводов.

Все способы автоматизации обработки металлов резанием можно разделить на два вида: жесткую и гибкую.

Жесткая автоматизация применяется исключительно в массовом и крупносерийном производстве и базируется на применении специальных и специализированных станков, где переход на другой вид изделия требует большой затраты времени. Однако подавляющая часть продукции выпускается небольшими партиями, что связано с непрерывным прогрессом техники, уменьшением сроков морального износа оборудования, быстрой сменяемостью объектов производства. Так, в США примерно 90 % производства приходится на небольшие партии (менее 25 шт.). Достаточно сказать, что к единичному и мелкосерийному производству относится почти все тяжелое машиностроение (производство крупных и уникальных станков, судов, турбо-, авиастроение и т. д.).

Автоматы и полуавтоматы различного технологического назначения появились давно. Автоматизация движения в таких станках осуществляется различного рода кулачками, командоаппаратами, коноидами, шарнирами и другими кинематическими элементами, задающими не только величину, но и скорость перемещения рабочего органа. Недостатки таких станков: износ кулачков, что приводит



Рис. 1.1. Иерархия уровней и средств автоматизации в различных видах производства

к снижению точности; сложность переналадки и длительность регулировки. Однако из-за высокой надежности и простоты они являются мощным средством автоматизации.

В настоящее время становится актуальной автоматизация единичного и мелкосерийного производств, сочетающая высокую производительность автоматов и полуавтоматов с широкими технологическими возможностями станков с ЧПУ при их быстрой переналадке. В этом и заключается смысл *гибкой автоматизации*.

Характерный пример гибкой автоматизации — копировальный станок. Однако автоматизация на основе копировальных станков со следящим приводом осложняется большими затратами времени на изготовление шаблонов и копиров (несколько месяцев). Учитывая тот факт, что в последнее время возросла потребность в изготовлении фасонных изделий сложной и часто изменяемой формы, возникла потребность в более гибких и мобильных системах управления, к которым относятся системы ЧПУ.

В зависимости от вида производства для осуществления автоматизации требуются различные средства (рис. 1.1). Если в условиях жесткой автоматизации при массовом и крупносерийном производстве обработка несложных деталей осуществляется на станке-автомате, например, дета-

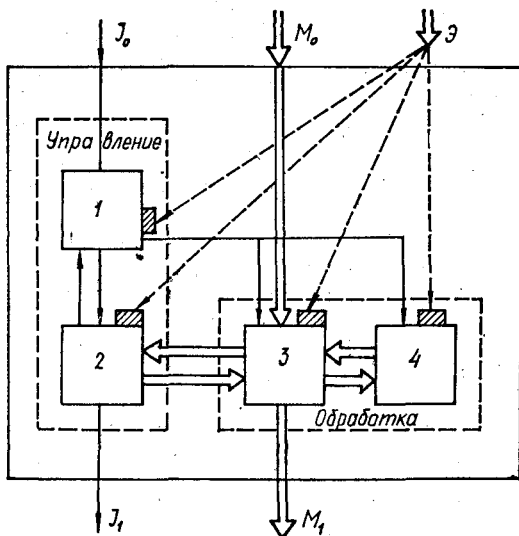


Рис. 1.2. Структурная схема станка:

J_0, J_1 — входная и выходная информации; M_0, M_1 — заготовка и изделие; $Э$ — энергия; 1, 2, 3, 4 — подсистемы соответственно управления, контроля, манипулирования, обработки

ли тел вращения, более сложных корпусных деталей — на однопозиционном или многопозиционном агрегатном станке, а еще более сложных деталей — на автоматической линии, то в условиях гибкой автоматизации при серийном, мелкосерийном и единичном производстве несложных деталей требуется станок с ЧПУ, более сложных — многооперационный станок, а еще более сложных — гибкая станочная система.

Единицей основного оборудования как средства автоматизации является металлорежущий станок, представляющий систему, состоящую из нескольких функциональных подсистем (рис. 1.2.) [32].

Подсистема манипулирования обеспечивает загрузку и зажим заготовок, разжим, перемещение и разгрузку готовых изделий, смену режущих инструментов, приспособлений и рабочих органов станка. Подсистема управления на основе входной внешней информации (чертеж, маршрутная технология, управляющая программа) и дополнительной внутренней информации от контрольных и измерительных устройств обеспечивает правильное функционирование всех

остальных подсистем в соответствии с поставленной задачей. Текущая информация поступает в подсистему управления от соответствующих преобразователей (датчиков) подсистемы контроля. Выходная информация содержит сведения о фактических параметрах обработанной детали.

Рабочий цикл станка как машины складывается из длительности рабочих t_p и холостых t_x ходов:

$$T = t_p + t_x. \quad (1.1)$$

За время рабочего цикла станок выдает одну или несколько деталей, т. е. каждый механизм за цикл обработки одной детали, как правило, срабатывает один раз.

Так как большинство движений и процессов являются циклическими, то для увязки работы отдельных механизмов удобно пользоваться условными диаграммами — циклограммами.

Циклограммы чаще всего показывают зависимость перемещений рабочих органов от времени или от соответствующих углов поворота распределительного вала и бывают:

1) круговые (в полярной системе координат), где циклу движения каждого механизма соответствует окружность произвольного радиуса, на которой изображены фазы движения с поясняющими надписями (рис. 1.3, а);

2) линейные, где работе каждого механизма соответствует отрезок прямой (или полосы) с изображением фаз движения и поясняющими надписями (рис. 1.3, б);

3) с условным изображением рабочих органов в прямоугольной системе координат (рис. 1.3, в), наиболее часто применяемые; такие циклограммы могут строиться для перемещений ($s - t$), скоростей ($v - t$ или $\omega - t$), ускорений, нагрузок, давления в гидросистеме и т. д.; синхронные диаграммы дают возможность проверить правильность цикла и по возможности совместить во времени, т. е. «уплотнить» цикл;

4) смещенные диаграммы движения рабочих органов и органов управления (рис. 1.3, г), где числами обозначены моменты подачи команд и положения органов управления в течение цикла; каждое одновременное переключение органов управления называют тактом, а последовательность переключения изображают в виде тактограмм;

5) упрощенные линейные (рис. 1.3, д) или в координатах $v - s$ (рис. 1.3, е) для возвратно-поступательного движения рабочего органа.

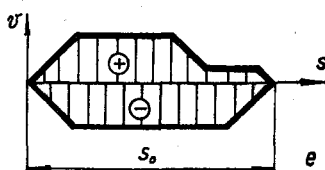
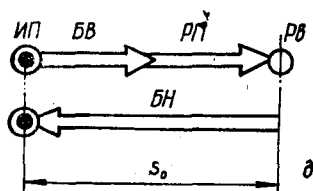
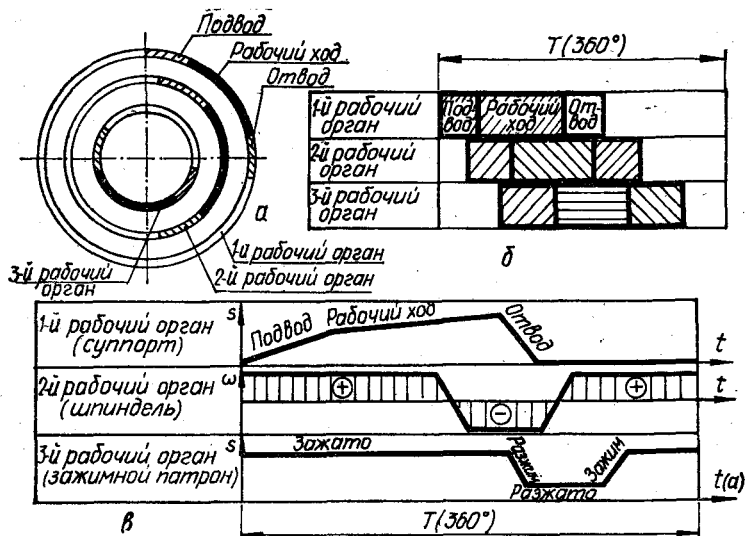


Рис. 1.3. Виды циклограмм:

положение 0 — выключено; положение 1 — включено; ИП — исходное положение; БВ — быстро вперед; РП — рабочая подача; РВ — реверс; БН — быстро назад; S_0 — общий ход

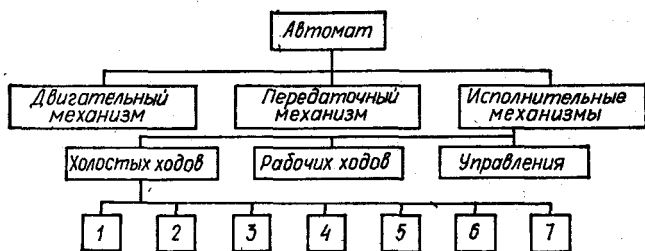


Рис. 1.4. Структурная схема механизмов автомата:

1 — питания; 2 — зажима; 3 — переключения; 4 — регулирования хода; 5 — контроля качества; 6 — контроля количества; 7 — прочие

Если станок, кроме рабочих ходов, самостоятельно выполняет и холостые, то он считается автоматом (рис. 1.4) или полуавтоматом.

Станком-автоматом называется самоуправляющаяся рабочая машина, которая при осуществлении заданного технологического процесса самостоятельно выполняет все рабочие и холостые движения цикла обработки и нуждается лишь в контроле за ее работой и наладке. Степень автоматизации станка можно повысить путем введения автоматических внецикловых механизмов и устройств, не связанных непосредственно с рабочим циклом автомата (замена и регулировка инструмента, уборка отходов и т. д.).

Станком-полуавтоматом называется рабочая машина, работающая в автоматическом цикле, для повторения которого требуется вмешательство рабочего (загрузка заготовок и разгрузка деталей, пуск станка, режущая ориентация изделий).

Станок с ЧПУ также является станком-автоматом и отличается лишь способом преобразования информации.

Процесс преобразования информации в станке-автомате состоит в преобразовании дискретных сигналов, заданных конструкторской и технологической документацией, в непрерывные (аналоговые) сигналы системы управления. Ему присущи два основных недостатка: 1 — информация однозначно превращается из дискретной в аналоговую, что приводит к погрешностям при изготовлении и изнашивании; 2 — необходимо изготавливать копии, кулачки и выполнять трудоемкую наладку.

Процесс преобразования информации в станках с ЧПУ — это преобразование дискретных сигналов в дискретные с вытекающими отсюда двумя основными достоинствами:

1 — возможность выполнения сложных движений за счет управления несколькими координатами; 2 — абстрактный и однозначный характер информации, что позволяет автоматизировать процесс программирования с применением ЭВМ и автоматизировать в комплексе цепочку: проектирование — программирование — производство.

Для комплексной обработки деталей различными видами инструментов применяются многооперационные станки, оснащенные системой ЧПУ, автоматическими сменой и закреплением режущего инструмента и обеспечивающие обработку детали за один установ с различных сторон.

Для комплексной обработки сложных деталей в условиях массового и крупносерийного производства станки-автоматы объединяют в автоматические линии [16]. *Автоматическая линия* — автоматически действующая система станков и других машин, расположенных в технологической последовательности и объединенных общими средствами транспортировки, управления, накопления заделов, удаления отходов и др.

Создание гибких автоматизированных производств (ГАП) является генеральным направлением автоматизации машиностроения в условиях мелкосерийного производства. ГАП — это принципиально новый тип производства, основанный на использовании металлообрабатывающих станков с ЧПУ, в том числе быстроперенастраиваемого многоцелевого оборудования, промышленных роботов и ЭВМ.

В настоящее время часто применяется термин «гибкая производственная система» (ГПС). Это более конкретное понятие, применяемое к определенному типу системы. ГПС (ГОСТ 26228—85) — совокупность в разных сочетаниях оборудования с ЧПУ, гибких производственных модулей (ГПМ), роботизированных технологических комплексов (РТК), отдельных единиц технологического оборудования и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного интервала времени, обладающая свойствами автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик.

Итак, основными составными частями ГПС являются: ГПМ — единица технологического оборудования для производства изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик с программным управлением, автономно функционирующая, автоматически осуществляющая все функции, связанные с их изготов-

лением, имеющая возможность встраивания в ГПС; РТК — совокупность единиц технологического оборудования, промышленного робота и средств оснащения, автономно функционирующая и осуществляющая многократные рабочие циклы; ГПС — совокупность взаимосвязанных автоматизированных систем проектирования изделий, технологической подготовки их производства, управления при помощи ЭВМ, перемещения предметов производства и технологической оснастки.

В общем случае в обеспечение функционирования ГПС входят следующие автоматизированные системы: транспортно-складская (АТСС); инструментального обеспечения (АСИО); контроля (САК); удаления отходов (АСУО); управления технологическими процессами (АСУ ТП); научных исследований (АСНИ); проектирования (САПР); технологической подготовки производства (АСТПП); управления (АСУ).

1.3. Классификация станков с ЧПУ

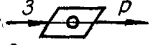
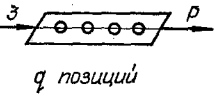
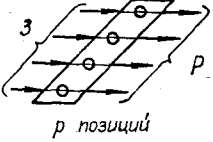
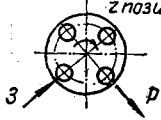
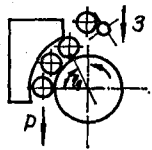
Металлорежущие станки с ЧПУ классифицируют:

1. По степени автоматизации — автоматы и полуавтоматы.
2. По назначению — одноцелевые и многоцелевые.
3. По степени универсальности — специальные, специализированные, универсальные.
4. По характеру выполняемых работ — токарные, сверлильные, шлифовальные, фрезерные, зуборезьбообрабатывающие.
5. По компоновке — вертикальные, горизонтальные, наклонные.
6. По роду привода — с гидро-, пневмо-, электроприводом.
7. По степени точности — Н — нормальной, П — повышенной, В — высокой, А — особо высокой и С — сверхвысокой.

В зависимости от класса точности допуски следующие: Н — 1,0; П — 0,6; В — 0,4; А — 0,25; С — 0,15.

8. По принципу построения технологического процесса — для одновременной обработки одной детали (например, с нескольких сторон) или для одновременной обработки нескольких деталей (табл. 1.1). В этом случае при учете времени работы одного режущего инструмента и бесперебойной работе время, приходящееся на обработку одной

1.1. Схемы построения технологических процессов станков с ЧПУ

№ п/п	Схема	Вид обработки	Время цикла, приходящееся на одну деталь
1	 3-загрузка p-разгрузка	Однопозиционная	$t_{p_0} + t_x$
2	 q позиций	Многопозиционная последовательная	$\frac{t_{p_0}}{q} + t_x = \frac{t_{p_0} + q t_x}{q}$
3	 p позиций	Многопозиционная параллельная	$\frac{t_{p_0} + t_x}{p}$
4	 z = p'q' позиций	Многопозиционная параллельно- последовательная	$\frac{t_{p_0} + q' t_x}{q' p'} =$ $= \frac{t_{p_0} + \frac{z}{p'} t_x}{\frac{z}{p'}}$
5	 z позиций	Многопозиционная роторная	$\frac{t_{p_0}}{z}$
6		Многопозиционная непрерывная	$\frac{t_{p_0}}{n_d}$

Примечания: q и p — соответственно число последовательных и параллельных позиций; z — суммарное число (параллельных p' и последовательных q') позиций; t_{p_0} — суммарное время технологического воздействия на заготовку; n_d — число деталей, охватываемых режущим инструментом во время обработки; t_x — время холостых кодов, предусмотренных циклом станка.

детали, различно и зависит от схемы построения технологического процесса.

Многопозиционные станки на примере многошпиндельного токарного автомата (рис. 1.5) бывают различного действия:

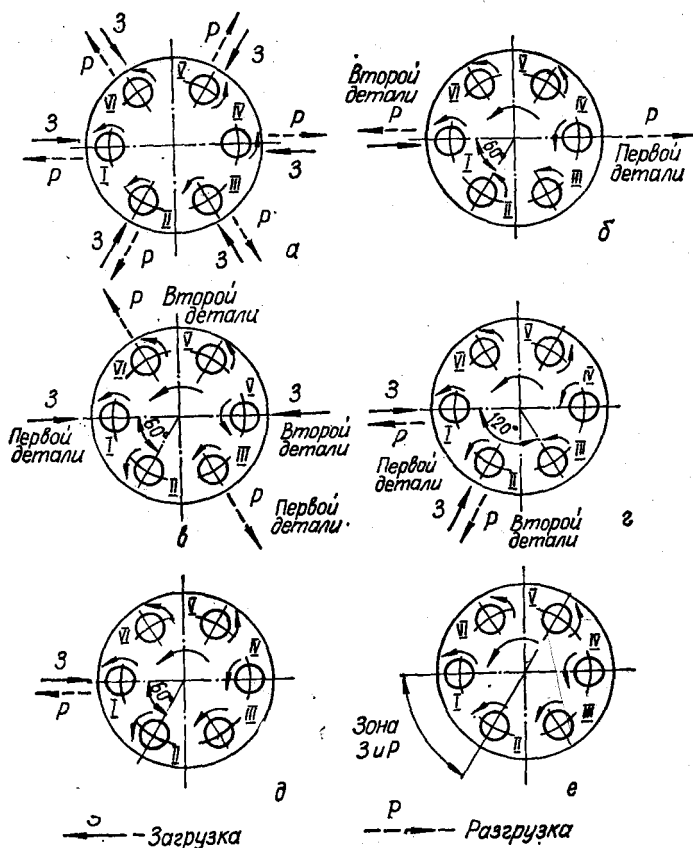


Рис. 1.5. Схемы построения технологического процесса в многошпиндельных токарных автоматах

1) параллельного (рис. 1.5, а); 2) параллельно-последовательного с подачей заготовки в одной позиции на две детали (рис. 1.5, б), с загрузкой двух деталей в диаметрально противоположных позициях (рис. 1.5, в), с загрузкой заготовок в двух соседних позициях (рис. 1.5, г) при двойной индексации шпиндельного барабана, т. е. при повороте его на две позиции; 3) последовательного (рис. 1.5, д); 4) роторного (рис. 1.5, е).

В. По решаемым технологическим задачам — позиционные, контурные и комбинированные (рис. 1.6).

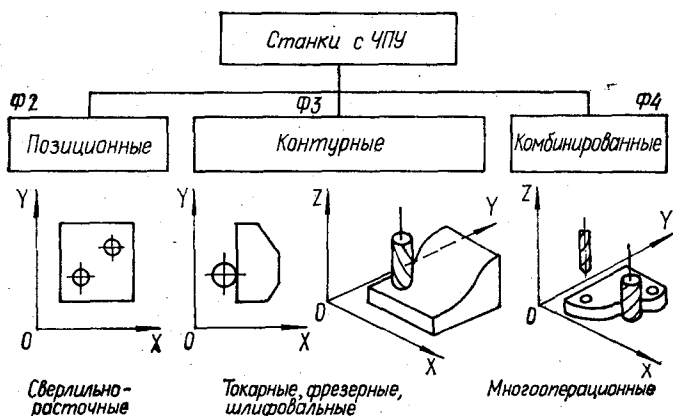


Рис. 1.6. Классификация станков с ЧПУ по технологическим задачам

10. По наличию обратной связи — разомкнутые и замкнутые (с обратной связью по положению рабочего органа, по положению рабочего органа и с компенсацией погрешности станка, самоприспосабливающиеся — с адаптацией на различные внешние возмущения и изменения характера протекания технологического процесса).

В зависимости от степени автоматизации и типа системы ЧПУ для станков приняты следующие дополнительные обозначения: Ф1 — цифровая индексация и предварительный набор координат; Ф2 — позиционные и прямоугольные системы ЧПУ; Ф3 — контурные системы ЧПУ; Ф4 — универсальные комбинированные (для позиционной и контурной обработки) системы ЧПУ; МФ — ЧПУ, инструментальный магазин и автоматическая смена инструмента (АСИ); РФ — ЧПУ, револьверная инструментальная головка и АСИ; РФМ — ЧПУ, револьверная инструментальная головка, инструментальный магазин и АСИ.

1.4. Техничко-экономические показатели станков с ЧПУ

К основным технико-экономическим показателям станков с ЧПУ относят их эффективность, производительность, надежность, гибкость, точность [31, 32].

Комплексным (интегральным) показателем, который наиболее полно отражает повышение производительности

и снижение затрат труда при обработке деталей, является *эффективностью*, определяемая по формуле $A = N/\Sigma C$, шт./р., где N — годовой выпуск деталей; ΣC — годовые затраты на их изготовление.

При проектировании и выборе станков необходимо стремиться к максимальной эффективности, рассматривая ее как целевую функцию $\Phi = A \rightarrow \max$. Если задана годовая программа N , то данное условие приводится к минимуму приведенных затрат, т. е. $\Phi = \Sigma C \rightarrow \min$.

Эффективность двух вариантов станков при заданной программе N сравнивают по разности приведенных затрат $P = (\Sigma C)_1 - (\Sigma C)_2$, где индекс 1 соответствует базовому, а индекс 2 — более совершенному варианту станка.

С учетом цикловых и внецикловых потерь времени [31] *техническая (или фактическая) производительность* автомата или станка с ЧПУ

$$Q = \frac{1}{t_p + t_{\text{ц}} + t_{\text{в.ц}}}, \quad (1.2)$$

где t_p — время на осуществление рабочих ходов (производительно затраченное время); $t_{\text{ц}}$ — потери времени, предусмотренные циклом работы станка и связанные с подачей материала, транспортировкой детали, фиксацией, зажимом и разжимом заготовки, подводом и отводом рабочих органов и т. д.; $t_{\text{в.ц}}$ — потери времени, не предусмотренные циклом работы станка и связанные с заменой и регулировкой инструмента, ремонтом станка, периодической заправкой материала, браком, переналадкой и т. д.

При $t_{\text{в.ц}} = 0$ частота повторения рабочего цикла $T_{\text{ц}}$ определяет *цикловую производительность станка*:

$$Q_{\text{ц}} = \frac{1}{T_{\text{ц}}} = \frac{1}{t_p + t_{\text{ц}}}. \quad (1.3)$$

Если у станка отсутствуют холостые ходы ($t_{\text{х}} = t_{\text{ц}} + t_{\text{в.ц}} = 0$), то цикловая производительность целиком определяется длительностью обработки:

$$Q_{\text{ц}} = \frac{1}{t_p} = K. \quad (1.4)$$

Величина K называется *технологической производительностью* и характеризует возможности технологического процесса, положенного в основу станка. На рис. 1.7 показана зависимость производительности Q от скорости протекания рабочего процесса v (или, что то же самое, от K). Пря-

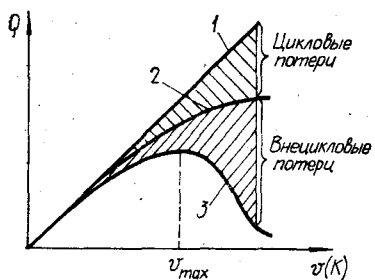


Рис. 1.7. Зависимость технологической 1, цикловой 2 и фактической 3 производительности станка от скорости протекания рабочего процесса

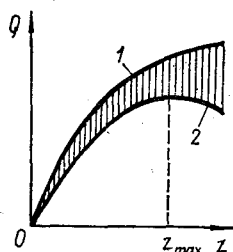


Рис. 1.8. Зависимость производительности труда от числа станков, обслуживаемых одним оператором

мая 1 характеризует работу «идеального» автомата непрерывного действия, не имеющего простоев. Если холостые ходы (цикловые потери) приводят к тому, что при повышении v (или K) темпы роста производительности замедляются (кривая 2), то внецикловые потери (особенно за счет снижения стойкости инструмента) при интенсификации рабочего процесса возрастают в такой степени, что приводят к резкому снижению фактической производительности (кривая 3).

С точки зрения надежности работы производительность автомата

$$Q = Q_{ц} \eta_{исп}, \quad (1.5)$$

где $\eta_{исп} = t_p / (t_p + t_{отк} + t_{пл})$ — коэффициент использования станка; t_p — время работы станка; $t_{отк}$ — время простоев станка вследствие отказов; $t_{пл}$ — плановые затраты времени на наладку, смену инструментов и т. п.

Коэффициент использования можно представить в виде

$$\eta_{исп} = \eta_r \eta_{пл},$$

где $\eta_r = t_p / (t_p + t_{отк})$ — коэффициент готовности, характеризующий вероятность того, что станок будет работоспособен в любой произвольно выбранный момент времени; $\eta_{пл} = (t_p + t_{отк}) / (t_p + t_{отк} + t_{пл})$ — коэффициент планового использования станка.

Экономическая эффективность обработки деталей на автоматах и станках с ЧПУ заключается в повышении производительности труда за счет: а) одновременного выполнения нескольких различных движений; б) быстроты выпол-

нения вспомогательных движений, что при ручном управлении ограничено скоростью реакции человека; в) возможности периодического контроля без остановки станка введением автоматического активного контроля; г) одновременного обслуживания нескольких станков. Кривая 1 (рис. 1.8) показывает зависимость производительности труда от числа станков z , обслуживаемых одним рабочим, без учета дополнительных затрат на механизацию, а кривая 2 с учетом дополнительных затрат, которые возрастают с увеличением z . Заштрихованный участок характеризует потери в темпах роста производительности труда вследствие дополнительных затрат на автоматизацию при многостаночном обслуживании.

Надежность станка — способность обеспечить бесперебойный выпуск готовой продукции в заданном количестве в течение определенного срока службы с учетом технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки.

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \frac{N_{от}}{N_o} = \frac{N_n}{N_o}, \quad (1.6)$$

где $Q(t) = N_{от}/N_o$ — вероятность отказа; N_o — общее число элементов; $N_{от}$ — число отказавших элементов; N_n — число исправных элементов.

Интенсивность отказов — условная плотность вероятности возникновения отказа в единицу времени

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_n} \frac{dN_{от}}{dt}. \quad (1.7)$$

Отсюда выражение (1.6) может принять вид

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (1.8)$$

Вероятность безотказной работы станка как сложной системы, состоящей из соединенных последовательно n элементов, представляют в виде

$$P_{ст}(t) = \prod_1^n P_i(t), \quad (1.9)$$

где $P_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го элемента.

Комплексным показателем надежности станков является коэффициент технического использования

$$\eta_{\text{исп}} = 1 / (1 + \sum_1^n \lambda_i t_{\text{ср}i}), \quad (1.10)$$

где λ_i — интенсивность отказов i -го элемента; $t_{\text{ср}i}$ — среднее время на устранение отказа (на восстановление). Коэффициент $\eta_{\text{исп}}$ дает возможность оценить фактическую производительность по формуле (1.5).

Диагностирование является эффективным средством повышения надежности станков и станочных систем [41, 46].

Гибкость станочного оборудования — способность к быстрому переналаживанию на изготовление других деталей. Она характеризуется двумя показателями — универсальностью и переналаживаемостью.

Универсальность определяется числом разных деталей, подлежащих обработке на данном станке, т. е. номенклатурой И обрабатываемых деталей. Серийность изготовления

$$s = N/I, \quad (1.11)$$

где N — годовой выпуск.

Переналаживаемость определяется потерями времени и средств на переналадку станка при переходе от одной партии заготовок к другой. При этом средний размер партии

$$p = N/P \quad (1.12)$$

связан с характером производства и с переналаживаемостью оборудования (P — число партий деталей).

1.5. Точность и жесткость станков с ЧПУ

Точность станка в основном определяет точность обработанных на нем изделий. Различают геометрическую и кинематическую точности. На точность обработки влияют жесткость, виброустойчивость и точность позиционирования.

Погрешности обработки деталей на станках с ЧПУ можно классифицировать: 1) по статистическим показателям — систематические и случайные; систематические ошибки — разность математических ожиданий входной (по чертежу или таблице) и выходной (по детали) функций;

2) по режиму работы, в котором возникают погрешности — стационарный и нестационарный; стационарный (установившийся) — режим, в котором рассматриваемая функция имеет вероятностные характеристики (математическое ожидание, дисперсию), не зависящие от времени; нестационарный (переходный) — режим, при котором рассматриваемая функция имеет определенные тенденции к изменению во времени и ее вероятностные характеристики зависят от выбора момента отсчета; 3) по источнику (узлу системы), где возникает погрешность; практически все узлы системы вносят систематические и случайные погрешности (можно выделить ошибки четырех основных частей системы: программирования, устройства ЧПУ, привода подачи, технологической системы); 4) по геометрическому виду — макропогрешности на детали (отклонения формы, волнистости) и микропогрешности обработки (шероховатость).

Макропогрешность на детали, поверхность которой задана чертежом или аналитически, определяется как кратчайшее расстояние до заданной. Ошибки рассогласования — разность мгновенного значения текущей координаты рассматриваемого параметра и ее величины, заданной программой. Погрешность рассогласования на деталь может не переноситься. В этом случае при движении детали относительно инструмента центр его остается на эквидистантной траектории.

Точность станков с ЧПУ пяти классов приведена в табл. 1.2. Нормирование допустимых погрешностей в станках с ЧПУ имеет существенное практическое значение. Точность останова (позиционирования) на заданной координате принята одним из основных показателей точности во всех типах станков как с позиционными, так и контурными системами ЧПУ.

Исходя из нормального закона распределения ошибок максимальное в пределах аттестуемой длины x_0 перемещение (рис. 1.9)

$$\delta_{\max} = \{M[\delta_x] + 3\sigma(\delta_x)\}_{\max} - \{M[\delta_x] - 3\sigma(\delta_x)\}_{\min},$$

где $M[\delta_x]$ и $\sigma(\delta_x)$ — текущие значения математического ожидания и дисперсии ошибки в интервале $0 \leq x \leq x_0$.

В системе ЧПУ производится сдвиг начальной расчетной координаты (нуля отсчета) на величину l_0 , обеспечивающую симметричное распределение допуска A_s . При этом стабильность (повторяемость) определяется полем рассеяния

1.2. Точность (допускаемая накопленная погрешность позиционирования при одностороннем подходе) станков с ЧПУ, мкм

Перемещение, мм	Класс точности														
	Н	П	В	А	С	Н	П	В	А	С	Н	П	В	А	С
	Среднеквадратическое отклонение														
	Накопленное отклонение по осям														
	Z и W					X и Y									
До 125	20	10	5	2,5	1,2	12	6	3	1,6	0,6	2	1	0,5	0,3	0,1
125...200	25	12	6	3	1,6	16	8	4	2	0,8	2,5	1,2	0,6	0,3	0,2
200...320	30	16	8	4	2	20	10	5	2,5	1	2,5	1,2	0,6	0,3	0,2
320...500	40	20	10	5	2,5	25	12	6	3	1,2	4	2	1	0,5	0,2
500...800	50	25	12	6	3	30	16	8	4	1,6	6	3	1,6	0,8	0,4
800...1250	65	30	16	8	4	40	20	10	5	2	6	3	1,6	0,8	0,4
1250...2000	80	40	20	10	5	50	25	12	6	2,5	6	3	1,6	0,8	0,4
2000...3200	100	50	25	12	6	65	30	16	8	3	10	5	2,5	1,2	0,6

Примечания: 1. Дискретность информации и отклонения по шагу шкалы устройства обратной связи для классов Н—10 мкм; П—5 мкм; В—2 мкм; А и С—1 мкм. 2. Разрешающая способность средств проверки для классов Н и П—1 мкм; В—0,5 мкм; А—0,2 мкм; С—0,1 мкм.

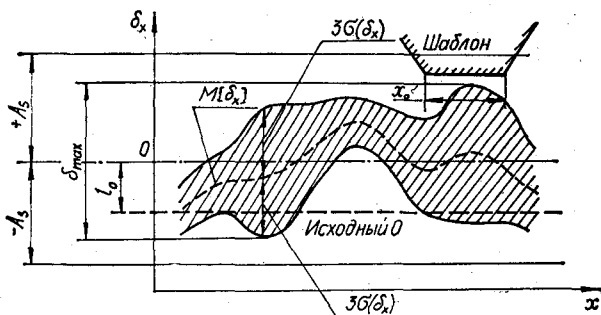


Рис. 1.9. Статистические оценки погрешности позиционирования в функции длины по нормали МТВА (США):

$2A_s$ — поле допуска; $\delta_{\max}$ — поле ошибки; x — линейное перемещение; x_0 — участок постоянного допуска

центрированной функции ошибки и при нормальном распределении

$$[\delta(x)]_{\max} = [\pm 3\sigma(\delta_x)]_{\max}.$$

Приведенные характеристики с указанными ниже дополнениями приняты в стандартах стран СЭВ, США, ФРГ. Согласно стандарту VDI (ФРГ), погрешность определяют в предположении, что центрированная функция ошибки $\delta(x)$ по всей аттестуемой длине перманентна. При этом $\delta_{\max} = [M(\delta_x)]_{\max} - [M(\delta_x)]_{\min} + 6\sigma$, $\delta_{\max} = \pm 3\sigma$.

Кроме общих норм точности для всех станков, точность станков с ЧПУ выявляется дополнительно следующими специфическими проверками: линейного и углового позиционирования рабочих органов; зоны нечувствительности (отставание при смене направления движения); точности возврата в исходное положение; стабильности выхода рабочего органа в заданную точку; точности обработки круга в режиме круговой интерполяции; стабильности положения инструмента после автоматической смены.

Общая допускаемая ошибка $\Delta_p = \Delta + \delta$, где Δ — накопленная погрешность; δ — допускаемая нестабильность.

Для сохранения точности в течение длительного времени все проверки по сравнению с нормативными ужесточают на 40 % (резервирование запаса на изнашивание: $\Delta_p^n = 0,6\Delta_p$).

Погрешности обработки на станках с ЧПУ определяются следующими основными факторами: неточностью из-за

ошибок интерполятора и режима интерполяции; погрешностями управляющих программ из-за аппроксимации; погрешностями установки, базирования и закрепления детали на станке; погрешностями настройки инструмента и станка на размер; неточностью инструмента и его износом; тепловыми деформациями и деформациями из-за внутренних напряжений в детали; малой жесткостью; ошибками наладчика и оператора.

Суммирование элементарных погрешностей δ_i , определяемых действием каждого отдельного фактора при условии их независимости, может быть выполнено по вероятностному методу:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i \delta_i)^2}, \quad (1.13)$$

где i — индекс элементарной погрешности; n — общее число погрешностей; $K_i = 1,0 \dots 1,73$ — коэффициенты, учитывающие закон распределения погрешностей (при нормальном законе $K_i = 1,0$).

Повышенные требования к точности и виброустойчивости станков с ЧПУ определяют тенденцию к уменьшению податливости элементов и узлов механической части в среднем на 40...50 % по сравнению с универсальными станками.

Расчет податливости выполняют для определения:

1) упругих параметров системы станка с последовательным анализом АФЧХ (запас устойчивости и динамическая точность);

2) статических погрешностей обработки из-за деформаций в технологической системе, не охваченных обратной связью.

В балансе упругих перемещений элементов и узлов станков рассматривают следующие виды деформаций: контактные неподвижных и подвижных стыков между сопрягаемыми механическими узлами; контактные опор качения; изгибные и крутильные звеньев кинематических цепей; изгибные и крутильные корпусных деталей и узлов.

В общем случае линейная податливость элемента или узла выражается отношением приращения линейного перемещения δ в направлении действующей силы P к приращению силы

$$e_{\delta} = d\delta/dP.$$

Угловая податливость выражается отношением приращения угловой деформации φ , вызванной действием момента

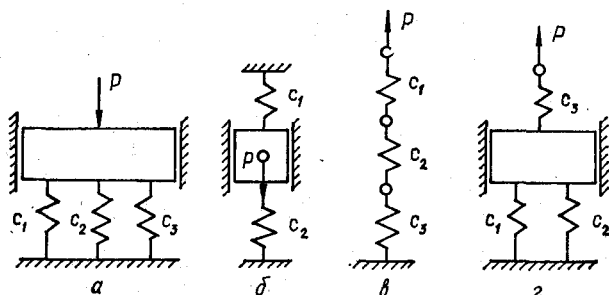


Рис. 1.10. Схемы соединения упругих элементов

M в направлении угла φ , к приращению момента:

$$e_m = d\varphi/dM.$$

Аналогично, линейные удельные податливости, характеризующие удельные и касательные перемещения на контактирующих поверхностях,

$$e_\sigma = d\delta/d\sigma, \quad e_\tau = d\delta/d\tau,$$

где σ и τ — соответственно нормальные и касательные напряжения в точке контакта.

При линейных зависимостях можно считать

$$e_\delta = \delta/P, \quad e_m = \varphi/M.$$

Величина, обратная податливости, называется *жесткостью*:

$$C = 1/e.$$

Так как в станках встречаются различные соединения элементов, то их приведенная жесткость (податливость) определяется схемой соединения [39, 59].

При параллельном соединении упругих элементов складываются их жесткости (рис. 1.10, а):

$$c_{пр} = \sum_{i=1}^3 c_i = c_1 + c_2 + c_3. \quad (1.14)$$

Если система состоит из двух последовательно расположенных элементов с коэффициентами жесткости c_1 и c_2 , установленных с предварительным натягом (рис. 1.10, б), то

$$c_{пр} = c_1 + c_2, \quad (1.15)$$

так как приложение силы вызывает одинаковую деформацию обоих упругих элементов, один из которых дополнительно нагружается, а другой разгружается.

При последовательном соединении элементов (рис. 1.10, в) складываются их податливости:

$$e_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^3 e_i = \frac{1}{c_{\text{пр}}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3}, \quad (1.16)$$

при смешанном соединении (рис. 1.10, г)

$$e_{\text{пр}} = e_{12} + e_3 = \frac{1}{c_1 + c_2} + \frac{1}{c_3}. \quad (1.17)$$

Статическая жесткость систем, состоящих из нескольких последовательно соединенных деталей, зависит от собственной жесткости этих деталей, контактной жесткости стыков между ними, жесткости масляных слоев, передаваемых нагрузок, сил трения, возникающих при относительном перемещении деталей вследствие нагружения системы. Понятие жесткости системы в некоторой мере условно, так как оно включает также влияние сил трения на способность системы противостоять деформациям под действием нагрузок.

Если при значительных нагрузках, возникающих в станках при черновой обработке, в общем балансе большой удельный вес имеют упругие деформации собственно деталей (определяемые известными формулами из сопротивления материалов), то при отделочной обработке основными являются контактные сближения.

Контактные сближения δ , мкм, для неподвижных плоских стыков имеют нелинейную зависимость (рис. 1.11, а) [59, 63]:

$$\delta = C_{\sigma} \sigma^m, \quad (1.18)$$

где $m = 0,5$; C_{σ} — коэффициент, зависящий от геометрии поверхностей и свойств материалов (для стальных и чугунных деталей при тонком шлифовании $C_{\sigma} = 0,07$; при точении и тонком шабрении $C_{\sigma} = 0,4 \dots 0,5$; при грубом шабрении $C_{\sigma} = 1,5$); σ — среднее давление, Па.

При наличии в стыке начального давления σ_0 под действием затяжки

$$\delta = \delta' - \delta_0 = C_{\sigma} [(\sigma + \sigma_0)^m - \sigma_0^m]. \quad (1.19)$$

Нелинейная зависимость $\sigma = f(\delta)$ может быть условно разбита на три линейных участка различной жесткости

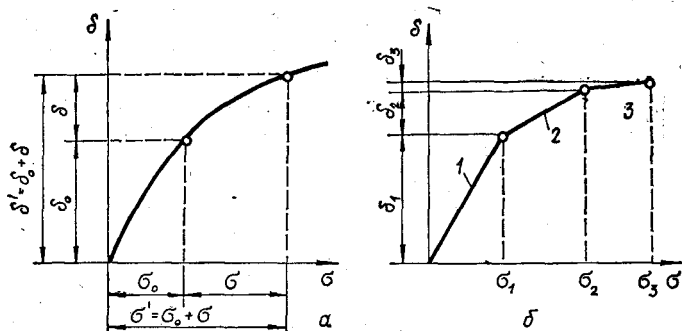


Рис. 1.11. Графики зависимости контактных сближений от нормальной нагрузки (давления)

(рис. 1.11, б): 1 — незатянутый стык в пределах деформации микронеровностей — шероховатости при $\sigma \leq \sigma_1$; 2 — затянутый стык в пределах деформации макронеровностей — волнистости при $\sigma_1 < \sigma \leq \sigma_2$; 3 — плотный стык в пределах деформации макронеровностей — волнистости при $\sigma_2 < \sigma \leq \sigma_3$ (при $\sigma > \sigma_3$ — металл разрушается или течет). Таким образом, для всех трех участков может быть зависимость $\delta_i = K_i \sigma_i$ (где $i = 1, 2, 3$).

Например, в незатянутых и подвижных (направляющие скольжения и др.) стыках, если давление от внешней нагрузки намного меньше начального (участок 1 рис. 1.11, б), то

$$\delta = K\sigma, \quad (1.20)$$

где K — коэффициент контактной податливости [59], равный для пары сталь—чугун 1...2.

1.6. Эволюция конструкций и конструктивные погрешности станков с ЧПУ

С применением программного управления (ПУ) конструкции станков начали претерпевать изменения. Однако на первых порах развития систем ПУ конструкции станков оставались традиционно неизменными, т. е. на них как бы просто «навешивались» узлы ПУ — двигатели подач с соответствующими редукторами и различные датчики обратной связи. При этом оставались неизменными все формы ручного управления станком: маховики, рукоятки и т. п.

По сути дела первые этапы развития станков с ПУ можно рассматривать как модернизацию станков под ПУ.

Такой подход к созданию станков с ПУ не дал ощутимого эффекта как по точности, так и по производительности, так как станки, управляемые вручную, давали лучшие результаты. Основной причиной снижения точности были большие зазоры в кинематических цепях первых станков с ПУ и нежесткость конструкций как в целом, так и отдельных узлов. Это привело к тому, что обратная связь всей кинематики станка не может дать приемлемые динамические характеристики следящих приводов подач, что сказывается главным образом на производительности станков, так как скорости подач весьма низки.

Обратная связь только двигателей следящих приводов или шаговых приводов, что фактически одно и то же, зазоры в кинематических цепях и нежесткость станков приводили к большой погрешности обработки. Поэтому путь модификации и модернизации станков оказался несовершенным и от него отказались, создавая станки второго поколения.

Станки с ЧПУ второго поколения работают в автоматическом режиме (следящий привод подач, смена инструмента, смена скорости главного движения и т. п.).

Из-за сложности контроля размеров детали в зоне обработки на большинстве станков применяют адаптирующие устройства и целые системы, косвенно характеризующие деформацию элементов конструкции станка и инструмента, а также вносят соответствующие коррективы в законы управления. Однако адаптивные системы в силу сложности пока не получили широкого применения и поэтому основным средством получения высокой точности на станках с ЧПУ является повышение жесткости элементов станка, включая инструмент. Обратную связь по положению стремятся получить поближе к конечному звену — рабочему органу, пытаясь охватить как можно больше кинематических элементов станка. На рис. 1.12 показаны возможные места включения датчика обратной связи (ДОС).

ДОС в виде обычного вращающегося трансформатора (ВТ) можно включить непосредственно на вал двигателя М (рис. 1.12, а), при этом вся кинематическая цепь окажется разомкнутой и все ее погрешности скажутся на точности обработки. При включении ВТ на ходовой винт (рис. 1.12, б) после редуктора (иногда ВТ включают внутри редуктора для обеспечения необходимого передаточного отношения

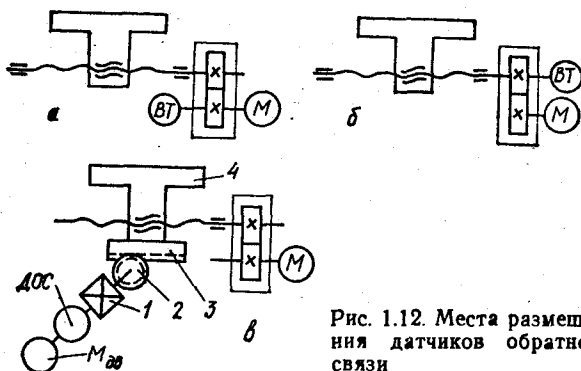


Рис. 1.12. Места размещения датчиков обратной связи

между ВТ и столом станка) обратная связь учитывает погрешности редуктора, включая небольшие по сравнению с зазорами пары винт — гайка. Такая схема тоже малоэффективна.

ВТ можно подключить (рис. 1.12, б) через измерительный мультипликатор 1 (повышающий редуктор) к измерительному колесу 2, сцепленному с измерительной рейкой 3, которая укреплена на столе 4. Все эти элементы могут быть изготовлены с достаточно высокой точностью. При этом для снижения зазоров можно применять специальный моментный двигатель $M_{дв}$, работающий в тормозном режиме при пониженном напряжении питания. Такая схема учитывает пару винт — гайка и обеспечивает высокую точность.

Основные особенности конструкций современных станков второго поколения, предназначенных для позиционной обработки (в первую очередь координатно-расточных), — поворотные столы, управляемые по программе, и инструментальные магазины с автоматической сменой инструмента в шпинделе станка по программе. Для этого нужны специальные манипуляторы и устройства автоматического зажима инструмента, а также устройства для ориентации шпинделя. Для получения оптимальных режимов резания при смене инструмента возникает необходимость изменения скорости шпинделя. Кроме того, при больших скоростях установочных перемещений требуется высокая точность (как в контурных станках), поэтому чаще всего используют обратную связь по конечному положению на индуктоксинах.

Развитие таких станков привело к появлению многооперационных станков, в которых осуществляются не только

сверлильно-расточные, но и фрезерные операции, включая контурную обработку, а иногда и токарную с помощью специальных сменных шпинделей.

Увеличение степени автоматизации привело к созданию станков с ЧПУ третьего поколения — многошпиндельных и многокоординатных станков для контурной обработки, причем каждый из шпинделей, помещенных на многокоординатной каретке, может работать по своей программе одновременно с другими.

На всех современных станках с ПУ для увеличения производительности реализуют максимально возможные режимы резания, применяя высокостойкий инструмент, настраиваемый вне станка, например, на специальных оптических устройствах.

Для станков с ЧПУ четвертого поколения характерны модульный принцип компоновки, короткие передачи в системе привод — рабочий орган, координатные модули (столы координатные, стойки, крестовые суппорты и т. д.). Появились многооперационные станки со сменой многошпиндельных головок и насадок, столов, зажимных патронов, планшайб, т. е. со сменой целевых узлов станка.

Можно также выделить 4 поколения развития приводов подач станков с ЧПУ: 1) привод с частотой $f_{\max} \leq 1000$ Гц (шаговый и двигатели постоянного тока); 2) шаговый с $f_{\max} = 8000$ Гц (f наброса — 2000 Гц); 3) шаговый с $f_{\max} = 16000$ Гц; 4) привод от высокомоментных двигателей постоянного тока с тиристорным управлением и силовых шаговых двигателей ($f_{\max} = 16000$ Гц); дискретность 0,001 мм; $v_{б.п} = 10 \dots 20$ м/мин.

При совершенствовании конструкций станков с ЧПУ стремятся повысить точность обработки деталей на них, так как погрешность обработки деталей зависит не только от технологических факторов (выбранный инструмент, приспособления, режимы резания и т. д.), но и конструктивных, определяемых следующими типовыми погрешностями: 1) скоростной характеристикой следящего привода; 2) неравенством и непостоянством коэффициентов усиления приводов подач по разным координатам, а также изменением их при изменении подачи; 3) зазорами в кинематических цепях станка, не учтенными обратной связью; 4) колебательностью (скачкообразным движением) приводов, что приводит к ухудшению качества обработки (неравномерная волна, зависящая от скорости подачи); 5) периодической внутришаговой погрешностью датчиков обратной связи,

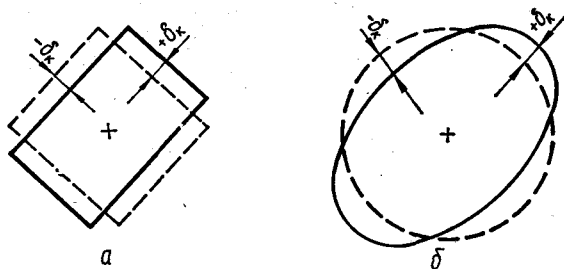


Рис. 1.13. Погрешности обработки при различных коэффициентах усиления приводов подач

главным образом фазовых (появление на детали волны, шаг которой зависит от цены оборота фазы приводов и угла наклона контура к координатам станка); б) податливостью технологической системы станка.

Если скоростные характеристики приводов различных координат заметно отличаются друг от друга, то возникают погрешности в обработке окружности, а также контуров, состоящих из наклонных прямых (рис. 1.13). Если коэффициент усиления по скорости одного привода равен K_{vx} , а другого K_{vy} , то центр фрезы сместится от заданного контура на величину

$$\delta_k = v_0 \frac{K_{vx} - K_{vy}}{2K_{vx}K_{vy}} \sin 2\alpha. \quad (1.21)$$

Наибольшие погрешности при углах α , кратных 45° . Если обрабатывается прямоугольник, то его противоположные стороны имеют погрешности разных знаков, так что общая погрешность удваивается, причем один размер прямоугольника будет больше на $2\delta_k$, а другой — меньше на $2\delta_k$ (рис. 1.13, а). Аналогично получаются погрешности при обработке окружности (рис. 1.13, б), вместо которой получается эллипс, наклоненный под углом, близким к 45° , у которого одна ось короче другой на $4\delta_{k \max}$ ($\delta_{k \max}$ — погрешность на контуре при $\alpha = 45^\circ$).

Из выражения (1.21) можно вывести требования к допустимой разности скоростных характеристик приводов:

$$\frac{\Delta K_v}{K_v} = 2\delta_k \frac{K_v}{v_p}. \quad (1.22)$$

Если разность осей эллипса или размеров квадрата, расположенного под углом $\alpha = 45^\circ$, не должна превышать

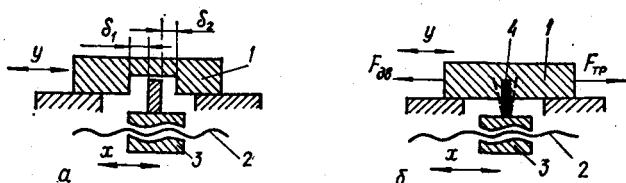


Рис. 1.14. Кинематический зазор (а) и упругие отжатия (б) в приводе станка с ЧПУ

0,1 мм, то $\delta_{\kappa \max} = 0,025$ мм, и если $v_p = 600$ мм/мин (10 мм/с) и $K_v = 50$ с⁻¹, то $\Delta K_v / K_v = 2 \cdot 0,025 \cdot \frac{50}{10} = 0,25$.

Таким образом, разность коэффициентов усиления приводов, отнесенная к среднему значению, не должна превышать в данном случае 25 %.

Важнейшей особенностью следящего привода станков с ЧПУ является наличие беззазорных кинематических цепей, зубчатых редукторов и шариковых винтовых пар качения. Зазоры могут быть кинематические и упругие (упругие отжатия).

Кинематический зазор (рис. 1.14, а) определяется зазорами δ_1 и δ_2 между подвижным органом 1 и ведущей частью гайки 3, перемещающейся по ходовому винту 2. В результате этого движение рабочего органа (РО) при включении привода может начаться после того, как один из зазоров будет равен нулю. Таким образом, при движении в одну сторону РО будет отставать от заданного положения на величину зазора δ_1 , а в другую — на δ_2 . Суммарный зазор $\delta_{\kappa} = \delta_1 + \delta_2$ называется кинематическим. Зазоры могут быть в самой гайке, подшипниках винта одновременно в нескольких местах. В результате в момент реверса полное перемещение выходного элемента всегда меньше перемещения входного элемента x на величину зазора δ_{κ} , т. е. $y = x - \delta_{\kappa}$.

Схема образования упругого зозора показана на рис. 1.14, б. Здесь гайка 3 соединена с РО с помощью упругого элемента 4 жесткостью c_y . Для того чтобы сдвинуть РО, к нему вдоль направляющих необходимо приложить силу $F_{дв}$, превышающую силу $F_{тр}$. Сила $F_{дв}$ пропорциональна натягу упругого элемента: $F_{дв} = c_y(x - y)$, причем $c_y(x - y) = F_{тр}$. Отсюда $y = x - F_{тр}/c_y$. Так как сила трения меняет знак при изменении направления движения и в первом приближении не зависит от скорости, то это

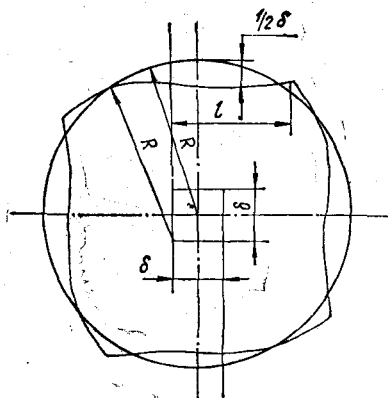


Рис. 1.15. Характер искажения обработки окружности при наличии зазоров и сухого трения в приводах подач

соотношение остается справедливым при обоих направлениях движения и перемещение выходного элемента всегда меньше перемещения входного элемента на величину $\delta_y = F_{тр}/c_y$, которая и называется упругим зазором. Обычно в легких станках превалирует влияние кинематического зазора, а в тяжелых — упругого.

Из характера получаемой погрешности при наличии зазоров и сопротивления сухого трения (рис. 1.15) видно, что контур полученной детали при задан-

ной окружности образован четырьмя дугами радиуса R с центрами в вершинах квадрата, сторона которого равна зазору δ (при равных зазорах по обеим координатам), и прямыми, параллельными координатам станка, т. е. на окружности появились «лыски». В результате этого диаметры окружностей в плоскостях, параллельных координатным осям станка, оказываются уменьшенными на величину зазора, а диаметры окружностей во всех упругих плоскостях равны заданным.

Для того чтобы деталь не смещалась при изменении направления скорости по одной из координат, реверс необходимо осуществлять вне контакта инструмента с деталью (рис. 1.16).

Погрешность обработки можно уменьшить предварительным натягом упругой системы, так как из-за различного характера нелинейности зависимости $P_y = f(y)$ для одной и той же силы P_y отжатие $y_1 = y + y_0$ в системе без натяга (рис. 1.17, а) будет больше, чем отжатие $y_2 = y - y_n$ в системе с натягом (рис. 1.17, б), где y — отжатие системы в случае линейной жесткости; y_0 — кинематический зазор; y_n — предварительный натяг. Отношение приращения нагрузки ΔP_y к Δy характеризует жесткость системы $j = \Delta P_y / \Delta y$.

Для оценки жесткости в любой точке A кривой $P_y = f(y)$ необходимо найти первую производную $y' = dP_y / dy =$

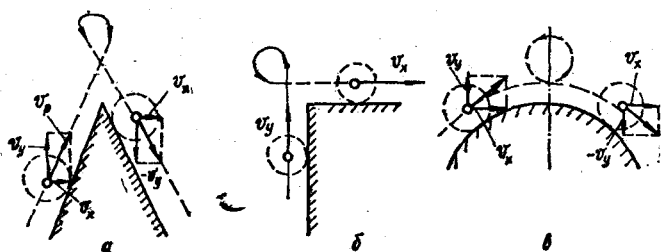


Рис. 1.16. Способы реверса в станках с ЧПУ при нежесткой системе и обходе контура:

a — остроугольного; *б* — прямоугольного; *в* — кругового; v_x и v_y — скорости режущего инструмента по координатам X и Y

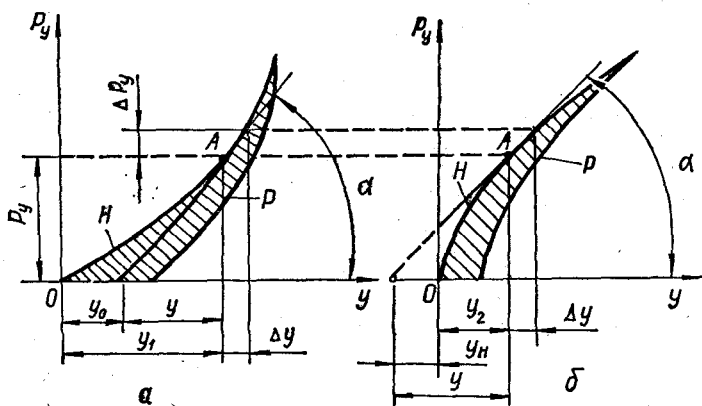


Рис. 1.17. Диаграммы жесткости:

a — системы без натяга; *б* — с предварительным натягом; *H* — нагрузка; *P* — разгрузка

$= j_A$, численно равную тангенсу угла α наклона касательной к кривой в точке *A*. Кривые нагрузки *H* и разгрузки *P* чаще всего не совпадают, а площадь, заключенная между ними, пропорциональна работе сил трения (демпфирующие свойства системы).

В ходе обработки заготовки погрешности формы и пространственные отклонения при каждом последующем проходе будут уменьшаться. Отношение погрешности Δb после обработки к погрешности Δa до обработки называют коэффициентом уточнения $K_{yt} = \Delta b / \Delta a$. Поскольку погрешности полностью не исчезают, речь может идти о копиро-

вании и наследовании погрешностей. Целесообразно при последующих проходах уменьшать припуск, а при большей жесткости системы уменьшать количество проходов.

1.7. Эволюция развития и конструктивные погрешности систем ЧПУ

До появления систем ЧПУ для получения требуемых величин и направлений перемещений рабочих органов, последовательности работы и режимов обработки применялся в основном принцип кинематической наладки путем: а) замены частей механизмов (кулачков, моделей, копиров, сменных зубчатых колес и др.); б) регулировки механизмов (изменение положения лимбов, упоров, переключения зубчатых колес коробки передач, переключение электросхемы и др.) в) введения программы, зафиксированной на специальном командоаппарате (например, штекерном барабане или штекерной панели).

Первые два вида наладки характерны для станков-автоматов специального и специализированного назначения. В этих автоматах с точки зрения управления режимами работы различают управление: а) циклическое (централизованное по времени или независимое); б) ациклическое (зависимое или рефлексное), которое может осуществляться без автоматического регулирования в соответствии с сигналами об окончании каждого предыдущего элемента процесса и с автоматическим регулированием процесса по заданному или оптимальному режиму (управление с обратной связью).

Циклическим называется управление, не зависящее от протекания технологического процесса ($T_{\text{ц}} = \text{const}$). Применяется такое управление, когда условия техпроцесса и передачи движений мало изменяются, стойкость режущего инструмента сравнительно высока (токарная или фрезерная обработка). Характерным является наличие распределительного вала, командоаппарата или другого устройства, имеющего одну (рабочую) или две (рабочую и быструю) скорости вращения. Пуск автомата осуществляется включением привода управляющего органа.

Ациклическим называется управление, зависящее от протекания технологического процесса ($T_{\text{ц}} = \text{var}$). При зависимом последовательном управлении движение каждого рабочего органа контролируется по линейному размеру или другим параметрам (по достижению веса, температуры и

др.). Выполнив свою функцию, рабочий орган дает команду на начало движения другому органу (или остановку в полуавтомате).

Переходным этапом к системам ЧПУ явились системы циклового ПУ. Для получения требуемых перемещений рабочих органов станка при цикловом ПУ нужно задать эти величины программным устройством и затем осуществить их приводом и механизмами управления. При цикловом ПУ требуемые перемещения устанавливаются упорами; задание последовательности движений осуществляется различными способами, наиболее просто — с помощью штекерной панели. Панель имеет столько вертикальных рядов гнезд и соответствующих проводов, сколько несовмещенных команд подается в течение полного цикла работы станка, и столько горизонтальных рядов, сколько имеется реле и других элементов управления. При программировании цикла в соответствующие гнезда вставляют штекеры, замыкая электрическую цепь между элементами, присоединенными к вертикальным и горизонтальным приводам. Требуемый вертикальный ряд гнезд включается шаговым искателем. Для исключения возможности возникновения ложных цепей установлены диоды.

С появлением элементной базы и различных программно-носителей возникла возможность кодировать величины, скорости и направления перемещения в виде чисел, заданных в одной из систем исчисления.

В развитии устройств ЧПУ можно выделить несколько поколений по различным признакам.

По признаку элементной базы: 1) на полупроводниковых схемах (ППС); 2) на интегральных схемах малой степени интеграции (МИС); 3) на интегральных схемах средней степени интеграции (СИС); 4) на схемах большой степени интеграции (БИС), микропроцессоры.

По признаку программноносителя: 1) магнитная лента с записью программ унитарным кодом или фазомодулированным сигналом; 2) перфолента пятидорожечная в коде БЦК-5; 3) перфолента восьмидорожечная в коде *ISO 7 bit*; 4) магнитный диск на большой объем памяти.

По структуре:

1) автономное устройство с постоянной структурой — *NC (Numerical control)*, которое строится по принципу цифровой модели (переработка информации «аппаратурным способом») — подчиняется неизменному циклу — алгоритму; оно содержит 4 функциональных блока (агрегата), каж-

дый из которых обеспечивает: 1 — первичную переработку информации (контроль, коррекция, преобразования кодов и т. д.); 2 — расчет всех промежуточных (между опорными) точек, скоростей перемещения; 3 — передачу оперативных управляющих команд к исполнительному органу; 4 — организацию общего цикла во взаимодействии агрегатов;

2) автономное устройство с переменной структурой — *CNC (Computer Numerical control)*, имеющее характерные признаки ЭВМ: универсальный характер блоков и программируемые связи, последовательное выполнение всех операций через центральное арифметическое устройство (что является недостатком); наличие оперативного (ОЗУ) и постоянного (ПЗУ) запоминающих устройств; гибкость и способность к функциональному наращиванию.

Сочетание систем I и II поколения образуют гибридные системы. Используются системы с расширенной оперативной памятью с микропроцессором на входе. К ним относятся системы типа *SNC (Speicher Numerical control)* или *MNC (Memory Numerical control)*, имеющие память для хранения всей управляющей информации;

3) устройство, имеющее центральную ЭВМ с периферийными устройствами — *DNC (Direct Numerical control)*; эти системы снабжены микропроцессорами, моделирующими функциональные агрегаты на базе одной ЭВМ, управляющей группой станков.

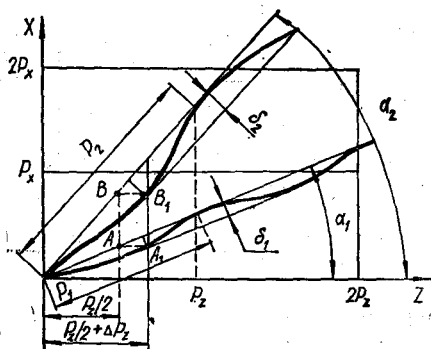
Другое направление (для простых деталей) — устройства с ручным вводом и редактированием с пульта — *HNC (Hand Numerical control)*.

Системы ЧПУ вносят погрешности в обработку деталей на станках. Часть погрешностей вносит интерполятор — вычислительное устройство, рассчитывающее траекторию движения точки по заданной кривой и вырабатывающее строго взаимосвязанные сигналы управления приводами подач станка.

Наиболее распространены линейные и линейно-круговые интерполяторы. Линейный интерполятор позволяет в одном кадре управляющей программы задать прямолинейное суммарное перемещение рабочих органов по двум трем координатам по архимедовой спирали или винтовой линии при одновременном вращении стола и равномерном прямолинейном перемещении рабочего органа.

Круговой интерполятор позволяет описать одним кадром часть окружности в любой плоскости координатных осей.

Геометрическая погрешность интерполяции для современных станков с ЧПУ с ценой одиночных импульсов в $0,001 \dots 0,002$ мм является малой величиной, не оказывающей существенного влияния на точность обработки, но проявляющейся в виде шероховатости обработанной поверхности.



При работе по одной координате ошибки в приводе подач проявляются в виде некоторой неравномерности движения и мало отражаются на результатах обработки.

Рис. 1.18. Возникновение погрешности в режиме линейной интерполяции:

P_z и P_x — шаги винтов по координатам Z и X

Совсем другая картина при движении по нескольким осям в режиме интерполяции. В этом случае неравномерность движения даже по одной из координат приводит к волнистости обработанной поверхности. Допустим, имеется неравномерность по координате Z при протачивании конуса под углом α_1 (рис. 1.18). Тогда после $1/2$ оборота винта РО пройдет путь не $P_z/2$, а $P_z/2 + \Delta P_z$ и при равномерном движении по координате X ($\Delta P_x = 0$) переместится не в точку A , а в точку A_1 . На обработанной поверхности возникает волнистость с высотой волны $\delta_1 = AA_1 \sin \alpha_1 = \Delta P_z \sin \alpha_1$ и шагом $P_1 = P_z / \cos \alpha_1$.

С увеличением угла наклона траектории к оси Z до α_2 увеличивается высота $\delta_2 = \Delta P_z \sin \alpha_2$ и шаг волны $P_2 = P_z / \cos \alpha_2$. Отсюда ясно, что для выяснения координаты, порождающей циклическую погрешность перемещения, нужно обработать две поверхности под углами α_1 и α_2 . Если при $\alpha_1 < \alpha_2$ шаг $P_1 < P_2$, то основное воздействие на погрешность оказывают элементы привода, расположенные и работающие по той же оси, от которой отсчитываются углы α_1 и α_2 . Если элемент, порождающий ошибку, связан с ходовым винтом зубчатыми передачами с редукцией u , то длина волны будет иметь шаг P_u .

Аппроксимация криволинейного контура (рис. 1.19) отрезками прямых или участками дуг окружности всегда связана с погрешностью, зависящей от разбиения контура

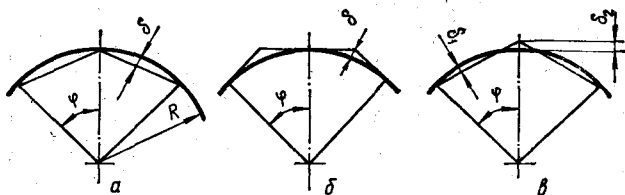


Рис. 1.19. — Аппроксимация дуги окружности:
а — хордами; б — касательными; в — секущими

на элементарные участки, характеризующиеся координатами опорных точек его начала и конца.

Связь между погрешностью δ и центральным углом φ отдельного участка при линейной интерполяции (рис. 1.19, а, б) выражается с довольно большой точностью зависимостью $\delta = R\varphi^2/28\,800$, из которой видно, что увеличение числа участков (уменьшение дуги φ) в 2 раза уменьшает погрешность в 4 раза.

Однако увеличение размеров программносителя (перфоленты) по длине нежелательно, поэтому нужно искать другие пути повышения точности, например, замена дуги секущими (рис. 1.19, в) дает наибольшее приближение запрограммированной траектории к заданной, так как $\delta_1 = \delta_2 = \frac{\delta}{2}$.

Для большинства устройств ЧПУ I и II поколений расчетной траекторией при программировании является не контур детали, а его эквидистанта, отстоящая от контура на радиус инструмента. В устройствах III поколения программируют непосредственно обрабатываемый контур, радиус инструмента набирают на корректоре, а траекторию движения инструмента по эквидистанте с высокой точностью рассчитывает устройство ЧПУ.

2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ

2.1. Этапы процесса создания новых станков

Каждый внедренный в эксплуатацию новый станок или его узел (механизм) должны превосходить по своим качествам и технико-экономическим характеристикам ранее используемые образцы.

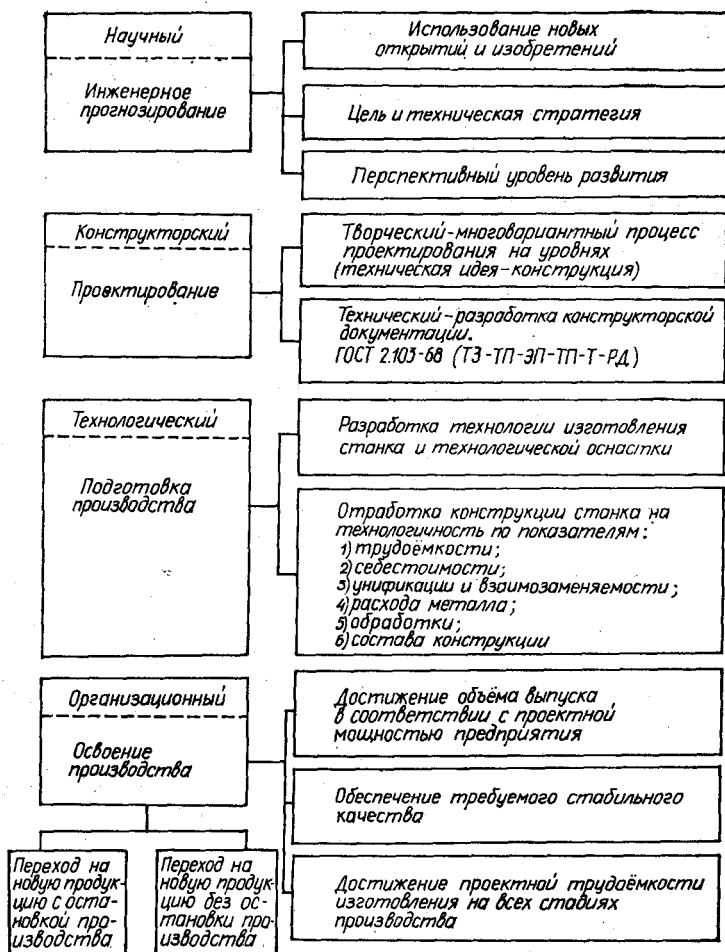


Рис. 2.1. Этапы процесса создания нового станка

Процесс создания нового станка, как и любой технической системы, делится на четыре основных этапа (рис. 2.1): 1) научный; 2) конструкторский; 3) технологический; 4) организационный.

Основу инженерного прогнозирования на научном этапе составляют 3 направления, определяющие [62]: а) значимость новых открытий и изобретений; б) цель и техническую стратегию; в) перспективный уровень развития кон-

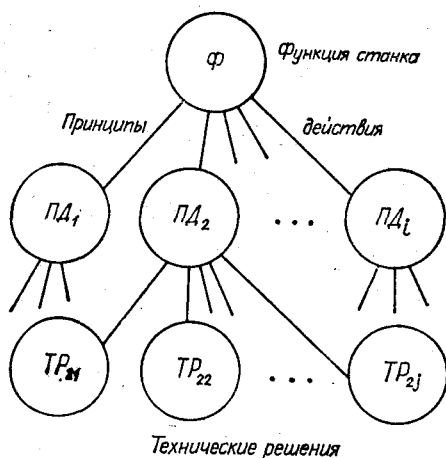


Рис. 2.2. Фреймовая модель прогнозирования новой техники

струкций станков (а, б — на 20...30 лет; в — на 5...10 лет). При инженерном прогнозировании используют теоретические и экспериментальные средства анализа и синтеза. Прогнозирование — это не предсказание, а научное теоретическое обоснование того, что должно произойти.

Успех в создании новых станков и длительность их жизненного цикла во многом зависят от того, насколько правильно перед проектированием выполнено прогнозирование. Следует помнить, что конструктор, ориентирующийся на аналог, в том числе и зарубежный, соответствующий высшим мировым достижениям, автоматически обрекает свою будущую машину на отставание. Поэтому надо идти не в фарватере передовых фирм, а выбирать новые пути ускоренного развития технических систем, построенных на новых принципах.

В вопросах прогнозирования и создания новых станков, которых еще не было в мировой практике, должен быть использован фреймовый подход. Согласно этому подходу, должна последовательно рассматриваться разветвляющаяся в виде дерева альтернатив цепочка поиска на нескольких уровнях (рис. 2.2): функциональная модель объекта (функция Φ) → альтернативные варианты модели принципов действия (ПД) — физических или технологических, реализующих рассматриваемую функцию Φ , → альтернативные ва-

рианты модели технических решений (ТР), реализующих рассматриваемый принцип действия.

Известно более 300 методов составления прогнозов. Из них на практике широко применяются методы, которые носят субъективный характер и осуществляются с привлечением экспертов и могут быть объединены как метод экспертных оценок (математическая обработка опроса группы экспертов при недостаточно систематизированной информации в прошлом).

Методы экспертной оценки альтернатив предназначены для получения качественных (парные сравнения, множественные сравнения, ранжирование, гиперупорядочение, векторы предпочтений, классификация и др.) и количественных (непосредственная численная оценка альтернатив, метод Чермена—Акофа, метод Терстоуна, метод фон Неймана—Моргенштерна и др.) оценок [29].

Существуют два принципиальных пути построения прогноза, которые используются параллельно: I — прогноз, идущий от имеющегося базиса в будущее (изыскательское прогнозирование); II — прогноз, движущийся от целей, которые должны быть достигнуты в будущем, к настоящему (нормативное прогнозирование).

Прогнозирование — часть НИР по подбору исходных данных для разработки технического задания на проектирование, включающее: функциональное назначение; основные технические и экономические параметры; возможные компоновочные схемы; новые материалы и виды заготовок; новые технологические процессы, станки и технологическую оснастку; новые формы и методы организации и управления производством; потребность и предполагаемый план изготовления станков; строительство нового или реконструкцию действующего завода.

Необходимость создания новых станков за короткие сроки на уровне лучших мировых образцов предъявляет особые требования ко второму (конструкторскому) этапу, который делится на творческий и технический подэтапы. Процесс творческого проектирования станка и его механизмов носит многовариантный характер, является сложным и представляет последовательное решение многоуровневых, многоциклических, многокритериальных и многоэкстремальных задач синтеза, анализа и измерения, начиная от выбора технической идеи (технологический принцип, способ формообразования, принцип зажима и т. д.) и заканчивая созданием конструкции с оптимальными параметрами. Оп-

тимальной будет та конструкция, для которой выбрана оптимальная или, по крайней мере, рациональная техническая идея.

Решение задач на верхних уровнях требует применения современных методов поиска новых технических решений, среди которых [3, 33, 35]: 1) системные (комбинаторные или гибридные); 2) ассоциативные (психологической активизации творчества); 3) программные (алгоритмические); 4) комбинированные.

Творческий подэтап проектирования при успешном его выполнении завершается составлением технического задания, начиная с которого содержание всех этапов разработки конструкторской документации оговорено в ГОСТ 2.103—68 и осуществляется в последовательности: техническое задание (ТЗ) — техническое предложение (ТП) — эскизный проект (ЭП) — технический проект (ТП-Т) — рабочая документация (РД). В общем случае исходными материалами для проектирования могут быть: 1) ТЗ, выдаваемое заказчиком (наиболее общий случай); 2) ТП, выдвигаемое в инициативном порядке проектной организацией или группой конструкторов; 3) НИР или созданный на ее основе экспериментальный образец; 4) изобретательское предложение или созданный на его основе экспериментальный образец; 5) образец зарубежного станка, подлежащий копированию или воспроизведению с переделками.

В настоящее время остро стоит вопрос существенного сокращения (в 3 и более раз) сроков разработки и освоения новых станков при повышении их производительности не менее чем в 1,5 раза.

Решение данного вопроса вызывает значительное увеличение объема творческой работы на всех этапах создания новых станков, так как возросло число и сложность технических систем (ТС).

В последнее время количество классов ТС увеличивается вдвое через каждые 10 лет, сложность их по числу деталей и узлов удваивается через каждые 15 лет, при этом объем научно-технической информации в разработке удваивается через каждые 8 лет, а время создания новой техники уменьшается в два раза через 15...25 лет и менее [3]. Все это приводит к увеличению объема поискового конструирования в 10 раз через каждые 10 лет, что вызывает противоречие между необходимым и фактическим обеспечением работ. Только 4...5 % объема конструкторских работ прихо-

дится на эскизное проектирование, но именно на этом этапе определяются в основном выходные характеристики станков, их технический уровень, а также затраты на проектирование.

При выпуске новейших станков на уровне мировых образцов должны учитываться следующие факторы:

1) необходима не модернизация, а создание принципиально нового; 2) время жизненного цикла станка должно быть ограниченным с начала проектирования до снятия с производства (не более 6...8 лет); 3) создаваться должны станки, конкурентоспособные на рынках развитых стран; 4) срок освоения новой конструкции станка должен быть предельно коротким (не более 1 г.). В настоящее время достичь этого можно при широком применении современных методов поиска новых технических решений и вычислительных машин на различных этапах создания новых станков.

2.2. Основные предпосылки оптимального проектирования станков как технической системы

Процесс оптимального проектирования станка и его механизмов можно представить в виде последовательного решения многовариантных (многоуровневых, многоциклических и многоэкстремальных) задач синтеза, анализа и измерения.

При создании новых станков (объектов проектирования) приходится решать в основном сложные задачи синтеза, так как при заданном выходе неизвестными являются состояние или параметры, определяющие структуру объекта[11].

Внутреннее состояние объекта-станка характеризуется вектором его состояния или структуры (рис. 2.3)

$$\bar{x} = (x_1, \dots, x_l, \dots, x_v), \quad (2.1)$$

где x_i — есть i -я составляющая вектора $\bar{x}$ или просто i -я переменная ($i = \overline{1, v}$); значение v характеризует размерность объекта, его математическую модель и во многих случаях связано с его сложностью.

Поведение объекта характеризуется выполнением требуемых функций, т. е. вектором его выходных параметров

$$\bar{y} = (y_1, \dots, y_l, \dots, y_m), \quad (2.2)$$

которые в конечном счете определяют вектор обобщенного показателя качества

$$\bar{K} = (K_1, \dots, K_\mu, \dots, K_n), \quad (2.3)$$

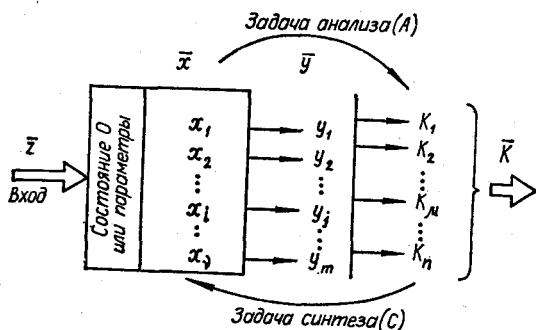


Рис. 2.3. Переменные состояния станка как технической системы и решаемые задачи

где K_μ есть μ -й единичный показатель качества ($\mu = \overline{1, n}$), а число n связано с многофункциональностью объекта и определяет его сложность.

Исходя из приведенного описания объекта исследования и проектирования задачи анализа (А) и синтеза (С) могут быть сформулированы следующим образом.

Задача анализа (А). Задан вектор $\bar{x}$, определить вектор $\bar{K}$ — прямая задача.

Задача синтеза (С). Задан вектор $\bar{K}$, найти вектор $\bar{x}$ — обратная задача. Другими словами, под синтезом в данной задаче понимается поиск таких значений составляющих x_i ($i = \overline{1, v}$) вектора состояния $\bar{x}$ системы, которые обеспечили бы заданные или наилучшие значения единичных показателей K_μ системы ($\mu = \overline{1, n}$), входящих в вектор $\bar{K}$.

В НИИ, КБ при выполнении проектных работ в качестве заданного вектора $\bar{K}$ фигурирует ТЗ на разработку объекта с включением единичных показателей K_μ . В качестве искомого вектора $\bar{x}$ выступает сам продукт разработки (станок, механизм и т. п.) с входящими в него технически реализованными составляющими вектора $\bar{x}$ в виде отдельных элементов этой разработки.

Цель проектирования — выбор такого состояния системы $\bar{x}_\varepsilon = \bar{x}_\varepsilon^0$ (ее вариантов), при котором достигается возможно большее значение обобщенного показателя качества системы:

$$K^0 = K(\bar{U}_\varepsilon^0) = \max_{\bar{U}_\varepsilon \in D} K(\bar{U}_\varepsilon), \quad (2.4)$$

где D — множество допустимых состояний системы, имеющих конечное число элементов $t \in \bar{U}_\xi (\xi = \overline{1, t})$. D оказывает большое влияние на поиск оптимального $\bar{U}_\xi^0 \in D$.

Большинство задач синтеза могут быть представлены в виде иерархической схемы, имеющей как минимум три уровня сложности: высший, средний и низший. Иерархическую систему задач синтеза при системном подходе к проектированию следует рассматривать как последовательность решения задач от высшего уровня к низшему (сквозная схема проектирования). При этом сначала осуществляется поиск принципов действия (ПД), затем при заданном ПД ведется поиск ТР и, наконец, при заданном ТР производится оптимизация данного ТР:

$$\text{ПД} \rightarrow \text{ТР} \rightarrow \underset{x}{\text{opt ТР}}.$$

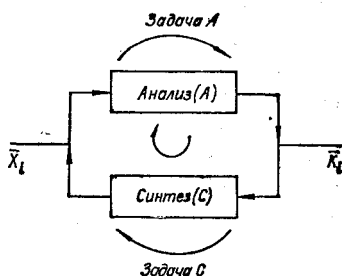


Рис. 2.4. Обобщенное изображение процесса создания новых технических систем

Процесс создания станка или его механизма всегда связан с решением задач анализа (А) и синтеза (С), при этом существуют два подхода к решению этих задач.

Если имеется аналог (или прототип), то процесс создания начинается с анализа, если аналог (или прототип) отсутствует, то процесс создания начинается с синтеза (рис. 2.4). Чаще всего при проектировании преобладает первый подход, однако пионерские 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. 2.4) объединены таким образом, что образуется непрерывный итерационный процесс.

Известны три основных направления решения задач синтеза [11]: 1) традиционное (полный перебор вариантов); 2) современное (неполный перебор); 3) перспективное (неполный перебор на новых принципах).

В пределах традиционного направления используется также метод дискретного синтеза, близкий по своей сути

к методу проб и ошибок и несущий элементы неполного перебора, поскольку проектировщик ограничивается по своему усмотрению существенно сокращенным множеством D вариантов, обозримым за выделенное время.

Современное направление решений задач синтеза — это неполный перебор вариантов проектируемой системы, основанный как на использовании ЭВМ, так и на использовании человеко-машинных или эвристических подходов. Эвристические методы основаны на творческих способностях человека, а человеко-машинные объединяют творческие способности проектировщика с уникальными по быстродействию способностями ЭВМ. С математической точки зрения неполный перебор с ЭВМ тождествен поиску локального или глобального экстремума функций многих переменных и дает существенный выигрыш при строгой формализации задач синтеза сложных систем.

К перспективному направлению относится неполный перебор вариантов с ЭВМ на новых принципах, объединенных под названием искусственного интеллекта.

Выбор того или иного метода исследования, а тем более совокупности методов зависит в основном от степени сложности проектируемого объекта, определяемой числом n заданных свойств функционирования, и отражающих их частных показателей качества K_μ из всего множества $\{K_\mu | \mu = \overline{1, n}\}$, а также их взаимосвязью.

Различные технические системы могут быть условно разделены на 3 основных класса: I — относительно высокой сложности ($n > 10$); II — средней сложности ($n \approx 10$); III — малой сложности ($n < 10$).

Методология поискового творческого конструирования содержит 4 характерных этапа, каждый из которых требует применения определенной системы методов [11]:

I этап — внешнее проектирование, применение метода формирования обобщенного критерия качества K на основе квалиметрии и определения совокупности ограничений;

II этап — синтез знаковой модели (принципиальной схемы) с принятыми условными знаковыми обозначениями, применение метода синтеза на основе математического программирования на ЭВМ, сводимого в большинстве случаев к поиску глобального экстремума многомерной целевой функции (наиболее выгодно на сетке кода Грея [11]);

III этап — синтез образной модели (конструктивной схемы), применение эвристического метода синтеза без четкой формализации процедур синтеза;

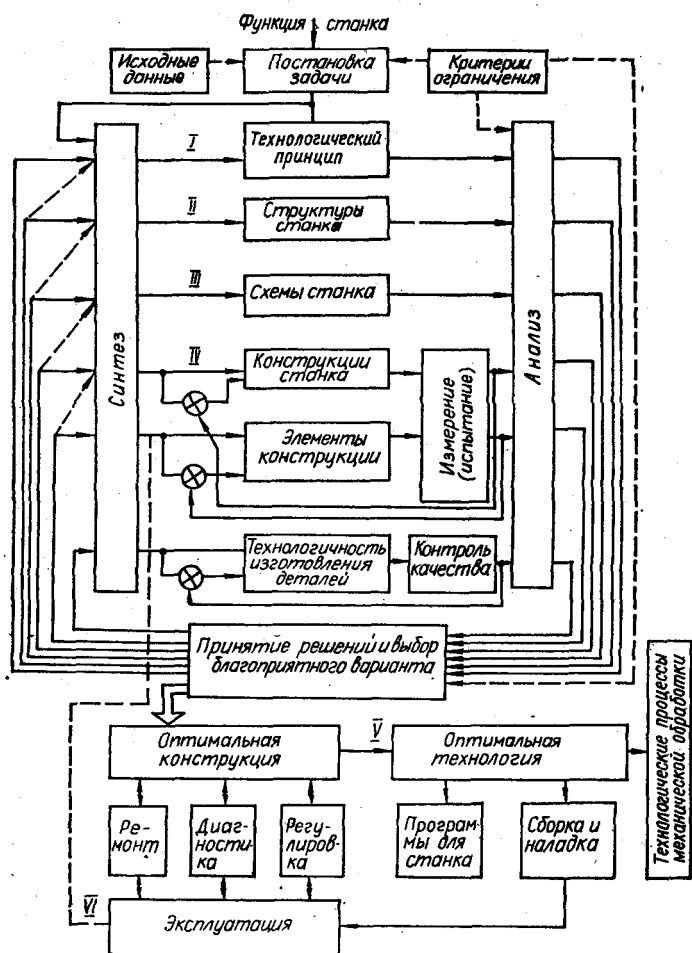


Рис. 2.5. Укрупненная блок-схема оптимального проектирования станка

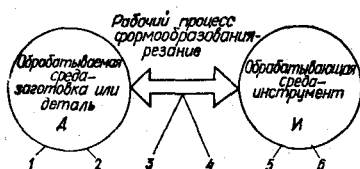


Рис. 2.6. Обобщенная модель рабочей технологической машины и процесса формообразования

При положительных результатах проверки проектирование системы считается законченным и можно переходить к разработке документации (рабочих чертежей).

С точки зрения иерархии проектирования, для станков и их механизмов можно выбрать следующие уровни проектирования сверху вниз (рис. 2.5): I — техническая идея (способ, принцип, метод); II — структура (морфология станка, элементный состав, блочная структура компоновки, кинематическая структура и т. д.); III — схема (принципиальная, кинематическая, гидравлическая и т. д.), представляющая сумму структуры и связей между ее элементами (блоками); IV — конструкция и ее параметры; V — технология; VI — эксплуатация.

Поиск новой технической идеи создания станка на I уровне может сводиться к поиску новых технологических принципов или способов формообразования с использованием положения о том, что все технологические процессы с точки зрения подготовленности их к комплексной автоматизации делятся на 4 класса. За основной признак принят способ действия обрабатывающей среды (инструмента И) на обрабатываемую среду (заготовку или деталь Д) (рис. 2.6).

Взаимодействие от низшего к высшему классу может быть: точечное (точение острым резцом и т. д.); линейное (фасонное точение и др.); поверхностное (обработка давлением, литье по выплавляемым моделям, порошковая металлургия и т. д.); объемное (окраска в электростатическом поле, нагрев изделий и др.).

Предложенная классификация позволяет формализовать задачи проектирования на I и II уровнях. Для выбора кинематики резания на I уровне и поиска новых структур (кинематических и компоновочных) с формализацией задач II уровня можно использовать классификацию кинематических схем резания, предложенную Г. И. Грановским [13] и закодировавшую схемы сочетания элементарных посту-

IV этап — проверка выполнения некоторых условий функционирования технической системы, применение метода анализа дополнительных свойств, так как может оказаться, что какой-то из показателей качества не учитывался на II и III этапах.

пательных и вращательных движений. С позиций системного подхода конструкцию станка можно рассматривать как иерархическую систему: станок — сборочная единица (узел, механизм) — деталь — часть детали — поверхность. Структура оптимального конструирования станка и его отдельных элементов имеет общий характер независимо от иерархической сложности технической системы.

Решение задач проектирования станков на высших уровнях (I—III) требует применения современных методов поиска новых технических решений [33]. Последовательность поиска новых технологических принципов и структур станков (других рабочих машин) с использованием системно-морфологического подхода [28] можно проследить на примере.

Точно сформулируем задачу: изготовить двухступенчатую цилиндрическую стальную деталь с минимальным расходом металла.

Для металлорежущих станков структуру технологического процесса (рис. 2.6) рассмотрим по следующим 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 (табл. 2.1). В каждой колонке морфологической матрицы может быть сколько угодно альтернатив (в зависимости от фантазии и знания заданной ТС) и их комбинаций. Для колонки 5 в качестве режущего инструмента можно выбрать различные типы резцов, фрез, протяжек и даже сверл.

Для заполненной морфологической матрицы общее число решений: $N=4^6=4096$ (изоморфных, неизоморфных, осуществимых, неосуществимых). Учитывая требование минимального расхода металла, выбираем четыре варианта сочетаний (комбинаций):

- | | |
|------------|--------------------------------------|
| I вариант: | 1.1 — 2.3 — 3.2 — 4.1 — 5.2 — 6.1; |
| II | : 1.4 — 2.2 — 3.3 — 4.3 — 5.4 — 6.4; |
| 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 представлена на рис. 2.7. Применительно к металлорежущим станкам известных конструктивных подходят варианты I (фасонно-отрезной токарный автомат) и IV (токарно-отрезной станок). Нетрадиционные варианты — II (машина сварки трением) и III (фрезерно-отрезной автомат).

Вариант	Обозначение	Элементы способа обработки	Схема и вид обработки
I	x_1		 <i>Фасонно-отрезная</i>
II	x_2		 <i>Сварка трением</i>
III	x_3		 <i>Фрезерно-отрезная</i>
IV	x_4		 <i>Токарно-отрезная</i>

Рис. 2.7. Схемы обработки двухступенчатой детали

2.3. Выбор принципиальной схемы станков с ЧПУ

Выбор принципиальной схемы автомата или станка с ЧПУ является важнейшей частью процесса разработки технического предложения как основы дальнейшего конструирования механизмов и устройств. Она выбирается, когда уже рассчитаны маршрут и режимы обработки, которые лишь в известной степени могут корректироваться на последующих этапах проектирования. Выбор принципиальной схемы включает: 1) определение направления геометрической оси — главной оси, по отношению к которой коор-

2.1. Морфологическая матрица способов обработки двухступенчатой детали

Заготовка		Рабочий процесс		Режущий инструмент	
1. Вид	2. Движение	3. Характер взаимодействия	4. Состояние	5. Количество режущих кромок и тип	6. Движение
1.1. Круглый пруток	2.1. Поступательное	3.1. Точечный	4.1. Холодное	5.1. Один резец	6.1. Поступательное
1.2. Профильный пруток	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. Периодический	4.3. Холодное и горячее	5.3. Фреза	6.3. Вращательное
1.4. Две штучные заготовки	2.4. Нет	3.4. Объемный	4.4. Текучее	5.4. Нет	6.4. Нет

динируют и располагают все основные механизмы и блоки; 2) выбор типа станка с ЧПУ, принципа его построения и расчет количества позиций; 3) определение степени автоматизации; 4) выбор типа системы ЧПУ; 5) компоновочные решения с учетом структуры и унификации узлов и блоков 6) проработку кинематической, гидравлической и других схем, систем смазки, охлаждения и т. д. Принципиальную схему станка принято изображать графически как комбинированную технологическую, кинематическую, гидро- и пневматическую и др.

В однопозиционных (одношпиндельных) станках геометрическая ось совпадает с осью шпинделя для вращающегося инструмента (заготовки), в многопозиционных станках — с осью поворотного рабочего органа (шпиндельного барабана, поворотного стола, карусели). Основные критерии выбора геометрической оси: занимаемая площадь; удобство загрузки и заправки обрабатываемого материала; удобство удаления стружки и других отходов обработки; прочность и жесткость обрабатываемых деталей; возможность унификации конструкций; удобство автоматической смены и закрепления инструмента.

Выбор типов станков с ЧПУ и их количества — это технико-экономическая задача при заданной годовой программе N . При этом выбор осуществляется в следующем порядке:

1. Определяется усредненный рабочий цикл для представительных деталей, мин:

$$T_{ц} = \frac{60F_r K_c \eta_{исп}}{N}, \quad (2.5)$$

где F_r — годовой фонд времени при односменной работе, ч; K_c — коэффициент сменности; $\eta_{исп} = 0,7 \dots 0,85$ — коэффициент использования станка.

2. Предварительно вычерчиваются схемы технологического процесса обработки деталей.

3. Исключаются явно неподходящие варианты по основным критериям.

4. Оставшиеся варианты располагаются по наиболее важному критерию, например по цене, в возрастающий ряд от 1 до n .

5. Последовательно проверяются варианты, обеспечивающие требуемую производительность, устанавливаются m подходящих вариантов.

6. По всем от 1 до m вариантам определяется необходимое количество станков.

7. Определяются капиталовложения, себестоимость изделий и срок окупаемости всех вариантов.

8. Принимается окончательное решение по выбору варианта. Выбор системы ЧПУ осуществляется исходя из количества управляемых координат (координатных блоков), приводов главного движения, подач, вспомогательных движений, а также стоимости системы и количества обслуживаемых станков.

При создании новых станков в кратчайшие сроки важное значение имеет унификация, которая может быть модификационной, размерной, межтиповой и общей [20, 62].

При разработке новой модификации станка необходимо вводить только такие новые детали и узлы, которые обеспечивают повышение качественных характеристик. Смена всех или большинства деталей при переходе от одной модели станка к другой свидетельствует о недостаточной квалификации конструктора.

Компоновка станка является важным этапом в его создании и имеет свои последовательные ступени: технологическую компоновку (определение необходимого состава рабочих и установочных движений, числа шпинделей, степени универсальности станка, параллельной или последовательной схемы обработки, числа рабочих или загрузочных позиций и т. д.); координатную компоновку, раскрывающую состав и порядок сочетания координатных движений; базовую компоновку, определяющую тип станка по разновидностям базовых узлов и другим признакам; конструктивное исполнение и некоторые другие особенности.

2.4. Особенности проектирования станков с адаптивным управлением

На выходные показатели технологической системы станка (производительность, качество и себестоимость) оказывают влияние различные факторы (рис. 2.8, а), связанные с рабочим процессом резания, внешними воздействиями окружающей среды (температура, колебания фундамента и др.), а также с внутренними свойствами системы (прочность, износостойкость, виброустойчивость, сопротивляемость температурным деформациям и др.), снижающими вредные внешние воздействия. Таким образом, качество технологической системы станка зависит от ее конструкции, размеров, материалов деталей и др. Между различными факторами имеют место сложные взаимосвязи.

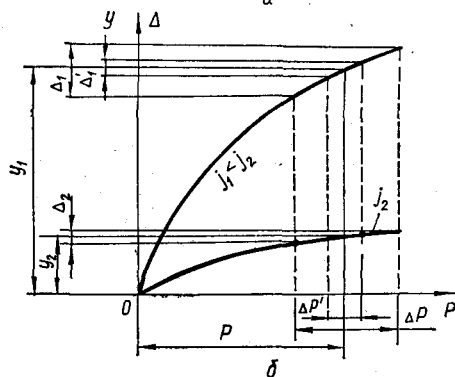
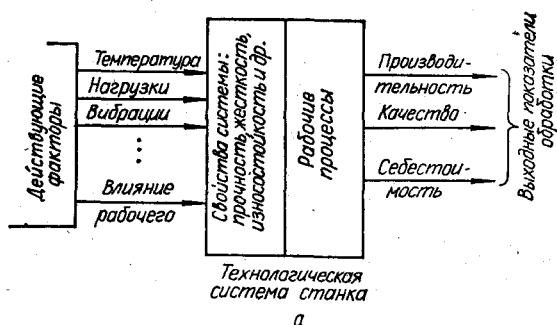


Рис. 2.8. Влияние на выходные показатели обработки детали:
 а — действующих факторов и технологической системы станка; б — силы резания и жесткости станка

Для повышения эффективности автоматизированной обработки обычно идут по традиционному пути, связанному с повышением жесткости и точности технологической системы. Второй путь — это адаптивное управление теми или иными параметрами, определяющими ход технологического процесса и позволяющими даже при низкой жесткости системы получить высокую эффективность обработки по точности и производительности.

Сущность адаптивного управления процессом обработки деталей на станках заключается в поддержании одного или нескольких параметров процесса, определяющих выходные показатели обработки, на заданном уровне независимо от изменения условий его протекания, например, независимо от колебаний припуска и твердости материала, затупления режущего инструмента и др. Для этого станок

оснащают различными чувствительными элементами и преобразующими устройствами, с помощью которых контролируют параметры протекания технологического процесса. Станки, имеющие адаптивное управление, называют самонастраивающимися или самоприспосабливающимися. В этих станках возможно автоматическое управление следующими параметрами процесса: а) упругими перемещениями звеньев; б) траекторией относительного движения обрабатываемой детали и инструмента; в) температурными деформациями звеньев; г) силами, действующими в системе; д) скоростью изнашивания инструмента; е) уровнем вибраций и др.

Проиллюстрируем на примере (рис. 2.8, б) эффективность применения адаптивного управления для повышения точности обработки деталей на станке с низкой жесткостью [6, 32].

Допустим, обрабатывается деталь на станке с высокой жесткостью системы j_2 и силой резания P . Отжатие $y_2 = P/j_2$, а при разбросе силы резания ΔP из-за переменного припуска $t \pm \Delta t$ колебания упругих отжатий и соответствующего размера детали будут $\Delta_2 = \Delta P/j_2$. Сила резания $P = C_{pt}^x S^y v^n K$ или при $C_{pv}^n K = A = \text{const}$

$$P = At^x S^y, \quad (2.6)$$

где t — глубина резания (припуск); S — подача.

При $t_{\min} = t - \Delta t$ сила $P_{\min} = At_{\min}^x S^y$, при $t_{\max} = t + \Delta t$ сила $P_{\max} = At_{\max}^x S^y$, поэтому

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} = AS^y (t_{\max}^x - t_{\min}^x). \quad (2.7)$$

При обработке детали на станке с более низкой жесткостью системы $j_1 < j_2$ будем иметь $y_1 = P/j_1 > y_2$, а при разбросе силы ΔP величина $\Delta_1 = \Delta P/j_1 > \Delta_2$. Для того чтобы уменьшить Δ_1 (повысить точность обработки) и обеспечить $\Delta_1 = \Delta_2$, необходимо уменьшить разброс силы $\Delta P'$ за счет изменения подачи. Тогда $\Delta_1 = \Delta P'/j_1$ будет равной $\Delta_2 = \Delta P/j_2$, т. е. $\Delta P'/j_1 = \Delta P/j_2$, или $\Delta P' = \Delta P j_1/j_2$. Этого можно достигнуть, зная изменение силы $\Delta P'$ и управляя подачей S так, чтобы при $t_{\min}$ $P'_{\min} = At_{\min}^x S'_{\max}$, а при $t_{\max}$ $P'_{\max} = At_{\max}^x S'_{\min}$, т. е.

$$\Delta P' = A (t_{\max}^x S'_{\min} - t_{\min}^x S'_{\max}). \quad (2.9)$$

Принципы построения станков с адаптивным управлением сводятся к тому, что в обычную систему ЧПУ станка

вводится дополнительный блок, управляющий дополнительными параметрами, характеризующими состояние технологической системы или элементов системы управления станка.

Дополнительный блок позволяет корректировать программу работы станка таким образом, чтобы исключить или максимально снизить влияние внешних возмущающих воздействий на работу станка и качество обрабатываемой детали. Это обстоятельство дает возможность автоматически выбирать оптимальный режим обработки для станка, максимально использовать мощность станка, снижать цикловые и внецикловые потери, упрощать программирование и значительно повышать надежность работы станка с программным управлением.

Самонастраивающиеся, или самоприспосабливающиеся, системы программного управления станков можно разделить на три группы — адаптивные, самоорганизующиеся и самообучающиеся [12, 31].

Адаптивные системы управления станков имеют адаптивный блок, содержащий различные вычислительные устройства, позволяющие ему получать дополнительную информацию, необходимую для оптимального управления процессом обработки. Для этого в адаптивный блок поступает информация о состоянии процесса обработки и о возмущениях. В настоящее время принципы самонастройки получили широкое применение в станках с ЧПУ.

Самоорганизующиеся системы управления станков — это системы, в которых структура дискретно или плавно изменяется таким образом, что в изменяющихся внешних условиях и воздействиях эти системы выполняют свои функции наилучшим образом. В процессе работы в этих системах изменяются связи между элементами (одни ослабевают или ликвидируются, другие усиливаются), изменяются пороги срабатывания различных элементов.

Самоорганизующиеся системы управления по своей структуре аналогичны адаптивным системам, но для обеспечения экстремального показателя качества их устройство адаптации изменяет не только параметры управляющего устройства, но и его структуру.

Самоорганизующиеся системы управления способны воспринимать и классифицировать информацию, поступающую в них из внешней среды, и самостоятельно разрабатывать программы переработки информации, оценивать эффективность этих программ по конечным результатам и запоми-

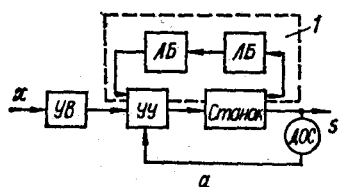
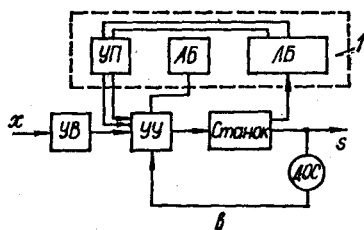
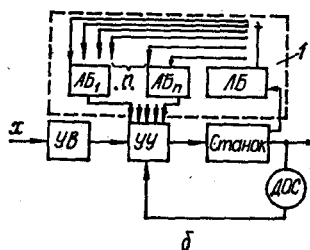


Рис. 2.9. Принципиальные схемы систем ЧПУ:

а — адаптивной; б — самоорганизующейся; в — самообучающейся



нать оптимальные программы для дальнейшего использования в аналогичных ситуациях и в соответствии с условиями и задачами управления перестраивают свою собственную структуру. Очевидно, что в таких системах связи между элементами заранее жестко не предопределяются, а устанавливаются в результате приспособления к условиям работы станка.

Самообучающиеся системы управления станков — это системы, в которых в процессе работы, наладки и подготовки к работе станка в управляющем устройстве происходит постепенное накопление данных о характеристиках работы системы. Это накопление информации производится в блоке памяти системы управления. В этих системах программа работы управляющего устройства определяется вычислительной машиной, которая обрабатывает всю информацию об управляемом процессе и постепенно вырабатывает алгоритм для классификации ситуаций, соответствующих определяемым параметрам выполняемого технологического процесса.

Эта задача представляет собой процесс распознавания образов, причем термин «образ» соответствует здесь термину «ситуация» или «состояние».

На рис. 2.9 представлены принципиальные схемы рассматриваемых систем управления. Адаптивная система управления (рис. 2.9, а) имеет постоянную структуру; в процессе работы имеются лишь управляющие воздействия или параметры системы управления. Сигнал x через уст-

ройство ввода УВ и управляющее устройство УУ вызывает перемещение системы «Станок». Перемещение S рабочего органа станка происходит после коррекции в системе датчика обратной связи ДОС. Информация поступает также в логический блок ЛБ, где производится анализ контролируемых параметров, сравнение их с заданными, предварительное формирование команд. Блок адаптации АБ на основе информации от ЛБ вырабатывает стратегию управления и воздействует на управляющее устройство с целью максимально возможной оптимизации процесса обработки и его конечных результатов.

Адаптивные системы управления позволяют автоматически компенсировать такие возмущающие воздействия, как колебание припусков, твердости, глубины резания, ошибок положения и перемещения, а также автоматически приспосабливаться к режиму (выбирать оптимальный режим). Эти системы позволяют также учитывать в процессе управления упругие деформации, изменение мощности и других параметров.

В самоорганизующейся системе (рис. 2.9, б) происходит непрерывный контроль процесса обработки. С помощью ЛБ в зависимости от условий обработки дается команда на подключение того или иного блока адаптации: АБ₁, АБ₂, ..., АБ_n. Эти блоки подбираются таким образом, чтобы охватить максимальный спектр возможных сочетаний режимов обработки, материалов инструмента и детали, состояния УУ и технологической системы станка.

В самообучающуюся систему (рис. 2.9, в) в отличие от обычного станка с ЧПУ включается еще дополнительный блок 1, состоящий из ЛБ, АБ и устройства памяти УП. По мере функционирования системы накапливается положительный опыт работы, который используется для направленного изменения алгоритма с целью достижения экстремума выбранного критерия оптимальности функционирования системы.

На рис. 2.10 представлена система управления одношпиндельного токарного полуавтомата модели 1Б732Ф3 с адаптивным управлением.

Обрабатываемая деталь 4 приводится во вращение электродвигателем 5, а подача суппорта с резцовой головкой 3 осуществляется ходовым винтом 2 продольной подачи. Измеряемым возмущением здесь служит изменение силы резания, происходящее вследствие изменения условий обработки. Колебания силы резания приводят к пропорционально-

му изменению мощности электродвигателя главного движения 5, что регистрируется датчиком 6. Возникший сигнал через усилитель 7 передается в схему сравнения 8, где он сравнивается с сигналом задающего устройства 9 силы резания. Разность сигналов датчика 6 и устройства 9 после усилителя 10 поступает в устройство программного управления 11 станка. После этого сигнал адаптации суммируется с сигналом программы и поступает в шаговый коммутатор 12, шаговый двигатель 13, гидроусилитель 14 и редуктор 15, вращающий ходовой винт и сообщающий рабочую подачу продольному суппорту 1.

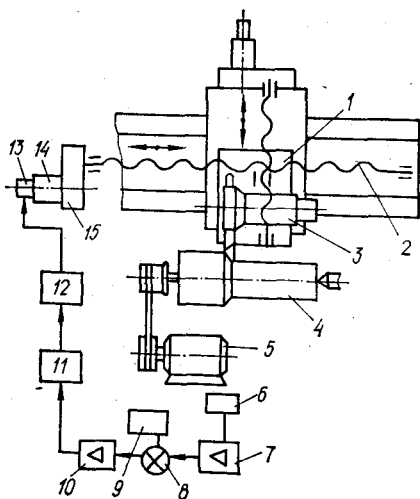


Рис. 2.10. Принципиальная кинематическая схема токарного полуавтомата модели 1Б732Ф3 с адаптивным управлением

Таким образом, в зависимости от знака разности сигналов датчика 6 и задающего устройства 9 увеличивается или уменьшается рабочая продольная подача, на которую влияет сила резания, измеряемая датчиком 6. Это позволяет обрабатывать детали практически при постоянной силе резания, сводя к минимуму разброс упругих деформаций в технологической системе, приводящих к погрешностям обработки; максимально использовать мощность станка; упрощать программирование; повышать стойкость инструмента. В зависимости от принципа работы самонастраивающиеся системы делят на 2 группы: предельного управления (рис. 2.11, а) и оптимального управления (рис. 2.11, б).

В процессе обработки детали на станках с ЧПУ предельного управления (ПУ) определяются один или несколько параметров, характеризующих процесс, на который действуют возмущения f , и сравниваются в регуляторе с заданными граничными или предельными значениями (ПЗ). Возникающее рассогласование в значениях этих величин устра-

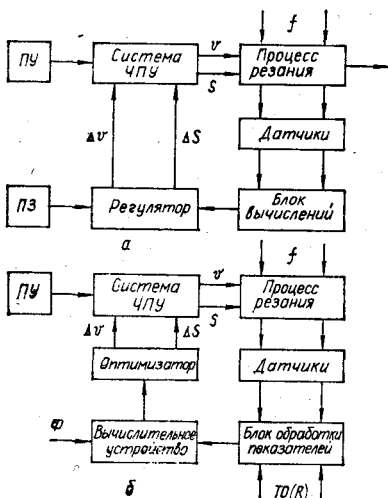


Рис. 2.11. Структурные схемы самонастраивающихся систем: а — предельного управления; б — оптимального управления

программе управления (ПУ) производят автоматическое определение сочетания скорости v и подачи S для обеспечения экстремального значения целевой функции Φ процесса обработки (точности, производительности или себестоимости обработки) при наличии технических ограничений (ТО) и действия возмущающих воздействий f (колеба-

няется изменением подачи S и скорости резания v на величины ΔS и Δv . Наибольшее применение получают более простые системы управления с регулируемой подачей S (рис. 2.12). Примерами служат фрезерование с переменным припуском, подрезка торцов, отрезка и разрезка деталей при использовании полной мощности станка $N \leq [N]$, максимально допустимой нагрузки при резании ($M_p \leq [M_p]$, $P_p \leq [P_p]$) и т. д.

При обработке детали на станках с ЧПУ с применением систем оптимального управления (см. рис. 2.11, б) по заданной про-

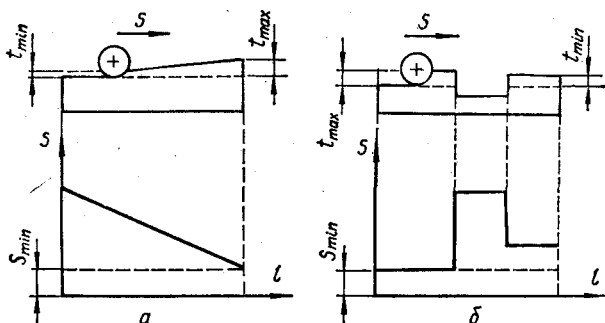


Рис. 2.12. Примеры обработки деталей и графики изменения подачи S в зависимости от длины обработки l :

а — с переменной глубиной резания; б — обработка детали с разным припуском на участках и с необработанным участком

ний припуска, твердости материала заготовки, режущих свойств инструмента и др.). Оптимизатор варьирует регулируемые параметры v и S путем введения поправок Δv и ΔS до тех пор, пока значение целевой функции Φ не попадает в оптимальную зону. Возмущения f , которые будут смещать оптимальную зону, также компенсируются системой управления.

Примерами применения систем оптимального управления могут служить: станок фирмы «Bendix» (США), в основу работы системы которого положен критерий производительности; фрезерный станок с системой, разработанной в Пизанском университете (Италия), где оптимизируется стоимость снятия стружки.

2.5. Структура компоновок станков с ЧПУ

Структурная формула компоновки — определенная последовательность символов, обозначающих блоки компоновки, раскрывающая координатную принадлежность и способ сопряжения блоков.

Для станков с ЧПУ применяется система обозначения осей координат ИСО (рис. 2.13). Особенность ее в том, что ось координат Z принимают всегда параллельной оси главного шпинделя станка, независимо от того, как он расположен — вертикально или горизонтально. Эта особенность позволяет при ЧПУ для наиболее распространенной плос-

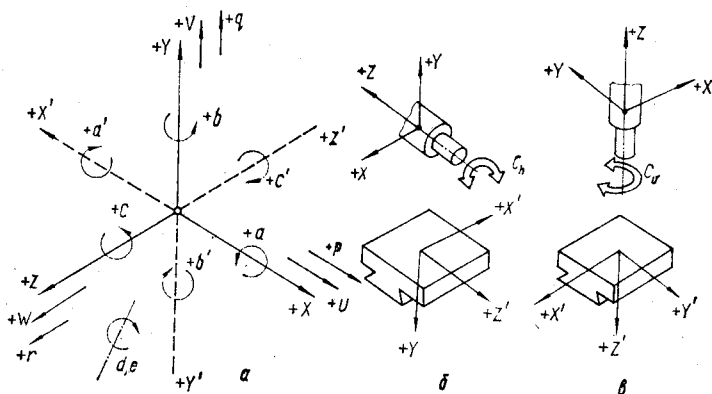


Рис. 2.13. Обозначение координатных осей и движений:

a — поступательных и вращательных; $б$ и $в$ — направления осей для компоновок с горизонтальным и вертикальным шпинделем

кой обработки использовать в программах обозначения координат через X и Y независимо от расположения оси шпинделя (рис. 2.13, б, в). В качестве положительного направления оси Z 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 (третьей очереди). Вращательные движения вокруг осей X , Y , Z обозначают соответственно буквами a , b , c , а дополнительные — d и e . Положительные направления вращательных движений инструмента $+a$, $+b$, $+c$ соответствуют направлению вращения правого винта при его продвижении соответственно вдоль осей $+X$, $+Y$, $+Z$.

При наличии в станке нескольких шпинделей один из них принимают главным. Вращение главного шпинделя обозначают буквой C (иногда S — *spindel*). Если в компоновке одновременно имеются шпиндели, заготовки и инструмент, то первый считают главным (C), а вращение второго — A (ось X), B (ось Y), D (ось Z). Главное движение резания обозначают знаком $\wedge$ над соответствующей буквой, например, $\hat{C}$ или $\hat{D}$. Стационарный блок обозначают знаком 0 (отсутствует движение).

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 обозначать подчеркиванием знака блока ($\underline{Z}$ или $\underline{C}$). Дробный индекс v/h при знаке шпиндельного блока проставляют, если ось шпинделя поворотная. Если ось имеет только два крайних положения, то обозначают v , h . Знаки дублирующих вращательных движений преимущественно применяют вокруг вертикальной оси — d , горизонтальной — e . Блоки, выполняющие одновременно два движения, например, поступательное и вращательное, записывают с косой дробной чертой (Z/C). Это относится и к блокам, перемещающимся под углом (Y/Z — ближе к оси Z).

При последовательном сопряжении блоков (рис. 2.14, а, б) используется знак « $\times$ », который для упрощения записи опускается или заменяется точкой « $\cdot$ », параллельно-сопряженные блоки (рис. 2.14, в) записывают в скобках со знаками « $+$ »; если же они одинаковы, то взамен скобок число блоков записывают цифрой перед соответствующим обозначением.

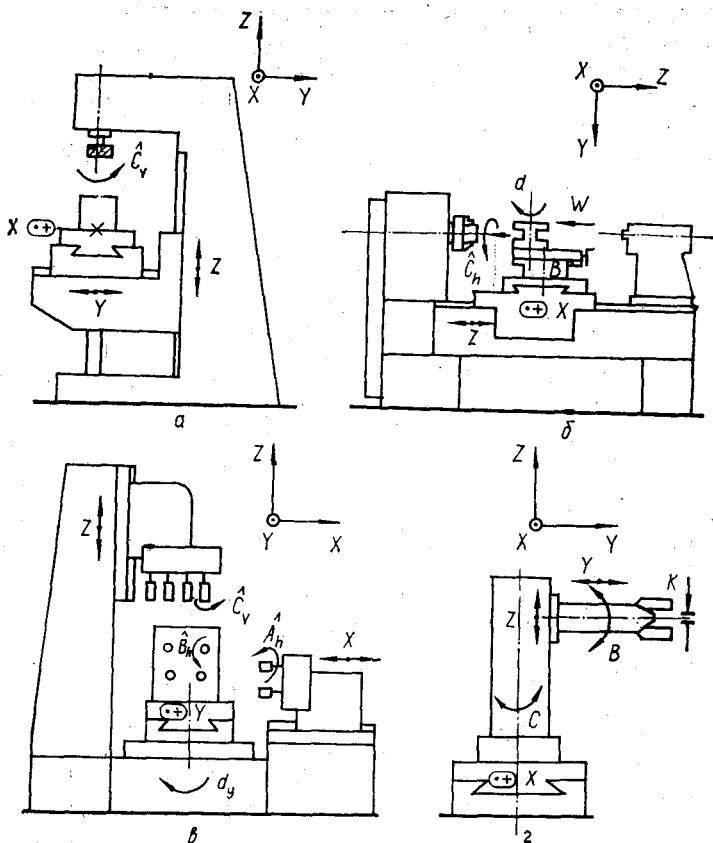


Рис. 2.14. Компонки с указанием координатных осей и движений: а — фрезерного станка; б — токарного станка; в — агрегатно-сверлильного станка; г — промышленного робота

Структурные формулы компоновок могут иметь различные степени уточнения: K_1 — координатная; K_2 — базовая; K_3 — конструктивная [13]. Например, для фрезерного станка (рис. 2.14,а) с общей формулой структуры $XYZOC$ обозначения координатной компоновки K_1 — $XYZOC_v$, которой чаще всего пользуются.

Агрегатное построение компоновки может быть отражено в формуле заключением в квадратные скобки конструктивных модулей, которые представляют собой агрегатные узлы и другие единицы унификации, включающие

один, два или больше блоков компоновки. Конструкционными модулями могут быть, например, стол и станина продольно-фрезерного станка, шпиндельные бабки, агрегатные силовые головки и т. д. Деление компоновки на конструкционные модули в отличие от деления на координатные блоки может проходить не только по направляющим, но и по разъемам частей блоков. Следовательно, части одного блока например, стационарного, могут принадлежать различным модулям. Например, если формула координатной компоновки агрегатного сверлильного станка (рис. 2.14, в) $d_0 0 (Z4\hat{C}_v + Y4\hat{B}_h + X2\hat{A}_h)$, то формула базовой компоновки с обозначением конструкционных модулей будет

$$[d_0 0] \{ [0Z4\hat{C}_v] + [0Y4\hat{B}_h] + [0X2\hat{A}_h] \}.$$

Съемные принадлежности, развивающие кинематическую структуру станка, такие, 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 многопозиционных станков принадлежность блоков тем или иным позициям может быть намечена при знаках блоков или в скобках римскими цифрами в виде индексов сверху, например:

$$[d_0^{I-IV} 0] \{ [0Z (2C_v^{II} + 2C_v^{III})] + [0Y4B_h]^{III} + [0X2A_h]^{IV} \}.$$

Способ обозначения компоновок станков может быть распространен на другие машины, действие которых связано с координатными перемещениями узлов: контрольно-измерительные машины, промышленные роботы и др. Например, формула координатной компоновки промышленного робота (рис. 2.14, г): $KY/B_h ZC_v XO$, где K — движение охвата.

Применительно к станочным системам целесообразна сокращенная запись, в которой станки и агрегаты системы обозначают одной буквой с указанием номера позиции (Π^I , Π^{II} , ...). Каждое из таких обозначений может быть отдельно расшифровано с помощью структурных формул компоновок. При этом продольную ось обозначают через X , поперечную Y , вертикальную Z (что может не совпадать с осями координат станков). В качестве положительного принимают направление оси X — по направлению

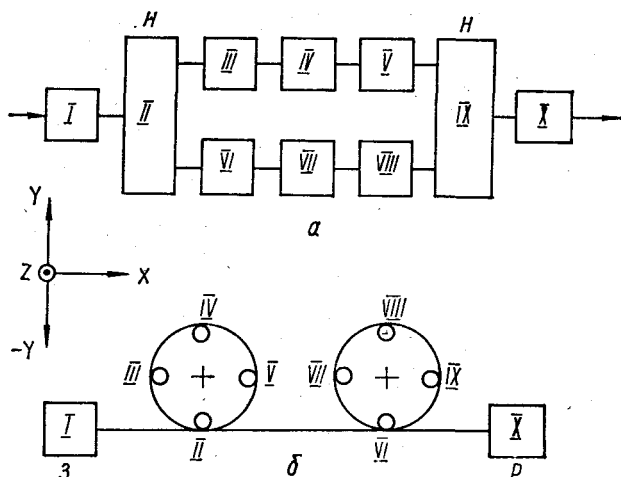


Рис. 2.15. Компоновки станочных систем (З — загрузочная позиция; Р — разгрузочная; Н — накопитель)

последовательности операций в начале системы; оси Z — вверх, оси Y — влево, если смотреть вдоль $+X$. Отрицательные направления обозначают знаком «минус». Строчными буквами x, y, z и a, b, c без индексов обозначают только направления движений.

Для обозначения станочных систем из двух параллельных участков (рис. 2.15, а) и двух многопозиционных станков (рис. 2.15, б) запишем структурные формулы компоновок:

$$CC_1 = x\P\P\P_n^{\text{II}} [x(\Pi^{\text{III}}\Pi^{\text{IV}}\Pi^{\text{V}}) + x(\Pi^{\text{VI}}\Pi^{\text{VII}}\Pi^{\text{VIII}})]\Pi_n^{\text{IX}}\Pi^{\text{X}},$$

$$CC_2 = \Pi_3^{\text{I}}x\P\P^{\text{II-V}}\Pi^{\text{VI-IX}}x\P^{\text{X}}_p.$$

Возможна и иная запись структурных формул компоновок станков, 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} , т. е., например, вместо $XYZ0C_v$ и $XZY0C_h$ (знаки Y и Z изменены местами) получим $X_3X_2X_10X_{01}$ и $X_3X_1X_20X_{02}$. Если перейти к цифровой системе, поставив цифровые индексы взамен букв X , то получим для вертикального и горизонтального консольно-фрезерных станков следующие записи: 3.2.1.01 и 3.1.2.0.02, где блок 1 — вертикально-подвижный; 2 — поперечно-подвижный; 3 — продольно-подвижный; 0 — стационарный (удобно жирным

шрифтом); 01 и 02 — вертикальный и горизонтальный шпиндели станков.

Для обозначения режимов работы станков можно воспользоваться табл. 2.2.

2.2. Режимы подвижных блоков

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

Количественный анализ структуры компоновок основывается на определении числа блоков и элементарных движений, заключенных в компоновке, и преследует цель структурной универсальности и степени возможного ее использования.

Формула компоновки позволяет определить [13]: общее число движений d ; общее число блоков u ; число подвижных блоков $u_d = u - 1$; причем в частных случаях $u_d < d$ за счет совмещения в одном блоке двух движений (например, поступательного и вращательного).

Если исключить из d число дублирующих движений, то получим $K_d = d - d_{дубл}$ — число относительных координатных перемещений инструмента и заготовки (число степеней свободы).

Схема резания							
Код схемы	101	203	301	401	402	403	405
Вид обработки	Строгание, протягивание	Разрезка ленточными пилами	Протягивание круговых сегментов	Сверление, точение и расточка	Конусное точение	Торцевое фрезерование и точение	Цилиндрическое фрезерование
Схема резания							
Код схемы	501	503	615	619	701	703	719
Вид обработки	Фрезерование тел вращения	Кромочное фрезерование тел вращения	Объемное фрезерование пазовыми фрезами, контурное точение	Контурное цилиндрическое фрезерование	Объемное фрезерование дугами строчками	Фрезерование доработанных кулачков	Фрезерование дисковых кулачков

Рис. 2.16. Кинематические схемы резания по Г. И. Грановскому и виды обработки

Вариант технологического модуля ТМ	Структура компоновки станка	Тип станка
$OZ\hat{C}$		Горизонтально-сверлильный
$\hat{C}OZ$		Токарный
$ZO\hat{C}$		Горизонтально-расточный
$\hat{C}ZO$		Токарный автомат продольного точения

Рис. 2.17. Известные структуры компоновок станков по технологическому модулю ТМ401 — $OZ\hat{C}$

Об универсальности структуры компоновки можно косвенно судить по величинам d , u_d и K_d , однако более действенная оценка требует анализа возможных сочетаний движений при обработке деталей, а для этого введем понятие технологического модуля (ТМ) — наименьшего состава блоков компоновки, необходимых для выполнения операций формообразования. ТМ должен состоять по меньшей мере из двух блоков — подвижного и стационарного, т. к. без этого невозможно относительное движение заготовки и инструмента. Для определения и обозначения ТМ можно воспользоваться кинематическими схемами резания по Г. И. Грановскому (рис. 2.16) [13]. Например, технологический модуль ТМ401- $OZ\hat{C}$, имеет поступательное движение Z , направленное вдоль оси вращательного движения $\hat{C}$.

Различные распределения движения образуют варианты ТМ, реализуемых в станках различных компоновок и типов. При этом число n перестановок из r элементов ($n = r$) будет $P'_n = n!$.

В нашем примере для ТМ401 - OZC число перестановок $P(3,3) = 3! = 6$.

На практике известны четыре структуры компоновок, соответствующие приведенным на рис. 2.17. Во всех этих вариантах характер относительного движения и кинематические схемы резания неизменны.

2.6. Математические свойства структурных формул компоновок

Для решения задач компоновки станков необходимо привлечь алгебру логики и теорию множеств, которые позволяют рассматривать компоновку как упорядоченное множество блоков, а различные сопряжения блоков — как логическое отношение элементов этого множества, среди которых конъюнкция — логическое умножение (функция «И») соответствует последовательному сопряжению элементов (блоков), а дизъюнкция — логическое сложение (функция «ИЛИ») — параллельному сопряжению.

Применительно к блокам компоновки станка конъюнкция (знак $\wedge$ либо $\cap$ или знак умножения — точка, которая, как в алгебре, может быть опущена) заключается в том, что для получения сложного перемещения концевых блока в системе координат $X-Y-Z$ станка требуется перемещение одного блока по направлению X , другого — по Y , и третьего — по Z , что достигается последовательным сопряжением блоков (см. рис. 2.14, а).

Дизъюнкция (знак $\vee$ либо $\cup$ или знак сложения $+$) соответствует параллельное сопряжение элементов (блоков) при котором действие функции, например двух элементов, проявляется при условии действия одного из них — первого «ИЛИ» второго «ИЛИ» при действии обоих вместе.

В тех случаях, когда, например, два элемента, объединенные дизъюнкцией, вступают в отношение конъюнкции к третьему, в алгебре логики допускают скобки, например $(X + Y)Z$, что применительно к блокам компоновки может означать, что блоки X и Y , порознь последовательно сопряженные с блоком Z , между собой параллельны, т. е. могут перемещаться одновременно или каждый в отдельности (см. рис. 2.14, в).

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

1) коммутативного (переместительного) — сложное формообразующее движение не нарушается при различных сочетаниях его элементов (рис. 2.18, а, б), т. е. типа

$$XYZ = YXZ = \dots;$$

2) дистрибутивного (распределительного) — позволяет объединять блоки, совершающие одинаковые движения, или наоборот, — разделять, если синхронное движение окажется неприемлемым (рис. 2.18, в, г), т. е. типа

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

3) ассоциативного (сочетательного) — объединение движений в одном блоке, например, поступательного движения с вращательным в зубодолбежных станках, горизонтально-расточных или двух поступательных движений с получением наклонных траекторий с целью повышения жесткости и точности, упрощения конструкции (рис. 2.18, д, е), т. е. типа

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

4) идемпотентности — позволяет дублировать движение вдоль одной оси путем распределения общего перемещения между двумя блоками, сопряженными последовательно, например, для уменьшения вылета в целях повышения жесткости в горизонтальных фрезерно-расточных станках (помимо выдвижного шпинделя Z перемещение колонны — установочное движение W), т. е. типа $X \cdot X = X$;

5) специфического де Моргана — устанавливает возможность перехода от конъюнкции к дизъюнкции и наоборот, что означает возможность перехода от последовательного сопряжения блоков к параллельному (рис. 2.18, ж, з).

Важным свойством структуры формул является возможность оперировать ими как множествами и как элементами более крупных подмножеств. Согласно различным ступеням 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 :

$$K_3 \subset K_2 \subset K_1$$

(знак $\subset$ означает «является элементом»).

В описанных структурных формулах наряду с ранее принятыми обозначениями используют еще одну функцию

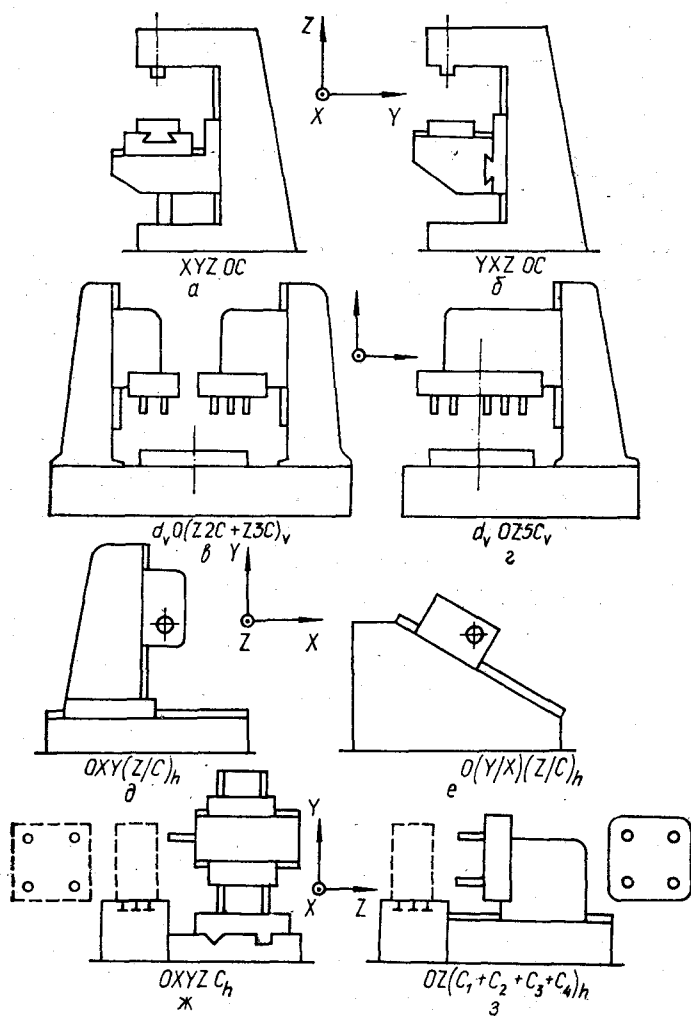


Рис. 2.18. Пресобразования компоновок станков с применением алгебраических законов

алгебры логики — инверсии или отрицания (функции НЕ). Функцию обозначают чертой над отрицаемым знаком, и применительно к множеству блоков, ограниченному определенным составом, она представляет собой дополнение к данному блоку до полного состава.

Например, $\bar{0}$ («не 0») означает все подвижные блоки, входящие в состав компоновки. Если при этом состав блоков определяется множеством $M\{0, X, Y, Z, C\}$, то блоком 0 могут быть X, Y, Z и C , т. е. $\bar{0} = X + Y + Z + C$, аналогично $\bar{X} = 0 + Y + Z + C$ и т. д.

Обобщенные формулы позволяют производить следующие математические операции: развертывание обобщенных формул (множеств) в конкретные формулы компоновок; соответствия конкретной формулы обобщенной (операция, обратная предыдущей); сложение и пересечение множеств.

Например, обобщенная формула $X0\bar{X}\bar{X}C$ развертывается 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 ($P_3 = 3! = 6$, т. е. 2 отрицания $\bar{0}$):

$$\bar{0}\bar{0}\bar{0}\bar{0}C = YX0ZC + YZ0XC + ZY0XC.$$

2.7. Выбор оптимального решения при проектировании станков

Каждое свойство объекта проектирования можно определить тремя численными характеристиками:

- 1) абсолютным значением единичного показателя качества K_μ , определяемым метрологическим методом;
- 2) относительным показателем качества K_μ^* , характеризующим степень удовлетворения потребителей в данном свойстве;
- 3) весомостью α_μ , определяющей важность данного свойства среди остальных свойств.

В исходных данных при проектировании станка эти характеристики должны учитываться требованиями эксплуатации и производства по уровню автоматизации, определяемому в зависимости от объема выпуска. Таким образом, имеются два вида конструкции станков, которые следует оценить с помощью заданного или принятого народнохозяйствен-

ного критерия и на этом основании разрабатывать оптимальный вариант станка, подлежащий реализации.

В формализованном виде задача оптимального проектирования в общей постановке заключается в определении значений независимых переменных (конструктивных параметров) $x_1, x_2, \dots, x_n$, при которых критерий оптимальности (целевая функция) проектируемого объекта $\Phi = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, являющийся нелинейной функцией переменных, имеет минимально (максимально) возможное значение при условии, что переменные $x_1, x_2, \dots, x_n$ принимают

лишь положительные значения, т. е. $x_j \geq 0$ ($j = 1, 2, \dots, n$) и выполняются ограничения, заданные в формуле неравенств для некоторых, в общем случае нелинейных, функций этих переменных (функций ограничений) $R_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ ($i = 1, \dots, m$; $m \leq n$ и $m \geq n$).

Существуют три типа задач оптимизации:

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

Например, при создании высокоточного станка в качестве целевой функции может быть выбрана точность обработки на нем деталей, а остальные технико-экономические показатели станка (производительность, металлоемкость, расход энергии и др.) будут техническими ограничениями. Приведем еще один пример.

При выборе оптимальной партии деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ, используют критерий оценки эффективности, представляющий собой приведенные затраты ΣC . Эти затраты учитывают технологическую себестоимость обработки деталей и долю капиталовложений в оборудование и незавершенное производство, приходящаяся на 1 деталь (рис. 2.19):

$$\Sigma C = A/m + Bm,$$

где A — величина, характеризующая стоимость наладки

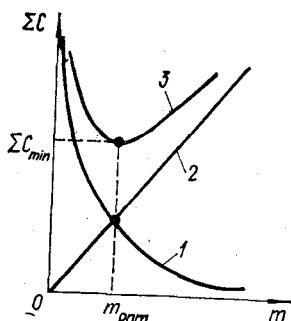


Рис. 2.9. Графики зависимости приведенных затрат от величины партии деталей, обрабатываемых на станке с ЧПУ

2.3. Классификация методов поиска

Поиск глобаль							
Поиск локального							
Метод определения			Метод представления математической модели				
Параболической аппроксимации	«Золотого сечения»	Фибоначчи	Формирование обобщенного оптимального критерия		Формирование возможных направлений		
			Барьерные функции	Штрафные функции	Проекций в переменной метрике	Линейное локальное моделирование	Проектно-градиентный метод

(кривая 1 на рис. 2.19); B — затрат на эксплуатацию (прямая 2 на рис. 2.19). Кривая 3 характеризует сумму затрат, минимальное значение которых $\sum c_{\min}$ будет соответствовать оптимальной партии деталей $m_{\text{опт}}$.

Продифференцировав $\sum c$ по m и приравняв к нулю, найдем оптимальное значение $m_{\text{опт}}$, т. е. $(\sum c)' = -A/m^2 + B = 0$; $m_{\text{опт}} = \sqrt{A/B}$.

2. Все n критериев суммируются (или умножаются) и формируют комплексный (смешанный) критерий качества в размерном:

$$K = \Phi = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_i \quad (2.9)$$

или безразмерном виде

$$K^* = \Phi = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_i^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{K_i}{R_i}, \quad (2.10)$$

где α_i — весовые коэффициенты, определяемые методами экспертных оценок, парных сравнений и другими методами неформальных процедур.

Например, качество зажимного механизма (или станочного приспособления) токарного станка с ЧПУ можно характеризовать как сумму частных безразмерных показателей по силе $K_1^* = K_c$, жесткости $K_2^* = K_{\text{ж}}$, точности радиальной $K_3^* = K_{\text{т.р}}$ и осевой $K_4^* = K_{\text{т.о}}$, быстродействия $K_5^* = K_b$, широкодиапазонности $K_6^* = K_{\text{ш}}$ и т. д., т. е. $K^* = \alpha_1 K_1^* + \alpha_2 K_2^* + \alpha_3 K_3^* + \alpha_4 K_4^* + \alpha_5 K_5^* + \alpha_6 K_6^* + \dots$

оптимума при проектировании

ного оптимума								
оптимума						Выбор начальных точек		
Метод определения направления движения к оптимуму						Последовательность испытаний с адаптацией	Использование априорной информации	Последовательность независимых испытаний
стохастический			детерминированный					
«Овражный»	Оценки градиента	Случайного поиска	Переменной метрики	Градиентный	Прямой			

3. Изменение (расширение) масштаба постановки задачи (по глобальному критерию), например, решение задачи в масштабе всего народного хозяйства: минимум расхода энергии, металла по всей стране и т. д.

При создании новых станков возникают задачи оптимального проектирования в самой общей постановке, когда критерий оптимальности (целевая функция) и ограничения являются нелинейными функциями конструктивных параметров. В общем случае эти задачи являются многоэкстремальными и поэтому требуют глобального экстремума.

В последнее время разработано много методов, позволяющих получить решение (точное или приближенное) для специальных задач [17]. Однако по-видимому невозможно создать универсальный метод, позволяющий получить точное решение общей задачи нелинейного программирования за конечное число итераций (шагов). Теоретически сложно доказать сходимость для процедур, применяемых при практических расчетах. Методы численного решения задач нелинейного программирования с помощью ЭВМ продолжают создавать и многие практические задачи уже удалось решить на ЭВМ.

В табл. 2.3 представлены методы решения задач оптимального проектирования для детерминированных моделей проектируемых станков, станочных систем и их элементов, в которых все параметры изменяются непрерывно.

При выборе лучшего варианта на I и II уровнях проектирования удобно пользоваться методами неформальных процедур, осуществляя поиск лучших решений в условиях нечеткой (или неполной) исходной информации, требующей экспертной информации [29, 40]. Одним из таких

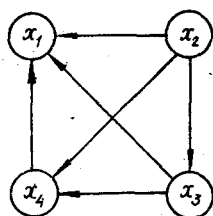


Рис. 2.20. Граф турнира вариантов изготовления двухступенчатой детали по критерию минимального расхода металла

методов является метод расстановки приоритета [7], который может использоваться также для определения коэффициентов весомости в комплексном критерии качества [формулы (2.9) и (2.10)].

Метод расстановки приоритета — один из эффективных методов качественной оценки вариантов. Он служит для многокритериального, качественного анализа на основе экспертизы вариантов построения объектов. Метод предусматривает попарное сопоставление объектов по принципу «лучше» ($>$), «хуже» ($<$), равно» ($=$) и специальный алгоритм обработки полученных данных.

Рассмотрим пример применения метода расстановки приоритета для оценки качества четырех синтезированных вариантов x_1, x_2, x_3, x_4 (см. рис. 2.7):

По критерию минимального расхода металла проведем парные сравнения в виде системы сравнений и построим граф турнира вариантов (рис. 2.20):

$$\begin{array}{l|l|l} x_1 < x_2 & x_2 > x_3 & x_3 > x_4 \\ x_1 < x_3 & x_2 > x_4 & \\ x_1 < x_4 & & \end{array} .$$

Общее число парных сравнений при m вариантах

$$M = \frac{m(m-1)}{2} . \quad (2.11)$$

В этом случае $m = 4$, а число парных сравнений $M = \frac{4 \cdot 3}{2} = 6$.

В графе вариантов ребра между вариантами x_i и x_j отражают условия:

$$\begin{array}{l|l|l} i > j & i > j & \longrightarrow \\ i \sim j & i = j & \longleftrightarrow \\ i < j & i < j & \longleftarrow \end{array} .$$

Обычно применяют следующую систему количественных соотношений качественного сравнения: при $i > j$ $a_{ij} = 2; 1,5; 1$, при $i = j$ $a_{ij} = 1; 0$, а при $i < j$ $a_{ij} = 0; 0,5; -1$.

2.4. Квадратная матрица смежности (рис. 2.20)

$i \backslash j$	x_1	x_2	x_3	x_4	$\sum a_{ij}$	$P_i^{\text{отн}} (1)$	$P_i (2)$	$P_i^{\text{отн}} (2)$	Место (приоритет)
x_1	1	0,5	0,5	0,5	2,5	0,156	9,25	0,157	IV
x_2	1,5	1	1,5	1,5	1,5	0,344	21,25	0,360	I
x_3	1,5	0,5	1	1,5	4,5	0,281	16,25	0,275	II
x_4	1,5	0,5	0,5	1	3,5	0,219	12,25	0,208	III
$\sum$	$m^2 = 4^2 =$				16	1	59	1	—

Принимаем систему количественных соотношений:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1,5 & a_i > a_j \longrightarrow \\ 1 & a_i = a_j \longleftrightarrow \\ 0,5 & a_i < a_j \longrightarrow \end{cases}$$

Строим и заполняем матрицу смежности (табл. 2.4), из которой видно, что лучшим является вариант II (x_2), так как его относительный вес $P_2^{\text{отн}} (2) = 0,360$, что соответствует I месту по минимальному расходу металла при изготовлении двухступенчатой цилиндрической детали.

3. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ

3.1. Общие принципы построения однопозиционных станков с ЧПУ

Построение станков с ЧПУ должно быть направлено на повышение их технико-экономических показателей и расширение технологических возможностей.

Построение компоновки станка является важным этапом в его создании и имеет свои последовательные ступени: технологическую компоновку (определение необходимого состава рабочих и установочных движений, числа шпинделей, степени универсальности станка, параллельной или последовательной формы централизации обработки, числа рабочих или загрузочных позиций и т. д.); координатную компоновку, раскрывающую состав и порядок сочетания координатных движений; базовую компоновку, определяющую

тип станка по разновидностям базовых узлов и другим признакам; конструкционную компоновку, уточняющую конструктивное исполнение и некоторые другие особенности.

В машиностроении различают технологические и конструкционные модули. *Технологический модуль* — это «технологическая структурная единица компоновки», или наименьший состав блоков компоновки станка, необходимых для выполнения операций «формообразования». *Конструкционный модуль* — функционально и конструктивно независимая единица унификации станка, которая может использоваться индивидуально или в различных комбинациях с другими модулями.

Основные положения, характеризующие модульный принцип проектирования и изготовления, следующие [2]. *Модуль* — это конструктивно и функционально законченная единица, являющаяся составной частью общей системы станков. Примером могут служить варианты исполнения модульных конструкций узлов для поступательного перемещения фирмы «M. Föhrenbach» (ФРГ) с различным количеством управляемых координат (рис. 3.1).

Модуль характеризуется наименьшим возможным числом связей для присоединения к нему новых модулей (присоединительные размеры должны быть унифицированы). Ограниченная номенклатура модулей должна обеспечивать множество различных компоновок станков путем многообразия сочетаний и положений модулей. Модульный принцип позволяет проектировать экономичные станки, наиболее полно отвечающие требованиям решения конкретной технической задачи без избыточных функций, более полно использовать выполненные ранее разработки при сокращении времени и трудоемкости проектирования, увеличивать надежность работы за счет использования отработанных конструкций модулей. Уменьшение разнообразия конструкций модулей и составляющих их элементов улучшает условия эксплуатации и ремонтпригодность. Модульное проектирование позволяет создавать новое высокопроизводительное оборудование для оптимальной обработки заготовок, а не подводить процесс под возможности уже имеющегося оборудования. Модульный принцип создает реальные предпосылки для замены устаревших форм и методов проектирования новых конструкций станков и их систем.

Одним из путей повышения производительности автоматов и станков с ЧПУ является дифференциация технологического процесса — первый принцип построения однопо-

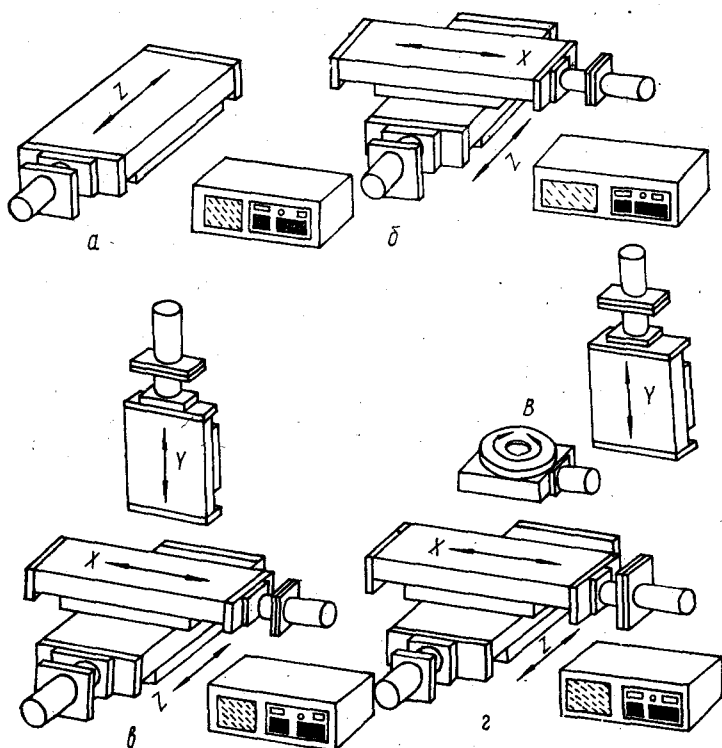


Рис. 3.1. Модульное построение координатных суппортов фирмы «M. Göhrenbach» с числом координат:

а — одной; б — двумя; в — тремя; г — четырьмя

зиционных станков с одношпиндельной обработкой. При этом процесс расчленяется на составные части, выполняемые на различных позициях, через которые последовательно проходит каждая деталь. Вместо того чтобы производить полную обработку детали (рис. 3.2) многими инструментами по очереди в одной позиции (рис. 3.3, а), технологический объем обработки и комплект инструментов рассредоточивают на q однопозиционных станков (рис. 3.3, б). Например, на первом токарном станке будет производиться обточка, на втором — нарезание резьбы, на третьем — сверление отверстия, на четвертом — фрезерование шлица. Чем больше число позиций, тем меньше обработка на каждой из них.

При равномерной дифференциации технологического

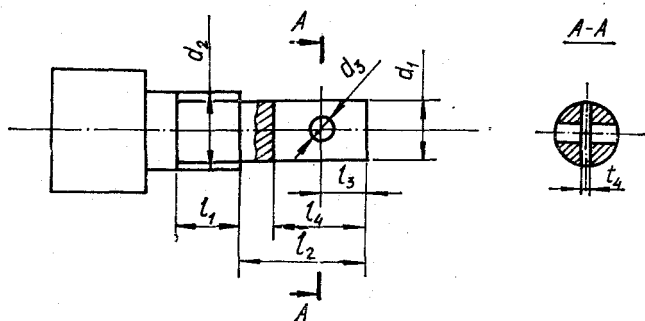


Рис. 3.2. Пример детали, требующей выполнения различных операций.

I — точение $d_1 \times l_1$; II — нарезание резьбы $d_2 \times l_1$; III — сверление $d_3 \times l_3$; IV — фрезерование шлица $t_4 \times l_4$.

процесса по позициям продолжительность одной технологической операции

$$t_p = t_{p0}/q, \quad (3.1)$$

где t_{p0} — суммарная длительность воздействия на каждую деталь (длительность несовмещенных операций). Одновременно уменьшается и время холостых ходов (один зажим-разжим, один подвод-отвод инструмента, постоянная глубина резания), с учетом которых время рабочего цикла

$$T = \frac{t_{p0}}{q} + t_x + t_{всп}, \quad (3.2)$$

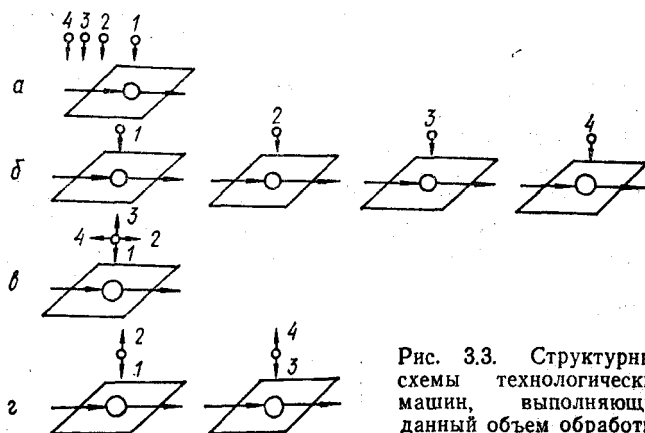


Рис. 3.3. Структурные схемы технологических машин, выполняющих данный объем обработки

а фактическая производительность

$$Q = \frac{1}{t_{p0}/q + t_x + t_{всп}}. \quad (3.3)$$

При значительной степени дифференциации ($q \rightarrow \infty$) длительность цикла (при $t_{всп} = 0$) и цикловая производительность $Q_{ц}$ все более определяются длительностью несовмещенных холостых ходов цикла:

$$Q_{ц\max} = \lim_{q \rightarrow \infty} Q_{ц} = \frac{1}{t_x}. \quad (3.4)$$

Максимальное число позиций $q_{\max}$ определяется невозможностью дальнейшей дифференциации процесса из-за потери качества изделий. Так, нельзя дробить на части чистовую обточку точных поверхностей ибо на поверхности останутся ступеньки, не устраняемые шлифованием.

Второй путь повышения производительности — автоматизация рабочего цикла, создание однопозиционных станков с многоинструментной обработкой с тем же сочетанием технологических возможностей, как у универсальных станков с ручным управлением, но более высоким быстродействием выполнения отдельных элементов рабочего цикла. Например, на многооперационном станке (рис. 3.3, в) типа «токарный обрабатывающий центр» при автоматической смене инструмента можно выполнить все операции; при этом вращающийся и невращающийся инструменты могут располагаться в многопозиционной (револьверной) головке, установленной на многокоординатном суппорте.

Дальнейшее повышение производительности достигается сочетанием первых двух принципов — дифференциации и концентрации (рис. 3.3, г) за счет многоинструментной обработки.

Сравним по производительности два конкурирующих варианта однопозиционных станков в условиях серийного производства:

1) группа из p параллельно работающих многооперационных станков (МОС), реализующих принцип концентрации операций ($t_{p0} = \sum t_{pi}$);

2) группа из q работающих последовательно однооперационных станков с ЧПУ, реализующих принцип дифференциации операций ($t_p = \frac{t_{p0}}{q}$).

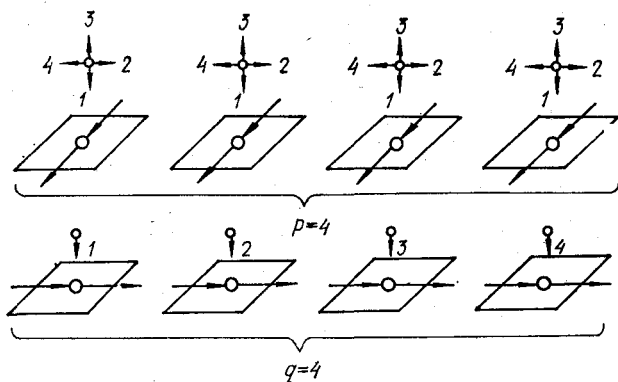


Рис. 3.4 Структурные схемы технологических систем из равного количества конкурирующих вариантов станков с ЧПУ:

а — многооперационных; б — однооперационных

Сравнение является правомерным при $p = q$ (рис. 3.4). Пренебрегая потерями по надежности, получим формулы производительности [32]:

$$Q_1 = Q_p = \frac{p}{t_{p0} + t_{всп} + t_{x1}s + \frac{v_1 + v_2s}{z}}; \quad (3.5)$$

$$Q_2 = Q_q = \frac{1}{t_{p0}/q + t_{всп} + t_{x1}s/q + \frac{v_1 + v_2 - s/q}{z}} \quad (3.6)$$

где $t_{p0} = t_{p1}s$; s — число элементарных переходов; t_{x1} — средняя составляющая времени холостого хода (подвод-отвод инструмента, координатная установка); z — размер партии деталей; $t_{всп}$ — вспомогательное время, связанное с загрузкой-разгрузкой; v_1 — среднее время переналадки станка, не зависящее от технологического маршрута и числа элементарных переходов (замена управляющих программ, замена и выверка приспособления и др.); v_2 — единичная составляющая среднего времени переналадки, пропорциональная числу элементарных переходов (замена комплекта инструментов, обработка и контроль пробной детали, поднастройка инструмента и др.).

Выразим отношение производительностей конкурирующих вариантов через уравнение относительной производительности

$$\Phi_Q = \frac{Q_p}{Q_q} = \frac{p(t_{p0}/q + t_{всп} + t_{x1}s/q + \frac{(q\vartheta_1 + \vartheta_2s)}{qz})}{t_{p0} + t_{всп} + t_{x1}s + \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2s}{z}}. \quad (3.7)$$

Заменяв q на p и преобразовав (3.7), получим

$$\Phi_Q = 1 + \frac{(p-1)(t_{всп} + \vartheta_1/z)}{t_{p0} + t_{всп} + t_{x1}s + \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2s}{z}}. \quad (3.8)$$

Из уравнения (3.8) видно, что при $p > 1$ для различных значений $t_{всп}$ и z группа многооперационных станков всегда более производительна, чем эквивалентная группа однооперационных станков ($\Phi_Q > 1$), особенно при большой длительности загрузки и съема детали. Основной выигрыш в производительности получается за счет того, что в многооперационных станках загрузка-разгрузка происходит лишь один раз, а в однооперационных — по числу станков; имеется выигрыш и за счет уменьшения суммарной длительности переналадок. Выигрыш зависит от серийности производства.

Пример [31]. Число станков $p = q = 4$, $t_{p0} = 20$ мин, $t_{x1} = 0,2$ мин, $\vartheta_1 = 20$ мин, $\vartheta_2 = 5$ мин, $s = 20$, $t_{всп} = 5$ и 10 мин, $z = 1 \dots 10^4$.

Из рис. 3.5 видно, что с увеличением размера партии деталей относительная производительность Φ_Q растет до определенных пределов, причем чем больше $t_{всп}$, тем выше Φ_Q . При малых значениях $t_{всп}$ влияние z сказывается меньше. Например, при $t_{всп} = 5$ мин с изменением z от 1 до 10 000 Φ_Q меняется от 1,5 до 1,52 (кривая 1), в то время как при $t_{всп} = 15$ мин Φ_Q меняется от 1,66 до 2,15.

3.2. Тенденции построения токарных станков с ЧПУ

По назначению токарные станки с ЧПУ подразделяются на патронные (АТПР2М, 1734ФЗ, 1П717ФЗ, КТ141ФЗ, 16К20РФЗ, 1П756ДФЗ и др.) для обработки сравнительно коротких деталей при их кон-

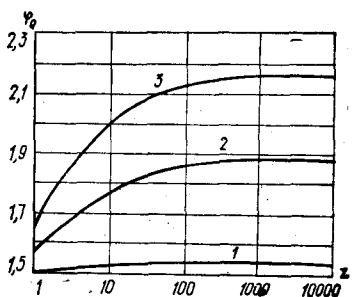


Рис. 3.5. Графики зависимости относительной производительности от размера партии деталей при вспомогательном времени:

1 — $t_{всп} = 5$ мин; 2 — $t_{всп} = 10$ мин; 3 — $t_{всп} = 15$ мин

сольном закреплении в зажимном патроне, центровые, оснащенные задней бабкой, для обработки валов в центрах и патронно-центровые (16Б16Ф3, 1П752МФ3, 1Б732Ф3, 16К30Ф3 и др.).

Весьма существенной чертой в компоновке станка является расположение направляющих суппорта: горизонтальное (1Б616Ф3, 1В340Ф30, 16К20Ф3, 16К30Ф3) с сохранением внешнего сходства с универсальными токарными и револьверными станками, вертикальное или наклонное (1П420Ф40), для которых преимуществами являются удобство обслуживания, облегчение схода и удаления стружки, расположение ходового винта между направляющими, что способствует повышению точности перемещения суппорта.

Токарные станки с ЧПУ имеют две управляемые координаты: Z — перемещение каретки вдоль оси шпинделя; X — перемещение поперечных салазок перпендикулярно этой оси. На поперечных салазках установлен либо резцедержатель (при смене инструмента из магазина), либо револьверная поворотная инструментальная головка, которая может иметь два различных положения оси поворота: совпадающее по направлению с осью Z и перпендикулярное плоскости XZ . Существуют тенденции оснащения станков двумя револьверными головками.

В последнее время наметилась также тенденция построения токарных станков с ЧПУ не только на базе универсальных токарных станков (16К20Ф3, 16К20РФ3, РТ705Ф3, 16К30Ф30), токарно-револьверных (1В340Ф30), патронно-центровых (1Б752МФ3), но и токарных автоматов, для которых свойственно было наличие распределительного вала и применение их в массовом и крупносерийном производстве.

Дальнейшее повышение производительности и расширение технологических возможностей токарных станков с ЧПУ идет по пути концентрации операций, увеличения числа РГ и суппортов, ужесточения конструкций за счет новых компоновок (наклонные станины), например, компоновки фирмы «HEID» (рис. 3.6).

При точении на токарных станках с ЧПУ традиционных компоновок невозможно вести обработку одновременно более чем двумя инструментами, т.к. есть лишь 2 независимых суппорта (рис. 3.7, а) с револьверными головками, одна из которых для наружной обработки, а другая — для внутренней.

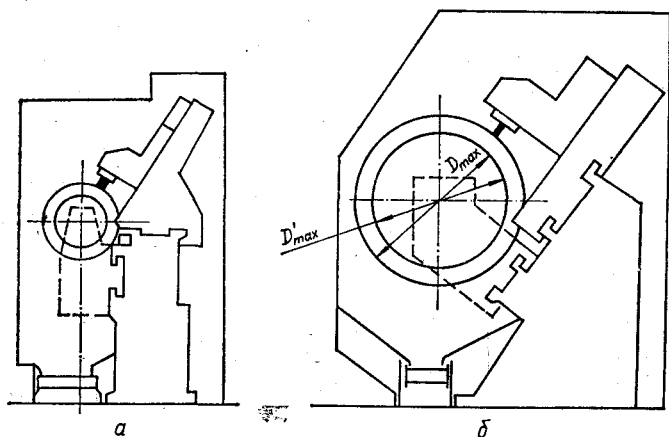


Рис. 3.6. Компонровка токарных станков с ЧПУ фирмы «HEID» при разных $D_{\max}$ заготовки:
 а — 400, 530 мм; б — 560, 750, 900, 1200 мм

Современные токарно-центровые станки позволяют обрабатывать валы одновременно с двух сторон (рис. 3.7, б, в), а при креплении за среднюю часть и с торцов.

При размещении шпиндельной бабки между центрами (рис. 3.7, в) и при ее перемещении возможна обработка длинномерных деталей с высокой точностью и концентрацией операций (четырёхсуппортная обработка). Повышение концентрации инструментов возможно на станках принципиально новых компоновок (рис. 3.7, г), в которых 3...5 суппортов, имеющих продольные направляющие, работают по принципу распределения припуска между резцами как по глубине, так и по длине обработки. Однако при этом исключается дальнейшее повышение производительности, расширение технологических возможностей станка до многооперационного. Качественно новый уровень, приближающий станок к полуавтомату крупносерийного производства, — это разделение перемещений рабочего органа на основные (рабочие) и вспомогательные (наладочные), выполняемые раздельно суппортами и независимо режущими инструментами многолезцового устройства (рис. 3.7, д, е), в котором наладочное перемещение резцов осуществляется шаговыми двигателями, а зажим — гидроцилиндрами.

Фирма «Шисс-Фрорип» создала двухсуппортный токарный прутковый автомат с ЧПУ (типа CNC) THC 30 D с за-

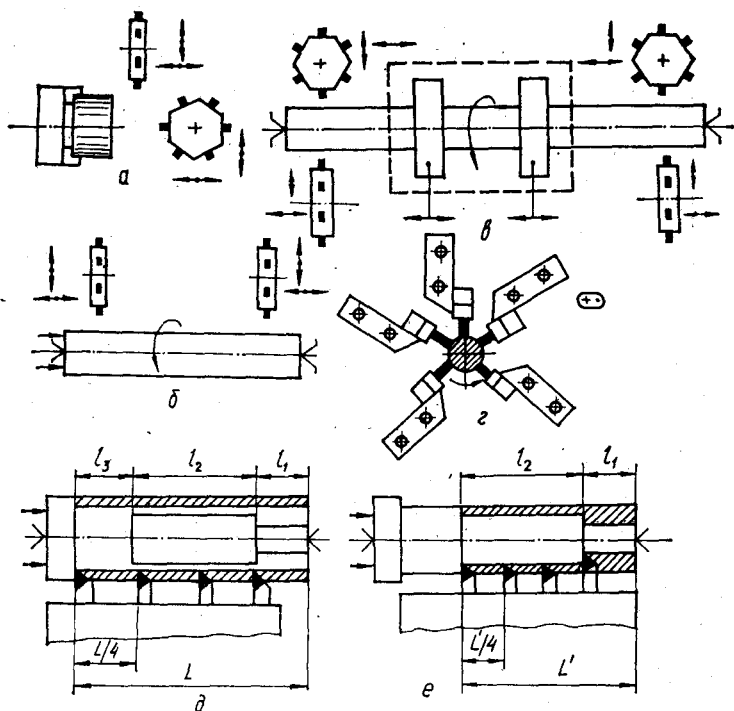


Рис. 3.7. Схемы концентрации операций на токарных станках с ЧПУ

грузочным магазином для прутков, на котором комплектно изготавливаются и собираются две детали резьбового соединения.

Фирма «Boley», используя модульный принцип компоновки, разработала 5 исполнений токарного станка с ЧПУ (рис. 3.8), обеспечивающего высокую точность обработки деталей по диаметру во всем диапазоне частот вращения шпинделя с $n_{\max} = 6300 \text{ мин}^{-1}$. В нем предусмотрена возможность автономного привода каждого инструмента, установленного в револьверной головке. Диаметр отверстия шпинделя 26 мм, наибольший диаметр зажимаемой в патроне заготовки 100 мм, а наибольшая длина обработки 200 мм.

Фирма «Emag» создала гамму одношпиндельных и многошпиндельных токарных автоматов с ЧПУ, используя агрегатно-модульный принцип и устройства автоматиче-

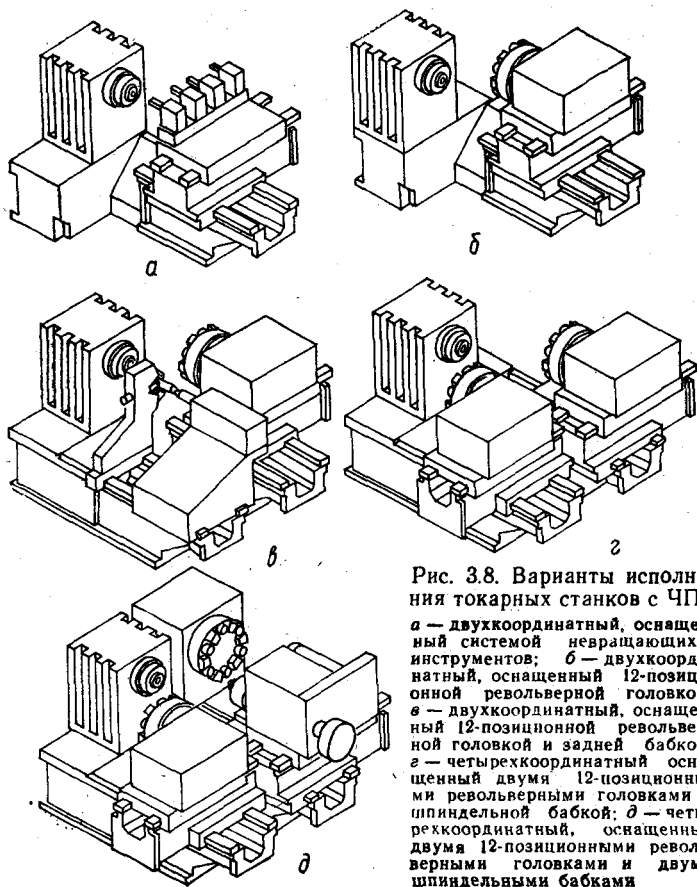


Рис. 3.8. Варианты исполнения токарных станков с ЧПУ
 а — двухкоординатный, оснащенный системой невращающихся инструментов; б — двухкоординатный, оснащенный 12-позиционной револьверной головкой; в — двухкоординатный, оснащенный 12-позиционной револьверной головкой и задней бабкой; г — четырехкоординатный, оснащенный двумя 12-позиционными револьверными головками и шпиндельной бабкой; д — четырехкоординатный, оснащенный двумя 12-позиционными револьверными головками и двумя шпиндельными бабками

ского манипулирования изделиями. Основными стандартизированными узлами (модулями) токарных автоматов фирмы «Etag» являются: станина; суппорты; шпиндельная бабка; грузочный механизм; несущая рама; ограждение рабочей зоны обработки; электрошкафы.

Таким образом основной тенденцией в создании токарных станков с ЧПУ является использование агрегатно-модульного принципа построения из агрегатизированных узлов (рис. 3.9). Узлы станка, такие как салазки, опорная задняя бабка, верхние салазки, приводы шпинделей изделия и стружкоуборочный транспортер можно применять ко всем типам станков. По мере надобности поставляются

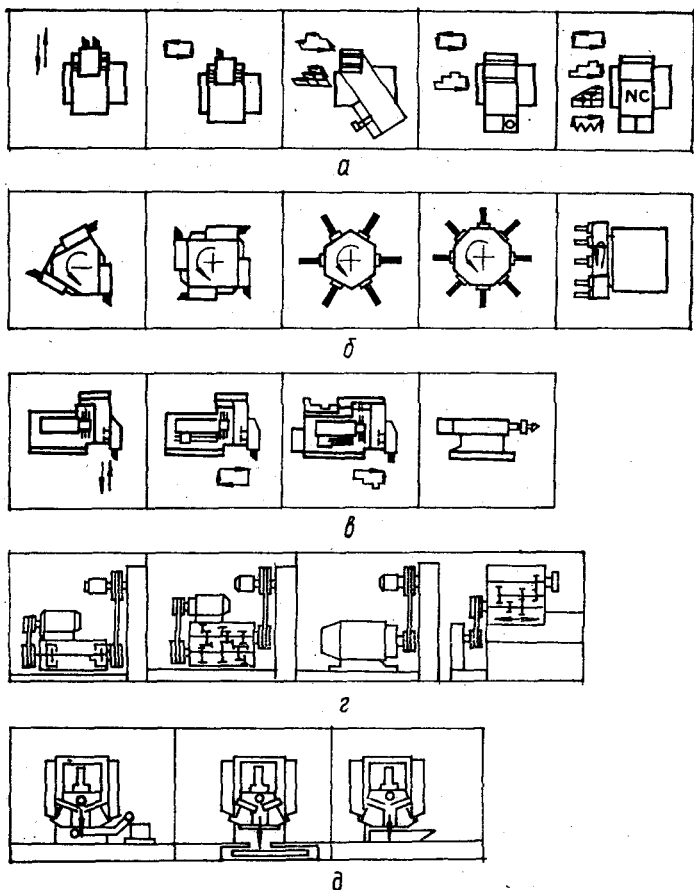


Рис 3.9. Унифицированные узлы (модули) токарных автоматов с ЧПУ фирмы «Etag»:

а — нижние салазки; б — инструментальные системы к ним; в — верхние салазки; г — приводы шпинделей изделий; д — стружкоуборочный транспортер

салазки в левом или правом исполнении, а инструментальные системы — в форме многолезвовой державки или револьверной головки. На двухшпиндельных или четырехшпиндельных автоматах можно пользоваться верхними салазками с двух сторон или только с одной стороны. Благодаря различным исполнениям оснастки обеспечивается экономичность станков при широких технологических возможностях, коротких сроках проектирования и изготовления.

3.3. Особенности построения сверлильных, расточных и фрезерных станков с ЧПУ

Сверлильные станки с ЧПУ изготавливают вертикально сверлильные (например, 2Р118Ф2 и 2Р135Ф3) и радиально-сверлильные. Производительная координатная обработка деталей (типа крышек, фланцев, панелей и др.) без предварительной разметки и применения кондукторов осуществляется за счет применения крестового стола, последовательной работы несколькими инструментами, установленными в револьверных головках, применения многоинструментальных головок, автоматизации позиционирования и работы вдоль оси Z.

В последнее время при использовании сверлильных станков с ЧПУ в ГПС (в условиях средне- и мелкосерийного производства) применяются сменные многшпиндельные головки (СМГ) с устройствами для их накопления (хранения) и автоматической смены, что обеспечивает получение довольно высокой производительности обработки наряду с достижением определенной гибкости при переналадках. В станке системы Хонсберг (рис. 3.10) автоматическая смена головок осуществляется поворотным рычагом за 18 с. СМГ кассетного типа (рис. 3.11) представляют собой корпусные плиты, в отверстиях которых в специальных втулках на подшипниках качения жестко закреплен требуемый на-

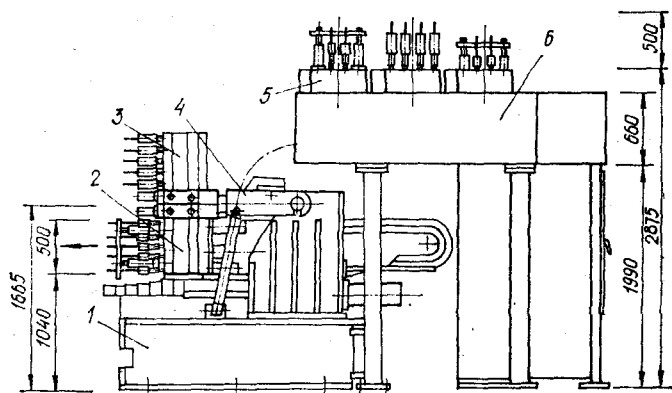


Рис. 3.10. Сверлильный станок с ЧПУ и автоматической сменой многшпиндельных головок:

1 — основание станка; 2 — СМГ в позиции обработки; 3 — СМГ в позиции смены; 4 — поворотный рычаг; 5 — СМГ в магазине; 6 — магазин СМГ (до 10 головок)

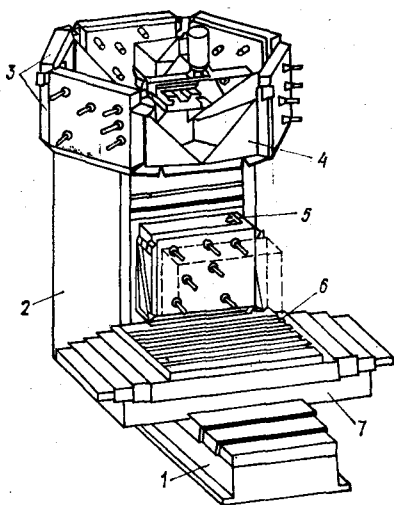


Рис. 3.11. Концепция конструкции сверлильно-расточного станка с ЧПУ и автоматической сменой многошпиндельных головок кассетного типа:

1 — основание; 2 — стойка; 3 — магазин СМГ (на 6 головок); 4 — СМГ в позиции смены; 5 — СМГ в позиции обработки; 6 — рабочий стол с обрабатываемым изделием; 7 — салазки

бор инструментов, т. е. СМГ имеют вид съемной передней насадки одношпиндельного сверлильно-расточного станка. Шпиндельная бабка станка с разъемной передней насадкой в виде СМГ перемещается по направляющим вертикальной стойки. Связь и привод вращения отдельных инструментов в СМГ осуществляется с помощью шарнирных валиков.

Расточные станки с ЧПУ могут быть с горизонтальным и вертикальным расположением шпинделей [31]. Горизонтально-расточные станки (например, 2611Ф2, 2А620Ф2, 2А622Ф2 и др.) имеют рабочий стол с вертикальной осью поворота, фиксирующийся, как минимум, в четырех положениях под углом 90° по командам управляющей программы;

иногда — это четвертая управляемая координата. Кроме автоматизации рабочих перемещений в станках автоматизировано изменение частот шпинделя и подач рабочих органов, зажим и разжим рабочих органов после позиционирования и перед перемещением, включение и выключение охлаждения. Вне автоматизации — смена инструмента. Совершенствование расточных станков идет по пути создания условий для высокопроизводительной обработки за счет большей мощности привода, жесткости и виброустойчивости системы. Направляющие исполнительных устройств делают комбинированными: по основным поверхностям — направляющие скольжения; по боковым — качения. В приводах подач используют приводы постоянного тока, в том числе высокомоментные.

Вертикально-расточные станки (например, 2450АФ2, 2Д450Ф2) в значительной мере повторяют компоновки координатно-расточных станков, имеют три управляемые

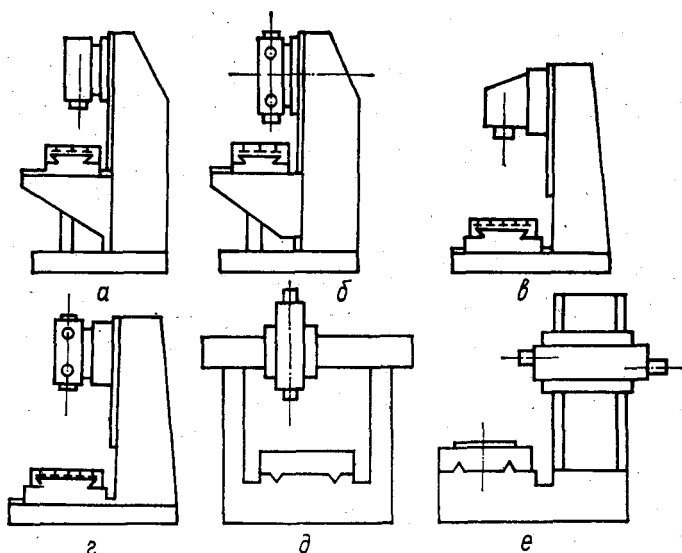


Рис. 3.12. Исполнение фрезерных станков с ЧПУ

координаты. Все подвижные исполнительные органы снабжены гидромеханическими зажимными устройствами, осуществляющими зажим пакетами тарельчатых пружин, а отжим — гидроцилиндром. Фрезерные станки с ЧПУ имеют компоновки вертикально-фрезерных, горизонтально-фрезерных и продольно-фрезерных станков (рис. 3.12). Вертикальные станки делят на консольные (например, 6Р11Ф3, 6Р13Ф3), имеющие меньшую массу и занимающие меньшую площадь в одноинструментальном (рис. 3.12, а) и многоинструментальном, с револьверной головкой (рис. 3.12, б) исполнениях, однако из-за низкой жесткости в варианте с ЧПУ мало перспективны. В бесконсольных станках вертикальное перемещение имеет фрезерная головка, а стол установлен на массивном основании с перемещениями по осям X' и Y' , что обеспечивает высокую жесткость. Бесконсольные станки (например, 6520Ф3) могут быть одноинструментальными (рис. 3.12, в) или с револьверными головками (рис. 3.12, г).

Продольно-фрезерные станки, например, 6М610Ф3 (рис. 3.12, д) чаще всего снабжают неподвижной траверсой, на которой расположена одна вертикальная фрезерная головка (координата Z). В конструкции направляющих этих

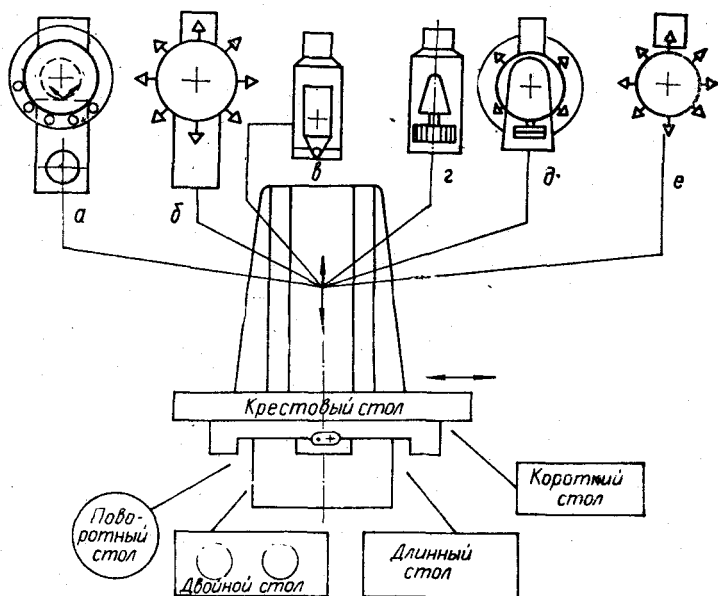


Рис. 3.13. Модификация фрезерного станка с ЧПУ, построенного на принципе агрегатирования узлов (шпиндельной бабки и стола):

а — фрезерно-сверлильный с магазином на 24 инструмента; *б* — специальный с восьмипозиционной револьверной головкой; *в* — двухшпиндельный для торцевого фрезерования; *г* — вертикально-фрезерный для торцевого фрезерования; *д* — вертикально-фрезерный с магазином на шесть инструментов; *е* — сверлильный с револьверной головкой на восемь инструментов

станков применяют направляющие качения. Выбор зазора в приводах подач обеспечивает встречное и попутное фрезерование. Передний конец шпинделя фрезерных станков имеет наружный фланец с посадочной цилиндрической поверхностью и крепежными резьбовыми отверстиями и двумя шпонками по торцу, а также внутреннее коническое отверстие с несамотормозящим конусом 7:24.

На одностоечном продольно-фрезерном станке (рис. 3.12, *е*) обычно встраивают поворотный стол.

Большинство вертикально-фрезерных станков снабжено контурной системой ЧПУ, а продольно-фрезерные — как контурной, так и позиционной, обеспечивающей прямоугольную обработку.

В последнее время с использованием принципа агрегатирования узлов происходит слияние различных групп станков: сверлильных, фрезерных, расточных. Реализация

этого принципа приведена на рис. 3.13. Во всех исполнениях сохраняется крестовый стол, который может быть двух модификаций по длине и оснащен накладным поворотным столом. Предусмотрен также вариант выполнения станка с двумя поворотными столами, позволяющими устанавливать следующую деталь во время обработки предыдущей. Станок может быть с горизонтальным и вертикальным шпинделем.

3.4. Особенности построения зубообрабатывающих станков с ЧПУ

ЧПУ зубообрабатывающими станками стало развиваться позже, чем ЧПУ другими станками. Это обусловлено сложностью синфазности движений механизмов станка при электронных связях между ними, необходимостью управления пятью и более координатами. Только создание микропроцессорных систем ЧПУ позволило снять ограничение по числу управляемых координат, повысить точность станков.

Системы ЧПУ, электронная синхронизация движений и коррекций применяются практически во всех зубообрабатывающих станках: зубофрезерных, зуборезных, зубодолбежных, зубострогальных, зубошлифовальных и даже заточных для изготовления зуборезного инструмента. Из них наибольшее распространение получили зубофрезерные, на которых остановимся подробнее.

Для малых партий обрабатываемых зубчатых колес время наладки зубофрезерного станка сокращается в 5... 8 раз. При использовании системы ЧПУ промышленным роботом для загрузки-разгрузки заготовок, смены инструмента эффект становится еще больше, и применение станков с ЧПУ распространяется уже на области серийного и даже крупносерийного производства. Основные достоинства зубофрезерных станков с ЧПУ: 1) высокая кинематическая точность, особенно в цепи деления, так как исключаются погрешности от упругих отжатий и зазоров; 2) низкие трудоемкости изготовления и сборки станка; 3) низкая металлоемкость.

Применяют два вида структур управления [50]: 1) с ведущей координатой (главный привод), когда датчик ведущей координаты (вращение фрезы) задающий, а скорости всех остальных координат устанавливаются от ЧПУ с использованием сигналов от задающего датчика; в этом слу-

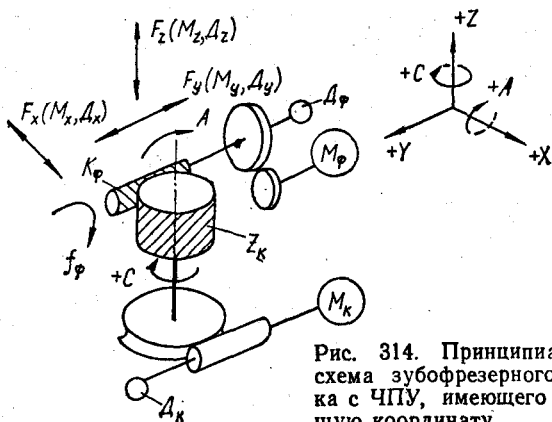


Рис. 314. Принципиальная схема зубофрезерного станка с ЧПУ, имеющего ведущую координату

чае обеспечивается высокая кинематическая точность даже при нестабильной скорости фрезы; 2) без ведущей координаты, когда все движения находятся в равных условиях и управляются от ЧПУ по заданной программе, при этом необходимо обеспечить высокую стабильность скорости перемещений.

Один из первых промышленных образцов зубофрезерных станков с ЧПУ создан фирмой «Pfauter» (ФРГ). Станок работает в пяти координатах (рис. 3.14), а задающая координата — фрезерный шпиндель.

Для сравнения последовательностей импульсов, снимаемых с датчика D_ϕ фрезы (f_ϕ), имеющей привод M_ϕ , и датчика D_κ вращения стола с нарезаемой заготовкой (f_κ), имеющей привод M_κ , пользуются отношением частот:

$$\frac{f_\phi}{f_\kappa} = \frac{z_\kappa}{z_\phi}.$$

Сдвиг сравниваемых частот формирует корректирующий сигнал для управления приводом стола M_κ .

Для нарезания косозубых цилиндрических колес частота импульсов датчика D_ϕ складывается с частотой импульсов датчика D_z осевой подачи F_z или вычитается в зависимости от направления наклона зубьев. Параметры изготавливаемого зубчатого колеса z_κ , β и т. д. и заходность фрезы K_ϕ в качестве заданных величин набираются десятичными переключателями и вводятся в счетно-решающее устройство для вычисления данных по обработке детали. Для радиальных F_x

образователя 6, суммирующего усилителя 7. Выходное напряжение импульсно-аналогового преобразователя (корректирующий сигнал U_k), пропорциональное среднему значению сигнала на его входе, подается на вход суммирующего усилителя и складывается с путевым сигналом привода стола U_s , поступающим от блока управления приводами 8 системы ЧПУ. При отсутствии корректирующего усилителя подается сигнал U_s , управляющий преобразователем 9 двигателя стола 2. Преобразователи 10 и 11 используются для управления двигателями фрезерной каретки 12 и фрезы 14.

Микропроцессор рассчитывает частоту корректирующего сигнала:

$$f_k = \frac{f_\Phi}{M}, \quad (3.9)$$

где f_Φ — частота измерительного преобразователя, установленного на фрезе.

Для прямозубого колеса, с конусным зубом, бочкообразного, червячного (радиальное врезание)

$$M = \frac{z_k}{K_\Phi}, \quad (3.10)$$

для колеса с винтовым зубом

$$M = \frac{z_k T_v}{K_\Phi (T_v \pm F_y)}, \quad (3.11)$$

для червячного колеса (тангенциальное врезание)

$$M = \frac{z_k^2 \pi m}{K_\Phi (\pi m z_k + F_z)}, \quad (3.12)$$

где z_k — число нарезаемых зубьев; m — модуль нарезаемого колеса; K_Φ — число заходов фрезы; F_y , F_z — подача по координатам Y и Z на 1 оборот стола; $T_v = \frac{\pi m z_k}{\sin \beta}$ — шаг винтовой линии нарезаемого колеса (β — угол наклона винтовой линии нарезаемого колеса).

Системы ЧПУ зубообрабатывающими станками требуют разработки специального программного математического обеспечения, которое должно обеспечивать формирование типовых технологических циклов обработки различных зуб-

чатых колес и автоматический расчет параметров настройки. Для таких станков можно рекомендовать отечественные системы ЧПУ моделей 2С85 или «Электроника НЦ80-31».

3.5. Особенности построения шлифовальных станков с ЧПУ

Шлифовальные станки с ЧПУ начинают распространяться, несмотря на трудности их создания [51].

При создании шлифовальных станков с ЧПУ необходимо решать проблемы, связанные: 1) с износом шлифовального круга, что требует автоматической правки по периферии (по торцу, по периферии и торцу), перенастройки механизма правки и автоматической компенсации износа круга; 2) с автоматическим определением контакта шлифовального круга с изделием и применением автоматических врезных устройств; 3) с автоматической загрузкой-разгрузкой обрабатываемых деталей; 4) с автоматическим регулированием процесса шлифования; 5) с автоматической сменой и балансировкой шлифовальных кругов, особенно больших диаметров, требующих соблюдения техники безопасности и высокого качества обработки.

Наибольшее распространение получили круглошлифовальные (ЗМ151Ф2, ЗМ163Ф2Н1В), внутришлифовальные и плоскошлифовальные станки с ЧПУ.

Оснащение ЧПУ для обработки криволинейных поверхностей с прямолинейной образующей позволяет резко повысить производительность обработки, например, контурно-шлифовальный станок МА396ФЗ, по компоновке напоминающий координатно-расточной или бесконсольно-фрезерный с вертикальной осью. В этом станке приводы подач координатных перемещений стола (X' и Y') — шаговые электродвигатели с гидроусилителями, дискретность перемещений 0,001 мм. Станок имеет третью управляемую координату U : перемещение пиноли прибора алмазной правки круга от шагового двигателя с дискретностью 0,002 мм. Автоматическая компенсация износа круга производится командами от устройств ЧПУ.

Задача определения контакта может быть решена двумя принципиально разными путями: компенсацией размера шлифовального круга при правке (тогда место контакта не изменяется, и настраивается один раз для каждого круга) и специальными устройствами.

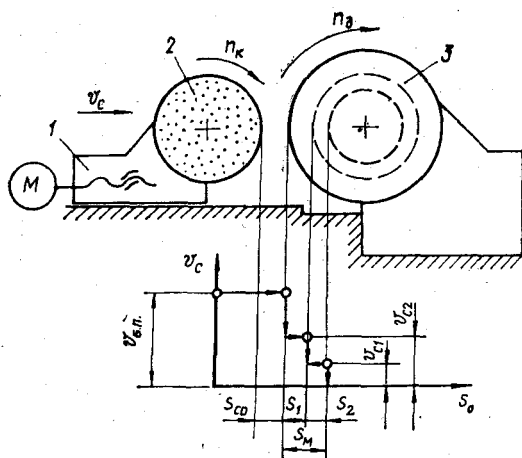


Рис. 3.16. Схема подвода и врезания шлифовального круга в обрабатываемую деталь:

1 — шлифовальная бабка; 2 — шлифовальный круг; 3 — обрабатываемая деталь

Устройства для определения контакта шлифовального круга с изделием выполняют на основе одного из следующих физических принципов: изменение мощности или тока (полной или активной составляющей) электродвигателя привода шлифовального круга; изменение уровня вибрации станка; появление искры, контролируемой фотодатчиком; изменение момента нагрузки на шпинделе шлифовального круга.

Автоматическое регулирование процесса шлифования (рис. 3.16) позволяет резко сократить вспомогательное время, а следовательно, увеличить производительность, исключить прижоги и снизить шероховатость поверхности на этапе выхаживания. Обычно на черновых операциях (участок s_1) $v_{c1} = 0,5 \dots 1,5$ мм/мин (реже $3 \dots 5$ мм/мин), а на отделочных (чистовых — участок s_2) весьма малы ($v_{c2} = 0,005 \dots 0,5$ мм/мин). Поэтому подвод шлифовального круга на рабочих подачах крайне нерационален и его осуществляют на скоростях $v_{6.п}$, в несколько раз превышающих v_{c1} , например, $v_{6.п} = 12$ мм/мин.

Автоматические врезные устройства [24] различают по функциональному назначению; видам металлообработки; характеру формируемых выходных сигналов (команд); точности; содержанию и характеру информации о состоянии процесса врезания.

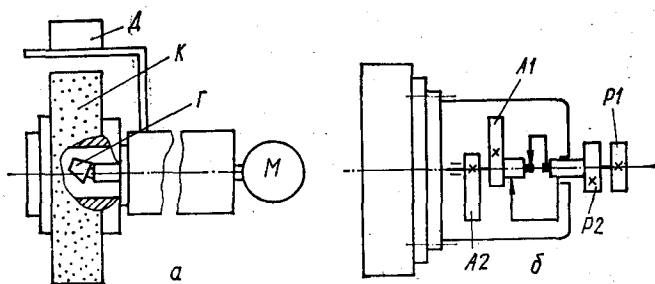


Рис. 3.17. Устройства автоматической балансировки шлифовальных кругов в процессе работы

Современные шлифовальные станки с ЧПУ снабжаются устройствами для автоматической балансировки шлифовального круга и датчиками дисбаланса круга (рис. 3.17).

В устройстве для автоматической балансировки (рис. 3.17, а) имеется регулировочная масса Γ , положение которой можно изменять (наклонять) дистанционно с помощью тяг, приводимых в движение от вспомогательного двигателя M . Кроме того, устройство содержит датчики дисбаланса D , являющиеся датчиками обратной связи, сигнализирующими о качестве балансировки круга K . Балансировка может производиться по командам системы ЧПУ или нажатием кнопки ручного управления.

В станке 3М163Ф2Н1В работа механизма балансировки (рис. 3.17, б) основана на повороте двух корректирующих элементов $A1$ и $A2$ относительно вращающегося круга при остановке попеременно одной из рукояток $P1$ или $P2$, вынесенных на торец механизма. Для наблюдения за уровнем вибраций можно использовать небольшое зеркало, закрепленное на стойке передней опоры шпинделя. При уменьшении вибраций изображение в зеркале из размытого становится четким.

Наметилась тенденция построения шлифовальных станков, ориентированная на агрегатно-модульный принцип. Примером могут служить шлифовальные станки фирмы «Schaudt» (ФРГ), оснащенные системой ЧПУ типа CNC, имеющие наклонную станину и предназначенные для наружного, внутреннего и профильного шлифования. Для обработки коротких деталей используют станки с четырехпозиционной револьверной головкой (рис. 3.18, а), установленной на крестовом суппорте (X, Z) с поворотом в преде-

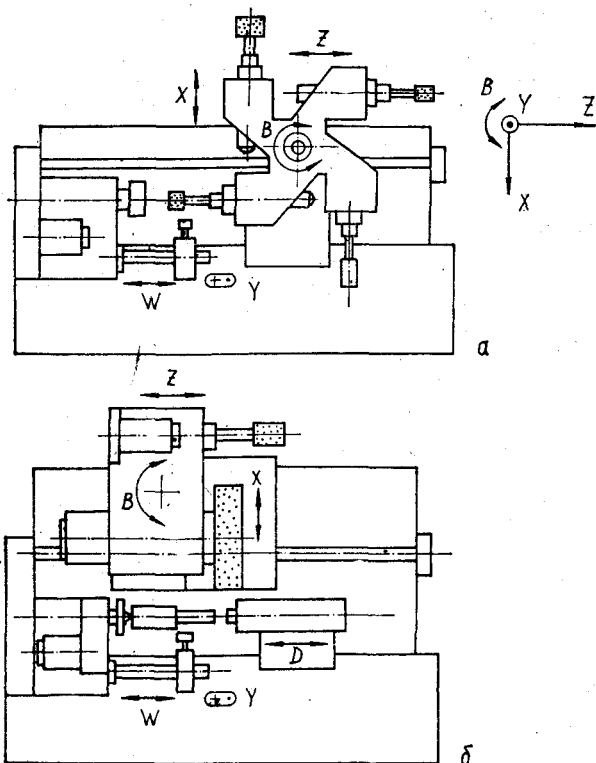


Рис. 3.18. Шлифовальные станки фирмы «Schaudt»:
 а — с четырехпозиционной; б — двухпозиционной револьверными
 головками шлифовальных шпинделей

лах 270° B и снабженной приборами правки, люнетом и смены измерительных роликов (W , Y); для деталей типа валов — с двухпозиционной головкой (рис. 3.18, б) и дополнительной координатой (D) для задней бабки.

3.6. Принципы построения многооперационных станков для плоских и корпусных деталей

Развитие и совершенствование конструкций станков с ЧПУ привело к появлению многооперационных станков (МОС), которые объединили в себе эксплуатационные качества целого ряда станков обычного исполнения. На этих

станках, оснащенных устройством автоматической смены инструментов, можно осуществлять различные операции, в том числе фрезерование, сверление, растачивание, нарезание резьб, развертывание и т. д.

Основные особенности МОС: 1) автоматизация всего цикла обработки; 2) наличие большого числа инструментов (до 100 и более); 3) быстроедействие при выполнении вспомогательных команд и холостых перемещений, повышение доли основного времени в операционном; 4) повышенная точность обработки; 5) возможность быстрой переналадки; 6) высокая степень универсальности.

По конструктивному оформлению и компоновкам МОС различны. МОС чаще имеют один шпиндель и магазин инструментов или револьверную головку. Инструменты используют последовательно. МОС (как и другие станки с ЧПУ) имеют управляемые координаты, минимальное количество которых равно трем. Первоначально МОС проектировали на базе имеющихся расточных и фрезерных станков, поэтому в их конструкции сохранилось некоторое сходство с рядом универсальных станков.

В последнее время чаще проектируют МОС с горизонтальным расположением шпинделя, что приближает их к горизонтально-расточным станкам. Однако практически существенным изменениям подвергались все узлы.

Магазины инструментов МОС по конструктивному оформлению разнообразны. Они могут располагаться на шпиндельной бабке, на колонне или станине, на столе станка или даже вне станка.

Компоновки МОС весьма разнообразны (рис. 3.19) [2, 31, 35]. Многие из них сохранили внешние черты и особенности компоновок универсальных станков при существенном изменении всех основных узлов и механизмов. МОС компонуются по типу вертикальных координатно-сверлильных (243ВФ4, рис. 3.19, а), горизонтально-фрезерных (рис. 3.19, б), вертикально-фрезерных (6Р11МФЗВ, рис. 3.19, в), горизонтально-расточных (ИР500МФ4, 6305Ф4 2623ПМФ4, рис. 3.19, д, е) и др. Большая их часть имеет одностоечную компоновку с подвижным бесконсольным крестовым столом, отличающимся высокой жесткостью и точностью перемещений. Могут быть МОС порталного, двухстоечного исполнения (6560МФЗ, рис. 3.19, г).

Для повышения жесткости и виброустойчивости МОС при снижении трудоемкости изготовления, сокращения

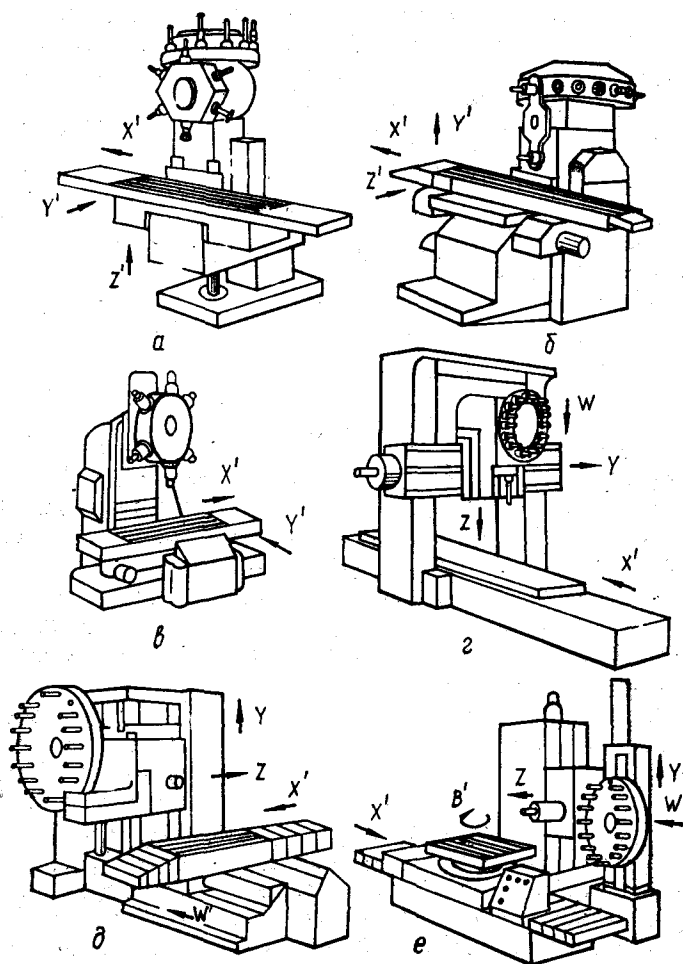


Рис. 3.19. Компонки многооперационных станков

сроков проектирования целесообразно учитывать следующее:

1. 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

A			
0111	1011	1101	1110
0111	1011	1101	1110
0111	1011	1101	1110
0111	1011	1101	1110
0111	1011	1101	1110
0111	1011	1101	1110
a			
H		V	
0ZXY	ZOXY	ZXOY	ZXYO
0XZY	XOZY	XZOY	XZYO
0XYZ	XOYZ	XYOZ	XYZO
0ZYX	ZOYX	ZYOX	ZYXO
0YZX	YOZX	YZOX	YZXO
0YXZ	YOXZ	YXOZ	YXZO
δ		Y-1	δ Z-1

Рис. 3.20. Структурные формулы возможных компоновок МОС

детали и требований технологического процесса. Так, например, при четырех блоках (1 — неподвижный, 3 — подвижных) возможное число компоновок соответствует числу перестановок $P_4^1 = 4! = 24$ (рис. 3.20).

2. Вертикальные перемещения сообщаются более легкому блоку, что вызывает меньшие изменения центра тяжести. В вертикально-фрезерных станках вертикальные перемещения сообщают блоку с инструментальным шпинделем, если он не нагружен коробкой скоростей и магазином.

3. Блок, несущий шпиндель и совершающий главное движение, желательно располагать на стационарном блоке или на блоке, движущемся по этому звену (для лучшей виброустойчивости и теплообмена).

4. Блок, осуществляющий наибольшее перемещение, желательно располагать на неподвижном блоке и не в крайних положениях.

5. При установке станка в автоматическую станочную систему обрабатываемые детали желательно располагать на неподвижном блоке, т. е. на крайнем звене.

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

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

При проектировании МОС все чаще применяют математические методы изыскания более рациональных конструкций с использованием математической логики [2, 13].

Приведем пример [34], который не может служить образцом для реального проектирования, так как в нем учтено недостаточное число формализуемых требований, но методика может быть использована, в том числе с применением ЭВМ. В табл. 3.1 приведены требования к компоновке из задания (колонка 2). Сетка для матриц (колонка 4) содержит 24 ячейки по числу возможных вариантов для вертикальных компоновок. В соответствии с обозначениями, принятыми в математической логике, в матрице (рис. 3.20, а), заменяющей две следующие, следует считать для горизонтальной компоновки $Y = 1$, причем знак равенства — это знак соответствия: $X + Z = 1 = \bar{Y}$, т. е. $\bar{1}$ — соответствует или X или Z , так как «+» означает «или» и «1» означает не $Y = 1$ (рис. 3.20, б). Эта матрица (рис. 3.20, а) справедлива и для вертикальных компоновок (рис. 3.20, в), но при этом принимается $Z = 1$, тогда $X + Y = \bar{1} = Z$.

В табл. 3.2 сведены данные для каждого разряда и каждого блока. В данном случае приоритетной является компоновка $YXOZ$.

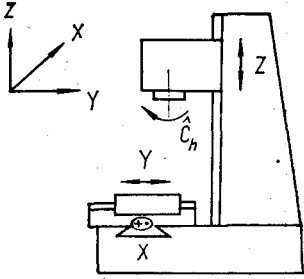
Могут быть предложены и другие методы определения целесообразной компоновки с использованием математической алгебры логики, в частности, с применением метода пересечения множеств. Совершенно очевидно, что выбор компоновок с помощью указанных методов не освобождает от необходимости проведения сравнительных расчетов различных компоновок на жесткость, виброустойчивость, податливость после того, как выясняются возможные «вылеты» инструментов, подвижных узлов станка, конструкция и размеры направляющих и др. Для выбора варианта по неформализуемым требованиям можно использовать метод экспертных оценок [29].

Для распространенных МОС на базе фрезерно-сверильной группы основная рабочая площадь стола $B \times L$, дли-

3.1. Требования к компоновке МОС

Требование	Желательное расположение блоков	Алгоритм	Матрица компоновки																								
Устойчивость и жесткость шпиндельного узла	Блок со шпиндельным узлом, несущим вращающуюся фрезу, имеет не более одного перемещения	0000	1 <table><tr><td></td><td></td><td>ZXOY</td></tr><tr><td></td><td></td><td>XZOY</td></tr><tr><td></td><td></td><td>XYOZ</td></tr><tr><td></td><td></td><td>ZYOX</td></tr><tr><td></td><td></td><td>YZOX</td></tr><tr><td></td><td></td><td>YXOZ</td></tr></table>			ZXOY			XZOY			XYOZ			ZYOX			YZOX			YXOZ						
		ZXOY																									
		XZOY																									
		XYOZ																									
		ZYOX																									
		YZOX																									
		YXOZ																									
Устойчивость и жесткость системы блоков, совершающих поступательное перемещение (движения подачи)	Блоки, имеющие небольшие перемещения, располагаются ближе к неподвижному звену. В данном случае наибольшие и наименьшие перемещения должны сообщаться блоком	YŶOŶ	2 <table><tr><td></td><td></td><td>YOXZ</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td>YZOX</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td></tr></table>			YOXZ									YZOX												
		YOXZ																									
		YZOX																									
Удобство автоматической смены инструментов (АСИ)	Шпиндельный блок только аксиально подвижен или неподвижен	ZZOZ + + 0000	3 <table><tr><td></td><td></td><td>YXOZ</td><td>YXZO</td></tr><tr><td></td><td></td><td>XYOZ</td><td>XYZO</td></tr><tr><td></td><td></td><td>XZOY</td><td>XZYO</td></tr><tr><td></td><td></td><td>YZXO</td><td>YZXO</td></tr><tr><td></td><td></td><td>ZYXY</td><td>ZYXY</td></tr><tr><td></td><td></td><td>ZXYO</td><td>ZXYO</td></tr></table>			YXOZ	YXZO			XYOZ	XYZO			XZOY	XZYO			YZXO	YZXO			ZYXY	ZYXY			ZXYO	ZXYO
		YXOZ	YXZO																								
		XYOZ	XYZO																								
		XZOY	XZYO																								
		YZXO	YZXO																								
		ZYXY	ZYXY																								
		ZXYO	ZXYO																								

3.2. Сводные данные к табл. 3.1

N	Разряды				Тождество
	$\bar{0}$	$\bar{0}$	0	$\bar{0}$	
1	$\bar{0}$	$\bar{0}$	0	$\bar{0}$	$\bar{0} = X + Y + Z$
2	Y	$\bar{Y}$	0	$\bar{Y}$	$\bar{Y} = X + Z$
3	$\bar{Z}$ $\bar{0}$	$\bar{Z}$ $\bar{0}$	0 0	Z $\bar{0}$	$\bar{Z} = X + Y$ $\bar{0} = X + Y + Z$
Блок	Числовой приоритет				Приоритетная компоновка
Z	2	3	1	3	
0	0	0	3	1	
X	3	4	1	2	
Y	4	3	1	1	

на перемещений — по координатам X , Y , Z . Произведение $X \times Y \times Z$ определяет рабочую зону. При подвижном столе рабочая зона перемещается в пределах рабочего пространства. Так, для бесконсольной компоновки $XUOZ$ рабочее пространство измеряется произведением $2X \times 2Y \times Z$.

В большинстве случаев размеры координатных перемещений соответствуют следующим соотношениям: $X = (0,8 \dots 0,9)L$; $Y = B$; $Z = B$. В зависимости от B , мм, ориентировочно рекомендуется классификация МОС на следующие группы: малые $B = 250 \dots 400$; средние $B = 500 \dots 800$; крупные $B = 1000 \dots 1600$; тяжелые $B > 2000$.

Наибольшее распространение получили МОС вертикальной компоновки $B = 300 \dots 1250$ мм; $L = 750 \dots 2500$ мм, а при горизонтальной компоновке с $B = 300 \dots 1000$ мм; $L = 700 \dots 2000$ мм.

Чаще у МОС рабочая зона формы «куб» для горизонтальной компоновки.

Наибольший диаметр применяемого инструмента в среднем составляет $D_{\max} \approx 0,21 B$ (вертикальные МОС) и $D_{\max} \approx 0,17 B$ (горизонтальные МОС).

Модульный принцип компоновки позволяет существенно уменьшить конструктивное и размерное многообразие МОС (из ограниченного набора унифицированных узлов).

Агрегатная станочная система — совокупность унифицированных узлов (материальное обеспечение), необходимых для построения станков, и логического обеспечения, осуществляющего связь между входными (параметры обрабатываемых деталей и условий производства) и выходными (параметры станков) характеристиками системы.

Кроме структурных формул компоновок [13] для МОС, как и других станков с ЧПУ, построенных на модульном принципе, удобно использовать конструктивный код, пригодный для обработки данных на ЭВМ [2]. Для этого в формулу структуры компоновки вводятся дополнительные данные. Кроме координат, вдоль которых перемещаются подвижные узлы (рис. 3.21), обозначаются номера координатных плоскостей, в которых расположены основные грани направляющих, обеспечивающих заданное перемещение узлов (1 — плоскость XOY ; 2 — XOZ ; 3 — YOZ). Номером 4 обозначают наклонное исполнение, а 5 — цилиндрические направляющие. Номер координатной плоскости неподвижного стыка обозначается в соответствии с плоскостью основных граней направляющих. Плоскость расположения зеркала стола для заготовки обозначается как неподвижный блок и должна предшествовать обозначению координаты, вдоль которой перемещается узел, несущий обрабатываемую деталь. Вращение шпинделя в плоскости обозначается большими буквами: CH — горизонтальное, CV — вертикальное.

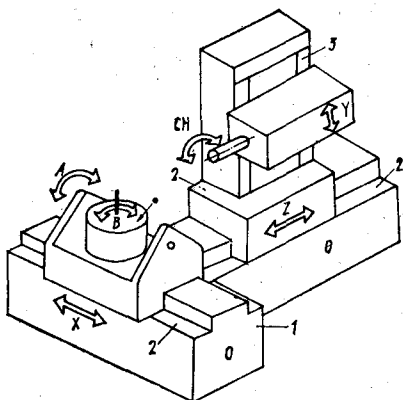


Рис. 3.21. Компоновка МОС по конструктивному коду 02BAK2010202Y3CH

Наметилась тенденция создания МОС на базе координатно-шлифовальных станков с устройствами автоматической смены шлифовальных шпинделей (S3 — CN 311 — АТС фирмы «Hauser» — Швейцария).

3.7. Особенности построения многооперационных станков для тел вращения

Токарные МОС получают широкое распространение, так как более 70 % деталей, обрабатываемых на токарных станках, требуют вторичной обработки: фрезерование, сверление, нарезание резьб на торцевой и цилиндрической поверхностях и т. д.

При создании и компоновке МОС для тел вращения необходимо учитывать следующие факторы: 1) возможность совмещения различных операций при вращающемся, невращающемся и позиционируемом (с фиксированным остановом) шпинделе; 2) возможность обработки деталей с двух сторон при обработке их из прутка или штучных заготовок; 3) наличие автоматической смены инструмента — вращающегося и невращающегося; 4) наличие многокоординатных систем ЧПУ; 5) наличие автоматического манипулирования заготовками.

Основные требования к построению МОС для тел вращения: 1) модульный принцип компоновки — как основной; 2) возможность стыковки станка с системой ЧПУ и другими станками при встраивании в станочные системы; 3) автоматизация всего цикла обработки (формообразование, изменение режимов, выполнение вспомогательных команд, диагностика и т.д.); 4) многоинструментальность при последовательном и параллельном введении режущих инструментов в работу; 5) быстрдействие выполнения холостых ходов; 6) наличие устройств дробления и удобство отвода стружки из рабочей зоны; 7) обеспечение повышенной жесткости узлов и точности позиционирования рабочих органов; 8) возможность открытого доступа к рабочей зоне с различных сторон, особенно при стыковке с загрузочно-разгрузочными устройствами; 9) наличие автоматической смены зажимных элементов или патронов, быстрота переналадки их на другой размер заготовки (по диаметру, длине, форме поперечного сечения).

МОС для тел вращения создаются на базе: многорезцово-копировальных станков; токарно-револьверных станков;

токарных автоматов; карусельных станков; шлифовальных станков для круглого и внутреннего шлифования.

Рассмотрим некоторые компоновки и особенности конструкции МОС для деталей типа тел вращения.

МОС ТМЦ-200 Московского ПО «Станкостроительный завод им. Серго Орджоникидзе» [13] предназначен для обработки деталей с закреплением их в патроне и в центрах. Станок оснащен крестовым суппортом с размещенной на нем инструментальной головкой. На базовые V-образные поверхности головки можно устанавливать блоки с неподвижными и вращающимися инструментами. Станок снабжен цепным магазином на 16 блоков инструментов, автооператором для смены инструментальных блоков, управляемым гидроцилиндрами, транспортером для уборки стружки и универсальной системой ЧПУ «Размер-2М-1300».

На рис. 3.22, а приведена компоновка МОС патронного исполнения (для штучных коротких заготовок) «Торн-12» фирмы «Керней-Треккер» (США) с формулой структуры его $\hat{C}_h^{03} Z^3 \times O^M Y^3 a^1 \hat{D}_{v,h}^0$ [13]. В этом станке шпиндель $\hat{C}_h$ имеет осевое перемещение вместе с бабкой Z , а суппорт Y — радиальное. Поворотная головка суппорта a устанавливает инструментальный шпиндель $\hat{D}_{v,h}$ в вертикальное либо горизонтальное положение. Станок имеет автоматическое устройство смены инструментов из магазина и смены патронов с деталями, может выполнять операции точения, фрезерования, сверления, нарезания резьбы и др. Для этого главный шпиндель работает в различных режимах, а вместо инструментального шпинделя может применяться резцедержатель.

МОС токарного типа LM70-AT фирмы «Окума» (рис. 3.22, б) имеет шпиндельную бабку с коробкой скоростей, передвигающуюся для установочных перемещений в вертикальном направлении по стойке. Имеется револьверный узел 2, поворачивающийся вокруг вертикальной оси и перемещающийся с крестовым суппортом параллельно Z и перпендикулярно X оси шпинделя. На корпусе этого узла размещена револьверная головка 1 с восемью невращающимися инструментами, поворачивающаяся вокруг горизонтальной оси. Вокруг этой же оси поворачивается головка 4 с вращающимся шпинделем, смена инструмента в котором происходит простым автооператором из магазина 3 с десятью инструментами. Станок оснащен системой «Fanuc-3000C».

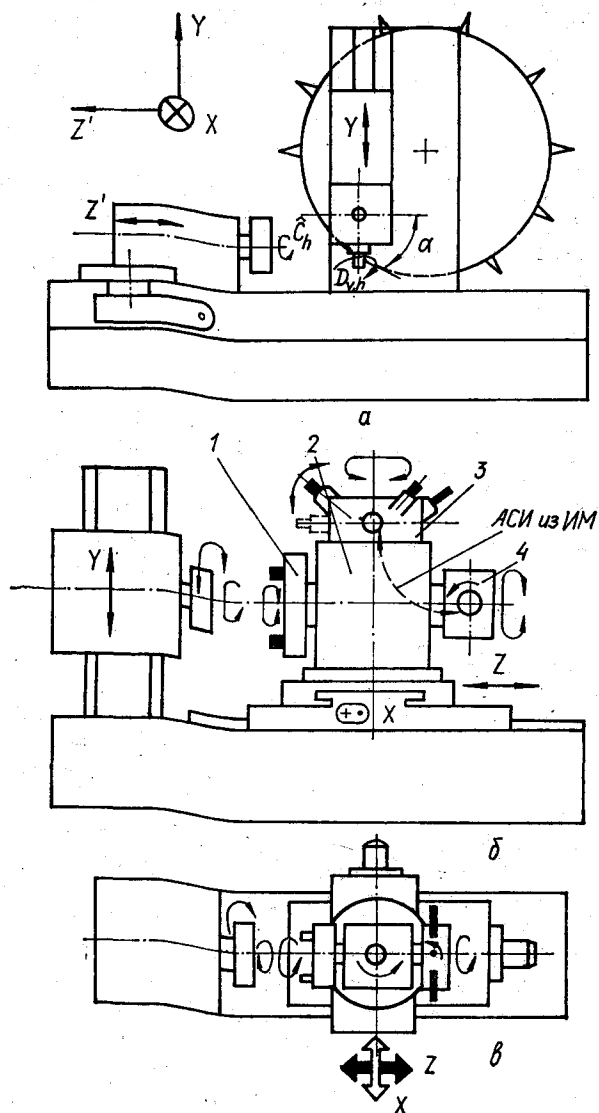


Рис. 3.22. Компоновки МОС для тел вращения на базе токарных станков:

а — фирмы «Торн-12» (США); б — фирмы «Окума» (Япония); в — фирмы «Икегай Айрон-Уоркс» (Япония)

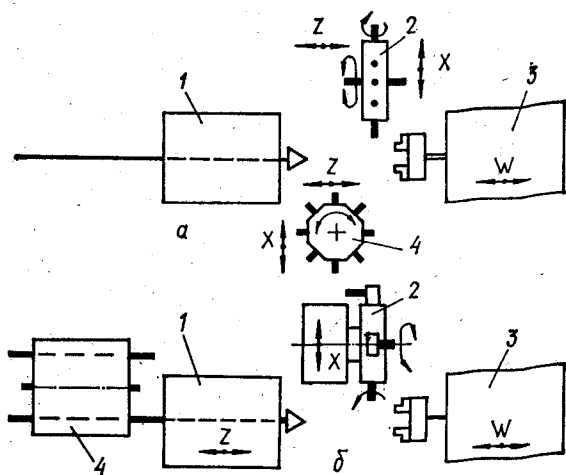


Рис. 3.23. Схемы и компоновки МОС для тел вращения на базе:

а — токарно-револьверных станков; б — одношпиндельных токарно-револьверных автоматов

Почти аналогичная компоновка у МОС фирмы «Икэ-гай Айрон Уоркс», Япония (рис. 3.22, в). Станок оснащен трехкоординатным устройством ЧПУ «Fanuc-240C».

Бердичевский станкостроительный завод «Комсомолец» разработал на базе токарно-револьверного станка 1В340Ф30 МОС (рис. 3.23, а) с двумя шпиндельными бабками (одна неподвижная 1 для прутковых заготовок, вторая — подвижная 3 для обработки штучных заготовок с противоположной стороны). Бабку 1 обслуживает револьверная головка 4, установленная на крестовом суппорте и оснащенная невращающимся инструментом, а бабку 3, захватывающую отрезаемую из прутка деталь в бабке 1, — револьверная головка 2 с вращающимся инструментом, установленная также на крестовом суппорте. МОС (рис. 3.23, б) трех типоразмеров (диаметры прутков 25, 40, 50 мм) и четырех модификаций по оснащению рабочими органами созданы на базе одношпиндельных токарно-револьверных автоматов, но с наклонной станиной (11Б40Ф4). В этих станках две бабки 1 и 3 подвижные (координаты Z и W), а револьверная головка 2 с трех сторон снабжена вращающимся и невращающимся инструментом. Левая бабка 1 оснащена дополнительным механизмом зажима

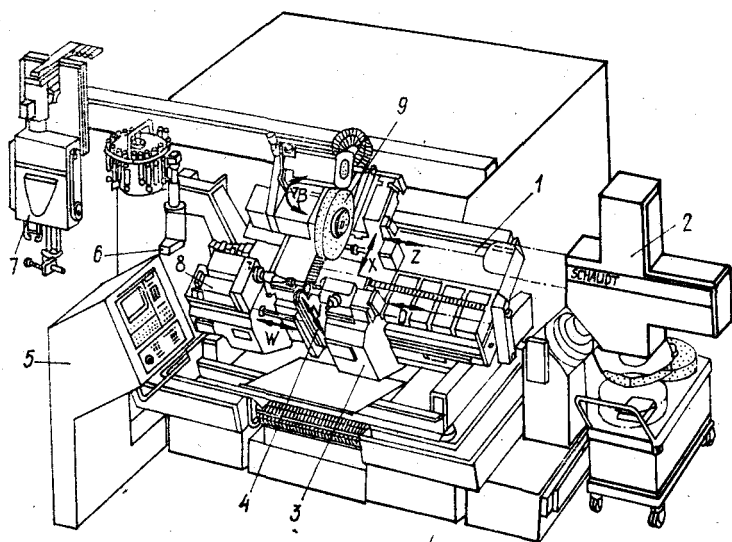


Рис. 3.24. Гибкий шлифовальный модуль фирмы «Schaudt» с наклонной станиной для наружного, внутреннего и профильного шлифования за один установ

прутка, расположенным между опорами шпинделя, и барабаном 4 для автоматической загрузки прутков, а правая бабка 3 — выгалькивателем для сброса полностью обработанной детали в улавливатель. Система ЧПУ — 2У32 типа CNC обеспечивает оперативный ввод программы непосредственно на станке с помощью кнопочного пульта или перфоленты.

МОС, построенные по модульному принципу на базе внутришлифовальных станков, обеспечивают обработку нескольких диаметров и поверхностей за один установ, что позволяет сократить время на наладку и снизить влияние неточности изготовления зажимных патронов.

МОС 600 фирмы «Voumard» (Швейцария) снабжен двухшпиндельной револьверной головкой с возможностью поворота на 180° . Рядом со станком предусмотрена позиция для размещения набора сменных кругов. Эти наборы закодированы так, что система ЧПУ при установке требуемого набора автоматически выбирает соответствующие циклы правки и шлифования. Наличие автоматической смены инструмента с автоматической правкой кругов (на 12 оправок) автоматического устройства загрузки деталей и позиции

послеоперационного контроля позволяет использовать этот станок при работе по «безлюдной технологии». Станки серии FM фирмы «Fortuna» построены также по модульному принципу, что позволяет компоновать из двух направляющих, четырех бабок изделий и трех шлифовальных шпинделей до восьми базовых модулей.

В шлифовальных станках с ЧПУ смена шлифовального круга требует больших затрат времени. В МОС фирмы «Schaudt» (рис. 3.24) предусмотрена автоматическая смена шлифовального круга (для наружного шлифования). Для этого узел шлифования 9 на крестовом суппорте подводится к правому внешнему ребру наклонной станины 1 и с помощью приспособления 2 производится автоматическая смена. Кроме того, возможна автоматическая смена из магазина (на 24 головки) шлифовальных головок с помощью приспособления 6 (с левой стороны станины). Для автоматической смены изделий, закрепленных в передней 8 и задней 3 бабках, предназначен управляемый порталый загрузчик 7. В зависимости от модификации станок оборудован системой ЧПУ 5 (Siemens 810 до 4 осей либо Siemens 850 до 15 осей). Замеры диаметров и длин производятся устройством 4 в ходе процесса обработки деталей в любом месте (координата W). Для поддержки длинных деталей используются следящий люнет и задняя бабка 3.

3.8. Принципы построения и расчет числа позиций многопозиционных станков с ЧПУ

Важнейшим источником получения технико-экономического эффекта при создании автоматизированного оборудования является совмещение операций за счет основного принципа концентрации операций — объединения составных частей дифференцированного технологического процесса в одном многопозиционном станке.

Концентрация операций за счет объединения отдельных рабочих позиций может производиться «вдоль» (рис. 3.25, а) «поперек» (рис. 3.25, б) технологического потока или «комбинированно» (рис. 3.25, в).

Таким образом, основной принцип построения многопозиционных станков заключается в том, что в них концентрируются или разноименные q операции (последовательное действие), или одноименные p операции (параллельное действие), или и те, и другие операции (последовательно-параллельное действие) технологического процесса.

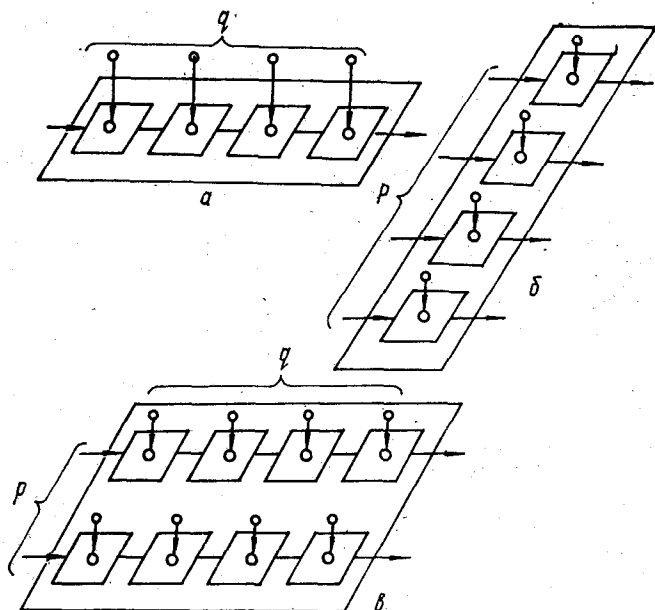


Рис. 3.25. Структурно-компоновочные варианты многопозиционных станков различного действия

Любой многопозиционный станок может быть построен по всем трем схемам. Например, шестишпиндельный токарный автомат ($z = qp = 6$) может иметь 4 разных исполнения: 1) $q = 6$, $p = 1$; 2) $q = 3$, $p = 2$; 3) $q = 2$, $p = 3$; 4) $q = 1$, $p = 6$. Число возможных вариантов возрастает с увеличением числа позиций z .

В многопозиционных станках последовательного действия время обработки в каждой позиции должно быть примерно одинаковым, так как время цикла определяется лимитирующей (самой длительной) операцией в одной из позиций станка, т. е. $T_{\text{ц}} = t_{\text{р max}} + t_{\text{x}}$. Поэтому надо, чтобы $t_{\text{р max}} \rightarrow \min$, а $t_{\text{р}} = t_{\text{р0}}/q$.

В многопозиционных станках параллельного действия одноименные операции во всех позициях могут выполняться не одновременно, а со сдвигом по времени, например, при обработке штучных заготовок.

Для установления зависимости производительности многопозиционного станка последовательного действия Q_q от числа позиций q необходимо определить, как изменяются

составляющие времени, входящие в формулу производительности однопозиционного станка:

$$Q_1 = \frac{1}{t_{p0} + t_{x0} + \Sigma C_i + t_e}, \quad (3.13)$$

где t_{p0} — суммарное время технологического воздействия согласно принятому технологическому процессу; t_{x0} — время несовмещенных холостых ходов (загрузка и сьем, зажим-разжим, подвод-отвод режущего инструмента ΣC_i — потери (по инструменту) одного комплекта инструмента; t_e — потери (по оборудованию) одного комплекта механизмов устройств (внецикловые потери одного комплекта механизмов); $\Sigma C_i + t_e = \Sigma t_n$ — собственные внецикловые потери однопозиционного станка.

Итак, в многопозиционном станке время обработки в одной позиции при равномерной дифференциации технологического процесса будет $t_p = t_{p0}/q$; время холостого хода не зависит от q и определяется динамическими характеристиками, т. е. $t_x = t_{x0}$; собственные потери в i -й позиции будут $t_{ni} = \Sigma C_i/q + t_e$, потому что в i -й позиции имеется $1/q$ часть инструмента. Так как отказ любой позиции приводит к остановке всего станка, то его собственные внецикловые потери $\Sigma_n = t_{ni}q = \Sigma C_i + t_e q$. Графики зависимости всех составляющих затрат времени от числа рабочих позиций q приведены на рис. 3.26.

Таким образом, с учетом длительности рабочего цикла $T_n = \frac{t_{p0}}{q} + t_x$ и собственных внецикловых потерь Σt_n , получим формулу производительности многопозиционного станка последовательного действия:

$$Q_q = \frac{1}{T_n + \Sigma t_n} = \frac{1}{t_{p0}/q + t_x + \Sigma C_i + q t_e}. \quad (3.14)$$

Производительность Q_q является функцией технологических t_{p0} , конструктивных t_x , структурных q параметров и показателей надежности в работе (ΣC_i и $t_e = \omega \vartheta_{cd}$, где

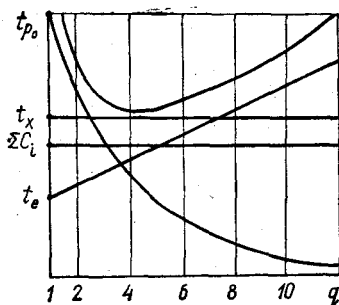


Рис. 3.26. Зависимости рабочих t_{p0} , холостых t_x и внецикловых (t_i , ΣC_i) потерь времени многопозиционного станка от числа рабочих позиций q

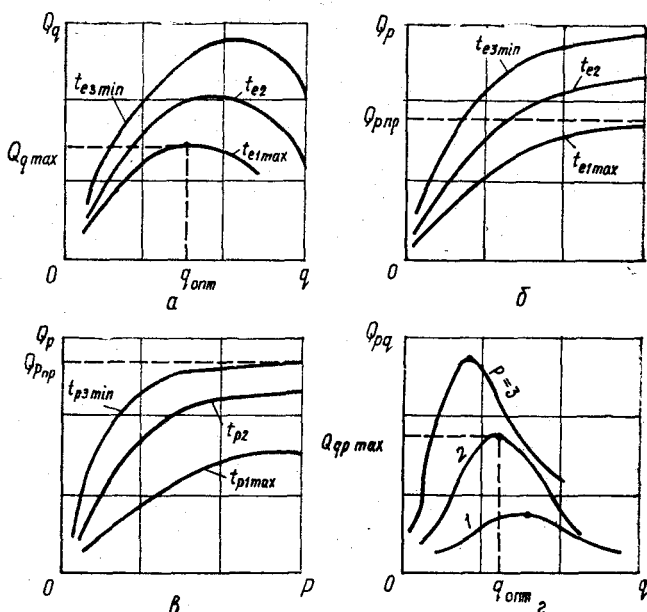


Рис. 3.27. Зависимости производительности Q_q , Q_p , и Q_{pq} от числа рабочих позиций станка

$\omega = \frac{1}{m_{cp}}$ — параметр потока отказов; m_{cp} — среднее время безотказной работы; ϑ_{cp} — среднее время обнаружения и устранения отказа, характеризующее ремонтпригодность). Графики Q_q от q при $t_{e1} < t_{e2} < t_{e3}$ (рис. 3.27, а) носят экстремальный характер. Поэтому, взяв первую производную $\frac{dQ_q}{dq}$ и приравняв ее к нулю, получим для Q_{qmax} оптимальное число позиций:

$$q_{opt} \sqrt{t_{p0}/t_e} = \sqrt{t_{p0}/\omega \vartheta_{cp}}. \quad (3.15)$$

Оптимальное число позиций зависит от двух факторов: общей длительности несовмещенных операций t_{p0} ; уровня надежности механизмов и устройств, их безотказности и ремонтпригодности.

В многопозиционном станке параллельного действия находятся p комплектов одинаковых механизмов и инструментов, имеющих собственные внецикловые потери $\Sigma C_i + t_e$; если при каждом отказе останавливается весь станок,

собственные внецикловые потери будут $\Sigma t_n = p (\Sigma C_i + t_e)$.

Анализ выгодного количества позиций p следует проводить из формулы производительности

$$Q_p = \frac{p}{t_{p0} + t_x + \Sigma t_n} = \frac{p}{t_{p0} + t_x + p (\Sigma C_i + t_e)} \quad (3.16)$$

Как видно из рис. 3.27, б, в зависимости производительности Q_p от числа позиций p при различных потерях ($t_{e1} > t_{e2} > t_{e3}$) и длительностях обработки ($t_{p1} > t_{p2} > t_{p3}$) имеют монотонно возрастающий характер, асимптотически приближаясь к некоторому пределу $Q_{p. пр.}$.

Так, например, для конкретной детали

$$Q_{p. пр} = Q_{\max} = \lim Q_p = \frac{1}{\Sigma C_i + t_e}. \quad (3.17)$$

Монотонное увеличение производительности Q_p с ростом p не целесообразно при создании станков с весьма большим числом позиций, так как увеличение числа позиций p приводит к росту конструктивной сложности и стоимости. Следовательно, в каждом случае имеется экономически оптимальное число позиций по критериям минимальной себестоимости эксплуатации, максимальной производительности труда и т. д.

По заданной производительности, определяемой по общей формуле $Q_p = (p/T_u) \eta_{исп}$, ориентировочно (с округлением в большую сторону) находят число позиций

$$p = \frac{Q_{p. пр} T_u}{\eta_{исп}}, \quad (3.18)$$

где $Q_{p. пр}$ — предельная теоретическая производительность; $\eta_{исп}$ — коэффициент использования станка.

Следует отметить, что многие реальные конструкции станков параллельного действия, в том числе роторные и конвейерные машины, обладают свойством живучести: при отказе механизма или инструмента в какой-либо позиции станок не останавливается, а лишь отключается от питания заготовками отказавшая позиция. В результате производительность может быть повышена на 10...15 %. Многопозиционные станки параллельного действия получают все большее распространение в машиностроении.

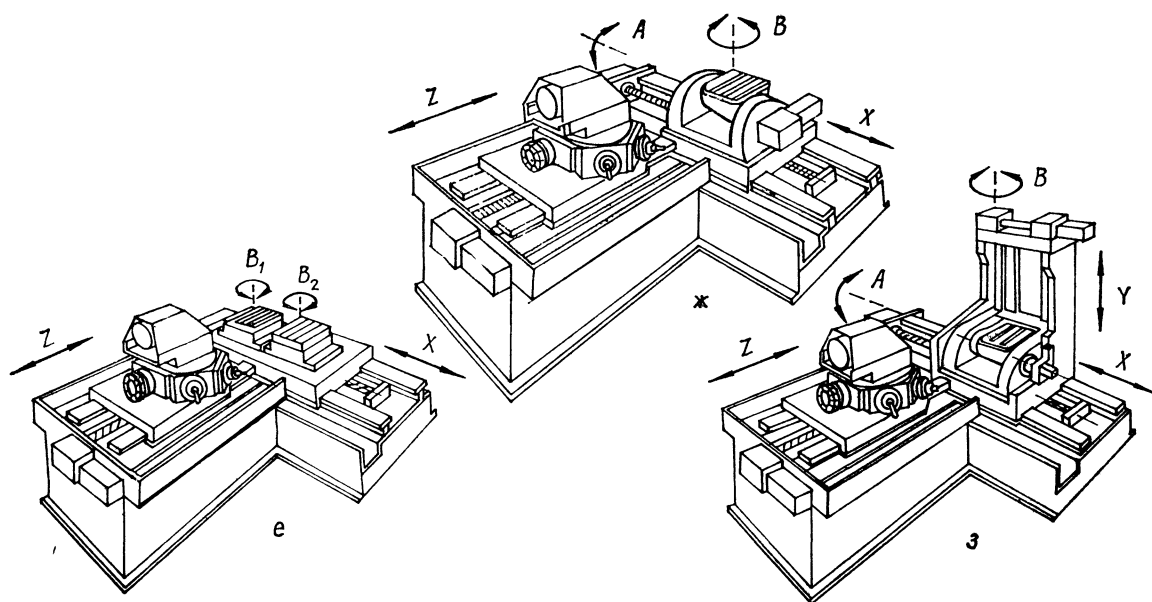
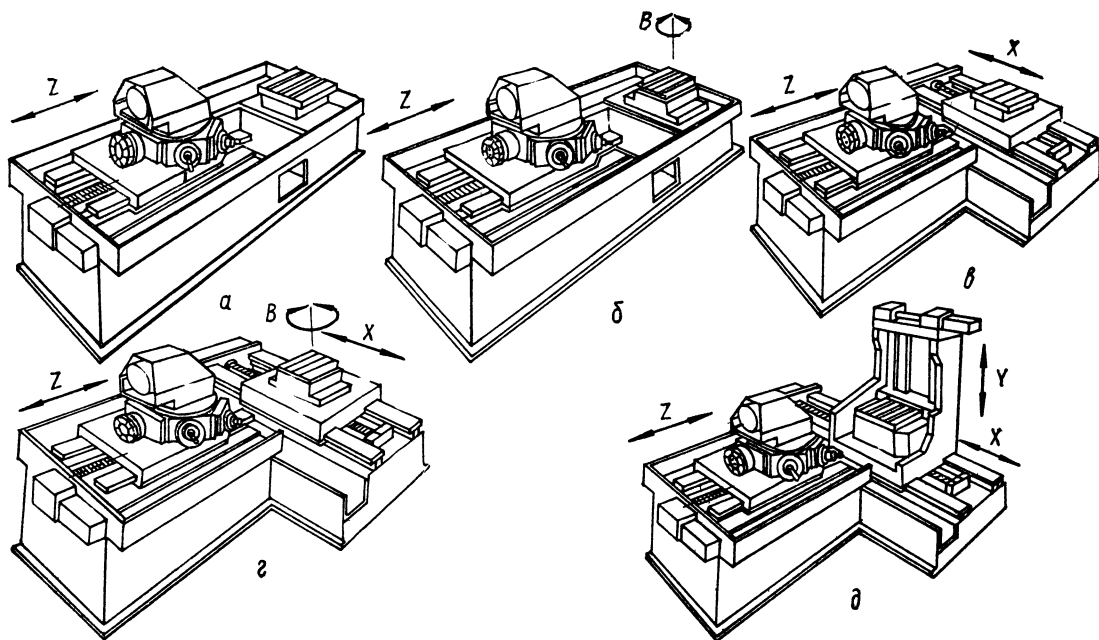


Рис 3 28. Компонки многошпиндельных обрабатывающих центров фирмы «Хонсберг», построенные на агрегатно-модульном принципе

Производительность многопозиционных станков параллельно-последовательного действия

$$Q_{qp} = \frac{p}{T_{\Sigma} + \Sigma t_n} = \frac{p}{t_{p0}/q + t_x + p(\Sigma C_t + q t_e)}. \quad (3.19)$$

Из рис. 3.27, *г* видно, что при любом сочетании определяющих факторов существует единственное число позиций $q_{\text{опт}}$, при котором производительность станка максимальная. Чем больше число потоков p , тем выше производительность, следовательно возрастает «цена» неоптимальных решений. Формула (3.19) является универсальной, так как при подстановке $p = 1$, получаем формулу (3.14), $q = 1$ — формулу (3.16), $p = q = 1$ — формулу (3.13).

Оптимальное, наивыгоднейшее число позиций $q_{\text{опт}}$ по критерию производительности при заданном p можно определить, взяв $\frac{dQ_{qp}}{dq} = 0$. В результате

$$q_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{t_{p0}}{p t_e}} = \sqrt{\frac{t_{p0}}{p \omega v_{\text{ср}}}}. \quad (3.20)$$

На многошпиндельном обрабатывающем центре с управлением *CNC* фирмы «Хонсберг» системы МАСКО в более высокой степени осуществлен конструктивно модульный принцип компоновки. Множество обрабатываемых деталей и осуществляемые способы резания, а также партии разных размеров требуют приспособления станка, в данном случае, многошпиндельного обрабатывающего центра, к конкретным схемам обработки. Модульный принцип обеспечивает значительное расширение технологических возможностей многошпиндельных обрабатывающих центров системы МАСКО. Основная конструкционная структура и различные возможности расположения пяти возможных осей гарантируют не менее восьми разных вариантов (рис. 3.28, *а—з*), которые обеспечивают гибкое расширение с одной оси до пяти. Кроме того, многошпиндельный обрабатывающий центр с управлением *CNC* может быть оснащен устройством для смены инструмента с тремя осями системой *CNC* и автоматическим устройством для смены шпиндельной головки.

Независимо от варианта исполнения, в любом случае, основным узлом является носитель многошпиндельной головки с задаваемым делением, т. е. делением 8 шагами по 45°, делением 6 шагами по 60°, делением 4 шагами по 90°. Носитель шпиндельной головки вращается вправо или влево

и осуществляет деление автоматически по самому короткому пути. Кроме того, имеются также носители многошпиндельных головок с несимметричным делением, например, $2 \times 90^\circ$, $3 \times 60^\circ$. Привод встроен в носитель многошпиндельной головки и, при стандартном исполнении, имеет мощность 15...25 кВт.

Ведущие предприятия многих промышленно развитых стран давно уже осознали, что рентабельное изготовление деталей средними и крупными сериями возможно только благодаря специальному оригинальному оборудованию. Примером могут служить агрегатные многопозиционные станки с круговым транспортером типа Турмат, характеризующиеся высокой концентрацией операций (обработка заготовки с трех сторон или при перезажиме — с шести сторон), и встраиваемые в линейные станочные системы. Существует 5 типоразмеров таких станков с 3...10 рабочими позициями, на которые устанавливается до 27 узлов обработки при хорошем доступе к каждой позиции. Станки могут быть с одинарной и двойной индексацией, с тем, чтобы одновременно обрабатывать две заготовки или одну заготовку с перезажимом (перекантованием).

Станок (рис. 3.29) содержит несущую траверсу 4, установленную на станине 8 и снабженную силовыми головками (вертикальными нижними 2 и верхними 5, горизонтальными 3) и поворотным барабаном 6 (время позиционирования до 1 с), оснащенным шпинделями с зажимными патронами 7. Скорость быстрых перемещений узлов 12...15 м/мин. Свободному сходу стружки из рабочих зон через основание 8 станка способствует очень сильный поток охлаждающей жидкости, и стружка свободно падает в стружкотранспортную систему 1. Рабочее пространство станка герметично и находится внутри него, что предотвращает попадание стружки и СОЖ наружу и способствует хорошему охлаждению и смазыванию обрабатываемых заготовок. Заготовки подаются по лотку 11, вводятся в станок поворотным загрузочным устройством 10 и выводятся из него в лоток 9.

3.9. Компоновка двухшпиндельных токарных автоматов с ЧПУ

Примером компоновки двухшпиндельных автоматов с ЧПУ отечественного производства на базе одношпиндельных модулей может служить станок специальный токарный двухшпиндельный фронтальный патронный с ЧПУ модели

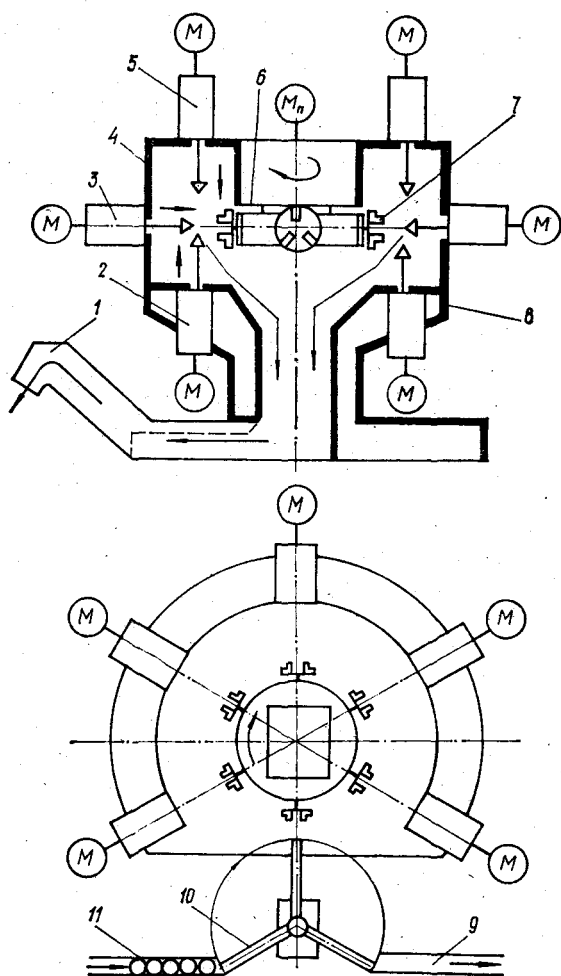


Рис. 3.29. Агрегатный многопозиционный станок с круговым транспортом типа «Турмат» для ГАП фирмы «Витунг и Франк-Мартинг» (ФРГ)

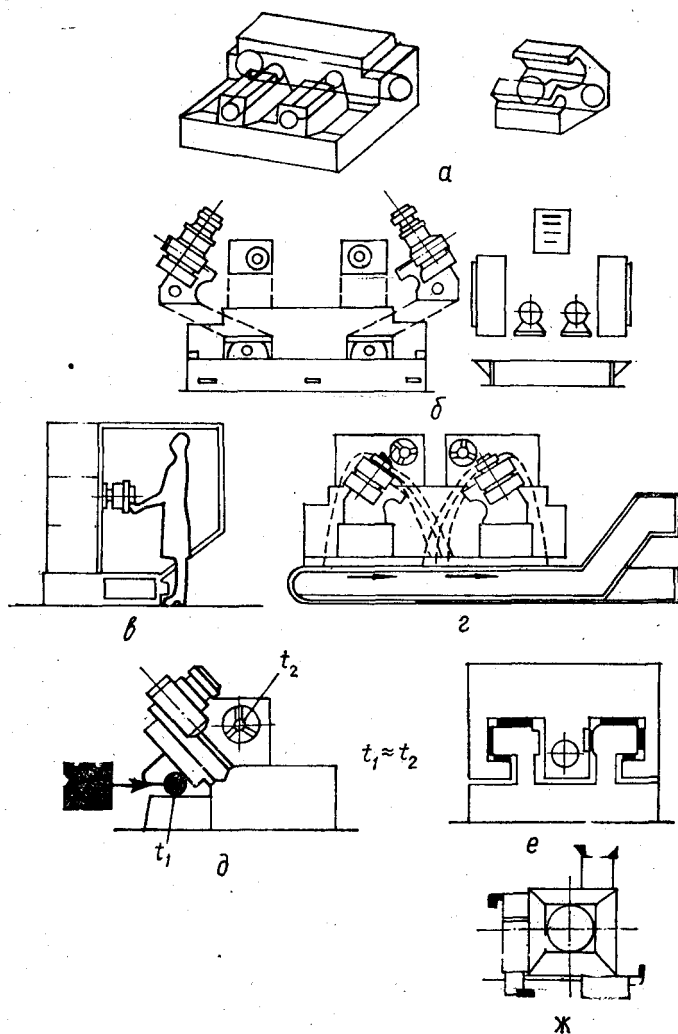


Рис. 3.30. Конструктивные особенности двухшпиндельного станка с ЧПУ МР315:

а — жесткие трубчатая станина и основание крестовых суппортов; *б* — агрегатный принцип компоновки; *в* — обслуживание; *г* — сход стружки свободный; *д* — механизм стабилизации и точности обработки детали; *е* — фторопластовые направляющие; *ж* — многолезвцовая обработка

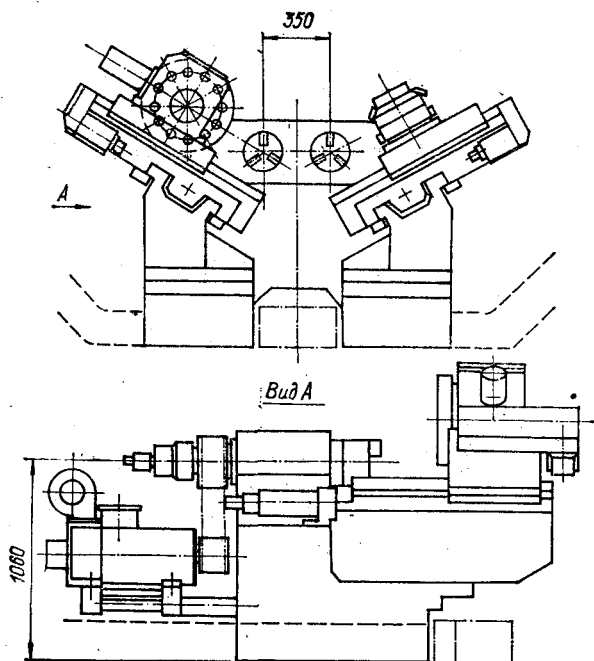


Рис. 3.31. Двухшпиндельный токарный станок с ЧПУ

МР315, разработанный Московским ПО «Станкостроительный завод им. С. Орджоникидзе» (рис. 3.30). Станок предназначен для обработки деталей в патроне. Наибольший диаметр обработки — до 500 мм, высота обрабатываемой детали — не более 200 мм.

На станке можно производить обточку цилиндрических, конусных, сферических поверхностей, подрезку торцов, прорезку прямых и наклонных канавок с поднутрением, обработку внутренних поверхностей гильз, фланцев, дисков, нарезку внутренней и наружной резьб. Станок имеет две не зависящие друг от друга стороны с самостоятельными приводами и системами управления. Каждый шпиндель, диаметр зажимного патрона которого 315 мм, оснащен четырехсторонней револьверной головкой с 12 позициями для установки инструментальных державок, настраиваемых вне станка.

По желанию заказчика станок может быть оснащен автооператором или порталным роботом. В обычном испол-

нении станок комплектуется системой ЧПУ и приводами отечественного производства и стран СЭВ.

Отличающиеся удобным доступом к заготовке и инструментам двухшпиндельные станки с ЧПУ фирмы «Петра 200/2—2NC» (ФРГ) и «DFP 2/124» (ГДР) построены на модульном принципе (рис. 3.31) и снабжены наклонными направляющими для крестовых суппортов с револьверными головками, имеющими вертикальную или горизонтальную оси. Каждая из сторон станка оснащена собственной системой управления.

Фирма «Gildemeister» (ФРГ) создала двухшпиндельный патронный фронтальный полуавтомат с ЧПУ модели MP25 (рис. 3.32, а). Одним из критериев его создания является повышение универсальности. Станок выполнен по принципу модульного агрегатирования.

Двухшпиндельный токарный станок модели *Transtar* фирмы «Tarex» (Швейцария) снабжен двумя противоположно расположенными шпиндельными бабками, что позволяет обрабатывать на станке обе стороны одной детали (рис. 3.32, б). Загрузка изделий на левый шпиндель осуществляется автоматически при помощи загрузочного устройства, а перегрузка изделий на правый шпиндель осуществляется путем перемещения правой шпиндельной бабки, при этом зажимное устройство правой шпиндельной бабки зажимает изделие, а зажимное устройство левой шпиндельной бабки освобождает его. Станок оснащен двумя суппортами, на каждом из которых устанавливается 10-позиционная револьверная головка, каждая из которых может работать как с левым, так и с правым шпинделем. Такая компоновка позволяет сократить время обработки до 60 %.

Другим направлением в развитии двухшпиндельной и многошпиндельной обработки с использованием ЧПУ явля-

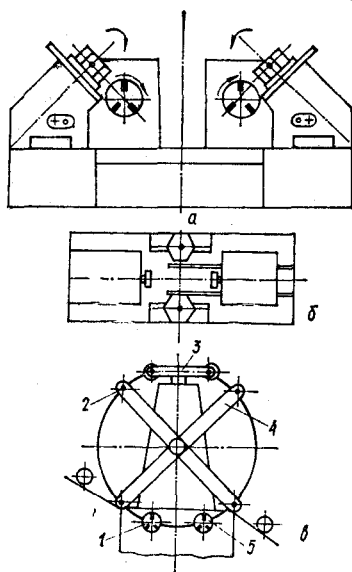


Рис. 3.32. Схемы двухшпиндельных станков с ЧПУ фирм: а — «Gildemeister»; б — «Tarex»; в — «Emag»

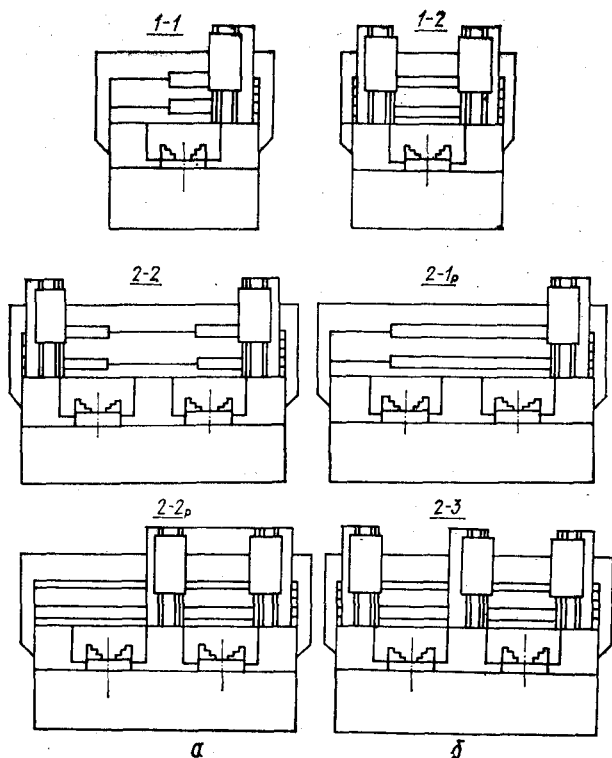


Рис. 3.33. Компоновка:

а — вертикальных одношпиндельных, *б* — двухшпиндельных токарных автоматов с ЧПУ фирмы «Питтлер»

ется создание и совершенствование станков со стационарными шпинделями. Существенным достоинством таких станков по сравнению с многшпиндельными, имеющими поворотный шпиндельный барабан, является наладка зажимных устройств каждой позиции, что позволяет сравнительно просто обеспечить переустановку детали. Перемещение и контактирование деталей по позициям осуществляется промышленными роботами или манипуляторами. Так, на двухшпиндельном патронном станке фирмы «Etag» (ФРГ) (рис. 3.32, *в*) в качестве манипулятора используется крестовина 4 с четырьмя захватами 2. Поворот детали, снятой со шпинделя 1, перед установкой на шпиндель 5 осуществляет кантователь 3.

В последнее время в токарных станках с ЧПУ наметилась тенденция вертикальной компоновки не только для обработки больших диаметров. Опыт применения вертикальных токарных станков показывает их преимущества по ряду показателей при сравнении со станками горизонтальной компоновки: а) облегчение условий зажатия заготовки и независимость высоты патрона от его диаметра; б) более высокая точность благодаря меньшей деформации шпинделя; в) жесткость конструкции в отношении деформации и диапазона изменения температуры; г) удобство удаления стружки как с изделия, так и с режущего инструмента; д) удобство автоматического манипулирования заготовками; е) свободный доступ оператора к станку.

Фирма «Питтлер» предлагает модульный принцип компоновки вертикальных одно- и двухшпиндельных станков с ЧПУ из унифицированных узлов. Примеры компоновки приведены на рис. 3.33 и характеризуют различные конструкции и технологические возможности станков.

3.10. Особенности построения многошпиндельных токарных автоматов с ЧПУ

Многошпиндельные токарные автоматы (МТА) с кулачковым приводом (распределительным валом управления) имеют высокую производительность, однако требуется длительная и трудоемкая переналадка. Одношпиндельные токарно-револьверные автоматы универсальны, но у них невысокая производительность. Сочетание высокой производительности и универсальности может быть в МТА с ЧПУ, отличающихся к тому же низкой металлоемкостью.

Для сравнения приведем принципы построения МТА с кулачковым управлением (рис. 3.34, а) и ЧПУ (рис. 3.34, б). В МТА с кулачковым управлением шпиндели 7 вращаются от одного электродвигателя 4 через центральную шестерню 1, установленную на оси поворота шпиндельного барабана 8. От этого же двигателя передается вращение на распределительный вал 2 с кулачками 3, обеспечивающими через рычажные и другие передаточные механизмы перемещения поперечного 6 и продольного 5 суппортов, а также управление вспомогательными движениями (поворот и фиксация, зажим-разжим, подача-набор и т. д.).

В МТА с ЧПУ (рис. 3.34, б) общим с ранее описанным остался только шпиндельный барабан с механизмом его поворота и фиксации. Обработка деталей осуществляется

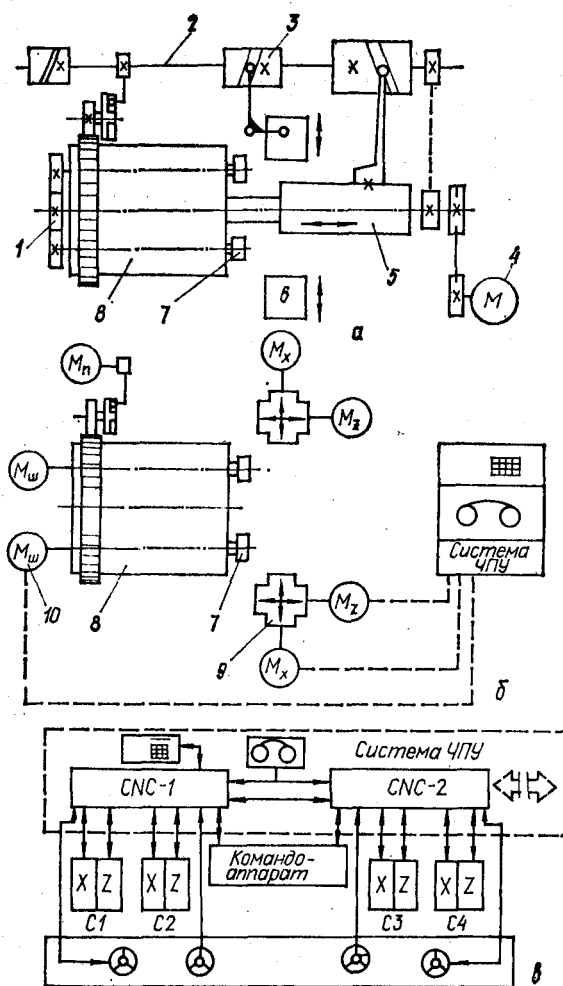


Рис. 3.34. Принципиальные схемы многошпиндельных токарных автоматов:

а — с кулачковым управлением, б, в — с ЧПУ

инструментами, размещенными в крестовых суппортах 9. Шпиндели 7 вращаются от отдельных двигателей 10. Аппаратурная реализация системы ЧПУ в МТА МДЗ 250 с четырьмя шпинделями приведена на рис. 3.34, в. Научно-технический прогресс и уровень развития современного производства предъявляют повышенные требования к МТА по производительности, точности, металлоемкости, энергоемкости и быстроперенастраиваемости при расширении технологических возможностей в условиях не только массового и крупносерийного производства, но и серийного и даже мелкосерийного.

Это требует иного методологического подхода к их проектированию, к поиску новых технологических принципов, разработке принципиально новых схем и конструкций в кратчайшие сроки.

Среди основных направлений развития МТА, связанных с повышением их технико-экономических показателей и расширением технологических возможностей, можно выделить следующие: 1) коренное изменение компоновки и существенное сокращение кинематических цепей за счет применения агрегатно-модульного принципа построения и систем ЧПУ; 2) поиск и выбор принципиально новых технологических принципов и схем формообразующих движений, например, сочетающих процессы развития с процессами пластического деформирования (комбинированная обработка), концентрация операций за счет перевода на параллельную и параллельно-последовательную обработку с использованием многоинструментальных и многорядных револьверных головок с вращающимися и невращающимися инструментами, одновременная многопоточная обработка нескольких на одном шпинделе (двух-трех и более) одинаковых коротких деталей типа колец подшипников при многократной подаче прутка или подаче на все детали сразу и двойном (или с двух сторон) зажиме; 3) создание многоцелевых станков, осуществляющих токарные, фрезерные, сверлильные и другие операции, не свойственные токарным автоматам, обработка деталей с двух сторон после отрезки из прутка или с перекалтованием штучной заготовки, оснащение существующих МТА дополнительными устройствами, и оснасткой специального технологического назначения, например, поворотными патронами и т. д.

Для поиска новых технологических принципов и компоновок МТА целесообразно применять системные и ассоциативные методы поиска новых технических решений. При

синтезе технологических схем и компоновок МТА эффективным, дающим большое количество вариантов, является метод морфологического анализа и синтеза [29], сводимый к перебору сочетаний альтернатив основных признаков, образующих морфологическую матрицу.

При поиске технологических схем МТА выбирают 5 основных признаков: 1 — схема обработки или принцип построения технологического процесса с точки зрения концентрации операций на z позициях — шпинделях ($z = pq$, где q — количество последовательных позиций; p — количество параллельных позиций); 2 — расположение рабочей зоны; 3 — изменение положения шпинделей; 4 — число рядов шпинделей в шпиндельной бабке; 5 — относительное расположение шпинделей. Для каждого признака выбирают варианты реализации — альтернативы и строят морфологическую матрицу (табл. 3.3).

Для примера возьмем несколько вариантов сочетаний альтернатив (подчеркнуты изменяемые альтернативы по сравнению с первым вариантом):

1) 1.1 — 2.1 — 3.1 — 4.1 — 5.2 — последовательная обработка с одной стороны рабочей зоны при периодическом повороте шпинделей, расположенных на одной окружности шпиндельного барабана (традиционная схема);

2) 1.2 — 2.1 — 3.3 — 4.1 — 5.1 — параллельная обработка с одной стороны рабочей зоны при неподвижном параллельном расположении одного ряда шпинделей (традиционная схема фасонно-отрезной обработки);

3) 1.1 — 2.1 — 3.1 — 4.2 — 5.2 — последовательная обработка с одной стороны рабочей зоны при периодическом повороте шпинделей, расположенных на двух окружностях шпиндельного барабана (новая схема);

4) 1.3 — 2.2 — 3.4 — 4.1 — 5.1 — параллельно-последовательная обработка с двух сторон рабочей зоны при параллельном расположении шпинделей одного ряда неподвижных, а другого ряда подвижных (новая схема);

5) 1.2 — 2.3 — 3.1 — 4.1 — 5.5 — параллельная обработка с нескольких сторон рабочей зоны при звездообразном расположении ряда подвижных шпинделей (новая схема).

При синтезе компоновок по различным технологическим схемам должны быть введены дополнительные признаки, характеризующие объект обработки — заготовку и конструктивные узлы (блоки) структуры МТА. Морфологиче-

3.3. Морфологическая матрица технологических схем многошпиндельных токарных автоматов

Схема обработки	Расположение рабочей зоны	Изменение положения шпинделей	Число рядов шпинделей в шпиндельной бабке	Относительное расположение шпинделей
1.1. Последовательная ($p = 1, q > 1$)	2.1. С одной стороны	3.1. Периодический поворот	4.1. Один	5.1. Параллельное
1.2. Параллельная ($p > 1, q = 1$)	2.2. С двух сторон	3.2. Периодическое поступательное	4.2. Два	5.2. По образующей цилиндра
1.3. Параллельно-последовательная ($p > 1, q > 1$)	2.3. С нескольких сторон :	3.3. Отсутствует	4.3. Несколько :	5.3. Конусообразное
1.4. Роторная : :		3.4. Сочетание 3.2 и 3.3 :		5.4. Тангенциальное
				5.5. Звездообразное (всереообразное)
				5.6. Перпендикулярное
				5.7. Сочетание 5.2 и 5.3 :

3.4. Морфологическая матрица компонентов МТА

Заготовка			
1 — вид	2 — сторона обработки	3 — движение	4 — геометрическая ось
1.1. Пруток	2.1. Одна	3.1. Поступательное	4.1. Горизонтальная
1.2. Штучная короткая	2.2. Две	3.2. Вращательное	4.2. Вертикальная
1.3. Штучная длинная	2.3. Все (внецентренное сверление и фрезерование)	3.3. Нет	4.3. Наклонная
1.4. Труба	2.4. Комбинированное	3.4. Комбинированное	4.4. Комбинированная (горизонтальная и вертикальная)
5 — расположение рабочей зоны			5.1. С одной стороны 5.2. С двух сторон 5.3. С нескольких сторон 5.4. С нескольких сторон

Продолжение табл. 3.4

Шпиндельный блок			
6 — расположение шпинделей	7 — движение	8 — количество координат	9 — расположение
6.1. В линию	7.1. Периодический поворот	8.1. Одна	9.1. Звездой
6.2. По цилиндру	7.2. Возвратно-поступательное	8.2. Две	9.2. Вдоль геометрической оси
6.3. Звездой	7.3. Поступательное	8.3. Три	9.3. Перпендикулярно оси
6.4. По двум цилиндрам	7.4. Комбинированное	8.4. Четыре	9.4. Параллельно геометрической оси
6.5. По многогранной призме	7.5. Нет	8.5. Сочетание	9.5. Произвольное
6.6. По конусу			
			10 — обслуживание шпинделей
			10.1. Одного
			10.2. Двух
			10.3. Нескольких
			10.4. Всех
			10.5. Сочетание

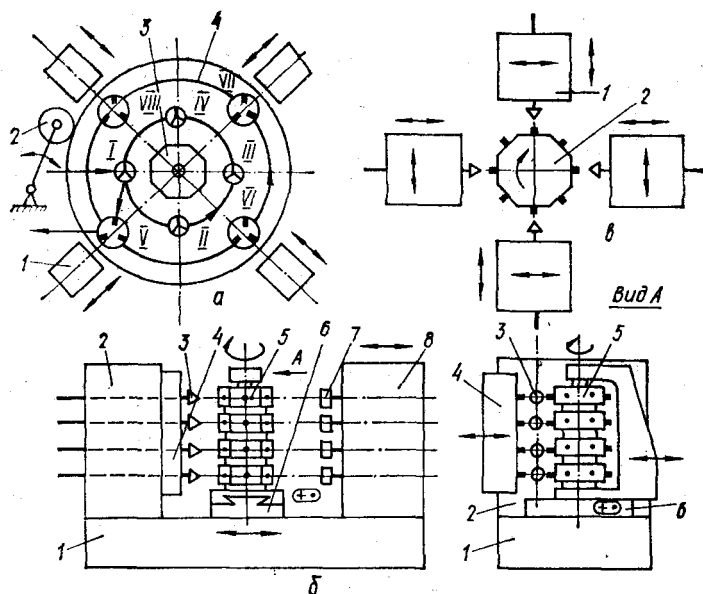


Рис. 3.35. Схемы многопозиционных процессов и соответствующих им новых компоновок многошпиндельных токарных автоматов:
 а — прутково-патронного последовательного действия; б — прутково-патронного параллельно-последовательного действия; в — пруткового параллельного действия

ская матрица компоновок МТА с десятью основными признаками, представляющая развитие табл. 3.3, приведена в виде табл. 3.4 [27].

Если из матрицы (табл. 3.4) взять сочетание (1.1 — 2.2 — 3.2) + (4.1 — 5.1 — 6.4 — 7.1) + (8.1 — 9.5 — 10.5), то на базе традиционной компоновки получится компоновка прутково-патронного МТА последовательного действия (рис. 3.35, а), реализующая схему 3 (табл. 3.3). В этом МТА на первой окружности расположения шпинделей (поз. I—IV) обработка осуществляется из прутка инструментами, установленными в продольном суппорте 3 с периодическим поворотом шпиндельного барабана 4 на одну позицию. В поз. I деталь отрезается, например, качающейся дисковой фрезой 2, и с помощью перекантователя с поворотом на 180° переносится в освободившуюся от готовой детали поз. V. На второй наружной окружности шпинделей (поз. V—VIII) заготовка обрабатывается с другой стороны ин-

струментами, установленными в поперечных суппортах 1, а при необходимости в продольном суппорте 3. Таким образом на МТА подобной компоновки можно выполнить обработку детали с двух сторон, заменив 2...3 МТА существующей компоновки, объединенных в автоматическую линию. Агрегатно-модульный принцип компоновок МТА может быть успешно реализован при отходе от традиционного взгляда на МТА, как на многопозиционный станок с поворотным шпиндельным барабаном, характеризующийся большими массами и моментами инерции. Например, момент инерции шпиндельного барабана с прутками максимальной длины в автомате 1Б216-6К (максимальный диаметр прутка $d_{\max} = 16$ мм) составляет $100 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, а в автомате 1Б290-6К ($d_{\max} = 100$ мм) более $700 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, что при быстром повороте вызывает большие динамические нагрузки.

Взяв из табл. 3.4 другое сочетание альтернатив, можно синтезировать компоновку МТА параллельно-последовательного действия, реализующую схему 4 (табл. 3.3), с теми же технологическими возможностями, как в МТА на рис. 3.35, а. Такой компоновке соответствует сочетание (табл. 3.4): $(1.1 - 2.2 - 3.2) + (4.1 - 5.2 - 6.1 - 7.5) + (8.5 - 9.3 - 10.3)$ (рис. 3.35, б). Синтезированная компоновка МТА является развитием компоновки фасонно-отрезных МТА, для чего к имеющемуся неподвижному шпиндельному блоку 2, установленному на станине 1 и снабженному расположенными в линию шпинделями 3 и отрезным поперечным суппортом 4, добавлены одна или две многоярусные револьверные головки 5, установленные на крестовых суппортах 6, и подвижная шпиндельная бабка 8 со шпинделями 7.

Возможна компоновка МТА параллельного действия, реализующая схему 5 (табл. 3.3) с расположением одной многошпиндельных бабок 1 на крестовых суппортах по разные стороны многопозиционной револьверной головки 2 (рис. 3.35, в), что соответствует следующему сочетанию альтернатив из морфологической матрицы (табл. 3.4): $(1.1 - 2.1 - 3.4) + (4.1 - 5.3 - 6.3 - 7.2) + (8.1 - 9.1 - 10.1)$.

При системно-морфологическом подходе поиск новых решений осуществляется на многомерном поле, где даже при существующих традиционных компоновках МТА при эволюционном переходе от механического (кулачкового) управления к ЧПУ возможны комбинированные схемы управления, не требующие коренных изменений конструкций. Так например, возможно изменение схемы обработки

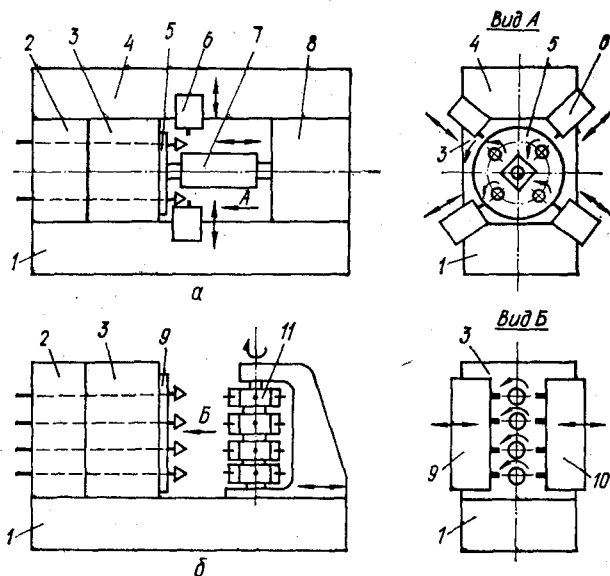


Рис. 3.36. Компоновки конкурирующих вариантов многошпиндельных токарных автоматов равных технологических возможностей:

а — существующий последовательного действия; *б* — фасонно-отрезного параллельного действия; 1 — станина; 2 — задняя стойка; 3 — шпиндельный блок; 4 — траверса; 5 — шпиндельный барабан; 6 — поперечный суппорт; 7 — продольный суппорт; 8 — передняя стойка; 9, 10 — многолезцовые поперечные суппорты (отрезной и фасонный); 11 — многоярусная револьверная головка

за счет устранения продольного суппорта и введение вместо него крестовых суппортов, а для доработки детали из прутка со стороны отрезки — за счет введения дополнительного шпинделя и дополнительных доработочных суппортов. Такой вариант МТА на базе существующих может быть получен по сочетанию (1.4 — 2.2 — 3.2) + (4.1 — 5.2 — 6.7 — 7.4) — (7.1 + 7.3) + (8.5 — 9.3 — 10.1) с конкретной реализацией альтернатив применительно к базовой модели МТА, например, к четырехшпиндельному.

Одним из резервов повышения производительности МТА является применение параллельной и параллельно-последовательной схем обработки, обладающих к тому же большей надежностью, что особенно важно в условиях гибкого автоматизированного производства.

Для этого сравним по производительности два конкурирующих варианта МТА при равных технологических возможностях:

I — существующий МТА последовательного действия с поворотным шпиндельным барабаном и q позициями (рис. 3.36, а); II — фасонно-отрезной МТА параллельного действия с p позициями и дополнительной многоярусной револьверной головкой, заменяющей функции поперечных суппортов и продольного с дополнительными устройствами (рис. 3.36, б), синтезированный из морфологической матрицы (табл. 3.4) по сочетанию: $(1.1 - 2.1 - 3.2) + (4.1 - 5.1 - 6.1 - 7.5) + (8.5 - 9.3 - 10.4)$.

Производительность сравниваемых многопозиционных автоматов соответственно определяют по формулам (3.14) и (3.16).

Для упрощения и наглядности сравнения в рассматриваемых вариантах принимаем число одновременно работающих инструментов $u_q = 2$ (один инструмент в продольном 7, а другой в поперечном 6 суппортах) и $u_p = 2$ (если при выполнении последовательно фасонной обработки поперечным суппортом 10 и меняющимся инструментом в револьверной головке 11, а затем суппортом 9 и инструментами в той же головке 11).

Таким образом, принимаем $u_q = u_p$. Кроме того, для наглядности сравнения принимаем коэффициент интенсификации режимов равным единице, а время холостых ходов, связанных с многократным поворотом многоярусной револьверной головки, выполняющей функции продольного суппорта, $t'_x = qt_x$.

С учетом принятых допущений запишем уравнение относительной производительности:

$$\Phi_Q = \frac{Q_p}{Q_q} = \frac{pu_p [t_{p0} + qu_q t'_x + qu_q (\Sigma C_t + qt_e)]}{qu_q [t_{p0} + qu_p t'_x + pu_p (\Sigma C_t + t_e)]}. \quad (3.21)$$

Сравнение эффективности того или иного варианта выполним при равных условиях по количеству позиций ($p = q = z$) и одновременно работающих в одной позиции инструментов ($u_p = u_q = u$). Тогда формула (3.21) примет вид

$$\Phi_Q = \frac{t_{p0} + zu t'_x + zu (\Sigma C_t + zt_e)}{t_{p0} + zu t'_x + zu (\Sigma C_t + t_e)}. \quad (3.22)$$

После преобразования получим

$$\Phi_Q = 1 + \frac{(z-1)t_e}{t_{p0}/zu + t'_x + \Sigma C_t + t_e}.$$

Так как при многопозиционной обработке $z > 1$, то из последней формулы видно, что $\varphi_q > 1$ всегда или $Q_p > Q_q$, т.е. второй вариант параллельной обработки превосходит по производительности первый вариант последовательной обработки.

Анализ зависимостей для φ_q при различных значениях t_{p0} , t_x , t_e , ΣC_i , u , z свидетельствует о целесообразности перевода обработки деталей на МТА с последовательной на параллельную обработку, особенно при увеличении числа одновременно работающих инструментов u , числа позиций z , меньших значениях длительности технологического воздействия t_{p0} и больших внецикловых потерях ΣC_i и t_e .

Аналогично выше изложенному можно сравнить варианты двух МТА, обрабатывающих детали из прутка с двух сторон (после отрезки) при расширении технологических возможностей:

I — последовательного действия с двумя рядами шпинделей и $z = q$ позициями (см. рис. 3.35, а);

II — параллельно-последовательного действия с двумя ($q = 2$) шпиндельными бабками, ($p = z/2$), каждая из которых обслуживается одной многоярусной револьверной головкой (см. рис. 3.35, б), где вместо поперечного суппорта 4 введена вторая револьверная головка.

Для сравнения примем одинаковое число позиций ($z_1 = z_2 = z$) и одновременно работающих в одной позиции инструментов ($u_1 = u_2 = u = 1$).

Тогда

$$Q_q = \frac{1}{t_{p0}/2 + t_x + \Sigma C_i + z t_e}; \quad (3.23)$$

$$Q_{qp} = \frac{z/2}{t_{p0}/2 + t'_x + z/2 (\Sigma C_i + t_e)}, \quad (3.24)$$

где $t'_x = \frac{z}{2} t_x$ — при замене одной многоярусной револьверной головкой поперечного, а другой продольного суппортов.

Уравнение относительной производительности:

$$\varphi_q = \frac{Q_{qp}}{Q_q} = 1 + \frac{(z-1) t_e}{t_{p0}/z + t_x + \Sigma C_i + t_e}, \quad (4.25)$$

откуда видно, что при $z > 1$ вариант параллельно-последовательной обработки МТА тоже приемлем наряду с параллельной обработкой, так как $\varphi_q > 1$.

При обработке сложных деталей из прутка или штучных заготовок, требующих выполнения сверлильно-фрезерных

и других операций с позиционированием шпинделя за счет высокой концентрации операций и оптимизации режимов резания при независимом регулировании их в различных шпиндельных бабках, имеет смысл создавать многоцелевые МТА с ЧПУ.

При создании МТА с ЧПУ последовательного или параллельного действия с целью повышения точности обработки, упрощения системы ЧПУ за счет сокращения управляемых координат необходимо решать вопрос компенсации износа режущего инструмента. Один путь компенсации режущего инструмента — введение корректировки управляющих программ, что неприемлемо при параллельной работе нескольких одинаковых инструментов от одной программы (одного привода подач или синхронно работающих приводов подач). Другой путь — создание системы автоматической подналадки инструментов, обеспечивающих дополнительные кинематические цепи коррекции положения режущего инструмента по сигналу от датчика, регистрирующего изменение размера обработки или износ инструмента.

При создании МТА с ЧПУ следует решать проблемы, связанные с дроблением и транспортировкой стружки, диагностикой инструментов и узлов станка, автоматическим манипулированием заготовками, режущими инструментами, рабочими органами станка и т. д., что требует применения современных методов поиска новых решений на уровне технических идей (принципов, способов), структур и схем станков и их механизмов.

Модульный принцип компоновки МТА с ЧПУ, станочных модулей и станочных систем предусматривает два возможных подхода, исходя из требуемой производительности обработки и технологических возможностей [28]: 1) на базе одношпиндельных модулей с приемом одинарного наращивания, зеркальности или расстановки требуемого количества позиций; 2) на базе двухшпиндельных модулей с приемом парного наращивания, зеркальности или расстановки до требуемого количества позиций.

Первый подход удобен для параллельной обработки, второй — для параллельно-последовательной. Прием симметричности парного наращивания отличается более высокой надежностью, имеет много аналогов в природе, поэтому перспективность его очевидна.

Модульный принцип компоновки МТА с ЧПУ, применяемый в условиях гибкого автоматизированного производ-

ства, позволяет путем повышения надежности в течение длительного периода и быстрой переналадки использовать устройства автоматического манипулирования блоками станка при выходе из строя и ремонте, при перекомпоновке станка для перехода на другую продукцию, при монтаже, транспортировке и т. п.

Успешной реализации агрегатно-модульного принципа компоновки МТА с ЧПУ может способствовать выполнение ряда дополнительных требований и условий, а именно: 1) номенклатура комплектующих агрегатов и модульных блоков должна быть минимальной; 2) создавать параллельные и параллельно-последовательные схемы обработки, уходя от использования поворотного шпиндельного барабана; 3) шпиндельные блоки должны быть симметричными, с несколькими привалочными плоскостями и устанавливаться с любой стороны станины или другой базовой детали без изменения привязки, по возможности уходить от различных исполнений (левых, правых, передних, задних, верхних, нижних, вертикальных, горизонтальных); для упрощения конструкций, повышения точности и жесткости шпиндельные узлы следует помещать в цельные корпуса шпиндельных бабок, отдавая предпочтение парному варианту; допускать, как оправданное, зеркальное исполнение корпусов шпиндельных бабок; 4) координатные блоки (одно- и двухкоординатные суппорты, револьверные головки) должны иметь не менее двух плоскостей симметрии, каждая координата суппорта должна предусматривать возможность установки привода координаты (двигателя) с двух сторон, расположения в различных плоскостях с учетом лучших динамических качеств, удобства схода стружки и обслуживания; 5) рабочая зона должна обеспечивать свободный доступ с различных сторон (сверху, сбоку и даже снизу) к каждому шпинделю при наладке, манипулировании заготовками, смене инструментальной и зажимной оснастки; 6) исполнение станины должно предусматривать встраивание транспортера стружки с различных сторон; 7) должна предусматриваться возможность совершенствования станка за счет автоматической смены инструментов, патронов (или их зажимных элементов), прутков, что переводит станок на следующий более высокий уровень гибкости; 8) система ЧПУ должна быть построена по модульному принципу — наращиванием модулей (управляющих координат); 9) для уменьшения количества управляемых координат операции сверления, фрезерования и резьбонарезания

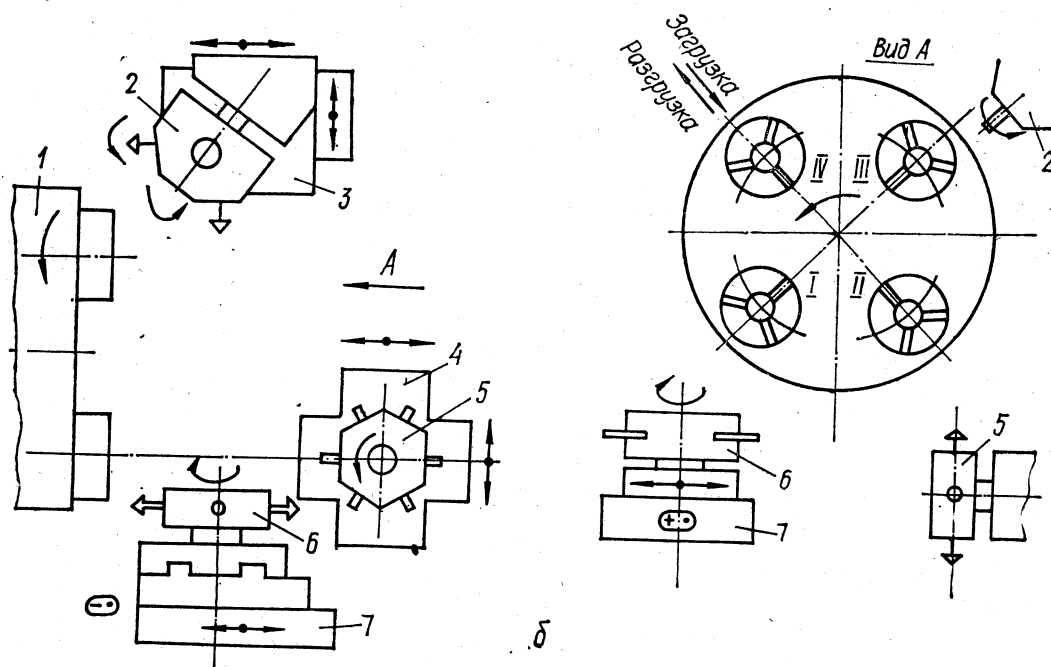
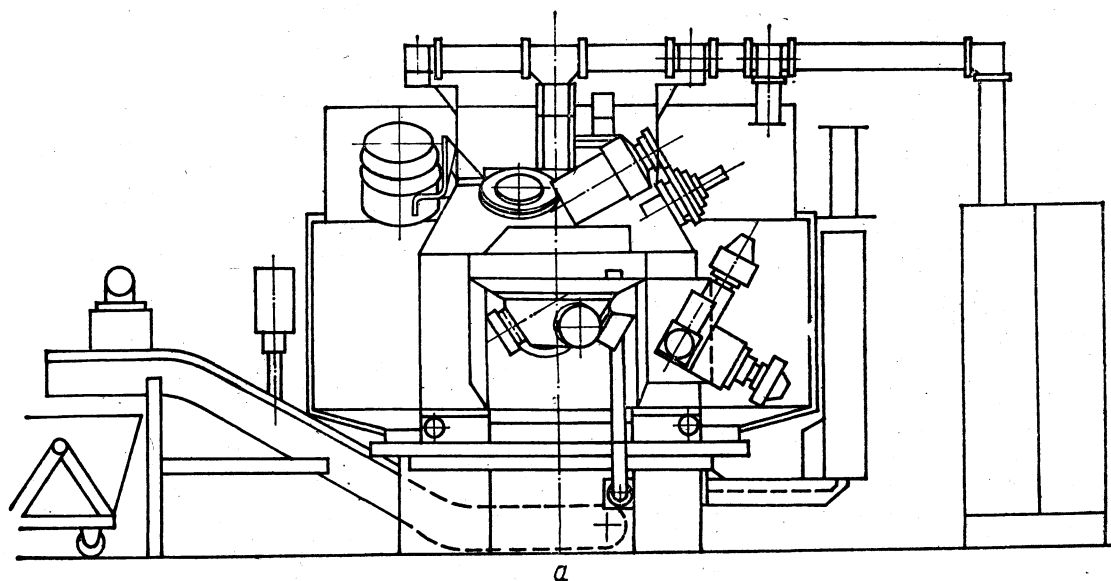


Рис. 3.37. Многоцелевой многшпиндельный токарный автомат:
 а — «MDZ» (ФРГ); б — 1А290П-4КФ30

многолезвийным инструментом, не требующим автоподналадки и компенсации износа, объединять в отдельные револьверные головки, т. е. иметь отдельно головку для вращающегося центрального инструмента и отдельно для различных однолезвийных проходных резцов; допускать сочетание в одной револьверной головке отрезных канавочных резцов и вращающегося инструмента, компенсация износа которых не требуется.

В Институте станков и технологии технического университета в Западном Берлине совместно с Западногерманским исследовательским обществом выполнены исследовательские работы по созданию многоцелевых МТА с ЧПУ как гибких производственных систем компактной структуры.

Из большого числа вариантов была выбрана концепция системы «Пилот», которая открывает новые пути как с точки зрения конструкций станин, так и с позиций пространственного размещения линейных и поворотных координатных осей для перемещения рабочих органов станка. Подобное решение впервые стало возможным благодаря использованию устройства ЧПУ и отдельных приводов шпинделя и каждой координатной оси, по которой осуществляются движения на рабочих подачах. Схематичное изображение многоцелевого МТА приведено на рис. 3.37, а. Базовыми узлами являются шпиндельные головки, установленные под углом 60° к главной оси. Этот запатентованный принцип расположения шпинделей обеспечивает независимое размещение главных приводов, а также использование отдельных, автоматически управляемых средств зажима. В системе «Пилот» принято подвесное крепление шпиндельных головок, что облегчает отвод стружки и минимизирует занимаемую производственную площадь. Основная станина несет четыре стойки, систему подачи СОЖ и транспортер для отвода стружки. На стойке размещена шпиндельная головка, приводы и аппараты подвода питающего напряжения. Инструментальные суппорты установлены с боковых сторон стоек и направлены параллельно шпинделям. Компактная конструкция шпиндельной головки определяет организацию рабочего пространства, обеспечивая установку деталей большого диаметра и размещения устройств, при этом исключаются столкновения и создаются благоприятные условия для полной обработки широкого спектра деталей. Все шпиндели оснащены гидравлическими зажимными патронами, которые могут настраиваться для внеш-

него или внутреннего крепления деталей с помощью вентилях, встроенных в шпиндельные головки. Это дает возможность автономно управлять зажимом на каждом шпинделе в отдельности и в любом его положении.

В специальном конструкторском бюро многшпиндельных автоматов Киевского станкостроительного производственного объединения (КСПО) создан многоцелевой МТА с ЧПУ 1А290П-4КФ30 (рис. 3.37, б), оснащенный во II и I позициях двумя крестовыми суппортами 4 и 7 с револьверными головками 5 и 6, имеющими невращающийся инструмент и предназначенными в основном для наружных токарных работ, а также одним верхним крестовым суппортом 3 с оригинальной револьверной головкой 2 (с расположением инструментальных шпинделей по аналогии с МТА на рис. 3.37, а) для сверлильно-фрезерных работ при позиционировании шпинделя в III позиции. Компоновка МТА осталась традиционной, т. е. с поворотным шпиндельным барабаном, I и IV загрузочно-разгрузочными позициями.

Станок предназначен для изготовления францев, стаканов, ступиц, шкивов и других деталей тел вращения из стали, чугуна и цветных сплавов с наружными и внутренними поверхностями сложных профилей. Штучные заготовки закрепляются в зажимных патронах рабочих шпинделей 1, вращающихся в прецизионных подшипниковых опорах шпиндельного барабана, который периодически поворачивается, перемещая обрабатываемую деталь в последующую позицию обработки. В трех позициях производится обработка, в четвертой — выгрузка готовой детали и загрузка новой заготовки. Возможно одновременное изготовление двух различных деталей. В этом случае в первых двух позициях производится обработка, в двух последних — загрузка и выгрузка.

Рабочие шпиндели имеют независимые приводы вращения, что позволяет производить выбор оптимальных режимов резания. Независимая обработка детали в каждой из трех позиций обеспечивается наличием в этих позициях автономных двухкоординатных суппортов, управляемых отдельными устройствами ЧПУ. На каждом суппорте устанавливается револьверная головка с набором необходимых режущих инструментов. МТА может быть оснащен автооператором или роботом для автоматической выгрузки, причем при эксплуатации с роботом обрабатывающий центр превращается в роботизированный токарно-сверлильно-фрезерный комплекс. Благодаря наличию специального

двухкоординатного суппорта с оригинальной револьверной головкой, предназначенной для выполнения фрезерных и сверлильных работ, данный многоцелевой МТА не имеет аналогов в мире. Одним из недостатков данного МТА является снижение его производительности при обработке заготовок, не требующих сверлильно-фрезерной обработки в III позиции, где шпиндель не имеет привода главного движения, а имеет лишь привод позиционирования.

4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДОВ И РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ОРГАНОВ СТАНКОВ С ЧПУ

4.1. Структура привода станка

Приводы станков предназначены для осуществления движений: главного, подачи и вспомогательных. Эти движения могут быть независимые и строго согласованные, определяющие простую или сложную разветвляющиеся структуры [42]. Обобщенная структура привода металлорежущего станка включает (рис. 4.1): 1) двигатель (Дв) вращательного или поступательного действия; 2) звенья, устройства и механизмы передачи движения — передаточные механизмы (ПдМ); 3) звенья, устройства и механизмы преобразования движения — преобразовательные механизмы (ПрМ); 4) исполнительный рабочий орган (РО); 5) устройства управления (УУ), обеспечивающие включение,

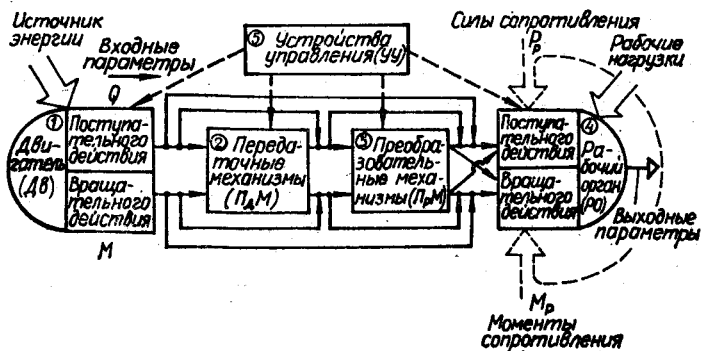


Рис. 4.1. Обобщенная структура привода металлорежущего станка

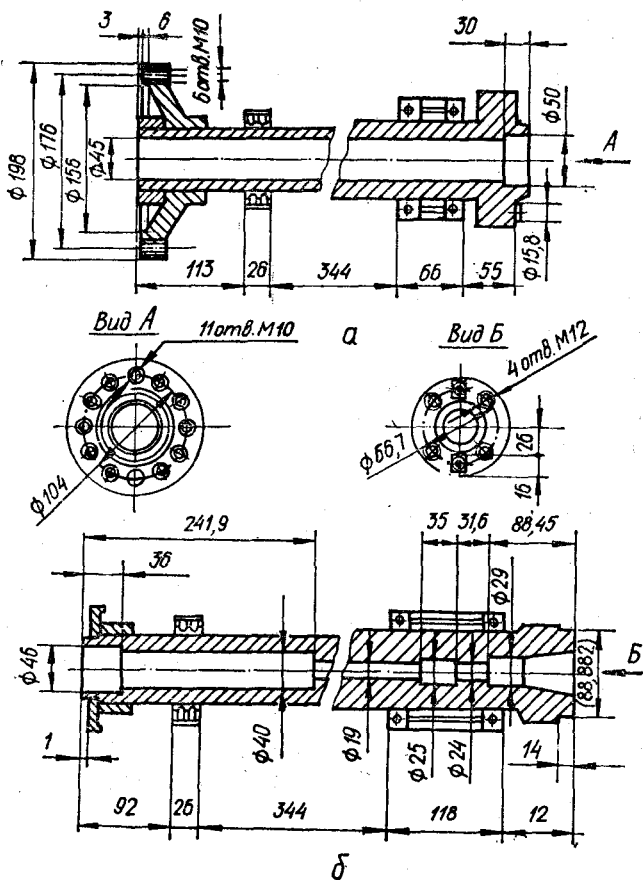


Рис. 4.2. Примеры модульных приводов главного движения фирмы «Fanuc», где шпиндель является ротором электродвигателя постоянного тока:

а — для токарных станков; б — для многооперационных станков, обрабатывающих корпусные детали

выключение, реверсирование, измерение и регулирование движения.

Наиболее простая структура будет тогда, когда двигатель выполнен как одно целое с рабочим органом или непосредственно связан с ним. Примером могут служить шпиндельные модули фирмы «Fanuc» (Япония) (рис. 4.2). Однако в большинстве случаев привод имеет звенья для

передачи, согласования и преобразования движения от двигателя к рабочему органу. Для приводов с вращательным главным движением рабочего органа могут быть зубчатые или ременные передачи, для приводов подач с поступательным движением — различные тяговые устройства.

Приводы большинства станков должны обеспечивать обработку с постоянной мощностью в определенной части R_N общего диапазона регулирования привода R_n , что зависит от диапазона размеров обрабатываемых деталей и режимов резания. Для многих станков $R_N = 5 \dots 20$ (иногда до 40), а общий диапазон регулирования привода зависит от его назначения: для главного движения — $4 \leq R_n \leq 100$; для подач — $1,5 \leq R_n \leq 150$. Если двигатель подач используется и как вспомогательный для быстрых перемещений, то диапазон может достичь $R_n \leq 3000$. Диапазоны регулирования некоторых двигателей приведены в табл. 4.1. Входными параметрами приводов являются

4.1. Диапазоны и способ регулирования некоторых двигателей

Максимальный диапазон регулирования	Асинхронный		Постоянного тока		Высокомоментный			Гидродвигатель
	Регулирование							
	с ваттотормом	частототокое	по системе Г—Д	ЭМУ	ПМУ	тиристорное		
R_n	10	3000	15	10	100	2000	3000	60
R_N	4	4	2,5	2	1,5	2,5...10	4...10	1,5...2

характеристики двигателя: мощность, моменты (номинальный, пусковой и максимальный), тяговое усилие, момент инерции ротора, частота (номинальная и максимальная), скорость, максимальное ускорение, постоянные времени (электромагнитная и электромеханическая) и др. Среди них основными являются силовые и скоростные параметры.

Характеристики передаточных механизмов выражаются кинематическими (передаточные отношения, диапазон регулирования частот или подач) и силовыми (КПД, соотношения сил, моментов, мощностей на входе и выходе) зависимостями.

Характеристики преобразовательных механизмов выражаются формулами преобразования (частот вращения в линейные скорости перемещения и наоборот, моментов в силы и наоборот) с учетом передаточных отношений и КПД.

Выходными параметрами приводов являются скоростные параметры перемещения рабочего органа (частота вращения шпинделя, число двойных ходов, скорость, подача, диапазон их регулирования) и значения внешних рабочих нагрузок (сил и моментов сопротивления), которые могут быть статическими и динамическими в зависимости от режима работы.

По характеру регулирования приводы разделяются на ступенчатые, бесступенчатые и комбинированные.

Приводы с бесступенчатым регулированием и электродвигателями постоянного тока являются основными для станков с ЧПУ.

При регулировании частоты вращения двигателя изменяется развиваемый им момент M_d и отдаваемая мощность N_d (рис. 4.3). В диапазоне от минимальной частоты $n_{\min}$ до номинальной n_n (зона I) крутящий момент $M_d = \text{const}$, а мощность N_d изменяется ($N_d = \text{var}$). В диапазоне от n_n до максимальной частоты $n_{\max}$ (зона II) регулирование происходит при $N_d = \text{const}$ и изменяющемся моменте M_d ($M_d = \text{var}$). В зоне III регулирование возможно до $n'_{\max}$, но происходит дальнейшее снижение момента M_d и мощности N_d .

Различают три способа регулирования [56]: при $M_d = \text{const}$ (зона I), при $N_d = \text{const}$ (зона II), двухзонное (зоны I и II). Работа в зоне III позволяет полнее использовать возможности электропривода, так как в большинстве станков на механизмах главного движения при максимальных частотах шпинделя во время обработки происходит снижение требуемых момента и мощности привода.

Для увеличения диапазона частот, в котором мощность постоянная по сравнению с диапазоном, обеспечиваемым регулируемым двигателем, используются коробки передач ступенчатого регулирования [32].

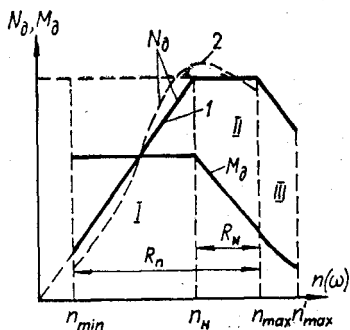


Рис. 4.3. Графики изменения мощности:

1 — при регулировании двигателя постоянного тока; 2 — требуемой для эффективного резания (среднестатистический)

4.2. Выбор и расчет привода главного движения

Для выбора привода, кроме исходных данных, необходимо четко сформулировать требования к нему, преимущества и недостатки аналогичного существующего привода, необходимость изменения кинематики станка. Общие требования должны быть дополнены требованиями, отражающими специфику станка и данного привода.

Приводы главного движения должны иметь жесткую механическую характеристику, малое время переходных процессов, малые потери мощности, постоянную мощность на конечном звене не зависимо от его скорости, возможность автоматического изменения скоростей под нагрузкой или в процессе настройки.

Выбор привода, как правило, требует анализа многих вариантов решений, при этом оптимальное решение принимается на основе технико-экономических расчетов и анализа степени удовлетворения основных требований, предъявляемых к приводу. Так, использование нескольких двигателей в станке позволяет сократить кинематические цепи, упростить управление, автоматизировать цикл работы.

Распространенным типом привода в станках средних размеров, когда не требуется изменять частоту в процессе работы, является привод с асинхронным нерегулируемым двигателем и коробкой скоростей.

Рассмотрим выбор этих электродвигателей.

Асинхронные двигатели следует выбирать с учетом геометрической точности, вибрации и шума. Для станков нормальной точности двигатель по вибрациям может быть класса С2, а для повышенной точности — С1.

Для выбора асинхронного двигателя необходимо определить режим его работы и привести его к одному из стандартных режимов в соответствии с ГОСТ 183—74. Предусмотрены следующие режимы работы: продолжительный S1, соответствующий постоянной нагрузке на валу двигателя в течение длительного времени; кратковременный S2, соответствующий кратковременной нагрузке на валу двигателя; повторно-кратковременный S3, S4, S5, характеризуемый продолжительностью включения; перемежающийся S6, при котором двигатель работает постоянно; перемежающийся S7, S8, характеризуемый числом реверсов или переключений в час и коэффициентом инерции.

При работе в режиме S1 двигатель выбирают по требуемой мощности на резание и преодоление сил сопротивления.

Для неразветвляющихся приводов главного движения требуемая мощность на валу двигателя может быть определена по формуле, кВт:

$$N_d = \frac{N_{эф}}{K\eta} + N_x, \quad (4.1)$$

где $K = 1,2 \dots 1,5$ — коэффициент кратковременной перегрузки двигателя; $\eta = 0,85 \dots 0,95$ — КПД передач привода (или может быть подсчитано по известным КПД отдельных передач); N_x — мощность холостого хода привода, вычисляется по зависимостям [31; 32] или принимается по экспериментальным данным аналогичных приводов.

Мощность холостого хода, кВт:

$$N_x = K_{см} d_{ср} 10^{-5} \left(\sum n + K_{ш} n_{ш} \frac{d_{ш}}{d_{ср}} \right),$$

где $K_{см} = 3 \dots 6$ — коэффициент, зависящий от совершенства системы смазки; $d_{ср}$ — средний диаметр всех валов привода, мм; $\sum n$ — сумма частот вращения всех промежуточных валов, мин⁻¹; $K_{ш} = 1,5 \dots 2$ — коэффициент, учитывающий дополнительные потери в шпиндельном узле; $n_{ш}$ — частота вращения шпинделя станка, мин⁻¹; $d_{ш}$ — диаметр подшипниковых шеек шпинделя, мм.

Для приводов с k -ми разветвляющимися кинематическими цепями (многошпиндельные токарные автоматы, токарно-винторезные станки) необходимая мощность двигателя определяется как сумма одновременно используемых мощностей по отдельным цепям:

$$N_d = \sum_{i=1}^k N_{di}, \quad (4.2)$$

где N_{di} — требуемая мощность от двигателя в i -й кинематической цепи.

При работе в режимах S3...S5 используют как обычные синхронные двигатели, так и двигатели с повышенным скольжением. В этом случае двигатель выбирают по рассчитанной требуемой мощности N_d и проверяют по предельно допустимому числу пусков в час [67]. В тех случаях, когда устанавливается ограничение на время разгона и торможения привода, выбранный двигатель проверяют по

времени разгона t_p и торможения t_t соответственно по выражениям:

$$t_p = 0,105 n_n (J_d + J_n) / (M_{п. ср} - M_c); \quad (4.3)$$

$$t_t = 0,105 n_n (J_d + J_n) / (M_{т. ср} + M_c), \quad (4.4)$$

где J_d — момент инерции ротора двигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; J_n — приведенный к валу двигателя момент инерции вращающихся деталей привода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; n_n — номинальная частота вращения двигателя, мин^{-1} ; $M_{п. ср} \approx M_{т. ср} = 0,5 M_n (m_n + m_k)$ — средний момент соответственно пусковой и торможения, $\text{Н} \cdot \text{м}$; $M_n = 10^3 N_d / 0,105 n_n$ — номинальный момент двигателя, $\text{Н} \cdot \text{м}$; $m_n = \frac{M_n}{M_{п. ср}}$; $m_k = \frac{M_{т. ср}}{M_n}$ — отноше-

ния пускового и максимального моментов к номинальному; принимаются по каталогам двигателей; M_c — момент сил сопротивления, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Большинство режимов работы приводов главного движения станков может быть приведено к одному из режимов S6...S8. Режимы S3...S5 также можно рассматривать как частные случаи этих режимов. При таких режимах двигателя предварительно выбирают по номинальной мощности N_n при известной максимальной мощности, рассчитанной по формулам (4.1), (4.2), или определяемой по нагрузочному графику работы станка:

$$N_n = N_{д \max} / \lambda, \quad (4.5)$$

где $\lambda = 0,72 m_k$ — коэффициент перегрузки, при предварительном выборе можно принимать $\lambda = 1,5$. Предварительно выбранный двигатель проверяют на нагрев методом средних потерь по следующему условию:

$$\Delta N_n \geq \Delta N_{ср}, \quad (4.6)$$

где ΔN_n — номинальная мощность потерь в двигателе при работе с номинальной нагрузкой в режиме S1; $\Delta N_n = N_n \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)$; $\Delta N_{ср}$ — средняя мощность потерь за цикл

работы станка, $\Delta N_{ср} = \sum_{i=1}^q \Delta N_i t_i / t_{ц}$; t_i — продолжительность i -го цикла работы станка при мощности двигателя N_i ; q — число интегралов в цикле; $\Delta N_i = N_i (1/\eta_i - 1)$ — мощность потерь в i -м интервале; η , η_i — КПД двигателя при соответствующей мощности, определяются по каталогу [67].

При выборе двигателя по методу средних потерь для режимов S3...S5 необходимо иметь в виду, что разгоны, торможения, простои ухудшают условия охлаждения двигателя, что учитывается при расчете $\Delta N_{\text{ср}}$ [67].

Когда в процессе обработки детали на станке с ЧПУ приходится бесступенчато регулировать частоту вращения в широком диапазоне, а электродвигатель постоянного тока имеет диапазон $R_N < R_n$, т. е. не позволяет вести обработку в зоне II (рис. 4.3) при $N_d = \text{const}$, то применяют комбинированный привод, представляющий сочетание двигателя постоянного тока с бесступенчатым регулированием и ступенчатой коробки передач.

В этом случае общий диапазон регулирования частот шпинделя:

$$R_n = R_N R_{\text{ст}}, \quad (4.7)$$

где $R_{\text{ст}}$ — диапазон регулирования ступенчатой коробки передач.

Если $R_{\text{ст}} \leq 8$, то можно использовать одну группу передач ($R_{\text{ст}} = R_{\Gamma 1}$). Если $R_{\text{ст}} > 8$, то используют две группы передач ($R_{\text{ст}} = R_{\Gamma 1} R_{\Gamma 2}$). Чтобы спроектировать ступенчатую структуру привода, бесступенчатую структуру двигателя представляют как фиктивную ступенчатую структуру со знаменателем φ , в которой число ступеней

$$p_\varphi = \frac{\lg R_N}{\lg \varphi} + 1. \quad (4.8)$$

Фиктивная структура принимается основной группой с характеристикой $x_\varphi = 1$. Тогда характеристика I группы ступенчатой структуры $x_1 = p_\varphi$, а характеристика II группы подбирается из условия достижения необходимого диапазона R_n .

С учетом фиктивной группы общее число ступеней частот

$$z_{\text{общ}} = p_\varphi z = p_\varphi (x_\varphi = 1) p_1 (x_1 = p_\varphi) p_2 (x_2), \quad (4.9)$$

где p_1 , p_2 — количество передач соответственно в I и II группах ступенчатых передач; $z = p_1 p_2 \geq \lg R_n / \lg R_N$ — число передач ступенчатой структуры; x_2 — характеристика II группы, которую необходимо определить.

Для определения x_2 находим $R_{\Gamma 1} = \varphi^{x_1(p_1-1)}$, затем $R_{\Gamma 2} = \frac{R_{\text{ст}}}{R_{\Gamma 1}} \rightarrow$. Так как $R_{\Gamma 2} = \varphi^{x_2(p_2-1)}$, то

$$x_2 = \frac{\lg R_{\Gamma 2}}{\lg \varphi (p_2 - 1)}. \quad (4.10)$$

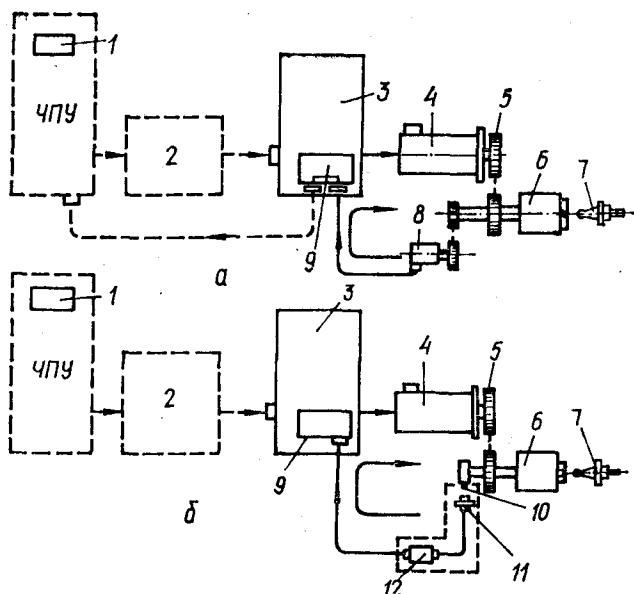


Рис. 4.4. Принципиальные схемы позиционирования шпинделя с использованием:

а — кодирования позиций; *б* — магнитного датчика; 1 — система ЧПУ; 2 — контрольная цепь; 3 — узел обслуживания шпиндельной бабки; 4 — двигатель; 5 — зубчатая или ременная передача; 6 — шпиндель; 7 — инструмент; 8 — устройство кодирования положений; 9 — ориентационная цепь; 10 — намагниченный элемент; 11 — магнитный датчик; 12 — усилитель

Чтобы избежать зон, в которых нет бесступенчатого регулирования, необходимо принимать $x_1 = p_\phi - 1$.

В ступенчатой структуре для снижения шума и обеспечения требуемой точности станка необходимо выдерживать максимально допустимые окружные скорости передач: для прямозубых колес в переключаемых передачах при $n_{\max} < 1500 \text{ мин}^{-1}$ не более 9 м/с; для косозубых в станках нормальной точности при $n_{\max} < 2500 \text{ мин}^{-1}$ не более 14 м/с; для ременных передач в высокоточных станках при $n_{\max} > 2500 \text{ мин}^{-1}$ не более 25 м/с.

Для фиксированного останова шпинделя от системы ЧПУ применяют дополнительные цепи ориентирования (рис. 4.4).

Для сокращения времени проектирования приводов главного движения применяют ЭВМ [32]. Подсистема «Главный привод» входит в общую САПР. Она предназна-

чена для синтеза кинематической структуры, проектных и проверочных расчетов элементов привода с электродвигателями переменного и постоянного тока и механической коробкой скоростей в режиме диалога между конструктором и ЭВМ. Использование графопостроителя позволяет выполнить графическое изображение сетки, эскизов развертки и свертки коробки скоростей.

4.3. Выбор и расчет привода подач

В станках с ЧПУ последним звеном кинематической цепи привода подачи являются тяговые устройства, которые должны удовлетворять следующим требованиям: обеспечивать заданный закон перемещения и скорости; иметь высокий КПД; обладать высокой жесткостью, которая является одной из главных характеристик и влияет на статические и динамические погрешности исполнительного узла; иметь малый момент инерции, что определяет быстродействие привода и точность обработки; обладать высокой чувствительностью к малым перемещениям; не образовывать зазоры, когда под действием внешней нагрузки имеет место раскрытие стыков; иметь минимальный износ в процессе эксплуатации.

Первоначальным этапом расчета привода является выбор двигателя.

Исключение силового редуктора в приводах подач станков с ЧПУ обусловило снижение общего момента инерции механизма и увеличение допустимого для привода по условиям механической прочности ускорения. Это обеспечило сокращение времени переходных процессов, увеличение производительности станков, улучшение качества обработки вследствие повышения быстродействия.

Исходными данными для выбора двигателя привода подачи служат: силы трения в опорах, направляющих и в передаче; передаточные отношения механических звеньев привода (коробки подач, винтовой пары, передачи рейка-шестерня и т. д.); масса перемещаемого органа вместе с деталью или другим органом; моменты инерции механических звеньев; КПД механических передач; скорости быстрого хода и установочных перемещений, а также диапазон рабочих подач; нагрузки и т. д.

Последовательность выбора включает [56, 67]:

1. Определение скоростей двигателя

для передачи винт-гайка

$$n_d = v u_p / t_v, \quad (4.11)$$

для передачи рейка-шестерня

$$n_d = v u_p / \pi D, \quad (4.12)$$

где t_v — шаг винта; D — диаметр шестерни; v — скорость перемещения рабочего органа; u_p — передаточное отношение кинематической цепи от двигателя до рабочего органа.

2. Определение моментов инерции, приведенных к валу двигателя,

$$J = J_{\text{max}} + J_v + J_n, \quad (4.13)$$

где J_{max} , J_v , J_n — приведенные моменты инерции преобразовательного механизма, ходового винта и зубчатой передачи.

3. Определение моментов двигателя

$$M_d = M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}, \quad (4.14)$$

где $M_{\text{ст}}$ — статический момент, определяемый усилием, передаваемым в направлении подачи при установившемся движении рабочего органа; $M_{\text{дин}}$ — динамический момент.

При резании статический момент равен сумме моментов от составляющих сил резания $M_{\text{рез}}$ и трения $M_{\text{тр}}$ в подвижных звеньях:

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{рез}} + M_{\text{тр}}. \quad (4.15)$$

Для вертикальных и наклонных осей координат должен быть учтен дополнительный момент на двигателе C_G от полной или неуравновешенной части силы тяжести перемещаемых узлов.

Момент на двигателе от сил трения складывается из моментов трения в направляющих $M_{\text{напр}}$, в паре винт — гайка M_v и подшипниках ходового винта $M_{\text{подш}}$ от предварительного натяга

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{напр}} + M_v + M_{\text{подш}}. \quad (4.16)$$

При повторно-кратковременном режиме двигатель выбирается не по $M_{\text{ст}}$, а по моменту

$$M_{\text{ст}}' = M_{\text{ст}} \text{ПВ}/100, \quad (4.17)$$

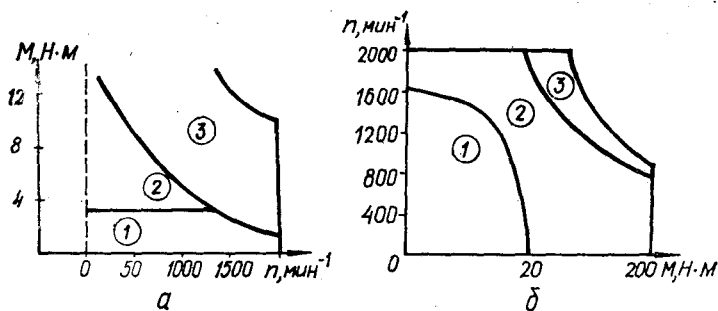


Рис. 4.5. Примеры механических характеристик электродвигателей постоянного тока:

a — фирмы «Fapic» *б* — отечественного производства; зоны: 1 — длительной работы; 2 — кратковременной работы; 3 — работы в переходных режимах

где ПВ — продолжительность включения двигателя,

$$\text{ПВ} = \left(\sum_{i=1}^n t_{pi} 100 \% \right) / \left(\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{j=1}^k t_{oj} \right), \quad (4.18)$$

где t_{pi} — продолжительность i -го этапа работы привода; t_{oj} — продолжительность j -й остановки; n — число этапов работы за цикл; k — число остановок за цикл.

В зависимости от режима работы предварительно выбирается двигатель по $M_{ст}$ или $M'_{ст}$. Затем по таблицам технических данных и механической характеристике $M = f(n)$ (рис. 4.5) продолжительного и повторно-кратковременного режимов работы для принятого двигателя выбирают все параметры, необходимые для проведения дальнейшего расчета.

Динамический момент в приводе двигателя постоянного тока:

$$M_{дин} = (J_{\Sigma} + J_{д}) \varepsilon, \quad (4.19)$$

где $J_{д}$ — собственный момент инерции двигателя; ε — ускорение, развиваемое двигателем. При разгоне двигателя по экспоненциальному закону

$$\varepsilon = 0,63 \omega_{б} / T_{м},$$

где $\omega_{б}$ — угловая скорость вала двигателя, соответствующая движению рабочего органа на быстром ходу; $T_{м}$ — электрохимическая постоянная времени двигателя.

В результате проведенных расчетов определяется момент двигателя M_1 в переходных режимах, необходимый

для преодоления сил трения и сообщения инерционным массам механизма заданного ускорения, момент двигателя M_2 в установившихся режимах на рабочих подачах по преодолению сил трения и составляющей от силы резания при обработке детали и момент двигателя M_3 в установившемся режиме при быстром ходе:

$$M_1 = M_{\text{тр}} + M_{\text{дин}}; \quad M_2 = M_{\text{рез}} + M_{\text{тр}}; \quad M_3 = M_{\text{тр}}.$$

По рассчитанным M_1 , M_2 , M_3 и частотам $n_{\text{б.к.}}$, $n_{\text{рх max}}$, $n_{\text{рх min}}$ выбирают двигатель привода, параметры которого должны удовлетворять следующим неравенствам:

$$M_{\text{дmax}} \geq M_1; \quad M_{\text{н}} \geq M_2; \quad M_{\text{б.к.}} \geq M_3; \quad n_{\text{max}} \geq n_{\text{б.к.}}$$

Если предварительно выбранный двигатель не удовлетворяет хотя бы одному из приведенных неравенств, то надо выбрать двигатель больших габаритов и повторить расчет.

4.4. Расчет точности конечных положений рабочего органа поступательного действия

Рабочими органами поступательного действия являются суппорты, элементы транспортно-загрузочных устройств (тактовые столы, палеты), подвижные шпиндельные бабки и др. Точность позиционирования зависит от ряда факторов, степень влияния которых рассмотрим из анализа процесса останова рабочего органа по координате X (рис. 4.6, а), имеющего массу m и движущегося со скоростью v от привода M с временем срабатывания (отключения) $t_{\text{ср}}$. После получения команды от системы ЧПУ на останов рабочего органа последний переместится на величину:

$$\Delta \bar{x} = \Delta \bar{x}_1 + \Delta \bar{x}_2, \quad (4.20)$$

где $\Delta \bar{x}_1$ — математическое ожидание перебега рабочего органа со скоростью v за время срабатывания $t_{\text{ср}}$ системы отключения двигателя M , равное $\Delta \bar{x}_1 = vt_{\text{ср}}$; $\Delta \bar{x}_2$ — математическое ожидание перебега рабочего органа после срабатывания (отключения) двигателя M и останова за счет сил сопротивления (торможения).

Величина $\Delta \bar{x}_2$ определяется из условия перехода кинетической энергии движущегося рабочего органа $E =$

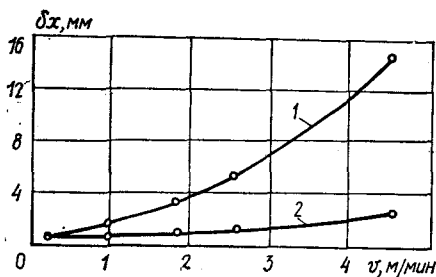


Рис. 4.7. Зависимость случайной величины разброса конечных положений суппорта от скорости:

1 — при свободном беге; 2 — при торможении электромагнитной муфты

подвижных узлов в момент отключения [39]; при отсутствии тормозных устройств и механизмов автоматического зажима рабочих органов силы сопротивления F_c равны силам трения F_t и зависят от веса перемещающихся частей, т. е. $F_c = F_t = Nf = Gf = mgf$, где f — коэффициент трения в направляющих. В этом случае

$$\Delta \bar{x}_2 = \frac{mv^2}{2Gf} = \frac{v^2}{2gf}. \quad (4.22)$$

При установке дополнительных автоматических зажимных или тормозных устройств

$$\Delta \bar{x}_2 = \frac{mv^2}{2(G + T_\Sigma)f}, \quad (4.23)$$

где T_Σ — суммарная сила зажима, направленная нормально к поверхности направляющих рабочего органа.

На точность позиционирования влияет также случайный разброс всех величин, входящих в формулу (4.21). Приняв приращение функции и ограничившись первым приближением (частными производными первого порядка), получим выражение для разброса перемещений:

$$\delta x = \delta x_1 + \delta x_2; \\ \delta x = v t_{cp} \left(\frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta t_{cp}}{t_{cp}} \right) + \frac{mv^2}{2F_0} \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{2\Delta \sigma}{v} - \frac{\Delta F_c}{F_c} \right). \quad (4.24)$$

Таким образом, суммарные (общие) погрешности позиционирования рабочего органа представляют сумму систе-

рис. 4.6, б); 2) уменьшать массу m подвижных частей рабочего органа в момент отключения движения за счет правильного выбора положения (места) механизма отключения; 3) уменьшать время срабатывания t_{cp} , используя быстродействующие механизмы; 4) повышать силы сопротивления F_c постановкой тормозных устройств (рис. 4.7) и зажимом подвижных узлов в момент отключения [39]; при отсутствии тормозных устройств и механизмов автоматического зажима рабочих органов силы сопротивления F_c равны силам трения F_t и зависят от веса перемещающихся частей, т. е. $F_c = F_t = Nf = Gf = mgf$, где f — коэффициент трения в направляющих. В этом случае

матических и случайных составляющих

$$\Delta = \Delta\bar{x} \pm 0,5\delta x, \quad [4.25]$$

откуда предельные значения (рис. 4.6, а)

$$\Delta_{\max} = \Delta\bar{x} + 0,5\delta x, \quad \Delta_{\min} = \Delta\bar{x} - 0,5\delta x.$$

Величина δx может быть уменьшена за счет стабилизации величин v , $t_{\text{ср}}$, m , F_c , т. е. при уменьшении разброса Δv , $\Delta t_{\text{ср}}$, Δm , ΔF_c .

Остановка поступательно движущегося рабочего органа (суппорта, стола и т. п.) точно в требуемом положении может быть осуществлена жестким упором; предварительным выключением привода с последующим свободным выбегом или торможением рабочего органа; следящим движением.

Компоновка и схема нагружения рабочего органа в большей мере влияет на силы трения в направляющих и их колебания, а вследствие этого на достижимую равномерность движений и точность конечных положений [39]. Возможные колебания коэффициента трения вызывают гораздо большие колебания коэффициента передачи сил $\Delta e = \Delta P_{\text{вх}} / \Delta P_{\text{вых}}$, где $\Delta P_{\text{вх}}$, $\Delta P_{\text{вых}}$ — разброс входной и выходной сил, при консольной компоновке в случае больших плеч приложения действующих сил относительно направляющих, а также в случае, когда силы реакций в направляющих создаются движущими силами, а не силами сопротивления. Поэтому рабочий орган, у которого велики плечи приложения действующих сил, особенно движущей силы, гораздо чувствительней к колебаниям сил трения и рассеяние его конечных положений больше, чем при небольших плечах.

4.5. Расчет точности конечных положений рабочего органа поворотного и вращательного действия

В станках с ЧПУ широко применяют различные механизмы периодического поворота с последующей фиксацией положения поворачиваемых узлов. К таким узлам относят: 1) шпиндельные барабаны, которые содержат вращающиеся шпиндели с патронами для закрепления обрабатываемых деталей; 2) позиционные столы для периодического подвода закрепленных на них заготовок к различным инструментам или в рабочую зону станка; иногда заготовки закрепля-

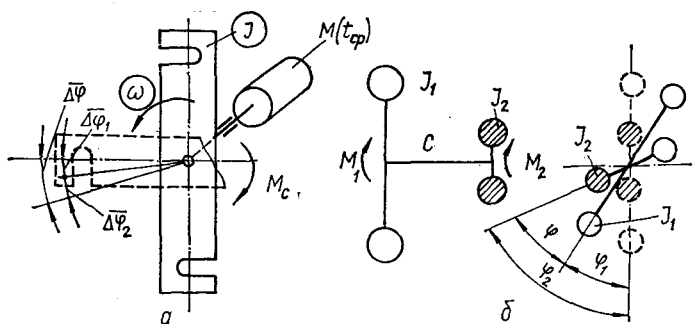


Рис. 4.8. Схема упрощенных моделей процесса углового позиционирования:

а — рабочего органа; б — привода рабочего органа

ются в поворотных приспособлениях на позиционном столе, при повороте которого могут одновременно поворачиваться детали в приспособлении для поочередной обработки различных сторон; 3) револьверные головки для поочередного подвода инструмента к обрабатываемой детали; 4) магазины инструментов; 5) захватные органы промышленных роботов и автооператоры («однорукие», «двухрукие» и «многорукие»), поворачивающиеся на заданный угол и работающие во взаимодействии с загрузочно-разгрузочными устройствами для заготовок и магазинами для инструментов; 6) шпиндельные узлы токарных станков, при необходимости выполнения операций поперечного сверления, фрезерования, автоматической смены зажимных патронов или их элементов.

Важнейшие требования к поворотным механизмам — точность и быстродействие позиционирования, находящиеся в противоречии, так как при повышении быстродействия снижается точность из-за роста динамических нагрузок.

Механизмы поворота рабочего органа могут быть периодического действия, а также непрерывно вращающиеся, например, шпиндели с последующим фиксированным остановом на заданном угле.

Для расчета погрешности углового позиционирования рабочего органа воспользуемся расчетной схемой (рис. 4.8, а). Допустим, рабочим органом является «двухрукий» автооператор с моментом инерции J , поворачиваемый с угловой скоростью ω на заданный угол, например 90° , от электродвигателя M , отключаемого за время $t_{\text{ср}}$.

После получения команды от системы ЧПУ на останов автооператора последний повернется дополнительно на угол

$$\Delta\bar{\varphi} = \Delta\bar{\varphi}_1 + \Delta\bar{\varphi}_2, \quad (4.26)$$

где $\Delta\bar{\varphi}_1$ — математическое ожидание перебега рабочего органа со скоростью ω за время $t_{\text{ср}}$; $\Delta\bar{\varphi}_2$ — математическое ожидание перебега рабочего органа после отключения двигателя M за счет момента сил сопротивления M_c .

Величина $\Delta\bar{\varphi}_1 = \omega t_{\text{ср}}$, а величина $\Delta\bar{\varphi}_2$ определяется из условия перехода кинетической энергии поворотного органа $E = J\omega^2/2$ в работу моментов сил сопротивления $A_c = M_c \Delta\bar{\varphi}_2$, откуда $\Delta\bar{\varphi}_2 = J\omega^2/2M_c$.

Таким образом,

$$\Delta\bar{\varphi} = \omega t_{\text{ср}} + J\omega^2/2M_c, \quad (4.27)$$

а при случайном разбросе параметров ($\Delta\omega$, $\Delta t_{\text{ср}}$, ΔJ и ΔM_c) рассеяние

$$\delta\varphi = \omega t_{\text{ср}} \left(\frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta t_{\text{ср}}}{t_{\text{ср}}} \right) + \frac{J\omega^2}{2M_c} \left(\frac{\Delta J}{J} + \frac{2\Delta\omega}{\omega} - \frac{\Delta M_c}{M_c} \right). \quad (4.28)$$

Суммарная погрешность углового позиционирования рабочего органа при свободном выбеге

$$\psi = \Delta\bar{\varphi} \pm 0,5\delta\varphi, \quad (4.29)$$

а предельные погрешности: $\psi_{\text{max}} = \Delta\bar{\varphi} + 0,5\Delta\varphi$; $\psi_{\text{min}} = \Delta\bar{\varphi} - 0,5\delta\varphi$.

Основными мероприятиями по повышению точности углового позиционирования рабочего органа, как видно из формул (4.27) и (4.28), являются: 1) снижение угловой скорости ω с переходом на «ползучую» при подходе к конечному положению; 2) введение дополнительных моментов торможения; 3) установка фиксирующих устройств и механизмов.

Динамическая система привода поворотного рабочего органа может быть приведена к двухмассовой с упругой связью (рис. 4.8, б). Могут быть различные варианты торможения: 1) постоянные моменты торможения, приложенные к массам с моментами инерции J_1 (ротора двигателя) и J_2 (рабочего органа и других частей, приведенных к нему); 2) движущий момент M_1 уменьшается, а тормозной момент M_2 увеличивается с течением времени и т. д.

При большой жесткости связи между массами, когда ее податливостью можно пренебречь, угол поворота масс, соответствующий остановке

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \frac{(J_1 + J_2) \omega_1^2}{2(M_1 + M_2)}. \quad (4.30)$$

При учете жесткости связи, когда тормозные моменты M_1 и M_2 постоянные:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 &= -C(\varphi_1 - \varphi_2) - M_1; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 &= C(\varphi_1 - \varphi_2) - M_2. \end{aligned}$$

После вычитания второго уравнения из первого и замены $\varphi = -(\varphi_1 - \varphi_2)$

$$\ddot{\varphi} = -\left(\frac{C}{J_1} + \frac{C}{J_2}\right)\varphi + \frac{M_2}{J_2} - \frac{M_1}{J_1}. \quad (4.31)$$

Обозначим: $C/J_1 + C/J_2 = \omega_0^2$, ω_0 — частота собственных колебаний системы. Тогда уравнение (4.31) будет иметь вид

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = \frac{M_2}{J_2} - \frac{M_1}{J_1}, \quad (4.32)$$

а его решение

$$\varphi = \frac{M_2 J_1 - M_1 J_2}{C(J_1 + J_2)} (1 - \cos \omega_0 t). \quad (4.33)$$

Из уравнения (4.33) следует, что одновременно с торможением системы происходят относительные колебания движения масс, вызывающие дополнительный разброс конечных положений рабочего органа, который резко уменьшается с увеличением частоты собственных колебаний ω_0 [39]. Для уменьшения угла φ закручивания одной массы относительно другой необходимо: а) повысить жесткость C , т.е. увеличить частоту ω_0 ; б) обеспечить тормозные моменты, приложенные к приведенным массам, пропорциональными моментам инерции; в) уменьшить отношение J_1/J_2 .

Высокая точность углового позиционирования рабочих органов обеспечивается применением механизмов фиксации [12, 39, 47].

Одним из основных направлений повышения точности и жесткости фиксации положения поворотных рабочих органов является создание механизмов, способных усреднять ошибки изготовления фиксирующих элементов при позиционировании [43]. Анализ известных конструкций

фиксирующих механизмов такого типа показал, что их работу можно свести к двум принципиальным схемам: 1) зафиксированное положение рабочего органа определяется поверхностями фиксирующих элементов; 2) зафиксированное положение рабочего органа определяется фиксирующими поверхностями элементов в угловом и радиальном направлении, а вдоль оси поворота — опорной поверхностью.

Следует отметить, что в большинстве известных механизмов фиксации, работающих по методу усреднения ошибки, перед поворотом рабочего органа производится его перемещение вдоль оси для расцепления фиксирующих поверхностей и создания зазора между их торцевыми поверхностями. Известны также механизмы фиксации, работающие без осевого перемещения рабочего органа.

4.6. Расчет податливости шпиндельных узлов

К шпиндельным узлам (ШУ) предъявляются следующие основные требования:

1. Надежность передачи на заготовку или инструмент крутящего момента.

2. Точность вращения, определяемая радиальными и осевыми биениями переднего конца шпинделя; для станков общего назначения в зависимости от класса точности станка точность вращения должна соответствовать стандартным значениям; для специальных станков она зависит от требуемой точности обработки:

$$\Delta \leq \Delta_d/3, \quad (4.34)$$

где Δ — биение шпинделя; Δ_d — допуск на лимитирующий размер готового изделия.

3. Жесткость (радиальная и осевая), определяемая отжатыми шпинделя под нагрузкой на переднем конце, Н/мкм:

$$j = P/y. \quad (4.35)$$

Исходя из нормальной работы подшипников жесткость на участке между опорами ограничивается 250...500 Н/мкм (большие значения — для станков повышенной точности), что лимитирует диаметр шпинделя:

$$d = \sqrt[4]{(0,05...0,1) l^3}, \quad (4.36)$$

где l — расстояние между опорами шпинделя.

Возможно также определение жесткости исходя из требований к точности обработки

$$y \leq \Delta_d/3. \quad (4.37)$$

4. Высокие динамические качества (виброустойчивость), определяемые амплитудой колебаний переднего конца шпинделя и частотой собственных колебаний, которая не должна быть ниже 500...600 Гц.

5. Минимальные тепловыделения и температурные деформации ШУ. Тепловыделения регламентируются допустимым нагревом подшипников.

6. Долговечность, зависящая от долговечности опор, которая в свою очередь во многом определяется эффективностью системы смазывания, уплотнений, частоты вращения, предварительного натяга в подшипниках качения и т. д. Долговечность ШУ не регламентируется, ее определяют по усталости, износу деталей подшипников или потере смазочных свойств масла.

7. Быстрое и точное закрепление инструмента или обрабатываемой детали при автоматизации этой операции.

8. Минимальные затраты на изготовление, сборку и эксплуатацию при удовлетворении всех остальных требований.

Конструкция ШУ зависит от типа и размера станка, класса его точности, предельных параметров процесса обработки (максимальной частоты вращения $n_{\max}$, эффективной мощности привода). Передние концы шпинделей для большинства станков стандартизированы.

Концы шпинделей выполняются фланцевыми (ГОСТ 12595—85, ГОСТ 12593—72) — для токарных, револьверных и шлифовальных станков; резьбовыми (ГОСТ 16868—71) — для токарных, токарно-винторезных и револьверных станков; с конусностью 7 : 24 (конус Морзе по ГОСТ 25557—82) — для фрезерных, сверлильных и расточных станков; с зажимными цангами (ГОСТ 6945—84, ГОСТ 2876—80) — для токарных автоматов и револьверных станков [54].

Для шпинделей станков нормальной точности применяются конструкционные стали 45, 50, 40Х с поверхностной закалкой (обычно с нагревом ТВЧ) до HRC , 49,3...57,1, шпиндели сложной формы изготавливаются из сталей 50Х, 40ХГР с объемной закалкой до HRC , 57,1...61. Для слабонагруженных шпинделей высокоточных станков применяются азотируемые стали 38Х2М0А, 38ХВЮА с закалкой до HRC , 63,9...68,9.

Тип опор шпинделей выбирается на основании требований по точности обработки и быстроходности, определяемой скоростным параметром dn , где d — диаметр отверстия под подшипник, мм; n — частота вращения шпинделя, мин⁻¹. В табл. 4.2 приведены данные о точности и скорости ШУ на разных опорах, а табл. 4.3 — характеристика быстро-

4.2. Точностные и скоростные параметры ШУ

Опоры	Радиальное и осевое биение шпинделя, мкм	Отклонение от круглости обработанного изделия, мкм	Скоростной параметр $(dn)_{\max} 10^{-3}$
Качения	1,00	1,0	0...10
Гидродинамические	0,50	0,5	1...10
Гидростатические	0,05	0,2	0...15
Аэростатические	0,10	0,5	5...40

4.3. Скоростные характеристики ШУ при различных смазках

Опоры	Пластичный смазочный материал		Жидкое масло		Масляный туман	
	$dn \cdot 10^{-3}$	v , м/с	$dn \cdot 10^{-3}$	v , м/с	$dn/10^{-3}$	v , м/с
Радиально-упорные шарикоподшипники ($\alpha = 12...18^\circ$)	7,0...7,5	37...39	—	—	9...13	46...68
Радиально-упорные шарикоподшипники ($\alpha = 25^\circ$)	6,0...6,7	31...35	—	—	8...12	42...63
Упорно-радиальные шарикоподшипники ($\alpha = 60^\circ$)	2,5...2,8	13...15	3,3...3,8	17...20	—	—
Радиальные двухрядные роликоподшипники	3,5...3,8	18...20	3,6...4,5	19...24	—	—
Конические роликоподшипники	2,0...2,3	11...12	3,0...3,5	16...18	—	—

ходности опор качения с диаметром отверстия 50...150 мм в зависимости от вида смазки (v — окружная скорость шейки шпинделя).

Расстояние между опорами для шпинделей с консольным креплением изделия должно быть равным: для токарных

станков не менее 2,5 внутренних диаметров подшипника передней опоры, для кругло- и плоскошлифовальных — не менее 4...5 диаметров передней опоры шпинделя и не менее 1,5 диаметров шлифовального круга, для внутришлифовальных — не менее 4...5 диаметров подшипника передней опоры.

Для всех станков отношение длины шпинделя (от центра задней опоры до переднего фланца) к диаметру передней опорной шейки шпинделя рекомендуется 4,5...6. Длина консоли от передней опоры до крайнего торца изделия или инструмента должна быть не более $(1/5...1/3) l$ и рекомендуется минимально возможной. При расположении инструмента между опорами расстояние l минимально возможное (для узких шлифовальных кругов примерно равно диаметру круга).

Для определения оптимальных параметров шпиндельных узлов рассчитывается жесткость с учетом демпфирующих свойств шпинделя. При этом шпиндель заменяется балкой ступенчато-переменного сечения на податливых точечных опорах, обладающих в общем виде радиальной и угловой жесткостью, не зависящей от нагрузки. Тип опор выбирается в зависимости от типа подшипника. Принято [4, 32], что радиальные подшипники обладают только радиальной жесткостью; радиально-упорные — радиальной, осевой, угловой; упорные и упорно-радиальные — осевой и угловой жесткостью. При двух шариковых подшипниках расчетная схема имеет вид балки на ножевых опорах (рис. 4.9, а). Если в передней опоре находятся два шариковых подшипника или один роликовый, можно считать, что в этом сечении шпиндель не имеет поворота (рис. 4.9, б). Если в передней опоре применен подшипник скольжения (рис. 4.9, в), он создает реактивный момент $M_p = (0,3...0,35) M_{изг}$ (в передней опоре). При двух опорах скольжения (рис. 4.9, г) сначала необходимо определить прогиб y_1 при деформации шпинделя в пределах радиального зазора подшипника, рассматривая его как балку на двух ножевых опорах. Если сила вызывает большую деформацию, следует определить прогиб y_2 конца шпинделя от той составляющей силы, которая деформирует его как консольную балку с заделкой в передней опоре. Суммарный прогиб $y = y_1 + y_2$. К прогибу шпинделя добавляется деформация на упругих опорах, при этом шпиндель рассматривается как жесткое тело.

Действие нагрузки от звеньев привода, которое необхо-

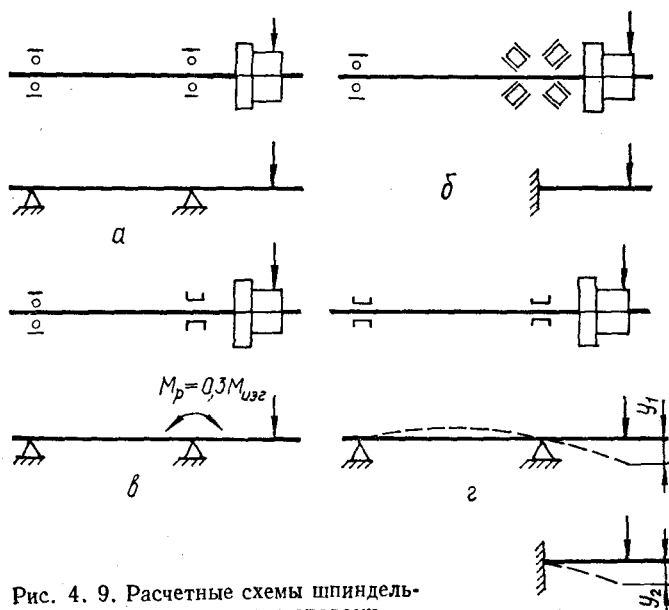


Рис. 4. 9. Расчетные схемы шпиндельных узлов с различными опорами

димо учитывать при расчете ШУ точных станков, в данных схемах не рассматривается.

На деформацию шпинделя и реакцию в опорах влияет положение приводного зубчатого колеса, передающего вращение на шпиндель. В схеме I (рис. 4.10) результирующая сила R , определяющая реакции R_1 и R_2 в передней и задней опорах, равна сумме силы резания P и нагрузки Q_1 на зубчатое колесо. В схеме II $R = P - Q_{II}$. Схема II выгоднее, если необходимо уменьшить реакцию в передней опоре, схема I — если требуется минимальный прогиб шпинделя, $y_1 < y_{II}$. Поэтому схема I чаще применяется в точных станках, а схема II — в станках для черновой обработки.

При приближенных проектных расчетах шпиндель заменяют балкой на двух опорах с силой P , приложенной на консоли, т. е. на расстоянии a от передней опоры (рис. 4.11, а).

Суммарное радиальное перемещение конца шпинделя без учета сдвига (не более 3...6 % от общих перемещений) от действия поперечных сил:

$$y_{\Sigma} = y_1 + y_2, \quad (4.38)$$

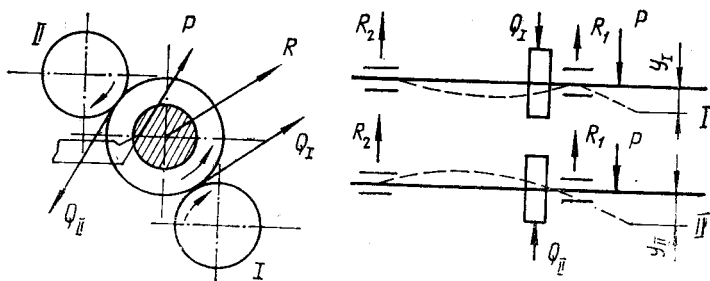


Рис. 4.10. Влияние положения приводного зубчатого колеса на деформации переднего конца шпинделя

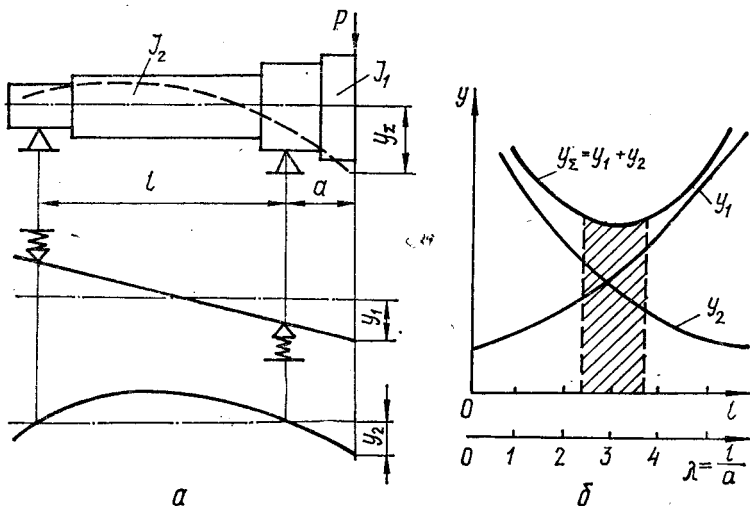


Рис. 4.11. Изменение расстояния между опорами:
а — расчетная схема, б — упругие перемещения шпинделя

где y_1 — перемещение, вызванное податливостью опор;
 y_2 — перемещение, вызванное изгибом тела шпинделя.

Из известных формул сопротивления

$$y_z = \frac{Pa^2}{3E} \left[\frac{a}{J_2} + \frac{l(1-\varepsilon)}{J_1} \right] + P \left\{ e_1 \left[\frac{a(1-\varepsilon) + l}{l} \right]^2 + e_2 (1 - \varepsilon \frac{a^2}{l^2}) \right\}, \quad (4.39)$$

где l — расстояние между опорами; E — модуль упругости; J_1 и J_2 — осевые моменты инерции шпинделя соответственно на консоли и между опорами; ε — коэффициент

зашемления в передней опоре (0,75...0,1 в зависимости от установленных подшипников качения и 0 — для гидростатических); e_1 и e_2 — податливости передней и задней опор шпинделя.

В соответствии с формулой (4.39) податливость шпиндельного узла можно представить

$$e_{\Sigma} = \frac{1}{l_{\Sigma}} = \frac{y}{P} = \frac{a^2}{3E} \left[\frac{a}{J_2} + \frac{l(1-\varepsilon)}{J_1} \right] + e_1 \left[\frac{a(1-\varepsilon) + l}{l} \right]^2 + e_2 (1-\varepsilon) \frac{a^2}{l^2}. \quad (4.40)$$

Эту зависимость обычно используют для оптимизации расстояния l (или $\lambda = l/a$) между опорами (рис. 4.11, б) при условии, что податливость e_{Σ} стремится к минимуму, если $de_{\Sigma}/dl = 0$ (или $de_{\Sigma}/d\lambda = 0$). При $\varepsilon = 0$

$$l^3 - [6EJ_2 e_1 \frac{l}{a} + 6EJ_2 (e_1 + e_2)] = 0. \quad (4.41)$$

Из решения кубического уравнения получаем $l_{\text{опт}}$ (или $\lambda_{\text{опт}} = l_{\text{опт}}/a$). Обычно в $\lambda_{\text{опт}}$ пределах 2,5...3,5.

Демпфирующие свойства ШУ можно количественно оценить с помощью логарифмического декремента колебаний $\lambda_{\text{ш}} = \ln(A_i/A_{i+1}) > [\lambda]$, где A_i, A_{i+1} амплитуды соседних по периоду свободных затухающих колебаний узла. Допускаемые минимальные значения $[\lambda]$ ШУ станков различных типов следующие [59]: токарных—0,23, фрезерных—0,27, шлифовальных—0,30, радиально-сверлильных—0,13. Приблизенно $\lambda_{\text{ш}} = 0,5 \frac{\psi_1 \psi_2^{1/2}}{a^2 \psi_1 + \psi_2 (l+a)^2}$, где ψ_1, ψ_2 — относительное рассеяние энергии соответственно в передней и в задней опорах.

Демпфирующие свойства ψ_0 используемых в ШУ подшипников качения приведены в табл. 4.4.

4.4. Демпфирующие свойства подшипников качения ШУ

Стандарт	Тип подшипника	ψ_0
ГОСТ 8338—75	Шариковый радиальный однорядный	0,23
ГОСТ 6874—75	» упорный однорядный одинарный	0,26
ГОСТ 831—75	» радиально-упорный однорядный	0,21
ГОСТ 333—75	Роликовый конический однорядный	0,35
ГОСТ 8328—75	» радиальный однорядный	0,36
ГОСТ 7634—75	» » двухрядный	0,40

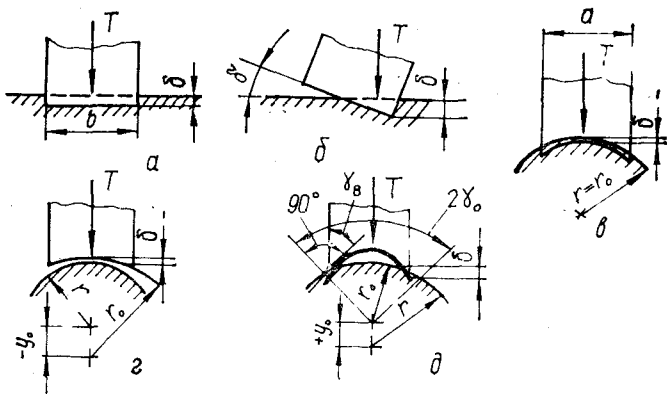


Рис. 4.12. Условия контактирования зажимного элемента с заготовками различной формы

При установке в опоре нескольких подшипников относительное рассеяние ψ равно сумме значений ψ_0 каждого из подшипников.

Приближенный расчет собственной частоты шпинделя, не имеющего больших сосредоточенных масс, можно определить по формуле [32], с^{-1} :

$$\omega_c = v \sqrt{\frac{EJ_1}{m(1+\lambda)^3 a^3}}, \quad (4.42)$$

где $v = f(\lambda)$ — коэффициент, который для $\lambda = 2,5 \dots 3,5$ лежит в пределах $2,3 \dots 2,4$; m — масса шпинделя, кг; $\lambda = l/a$ — относительное расстояние между опорами.

При расчетах жесткости системы шпиндель — патрон — деталь необходимо учитывать контактные сближения в патроне, в месте взаимодействия зажимных элементов патрона с зажимаемой заготовкой (режущим инструментом), конуса шпинделя с хвостовиком оправки, в которой зажат режущий инструмент, и как уже было сказано, в опорах шпинделя, установленного на различных подшипниках.

В сопряжениях зажимных элементов с круглой заготовкой в зависимости от соотношения радиусов кривизны заготовки r и зажимного элемента r_0 контактные сближения различные (рис. 4.12) [26, 54].

При $r = r_0$ и $\vartheta = 0$, что соответствует полному прилеганию зажимного элемента вдоль (рис. 4.12, а) и поперек (рис. 4.12, в) заготовки

$$\delta = C_\sigma \sigma^m = C_\sigma (T/F_k)^m. \quad (4.43)$$

При кромочном контакте ($\vartheta \neq 0$) и $r = r_0$ (рис. 4.12, б)

$$\delta = C_{\sigma} (T/F_{\kappa})^n + A_{\vartheta} T \vartheta, \quad (4.44)$$

где F_{κ} — площадь контакта, см² или приближенно

$$\delta = A_{\vartheta} T \vartheta. \quad (4.45)$$

При $r < r_0$ и $\vartheta = 0$ (рис. 4.12, з)

$$\delta = T \frac{A'_d}{b} \Delta d', \quad (4.46)$$

где $\Delta d' = 2(r_0 - r)$ — отклонение диаметра рабочего отверстия зажимных элементов от диаметра заготовки.

При $r < r_0$ и $\vartheta \neq 0$

$$\delta = T \left(A_{\vartheta} \vartheta + \frac{A'_d}{b} \Delta d' \right). \quad (4.47)$$

При $r > r_0$ (рис. 4.12, д) и $\vartheta \neq 0$

$$\delta = T (A_d/b \Delta d + A_{\vartheta} \vartheta + A_{\gamma} \gamma_0/\gamma_{\kappa}), \quad (4.48)$$

где $\Delta d = d - d_0$; γ_0 — половина угла кромочного охвата заготовки зажимным элементом; γ_{κ} — угол поперечного внедрения, зависящий от формы поперечного сечения зажимного элемента и находящийся в диапазоне от $90^\circ - \gamma_0$ до $180^\circ - \gamma_0$.

При зажиме круглых стальных заготовок гладкими калеными стальными зажимными элементами $m = 0,6$; $C_{\sigma} = 0,13$; $A_d = 20$ мкм/кН; $A'_d = 12$ мкм/кН; $A_{\vartheta} = 1,3$ мкм/(кН $\cdot^\circ$); $A'_{\vartheta} = 0,65$ мкм/кН $\cdot^\circ$; $A_{\gamma} = 0,04$ мкм/кН $\cdot^\circ$.

На основании теории контактных сближений тел качения и колец подшипников упругие деформации шарико-подшипников [59]:

радиальных

$$\delta_r = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{d_{\text{ш}}^{1/3}} \left(\frac{F_r}{z} \right)^{2/3}; \quad (4.49)$$

радиально-упорных

$$\delta_a = (F_a/c)^{2/3}, \quad (4.50)$$

где δ_r , δ_a — соответственно осевая и радиальная упругие деформации подшипников, мм; $d_{\text{ш}}$ — диаметр шарика, мм; F_r , F_a — общая радиальная и осевая нагрузки, Н; z — общее число тел качения; $c = 1,12 \cdot 10^5 d^{0,5} \sin^{2,5} \alpha$ — коэффициент; α — угол контакта тел качения.

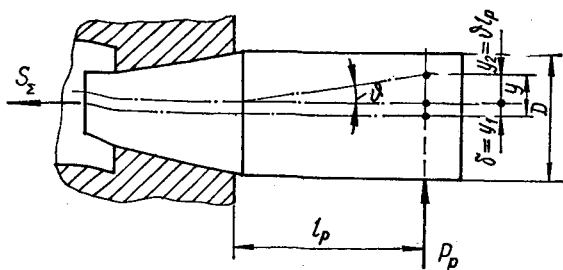


Рис. 4.13. Схема расчета отжатый оправки с коническим хвостовиком

Упругие деформации: двухрядных цилиндрических (шпиндельных) роликоподшипников

$$\delta_r = 7,5 \cdot 10^{-5} F_a^{0,9} / l^{0,8} = \frac{3,2 \cdot 10^{-4}}{l^{0,8}} \left(\frac{F_r}{z} \right)^{0,9}, \quad (4.51)$$

конических роликоподшипников (при работе с натягом или значительной внешней осевой нагрузкой)

$$\begin{aligned} \delta_a &= F_a^{0,9} / c^{0,9}; \\ \delta_r &= F_r / j_r, \end{aligned} \quad (4.52)$$

где $c^{0,9} = 13300 z^{0,9} l^{0,8} \sin^{1,9} \alpha$; l — эффективная длина ролика, мм; j_r — радиальная жесткость подшипника, Н/мм, $j_r = 0,55 / \lg^2 \alpha \cdot F_a / \delta_a$.

Несущая способность (коэффициент работоспособности S) и предельно допустимая статическая нагрузка Q подшипников шпиндельных узлов, выбранных по критерию жесткости узла, как правило, удовлетворяют требованиям к опорам станка.

В многооперационных и других станках коническое соединение переднего конца шпинделя с хвостовиком инструмента или с оправкой приспособления должно обеспечивать точное центрирование и жесткость. Для стандартного несамотормозящего конуса 7/24 в соответствии с расчетной схемой (рис. 4.13) упругое перемещение оправки диаметром D под действием силы резания P_r , приложенной на расстоянии l_p от конца шпинделя,

$$y = y_1 + y_2 = \delta + \phi l_p, \quad (4.53)$$

где δ — поперечное смещение на краю конического соединения; ϕ — угол поворота в соединении.

Без учета погрешностей в соединении [4, 32, 52]

$$\delta = \frac{4P_p \beta K}{\pi D} (l_p \beta C_1 + C_2); \quad (4.54)$$

$$\vartheta = \frac{4P_p \beta^2 K}{\pi D} (2l_p \beta C_3 + C_1), \quad (4.55)$$

где $\beta = \sqrt[4]{\frac{1}{13KD^3}}$; $K = 0,2 \text{ мкм} \cdot \text{м}^2/\text{Н}$ — коэффициент контактной податливости; C_1, C_2, C_3 — коэффициенты, принимаемые равными $C_1 = C_2 \approx 1,35$; $C_3 = 1$.

Из вышеприведенных формул для стандартных конусов 7/24 можно вывести формулу податливости, приведенную к точке приложения силы P_p , мкм/Н:

$$e_p = \frac{l_p^2}{20D^4}, \quad (4.56)$$

где l_p и D , см. Осевая сила затяжки S_Σ и угловой зазор в коническом соединении существенно влияют на его жесткость, так как при $30' \dots 40'$ жесткость снижается в 10...15 раз, плотность конического стыка обеспечивается при давлениях 1,5...2,0 МПа. Последнее условие требует, чтобы для конуса $JS050 S_\Sigma \geq 15 \text{ кН}$. С учетом вышеизложенного обобщения расчетная схема для определения упругих отжатий детали (заготовки или инструмента) в системе шпиндель—патрон—деталь представлена на рис. 4.14, а, где заделка детали в месте зажима ее в патроне (оправке) рассматривается в виде условного упруго-фрикционного шарнира (4.14, б) [54].

Этот условный шарнир характеризуется радиальной C_p и поворотной C_n жесткостями, а также моментом трения M_τ в условном шарнире, радиус которого для цангового патрона может быть определен по нормали от контакта губки цанги со шпинделем (при отсутствии угловых зазоров по центру конуса) до пересечения с осью шпинделя (патрона).

Суммарные отжатия заготовки в месте нагружения силой P_p на «вылете» l_p от центра упруго-фрикционного шарнира в патроне (рис. 4.14, а):

$$y_\Sigma = y_\text{ш} + y_\text{п}, \quad (4.57)$$

где $y_\text{ш}$ — отжатия из-за податливости системы шпиндель—

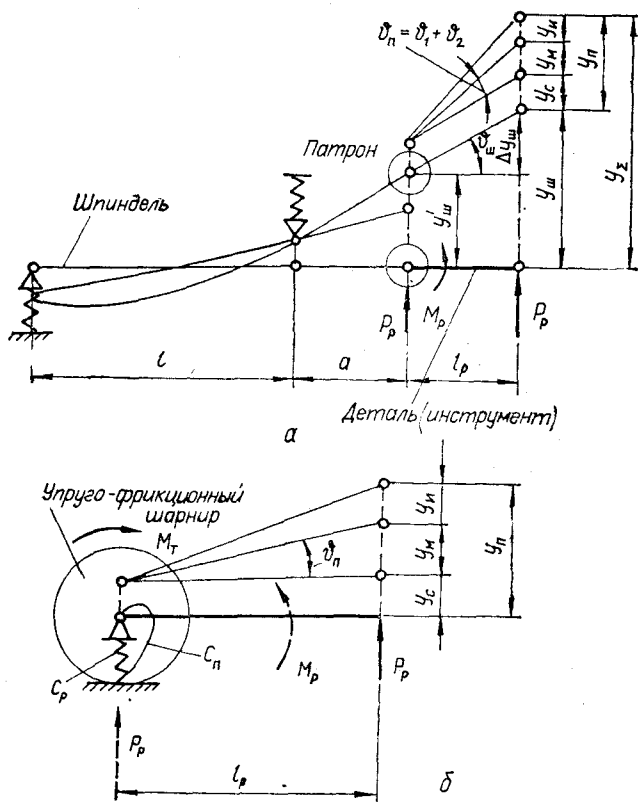


Рис. 4.14. Обобщенная расчетная схема для определения упругих отжатий в системах:

а — шпиндель — патрон — деталь; б — патрон — деталь

патрон (Ш—П); y_n — отжатия из-за податливости системы патрон—деталь (П—Д)

$$y_w = y'_w + \Delta y_w, \quad (4.58)$$

где $y'_w = y_1 + y_2$ — отжатия шпинделя в месте присоединения патрона на консоли а под действием перенесенной к шарниру силы P_p и момента $M_p = P_p l_p$; y_1 — отжатия, вызванные податливостью опор; y_2 — отжатия, вызванные изгибом тела шпинделя; $\Delta y_w = \theta'_w l_p$ — дополнительное отжатие шпинделя на «вылете» l_p ; θ'_w — угол поворота

консоли шпинделя, определяемый экспериментальным путем (аналитический метод расчета тоже возможен).

При допущении $M_p = 0$ отжатия $y_{ш}$ могут быть определены по известной формуле (4.39).

Отжатия в системе П—Д:

$$y_{п} = y_{с} + y_{м} + y_{и}, \quad (4.59)$$

где $y_{с} = P_p/C_p$ — отжатие от действия силы P_p из-за контактных сближений в патроне; $y_{м} = \vartheta_{п} l_p$ — отжатия от действия момента $M_p = P_p l_p$ из-за контактных сближений и угловых зазоров (обычно в коническом соединении) в патроне; $y_{и} = P_p l_p^3 / 3EJ$ — отжатия самой детали (оправки) при абсолютной жесткой консольной заделке; J — осевой момент инерции детали (отправки или прутка). На основании экспериментальных исследований [26] установлено, что величина $y_{с} \ll y_{м}$, поэтому величиной $y_{с}$ можно пренебречь. Угол

$$\vartheta_{п} = \vartheta_1 + \vartheta_2, \quad (4.60)$$

где ϑ_1 — угловой зазор в коническом соединении, который выбирается при условии, что момент M_p превышает момент упругого сопротивления лепестков и губок цанги (обычно составляет $10' \dots 30'$); ϑ_2 — угол поворота балки на упругом основании [4]:

$$\vartheta_2 \cong \frac{2\beta^2 P_p K}{B} (1 + 2\beta l_p), \quad (4.61)$$

где $\beta = \sqrt[4]{1/(13Kd^3)}$; $K = 0,2$ мкм·м²/Н — коэффициент контактной податливости; d — диаметр прутка, см; l_p — «вылет» прутка, см; $B = \frac{\pi d}{4}$ — приведенная ширина упругого основания.

Для точных расчетов $y_{п}$ целесообразно $\vartheta_{п}$ определять экспериментально.

4.7. Расчет податливости шариковой винтовой передачи

Шариковая винтовая передача является основным типом тяговых устройств в приводе подач станков с ЧПУ благодаря следующим достоинствам: малое трение, устранение зазоров за счет предварительного натяга, достаточно высокая жесткость и технологическая надежность.

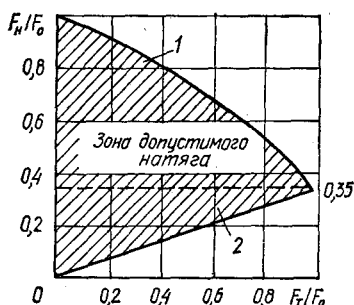


Рис. 4.15. График к выбору осевой силы предварительного натяга:

1 — максимальная сила; 2 — минимальная сила

силе предварительного натяга F_n

Предварительный натяг в шариковой винтовой паре устанавливают исходя из условий, что сумма силы натяга и внешней силы не превышает допустимого значения, а при разном направлении сил натяг всегда сохраняется [4, 32, 59]. Суммарная осевая тяговая сила, действующая на обе полугайки,

$$F_T = F_1 + F_2; \quad (4.62)$$

из условия равенства осевых перемещений получаем при

$$(F_n - F_1)^{2/3} - F_n^{2/3} = F_n^{2/3} - (F_n - F_2)^{2/3}. \quad (4.63)$$

По условию предельно допустимой по прочности осевой силы

$$F_n + F_1 \leq F_0$$

получаем ограничение для максимальной силы предварительного натяга (кривая 1, рис. 4.15):

$$F_{n\max} = F_0 \left[\frac{(1 + F_T/F_0)^{2/3}}{2} \right]^{3/2}, \quad (4.64)$$

а минимальное значение определяется из условия сохранения натяга (кривая 2, рис. 4.15):

$$F_{n\min} \geq F_2. \quad (4.65)$$

Из этих условий следует (рис. 4.15), что при любых нагрузках $F_n = 0,35F_0$.

Ограничивая контактное напряжение значением $\sigma_k \leq 2500$ МПа, можно определить предельное тяговое усилие

$$F_T \leq 10zd_1^2, \quad (4.66)$$

где z — число шариков, воспринимающих нагрузку; d_1 — диаметр шарика, мм.

С учетом коэффициента долговечности k :

$$F_{\tau} \leq \frac{10z d_1^3}{k}, \quad (4.67)$$

где $k = 0,9 \sqrt[3]{\frac{60Tnz_1}{10^7}}$, T — расчетный срок долговечности, ч;
 n — расчетная частота вращения винта, мин⁻¹; z_1 — половина шариков в одном витке.

Если принять, что осевая деформация винтовой пары создается главным образом силой предварительного натяга, то можно получить жесткость винтовой передачи, Н/мкм

$$j_1 = 2d_1z. \quad (4.68)$$

Общая жесткость привода подач зависит не только от жесткости резьбового соединения, но и в большой степени от жесткости самого винта при его растяжении — сжатии, осевых опор и всех неподвижных соединений.

5. КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МЕХАНИЗМОВ И УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКАМИ

5.1. Типовые механизмы и устройства станков с ЧПУ

Типовые механизмы и устройства могут быть разделены на функциональные механизмы, выполняющие: а) только вспомогательные движения; б) как вспомогательные, так и рабочие движения.

В общем цикле работы любого автомата или станка с ЧПУ важное значение имеет время вспомогательных движений, влияющее на производительность станка, а в общем балансе точности и жесткости — погрешности и упругие перемещения поверхностей и стыков механизмов, влияющие на точность и устойчивость обработки.

К механизмам и устройствам вспомогательных движений с этой точки зрения предъявляют два противоречивых требования: быстроедействие и точность.

Вследствие сокращения времени вспомогательных движений увеличиваются динамические нагрузки и снижается точность. Кроме того, время вспомогательных движений зависит от конструктивных особенностей механизмов и уст-

ройств; условий изготовления и эксплуатации (в частности, шума).

Механизмы и устройства, выполняющие только вспомогательные движения и не участвующие в процессе резания, предназначены для автоматической загрузки прутковых, трубных и штучных заготовок; автоматического позиционирования; автоматического останова и упора подаваемых в рабочую зону прутков и труб; хранения и автоматической передачи режущего инструмента из инструментальных магазинов в рабочую зону; автоматической переналадки режущего инструмента и т. д. Такие механизмы, выполнив свои функции, не входят в замкнутую динамическую систему станка и не оказывают влияния на динамическую жесткость технологической системы.

Механизмы и устройства, выполняющие вспомогательные движения и участвующие в процессе резания, предназначены для автоматического зажима прутков, труб и штучных заготовок; автоматического поворота и фиксации рабочих органов в зоне резания (шпиндельные барабаны, поворотные столы, револьверные головки и др.); автоматического зажима режущего инструмента; автоматического позиционирования и угловой фиксации шпинделя; автоматического зажима рабочего органа и т. д. Такие механизмы входят в замкнутую динамическую систему станка, например зажимные механизмы, и оказывают влияние на его динамическую жесткость и виброустойчивость.

Для получения требуемой точности и производительности формообразования в технологической системе станка должна обеспечиваться координатная связь его элементов и сохраняться их заданное положение при различных возмущениях. Для сохранения заданного положения элементов в системе координат станка $X'YZ$ (рис. 5.1) служат зажимные механизмы, устройства и приспособления, которые при определенном законе формообразования фиксируют заданную связь в виде вектора ρ между деталью (с системой координат $X_dY_dZ_d$) и режущим инструментом (с системой координат $X_nY_nZ_n$), которые расположены на подвижных рабочих органах с системами координат соответственно $X_1Y_1Z_1$ и $X_2Y_2Z_2$.

Во всех случаях вспомогательные движения связаны с перемещением (поворотом) какого-то объекта (заготовки, рабочего органа, инструмента) из одного положения в другое; останком или базированием его на упоре или без упора; закреплением (фиксацией) положения таким образом,

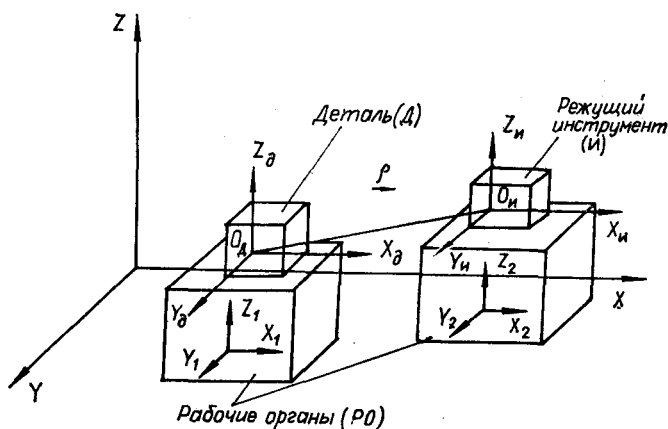


Рис. 5.1. Координатная связь основных элементов в технологической системе металлорежущего станка

чтобы при действии внешних возмущений его состояние не изменилось.

Таким образом, вспомогательные движения по автоматическому манипулированию с объектом выполняют по типовому циклу: снятие натяга (разжим, расфиксация) — перемещение объекта из одного положения в другое (передвижение, поворот, подача) — останов (базирование) — создание натяга (зажим, фиксация) — участие в резании.

Объекты закрепления в станках с ЧПУ подвергаются внешним возмущениям $f_i(t)$ и последовательно воздействиям $f_1(t) \dots f_4(t)$ по циклу от механизмов (рис. 5.2): перемещения (загрузка, позиционирование, ввод в рабочую зону); остановки (установка в требуемое положение, останов на упоре); зажима (закрепление, фиксация); рабочих ходов (резание).

Время вспомогательных движений t_x в станках с ЧПУ может составлять значительную долю от общего времени автоматического цикла $T_{ц}$. При обработке несложных деталей в короткоцикловых автоматах $t_x/T_{ц} = 0,4 \dots 0,5$ и более. В многооперационных станках $t_x/T_{ц} = 0,28 \dots 0,4$ и в основном связано с автоматической сменой и закреплением инструментов и заготовок. В многошпиндельных токарных автоматах время поворота и фиксации шпиндельного барабана составляет $2 \dots 3$ с, а подачи и зажима прутка $1 \dots 2$ с, в то же время в токарно-револьверных станках с ЧПУ с гидравлическим приводом время подачи и зажима прутка достигает $3 \dots 5$ с и более.

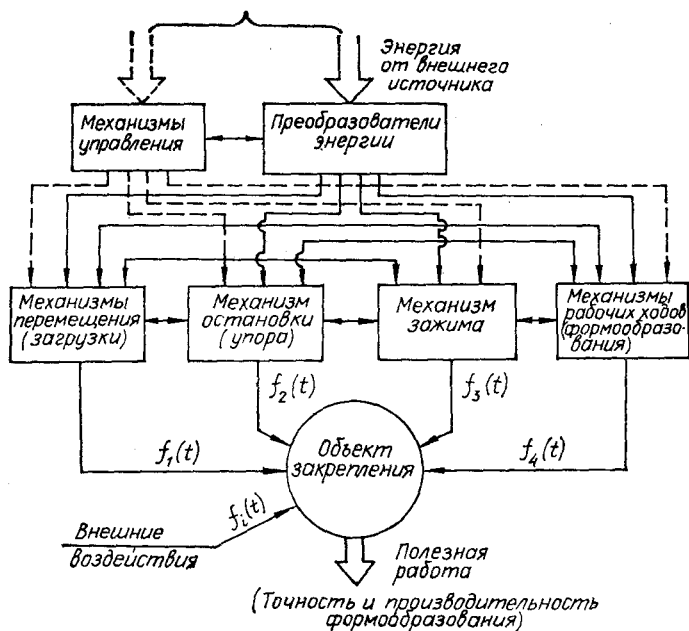


Рис. 5.2. Обобщенная структура взаимодействия типовых механизмов станка с ЧПУ с объектом манипулирования

Тенденция сокращения машинного времени за счет многоинструментальной и многопозиционной обработки требует уменьшения времени t_x [39].

5.2. Способы автоматической загрузки заготовок

В зависимости от вида и размеров заготовок существуют следующие способы их автоматической загрузки: 1) бунтовый (бухты проволоки); 2) прутковый для подачи прутков или труб длиной 3...6 м, а также их загрузки в линию досылки (в виде мерных прутков длиной 1...2 м); 3) магазинный для штучных заготовок (в самотечных, полусамотечных и принудительных магазинах); 4) поштучный или порционный бункерный для штучных заготовок (с помощью дисковых, карманчиковых, секторно-шиберных и других бункерных загрузочных устройств); 5) непрерывный бункерный для мелких штучных заготовок (с помощью вибрационных бун-

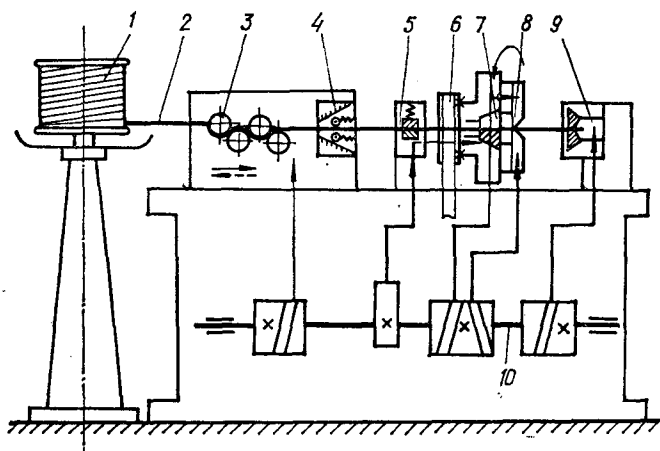


Рис. 5.3. Принципиальная схема фасонно-отрезного автомата с бунтовой загрузкой проволоки

керных загрузочных устройств); 6) с помощью автооператоров (для мелких и средних штучных заготовок), промышленных роботов и манипуляторов (для средних и крупных заготовок) [59].

Для фасонно-отрезной обработки деталей малого диаметра (до 7...8 мм) в качестве заготовки применяется проволока, свернутая в бунт 1. Однако существуют станки для обработки бунтовых заготовок диаметром до 16 мм. Станки с бунтовой загрузкой по сравнению с прутковой позволяют сократить время простоев станка, необходимое на подготовку и заправку нового прутка. Проволока во время обработки не вращается и имеет только периодическое продольное перемещение при ее подаче вперед для обработки следующей заготовки. Подача проволоки 2 (рис. 5.3) необходимой длины осуществляется кареткой с механизмами правки 3 и подачи 4. При этом из переднего зажима 9 выталкивается обработанная деталь. После подачи проволока зажимается в трех местах передним 9, средним 6, 7, цанговыми зажимами, расположенными по обеим сторонам вращающейся резцовой головки 8, и задним зажимом 5, расположенным в шпиндельной бабке. Управление всеми механизмами осуществляется от кулачков, установленных на распределительном валу 10, имеющем механическую (рабочую) и ручную (наладочную) скорости вращения.

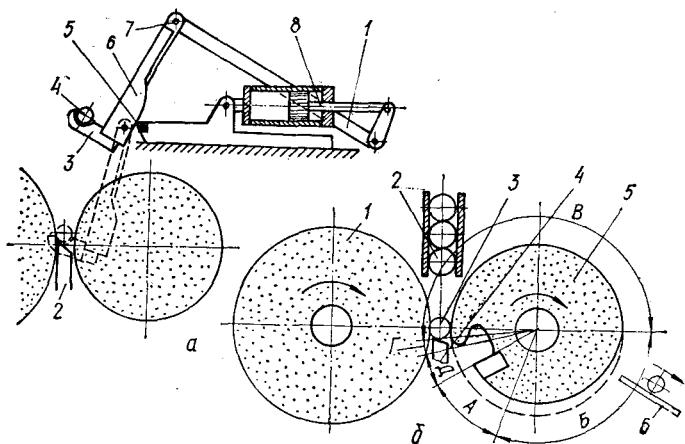


Рис. 5.4. Схема автоматического загрузочного устройства к бесцентрово-шлифовальным станкам

Механизмы правки, работающие при обратном ходе каретки, бывают: а) штифтовые и гребенчатые неподвижного типа преимущественно для проволоки малого диаметра (до 1 мм); б) роликовые подвижного типа однорядные и двухрядные. Двухрядные механизмы, в которых ролики расположены во взаимоперпендикулярных плоскостях, обеспечивают более качественную правку материала и поэтому получили большое распространение.

Подача проволоки из прутка может осуществляться под действием груза, собственного веса при вертикальном и наклонном шпинделе, подающих роликов, цанг и патронов.

Автоматизировать работу шлифовальных станков с ЧПУ часто трудно из-за сложности загрузки и зажима заготовок. Автоматизация бесцентрово-шлифовальных станков осуществляется обычно в двух направлениях: загрузки и цикла обработки. При перемещении и установке заготовок в шлифовальных станках часто используют магазинные, бункерные и другие загрузочные устройства.

Схема автоматического загрузочного устройства к бесцентрово-шлифовальным станкам показана на рис. 5.4, а. Это устройство имеет рычаг-балансир 1, одно плечо которого соединено со штоком гидроцилиндра 8, а к другому подвешен рычаг 7 с захватом (люлькой) 3 для заготовки 4. К рычагу прикреплена копирная планка 6, которая при спуске

рычага вместе с заготовкой в направлении ножа 2 станка (пунктирное положение) приходит в контакт с роликом 5 и создает определенное положение рычагу, а значит заготовке относительно шлифовального и ведущего кругов.

Существуют бесцентрово-шлифовальные станки, у которых автоматические загрузки и цикл обработки осуществляются за счет профильного ведущего круга 5 (рис. 5.4, б). Участок А соответствует периоду загрузки деталей 3 из магазина 2, а длина дуги l_A учитывает свободный вход заготовок и колебания их припуска: $l_A = \pi d_n n t_1$, где d_n и n — диаметр и частота вращения ведущего круга; t_1 — время загрузки заготовки на опорный нож 4.

Участок Б предназначен для съема припуска шлифовальным кругом 1 и выполнен по архимедовой спирали, у которой разность конечных и начальных радиусов равна припуску на деталь: $l_B = \pi d_s \frac{h}{s_n}$, где d_s — диаметр заготовки; h — припуск на обработку; s_n — поперечная подача на один оборот заготовки. Калибрующий участок В служит для снижения шероховатости шлифуемой детали. Длину этого участка l_B определяют опытным путем в зависимости от точности и шероховатости обработки. На участке Г круг затылуют по радиусам с разностью 0,05 мм. На последнем участке Д имеется паз, в который деталь подается с ножа 4 и из которого она поступает в разгрузочный лоток 6. Подобная автоматизация требует быстродействующих механизмов, так как весь цикл обработки происходит за один оборот ведущего круга.

Для автоматизации загрузки и разгрузки штучных заготовок, а также с целью встраивания токарных автоматов и полуавтоматов в станочные системы применяются загрузочные устройства, среди которых важное место занимают «механические руки» — автооператоры. По характеру движения «механических рук» они бывают возвратно-поступательного, возвратно-качательного и комбинированного действия, а по приводу — гидравлические, пневматические, электромеханические и др. Управление автооператорами осуществляется от командоаппарата или системы ЧПУ. Автооператор (рис. 5.5, а) работает в следующей последовательности: подвод корпуса 4 к рабочей зоне и захват с отсеканием заготовки 2, поступающей из загрузочного лотка 1; выход руки 5 к рабочей зоне, разжим, захват и извлечение детали; отвод руки 5 с деталью; подвод руки 3 к рабочей зоне, заталкивание и зажим заготовки; отвод ру-

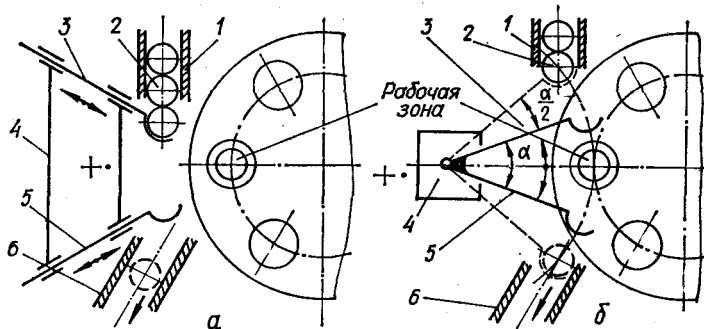


Рис. 5.5. Схемы автооператоров, применяемых в многошпиндельных токарных полуавтоматах:

а — поступательного действия; *б* — качательного действия

ки 3; возврат корпуса 4 в исходное положение и загрузка детали в лоток 6 при наталкивании ее на упор.

Автооператор (рис. 5.5, б) имеет следующий цикл работы: подвод корпуса 4 к рабочей зоне; поворот рук 3 и 5 против часовой стрелки на угол $\alpha/2$; захват с отсеканием заготовки 2, поступающей из загрузочного лотка 1, и захват с извлечением готовой детали; поворот рук по часовой стрелке на угол α , заталкивание и зажим заготовки; отвод корпуса 4 в исходное положение и разгрузка детали в лоток 6 при наталкивании ее на упор; возврат рук в исходное положение. Может быть и другая последовательность работы автооператора, если исходное положение рук на уровне линии загрузки и оси шпинделя. Существуют автооператоры с перекантователем, позволяющие вести обработку детали на одном станке с двух установок.

5.3. Конструирование и расчет механизмов автоматической подачи прутка

Эти механизмы предназначены для подачи прутков и труб в токарных автоматах и револьверных станках с различными системами управления. В последнее время они претерпевают значительные изменения. Это объясняется тем, что на автоматах после подачи прутка до упора и его зажима обычно не достигается достаточно стабильное положение переднего торца, и поэтому для получения точной длины детали приходится дополнительно подрезать передний торец прутка, что приводит к излишнему расходу ма-

териала, режущего инструмента, дополнительным затратам времени

К механизмам подачи предъявляются следующие требования: 1) обеспечение точности длины прутка при взаимодействии с другими механизмами, которая определяется отклонением длин деталей, отрезанных с поперечного суппорта из прутка, поданного до упора (отсутствие отскока прутка); 2) возможно меньшее время подачи прутка до упора (быстродействие); 3) обеспечение осевой силы сцепления, исключающей проскальзывание прутка при подаче. Эта сила должна быть выбрана из условия преодоления суммарных сил инерции и сил трения прутка о направляющие, учитывая запас на износ; 4) предохранение от поломки механизма, наличие блокировки при израсходовании прутка (поломка механизма может произойти при подаче остатка прутка торцом подающего патрона или подающей цанги); 5) долговечность и износостойкость механизма; 6) удобство и простота загрузки прутка в линию шпинделя; 7) снижение шума при работе вращающегося прутка.

Таким образом, основное требование к механизму подачи: обеспечение точности подачи прутка по длине в требуемых пределах после его разжима при заданной продолжительности этого процесса в течение гарантированного периода эксплуатации.

Качество той или иной конструкции механизма подачи прутка можно оценить по тому, насколько рассматриваемый механизм удовлетворяет указанным требованиям, удобен в эксплуатации, долговечен и надежен. Уменьшение надежности работы механизма подачи прутка, как и других механизмов, обнаруживают при появлении отказов.

По характеру перемещения прутка и конструкции привода все механизмы подачи делятся на три основные группы. К первой группе относятся механизмы подачи, перемещающие пруток к упору с постоянной скоростью, ко второй — с постоянным ускорением, к третьей — с переменным ускорением. Каждая основная группа делится на три подгруппы в зависимости от конструкции привода. К первой подгруппе относятся механизмы подачи, осуществляющие перемещение прутка к упору пружиной при ограничении скорости перемещения кулачком; ко второй — перемещение прутка к упору под действием веса груза, собственного веса, сжатого воздуха постоянного давления; к третьей — перемещение прутка к упору кулачком, а возвращение подающих звеньев в исходное положение контркулачком.

Различают следующие способы подачи прутка:

1. Изнутри шпинделя: а) подающими упругими, заклинивающими и упруго-заклинивающими патронами; б) толкателем (с приводом от груза, пневмо-гидро-приводом); в) фрикционными роликами за шпинделем; г) под действием собственного веса при наклонной или вертикальной компоновке;

2. Снаружи шпинделя: а) захватом или патроном вытяжного типа; б) суппортом, имеющим продольное перемещение.

Силы сцепления подающих элементов с прутком могут быть расположены: а) в одном месте (за зажимным патроном); б) в двух местах (по концам подающей трубы); в) распределенными (по всей длине подающей трубы).

Подача прутка может быть безупорной и до упора (выдвижного или поворотного действия) в торец прутка или внутри привода подачи.

Прутки заправляются в станок длиной 1...6 м (магазинная загрузка или с поддержкой их в направляющих трубах, ограничивающих биение свободного конца прутка при действии центробежных сил).

Типовая линия шпинделя пруткового автомата содержит: направляющую трубу с демфирующим (шумопоглощающим) устройством или средой, подающую трубу с подающим патроном, расположенную внутри зажимной трубы, зажимной патрон на переднем конце шпинделя, упор для прутка.

Для снижения биения прутка и шума демфирующие устройства направляющих труб выполняют в виде пружин переменного шага или диаметра (волнистые), опор из древесных или пластических материалов, сыпучей или текучей среды. В последнее время получило применение гидравлическое устройство подачи прутков-гидробар (*hydrobar*), состоящее из трех алюминиевых профилей, в которых расположены направляющие трубы разных диаметров с проталкивающими поршнями. Во избежание трения между подаваемым прутком и направляющей трубой в последнюю заливается определенное количество масла. Гидравлическая схема устройства приведена на рис. 5.6, а. Вращающийся внутри трубы пруток создает масляную пленку h_0 (рис. 5.6, в), которая способствует снижению шума и вибрации. Если пруток не вращается, гидродинамическое воздействие равно нулю и пруток прилегает к направляющей трубе (рис. 5.6, б). Чем больше число оборотов прутка, тем больше будет гидродинамическое воздействие (рис. 5.6, г).

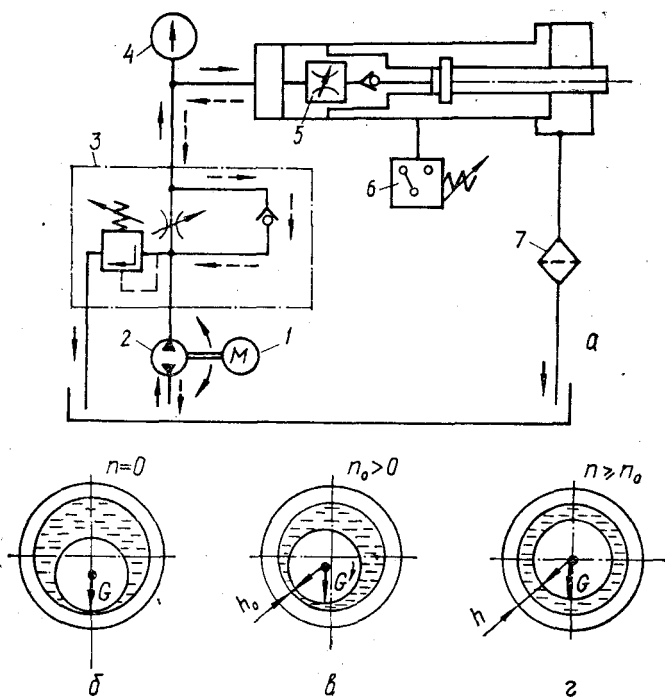


Рис. 5.6. Гидравлическое подающее устройство типа *Super Hydrobar HS LNS*:

1 — электродвигатель; 2 — насос двухстороннего действия; 3 — регулятор скорости и давления; 4 — манометр; 5 — регулируемый дроссель; 6 — реле давления; 7 — фильтр; G — сила тяжести прутка; n — рабочая частота вращения прутка; n_0 — начальная частота вращения прутка

Рассмотрим некоторые схемы и конструкции механизмов подачи прутка, работающие во взаимодействии с зажимными механизмами.

В автоматах продольного точения (рис. 5.7) пруток 5, закрепленный в шпинделе 7 зажимной цангой 6, неподвижной в осевом направлении, одновременно может вращаться и продольно перемещаться вместе со шпиндельной бабкой 8 (или с пинолью шпинделя). Резцы 2 (до 4...5 штук), закрепленные в суппортах 3, могут в процессе обработки получать поперечные перемещения или оставаться неподвижными. При неподвижных резцах в продольной подаче шпиндельной бабки вместе с прутком обрабатываются цилиндрические поверхности.

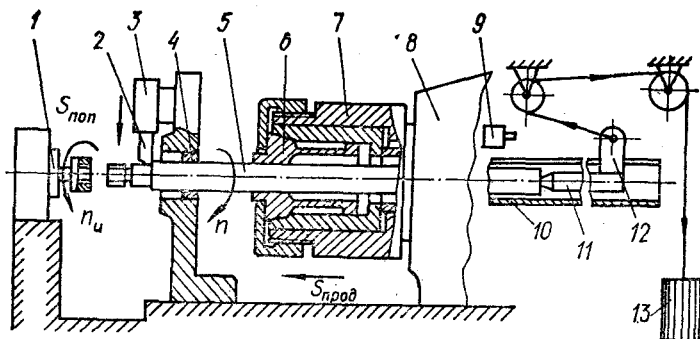


Рис. 5.7. Линия шпинделя автомата продольного точения с механизмами подачи и зажима прутка

Нарезание правой резьбы осуществляется за счет левого обгонного вращения резбового инструмента 1 (плашки или метчика), т. е. при $n_u > n$, а вывинчивание левым вращением прутка при остановленном инструменте ($n_u = 0$). Исключение биений конца прутка с обрабатываемой деталью обеспечивается люнетом 4. Для блокировки при израсходовании прутка служит конечный выключатель 9, на который наезжает флажок 12 толкателя 11, расположенный в продольном пазу трубы подачи 10 и связанный с грузом 13.

В токарных автоматах с ЧПУ основным приводом для подачи и зажима прутка является гидравлический по аналогии, например, с токарно-револьверными станками с ЧПУ 1В340Ф30 (рис. 5.8).

Для гидравлического привода механизма зажима и подачи прутка 9 используется насосная установка с гидропанелью, расположенная в станине. Электродвигатель и насос 1 закреплены на корпусе гидропанели. Гидравлическая схема механизма зажима и подачи прутка показана в положении «Пруток зажат, идет набор». Цикл работы механизма, состоящий из освобождения, подачи и зажима прутка, выполняется в следующем порядке.

После команды «Подача прутка» включается электромагнит ЭМ1, перемещающий золотник 14. Масло через маслоподводящее кольцо 5 поступает в левые полости цилиндров разжима и подачи прутка, двигая поршень 11 и каретку 10 влево. В конце подачи прутка ЭМ1 выключается и золотник 14 переключается. Масло направляется в правую полость цилиндра 4. Происходит зажим прутка 9

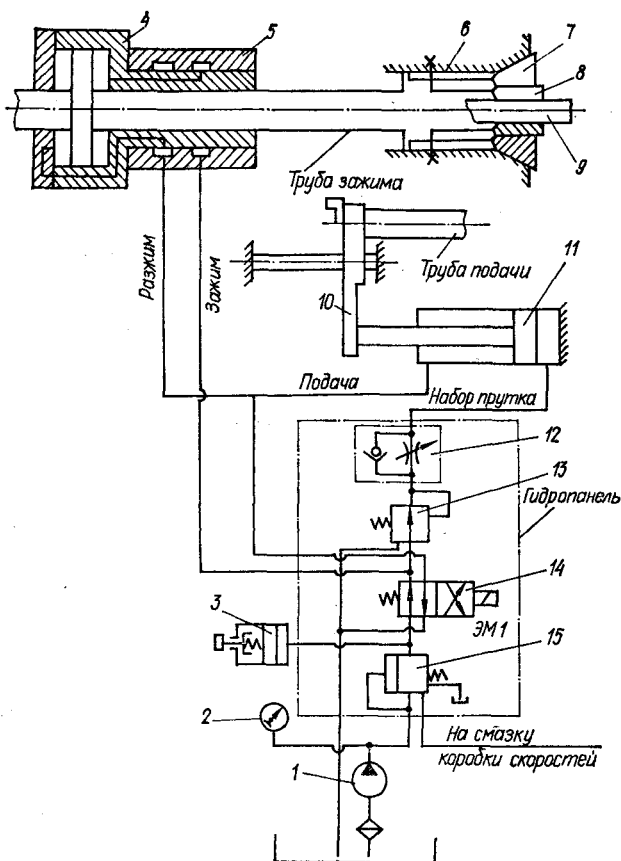


Рис. 5.8. Гидравлическая схема механизмов подачи и зажима прутка токарно-револьверного станка с ЧПУ

цилиндрической цангой 8 при движении трубы зажима и затяжной цанги 7 вовнутрь шпинделя 6. По окончании зажима движение поршня в цилиндре 4 прекращается, в результате чего давление масла в системе повышается и через редукционный клапан 13, дроссель 12 с обратным клапаном поступает в правую полость цилиндра подачи, перемещая поршень 11 влево. Происходит «набор» прутка. Через редукционный клапан 15 масло поступает на смазку коробки скоростей.

Описанная последовательность работы предотвращает оттягивание от упора прутка до окончания его зажима. При

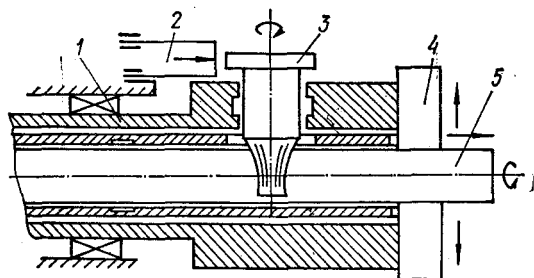


Рис. 5.9. Схема механизма подачи прутка с роликовым подающим патроном, расположенным внутри шпинделя:

1 — шпиндель; 2 — прижимной диск; 3 — ролик; 4 — зажимной патрон; 5 — пруток

зажиме прутка срабатывает реле давления 3, подающее команду для начала обработки детали. Масло, идущее через переливной (предохранительный) клапан 15, используется для смазки. Давление масла в системе контролируется манометром 2.

В прутковых автоматах с ЧПУ, встраиваемых в ГПС, начали применять роликовые механизмы подачи следующих один за другим мерных прутков. Однако из-за расположения роликов за шпинделем может увеличиваться остаток последнего прутка. Чтобы этого избежать, применяется механизм подачи прутка с роликом, расположенным вблизи рабочей зоны за зажимным патроном (рис. 5.9).

Выбор конструкции подающего патрона и его элементов должен производиться исходя из предъявляемых требований к механизму подачи, формы и размеров поперечного сечения прутка, габаритов шпинделя, точности и времени подачи.

При подаче прутка с большими отклонениями диаметра (свыше 1 мм) в тех случаях, когда позволяют габариты, следует применять самозаклинивающиеся подающие цанги и патроны (рис. 5.10). При подаче прутка с небольшими отклонениями диаметра (не более 1 мм) применяют подающие патроны с упругими элементами (рис. 5.11), чаще всего выполненные в виде подающей цанги.

Для обеспечения основной характеристики подающих цанг — осевой силы сцепления с прутком при подаче — лепестки должны иметь правильно выбранные размеры в продольном (длина губки и лепестка) и поперечном сечениях (центральный угол сектора и толщина лепестка), так

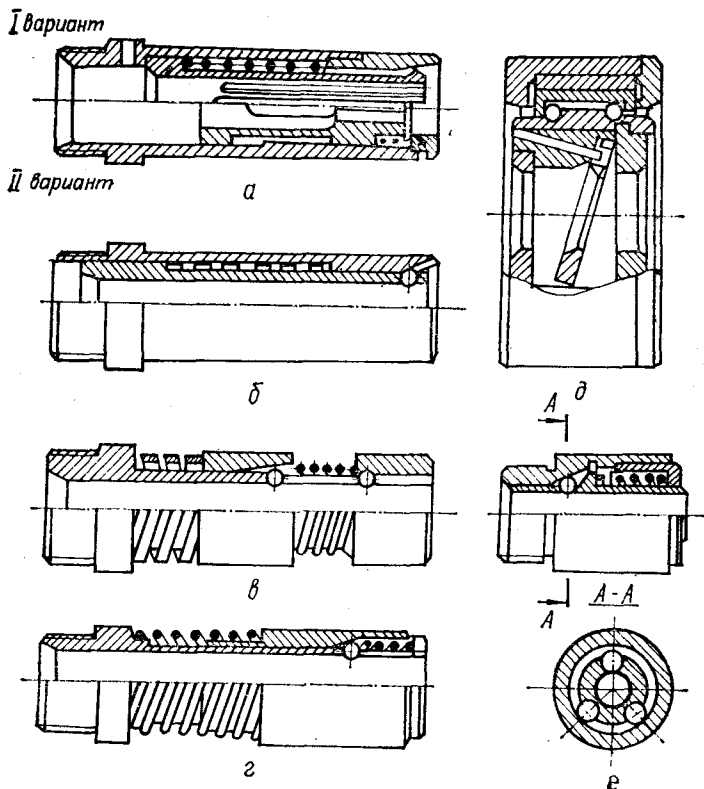


Рис. 5.10. Самоаклинизирующиеся подающие цанги и патроны:
 а — с подпружиненной внутренней многолепестковой цангой; б, в, г, е — с подпружиненными шариками; д — с наклонной подпружиненной шайбой

как эти размеры в большой мере влияют на изгибную жесткость лепестков. Эта сила должна быть выбрана с запасом, учитывающим износ рабочего отверстия и частичную потерю упругих свойств лепестков при деформациях выше предела упругости в течение определенного срока службы до наступления проскальзывания прутка. Кроме того, при выборе осевой силы сцепления необходимо учитывать конструктивные особенности механизма и условия подачи прутка до упора, вызывающие удар, который сопровождается дополнительным проскальзыванием прутка в цанге.

Сравнительно низкая стойкость подающих цанг, особенно на одношпиндельных токарных автоматах, снижает

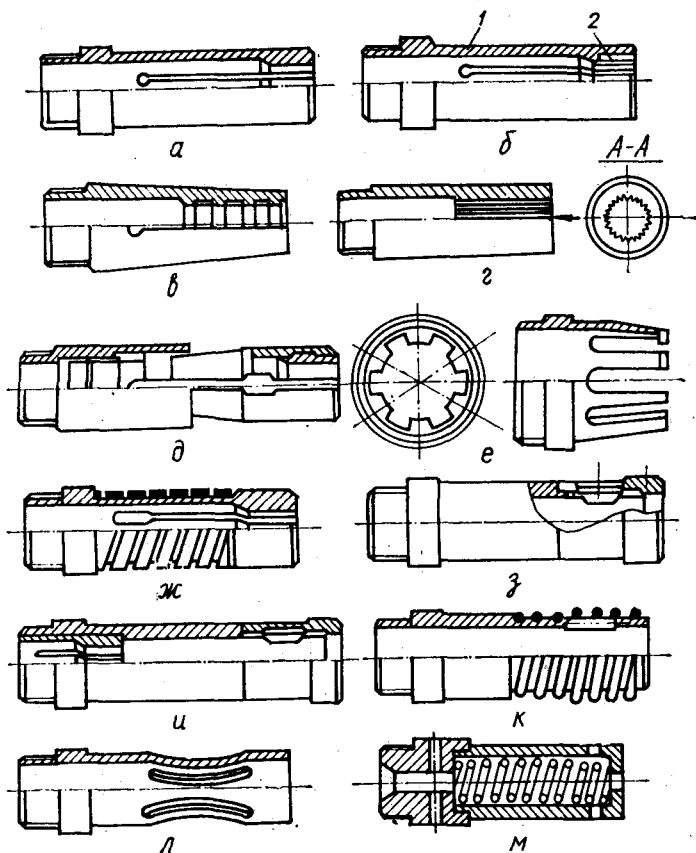


Рис. 5.11. Подающие патроны и цанги с упругими элементами:
 а — стандартная; б — стандартная с впаянными вкладышами; в — капроновая;
 г — резиновая; д — с регулируемой жесткостью лепестков; е — с лепестками
 прямоугольного сечения; ж — с дополнительной усилительной пружиной; з, и —
 с отдельными плоскими лепестками; к — с подпружиненными твердосплавными
 стержнями; л — с двухопорными лепестками; м — с внутренней сведенной в
 неустойчивом положении цилиндрической пружины

производительность станков из-за увеличения простоев, связанных с заменой цанг и дополнительной регулировкой механизмов подачи прутка.

Причиной выхода из строя подающих цанг являются:
 а) износ рабочего отверстия при проскальзывании цанги во время набора прутка и при подаче его до упора; б) поломка лепестков при ударах во время заправки прутка или при

низком качестве термообработки и грубой механической обработке пружинной части (шероховатость поверхности $R_z 40 \dots R_z 20$); в) потеря лепестком упругих свойств из-за низкого качества термообработки и напряжений выше предела упругости.

Обмер изношенных подающих цанг свидетельствует о том, что максимальный износ происходит вдоль средней образующей в передней части губки при диаметре рабочего отверстия, равном номинальному диаметру прутка. Износ по крайним образующим примерно одинаков с некоторым увеличением в задней части губки, имеющей меньшую твердость.

Изучение факторов, влияющих на износостойкость подающих цанг, свидетельствует о том, что одним из важных факторов является выбор материала и режимов термообработки цанги [54]. По износостойкости в сторону ее увеличения марки сталей, применяемые для цанг, можно распределить следующим образом: 60С2ХФА, 65Г, 18ГХТ цементируемая, 18ХГТ цианированная, углеродистые У8А, У10А и др., 4ХС, Р9. Однако по упругим свойствам и ударной вязкости эти стали располагаются в обратной последовательности. Наиболее распространенный материал для изготовления цанг — сталь 65Г.

В крупных токарных автоматах, особенно многошпиндельных среднего и тяжелого рядов, необходимы сравнительно большие осевые силы сцепления (1,5...2,5 кН) подающей цанги с прутком для надежной его подачи. При такой осевой силе сцепления затрудняется заправка прутка в станок из-за значительного увеличения усилия заправки прутка в подающую цангу со стороны направляющих труб или питающего механизма. Силы заправки прутка в подающую цангу, зависящие от жесткости лепестков, размеров встречного конуса и формы рабочей поверхности губок (гладкая или рифленная) должны служить исходными данными при выборе тяговой силы привода питающего механизма. В случае ручной заправки их выбирают исходя из физических возможностей человека, обслуживающего станок.

Для уменьшения усилия заправки прутка диаметром более 50...60 мм необходимо губки цанг выполнять гладкими, а также предусматривать раскрытие цанги с передней стороны рабочего отверстия.

С целью уменьшения колебаний силы сцепления подающих цанг с прутком, увеличения стабильности срока службы

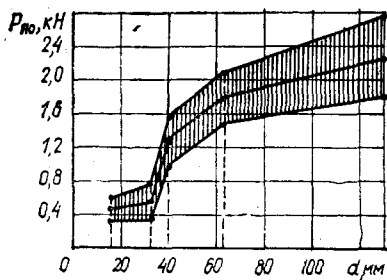


Рис. 5.12. График для выбора первоначальной силы сцепления подающей цанги с прутком номинального диаметра

увеличивать путь проскальзывания прутка, что приводит к уменьшению срока службы цанг, а иногда и к поломкам. Кроме того, колебания геометрических размеров и термообработка цанг вызывают колебания их стойкости до 300 %. Для повышения долговечности подающих цанг необходимо пользоваться рекомендациями, приведенными в [26].

При выборе основных размеров подающих цанг и проектировании механизма подачи для оценки принятой первоначальной силы сцепления $P_{по}$ цанг с прутком номинального диаметра можно пользоваться среднестатистическими данными, приведенными на рис. 5.12.

Минимально допустимое значение осевой силы сцепления при подаче прутка можно определить из условия

$$P_{\min} \geq K_1 (P_n + F_{\text{тр}}), \quad (5.1)$$

где $K_1 = 1,3 \dots 1,5$ — коэффициент запаса; P_n — сила инерции, зависящая от закона движения прутка:

$$P_n = K_a M l_n / t_n^2, \quad (5.2)$$

$F_{\text{тр}} = (G + R_n)f$ — сила трения прутка в направляющих трубах от веса и центробежной силы; K_a — коэффициент ускорения прутка при его разгоне, зависящий от закона движения и равный 4 (при ускорении $a = \text{const}$), 6,25 (при $a = \sin t$); l_n — ход подачи прутка (по настройке привода); t_n — время подачи прутка по циклограмме станка; M — масса прутка.

После преобразования

$$P_{\min} \geq K_1 M \left(K_a \frac{l_n}{l_n^2} + g f \frac{L_{\text{пр}} - L_r}{L_n} + 4f\pi^2 n^2 \Delta_{\text{пр}} \frac{L_{\text{пр}}}{L_n} \right), \quad (5.3)$$

где $L_{\text{пр}}$ — длина поддерживающих труб; L_n — длина прутка; L_r — длина трубы подачи; n — частота вращения шпинделя; $\Delta_{\text{пр}}$ — радиальный зазор между прутком и поддерживающими трубами; g — ускорение свободного падения.

Первоначальная сила $P_{\text{по}}$ не должна быть меньше $P_{\text{н min}}$.

Ориентировочные значения $P_{\text{по}}$ можно получить из следующей приближенной эмпирической зависимости

$$P_{\text{по}} = K_2 d, \quad (5.4)$$

где d — номинальный диаметр прутка, мм; K_2 — эмпирический коэффициент, определяемый по табл. 5.1 и зависящий от типа автомата, подачи l_n и частоты вращения шпинделя n .

5.1. Коэффициент K_2 при значениях длин подачи l_n и частот вращения n прутка

Диаметр прутка d , мм	l_n, n — малые и средние	l_n, n — максимальные
3...25	10...20 МТА	16...26 МТА
	10...16 ОТА	13...20 ОТА
	8...10 ТРС	10...20 ТРС
26...65	10...13 МТА	15...20 МТА
	8...13 ОТА	13...18 ОТА
	6...10 ТРС	10...15 ТРС
66...125	10...13 МТА	13...15 МТА

Примечание: МТА — многошпиндельные токарные автоматы; ОТА — одношпиндельные токарные автоматы; ТРС — токарно-револьверные станки.

Осевая сила сцепления подающей цанги с прутком зависит от радиальной силы упругого зажима T одним лепестком, количества z лепестков (губок) и коэффициента сцепления (рис. 5.13, а):

$$P_n = T z \mu = C_n (\delta - 0,5 \Delta d - \Delta_n) \mu, \quad (5.5)$$

где δ — сведение одного лепестка; Δd — отклонение диаметра прутка от диаметра рабочего отверстия цанги (выбирается по максимальному диаметру прутка $d_0 = d_{\text{max}}$);

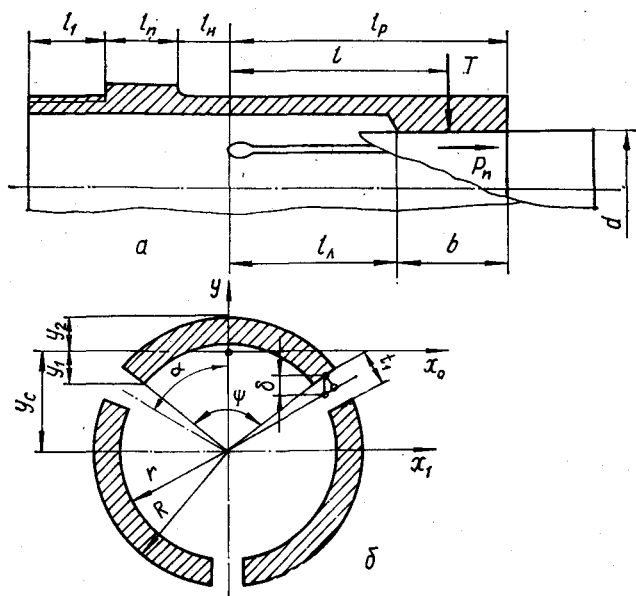


Рис. 5.13. Сечение лепестка подающей канги:
а — продольное; б — поперечное

Δ_n — износ губки канги; μ — коэффициент сцепления; C_l — изгибная жесткость лепестка на длине l с заделкой в конце разрезки, представляющей цилиндрическую оболочку [26, 38]:

$$C_l = \frac{3EJ}{\xi l^3 + J \epsilon l (1 + 2\lambda l)}, \quad (5.6)$$

где J — момент инерции сечения лепестка относительно центральной оси x_0 (рис. 5.13, б); $\epsilon = K_5 \frac{1}{(R-r)^2}$ — коэффициент заделки лепестка; $K_5 = \frac{46300 (0,01745\psi + \sin \psi)}{1,815\psi^2}$; ψ — центральный угол лепестка, °; $\lambda = \frac{1,815}{\sqrt{R^2 - r^2}}$ — коэффициент затухания деформаций в конце разрезки; E — модуль упругости.

Основные и присоединительные размеры подающих канг приведены в ГОСТ 2877—80, среди которых длины разрезки лепестка l_p , губки b , переходного участка l_n и общая длина $L = l_p + l_n + l_n + l_1$ (рис. 5.13, а).

Длину разрезки определяют по формуле

$$l_p = \frac{K_i J [\sigma] \mu z}{P_{\min} y_{\xi}}, \quad (5.7)$$

где $K_i = 0,6 \dots 0,8$ — поправочный коэффициент, учитывающий допуск на прутки, количество разрезов, материалы цанги и прутка и т. д.; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение на изгиб с учетом цикличности работы и зависящее от материала цанги, Н/мм²; $[\sigma] = (0,4 \dots 0,5) \sigma_B$; μ — коэффициент сцепления (для гладких губок 0,1...0,15, для кольцевых канавок 0,2...0,6); z — количество разрезов (лепестков или губок); ξ — коэффициент, учитывающий изменение поперечного сечения лепестка в продольном направлении ($\xi = 1$ — для постоянного сечения; $\xi = 1,5$ — для равнопрочного сечения); $J = K_1 (R^4 - r^4) - K_2 \frac{(R^3 - r^3)^2}{R^2 - r^2}$; y_1 и y_2 — расстояние от центра тяжести до крайних наиболее нагруженных волокон лепестка, мм (рис. 5.13, б); для внутренних волокон

$$y_1 = y_c - r \cos \frac{\psi}{2};$$

для наружных волокон

$$y_2 = R - y_c,$$

$y_c = K_3 \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2}$ — координата центра тяжести поперечного сечения лепестка, мм; $K_1 \dots K_3$ — безразмерные коэффициенты, зависящие от центрального угла лепестка, ψ , °;

$$K_1 = 0,125 (0,01745 \psi + \sin \psi);$$

$$K_2 = 25,4618 \frac{1 - \cos \psi}{\psi};$$

$$K_3 = \frac{66,394}{\psi} \sin \frac{\psi}{2};$$

$$\psi = 360/z - 2 \arcsin \frac{t_1}{R + r},$$

где t_1 — ширина разреза, мм; R и r — соответственно наружный и внутренний радиусы сечения лепестка, мм.

Длина рабочей части губки

$$b \approx (0,2 \dots 0,4) l_p. \quad (5.8)$$

Длина переходного цилиндрического участка до посадочной поверхности

$$l_n \geq x = \frac{1}{\lambda} [\pi - \arctg(1 + 2\lambda l_p)], \quad (5.9)$$

где x — участок затухания деформации в оболочке с учетом краевого эффекта.

Одним из основных размеров цанг считают длину лепестка, которую определяют из отклонений диаметра прутка, наибольших напряжений в месте заделки лепестка и, главное, жесткости лепестка. Из соображений экономии материала длину лепестка выбирают как можно меньшей, однако при этом увеличиваются колебания силы сцепления цанги с прутком.

При подаче прутка с наибольшим отклонением диаметра в минус лепесток будет прижиматься к прутку с силой $T_{\min}$, при наименьшем отклонении в плюс — с силой $T_{\max}$,

Обозначим через $\lambda_p = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \frac{P_{\max}}{P_{\min}}$ — коэффициент нестациональности силы T (P_n), с которой лепестки цанги охватывают прутки, и определим наивыгоднейшее его значение. При подаче прутка разность прогибов лепестка

$$f_{\max} - f_{\min} = 0,5 (\Delta d_1 + \Delta d_2) = 0,5 \Delta d.$$

Так как в пределах упругости лепестка $f_{\max} = \lambda_p f_{\min}$, то $\Delta d = 2f_{\min} (\lambda_p - 1) = 2K_{\Delta d} f_{\min}$, где $K_{\Delta d} = \lambda_p - 1$. Наибольшее напряжение при деформации лепестка

$$\sigma_{\max} = \frac{T_{\max} l_p y_{\max}}{J},$$

где $T_{\max} = \lambda_p T_{\min}$; $y_{\max}$ — расстояние до наиболее удаленного волокна от центра тяжести сечения лепестка; J — момент инерции сечения лепестка относительно нейтральной оси; l_p — расчетная длина лепестка, определяемая из соотношения

$$f_{\min} = \frac{\Delta d}{2(\lambda_p - 1)} = \frac{T_{\min} l_p^3}{AEJ},$$

тогда

$$l_p = K_l \sqrt[3]{\frac{AEJ \Delta d}{2T_{\min}}}, \quad (5.10)$$

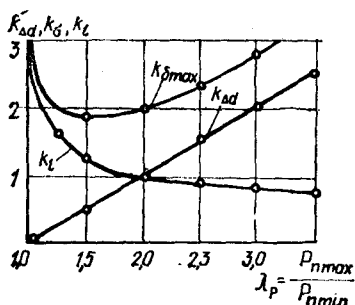


Рис. 5.14. Графики для выбора оптимальных характеристик подающей цанги

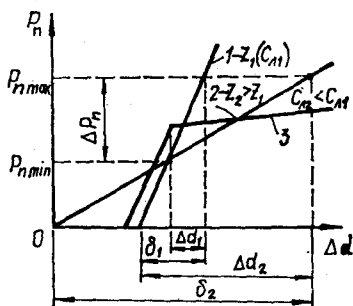


Рис. 5.15. Графики зависимости сил сцепления подающих цанг с прутком, имеющим различное количество лепестков

где $K_l = \sqrt[3]{l_p - 1}$ — коэффициент длины лепестка. После подстановки T_{max} и l_p и преобразования получим

$$\sigma_{max} = K_{\sigma} \sqrt[3]{\frac{AE\Delta d T_{min}^2 y_{min}^2}{f^2}},$$

где $K_{\sigma} = \frac{\lambda_p}{\sqrt[3]{\lambda_p - 1}}$ — коэффициент изменения напряжения в месте заделки лепестка.

Из последней формулы следует, что напряжение σ_{max} будет меньше, чем меньше отношение $\frac{\lambda_p^3}{\lambda_p - 1}$.

Найдем минимальное значение этого отношения:

$$\left(\frac{\lambda_p^3}{\lambda_p - 1} \right)' = \frac{3\lambda_p^2(\lambda_p - 1) - \lambda_p^3}{(\lambda_p - 1)^2} = 0.$$

Отсюда минимальное значение σ_{max} будет при $\lambda_p = 1,5$. Зависимости коэффициентов $K_{\Delta d}$, K_{σ} , K_l от λ_p представлены на рис. 5.14. Из графика видно, что значения напряжения σ_{max} (K_{σ}) незначительно изменяются в пределах значений $\lambda_p = 1,25 \dots 2$. Наиболее короткие цанги будут получены при больших колебаниях силы подачи прутка и небольших отклонениях от диаметра. Значения λ_p не следует принимать менее 1,25, так как длина лепестка при этом резко увеличивается. Так, например, уже при $\lambda = 1,25$ длина лепестка по сравнению с $\lambda_p = 2$ увеличивается в 1,6 раза.

Рассмотрим некоторые методы повышения точности и быстродействия подачи прутка. Статические погрешности подачи обусловлены различными отжатиями упора и пластическими деформациями торца прутка от силы воздействия $\bar{P}_{п-у}$ его на упор:

$$\bar{\Delta}_{оп.с} = \bar{P}_{п-у} / \bar{C}_{п-у},$$

где $\bar{P}_{п-у} = \bar{P}_п - \bar{F}_{нт}$; $\bar{P}_п$ — сила, передаваемая патроном прутку от привода; $\bar{F}_{нт}$ — сила трения прутка в направляющей трубе; $\bar{C}_{п-у} = (\bar{C}_у \bar{C}_{кп}) / (\bar{C}_у + \bar{C}_{кп})$ — жесткость системы прутки—упор; $\bar{C}_у$ — жесткость упора; $\bar{C}_{кп}$ — контактная жесткость стыка прутки—упор. В формуле взяты номинальные средние значения величин, а с учетом случайного разброса

$$\Delta_{оп.с} = \bar{\Delta}_{оп.с} \pm 0,5 \delta_{оп.с},$$

где

$$\delta_{оп.с} = \frac{\bar{P}_{п-у}}{\bar{C}_{п-у}} \left(\frac{\Delta P_{п-у}}{\bar{P}_{п-у}} - \frac{\Delta C_{п-у}}{\bar{C}_{п-у}} \right);$$

$\Delta P_{п-у}$ — разброс силы воздействия подающего патрона на упор, принимаемый равным разности $\Delta P_п$ сил сцепления $P_{п\max}$ (для прутка $d_{\max}$) и $P_{п\min}$ ($d_{\min}$); $\Delta C_{п-у}$ — разброс жесткости системы прутки—упор, равный $\Delta C_у$ при $\bar{C}_{кп} \gg \bar{C}_у$.

Тогда

$$\Delta_{оп.с} = \frac{\bar{P}_п}{\bar{C}_у} \left[1 \pm 0,5 \left(\frac{\Delta P_п}{\bar{P}_п} + \frac{\Delta C_у}{\bar{C}_у} \right) \right].$$

Так как на $\Delta P_п$ существенное влияние оказывает жесткость лепестков $C_л$, величина их сведения δ , зависящая от Δd , и коэффициент сцепления μ , то с учетом их разброса

$$\Delta P_п = C_л \delta \mu z \left(\frac{\Delta C}{C_л} + \frac{\Delta \delta}{\delta} + \frac{\Delta \mu}{\mu} \right).$$

Отсюда видно, что снижение величины $\Delta_{оп.с}$ может быть достигнуто за счет повышения $\bar{C}_у$, снижения разбросов $\Delta C_л$, $\Delta \delta$, $\Delta \mu$.

При увеличении количества лепестков z (или уменьшении жесткости лепестков) диапазон отклонений диаметров прутка Δd увеличивается, а показатель $\epsilon_p = \Delta P_п / \Delta d$

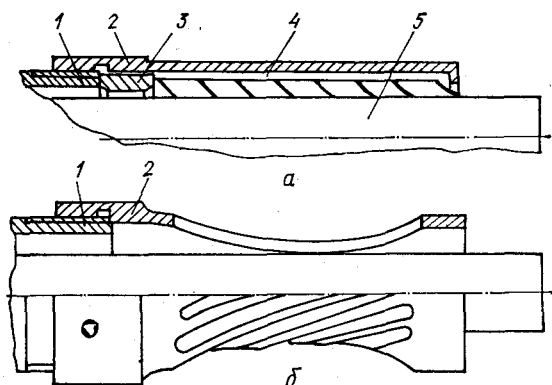


Рис. 5.16. Долговечные:

а — многолепестковые; *б* — широкодиапазонные подающие цанги: 1 — труба подачи; 2 — корпус; 3 — кольцо; 4 — штампованные рабочие лепестки; 5 — пруток

уменьшается (рис. 5.15), т. е. увеличивается запас на износ при повышении точности подачи. Это основной путь создания широкодиапазонных подающих цанг для токарных автоматов с ЧПУ, встраиваемых в ГПС.

На рис. 5.16 приведены долговечные и широкодиапазонные подающие цанги, в которых используется многолепестковый и многорядный охват подаваемого прутка. При этом в цанге (рис. 5.16, *а*) за счет эффекта закусывания прутка сила подачи P_n большая, а сила набора P_n незначительная.

В подающих цангах со скрученными лепестками (рис. 5.16, *б*) для обеспечения силы зажима прутка используется потенциальная энергия предварительно изогнутых и закрученных лепестков. Лепестки до скручивания образуются несквозными разрезами на зубофрезерном станке. Достоинством таких цанг является их многократное восстановление за счет дополнительного скручивания.

При создании долговечных подающих цанг, работающих в большом диапазоне диаметров подаваемых прутков, что особенно важно для прутковых автоматов с ЧПУ в ГПС, необходимо стремиться обеспечить силовую характеристику (кривая 3, см. рис. 5.15) с двумя участками — крутым для предварительного натяга и пологим при работе [28].

При подаче прутка на больших скоростях возможен отскок его от упора или совместное колебание с ним, что оценивается амплитудой колебания за период рассогласо-

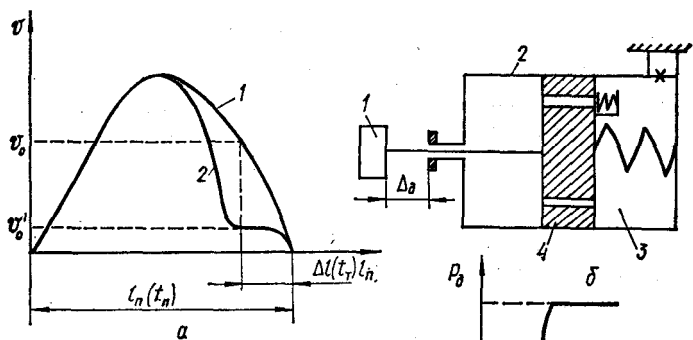


Рис. 5.17. Способы повышения точности подачи прутка при высоком быстродействии:

а — изменение закона движения; б — применение демпфирующего упора; в — отсечение силы соударения прутка с упором

вания работы механизмов подачи и зажима прутка. Сила отрыва прутка от упора определяется из анализа уравнения их совместного движения во время первого соударения [19]:

$$P_0 = \beta_v v_0 \sqrt{C_y (m^2 - 1) / (m + m_y)}, \quad (5.11)$$

где m и m_y — приведенные массы прутка и упора; β_v — коэффициент восстановления скорости прутка и упора; v_0 — начальная скорость соударения.

При $P_0 > P_{п-у}$ происходит отскок прутка, поэтому необходимо стремиться уменьшить силу P_0 за счет уменьшения v_0 и β_v , изменяя закон подачи, увеличивая демпфирующие свойства упора [19].

Для повышения точности подачи прутка до упора, за счет устранения отскока при высоком быстродействии необходимо: изменять закон подачи так, чтобы при подходе к упору на участке Δl скорость снижалась с v_0 до v_0' (ползучая скорость) при времени торможения t_τ (рис. 5.17, а); использовать силы магнитного притяжения стального прутка к жесткому упору; применять демпфирующий упор (рис. 5.17, б) при жестком основании, содержащий подвижную часть 1, встречающую прутки с упреждением $\Delta_d = 3 \dots 8$ мм, неподвижную часть 2, представляющую заполненную жидкостью полость 3 с каналами и клапанами в поршне 4 для автоматического регулирования дисси-

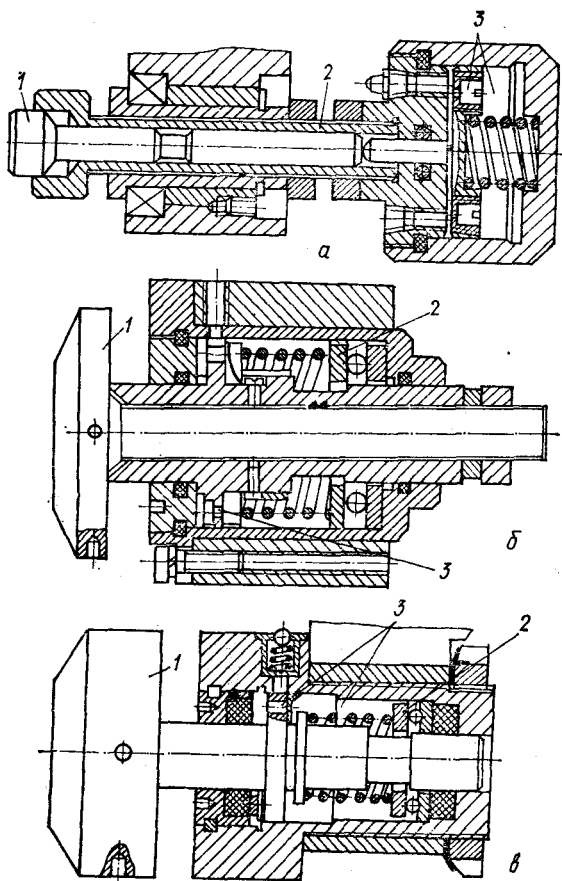


Рис. 5.18. Конструкции демпфирующих упоров к многошпиндельным токарным автоматам

пассивной связи (рис. 5.17, в); создавать противодействие движению прутка при встрече с упором.

Применение демпфирующих упоров (рис. 5.18 а, б, в,) на многошпиндельных токарных автоматах позволило устранить отскок прутка от упора при изменении его кинематической энергии до 1000 и более раз и времени торможения демпфером в пределах 0,03...0,05 с (общее время торможения на демпфирующем упоре составляет 0,05...0,1 с).

Следует решать проблему безупорной подачи прутка за счет вытягивания его захватным устройством.

5.4. Конструирование устройств автоматической смены заготовок

Автоматизация вспомогательных операций смены заготовок и деталей на станках с ЧПУ создает предпосылки для внедрения трудосберегающей («безлюдной») технологии, а также повышает их эффективность за счет сокращения простоев станков между отдельными рабочими циклами. Многообразие компоновок станков ведет к различию конструкций устройств автоматической смены заготовок (УАСЗ).

На многооперационных станках для обработки призматических деталей широко применяют многопозиционные загрузочные столы, которые позволяют во время обработки предыдущей детали установить следующую в непосредственной близости от рабочего места станка. Конструкция УАСЗ (рис. 5.19) проста, поперечное перемещение осуществляется стойкой 9 станка, а стол 6 имеет лишь одно продольное движение. У стола установлено дополнительное основание, по направляющим которого могут передвигаться салазки 5 с двумя платформами 3 (П1) и 2 (П2). На одной из платформ 2 (П2) устанавливается спутник 1 (С2) с очередной заготовкой, вторая платформа 3 (П1) готова к приему спутника 4 (С1) с обработанной деталью. После завершения всех операций на станке стол 6 перемещается в позицию загрузки, в которой транспортные направляющие стола 6 совпадают с направляющими свободной платформы 3 (П1). В шпиндель станка вместо инструмента вставляется специальная оправка 7 с замком, соединяющим ее

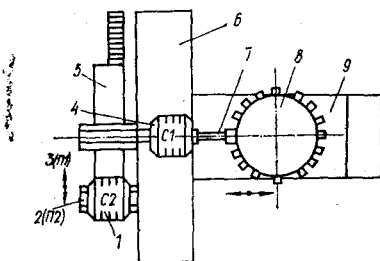


Рис. 5.19. УАСЗ на многооперационном станке

с кронштейном спутника 4 (С1). Затем поперечным движением стойки 9 спутник 4 (С1) передвигается со стола 6 на свободную платформу 3 (П1). После расцепления оправки каретка с платформами перемещается до крайнего положения в котором вторая платформа 2 (П2) с новым спутником 1 (С2) окажется совмещенной с позицией стола

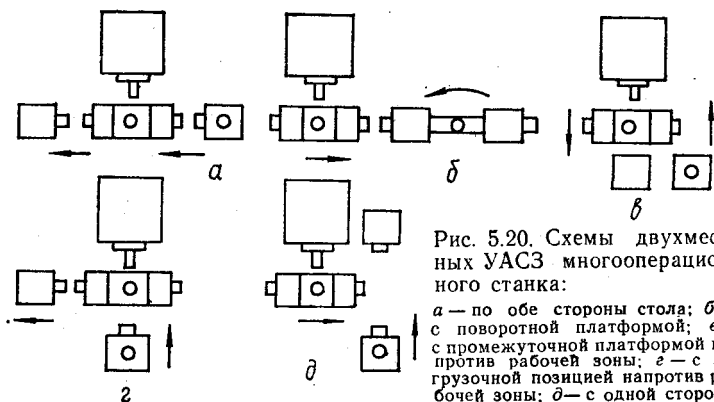


Рис. 5.20. Схемы двухместных УАСЗ многооперационного станка:

а — по обе стороны стола; б — с поворотной платформой; в — с промежуточной платформой напротив рабочей зоны; г — с загрузочной позицией напротив рабочей зоны; д — с одной стороны стола

станка. Оправка 7 захватывает новый спутник 1 (С2) и обратным движением стойки 9 затаскивает его на рабочую позицию стола 6. Оправка в шпинделе заменяется на первый необходимый для работы режущий инструмент из магазина 8. Каретка разгружается спутником 4 (С1) с готовой деталью, возвращается в исходное положение, и на нее устанавливается спутник со следующей на обработку заготовкой.

Двухместные УАСЗ могут широко варьироваться по компоновке и конструктивному оформлению (рис. 5.20). Многоместные УАСЗ (рис. 5.21) выполняют также функции накопителей, создавая запас деталей для обработки иногда на полную рабочую смену. При этом станок частично превращается в автономно действующий модуль (технологический).

Спутники для призматических деталей выполняют в виде плоских плит-столов (палет) с точно обработанными базовыми плоскостями для крепления на них заготовок. Для этого предусматривают Т-образные пазы или сетку чередующихся резьбовых фиксирующих отверстий. Для зажима применяют пружинно-гидравлические цилиндры.

Автоматическую смену заготовок на токарных станках с ЧПУ обычно осуществляют «механической рукой» (автооператором), установленной на станке, либо промышленным роботом, обслуживающим несколько станков на основе автономного технологического модуля. В отдельных случаях целесообразно обслуживание одного токарного станка в составе модуля промышленным роботом напольного или навесного типа.

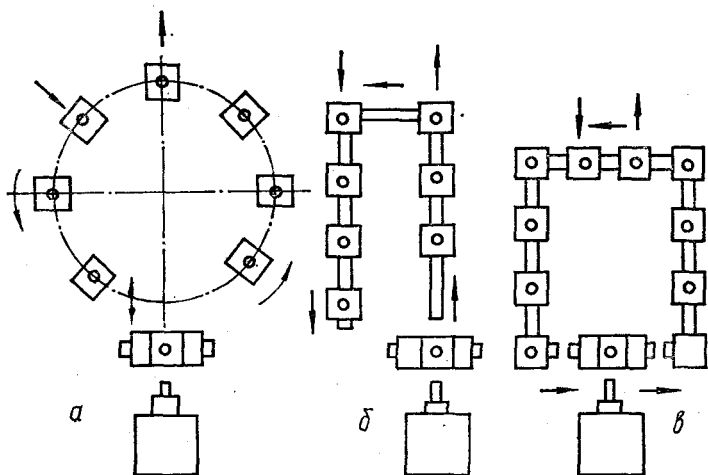


Рис. 5.21. Схемы многоместных УАСЗ различного типа:
а — карусельного; *б* — разомкнутого прямоугольника; *в* — замкнутого прямоугольника

Для надежности установки и зажима длинных валов применяют поводковые патроны с самоустанавливающимся по их торцу поводком с зубьями и поджимом вращающимся центром задней бабки. Для установки роботом коротких деталей их захваты снабжаются пружинным поджимом.

5.5. Общие принципы конструирования механизмов автоматического зажима заготовок

Любой механизированный зажимной механизм (ЗМ) как система состоит из нескольких элементов: источник энергии, командное устройство, силовое устройство, связывающие элементы и исполнительное устройство, непосредственно обеспечивающее зажим. Обычно эти элементы обособлены, но имеются случаи, когда силовое устройство, связывающие элементы и исполнительное устройство объединены.

Анализ различных ЗМ показал, что независимо от назначения, схемы работы и конструктивного исполнения системы ЗМ имеют общую структуру и функциональную схему (рис. 5.22), включающие источник и преобразователи энергии (ПЭ) и движущие силы (моменты), узел управления (УУ), привод (Пр) с передаточно-усилительным механизмом

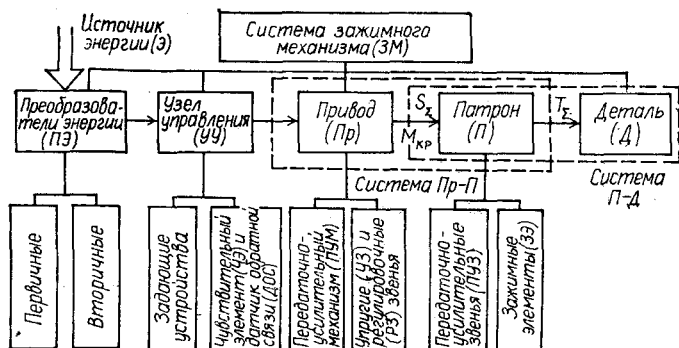


Рис. 5.22. Обобщенная структурно-функциональная схема ЗМ

(ПУМ) и упругими звеньями (УЗ) для переноса движущей силы и передачи на исполнительный механизм — патрон (П) (или приспособление), преобразующий движущую силу в зажимную, непосредственно воздействующую на деталь (или несколько деталей). Патрон состоит из передаточно-усилительных звеньев (ПУЗ) и зажимных элементов (ЗЭ), расположенных в одном или нескольких местах. ПУМ может быть назван как передаточно-преобразовательный механизм (ППМ), так как он преобразует силы и перемещения (силы усиливает, перемещения уменьшает).

В любой системе ЗМ есть подсистемы, которые можно рассматривать как самостоятельные системы и роль их различна для различных состояний ЗМ [26]. К ним относятся системы привод—патрон (Пр—П) и патрон—деталь (П—Д), каждая из которых может быть в свою очередь многозвенной и сложной.

В зависимости от источника энергии различают ЗМ: механические, гидравлические, пневматические, вакуумные, электрические, электромеханические, магнитные, электромагнитные, центробежные, электрогидравлические и др. [26, 38]. В зависимости от назначения системы ЗМ могут быть: стационарные или подвижные, с прямолинейным и вращательным движением выходного звена (тяги), для универсальных, специальных и специализированных металлорежущих станков, для автоматов, станков с программным управлением и т. д. В зависимости от технологического процесса они могут использоваться на токарных, фрезерных, сверлильных, зубообрабатывающих, шлифовальных и других станках. В зависимости от конструктив-

ного исполнения и длины зажимаемой цилиндрической заготовки ЗМ делят на три группы: а) со сквозным отверстием в патроне и шпинделе; б) со сквозным отверстием в патроне; в) без сквозного отверстия.

В зависимости от характера замыкания силового устройства — привода широко применяемые ЗМ постоянной структуры делятся на четыре основных вида: 1) с неупругим силовым замыканием вследствие действия внешних сил в течение всего периода работы ЗМ, в зажатом состоянии, т. е. силовой контур ЗМ открытый и всегда связан с источником и преобразователями энергии; 2) с упругим силовым замыканием за счет потенциальной энергии натягиваемого при разжиме упругого звена в виде пружины или пакета тарельчатых пружин; 3) с геометрическим замыканием, при котором сила зажима определяется натягом (упругой деформацией), отключенной от привода цепи, в сторону объекта закрепления; 4) с фрикционным замыканием в виде самоторможения, определяемым геометрией передаточных звеньев и обеспечивающим возрастание силы трения с дальнейшим отключением нагрузки от привода после достижения требуемой величины и заклинивания. Последние два вида ЗМ экономичны, так как имеют закрытый силовой контур, отключенный от источника энергии. В одном ЗМ возможны различные замыкания: силовые, геометрические и фрикционные. Такие ЗМ относятся к комбинированным.

В последнее время появились ЗМ переменной структуры [38, 54], к которым можно отнести самонастраивающиеся, с автоматическим регулированием характеристик, многофункциональные и др., имеющие автоматически переключающиеся кинематические цепи.

Неупругое силовое замыкание (рис. 5.23, а, б) осуществляется за счет объемных сил давления жидкости, газа, магнитных, центробежных и электростатических сил, что определяет его основное достоинство — стабильность независимо от отклонений размеров заготовки, возможность бесступенчатого и автоматического регулирования силы зажима, изменением давления, напряженности магнитного или электростатического поля, центра тяжести инерционной системы и т. д. Существенный недостаток неупругого силового замыкания — большой расход электроэнергии и низкая надежность при нестабильном энергоснабжении, что требует дополнительных предохранительных средств. Этот недостаток исключен в ЗМ с упругим силовым замыканием, если зажим осуществляется пружиной, а разжим,

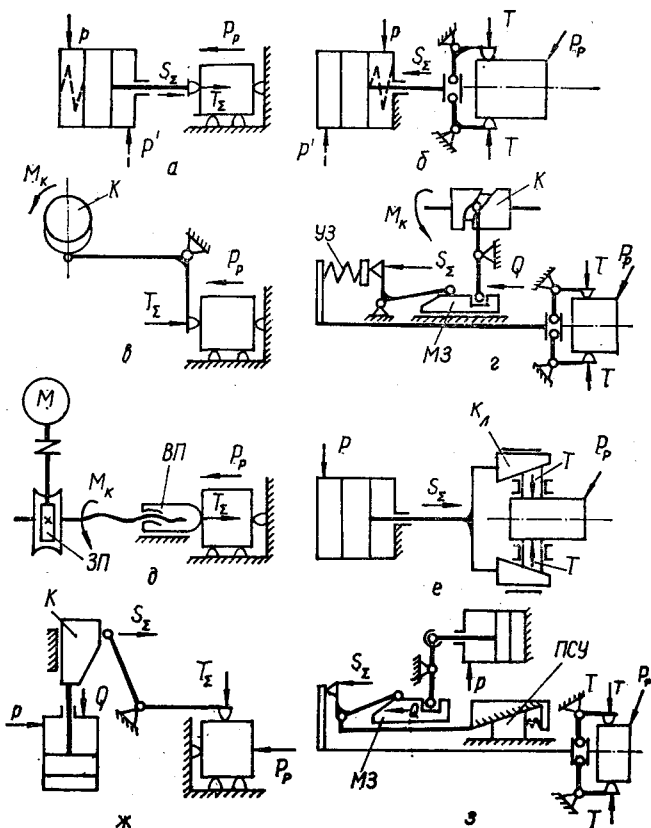


Рис. 5.23. Принципиальные схемы ЗМ:

а, б — с силовым замыканием; в, г — с геометрическим замыканием; д, е — с фрикционным замыканием (самоторможением); ж, з — комбинированных

давлением жидкости или воздуха. Однако такие ЗМ неудобны для автоматического регулирования силы зажима, а ее стабилизация при отклонении размеров зажимаемых заготовок достигается увеличением длины пружины или подбором пакета с нелинейной характеристикой [38].

Силовое замыкание может быть прямого действия (рис. 5.23, а), т. е. без передаточно-усилительных, преобразовательных и самотормозящих передаточных звеньев. В этом случае осевая сила S_z от привода равна нормальной (радиальной) силе зажима T_z , что не требует дополнитель-

ных исполнительных органов, например патрона с зажимными кулачками. В этом случае, если сила резания, направленная против сил зажима, станет больше S_z и сил трения, то шток может сразу сильно переместиться [54], предварительно сместившись на величину упругих деформаций звеньев и контактов, т. е. на величину предварительного натяга. Наличие в ЗМ с силовым замыканием патронов с замкнутым силовым контуром (кулачковых, клиновых, цанговых и др.) не вызовет больших перемещений передаточного звена — штока при действии сил резания P_p (рис. 5.23, б).

Геометрическое замыкание осуществляется за счет геометрической формы и размеров деталей-кулачков К (рис. 5.23, в) и муфт зажима МЗ (рис. 5.23, г), имеющих фасонный участок с подъемом и участок постоянного радиуса или высоты, на котором происходит замыкание [12, 38]. Геометрическое замыкание может быть жестким, т. е. без дополнительного упругого звена (рис. 5.23, в), и упругим, с дополнительным упругим звеном УЗ (рис. 5.23, г), имеющим линейную или нелинейную характеристику. В системе ЗМ может быть несколько элементов с геометрическим замыканием, например с кулачком К на распределительном валу и муфтой МЗ на шпинделе (рис. 5.23, г), что широко распространено на токарных прутковых автоматах. Основные достоинства геометрического замыкания — быстроедействие, экономичность и надежность, а существенные недостатки — короткий ход и нестабильность силы зажима, зависящая от отклонений размеров зажимаемых деталей и жесткости звеньев ЗМ.

Эти недостатки исключены в ЗМ с фрикционным замыканием (самоторможением) за счет выполнения в приводе или патроне самотормозящих винтовых (ВП), червячных зубчатых (ЗП) и клиновых (КП) передач (рис. 5.23, д, е), а также в виде фрикционных муфт [38]. Основные достоинства — большой ход и постоянная (регламентируемая) сила зажима, настраиваемая предохранительным звеном, например, в виде муфты предельного момента или напорного золотника. Недостаток — недолговечность самотормозящих элементов.

Пример комбинированного ЗМ с сило-геометрическим замыканием постоянной структуры приведен на рис. 5.23, ж, а переменной структуры с подвижным самотормозящим упором (ПСУ) [38, 39] — на рис. 5.23, з.

Основной частью любой системы ЗМ является исполни-

тельная — зажимной патрон с зажимными элементами, взаимодействующими непосредственно с объектом закрепления. От конструкции и характеристик зажимного патрона во многом зависят характеристики ЗМ, а также технико-экономические показатели станка, среди которых точность, производительность и стабильность обработки. Исполнительная часть ЗМ может быть выполнена по-разному, чаще всего в виде тисков, самотормозящей втулки, цанги, патрона и т. д.

Разнообразие патронов практически неограничено и они могут быть различных конструктивных исполнений, назначений, размеров, точности и жесткости.

В прутковых автоматах широкое применение получили цанговые ЗМ, область применения которых и соответствующих им патронов расширяется с повышением точности зажима и ужесточением связи между элементами патрона [26].

В одношпиндельных токарных автоматах, к которым относятся фасонно-отрезные, продольно-фасонные точения и револьверные, от кулачка 1 (рис. 5.24, а) на распределительном валу, через рычажную передачу 2 получает поступательное перемещение муфта 3, которая за счет фасонного профиля приводит в движение рычажки 5, а от них конусную втулку 7. Втулка наезжает на цангу 8, упирающуюся в гайку 9, навинченную на шпиндель — происходит зажим детали 10. В приводе таких механизмов упругое звено (УЗ) или отсутствует, или выполнено в виде компенсатора 4 с линейной характеристикой, а разжим происходит за счет упругости лепестков цанги и пружины 6.

В многошпиндельных токарных автоматах кроме кулачка 1 (рис. 5.24, б) и рычажной передачи 2 добавляется ползун зажима 3 и вилки 4, которые перемещаются по скалкам, установленным в шпиндельном барабане. На каждом из шпинделей имеется муфта 7, рычажки 8 и упругое звено 9, которое может быть выполнено в виде предварительно натянутого пакета тарельчатых пружин с нелинейной характеристикой. Связь цанги 6, зажимающей прутки 5, с приводом осуществляется с помощью трубы 10.

В токарно-револьверных станках, предназначенных для зажима прутков и штучных заготовок с большими отклонениями диаметра, широкое распространение получили силовые гидро-, пневмоприводы (рис. 5.24, в). При подаче масла (воздуха) под давлением p в полость вращающегося цилиндра 2 поршень 1, труба 3 и цанга 4 перемещаются влево, обес-

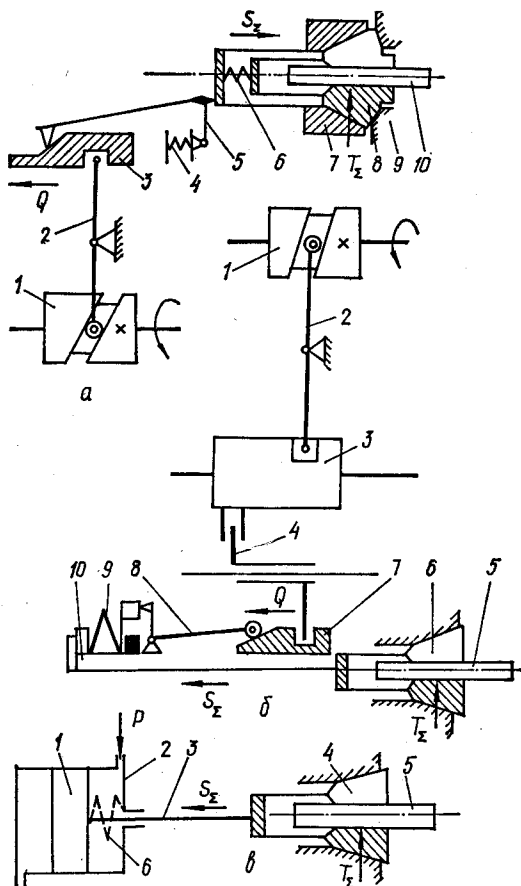
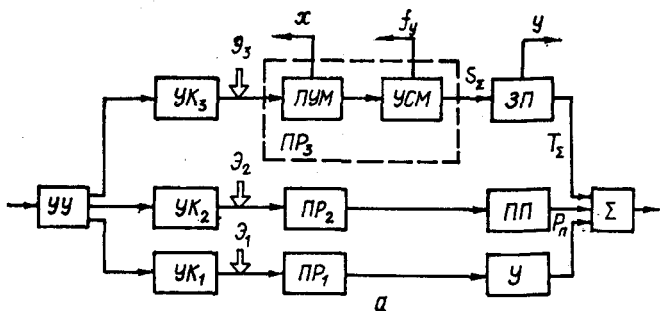


Рис. 5.24. Типовые схемы цанговых ЗМ с замыканием:

а, б — геометрическим; в — силовым

печивая зажим прутка 5. Зажим может осуществляться пружиной 6, а разжим — гидро-, пневмоприводом.

В ЗМ с геометрическим замыканием закон движения трубы зажима определяется в основном кулачком и передаточным отношением звеньев ПУМ, а в ЗМ с силовым замыканием режим движения рабочей среды (жидкости или воздуха), ее расходом, жесткостью, срабатыванием пружины и тормозными силами. В токарных прутковых автоматах с ЗМ согласовано работают механизмы подачи прутка.



Механизм	Положение	Такты							
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
Зажима (ЗМ)	Конечное (зажим)	■				■	■	■	■
	Начальное (разжим)		■	■	■				
Подачи (МПП)	Конечное (подача)				■	■	■		
	Начальное (набор)	■	■	■				■	■
Упора (МУП)	Конечное (выход)			■	■	■			
	Начальное (возврат)	■	■				■	■	■

б

Рис. 5.25. Механизмы зажима, подачи и упора прутка токарного автомата:

а — общая блочно-функциональная схема; б — тактограмма работы

На рис. 5.25, а показана общая блочно-функциональная схема механизмов зажима, подачи и упора пруткового автомата с центральным управлением, где каждая цепочка включает управляющий кулачок $УК_1...УК_3$ (действие каждого УК синхронизировано от узла управления, например в виде распределительного вала); источник энергии $Э_1...Э_3$; привод $ПР_1...ПР_3$ и исполнительный элемент; упор (У), подающий патрон (ПП) и зажимной патрон (ЗП). Графическое изображение последовательности работы механизмов приведено (рис. 5.25, б) в виде тактограммы.

В технологической системе станка функциональная работоспособность ЗМ проявляется по-разному в процессе зажима—разжима и в процессе резания. Система ЗМ подвержена внешним воздействиям со стороны главного привода или механизмов станка, станка в целом и окружающей среды (колебания механизмов и станка, вибрация фун-

дамента, температура среды и т. д.). В процессе обработки в качестве возмущающего воздействия на систему ЗМ через объект закрепления служат силы резания.

На привод и патрон в процессе зажима—разжима и при резании воздействуют возмущения, связанные, например, с колебаниями шпинделя, центробежными силами неуравновешенных частей, эксцентricностью обрабатываемой детали (штучной заготовки или прутка) и т. д.

Система ЗМ может быть разомкнутая и замкнутая. В замкнутой системе ЗМ возможны общие обратные связи между деталью (выходом) и устройством сравнения — входом, между патроном и входом, приводом и входом. В этом случае ЗМ может быть с автоматическим регулированием в процессе зажима и при резании и с автоматической подналадкой до зажима или в процессе зажима. В разомкнутых системах ЗМ, как и в замкнутых, существуют местные (условные) обратные связи между деталью и приводом, патроном и приводом. В качестве периодического возмущающего воздействия на систему ЗМ оказывает влияние сама деталь (отклонение ее размера, жесткости, формы и т. д.).

В станках с ЧПУ требуется дифференцированное отношение к отдельным существенным техническим характеристикам ЗМ, например быстропереналадживаемости, широкодиапазонности и т. д.

В металлорежущих станках с ЧПУ ЗМ оказывают значительное влияние на точность и производительность обработки деталей.

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

Трудно создать эффективный ЗМ, обеспечивающий высокую точность и большие усилия закрепления. Поэтому проектирование эффективных ЗМ должно базироваться на достаточно глубоком анализе и расчете параметров процесса закрепления при взаимодействии их основных элементов.

Среди требований, предъявляемых к ЗМ в процессах зажима—разжима (I состояние) и резания (II состояние), объясняющих большое многообразие их конструкций, основными являются: сила (необходимое условие), жесткость, точность при их стабильности, прочность, быстродействие, энергоэкономичность, компактность, габариты, безотказность работы, долговечность и конструктивная простота. Кроме основных, к ЗМ предъявляется ряд дополнительных и специальных требований: быстросменность, быстроперенастраиваемость, легкость регулировки, широкодиапазонность, защищенность, ремонтпригодность, возможность автоматической регулировки характеристик зажима или дистанционного управления, бесшумность, безопасность и др. Таким образом, основные и дополнительные требования к ЗМ вытекают из требований, предъявляемых к станку, технологическому процессу и определяющих точность и производительность обработки при высоком качестве выпускаемой продукции.

Силы зажима заготовки, инструмента или подвижного узла станка должны обеспечить достаточную жесткость контакта сопряженных поверхностей, предотвратить их смещение в процессе обработки, возникновение вибраций и предотвратить недопустимые деформации элементов системы. Сила зажима должна создать предварительный натяг системы, превышающий действие других сил (резания, инерции) и при этом должна находиться в определенных пределах. Она не может быть меньше величины, обеспечивающей производительную и точную обработку деталей и не может быть чрезмерно большой, чтобы вызывать недопустимые деформации обрабатываемых деталей и элементов станка, а также повышенный износ механизма. Требуемые силы зажима можно аналитически определить для сравнительно простых конфигураций толстостенных деталей. Для тонкостенных деталей сложной конфигурации аналитическое определение требуемых сил зажима практически невозможно. Для таких деталей силы зажима часто принимают по аналогии с силами, действующими в ЗМ (проверенными в эксплуатации) и обеспечивают возможность в проектируемой конструкции регулировать эти силы в значительных пределах. При создании некоторых ЗМ проводят специальные эксперименты для определения сил зажима и выбора мест расположения основных и дополнительных опор.

При определении требуемых сил зажима учитывают возможность отклонений механических качеств и размеров за-

готовок, затупления режущего инструмента и вызванное этим увеличение сил резания, отклонение сил трения в зажимных элементах. Эти факторы могут учитываться соответствующими исходными данными для расчета или коэффициентом запаса. Коэффициент запаса $K_{\text{зап}}$ принимают в пределах 1,5...2, за исключением случаев, когда силы резания отжимают заготовку от баз, тогда $K_{\text{зап}}$ должен быть не менее 2,5. Рекомендуется [38] принимать коэффициент запаса $K_{\text{зап}}$ равным произведению первичных коэффициентов, отражающих конкретные условия обработки; в соответствии с этим $K_{\text{зап}}$ может приниматься в пределах 1,5...8. Силы зажима, необходимые для предотвращения смещения заготовки в процессе обработки, приближенно определяют из уравнений статики. Для принятой схемы закрепления заготовки рассматривают условия равновесия приложенных к ней сил: известных сил резания и других сил, возникающих в процессе обработки, искомых сил зажима, реакций опор и сил трения. Затем для проверки возможности получения требуемой точности обработки деталей выполняют дополнительные расчеты возникающих удельных давлений в стыках, деформации заготовки и элементов системы. Эти расчеты могут выявить необходимость уточнения или изменения схемы установки и закрепления заготовки, изменения режимов обработки.

Расчет деформации системы ведется по упругим характеристикам отдельных элементов и контактной жесткости стыков между ними [52, 63]. Как показали экспериментальные исследования, с увеличением давления затяжки стыка коэффициент контактной податливости сначала резко уменьшается, а затем при давлениях выше 3,0...3,5 МПа для шлифовальных и шабренных поверхностей почти не меняется. Поэтому в случаях, когда нет опасности раскрытия стыков под нагрузкой, повышение давления свыше 3,0 ... 3,5 МПа для увеличения жесткости стыка не является необходимым.

Стыки деталей, отсутствие смещения которых обеспечивается трением, рассчитывают так, чтобы касательные смещения в них не переходили в область пластических.

В станках с ЧПУ и станочных системах время операций, связанных с манипулированием заготовками и инструментами (загрузка, зажим—разжим, перекантование, смещение и т. д.) оказывает существенное влияние на общий баланс времени выполнения технологических операций. Имеются такие технологические системы с автоматическим циклом

управления, в которых операции так расчленены, что время вспомогательных движений соизмеримо с машинным временем. Поэтому время зажимных операций должно быть сведено до нескольких секунд или даже их долей. По быстродействию среди различных конструкций ЗМ следует отдать предпочтение вакуумным, пневматическим и магнитным ЗМ. Кроме использования быстродействующих приводов рабочего перемещения зажимных элементов необходимо создавать такие ЗМ переменной структуры, в которых рабочий ход зажима был бы предельно малым и служил только для натяга системы, а выбор зазора при переходе на другой размер обрабатываемой заготовки осуществляется дополнительными кинематическими цепями с большой скоростью.

Усложнение технологических циклов, включение ЗМ в автоматизированные технологические системы и установка их в дорогие металлорежущие станки накладывает достаточно высокие требования к надежности, так как поломка ЗМ приводит к неизбежному простоя станка или целой технологической линии. Еще один существенный факт, что в половине случаев отказ ЗМ приводит к повреждению режущего инструмента или рабочего органа станка, а также к травмированию обслуживающего персонала.

Правильное функционирование ЗМ связано с согласованным действием других механизмов станка и выработкой сигналов, обусловленных: наличием обрабатываемой заготовки; включением привода зажима; регулированием силы зажима; достижением предварительно заданной силы зажима; включением механизма или переключением на установленный режим работы; окончательным отклонением.

Многообразие требований к ЗМ как в процессе зажима, так и в процессе резания при их взаимосвязи порождает множество различных схем и конструкций, среди которых всегда существуют оптимальные по соответствующим критериям качества. Тем не менее, независимо от структуры, схемы и конструктивного исполнения все системы ЗМ имеют единую структуру, включающую множество p вариантов: источник (ИЭ) — преобразователи энергии (ПЭ) — привод (Пр) — патрон (П) — деталь (Д). С увеличением количества вариантов число различных множеств растет в соотношении p^{p-2} . Существенно различные (неизоморфные) множества подсчитываются комбинаторными методами с помощью производящих функций и их меньше. Количество вариантов всей системы ЗМ может быть значительным, что

потребовало бы при ручном переборе десятки, сотни и даже тысячи лет. Поэтому автоматизированное проектирование ЗМ с применением ЭВМ весьма актуально.

При проектировании ЗМ приходится решать многоуровневые задачи разной сложности [54], связанные с выбором принципа (или способа) зажима, т. е. руководящей технической идеи, структуры для выбранного принципа зажима, схемы для выбранной структуры и конструкции с оптимальными параметрами выбранной схемы.

При оптимальном проектировании ЗМ на различных уровнях (см. рис. 2.5) необходимо учитывать все факторы, оказывающие существенное влияние на объем проектирования, и вести целенаправленный, планомерный поиск решения, используя системный подход, т. е. объект и процесс проектирования рассматривать как систему, взаимодействующую со смежными системами и окружающей ее средой.

При моделировании, например, патронов по виду зажимных элементов используют совокупности независимых сечений и контуров. Зажимной элемент может служить основой различных схем патронов, образуя множество вариантов в продольном и поперечном сечениях.

Наиболее сложным и важным является поиск новых технических идей, в частности, новых принципов зажима, в которых используются новые эффекты и знания в области фундаментальных наук, современные достижения в науке и технике на уровне открытий и изобретений.

Эти задачи трудно формализуемы, требуют применения теории неформальных процедур, принятия решений при неполной исходной информации, укрупнения критериев оптимизации и диалоговой работы с ЭВМ, наделенных искусственным интеллектом и имитационной системой САПР. В данном случае очень важно сотрудничество конструктора и математика, т. е., что не сможет сделать конструктор, выполнит математик и наоборот.

Прежде чем заниматься синтезом ЗМ, необходимо выполнить строгую классификацию приводов, патронов и систем ЗМ в целом; найти приемы формализации (частной или полной) задач выбора принципов зажима, структурного и схемного синтеза; разработать комплексный безразмерный показатель качества ЗМ для анализа различных структур, схем, конструкций и выбрать лучший вариант; уточнить критерии оптимизации и налагаемые ограничения на уровнях схемного и параметрического синтеза; найти область

применения различных методов поиска новых технических решений; разработать новые методы и приемы структурного и схемного синтеза; создать общий алгоритм оптимального проектирования и частные алгоритмы на различных уровнях проектирования, в том числе с использованием ЭВМ для автоматизации этого процесса.

Имея исходные данные для проектирования ЗМ, а также сведения о протекающих в них процессах и явлениях с учетом предъявляемых требований и главной цели, необходимо правильно поставить задачу, т. е. выбрать целевую функцию, критерии оптимизации и технические ограничения, условия работоспособности и модели ЗМ (физические, динамические и математические).

Далее задача проектирования решается многоциклично: выбирается принцип зажима; с использованием сведений о процессах зажима и резания на последующих уровнях выполняется анализ, позволяющий вывести показатели качества, сформулировать критерии и ограничения для синтеза на различных уровнях; приводится последующий анализ с параллельным сравнением нескольких вариантов и выбор наиболее предпочтительного.

Требования к ЗМ могут быть выражены количественно через соответствующие характеристики. Величина и разброс характеристик ЗМ зависят от качества их изготовления и регулировки, поскольку это является функцией отклонения от номинала многих линейных, угловых размеров, жесткости деталей, сил трения, качества сборки и т. д. На стабильность характеристик большое влияние оказывает отклонение размера (диаметра) зажимаемой поверхности объекта закрепления:

$$\Delta d = d_{\max} - d_{\min}.$$

Абсолютная величина любой характеристики — функции Φ определяется ее средним значением $\Phi_{\text{ср}}$ или математическим ожиданием $\bar{\Phi}$:

$$\Phi = \Phi_{\text{ср}} = 0,5 (\Phi_{\max} + \Phi_{\min}),$$

$$\Phi = \bar{\Phi} = 1/n \sum_{i=1}^n \Phi_i,$$

где $\Phi_{\max}$, $\Phi_{\min}$ и Φ_i — соответственно максимальное, минимальное и случайное абсолютное значение характеристики; n — число замеров случайных значений (объем выборки) характеристики.

Разброс характеристик может определяться их абсолютной разностью $\Delta\Phi$ или дисперсией σ_Φ^2 :

$$\Delta\Phi = \Phi_{\max} - \Phi_{\min},$$

$$\sigma_\Phi^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \bar{\Phi})^2.$$

Относительный разброс характеристик может определяться различными коэффициентами и показателями (табл. 5.2). Например, суммарная радиальная сила зажима

5.2. Относительный разброс характеристик ЗМ

№ п/п	Наименование	Обозначение	Формула
1	Показатель нестабильности	ϵ_Φ	$\Delta\Phi/\Delta d$
2	Коэффициент неравномерности	δ_Φ	$\Delta\Phi/\Phi_{\text{ср}}$
3	Коэффициент стабильности	K_Φ	$\Phi_{\min}/\Phi_{\max}$
4	Коэффициент разброса (перегрузки)	λ_Φ	$\Phi_{\max}/\Phi_{\min} = \frac{1}{K_\Phi}$
5	Коэффициент охвата	K_0	$\Delta\bar{d}/\Delta d$
6	Коэффициент диапазонности	δ_d	$\Delta\bar{d}/\bar{d}_{\text{ср}}$ или $\frac{\Delta\bar{d}}{\bar{d}_{\text{ср}} + \bar{d}_0}$
7	Показатель дискретности (комплектности)	K_k	$n/\bar{n}$
8	Коэффициент качества патрона по широкодиапазонности	ϵ'_k	δ_d/δ_Φ

Примечание: $\bar{d}_{\text{ср}}$ — средний диаметр рабочего отверстия патрона; $\bar{d}_0$ — начальный диаметр рабочего отверстия патрона; n — рабочий диапазон целочисленных номиналов диаметров заготовок; $\bar{n}$ — заданный диапазон номиналов диаметров, охватываемых патроном без его переналадки или смены, который может быть дробным или целым.

цилиндрической заготовки с отклонением диаметра Δd может определяться средним значением $T_\Sigma = 0,5(T_{\Sigma \max} + T_{\Sigma \min})$, показателем нестабильности $\epsilon_T = \Delta T_\Sigma/\Delta d = \frac{T_{\Sigma \max} - T_{\Sigma \min}}{d_{\max} - d_{\min}}$, коэффициентами неравномерности $\delta_T = \Delta T_\Sigma/T_\Sigma$, стабильности $K_T = T_{\Sigma \min}/T_{\Sigma \max}$ или разброса

(перегрузки) $\lambda_T = \frac{T_{\Sigma \max}}{T_{\Sigma \min}}$. При $\Delta d = 0$ $\varepsilon_T = 0$, но если $\delta_T \neq 0$, то это характеризует влияние разброса случайных факторов (трения, жесткости детали и т. д.) на неравномерность характеристики — радиальной силы.

При коэффициенте охвата $K_0 < 1$ патрон с рабочим диапазоном Δd не может закреплять заготовки в заданном диапазоне диаметров Δd . При $K_0 = 1$ полностью используется рабочий диапазон патрона и обеспечивается сила зажима не меньше нижнего допустимого уровня. При $K_0 > 1$ имеет место резерв на дополнительный охват диаметров заготовки. В последнем случае K_0 можно рассматривать как показатель запаса на износ рабочей поверхности зажимных элементов патрона при условии, что зажимаются заготовки одного номинального диаметра с соответствующими отклонениями. Признаком, позволяющим отнести патроны к широкодиапазонным, является выполнение условия $K_0 \geq 1$. В противном случае, т. е. когда не обеспечивается охват заданного диапазона диаметров заготовки диапазоном диаметров патрона, последние относятся к узкодиапазонным.

В основном о характеристиках ЗМ судят по характеристикам конечного звена — патрона, в то время, как для привода характеристиками являются: ход зажима, тяговые усилия, коэффициент усиления и передаточное отношение передаточно-усилительного механизма (ПУМ), жесткость упругой системы механизма (УСМ), а также законы движения, характеризующие расход энергии, быстродействие и др.

При последовательном соединении элементов в системе ЗМ, патрона и привода передаточные отношения u , коэффициенты усиления k и КПД:

$$u_m = u_n u_{np}; \quad k_m = k_n k_{np}; \\ \eta_m = \eta_n \eta_{np} = k_m u_m = (k_n u_n) (k_{np} u_{np}),$$

где

$$u_n = y_n / x_t; \quad u_{np} = x_t / x_m; \quad k_n = T / S = T_{\Sigma} / S_{\Sigma}; \quad k_{np} = S_{\Sigma} / Q.$$

5.6. Конструирование и основные характеристики зажимных патронов

Способ зажима во многом определяется направлением зажимного усилия в месте контакта зажимного элемента с объектом закрепления. Рассмотрим на примере зажим деталей типа тел вращения.

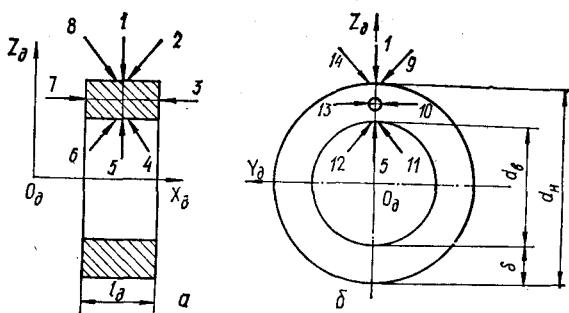


Рис. 5.26. Результирующие усилия зажима в патроне

Зажим цилиндрической детали может определяться силой S_z или моментом M_z привода, создающими направленные зажимного усилия. В плоскости оси детали существует 8 направлений (рис. 5.26, а), а в перпендикулярной плоскости — еще 6 направлений (рис. 5.26, б), определяющих тип зажима: радиальный, угловой, торцевой, заклинивающий, поводковый и комбинированный. Для зажима прутков можно применять только наружный зажим (радиальный, заклинивающий, угловой и комбинированный) с направлениями зажимного усилия (рис. 5.26): 1, 2, 8, 9, 14.

Основные показатели зажима во многом определяются типом патрона и схемой замыкания в нем зажимных сил.

В зажимных патронах механического исполнения в зависимости от требуемого хода зажимных элементов (ЗЭ), силы и точности зажима различают передаточно-усилительные звенья (ПУЗ): рычажные (Р), клиновые (К), мембранные (М), упругие (У) и их сочетания.

В замкнутой системе ЗМ силовой контур зажимного патрона (табл. 5.3) может быть замкнутым (радиальные силы зажима представляют замкнутый многоугольник в плоскости, перпендикулярной оси патрона), разомкнутым (нормальные силы зажима параллельны оси патрона) и комбинированным (результирующие силы зажима действуют в двух плоскостях и сходятся к вершине многогранной пирамиды). В свою очередь замкнутый силовой контур патрона может быть открытым (зажимные элементы не охвачены общим корпусом) и закрытым, что определяется типом последнего передаточно-усилительного звена патрона.

Принцип зажима и тип патрона во многом определяется типом и размером детали. Прутковая заготовка характе-

ризуется изменяемым соотношением диаметрально-длинновы параметров. У деталей с одним вырожденным или гиперболизированным размером число вариантов зажима сокращается. Например, деталь типа мембраны можно зажимать только по плоскости, так как толщина (длина) стремится к нулю и, наоборот, прутки или проволоку нужно зажимать и поддерживать вдоль большего размера, а для исключения прогибов — в двух и более местах.

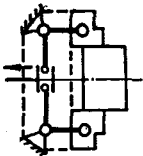
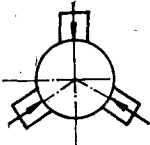
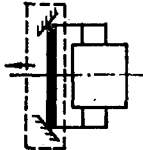
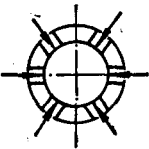
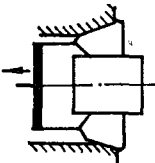
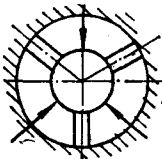
При синтезе структур и схем зажимных патронов целесообразно применять дифференциально-морфологический метод [54], представляющий собой развитие и комбинацию известных [33]. Сущность метода заключается в том, что для разрешения противоречий на стадии поиска структур используются эвристические приемы полного, неполного и комбинированного расчленения зажимного элемента, дифференцирующие и интегрирующие функции и поверхности, что дает различные основные и дополнительные эффекты, а при полном однонаправленном расчленении синтезируемые структуры соответствуют новым принципам зажима или обеспечивают новые качества. В соответствии с основным эффектом расчленения на стадии структурного синтеза выбирают несколько предпочтительных структур по полуформализуемому частному критерию качества, отражающему основное требование к синтезируемому ЗМ, а далее проводят морфологический анализ схем с использованием приемов перестановки, сочетания, установки последовательности работы, функции зажимных элементов и передаточно-усилительных звеньев, введения различных связей, выбора их места. Различные структуры и схемы патронов могут быть получены предложенным методом в сочетании с методами комбинаторики [18, 55].

Приемы расчленения ЗЭ относятся к эвристическим и используются не только при синтезе структур и схем, но и при выборе принципа зажима. Сущность приемов расчленения проследим на синтезе структур зажимных патронов с клиновым передаточно-усилительным звеном (ПУЗ) к которым относятся цанговые патроны.

Каждый вид расчленения дает определенный эффект — основной и дополнительный. Расчленение может быть: полное, (продольное, поперечное, угловое, звездой, гранное), неполное и комбинированное.

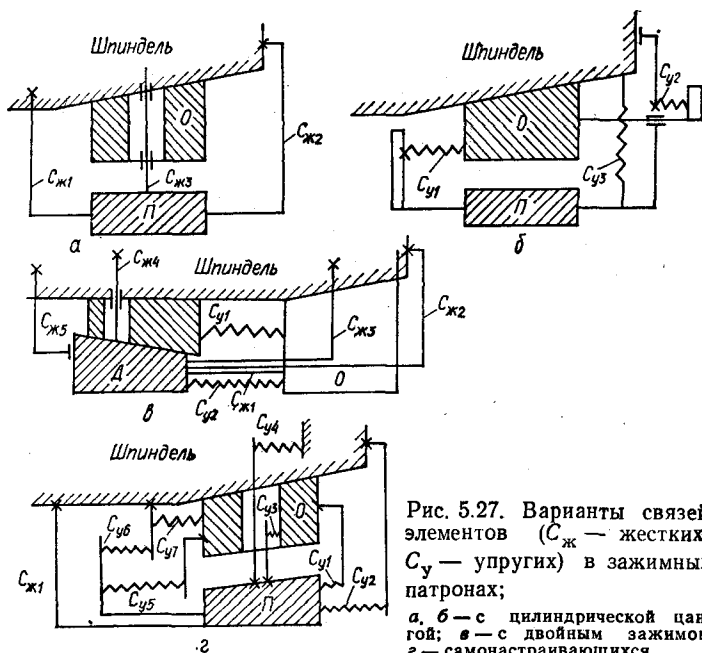
Из анализа расчленений ЗЭ с клиновым ПУЗ установлено, что новые принципы зажима и существенное улучшение показателей качества достигаются только полным одно-

5.3. Силовой контур зажимного патрона

Вид контура	Тип ПУЗ патрона	Условное изображение патрона		Схемы смыкания зажимных сил	Показатели радиальной точности зажима	
		продольное	поперечное			
Замкнутый	Открытый	Рычажный (Р)				$\Delta_p \uparrow$ $K \uparrow$
		Мембранный (М)				$\Delta_p \downarrow$ $K \downarrow$
	Закрытый	Клиновой (К)				$\Delta_p \uparrow \downarrow$ $K \downarrow$

		Упругий (У)				$\Delta_p \downarrow$ $K \rightarrow 0$
Разомкнутый	Торцевой	Отсутствует				$\Delta_p \uparrow \downarrow$ $K \rightarrow 0$
						$\Delta_p \downarrow$ $K \rightarrow 0$
Комбинированный		Клиноупругий				$\Delta_p \downarrow$ $K \rightarrow 0$

Примечание. Δ_p и K — соответственно радиальное биение и конусность на определенном вылете $\downarrow$ — меньше погрешность; $\uparrow$ — больше погрешность.



направленным расчленением. Например, расчленение вдоль оси патрона дает эффект осевой точности, перпендикулярно оси с раздвижением — высокой жесткости, угловое — самонастройка на размер, гранное — широкодиапазонность, многослойное — чувствительность и сыпучесть и т. д. Неполное расчленение служит для выравнивания эпюр контактных давлений, компенсации технологических погрешностей изготовления элементов патрона и погрешностей формы деталей, а также для уменьшения неравномерности характеристик зажима. Наивысшую радиальную точность зажима обеспечивает отсутствие сквозного расчленения в поперечном сечении кругового контура ЗЭ.

Расчленение по оси $X-X$ выделяет из основного ЗЭ промежуточный, а сечение по оси $Y-Y$ делит ЗЭ на основной и дополнительный. Если дополнительный элемент сместить вдоль оси, образуется двойной зажим; если сечений, параллельных оси $Y-Y$, несколько, образуется многорядный зажим.

С введением различных связей (рис. 5.27) для одной структуры патрона появляется множество схем. Различные

варианты схем высокоточных патронов с одинарным зажимом и цилиндрической цангой, служащей в качестве промежуточного ЗЭ, могут быть созданы из зажимной цанги тянущего типа полным расчленением по оси $X-X$ и введением различных связей промежуточного ЗЭ — цилиндрической цанги со шпинделем и выбором различного места связи (рис. 5.27, а, б). Положительный эффект применения патронов с цилиндрической цангой — высокая осевая точность зажима, так как полное продольное расчленение разорвало связь между приводом и деталью через основной ЗЭ введением промежуточного ЗЭ, неподвижного в осевом направлении.

Цанговые патроны с двойным зажимом могут быть созданы из затяжной цанги полным расчленением по оси $Y-Y$, введением различных связей с приводом, между дополнительными и основными ЗЭ или между цангами (рис. 5.27, в). Положительный эффект применения таких патронов — высокая жесткость зажима. При отсутствии жесткой связи основной или дополнительной цанг со шпинделем такое расчленение сохранило недостаток затяжных цанг — оттягивание детали при зажиме. Избавиться от этого недостатка можно, например, введением жесткой связи дополнительного ЗЭ со шпинделем и его перестановкой (вершина его конуса и конуса основного ЗЭ обращены в противоположные стороны).

Проблема надежного зажима горячекатаных прутков на токарных автоматах успешно решена путем применения самонастраивающихся цанговых патронов (СЦП). Самонастройка в них осуществляется за счет того, что подпружиненные зажимные элементы «следят» за размером заготовки (прутка), выбирая в системе привод — патрон — деталь (Пр—П—Д) зазоры или сводя их к минимуму. СЦП, реализующие этот принцип, получены путем полного углового расчленения (в продольном направлении) клинового зажима элемента и введением упругих связей в осевом направлении промежуточного элемента (ПЭ), клина со шпинделем станка (корпусом патрона), или с основными зажимными элементами (ОЭ) в виде зажимной цанги, или кулачков патрона с различными передаточно-усилительными звеньями (рис. 5.27, г).

К передаточно-усилительным звеньям прием расчленения неприменим, и синтез новых схем патронов в основном строится на приемах сочетания различных ПУЗ, их перестановки, взаимодействия с различными ЗЭ, а также введе-

нием различных связей. Выбор схемы и элементов конструкции цангового зажимного патрона производится исходя из вида и размеров заготовок, требований по силе, жесткости и точности зажима, а также требований технологического процесса, обеспечения долговечности и надежности работы патронов.

Многообразие существующих конструкций цанговых патронов в значительной мере вызвано различными требованиями, предъявляемыми к ним, и поиском лучших вариантов, обеспечивающих в наибольшей мере доминирующие требования. Установившихся широко применяемых конструкций сравнительно мало.

Наиболее часто применяемые цанги (ГОСТ 2876—80) можно разделить на подвижные, имеющие осевое перемещение от привода, и неподвижные в осевом направлении. В зависимости от точности обработки деталей зажимные цанги делятся на две группы: повышенной и нормальной точности.

Для точной обработки деталей должны применяться только калиброванные прутки и зажимные цанги повышенной точности, у которых диаметр рабочего отверстия выполняют меньшим или равным минимальному диаметру прутка.

При расчете затяжной цанги для зажима калиброванных заготовок может быть принято условие $d = d_0$, и тогда зажим осуществляется двумя этапами при наличии разводки лепестков или даже за один этап при отсутствии разводки.

Расчет в данном случае может выполняться по методике DIN 6341, но с учетом условий контактирования цанги со шпинделем в поперечном сечении (введением приведенного угла трения $\varphi_{пр}$) и изгибной жесткости лепестков.

На рис. 5.28, а представлена расчетная схема для зажима калиброванной заготовки затяжной цангой с упором. Согласно этой схеме на губку цанги действуют: S_x — суммарная осевая сила затяжки; S — осевая сила, действующая на один лепесток цанги; P_y — сила упругости лепестка на длине L ; R — нормальная составляющая, действующая со стороны шпинделя на конус цанги; $F_1 = Rf_{пр}$ — сила трения на зажимном конусе; $f_{пр} = \text{arctg } \varphi_{пр}$ — приведенный коэффициент трения между конусом цанги и шпинделя, а $\varphi_{пр}$ — приведенный угол трения; T — радиальная сила зажима заготовки одной губкой; $F_2 = \mu_2 T$ — сила трения (сцепления) на поверхности зажатой заготовки; μ_2 — коэффициент трения (сцепления) между губкой цанги и за-

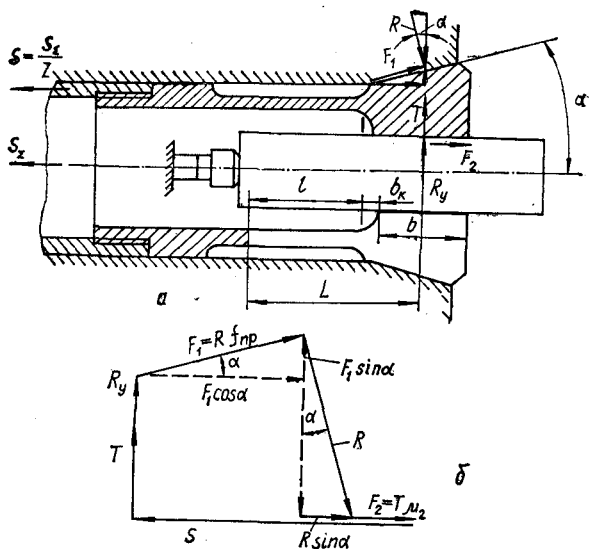


Рис. 5.28. Расчетная схема для определения силовых характеристик цангового патрона

готовкой при проскальзывании цанги в осевом направлении.

Составляем следующие условия равновесия (рис. 5.28, б): в горизонтальной плоскости

$$F_1 \cos \alpha + R \sin \alpha + \mu_2 T - S = 0,$$

в вертикальной плоскости

$$T + R_y + F_1 \sin \alpha - R \cos \alpha = 0.$$

Считая $F_1 = R f_{np}$, из первого уравнения получим

$$R = \frac{S - \mu_2 T}{f_{np} \cos \alpha - \sin \alpha},$$

а из второго уравнения

$$R = (T + R_y) / (\cos \alpha - f_{np} \sin \alpha).$$

Приравняв правые части формул для R и преобразовав, получим

$$S = (T + R_y) \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \mu_2 T.$$

Силу S можно представить как сумму S_1 и S_2 , где

$$S_1 = R_y \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}}); \quad S_2 = T [\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}}) + \mu_2].$$

Сила упругости лепестка цанги

$$R_y = C\Delta = \frac{3EJ\Delta}{\xi L^3 + J_e L(1 + 2\lambda L)},$$

где Δ — максимальный зазор между губкой цанги и заготовкой в разжатом состоянии.

Обозначим $R_y/T = A_1$, тогда $R_y = A_1 T$, а коэффициент усиления патрона

$$k_{\text{п}} = \frac{T}{S} = \frac{1}{(1 + A_1) \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}}) + \mu_2}. \quad (5.12)$$

В случае затяжной цанги без упора заготовка в процессе зажима совершает такое же осевое перемещение, что и сама цанга. Вследствие этого отпадает сила трения F_2 и тогда $S = (T + R_y) \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}})$,

$$k_{\text{п}} = \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}})/(1 + A_1). \quad (5.13)$$

При малых разводках цанги или при ее отсутствии, силами упругости лепестков можно пренебречь ($A_1 = 0$), в результате чего

$$S = T \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}}),$$

а коэффициент усиления

$$k_{\text{п}} = \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi_{\text{пр}}). \quad (5.14)$$

Существуют и другие методы расчета затяжных цанг без упора. Можно считать, что зажатая в цанге заготовка и головная часть цанги являются внутренней частью конусного прессового соединения.

Принимая условие, что на заготовку действует суммарная радиальная сила T_{Σ} в коническом гнезде, равная зажимному усилию на диаметре закрепления d , в грубом приближении предельное давление в коническом гнезде по среднему диаметру конуса d_k

$$p_1 = T_{\Sigma}/\pi d_k b, \quad (5.15)$$

а удельное давление на заготовку на длине губки

$$p_2 = T_{\Sigma}/\pi d b. \quad (5.16)$$

Удельное давление p_2 должно быть столь велико, чтобы крепление детали с силовым замыканием обеспечивало от-

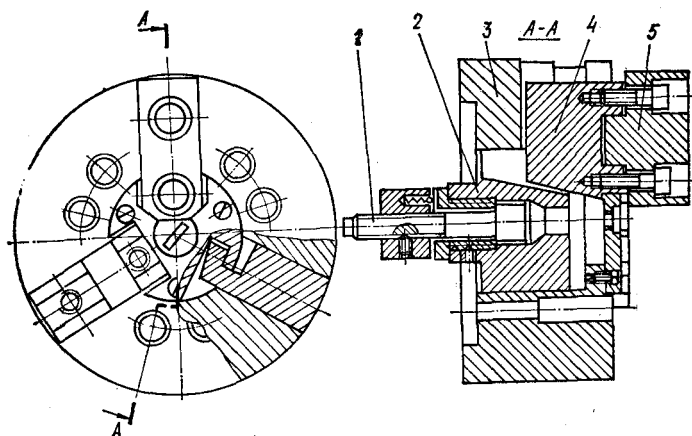


Рис. 5.29. Клиновой кулачковый патрон для штучных заготовок

сутствие смещения детали от сил резания $P_{рез}$ и момента резания M_p .

Определив из уравнения (5.16) $T_z = \pi db p_2$ и учитывая, что $S = S_z/2$, после преобразования получим

$$S_z = \pi db p_2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{пр}). \quad (5.17)$$

Следовательно, максимально допустимая осевая сила втяжки цанги может быть определена из условий несмятия поверхности заготовки по рекомендуемым значениям удельных давлений p_2 . Этой же формулой удобно пользоваться при определении оптимальной длины губки b (обратная задача).

Для консольного закрепления вращающихся заготовок снаружи и изнутри наиболее широкое применение получили трехкулачковые патроны с клиновыми и рычажными устройствами для преобразования поступательного перемещения тяги привода в радиальное перемещение кулачков.

Применяются также патроны с устройствами для преобразования вращательного движения привода в радиальное перемещение кулачков (спиральное, винтовое), а также другие патроны.

На рис. 5.29 показан клиновой трехкулачковый патрон для штучных заготовок типа ПКС. В термически обработанном направляющем корпусе 3 перемещаются основные кулачки 4; к которым крепятся рабочие кулачки 5. Втулка

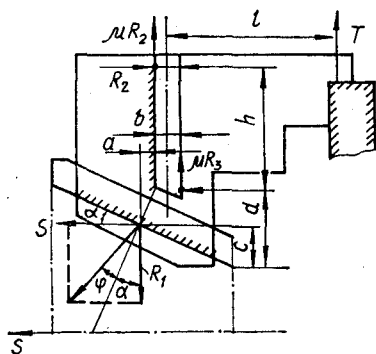


Рис. 5.30. Расчетная схема для определения сил в клиновом патроне при невращающемся шпинделе

2 с клиновыми пазами перемещается в отверстии корпуса с помощью тяги привода, с которой она соединяется винтом 1. Этот винт выполняют с кольцевой канавкой для предохранения патрона от чрезмерных нагрузок. Угол клина (в некоторых типах патронов 12° для увеличения коэффициента усиления). При сборке патрона втулку 2 устанавливают в такое положение, которое не препятствует установке основных кулачков в радиальном направлении, после чего втулку 2 поворачивают по часовой стрелке и осуществляют сопряжение рабочих клиновых поверхностей с соответствующими клиновыми поверхностями кулачков 4.

Расчетная схема для определения сил в клиновом патроне при невращающемся шпинделе приведена на рис. 5.30. На основании уравнений статики получено выражение для коэффициента усиления патрона

Расчетная схема для определения сил в клиновом патроне при невращающемся шпинделе приведена на рис. 5.30. На основании уравнений статики получено выражение для коэффициента усиления патрона

$$k_{\text{п}} = \frac{T}{S} = \frac{0,5h\mu - a \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) + d + c + 0,5(h + b\mu)}{0,5h\mu + l}, \quad (5.18)$$

где T — радиальная сила зажима одного кулачка; S — сила на тяге, приложенная вдоль оси патрона, соответствующая одному кулачку; α — угол клина, обычно $\alpha = 15^\circ$; φ — угол трения; μ — коэффициент трения в направляющих кулачка; a, b, c, d, h, l — плечи приложения сил.

КПД патрона $\eta_{\text{п}} = k_{\text{п}} \operatorname{tg} \alpha$, так как $u_{\text{п}} = \operatorname{tg} \alpha$.

Коэффициент трения μ для закрепленных тщательно обработанных направляющих кулачков можно принимать в пределах 0,08...0,2. Меньшие значения μ соответствуют сравнительно небольшим удельным давлениям и хорошей консистентной смазке, например, содержащей дисульфид молибдена. Коэффициент трения (сцепления) между зажимными гладкими незакаленными поверхностями насадок кулачков и обточенной поверхностью заготовки $\mu = 0,14...0,18$. В продольных и поперечных пазах закаленных за-

жимных поверхностях кулачков $\mu = 0,15 \dots 0,25$; в зажимных поверхностях с острыми зубьями $\mu = 0,25 \dots 0,35$.

После зажима заготовки и включения вращения шпинделя с патроном вследствие действия центробежных сил, приложенных к центрам тяжести кулачков, последние сместятся в радиальном направлении, каждый на некоторую величину δ и созданная при невращающемся патроне сила зажима T заготовки уменьшается на ΔT , а радиальная составляющая R_1 силы реакции клина увеличится на ΔR_1 . Отношение ΔT и ΔR_1 определяется отношением жесткости заготовки C_3 и патрона C_{π} , так как

$$\Delta R_1/C_{\pi} = \delta = \Delta T/C_3, \text{ т. е. } \Delta T/\Delta R_1 = C_3/C_{\pi}.$$

Коэффициент усиления вращающегося патрона может быть получен из уравнения равновесия кулачка под действием приложенных к нему сил, включая и центробежную. При этом следует иметь в виду, что силы трения от сил реакций R_2 и R_3 будут иметь направления, противоположные показанным на схеме (рис. 5.30).

При вращающемся патроне вследствие действия центробежных сил, приложенных к кулачкам, понижается сила зажима, а также жесткость зажатой заготовки. Жесткость, противодействующая вырыву заготовки из патрона, определяется отношением момента, приложенного в плоскости сил заготовки, к углу ее поворота относительно оси шпинделя. Этот момент образуется силой, приложенной на заданном расстоянии от базовой поверхности патрона. Жесткость зажима зависит от направления нагрузки по отношению к положению кулачков. Как показали эксперименты, жесткость зажима, измеренная при вращении трехкулачкового патрона определенной конструкции с частотой 500 мин⁻¹, имеет значение, меньшее примерно на 50 %, чем жесткость, измеренная при невращающемся патроне.

Вследствие некоторого поворота кулачков при зажиме, соответствующего зазорам и контактными деформациям направляющих, образующие зажимных поверхностей кулачков устанавливаются параллельно образующим заготовки лишь тогда, когда они имеют в свободном состоянии конусность, которая определяется экспериментально. Например, для одной из конструкций патрона рекомендуется конусность 1 : 200. Для снижения влияния центробежных сил кулачков на силу зажима заготовки в конструкции рычажного патрона (рис. 5.31) предусмотрена дополнительная масса 1, связанная с рычагом 2, которая частично уравни-

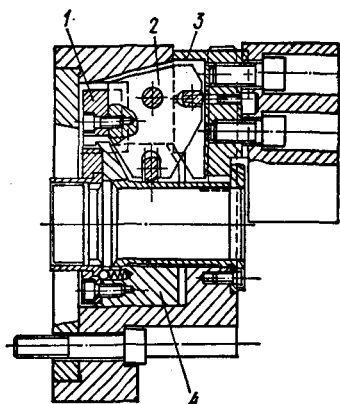


Рис. 5.31. Рычажный патрон с компенсацией центробежных сил

прямоугольного поперечного сечения. Радиальное перемещение плунжеров, расположенных чаще всего через 120° , производится при помощи трехскосях клиньев. Когда длина базового отверстия детали превосходит половину его диаметра, целесообразно применять двухрядные плунжерные патроны [38].

Для закрепления валов средних и больших диаметров применяются поводковые патроны ударного действия, особенность которых состоит в том, что внедрение поводков (штырей в торец заготовки) осуществляется массивным подпружиненным ударником до начала обработки; в этом случае усилие поджима может быть незначительным, но достаточным для удержания детали в центрах. Конструкция одного из таких патронов показана на рис. 5.32, а. В корпусе 1 смонтирован плавающий центр 2 и ударник 3 с механизмом взвода в виде собачки 4 и плоской пружины 5. Ударник поджат пружиной 6, усилие которой регулируется гайками. Центр 2 также поджимается пружиной 9 к упору 11, установленному во фланце 10. Поводковая шайба 12 с тремя поводками 13 связана штифтами 14 с фланцем и удерживается колпачковой гайкой 15. Стопорные винты предохраняют поводки от выпадания. Шайба сферической поверхностью опирается на толкатели 8, которые скошенными поверхностями на другом конце перемещают плунжеры 7, а последние сжимают разрезанный хвостовик ударника, запирая таким образом центр 2 патрона. Ударник в таком положении является опорой для поводков.

вешивает кулачок 3. Дополнительная масса меньше массы кулачка пропорционально соответствующей силе трения кулачка в направляющих.

Для автоматизированного зажима заготовок изнутри применяются различные конструкции разжимных оправок и патронов: плунжерные, ресорные, пружинные (в виде витых и тарельчатых пружин), с упругими шайбами различной конструкции и др. Непосредственными рабочими органами являются плунжеры круглого, овального или

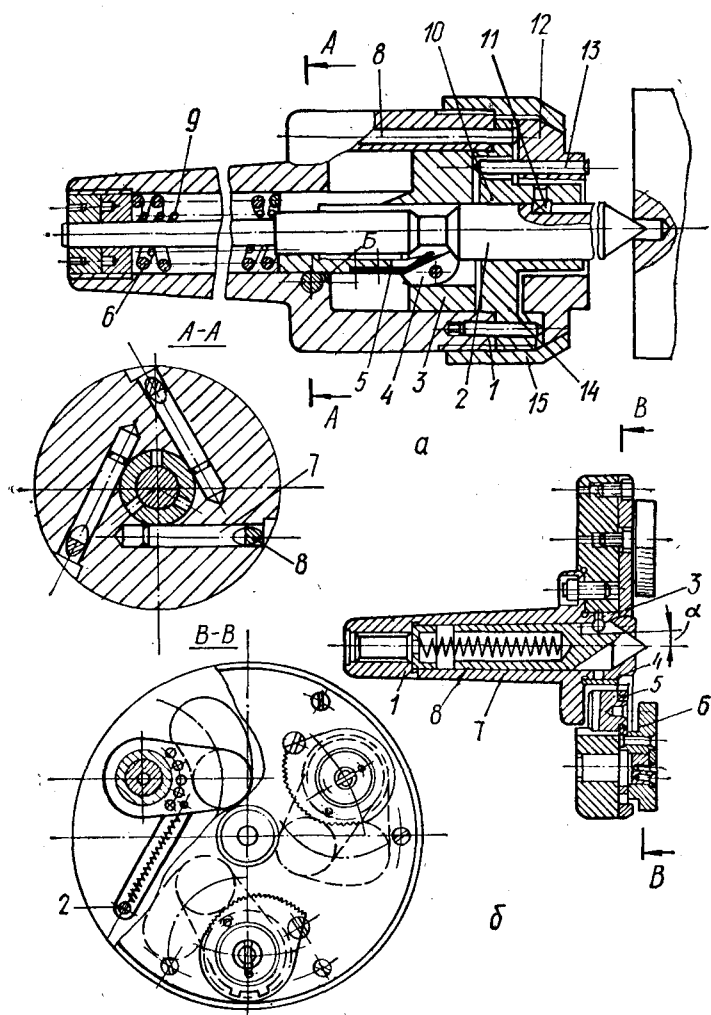


Рис. 5.32. Проводковые патроны

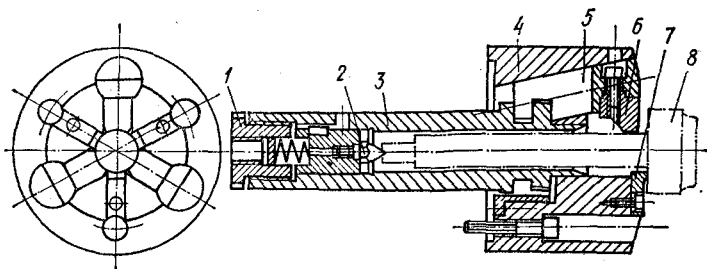


Рис. 5.33. Плу́нжерный трехкулачковый патрон фирмы «Берг» (ФРГ)

В исходном положении центр выдвинут из патрона, а собачка упирается в фаску центра. При поджиме заготовки задней бабкой центр 2 перемещается влево, увлекая через собачку ударник; при этом пружина 6 сжимается. Заготовка перемещается до тех пор, пока собачка не упрется в фаску корпуса и освободит ударник. Последний под действием пружины ударяет по поводкам, внедряя их в торец заготовки, после чего заготовка упирается в торец поводковой шайбы. Торец после запираания центра и поводка является жестким упором для заготовки.

Применение самозажимных поводковых патронов при обработке деталей в центрах позволяет во время включения и выключения вращения шпинделя станка зажимать и освобождать от зажима детали без дополнительных затрат времени. На рис. 5.32, б показан вариант конструкции такого патрона. Хвостовик 1 корпуса патрона закрепляется в конусе шпинделя станка. Когда патрон не вращается, пружины 2 удерживают кулачки 6 в отведенном положении; в этом положении обрабатываемая деталь может свободно устанавливаться в центрах. После установки детали пиноль бабки перемещает ее вместе с центром 8, сжимая при этом пружину 7 до тех пор, пока торец обрабатываемой детали не нажмет на втулку 4, в результате этого будут застопорены при помощи шариков 3 втулка 4 и центр 8. В начале вращения шпинделя центробежные силы, приложенные к противовесам 5, поворачивают кулачки до соприкосновения с обрабатываемой деталью. Дальнейшее зажатие детали осуществляется силами резания.

На рис. 5.33 представлен трехкулачковый патрон конструкции «Берг» (ФРГ), приводимый в движение от штока привода с помощью гайки 1, жестко связанной с подвижной

втулкой 3. Втулка 3 связана с тремя наклонными плунжерами 5, перемещаемыми в отверстиях корпуса 4. К плунжерам 5 привинчены сменные кулачки 6. Заготовка 8 ориентируется с помощью подпружиненного центра 2 и упора 7. По сравнению с клиновыми патронами данный патрон отличается простотой и компактностью конструкции, повышенной жесткостью.

6. КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МЕХАНИЗМОВ И УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТОМ И РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ

6.1. Конструирование и расчет устройств автоматической смены инструмента

От типа и конструкции устройств автоматической смены инструмента (УАСИ) зависят точность установки инструмента, а следовательно, точность обработки, время смены инструмента, т. е. производительность, а также вся компоновка многооперационного станка.

К УАСИ предъявляются следующие основные требования: 1) быстроедействие; 2) высокая надежность и точность перемещения, безударность; 3) большая емкость магазина при минимальной занимаемой площади; 4) неограничение рабочего объема станка; 5) удобство обслуживания; 6) надежность контроля износа и поломки инструментов, предохранения инструментов и их посадочных мест от загрязнения и запыления; 7) возможность ручной смены инструмента.

УАСИ могут быть разделены на 4 основных типа (рис. 6.1): 1 — смена инструмента осуществляется при изменении положения рабочего накопителя (револьверные головки); 2 — инструмент автоматически передается из магазина в рабочее положение (например, в шпиндель); 3 — инструмент из магазина передается в рабочую позицию через промежуточный накопитель; 4 — инструмент подается в рабочую позицию частично из рабочего накопителя и частично из магазина через промежуточный накопитель (штриховыми линиями указана автоматическая установка,

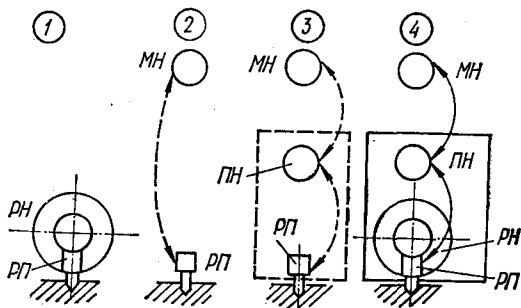


Рис. 6.1. Типы устройств автоматической смены инструмента:
МН — магазинный накопитель; ПН — промежуточный накопитель; РН — рабочий накопитель (многоинструментальная головка); РП — рабочая позиция

сплошными — ручная). Типичным рабочим накопителем является револьверная головка, применяемая в станках различных групп.

Таким образом, автоматическая смена инструмента при обработке деталей на станках может производиться: 1) переключением (поворотом и фиксацией) револьверной головки с неподвижно закрепленным в ней инструментом; 2) заменой всего шпиндельного узла с инструментом; 3) сменой инструмента в шпинделе станка.

Автоматическая смена инструмента в шпинделе позволяет выполнять на многооперационном станке различные технологические операции без перебазирования обрабатываемых деталей с малыми затратами вспомогательного времени.

Когда инструмент передается в рабочую позицию через промежуточную, последняя устанавливается у шпинделя или у магазина, либо в промежуточном носителе. В последнем случае носитель связывает промежуточную и рабочую позиции в единый конструктивный элемент. Промежуточная позиция выполняется в виде двухпозиционной револьверной (рис. 6.2) или двойной шпиндельной головки.

Конструктивное и компоновочное использование УАСИ зависит главным образом от типа станка, расположения шпинделя, количества и типов применяемого инструмента, времени смены инструмента. Классификация способов и устройств АСИ приведена на рис. 6.3. Револьверные шпиндельные головки (рис. 6.3, а) вначале получили широкое распространение благодаря относительной простоте устройства. Однако в последние годы они применяются реже

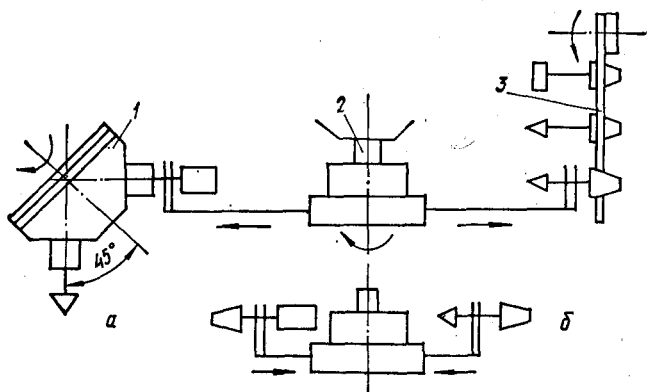


Рис. 6.2. АСИ из магазина с помощью двухзахватного автооператора и двухпозиционной revolverной головки:

а — захват отработанного инструмента из revolverной головки; *б* — сведение «рук» автооператора перед его поворотом на 180°; 1 — revolverная головка; 2 — автооператор; 3 — магазин инструментов

из-за малого числа размещаемого в них инструмента и неточностей, вносимых индексацией головок, а также недостаточной их жесткостью. Сменные многошпиндельные головки (рис. 6.3, *б*) используют в многооперационных станках при изготовлении крупных серий деталей. Магазины шпиндельных гильз (рис. 6.3, *в*) лишены недостатков, свойственных revolverным шпиндельным головкам, но имеют высокую стоимость вследствие необходимости изготовления большого числа прецизионных шпиндельных узлов. Revolverные магазины с постоянным положением относительно шпинделя (рис. 6.3, *г*) содержат больше инструмента, чем revolverные шпиндельные головки, и позволяют разместить шпиндель любой длины. Их недостатки: ограниченная емкость магазина, большой вылет шпинделя, вследствие этого снижение точности обработки, размещение громоздкого магазина непосредственно на шпиндельной бабке вблизи рабочей зоны станка и загромождение рабочей зоны. Магазины инструментов без автооператоров (рис. 6.3, *д*) требуют дополнительного радиального перемещения, что ограничивает их емкость и количество вариантов компоновок.

Перемещение же шпинделя при автоматической смене инструмента (АСИ) к неподвижному магазину нарушает предварительную установку. УАСИ с одним

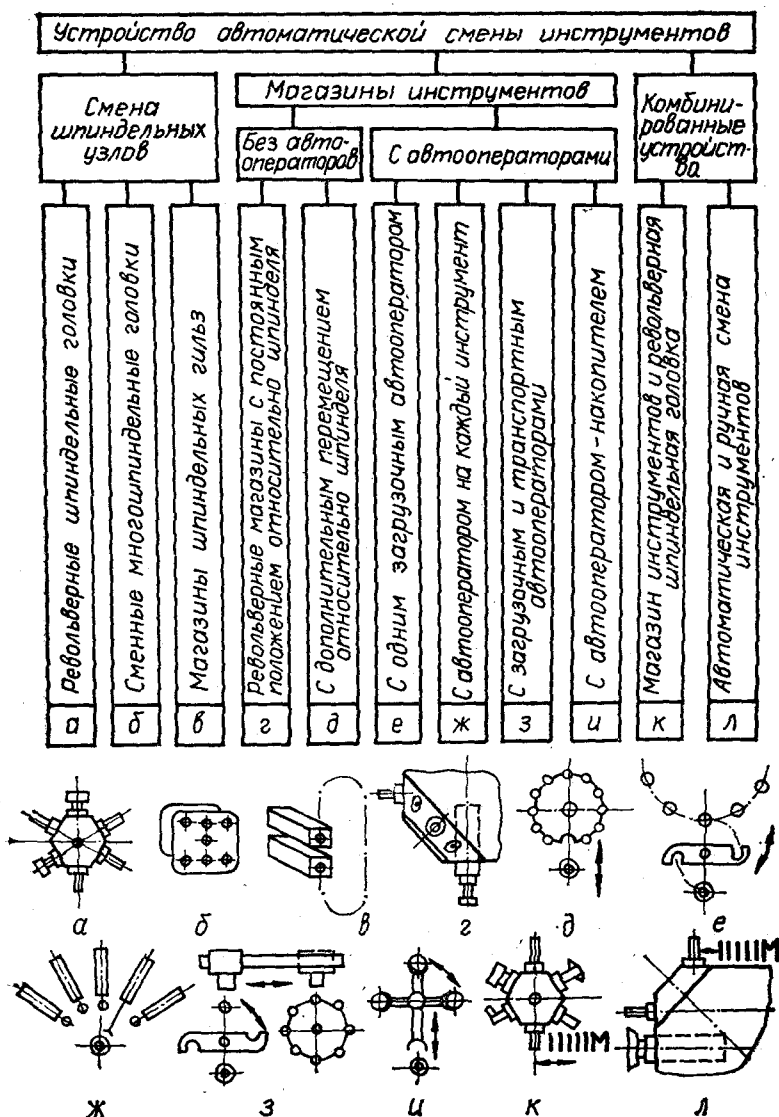


Рис. 6.3. Классификация способов и устройств АСИ

загрузочным оператором (рис. 6.3, *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° 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. 6.3, *ж*) имеет ограниченную емкость или же получается громоздким. Обслуживание устройства, расположенного в рабочей зоне, затруднено. Магазины с загрузочным и транспортным автооператорами (рис. 6.3, *з*) могут быть размещены на достаточном удалении от шпинделя, в удобном для обслуживания месте. Условие, связанное с дополнительным автооператором, компенсируется возможностью изготовления магазинов в виде независимых агрегатных узлов различной емкости. Устройства с автооператором — накопителем инструмента (рис. 6.3, *и*) применяют с целью исключения использования большого магазина и ускорения АСИ при повторяющемся применении наиболее характерного для данной детали режущего инструмента. В комбинированном устройстве (рис. 6.3, *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. 6.3, *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 АСИ свести к времени индексации головки, поскольку поиск и загрузка—разгрузка инструментов совмещены с работой станка. Специализация шпинделей позволяет приспособить их конструкцию к условиям работы и уменьшить размеры магазина.

Время смены инструмента может быть сведено к минимуму (до 1 с) применением в УАСИ многозахватных автооператоров (рис. 6.4), [25], общее количество которых доходит до 16.

Из конструктивных разновидностей магазинов наибольшее распространение получили дисковые и цепные, послед-

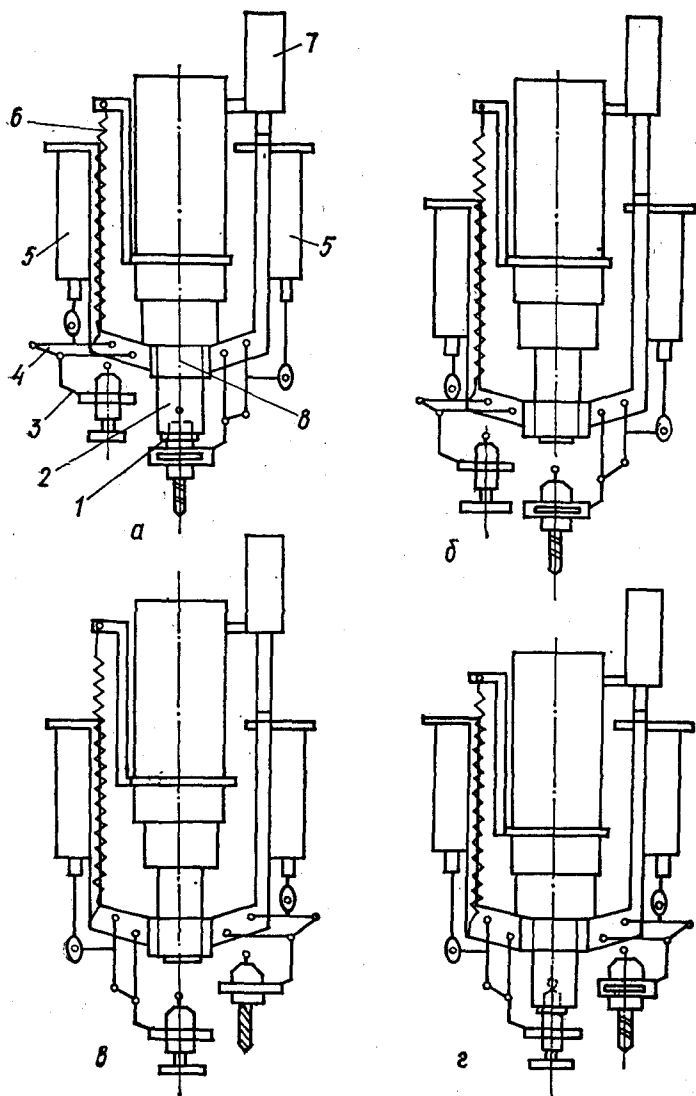


Рис. 6.4. Последовательность работы УАСИ с многозахватным автооператором многооперационного станка FZ 16 фирмы «Chiron» (ФРГ):
 а — рабочее состояние первого инструмента и исходное положение второго;
 б — выход из шпинделя первого инструмента и подвод второго;
 в — отвод в сторону первого инструмента и ввод на линию шпинделя второго;
 г — ввод в шпиндель и закрепление второго инструмента и отвод в исходное положение первого; 1 — шпиндель; 2 — скалка; 3 — захват; 4 — четырехзвенный механизм; 5 — пневмоцилиндр-автооператор; 6 — пружина возврата обоймы; 7 — сдвинутый пневмоцилиндр перемещения обоймы (одностороннего действия); 8 — обойма

ние вследствие большой емкости и возможности различного размещения при компоновке. Положение магазина при компоновке в некоторых случаях однозначно определяется конструктивным типом устройства, а в других случаях благодаря автооператорам может быть неоднозначным. Расположение магазина и инструмента при компоновке определяет технология производства и эксплуатация станка и должно соответствовать общим требованиям к УАСИ, которые были рассмотрены выше и здесь только перечисляются: 1) сокращение числа координатных движений при АСИ; 2) максимальное совмещение времени АСИ с работой станка; 3) сокращение координатной установки по осям X и Y при АСИ, что обеспечивает соосность отверстий при обработке разным инструментом; 4) отсутствие влияния массы инструментов в магазине на точность станка; 5) возможность увеличения емкости магазина без существенного влияния на конструкцию основных узлов станка; 6) возможность независимого агрегатного исполнения магазина (для поставки станков с АСИ и без нее) и другие требования. Выполнение этих требований во многом зависит от расположения магазина в компоновке станка и прежде всего наличие самого магазина инструментов в УАСИ, что обусловлено необходимостью выполнения требований и применением большого количества инструментов для обработки деталей.

В Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС) разработан агрегатированный комплекс многоинструментальных станков АКМ-26 (сверлильно-фрезерно-расточных многооперационных станков с построением АУСИ на агрегатной основе — система АКМ-26-АСИ) [2].

Для автоматического поиска необходимого инструмента используют различные методы кодирования непосредственно инструментальной оправки или гнезда магазина:

1. Инструмент в определенной технологической последовательности — программируется только шаг (угол поворота магазина). Недостаток — нет повторного использования одного и того же инструмента.

2. Кодирование самих инструментов с помощью набора колец, закрепляемых на специальном цилиндрическом пояске оправки. Считывающее устройство контактного или бесконтактного типа формирует двоично-кодированные сигналы при движении относительно него инструментального магазина. В момент совпадения кода инструмента, заданного управляющей программой, с кодовым сигналом считы-

вающего устройства происходит останов и фиксация магазина инструмента. Достоинство — расположение инструмента в любой последовательности. Недостаток — усложнение конструкции инструментальной оправки, снижение ее жесткости, увеличение массы магазина и времени поиска инструмента.

3. Кодирование гнезд магазина плоскими кодовыми ключами с различными комбинациями проточек (например, по двоично-десятичному коду), устанавливаемые в специальные замки рядом с соответствующим инструментом.

4. Кодирование гнезд магазина кодовым барабаном с набором кулачков, который установлен в хвостовой части вала магазина или механически связан с его приводом. Соответствующие каждой позиции магазина комбинации выступов кулачков на барабане воздействуют на контактные или бесконтактные микропереключатели считывающего устройства.

Третий и четвертый методы получили широкое применение из-за быстрого поиска инструмента, однако цикл и устройство управления АСИ усложняются.

Фирма «Хертель» (Австрия) разработала новую систему идентификации инструмента «Микролог-1D», состоящую из трех электронных элементов, ядром которых является чип с 32-битовым постоянным кодом. Для кодирования какого-либо предмета кодоноситель крепят в предусмотренном для него углублении. Считывание осуществляется индуктивно за несколько миллисекунд считывающей головкой. Чип $\varnothing$ 12 может хранить любое кодовое число до 2^{32} . Достоинства — энергонезависимая память, хранящаяся много лет; индуктивная передача сигналов между кодоносителем и считывающей головкой; герметичность кодоносителя.

Перспективными считают способы кодирования и поиска инструмента с использованием фотоэлектрических, электромагнитных и других физических эффектов, позволяющих достичь наибольшей компактности конструкции УАСИ. Анализ выполненных работ по УАСИ показал, что наметилась многоуровневая тенденция АСИ, начиная от смены режущих элементов инструмента с изменением его положения и заканчивая сменой инструментальных магазинов. Можно полагать, что АСИ расширит свои границы: с одной стороны, смена режущих пластин (рис. 6.5) или режущих кромок, с другой — смена стеллажей с инструментальными магазинами или целых складов в пределах гибкого техно-

логического комплекса для ряда территориально объединенных заводов-автоматов.

Резец (рис. 6.5) с автоматической сменой режущей пластины 2, установленной на опорной пластине 1 и державке 6 снабжен механизмами закрепления и сброса режущей пластины. Механизм сброса содержит по два подпружиненных толкателя 5, упирающихся в боковые поверхности пластины 2. Механизм закрепления включает в себя шток 8, пакет тарельчатых пружин 7, двуплечий рычаг 10, установленный на оси 9, стакан 12, зажимной элемент 4, подпружиненный диск 11 и пластинчатую пружину 3. Замена пластины осуществляется после износа по задней поверхности на 0,4...0,45 мм при средней стойкости 80....110 мин. Время работы УАСИ, а следовательно, и быстродействие, кроме всех прочих условий, в значительной мере зависят от выбранного закона движения. Законы изменения скорости движения рабочих органов УАСИ показаны на рис. 6.6. С позиций наибольшего быстродействия оптимальным является треугольный закон изменения скорости (рис. 6.6, а), однако большие энергетические затраты, мгновенное изменение знака ускорения при переходе разгон — торможение (возникают большие динамические нагрузки, происходит перераспределение зазоров в механизмах и появление ударов) делают его мало пригодным. В большинстве УАСИ применяют закон изменения скорости движения близкий к трапецеидальному (рис. 6.6, б) — сплошная линия; вследствие потерь мощности и постепенного нарастания или спада нагрузки происходит плавное изменение скорости и ускорения — пунктирная линия. Ввиду того что

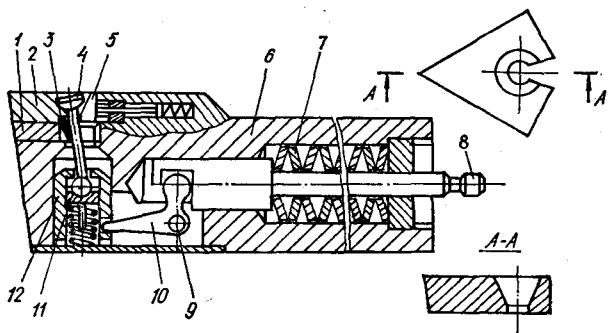


Рис. 6.5. Резец с автоматической сменой режущей пластины

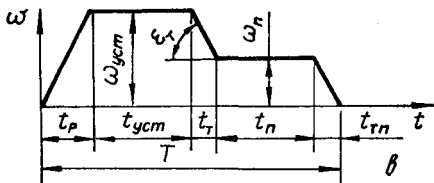
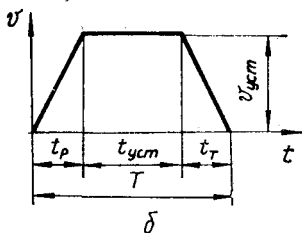
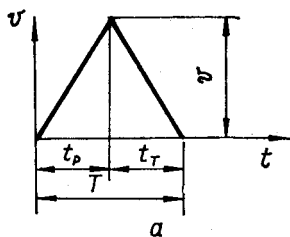


Рис. 6.6. Законы изменения скорости движения рабочих органов УАСИ: а — треугольный; б — трапецеидальный; в — трапецеидальный с позиционированием (для вращательного движения)

в УАСИ прочность элементов приводов не ограничивает величину и распределение во времени ускорений, осуществление более сложных законов не требуется.

Также широко применяется двухступенчатый трапецеидальный закон с замедленной скоростью движения (скоростью позиционирования) для повышения точности работы УАСИ. Треугольный и трапецеидальный законы изменения скорости чаще всего применяют для поступательных движений, а трапецеидальный с позиционированием (замедлением) — для вращательных.

В общем случае время смены инструмента (рис. 6.6 в)

$$T = t_p + t_{уст} + t_r + t_n + t_{тп}, \quad (6.1)$$

где t_p — время разгона; $t_{уст}$ — время установившегося движения; t_r — время торможения; t_n — время позиционирования; $t_{тп}$ — время торможения механизмов при позиционировании.

В случае изменения скорости по закону трапеции без позиционирования

$$T = t_p + t_{уст} + t_r, \quad (6.2)$$

а в случае треугольного закона изменения скорости УАСИ

$$T = t_p + t_r. \quad (6.3)$$

Для схематизированной трапецеидальной диаграммы скорости, характерной для автооператоров, кантователей,

промежуточных носителей, выражение для определения общего времени T отдельного движения имеет вид [32]:

$$T = \sqrt{\frac{s}{a_t}} \cdot \frac{1 + \gamma \left(\frac{v}{\sqrt{a_t s}} \right)^2}{\frac{v}{\sqrt{a_t s}}}, \quad (6.4)$$

где s — общий путь; v — скорость установившегося (равномерного) движения; a_t — модуль ускорения при торможении; γ — коэффициент, зависящий от соотношения ускорений при разгоне a_p и торможении a_t ; при $a_p = a_t$ $\gamma = 1$.

Если вращательное движение рассматривать приведенным к определенному радиусу, например радиусу расположения инструмента, то расчетные формулы как для вращательного, так и для поступательного движения становятся идентичными.

Рекомендуемые ускорения a_t при торможении автооператоров, определенные из условия нормального подхода в конечном положении, составляют 2...7 м/с². При этом наибольшая скорость ограничена ударом об упор, а наименьшая — обеспечением надежного дохода до упора в условиях переменных параметров системы.

При переходных процессах (разгон — торможение) возникают колебания в механизмах привода, которые также ограничивают номинальное ускорение. Так как импульсные возмущения, образующиеся при разгоне и торможении, характеризуются силовым спектром, то в приводе появляются главным образом колебания с собственными частотами системы. Для ограничения этих колебаний время торможения должно быть таким, чтобы низшая собственная частота колебаний системы была выше полосы частот, в которой сосредоточена основная часть энергии импульсов. Для простейших форм импульсов — прямоугольного, треугольного и поступательного — это условие может быть выражено как $\tau/T_k > 2...2,5$, где τ — время действия импульса ускорения, T_k — период собственных колебаний системы.

В большинстве случаев $T_k = 0,02...0,04$ с и соответственно $\tau < 0,08...0,1$ с. При малых ходах 0,15...0,3 м и для выполнения этого условия необходимо, чтобы номинальное ускорение a_t было меньше 5...6 м/с², при больших ходах 0,7...0,8 м (например, для поворота автооператора или перемещения вспомогательного носителя) ускорение должно быть меньше 10...12 м/с².

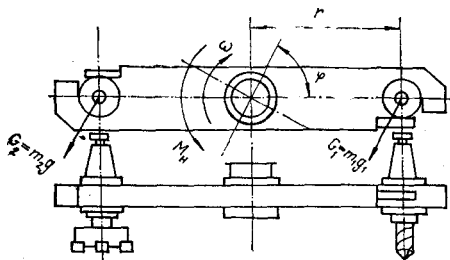


Рис. 6.7. Определение момента M_n неуравновешенности автооператора

Для автооператоров с радиусом расположения инструмента 180...250 мм рекомендуемая скорость поворота (на радиусе расположения инструмента) составляет 1...1,2 м/с, номинальное ускорение при разгоне и торможении — 5...7 м/с²,

скорость поступательного движения — 0,4...0,5 м/с (до 1,2 м/с).

Рациональную скорость поворота инструментального магазина определяют также по времени поворота. Отличительные особенности движения инструментальных магазинов по сравнению с другими узлами УАСИ — двухступенчатое изменение скорости (рис. 6.6, в) и переменная длина хода (поворот на разное число позиций).

При проектировании и расчете УАСИ необходимо учитывать, что вследствие неуравновешенности, обусловленной изменением масс инструмента, возникают дополнительные моменты, изменяющиеся по углу поворота, которые могут препятствовать или способствовать движению.

Момент неуравновешенности автооператора (рис. 6.7)

$$M_n = (G_1 - G_2) r \sin \varphi = (m_1 - m_2) g r \sin \varphi = \alpha J \frac{g}{r} \sin \varphi,$$

где m_1, m_2 — масса инструментов; r — расстояние между осями автооператора и инструмента; φ — угловое положение автооператора; g — ускорение свободного падения; $\alpha = (m_1 - m_2) r^2 / J$ — степень неуравновешенности; J — суммарный момент инерции автооператора с инструментом. В зависимости от положения автооператора направление действия момента M_n может изменяться.

Максимальный момент приводного двигателя $M_{д \max}$ и его мощность $N_{д \max}$ при условии оптимального быстрого действия и практически постоянном статическом моменте нагрузки M'_c и динамическом моменте инерции J'_Σ привода определяют по формулам

$$M_{д \max} \geq \frac{4J'_\Sigma \Delta \varphi_d}{t_{\min}^2 (1 - k_M^2)}; \quad (6.5) \quad M_{д \max} = \frac{8J'_\Sigma \Delta \varphi_d^2}{t_{\min}^3 (1 - k_M^2)}, \quad (6.6)$$

где $\Delta\varphi_d$ — угол поворота вала двигателя; k_m — коэффициент нагрузки двигателя по моменту; $t_{\min} = 2l/v_{\max}$ — минимальное время переходного процесса при треугольном законе изменения скорости (рис. 6.6, а); l — путь перемещения исполнительного органа; $v_{\max}$ — максимальная расчетная скорость. Мгновенное изменение знака ускорения в точке начала торможения приводит к появлению ударов, а также делает закон треугольного изменения скорости менее рациональным в сравнении с трапецеидальным законом.

Разброс времени срабатывания из-за разброса параметров УАСИ составляет $\Delta\tau_1 = 0,015 \dots 0,04$ с, а из-за систем управления $\Delta\tau_2 = 0,003 \dots 0,01$ с. Для обеспечения скорости подхода к упору исполнительного органа в заданных пределах при номинальном времени торможения $\tau = mv_0/P_c$ (v_0 — установившаяся скорость, P_c — сила сопротивления) ускорение

$$a \leq \Delta v / \Delta \tau,$$

где Δv — разброс скорости; $\Delta \tau = \Delta \tau_1 + \Delta \tau_2$.

6.2. Механизмы автоматической смены зажимных патронов и их элементов

Проблема создания гибких производственных систем (ГПС) механической обработки на базе станков с ЧПУ и станочных модулей становится все более актуальной и требует особого методологического подхода не только к подбору номенклатуры деталей, построению технологического процесса, выбору основного станочного оборудования, систем программного управления, поддержания работоспособности (диагностики и контроля), но и к осуществлению вспомогательных движений, связанных с быстрой переналадкой технологической оснастки, систем инструментального обеспечения, загрузочно-разгрузочных устройств и транспортно-накопительных систем [4].

Создание быстропереналаживаемых и широкодиапазонных механизмов и устройств автоматического манипулирования заготовками связано с решением ряда технических и экономических проблем, что позволяет существенно повысить технико-экономические показатели станков с ЧПУ, станочных модулей и ГПС, а также расширить их технологические возможности в условиях мелкосерийного производства.

К этим устройствам предъявляются следующие основные требования: точность и быстродействие позиционирования; гибкость, быстроперенастраиваемость и широкодиапазонность; надежность стыковки и функционирования; чувствительность и самонастраиваемость; трудоемкость, экономичность изготовления и обслуживания.

В некоторой степени эти требования противоречивы и их удовлетворение связано с решением оптимизационных задач на различных уровнях проектирования [54].

Аналогично способам регулирования скоростей (частот и подач) в приводах станков можно выделить три основных способа автоматического манипулирования заготовками с охватом различных размеров и форм: 1) ступенчатым (дискретным); 2) бесступенчатым (непрерывным); 3) комбинированным (дискретно-непрерывным).

В настоящее время широкое распространение получил дискретный принцип охвата за счет автоматической смены: зажимных устройств и их элементов (патронов, цанг, основных и промежуточных кулачков); оправок, шпиндельных узлов и бабок.

Второй принцип охвата является наиболее перспективным, но пока не получил широкого распространения из-за сложности удовлетворения противоречивых требований, необходимости применения новых физических эффектов и явлений. Характерными примерами устройств, реализующими этот принцип, являются: следящие люнеты для длинномерных деталей; программно-перестраиваемые приспособления для корпусных заготовок; зажимные патроны с автоматически регулируемыми (по длине хода) кулачками; самонастраивающиеся и широкодиапазонные зажимные механизмы переменной структуры и др.

Гибкость токарного станка с ЧПУ по диапазону размеров обрабатываемых заготовок от $d_1 = d_{\min}$ до $d_n = d_{\max}$ и широкодиапазонности зажимного механизма (ЗМ) может определяться коэффициентом охвата, показателем дискретности или комплектности, числом сменяемых элементов или их комплектов, числом ступеней многоступенчатых зажимных элементов [54].

Быстроперенастраиваемые ЗМ с дискретной схемой охвата могут быть созданы с применением системно-морфологического подхода [54], где в качестве двух основных морфологических признаков взяты перенастраиваемая часть и способ переналадки. Этот подход успешно реализован при создании быстроперенастраиваемых зажимных патронов.

Принцип непрерывного охвата реализуется в самонастраивающихся и широкодиапазонных ЗМ [54], при этом может быть постоянным или переменным положение и площадь базирующих и рабочих поверхностей, а также объем зажимных элементов. Для самонастраивающихся и широкодиапазонных ЗМ характерно наличие не менее двух кинематических цепей, одна из которых служит для натяга упругой системы, а другая — для выборки зазоров и перестройки элементов и структуры механизма.

В широком смысле широкодиапазонность ЗМ может быть: 1 — по размеру (диаметру и длине заготовки); 2 — по форме заготовки (круглая, граненная, профильная); 3 — по силе зажима; 4 — по жесткости зажима; 5 — по чувствительности к изменению свойств и состояния заготовки, характера воздействия на нее сил резания, центробежных и др.

Основная трудность при создании широкодиапазонных ЗМ заключается в органических возможностях достижения в рамках одной конструкции двух противоречивых требований. С одной стороны, необходимо обеспечить сравнительно высокий уровень сил, создающих эффект удержания одной поверхности относительно другой при наличии значительных внешних силовых воздействий, обусловленных инерционными нагрузками и силами резания, с другой — необходимо сохранить этот уровень сил при минимальных затратах на переналадку в широком диапазоне изменения диаметров. Дополнительные трудности связаны с необходимостью учета и количественной оценки множества ограничений, определяющих область нормального функционирования широкодиапазонных ЗМ в конкретных условиях производства.

Если широкодиапазонный зажимной механизм должен обеспечить значительный диапазон изменения размера поперечного сечения зажимаемой заготовки, превышающей диапазон, который может быть получен с помощью широкодиапазонного патрона с бесступенчатой схемой охвата размеров, то вводится ступенчатая система охвата, обеспечиваемая сменой патрона или его элементов. В результате получаем комбинированную (непрерывно-дискретную) схему охвата размеров зажимаемых заготовок во всем рабочем диапазоне станка.

В клинореечных быстропереналаживаемых патронах с двумя рейками на диаметры 200, 260 и 315 мм, например типа *3KGHVNC* фирмы «*Forkardt*» (ФРГ) (рис. 6.8), в кор-

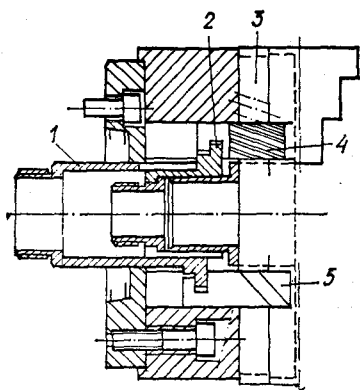


Рис. 6.8. Клинореечный быстро-переналаживаемый патрон фирмы «Forkardt» (ФРГ)

пале расположенны три пары косозубых реек 4 и 5 соответственно с небольшим и большим углом наклона зубьев, зацепляющихся с зубьями кулачков 3. Рейки соединены с втулкой 2, рейки 5 — с втулкой 1, а обе втулки — со штоком поршня двойного гидроцилиндра. При перемещении реек 4 осуществляется зажим — разжим заготовки (радиальный ход кулачков 7... 8 мм). Для изменения положения кулачков рейки 4 выходят из зацепления с последними.

В рычажно-винтовом быстропереналаживаемом патроне фирмы «New — Britain» (США) (рис. 6.9) усилие зажима

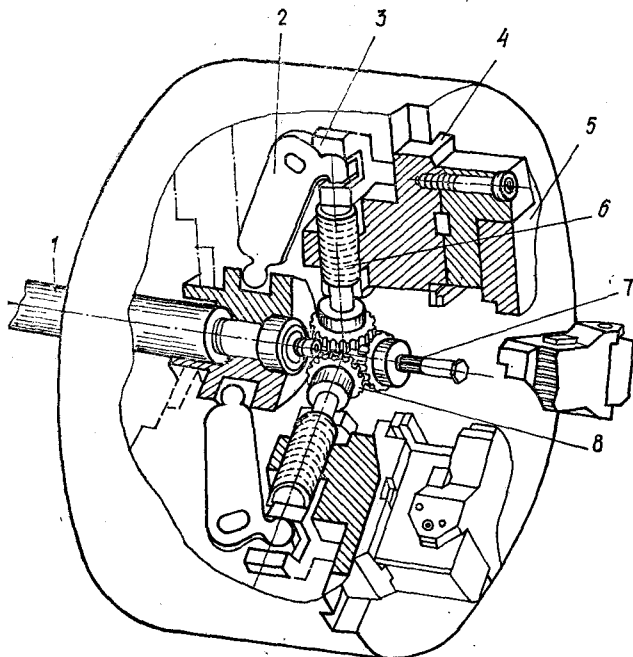


Рис. 6.9. Рычажно-винтовой быстропереналаживаемый патрон фирмы «New — Britain» (США)

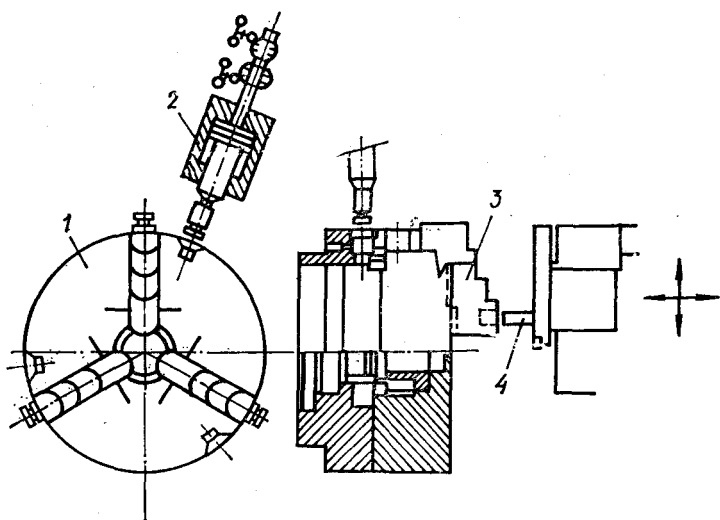


Рис. 6.10. Патрон с последовательной автоматической сменой кулачков фирмы «SMW» (ФРГ)

передается от гидроцилиндра, закрепленного на заднем конце шпинделя станка, через тягу 1 и рычаги 2 к основным 3 и накладным 4 (со сменной вставкой 5) кулачкам. Кулачки 3 опираются на подпятники регулировочных винтов 6, которые ввинчены в кулачки 4. Положение кулачков регулируют с помощью валика 7 и конических колес 8 [25].

Для автоматической смены кулачков в патроне фирмы «SMW» (ФРГ) (рис. 6.10) шпиндель станка индексируется последовательно в трех положениях, при которых шток поршня цилиндра 2 расположен соосно одному из трех отверстий в патроне 1. Шток, перемещаясь вниз, выводит зубья косозубой рейки, соединенной с приводом патрона, из зацепления с косыми зубьями кулачка 3. После этого захват 4, установленный в одной из позиций револьверной головки станка, перемещается к торцу патрона, входит в торцевое отверстие кулачка и затем перемещает последний в радиальном направлении на заданную величину. После этого поршень цилиндра 2 поднимается и зубья рейки входят в зацепление с зубьями кулачка 3; при этом шпиндель поворачивается на 120° .

Для осуществления черновой и чистовой обработки заготовок на одном станке применяют патроны с автоматиче-

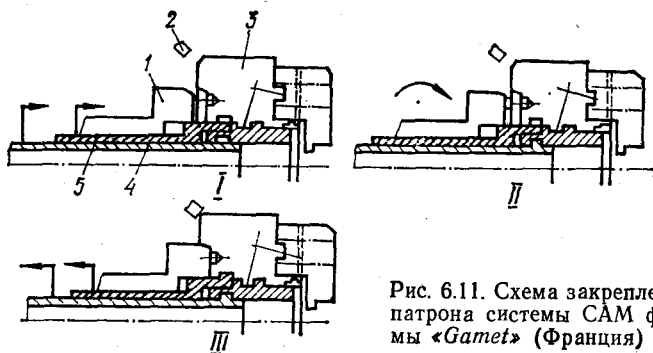


Рис. 6.11. Схема закрепления патрона системы САМ фирмы «Gamet» (Франция)

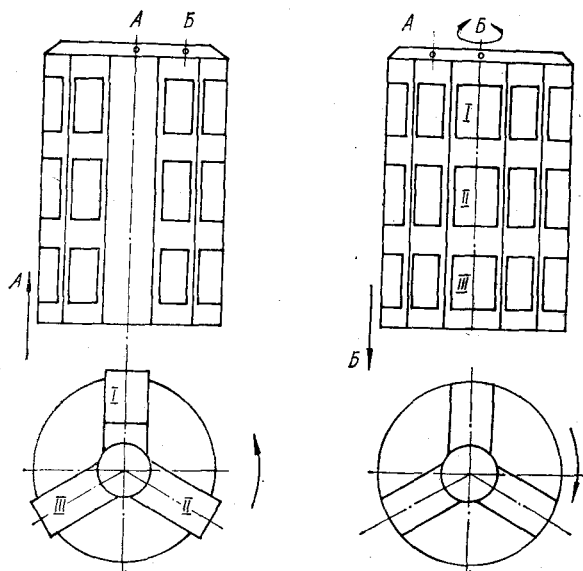


Рис. 6.12. Этапы автоматической смены кулачков с помощью зажимного устройства Mazak Aic (Япония)

ской сменой закаленных и незакаленных кулачков, хранящихся в магазине-накопителе или в кассете. Магазины-накопители бывают линейные, кольцевые, дисковые, барабанные и цепные.

Применяются также патроны с автоматической сменой комплекта кулачков из кассеты.

Сменный патрон 3 системы САМ фирмы «Gamet» (Франция) (рис. 6.11) базируется на шпинделе 1 станка по корот-

кому конусу. Перед установкой патрона на шпиндель патрон позиционируется промышленным роботом (ПР) соосно шпинделю (поз. I), после чего две трубы 4 и 5, смонтированные внутри шпинделя и соединенные с вращающимся гидроцилиндром, закрепленным на заднем конце шпинделя, перемещаются вправо, входят в отверстие патрона и поворачиваются на угол 60° ; при этом их выступы входят в прорези байонетного замка в патроне 3 (поз. II). Затем трубы 4 и 5 перемещаются влево, прижимая патрон к торцу шпинделя (поз. III). Датчик 2 контролирует положение патрона.

В автоматически сменяемых патронах фирмы «Gamet» (Франция) на торце постоянной части, закрепляемой на шпинделе станка, имеются зубья. Эти патроны хранятся в четырехместном поворотном накопителе. Поворотные накопители применяются для автоматической смены зажимных кулачков патронов фирмы «Mazak Aic» (рис. 6.12).

6.3. Конструирование и расчет механизмов автоматического закрепления режущего инструмента

Основные требования, предъявляемые к механизмам автоматического закрепления инструмента (МАЗИ): точность и жесткость крепления; быстродействие зажима; надежность крепления; минимальные габариты; возможность кодирования и декодирования и т. д.

Автоматическое закрепление режущего инструмента в многооперационных станках для обработки корпусных деталей осуществляется в патронах (при цилиндрическом хвостовике) и промежуточных оправках с коническим хвостовиком.

Применяемые стандартные инструменты имеют хвостовики разных размеров и форм. Для возможности закрепления их в шпинделе многооперационного станка применяют переходные оправки, имеющие хвостовики по шпинделю станка и отверстия, соответствующие различным хвостовикам нормализованных инструментов. Для обеспечения автоматической смены инструментов в шпинделях обычно не применяют самотормозящие конусы Морзе. Часто используют сопряжение хвостовиков оправок с отверстием шпинделя по несамотормозящему конусу, например 7 : 24. Иногда хвостовики оправок выполняют цилиндрическими тогда они в шпинделе базируются в осевом направлении п;

торцам, а в радиальном — цанговым устройством. Крутящие моменты передаются от шпинделя оправке с помощью торцевых шпонок на шпинделе и соответствующих пазов на оправках или зубчатых венцов с наружным зацеплением на оправках и с внутренним — на шпинделе. На переходных оправках для автоматически сменяемого инструмента предусматриваются специальные поверхности для захвата их автооператором в виде кольцевых канавок, ориентирующих оправки в осевом направлении. Оправки с инструментом в шпинделе часто закрепляются силой упругости пакета тарельчатых пружин, а отжимаются гидро- или пневмоприводом либо шпиндельной головкой. Крепление инструмента может осуществляться устройством с геометрическим замыканием либо самоторможением элементов, например резьбовым шомполом с электромеханическим приводом.

На рис. 6.13 приведены примеры автоматических устройств зажима переходных оправок с коническим хвостовиком [38].

Хвостовик оправки 1 (рис. 6.13, а) затягивается в конус шпинделя 2 силой упругости пакета тарельчатых пружин 4 с помощью стержня и шарикового захвата. Крутящий момент передается оправке торцевыми шпонками. В случае отсутствия оправки в шпинделе стержень 3 упирается через втулку 5 в гайку 6.

При вращении шпинделя масло в гидроцилиндр не подается; положение корпуса 7 гидроцилиндра вдоль своей оси фиксируется по бурту тарельчатой пружины 8 малой жесткости; детали узла шпинделя не касаются деталей гидроцилиндра $d > b$.

Для смены инструмента шпиндель останавливают, подают масло в гидроцилиндр, его поршень перемещается влево и шток отжимает стержень 3, а корпус 7 отжимается вправо до упора гайки 9 в гайку 6 и соединяется со шпинделем $h > a + b + c$. При давлении стержня 3 влево захват освобождает и в конце своего хода выталкивает оправку из конуса шпинделя. При отсутствии оправки шарики удерживаются плунжером 10. После ввода в конус шпинделя следующей оправки с инструментом полость гидроцилиндра соединяют со сливом и оправка закрепляется в шпинделе пакетом тарельчатых пружин.

На рис. 6.13, б показана конструкция цангового захвата оправки. В торец оправки 1 ввернут винт 8 с цилиндрической шейкой и головкой. С торцом головки винта контактирует четырехлепестковая цанга 4, навинченная на коне-

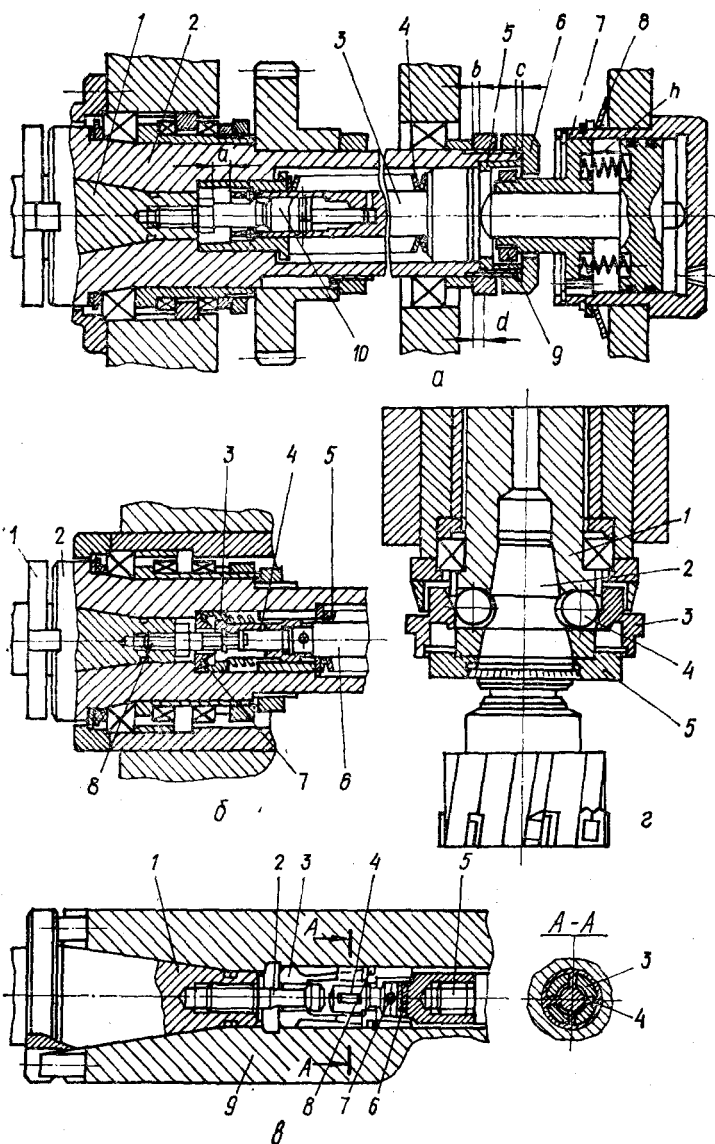


Рис. 6.13. Устройства автоматического зажима переходных оправок с коническим хвостовиком

стержня 6. Пакет тарельчатых пружин 5 передает осевую силу через стержень на цангу и затягивает хвостовик оправки в конус шпинделя 2. Самопроизвольное раскрытие цанги при замкнутой оправке исключает втулка 3, охватывающая головку цанги. Для освобождения оправки с помощью гидроцилиндра дополнительно сжимаются пружины 5, стержень 6 и цанга 4 перемещаются влево. При этом цанга раскрывается конусом втулки 7, своим торцом упирается в винт 8 и выталкивает оправку.

На рис. 6.13, в приведена конструкция захвата оправки с цангой, составленной из отдельных лепестков. В оправку 1 ввернут хвостовик-винт 2 с конической головкой, который взаимодействует с лепестками 3, расположенными между выступами штока-крестовины 4. Пружины 6 и 7 разжимают лепестки. Крестовина соединена резьбой со стержнем 5, перемещаемым тарельчатыми пружинами. При затяжке оправки хвостовик-винт 2 и крестовина контактируют с лепестками по коническим поверхностям. Когда оправка зажата, головки лепестков упираются в цилиндрическую поверхность отверстия шпинделя 9. При движении стержня 5 влево головки лепестков попадают в кольцевую проточку шпинделя 9, оправка освобождается, хвостовик-винт 2 и оправка выталкиваются торцом крестовины. Для облегчения монтажа цанги служит пружинное кольцо 8.

На рис. 6.13, г показано устройство, применяемое в многооперационном станке фирмы «Монарх», для зажима в шпинделе автоматически сменяемого инструмента. Зажим оправки 2 с инструментом производится с помощью шариков 4, расположенных в радиальных отверстиях шпинделя 1. При перемещении вверх специальным приводом зажимной муфты 3 фасонный профиль ее внутренней поверхности вызывает перемещение шариков 4 к оси шпинделя, а это вследствие контакта шариков с поверхностью фасонной кольцевой канавки оправки вызывает затяжку последней в конус шпинделя. При окончании зажима оправки шарiki 4 находятся в контакте с поверхностью муфты 3, близкой к цилиндрической — механизм имеет геометрическое замыкание, муфта разгружена от осевых сил. Наибольшие отклонения размеров различных оправок вызывают некоторые отклонения в силе их зажима. Крутящий момент передается оправке зубчатым зацеплением: на оправке 2 выполнен зубчатый венец наружного зацепления; а в фланце 5 шпинделя — внутреннего зацепления. Перемещения оправки осуществляют муфтой 3.

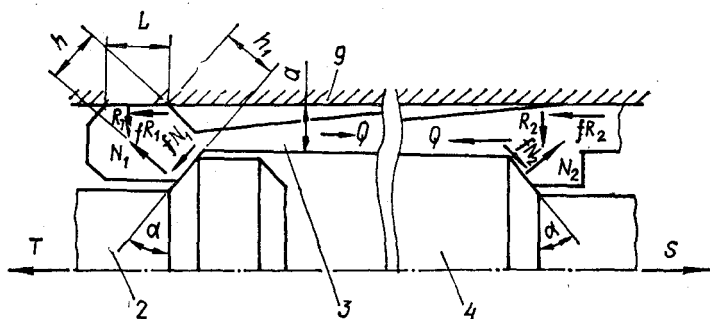


Рис. 6.14. Расчетная схема для определения сил зажима в МАЗИ с лепестками

Силу зажима инструмента в устройстве [например (рис. 6.13, в)] определяют исходя из действующих сил резания по расчетной схеме (рис. 6.14), согласно которой требуемая осевая сила на хвостовике-винте 2 должна удовлетворять условиям

$$T \geq K_{\text{зап}} P_x, \quad T \geq \frac{\pi L p (2r_1 + L \operatorname{tg} \beta) \operatorname{tg} (\beta + \varphi)}{\cos \beta}, \quad (6.7)$$

где $K_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса; P_x — осевая составляющая силы резания; L — длина контакта конусов шпинделя 9 и оправки; r_1 — наименьший радиус конуса на длине L ; β — угол между образующей и осью конуса; φ — угол трения; p — требуемое удельное давление в коническом стыке.

Зависимость между силами S на штоке-крестовине 4 и T на хвостовике-винте 2 определяют из рассмотрения условия равновесия левой и правой частей лепестка 3 при пренебрежении членами второго порядка, что допустимо для реальных конструкций, у которых угол контакта рычагов $\alpha \leq 45^\circ$, а коэффициент трения $f \leq 0,2$.

Уравнения равновесия левой части рычага:

$$N_1(\cos \alpha + f \sin \alpha) \pm R_1 f = Q;$$

$$N_1(\sin \alpha - f \cos \alpha) = R_1;$$

правой части рычага:

$$N_2(\cos \alpha + f \sin \alpha) \pm f R_2 = Q;$$

$$N_2(\sin \alpha - f \cos \alpha) = R_2.$$

Отсюда

$$Q = P_x \left(1 \pm \frac{f \operatorname{tg} \alpha}{1 + f \operatorname{tg} \alpha} \right);$$

$$S' = \frac{T}{1 + 2f \operatorname{tg} \alpha}.$$

Таким образом получаем при зажиме и соответственно при разжиме (вытягивании)

$$S = T (1 + 2f \operatorname{tg} \alpha); \quad S' = \frac{T}{1 + 2f \operatorname{tg} \alpha}.$$

Для разгрузки лепестка 3 от изгибающего момента необходимо соблюдать геометрические соотношения, определяемые условием равновесия:

$$l \geq \frac{h + fh_1 - a (\cos \alpha + 2f \sin \alpha)}{\sin \alpha - f \cos \alpha}.$$

По осевой силе и перемещению штока рассчитывают пакет тарельчатых пружин. Одно из требований, предъявляемых к широкодиапазонным МАЗИ с гидромеханическим приводом (зажим — пакетом пружин, разжим гидравлический), — необходимость разгрузки опор шпинделя от осевой силы разжима и минимальный расход энергии.

Для этого гидропривод выполняется двухпоршневым (рис. 6.15), в котором поршень 1 развивает усилие для сжатия тарельчатых пружин при освобождении оправки с инструментами, а поршень 2 создает усилие, необходимое для разгрузки опорных подшипников шпинделя 3 и зажимов гильзы от действия первого усилия.

В последнее время с появлением автоматической смены инструмента в токарных модулях начали использовать устройства автоматического закрепления инструмента (невращающегося и вращающегося), к которым предъявляются

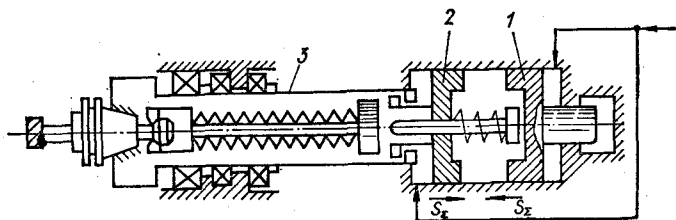


Рис. 6.15. МАЗИ с двухпоршневым гидромеханическим приводом и разгрузкой опор шпинделя

следующие требования: компактность, точность крепления и ее стабильность; достаточная жесткость и универсальность; наличие поверхностей для захвата манипулятора; быстросменность и возможность размещения кодируемых элементов для идентификации головок системой управления и ориентации режущей кромки в различных направлениях; технологичность в изготовлении и возможность встраивания в стандартные системы крепления инструмента на станках с ЧПУ.

Несмотря на многообразие конструкции МАЗИ для токарных модулей все они могут быть приведены к обобщенной схеме (рис. 6.16) для определения силовых характеристик закрепления. Предполагая, что силы, действующие на противоположных вертикальной оси поверхностях контакта при симметричности МАЗИ, равны и вызваны половиной осевой силы S_z , развиваемой приводом, определим реакции (нагрузки) N_1 и N_2 с учетом потерь на упругие и контактные деформации

$$R_y = A_1 R \left(R = \frac{S_z}{2 \sin(\alpha + \varphi)} \right), \text{ т. е.}$$

$$R_y = \frac{A_1 S_z}{2 \sin(\alpha + \varphi)},$$

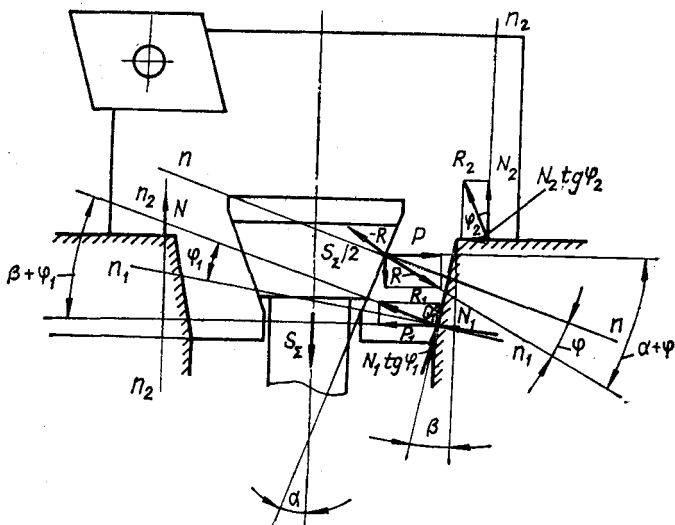


Рис. 6.16. Обобщенная схема МАЗИ токарного модуля

где α — угол наклона контактирующих поверхностей, $0^\circ < \alpha < 90^\circ$; φ — угол трения.

Из условия равновесия сил на оси X и Y запишем следующую систему уравнений:

$$\sum P(x) = 0,5S_z - N_2 - N_1 \frac{\sin(\beta + \varphi_1)}{\cos \varphi_1} - 0,5A_1S_z = 0;$$

$$\sum P(y) = 0,5S_z \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi) - N_1 \frac{\cos(\beta + \varphi_1)}{\cos \varphi_1} - N_2 \operatorname{tg} \varphi - 0,5A_1S_z \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) = 0,$$

где β — угол наклона контактирующих поверхностей, $90^\circ < \beta < 90^\circ$; φ_1, φ_2 — углы трения.

Решение системы уравнений дает

$$N_1 = \frac{S_z (1 - A_1) [\operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) - \operatorname{tg} \varphi_2]}{2 \cos \beta [1 - \operatorname{tg} \beta (\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2) - \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2]};$$

$$N_2 = \frac{S_z (1 - A_1) [1 - \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \beta - \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \varphi_1)]}{2 [1 - \operatorname{tg} \beta (\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2) - \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2]}.$$

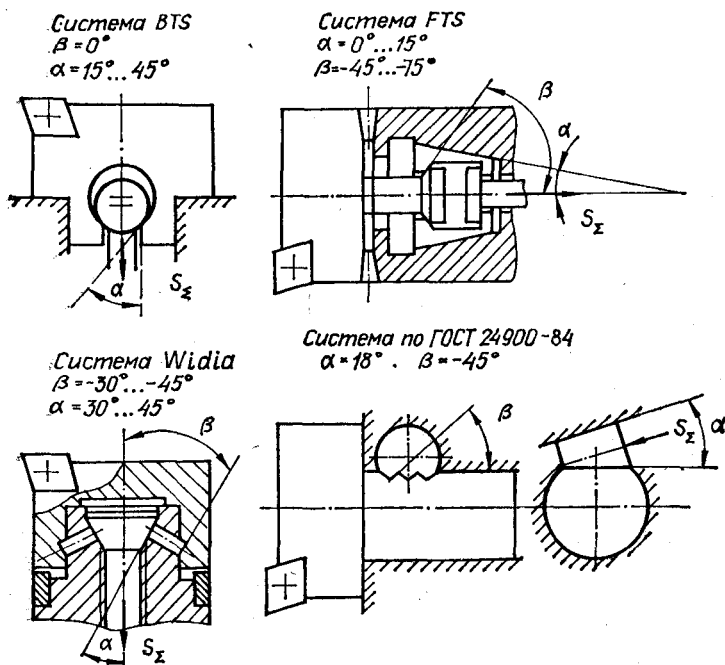


Рис. 6.17. Параметры известных МАЗИ различных систем

Коэффициенты усиления МАЗИ

$$k'_y = \frac{2N_1}{S_\Sigma} = \frac{(1 - A_1) [\operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) - \operatorname{tg} \varphi_2]}{\cos \beta [1 - \operatorname{tg} \beta (\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2) - \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2]} ; \quad (6.8)$$

$$k''_y = \frac{2N_2}{S_\Sigma} = \frac{(1 - A_1) [1 - \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \beta - \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \varphi_1)]}{1 - \operatorname{tg} \beta (\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2) - \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2} . \quad (6.9)$$

При параллельном закреплении суммарный коэффициент усиления равен $k_y = k'_y + k''_y$. Изменение коэффициентов усиления во всем диапазоне углов α и β позволяет правильно выбрать их значение с точки зрения максимального усиления. Анализ показывает, что наибольшие коэффициенты усиления имеют УАЗИ типа *FTS* и по ГОСТ 24900—81 (рис. 6.17). К недостаткам УАЗИ по ГОСТ 24900—81 можно отнести: несимметричность приложения силы привода относительно хвостовика инструментальной головки, что обуславливает неравномерность сил и жесткости закрепления на контактирующих поверхностях.

Наряду с силовыми зависимостями должны выполняться расчеты на жесткость с целью определения оптимальной силы S_Σ , развиваемой приводом.

Для крепления вращающегося инструмента типа сверл и фрез в широком диапазоне диаметров следует применять вместо распространенного набора цанг широкодиапазонные клиновые патроны без ключа, созданные КПИ (СССР) совместно с ВМЭИ — Габрово (НРБ) [54].

6.4. Конструирование и расчет механизмов автоматического зажима подвижных рабочих органов

Подвижные узлы автоматизированных станков (суппорты, столы, барабаны, револьверные головки и др.) после установки их в требуемое положение зажимают на направляющих с помощью винтовых, клиновых, эксцентриковых и рычажных гидро-, пневмо- или электромеханических приводов.

Чаще всего применяются винтовые зажимы с электроприводом, причем зажим осуществляется пружиной, а отжим — приводом. Применяются устройства, у которых винт или гайка поворачиваются гидро- или пневмоцилиндром. Для зажима масло обычно подается в штоковую полость, а для отжима — в безштоковую, так как для от-

жима требуется большая сила. При гидро- и пневмоприводе иногда применяют гидропластовые усилители для получения требуемых больших сил при сравнительно низком давлении масла или воздуха. От одной камеры с гидропластом можно перемещать и несколько плунжеров, осуществляющих зажим.

Станки, у которых гидро-, пневмопривод отсутствует, имеют обычно электромеханический привод зажимных устройств. В крупных станках чаще всего применяют электромеханический привод зажимных устройств.

Зажимные элементы перемещаются на сравнительно небольшое расстояние 0,2...1 мм для выборки зазора и натяжения системы, а также для компенсации износа контактирующих поверхностей. При зажиме в нескольких местах планками применяют рычажные устройства, обеспечивающие одновременный зажим всех планок. Для предохранения от смятия поверхностей направляющих к зажимным планкам крепят накладки из мягкого материала (текстолита, бронзы). Зажим подвижных узлов производят в местах, не вызывающих их значительной деформации, или через упругое звено типа пластины, ленты. Деформация зависит от формы направляющих: при прямоугольных направляющих деформация обычно меньше, чем при направляющих другой формы.

Типовые устройства и механизмы для зажима поступательно перемещающихся подвижных органов станков показаны на рис. 6.18. В механизме, показанном на рис. 6.18, а, зажим осуществляется пакетом тарельчатых пружин 4 через клиновую передачу 2, 3 и тягу 1, а разжим — с помощью гидроцилиндра 5.

На рис. 6.18, б приведена конструкция пневмо-пластического усилителя для зажима подвижных узлов горизонтально-расточного станка W 250 «Шкода» (ЧСФР). В пневмоцилиндр 1 поступает сжатый воздух, который перемещает поршень, связанный с плунжером 2, входящим в камеру 4 с гидропластом. Под действием плунжера 2 гидропласт давит на плунжер 5 — происходит прижим узла к направляющим. Сила зажима без учета потерь на трение

$$T = \pi p \left(\frac{D_1 D_2}{2d} \right)^2,$$

где p — давление воздуха в цилиндре 1; D_1 , D_2 и d — диаметры пневмоцилиндра 1, плунжера 5 и 2 соответственно.

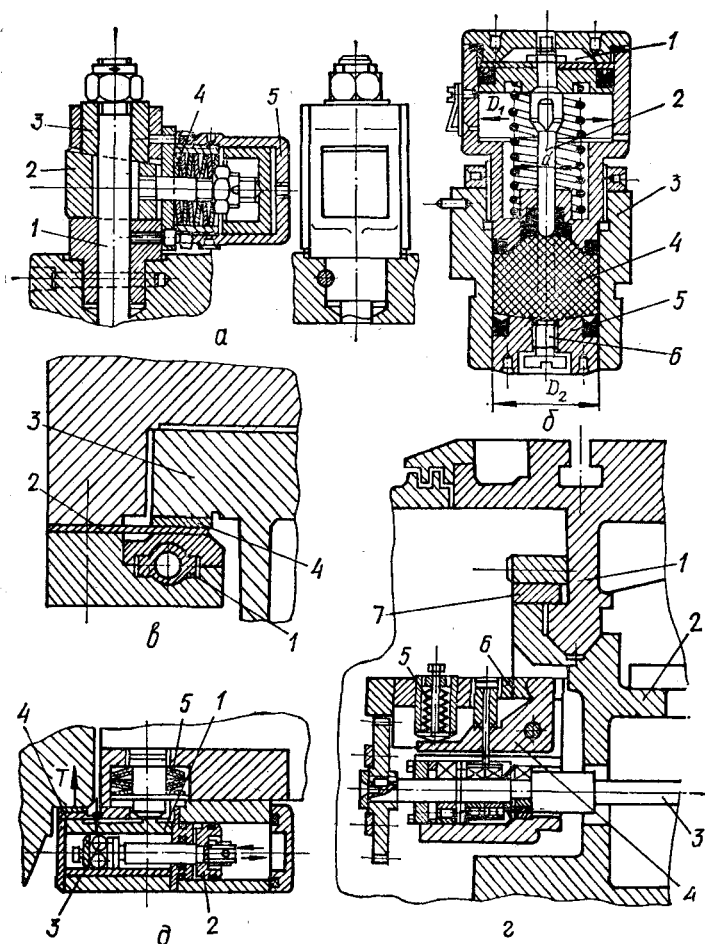


Рис. 6.18. Типовые устройства и механизмы для зажима поступательно-перемещающихся подвижных органов

Утечки гидропласта компенсируются завинчиванием пневмоцилиндра 1 в корпусе 3 или добавкой гидропласта через отверстие в плунжере 5, закрытое винтом 6.

Зажим подвижных узлов ряда конструкций станков, выпускаемых в ГДР, осуществляется с помощью эластичных резиновых трубок (рис. 6.18, в). При подаче масла под давлением в трубу 1 объем ее увеличивается, что вызывает

прижим наладки 4 из мягкого материала, связанной с пластинкой 2 к направляющей 3.

Закрепление стола многооперационного станка 243ВМФ2 (рис. 6.18, з) производится двумя зажимами с помощью двух стальных закаленных лент. Лента 7 прикреплена к столу 1 и при зажиме прижимается рычагом 4 под действием пакета тарельчатых пружин 5 к неподвижной опоре 6, связанной со станиной 2. Отжим производится эксцентриковым валом 3. Такое устройство обеспечивает минимальные смещения стола при зажиме (до 2 мкм).

Гидромеханический зажим шпиндельной головки многооперационного станка (рис. 6.18, д) действует по принципу рычага первого рода. На рычаг 1 действует сила упругости пакета тарельчатых пружин 5; второй конец рычага 1 поворачивается относительно подвижной опоры 3 и прижимает упругую планку 4 к зажимному узлу с необходимой силой T (на рисунке показано положение «зажато»). При отжати подается жидкость под поршень 2 и, преодолевая трение качения в роликах опоры 3 и трение роликов о сепаратор, опора перемещается в крайнее правое положение, где сила упругости пружин $P_{пр}$ действует на саму опору; рычаг отходит в исходное положение под действием упругой планки 4 и узел отжимается. Сила Q тангенциального сопротивления смещению подвижного узла, зажатого на направляющих с помощью планки силой натяжения винта или упруго-

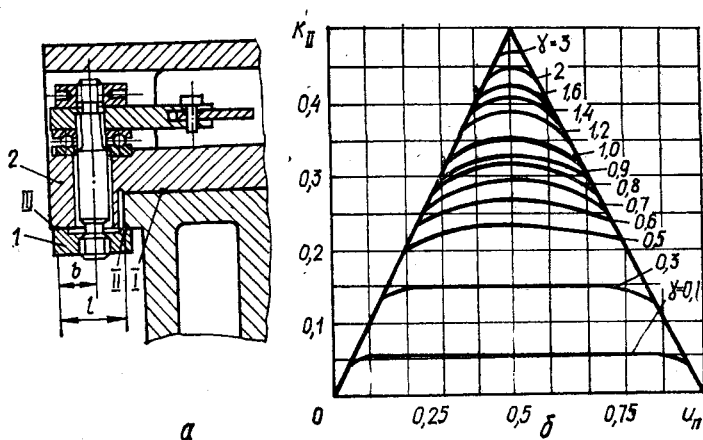


Рис 6.19. Винтовой зажим подвижного узла:

а — схема; б — график определения коэффициента приведения

сти пружины (рис. 6.19, а), если поворот планки I относительно узла 2 предотвращается трением в сопряжении III, определяется формулой

$$Q = T(f_I u_n + f_{II} K_n),$$

где f_I и f_{II} — коэффициенты трения в сопряжениях I и II; $u_n = b/l$ — передаточное отношение нажимной планки; K_n — коэффициент приведения определяется по графику (рис. 6.19, б) и является функцией u_n и конструктивного параметра планки $\gamma = H/l$; здесь H — длина планки. Если имеется устройство, исключающее возможность поворота планки относительно узла (например, штифты), то

$$Q = T u_n (f_I + f_{II}). \quad (6.10)$$

Расчет усилия, развиваемого зажимным устройством, основан на создании соответствующих нормальных давлений на рабочих поверхностях, при которых касательные перемещения этих поверхностей будут обратимы. При этом $\tau \leq k p$, где $k = 0,12 \dots 0,15$ — для стальных поверхностей, а для других $k = \frac{1}{2} f_{\text{пок}}$ ($f_{\text{пок}}$ — трения покоя).

Если задана внешняя касательная сила, стремящаяся сдвинуть узел станка, то суммарная нормальная нагрузка $T = P_{\text{ум}}/k$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов О. И., Дашенко А. И., Межов А. Е. Агрегатно-модульный принцип построения гибких автоматизированных линий и оптимизация их структурно-компоновочных схем // Вестник машиностроения. — 1986. — № 5. — С. 34—40.
2. Аверьянов О. И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ. — М. : Машиностроение, 1987. — 232 с.
3. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / А. И. Половинкин, Н. К. Бобков, Т. Я. Буш и др. ; Под ред. А. И. Половинкина. — М. : Радио и связь, 1981. — 344 с.
4. Автоматические станочные системы / В. Э. Пуш, Р. Пигерт, В. Л. Сосонкин; Под ред. В. Э. Пуша. — М. : Машиностроение, 1982. — 319 с.
5. Агрегатные станки средних и малых размеров / Ю. В. Тимофеев, В. Д. Хидан, М. С. Васерман, В. В. Громов; Под ред. Ю. В. Тимофеева. — М. : Машиностроение, 1985. — 248 с.
6. Базров Б. М. Технологические основы проектирования самонастраивающихся станков. — М. : Машиностроение, 1978. — 216 с.
7. Бломберг В. А., Глущенко В. Ф. Какое решение лучше? Метод расстановки приоритетов. — Л. : Лениздат, 1982. — 160 с.
8. Бобров А. М., Перченко Ю. Г. Автоматизированные фрезерные станки. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. — 231 с.
9. Брук И. В. Тенденции развития автоматизации машиностроительного производства на базе использования оборудования с ЧПУ // Станки и инструмент. — 1981. — № 5. — С. 27—29.
10. Васильев Г. Н. Автоматизация проектирования металлорежущих станков. — М. : Машиностроение, 1987. — 280 с.
11. Воинов Б. С. Принципы поискового конструирования радиоэлектронных устройств. — Горький: ГГУ, 1982. — 80 с.
12. Волчкевич Л. И., Кузнецов Ю. Н., Усов Б. А. Автоматы и автоматические линии : В 2 ч. / Под ред. Г. А. Шаумяна. — М. : Высш. шк., 1976. — Ч. 1—2.
13. Врагов Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков. — М. : Машиностроение, 1978. — 208 с.
14. Гальперин Б. Я., Магиденко С. Б. Выбор конструктивных параметров зубчатых венцов, используемых для фиксации револьверных головок // Станки и инструмент. — 1978. — № 4. — С. 11—12.

15. Горбунов Б. И., Гусев В. Г. Уравновешивающие устройства шлифовальных станков. — М. : Машиностроение, 1976. — 167 с.
16. Дашенко А. И., Белоусов А. П. Проектирование автоматических линий. — М. : Высш. шк., 1983. — 328 с.
17. Дегтярев Ю. И. Методы оптимизации. — М. : Сов. радио, 1980. — 272 с.
18. Дитрих Я. Проектирование и конструирование : Системный подход: Пер. с пол. — М. : Мир, 1981. — 456 с.
19. Дьяченко Ю. П., Кузнецов Ю. Н. Методы улучшения динамических характеристик механизма подачи прутка // Станки и инструмент. — 1984. — № 11. — С. 16—18.
20. Заблонский К. И. Основы проектирования машин — К. : Вища шк. Головное изд-во, 1981. — 312 с.
21. Камышный Н. И. Автоматизация загрузки станков. — М. : Машиностроение, 1977. — 288 с.
22. Колака И. А., Кувшинский В. В. Многооперационные станки. — М. : Машиностроение, 1983. — 136 с.
23. Корсаков В. С., Лихтин И. О. Обработка деталей типа тел вращения в гибких автоматизированных станочных системах // Станки и инструмент. — 1983. — № 11. — С. 7—10.
24. Костюков К. М., Михелькевич В. Н. Автоматические врезные устройства. — М. : Машиностроение, 1980. — 136 с.
25. Кузнецов Ю. И. Применение технологической оснастки для совершенствования гибких станочных систем // Вестник машиностроения. — 1987. — № 4. — С. 50—53.
26. Кузнецов Ю. Н., Кухарец А. Е. Новые зажимные механизмы станков. — К. : Техніка, 1979. — 151 с.
27. Кузнецов Ю. Н. Повышение эффективности многошпиндельных токарных автоматов // Станки и инструмент. — 1988. — № 2. — С. 4—6.
28. Кузнецов Ю. Н., Срибный Л. Н. Повышение эффективности токарных автоматов. — К. : Техніка, 1989. — 168 с.
29. Литвак Б. Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа. — М. : Радио и связь, 1982. — 184 с.
30. Марголит Р. Б. Наладка станков с программным управлением. — М. : Машиностроение, 1983. — 253 с.
31. Металлорежущие станки и автоматы / А. С. Проников, Н. И. Камышный, Л. И. Волчкевич и др. ; Под общ. ред. А. С. Проникова. — М. : Машиностроение, 1981. — 479 с.
32. Металлорежущие станки / Под ред. В. Э. Пуша. — М. : Машиностроение, 1985. — 256 с.
33. Методы поиска новых технических решений. — Йошкар-Ола : Мар. кн. изд-во, 1976. — 192 с.
34. Модзелевский А. А., Соловьев А. В., Лонг В. А. Многооперационные станки. — М. : Машиностроение, 1981. — 216 с.
35. Моисеева Н. К. Выбор технических решений при создании новых изделий. — М. : Машиностроение, 1980. — 272 с.
36. Молчанов Г. Н. Повышение эффективности обработки на станках с ЧПУ. — М. : Машиностроение, 1979. — 204 с.
37. Муминов Н. А., Исмаилов Б. М., Сафаров Т., Назармантов Р. Повышение точности обработки на одно- и многоинструментальных станках. — Ташкент : Фан, 1982. — 140 с.
38. Орликов М. Я., Кузнецов Ю. Н. Проектирование зажимных механизмов автоматизированных станков. — М. : Машиностроение, 1977. — 142 с.

39. Орликов М. Л. Механизмы вспомогательных движений и автоматизированных станков.— К. : Техніка, 1985.— 176 с.
40. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации.— М. : Наука, 1981.— 208 с.
41. Палк К. И. Системы управления механической обработкой на станках.— Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1984.— 215 с.
42. Пестунов В. М., Кариков Е. А. Повышение точности и производительности металлорежущих станков.— К. : Техніка, 1979.— 96 с.
43. Повышение производительности и надежности токарно-револьверных станков / В. Н. Шишкин, В. Е. Лоев, Л. И. Новицкий, А. В. Шевченко.— К. : Техніка, 1986.— 95 с.
44. Прейс В. В. Технологические роторные машины : вчера, сегодня, завтра.— М. : Машиностроение, 1986.— 128 с.
45. Программное управление станками / Под ред. В. Л. Сосонкина.— М. : Машиностроение, 1981.— 398 с.
46. Проектирование автоматизированного производственного оборудования / М. М. Кузнецов, Б. А. Усов, В. С. Стародубов.— М. : Машиностроение, 1987.— 288 с.
47. Проектирование и расчет узлов агрегатных станков / И. Л. Цымбал, В. И. Соколов, А. А. Кожухарь.— К. : Техніка, 1980.— 190 с.
48. Ратмиров В. А. Основы программного управления станками.— М. : Машиностроение, 1978.— 240 с.
49. Ратмиров В. А. Управление станками гибких производственных систем.— М. : Машиностроение, 1987.— 272 с.
50. Ратмиров В. А., Рашкович П. М. Программное управление зубообрабатывающими станками : Обзор.— М. : НИИМаш, 1983.— 48 с.
51. Ратмиров В. А., Чубуков А. С. Математическое обеспечение систем ЧПУ шлифовальными станками : Обзор.— М. : НИИМаш 1983.— 64 с.
52. Решетов Д. Н., Портман В. Т. Точность металлорежущих станков.— М. : Машиностроение, 1986.— 336 с.
53. Розман Я. Б. Электропривод с магнито-тиристорными преобразователями для станков.— М. : Машиностроение, 1976.— 184 с.
54. Самонастраивающиеся зажимные механизмы / Ю. Н. Кузнецов, А. А. Вачев, С. П. Сяров, А. Й. Цървенков; Под ред. Ю. Н. Кузнецова.— К. : Техніка, 1988.— 252 с.
55. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера.— К. : Техніка, 1977.— 768 с.
56. Следящие электроприводы станков с ЧПУ / А. М. Лебедев, Р. Т. Орлова, А. В. Пельцев.— М. : Энергоатомиздат, 1988.— 223 с.
57. Сопровождение материалов / Под общ. ред. Г. С. Писаренко.— К. : Вища шк. Головное изд-во, 1986.— 775 с.
58. Спыну Г. А. Промышленные роботы. Конструирование и применение / Под ред. В. И. Костюка.— К. : Вища шк. Головное изд-во, 1985.— 176 с.
59. Станки с числовым программным управлением (специализированные) / Под ред. В. А. Лещенко.— М. : Машиностроение, 1979.— 592 с.

60. Храп Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование: Механические системы и конструкции : Пер. с англ.— М. : Мир, 1983.— 478 с.
61. Хубка В. Теория технических систем: Пер. с нем.— М. : Мир, 1987.— 208 с.
62. Чернов Л. Б. Основы методологии проектирования машин. — М. : Машиностроение, 1978.— 148 с.
63. Чихладзе Г. Е. Контактная жесткость и стыковое сближение деталей станков.— Тбилиси : Изд-во Тбил. ун-та, 1986.— 231 с.
64. Шац Я. Ю. Основы оптимизации и автоматизации проектно-конструкторских работ с помощью ЭВМ. — М. : Машиностроение, 1970.— 400 с.
65. Шевченко А. В., Кузнецов Ю. Н. Устройства автоматического закрепления инструментов в токарных модулях: Материалы науч.-техн. семинара «Прогрессивное инструментальное обеспечение технологических процессов механической обработки деталей» (Ленинград, 11—12.03.1988). — Л., 1988. — С. 49—54.
66. Эксплуатация многоцелевых станков / И. Г. Федоренко, И. С. Шур, В. Н. Давыгора и др. ; Под общ. ред. В. А. Федорца.— К. : Техніка, 1988.— 176 с.
67. Эффективность применения высокомоментных двигателей в станкостроении / Э. Г. Королев, И. А. Волкомирский, А. М. Лебедев и др.— М. : Машиностроение, 1981.— 144 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Автоматизация 11
 — гибкая 12
 — жесткая 12
 Автоматическая линия 17
 АСН 244

Г

ГПС 17

Д

ДОС 33

З

Задачи оптимизации, тип 79
 ЗМ 212
 ЗЭ 228

М

МАЗН 261
 Модуль 84
 — конструкционный 84
 — технологический 84
 МОС 106
 — для деталей плоских корпус-
 ных 106
 — — тел вращения 114
 МТА 133

П

Патрон клиновый кулачковый 237
 — плунжерный трехкулачковый
 242
 — разжимной 240
 — цанговый 234

Р

РО 37
 РТК 17

С

Свойство объекта, характери-
 сти 78
 Синтез 51

Системы управления 62

— — — — — самонастраивающиеся 62
 — — — — — адаптивные 62
 — — — — — самообучающиеся 63
 — — — — — самоорганизующиеся 62
 Станки с ЧПУ 18
 — — — — —, выбор типа 58
 — — — — —, гибкость оборудования
 25
 — — — — —, жесткость 30
 — — — — —, зубообрабатывающие 99
 — — — — —, классификация 18
 — — — — —, надежность 24
 — — — — —, податливость 29
 — — — — —, принципиальная схема 56
 — — — — —, производительность 22
 — — — — —, — техническая 22
 — — — — —, — технологическая 22
 — — — — —, — цикловая 22
 — — — — —, расточные 96
 — — — — —, сверлильные 95
 — — — — —, точность 25
 — — — — —, фрезерные 97
 — — — — —, шлифовальные 103
 — — — — —, эффективность 22

У

УАСИ 243
 УАС 3 210
 Управление режимами 40
 — — ациклическое 40
 — — циклическое 40

Ф

Формула компоновки 71
 — —, алгебраические законы 76

Ц

Циклогамм виды 14

Ш

ШУ 169

Э

Этапы создания станка 45

Учебное издание

Кузнецов Юрий Николаевич

СТАНКИ С ЧПУ

Переплет художника

В. А. Гурлева

Художественный редактор

С. П. Духленко

Технический редактор

О. В. Козлитина

Корректор

М. Г. Прус

ИБ № 13434

Сдано в набор 28.11.89. Подписано в печать 24.07.90.
БФ 01760. Формат 84×108¹/₃₂. Бум. тип. № 2. Гар-
нитура литературная. Высокая печать. Усл. печ.
л. 14,7. Усл. кр.-отт. 14,96. Уч.-изд. л. 14,65.
Тираж 11 000 экз. Изд. № 8380. Заказ № 283.
Цена 65 к.

Издательство «Выща школа», 252054, Киев-54,
ул. Гоголевская, 7.

Отпечатано с матриц Харьковской книжной ф-ки
им. М. В. Фрунзе, 310057, Харьков-57, ул. Донец-
Захаржевского, 6/8 в Белоцерковской книжной
фабрике, 256400, Белая Церковь, ул. Карла
Маркса, 4.