

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

*В. Т. ДУДНИКОВ*

АВТОМАТИЗАЦИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

(2-е изд. переработанное и дополненное)

Утверждено редакционным  
советом института  
в качестве учебного пособия

Гудников В. Е. «Автоматизация технологических процессов и авиадвигателестроения». — Куйбышев: КуАИ, 1985. — 92 с.

В работе изложены основные вопросы теории автоматического управления, связанные с применением САУ процессов электрохимической размерной обработки, гидравлических следящих систем для копированной обработки и систем управления с компенсацией упругих перемещений системы СПИД; дана характеристика представлений о материально-технической базе автоматизации операций с рассмотрением систем путевого управления, программного управления с применением цикловой автоматки, систем и станков с ЧПУ; подчеркивается особенность проектирования технологических процессов с применением станков с ЧПУ с изложением методики ручного программирования, с использованием кодов БЦК-5 и ИСО, наглядно показывающего все этапы преобразования информации.

Пособие предназначено для студентов специальности «Авиационные двигатели», обучающихся по учебному плану целевой интенсивной подготовки (ЦИПС), а также для студентов технологической специализации при изучении ими курса «Автоматизация технологических процессов». Оно может быть также рекомендовано для слушателей ФПК, руководящих работников и специалистов отрасли.

Цл. 28, табл. 5, библиогр. — 8 назв.

Рецензенты: д. т. н. профессор М. К. Клебанов,  
к. т. н. доцент Е. А. Верегеников

## ВВЕДЕНИЕ

Слово *автоматизация* происходит от греческого слова *automatos*, что означает *самодвижущийся*. Понятие *автоматизация технологических процессов в авиадвигателестроении* как и другие отрасли народного хозяйства следует рассматривать в историческом плане, в зависимости от методов решения задач производства, определяющих производительность труда и характеризующих использование достижений науки.

Бурное развитие сверхзвуковой авиационной и ракетной техники обусловило особенность авиадвигателестроения, заключающуюся в интенсивном совершенствовании конструкций двигателей различного целевого назначения, непрерывном росте их мощности и параметров рабочих процессов, улучшении качественных характеристик, увеличении ресурса и надежности. Это привело к расширению номенклатуры деталей и применяемых конструкционных материалов, к повышению требований к качеству как отдельных деталей, так и изделий в целом.

Технологическим методам повышения ресурса и надежности двигателей стало уделяться особое внимание. Предпосылкой обеспечения высоких эксплуатационных характеристик двигателей является стабильность параметров технологических процессов, что можно обеспечить только при применении средств автоматизации.

В современном авиадвигателестроении в зависимости от решаемых производственных задач и материально-технического уровня различают четыре вида автоматизации:

1. Малая автоматизация, или элементы автоматизации;
2. Автоматизация операций производственного процесса;
3. Комплексная автоматизация;
4. Автоматическое производство.

Применение средств малой автоматизации, таких как автоматические станочки, контроль размеров в процессе обработки, автоматическая защита от перегрузки приводов и рабочих от

травматизма и т. п., решает частные задачи, направленные на повышение точности размеров при обработке деталей на отдельных станках, сокращение вспомогательных работ, улучшение условий труда и техники безопасности.

Автоматизация отдельных операций предусматривает применение станков-автоматов и полуавтоматов, систем автоматического управления, систем числового программного управления, контрольных и контрольно-сортировочных автоматов, автоматических транспортных устройств, роботов и т. п.

Комплексная автоматизация охватывает весь технологический процесс или его существенную часть.

Автоматическое производство, как определял К. Маркс, предусматривает автоматизацию всего производственного процесса от сырья до готового изделия. В современном понимании следует добавить и автоматизацию инженерного труда, планирования и управления производством с использованием автоматических вычислительных машин — ЭВМ.

Несмотря на трудности, связанные с условиями преимущественного применения серийного производства, в последнее время определились конкретные пути автоматизации всех технологических процессов.

Основой материально-технической базы автоматизации современного авиадвигателестроения является создание многоменклатурного автоматизированного поточного производства на базе гибких производственных систем (ГПС).

Первым низким уровнем ГПС является гибкий *производственный модуль (ГПМ)*, состоящий из единицы технологического оборудования, оснащенного устройством автоматического управления и необходимыми средствами автоматизации, обеспечивающими как его функционирование, так и быструю переналадку на выпуск новых изделий и возможность встраивания ГПМ в гибкие производственные комплексы.

В средства автоматизации ГПМ входят: накопительные и ориентирующие устройства; промышленный робот или встроенный автоматический манипулятор для загрузки и выгрузки как отдельных заготовок, так и заготовок, устанавливаемых в приспособлениях-спутниках; необходимое дополнительное транспортное устройство для подачи и удаления заготовок, деталей и инструментов; устройства для замены инструментов и технологической оснастки; устройства для контроля размеров деталей и их положения в рабочей зоне.

Технологическое оборудование, оснастка и средства автоматизации ГПМ для обеспечения гибкости должны создаваться на базе агрегатных, унифицированных (модульных) конструкций с применением передовых технологических процессов.

Управление основного технологического оборудования осуществляется с преимущественным применением систем числового программного управления (СЧПУ). Однако для непрерывных процессов широко используются системы программного управления (САУ), а для циклических процессов — системы путевого программного управления и системы программного управления с числовой индикацией.

В прошлом для условий массового автоматизированного производства в качестве технологического оборудования преимущественно применяли агрегатные станки, использование которых в известной мере отвечало требованиям гибкого автоматизированного производства, но и они в настоящее время совершенствуются с целью обработки деталей более широкой номенклатуры, с учетом повышенных требований современного научно-технического прогресса и применения систем ЧПУ. В настоящее время станкостроительная промышленность поставляет робототехнические модули (РТМ), состоящие из единицы технологического оборудования и промышленного робота, обеспеченные системой программного управления, которые могут служить материально-технической основой ГПМ.

На базе РТМ могут создаваться автоматизированные автоматические линии и участки, автоматизированные цехи и заводы. Однако лишь то автоматизированное производственное подразделение можно отнести к гибким (гибким автоматизированным линиям — ГАЛ, гибким автоматизированным участкам — ГАУ, гибким автоматизированным цехам — ГАЦ, гибким автоматизированным заводам — ГАЗ), которые можно быстро перестраивать на выпуск новых, более совершенных изделий, что является *первейшей и основной целью создания гибких производственных систем.*

Высокой степенью автоматизации серийного производства в авиадвигателестроении является гибкий производственный комплекс (ГПК), создаваемый из нескольких гибких производственных модулей, объединенных автоматизированной системой управления и развитыми транспортно-складскими системами для заготовок, деталей, инструментов и технологической оснастки, а также устройствами для удаления отходов, подачи смазочно-охлаждающей жидкости и т. п. При этом обеспечивается автономное функционирование в течение заданного времени, и ГПК может встраиваться в гибкое автоматизированное производство как его составная часть.

Применяемое технологическое оборудование, средства автоматизации и система управления ГПК, включающая ЭВМ и системы программного управления отдельных модулей, должны обеспечивать возможность работы ГПК по принципу безлюдной

технологии (с круглосуточной работой ГПК и обслуживанием лишь в первую смену), что является *второй основной целью организации гибких производственных систем*. Достижение этой цели решает проблему полного использования оборудования и способствует решению социальной проблемы — ликвидации дефицита трудовых ресурсов страны.

Высшей ступенью автоматизации серийного производства в авиадвигателестроении является *гибкое автоматизированное производство (ГАП)*, которое в развитом виде имеет не только материально-техническую основу, но и автоматизированные системы конструкторской и технологической подготовки производства.

Материально-техническая основа ГАП состоит из гибких производственных модулей и комплексов, объединенных перархической системой управления, высшим уровнем которой является автоматизированная система управления предприятием (АСУП), предназначенная для планирования производства и управления и организации работы всех систем управления ГАП.

Системы конструкторской и технологической подготовки производства служат для ускорения процесса непрерывного совершенствования изготавливаемых изделий и включают автоматизированную систему научных исследований (АСНИ), систему автоматизированного проектирования (САПР) и автоматизированную систему подготовки производства (АСПП).

Предпосылкой для создания систем конструкторской и технологической подготовки производства, разработки их математического обеспечения являются работы по стандартизации и типизации изделий на базе агрегатных (модульных) конструкций, а также применение прогрессивных технологических процессов с использованием групповых методов обработки.

С расширением масштабов производства и увеличением количества комплексов в ГАП совершенствуются как система управления, так и автоматизированные транспортно-складские системы (АТСС) инструментального обеспечения (АСОИ) и удаления отходов (АСУО).

Часть отдельных деталей в авиадвигателестроении, таких как лопатки газовых турбин, мелкие корпусные детали и крепежные детали изготавливаются в больших количествах и их изготовление может осуществляться с использованием автоматизированных производственных систем, применяемых в массовом производстве на базе агрегатных станков усовершенствованных конструкций и автоматов с цикловым управлением путем создания переналаживаемых автоматических линий групповой обработки (ПАЛГО) и переналаживаемых автоматиче-

ских линий широкой номенклатуры (ПАЛШН). Однако для массовых деталей в авиадвигателестроении не исключается возможность обоснованного применения станков с ЧПУ, промышленных роботов и иерархических систем управления как основной материально-технической базы ГАП, создаваемой в последние годы.

При автоматизации производственных процессов в авиадвигателестроении изменяется не только материально-техническая база производства, но и труд самих рабочих, уменьшается доля ручных работ, возрастает значение квалифицированного рабочего и инженерного труда.

Исходя из изложенного, под автоматизацией технологических процессов следует понимать качественно более высокий уровень развития авиадвигателестроения, при котором с помощью технических средств и организационно-технических мероприятий на базе ГПС организуется как осуществление производственных процессов, так и управление ими с резким повышением производительности труда, улучшением качества изделий и ликвидацией существенного различия между физическим и умственным трудом членов производственного коллектива.

В соответствии с ГОСТ 14.309-74 для количественной оценки категории механизации и автоматизации вводится временной показатель в виде отношения

$$a_T = \frac{T_M^A}{T_{ш}^A},$$

где  $T_M^A$  — сумма машинного времени;  
 $T_{ш}^A$  — сумма штучного времени.

По этому показателю оценивается уровень автоматизации единичных операций, технологических процессов и систем технологических процессов отдельных участков цеха и предусматривается 8 категорий механизации и автоматизации: 1 — нулевая — при отсутствии механизации и автоматизации; 2 — низшая — при показателе уровня 0,01—0,25; 3 — малая — 0,25—0,45; 4 — средняя — 0,45—0,60; 5 — большая — 0,60—0,75; 6 — повышенная — 0,75—0,90; 7 — высокая — 0,90—0,99; 8 — полная — 1,00.

Научной основой автоматизации является техническая кибернетика и теория рабочих машин. Актуальными являются проблемы обеспечения качества выпускаемой продукции, оценки надежности средств автоматизации и ряд социальных проблем.

Под технической кибернетикой понимается наука о законах управления и передачи информации в технических системах. Она включает: теорию информации, изучающую получение, преобразование, передачу и хранение информации; теорию программирования, рассматривающую методы использования информации для целей управления, и автоматику, изучающую как физические элементы, так и принципы построения, и теорию систем автоматического управления.

*Теория рабочих машин* рассматривает методы расчета конструктивных и эксплуатационных параметров и производительности машин. Обеспечение качества выпускаемой продукции связано как с методами количественной оценки точности изготавливаемых деталей, параметров процессов и систем управления автоматизированного производства, так и с разработкой путей улучшения их качественных характеристик. *Теория надежности средств автоматизации* дает методы количественной оценки надежности и указывает способы ее повышения.

В числе многочисленных социальных проблем главной является повышение благосостояния и культуры советского народа. Автоматизация производственных процессов, позволяющая повысить производительность труда, является эффективным средством решения ряда социальных проблем развитого социализма. В программе КПСС записано, что «автоматизация и комплексная механизация служат материальной основой для постепенного перерастания социалистического труда в труд коммунистический». Выполнение этой социальной задачи следует решать в комплексе планируемых мероприятий, путем постепенного закрепления за рабочим функций не только оператора, но и наладчика, и контролера. Дифференциация этих функций, характерная для капиталистического производства, с тенденцией понижения квалификации обслуживания, направленная на эксплуатацию большого числа малоквалифицированных рабочих, не отвечает социальным проблемам автоматизации советского авиадвигателестроения.

Решениями XXVI съезда КПСС предусматривается ускорение научно-технического прогресса и перевод экономики на интенсивный путь развития, широкое внедрение комплексной механизации и автоматизации с применением автоматических манипуляторов, создание автоматизированных цехов и заводов.

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Каждый вид промышленного оборудования или промышленных объектов в авиадвигателестроении имеет свое целевое назначение, в зависимости от которого оборудование может быть: *технологическим* — предназначенным для изменения формы, размеров и свойств веществ; *энергетическим* — для преобразования энергии; *транспортным* — для изменения положения материалов, деталей и средств производства; *контрольным* — для контроля состояния процесса, формы, размеров деталей и свойств материалов; *информационным* — для преобразования и передачи информации.

Процессы в промышленном объекте осуществляются в определенной последовательности, обуславливаемой технологическим процессом или техническими условиями эксплуатации. Всякий технологический процесс или условия эксплуатации характеризуются физическими величинами или качественными параметрами (рабочими, контролируемыми или выходными). Например, таким параметром нагревательной печи является температура; в паровом котле — уровень воды и давление пара; в двигателе внутреннего сгорания — число оборотов; в станках ЭХО — зазор между электродом и деталью; в металлорежущих станках — точность размеров деталей.

Действия, связанные с достижением необходимых параметров процесса при работе промышленного объекта, называются *управлением*, а сам промышленный объект — *управляемым объектом*. Управление может быть ручным или автоматическим.

Совокупность управляемого объекта и автоматического управляющего устройства называется *системой автоматического управления* (САУ). В процессе работы САУ поддерживается необходимая закономерность изменения ее качественного параметра или выходной величины, которая определяется законом изменения входной величины — управляющим воздействием.

Кроме управляющего воздействия на систему влияют нагрузки, изменения окружающей среды, физических свойств носителей энергии и т. п., которые нарушают закон управления и называются возмущающими воздействиями. В зависимости от управляющего воздействия выделяют следующие системы автоматического управления: *системы стабилизации* (системы регулирования), когда входная величина имеет постоянное значение, т. е.  $F_{вх} = \text{const}$ ; *системы программного управления*, когда входная величина изменяется по заранее установленному закону, т. е.  $X_{вх} = F(t)$ , где  $F(t)$  — заданная функция времени; *следящие системы*, когда закон изменения входной величины может быть любым в пределах технических условий, т. е.  $X_{вх} = f(t)$ ,  $a < f(t) < b$ ; где  $a$  и  $b$  — предельные значения параметров (координат, скоростей, температур и т. п.).

Кроме указанных систем, имеющих наибольшее распространение, применяются *адаптивные* (самоприспосабливающиеся) или *самонастраивающиеся*, когда обеспечиваются определенные показатели качества при изменяющихся внешних воздействиях (как управляющих, так и возмущающих); *инвариантные* (независимые), которые могут быть как системами стабилизации программного управления, так и следящими системами, но не зависящими от внешних возмущений, и системы *комбинированного управления*, относящиеся к классу инвариантных систем.

## 1.2. ОСОБЕННОСТИ ЗВЕНЬЕВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ САУ

Методика определения передаточных функций отдельных элементов и САУ в целом дается в курсах теории автоматического управления. Ниже рассматриваются некоторые особенности технологических САУ, определение их передаточных функций и отдельных элементов. К технологическим САУ, как правило, предъявляются повышенные требования по точности, и в этом случае приходится учитывать влияние возмущений на объект или исполнительный орган. Возмущение можно представлять как на входе объекта, так и на выходе следующим образом. Пусть получено операторное уравнение в виде

$$D(p)y = Q(p)x + F(p)f_R, \quad (1)$$

где  $D(p)$  — полином характеристического уравнения  $D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n$ ;

$Q(p), F(p)$  — полиномы при управляющем воздействии и возмущениях.

Передаточная функция по управляющему воздействию определяется при  $f_R = \frac{\Delta R}{R_0} = 0$  и выразится в виде

$$W_1(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{Q(p)}{D(p)}, \quad (2)$$

где  $f_R$  — безразмерное значение возмущения.

При  $x = 0$  передаточная функция по возмущению определяется

$$W_2(p) = \frac{y(p)}{f_R(p)} = \frac{F(p)}{D(p)}. \quad (3)$$

Представим возмущение на выходе объекта, для чего уравнение (1) выразим

$$y = \frac{Q(p)}{D(p)} x + \frac{F(p)}{D(p)} f_R. \quad (4)$$

Структурная схема принимает вид (рис. 1,а). Отсюда вытекает правило: для представления возмущения на выходе объекта необходимо уравнение связи между входной, выходной вели-

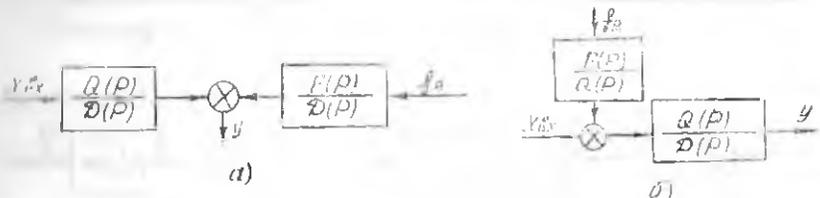


Рис. 1. Структурные схемы звеньев: а) представление возмущения на выходе звена; б) возмущение на входе звена

чиной и главным возмущением разделить на характеристический полином. Для изображения возмущения на входе объекта преобразуем уравнение (1) к виду

$$D(p)y = Q(p) \left[ x + \frac{F(p)}{Q(p)} f_R \right] \quad (4')$$

и тогда структурная схема объекта представится в виде (рис. 1,б).

Сравнивая две последние структурные схемы, можно сформулировать правило переноса возмущений: при переносе возмущения на вход объекта необходимо передаточную функцию по возмущению разделить на передаточную функцию по управляемому воздействию.

Полученные общие положения проиллюстрируем на конкретных примерах звеньев, применяемых в авиадвигателестроении.

### 1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

В процессе электрохимической обработки происходит растворение обрабатываемой детали, являющейся анодом при относительной стабильности инструмента-катода. Анод-деталь и ка-

тод-инструмент в проточном электролите образуют электрохимическую ячейку (ЭХЯ). Зазор  $s$  между электродами является выходной величиной, а скорость перемещения электрода-инструмента  $v$  — входной величиной (рис. 2, а).

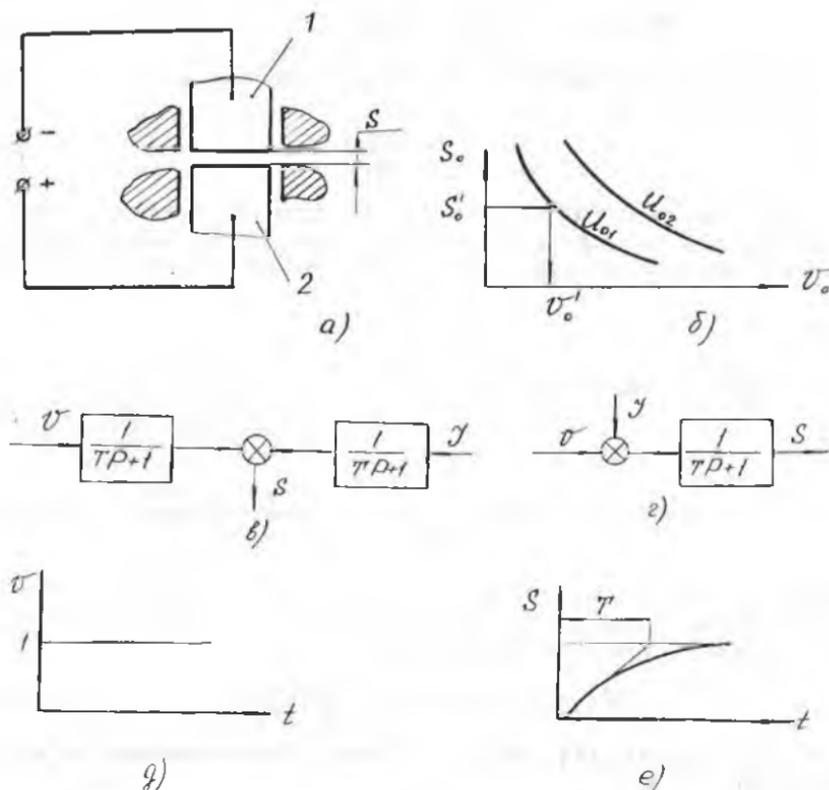


Рис. 2. Электрохимическая ячейка: а) принципиальная схема: 1 — электрод-инструмент, 2 — деталь; б) статическая характеристика; в), г) структурные схемы; д) единичное ступенчатое воздействие; е) переходная характеристика

Главными возмущающими воздействиями на управляемый объект являются колебания напряжения на электродах и изменение электропроводности электролита  $\gamma$ .

Влияние параметров потока электролита можно ограничить за счет выбора оптимальных значений перепада давлений на входе и выходе электролита.

Выбор оптимальных технологических параметров зависит от обрабатываемого материала, неравномерности припуска, состава

ва и параметров потока электролита и допустимой погрешности обработки.

#### Технологические параметры

1	Напряжение на электродах, В	$U = 10 - 15$
2	Плотность тока, $\text{а/см}^2$	$j = 10 - 100$
1	Скорость перемещения электрода-инструмента, мм/мин	$v = 0,2 - 2$
1	Зазор между электродами, мм	$s = 0,1 - 0,8$

Изменение межэлектродного зазора можно выразить уравнением

$$S = S_n - Vdt + v_p dt, \quad (5)$$

где  $S_n$  — начальный зазор;  $v_p$  — скорость электрохимического растворения;  $t$  — время.

Разделив на  $dt$ , получим

$$S' = -v + v_p, \quad (6)$$

где  $S'$  — скорость изменения зазора.

По закону Фарадея масса растворенного вещества определится из формулы

$$dm = \rho F v_p dt = \eta K I dt, \quad (7)$$

где  $\rho$  — плотность обрабатываемого материала;  $F$  — площадь поверхности электрода;  $\eta$  — выход по току;  $K$  — электрохимический эквивалент;  $I$  — ток.

Из последнего равенства получим

$$v_p = \frac{\eta K I}{\rho F}. \quad (8)$$

По закону Ома

$$I = \frac{(U - e) \nu F}{S}, \quad (9)$$

где  $e$  — ЭДС поляризации;  $\nu$  — удельная электропроводность электролита.

Подставляя значения (8) и (9) в уравнение (6), определим

$$S' = -v + \frac{\eta K (U - e) \nu}{\rho s}. \quad (10)$$

Для установившегося режима ( $S' = 0$ )

$$v_0 = \frac{\eta K (U_0 - e) \nu_0}{\rho s_0}. \quad (11)$$

По данным экспериментальных исследований установлено, что за счет высокой концентрации продуктов растворения (шлама, водорода и т. п.) удельная электропроводность электролита зависит от зазора и может быть представлена в виде

$$v_0 = \beta S_0^m, \quad (12)$$

где  $m$  — показатель степени;  $S$  — зазор, мм.

При обработке жаропрочных материалов с использованием водного раствора  $\text{NaCl}$   $m = 0,35$ ,  $\beta = 0,1-0,13$ . С учетом этой связи между параметрами в установившемся режиме определится

$$v_0 = \frac{\eta K (U_0 - e) \beta}{\rho S_0^{1-m}}. \quad (13)$$

Полученная зависимость является статической характеристикой электрохимической ячейки, в соответствии с которой устанавливаются конкретные значения технологических параметров (рис. 2,б).

Выражая уравнение (10) в малых отклонениях, получим

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\Delta S) = & -\Delta v + \frac{\eta K v_0}{\rho S_0} \Delta U + \frac{\eta K (U_0 - e)}{\rho S_0} \times \\ & \times \Delta v - \frac{\eta K (U_0 - e) v_0}{\rho S_0^2} \Delta S. \end{aligned}$$

Принимая значение напряжения  $U_0 - e$  и значение зазора  $S_0$  за базисные, это уравнение выразим в виде

$$\begin{aligned} S_0 \frac{d}{dt} \left( \frac{\Delta S}{S_0} \right) = & -v_0 \frac{\Delta v}{v_0} + \frac{\eta K (U_0 - e) v_0}{\rho S_0} \left( \frac{\Delta U}{U_0 - e} \right) + \\ & + \frac{\eta K (U_0 - e)}{\rho S_0} \left( \frac{\Delta v}{v_0} \right) - \frac{\eta K (U_0 - e) v_0}{\rho S_0} \left( \frac{\Delta S}{S_0} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Разделяя переменные с учетом (11), получим уравнение электрохимической ячейки в отклонениях и безразмерном виде

$$T \bar{s}' + \bar{s} = -\bar{v} + \bar{u} + v, \quad (15)$$

где  $T = s_0 / v_0$ . (16)

Выражая в операторном виде, получим

$$T p \bar{s} + \bar{s} = -\bar{u} + \bar{f}_R, \quad (17)$$

где  $f_R(u, v) = \bar{u} + v$  — возмущающее воздействие.

Закон Ома в малых отклонениях и безразмерном виде при постоянном зазоре представляется в виде

$$I = \bar{u} + \bar{v}. \quad (18)$$

С учетом этого операторное уравнение электрохимической ячейки можно записать

$$(T p + 1) \bar{s} = -v + I \quad (19)$$

или

$$s = \frac{1}{T p + 1} \bar{v} + \frac{1}{T p + 1} \bar{s}.$$

При  $I = \text{const}$  передаточная функция по управляющему воздействию определится

$$W_1(p) = \frac{s(p)}{v(p)} = -\frac{1}{T_p + 1}. \quad (20)$$

Знак «—» показывает, что с увеличением скорости зазор уменьшается.

Передаточная функция по возмущениям

$$W_2(p) = \frac{s(p)}{j_k(p)} = \frac{1}{T_p + 1}. \quad (21)$$

Рассматриваемый объект управления можно представить структурными схемами (рис. 2, в, г). Постоянная  $T$  имеет размерность времени (с) и называется постоянной времени. На рис. 2, е показана переходная характеристика ЭХЯ.

#### 1.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

Электродвигатели применяются как исполнительные элементы систем автоматического управления и как объекты управления. При малых мощностях (до 100 Вт) применяются двухфазные асинхронные двигатели, так как они более надежны из-за отсутствия скользящих контактов. При мощностях более 100 Вт применяются двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, которые допускают десятикратную кратковременную перегрузку. Энергия возбуждения этих двигателей очень мала по сравнению с энергией якоря. Указанные преимущества двигателей постоянного тока с независимым возбуждением дают возможность широко применять их в промышленных САУ.

В связи с бурным совершенствованием следящего привода станков с ЧПУ и исполнительных механизмов САУ в настоящее время для малых мощностей применяются двигатели постоянного тока с печатным ротором, диск которого изготавливается из пластмассы; на диск печатным способом наносится обмотка. Для мощностей больше 100 Вт, кроме обычных двигателей постоянного тока с независимым возбуждением промышленной серии П, получили широкое применение: 1) малонерционные двигатели малого диаметра, но большой длины ротора — серии ПГ; 2) двигатели с гладким безпазовым ротором, якорная обмотка которых заливается эпоксидной смолой, и каждый слой обмотки стягивается лентой из стеклоткани, что обеспечивает большой воздушный зазор, лучшее охлаждение и увеличение момента двигателя.

В отечественных станках с ЧПУ наиболее широкое применение получили двигатели серии ПБСТ со встроенными тахо-

генераторами, обеспечивающие более линейные статические характеристики, десятикратную перегрузку в течение 1 с и четырехкратную перегрузку в течение 1 мин. В США разработаны высокомоментные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов, которые могут непосредственно соединяться с ходовыми винтами. Наиболее мощные двигатели этого вида развивают момент около 20 кгс/м и допускают более чем десятикратную временную перегрузку.

1.5. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ И ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

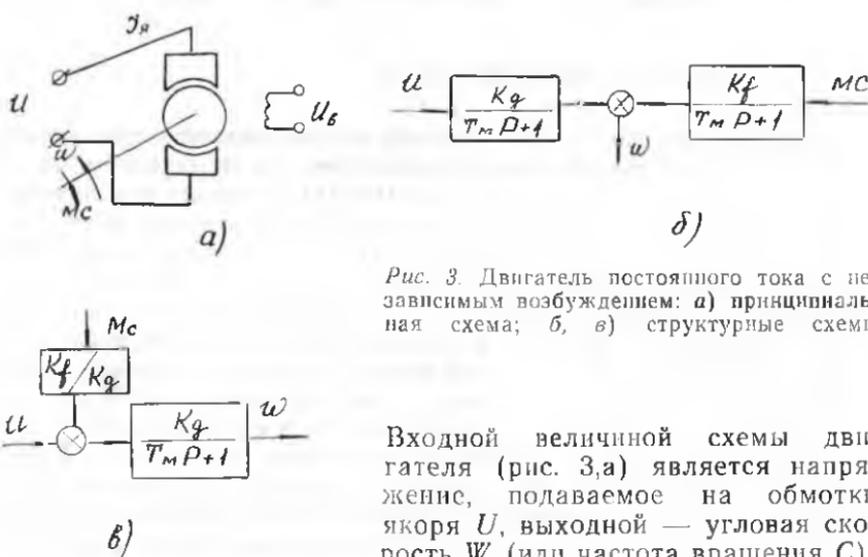


Рис. 3. Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением: а) принципиальная схема; б, в) структурные схемы

Входной величиной схемы двигателя (рис. 3,а) является напряжение, подаваемое на обмотки якоря  $U$ , выходной — угловая скорость  $\omega$  (или частота вращения  $C$ ).

Исходные уравнения

1. Уравнение моментов

$$I_0 \frac{d\omega}{dt} = M - M_c \quad (22)$$

где  $I_0$  — момент инерции якоря;  $M$  — момент, развиваемый двигателем;  $M_c$  — момент сопротивления.

В свою очередь,  $M = C_m I_a$ , где  $C_m = \frac{M_H}{I_{aH}}$ .

По закону Ома

$$U = R_{я} I_{я} + L_{я} \frac{dI}{dt} + e, \quad (23)$$

где  $R_{я}$  — сопротивление якоря;  $I_{я}$  — ток якоря;  $L_{я}$  — индуктивность якорной цепи;  $e$  — обратная ЭДС двигателя.

При этом  $e = C_e \omega$ . (24)

Подставляя значение (24) в уравнение (23), получим

$$U - R_{я} I_{я} - L_{я} \frac{dI}{dt} - C_e \omega = 0.$$

При установившемся режиме  $\frac{dI}{dt} = 0$ . Из этих условий

$$C_e = U_n - \frac{I_{ян} R_{я}}{\omega_n}. \quad (25)$$

Величина с индексом «н» соответствует номинальным значениям.

Из уравнения (22) определим

$$I_{я} = \frac{I_0}{C_M} \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_c}{C_M}. \quad (26)$$

Подставляя значения (24) и (26) в уравнение (23), запишем

$$U = \frac{R_{я}}{C_M} \left( I_0 \frac{d\omega}{dt} + C_M \right) + \frac{L_{я}}{C_M} \left[ I_0 \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{d}{dt} (M_c) \right] + C_e \omega.$$

Переносим значение выходной величины в левую часть уравнения, получим

$$\frac{L_{я} I_0}{C_M} \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{R_{я} I_0}{C_M} \frac{d\omega}{dt} + C_e \omega = U - \frac{L_{я}}{C_M} \frac{dM_c}{dt} - \frac{R_{я}}{C_M} M_c.$$

Выражая в отклонениях, запишем

$$\begin{aligned} \frac{L_{я} I_0 d^2}{C_M dt^2} (\Delta\omega) + \frac{R_{я} I_0 d}{C_M dt} (\Delta\omega) + C_e \Delta\omega = \Delta U - \frac{L_{я} d}{C_M dt} \times \\ \times (\Delta C_M) + \frac{R_{я}}{C_M} (\Delta M_c). \end{aligned}$$

Разделив на базисные значения, определим

$$\frac{L_{я} I_0 \omega_0}{C_M} p^2 \bar{\omega} + \frac{R_{я} I_0 \omega}{C_M} p \bar{\omega} + C_e \omega_0 \bar{\omega} = U_0 \bar{U} - \frac{L_{я} M_n}{C_M} p \bar{M}_c - \frac{R_{я} M_n}{C_M} \bar{M}_c.$$

Разделив на  $C_e \omega_0$ , окончательно получим

$$(T_M T_{я} p^2 + T_{я} p + 1) \omega = K_n U - K_f (T_f p + 1) \bar{f}_R, \quad (27)$$

где

$$T_M = \frac{R_{я} I_0}{C_e C_M}; \quad T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}}; \quad K_n = \frac{U_0}{C_e \omega_0}; \quad K_f = \frac{M_n R_{я}}{C_M C_e \omega_0};$$

$$T_f = \frac{L_a}{R_a}; \quad J_R = \frac{\Delta M_c}{M_H}.$$

При этом передаточная функция по управляющему воздействию  $\omega$  определится в виде

$$W_1(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{K_d}{T_M T_{\text{я}} p^2 + T_M p + 1}. \quad (28)$$

Передаточная функция по возмущениям

$$W_2(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = \frac{K_f(T_f p + 1)}{T_M T_{\text{я}} p^2 + T_M p + 1}. \quad (29)$$

Для большинства случаев  $T_{\text{я}} \ll T_M$

$$(T_M p + 1)\omega = K_d U - K_f f_R. \quad (30)$$

Тогда

$$W_1(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{K_d}{T_M p + 1} \quad \text{и} \quad W_2(p) = \frac{\omega(p)}{f_R(p)} = \frac{K_f}{T_M p + 1}. \quad (31)$$

Структурные схемы двигателя показаны на рис. 3,б и 3,в.

#### 1.6. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ГИМ

Гидравлические исполнительные механизмы (гидродвигатели, гидроусилители) (ГИМ) применяются в приводах металлообрабатывающих станков, прессов и транспортных устройств. Гидравлические исполнительные механизмы различаются:

По числу рабочих кромок золотника и по конструкции цилиндра

- 1) с однокромочным золотником и дифференциальным цилиндром;
- 2) с двукромочным золотником: а) с дифференциальным цилиндром; б) с недифференциальным цилиндром;
- 3) с четырехкромочным золотником и недифференциальным цилиндром.

По характеру открытия щелей золотника

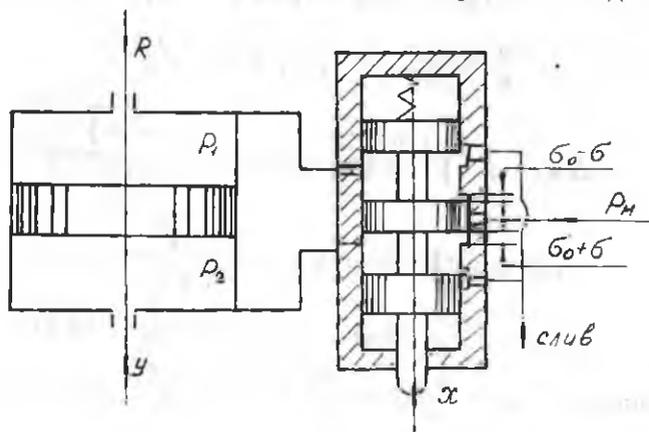
- 1) с положительным перекрытием;
- 2) с нулевым перекрытием;
- 3) с отрицательным перекрытием.

Схема гидравлического исполнительного механизма с четырехкромочным золотником, отрицательными перекрытиями и недифференциальным цилиндром показана на рис. 4,а.

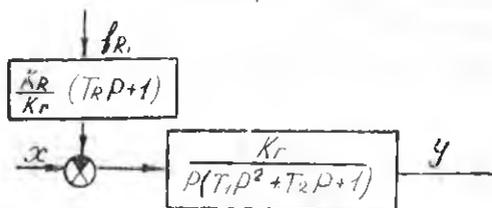
Из условия неразрывности потока рабочей жидкостью полу-

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (32)$$

где  $Q_1$  — объемный расход на входе;  $Q_2$  — на сливе;  $Q_3$  — на наполнение цилиндра;  $Q_4$  — на сжатие рабочей жидкости.



а)



б)

Рис. 4. Гидравлический исполнительный механизм:  
а) конструктивная схема; б) структурная схема

Уравнение сил на штоке поршня

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = F (p_2 - p_1) - R; \quad (33)$$

$$P_n = p_1 + p_2. \quad (34)$$

Из гидравлики известно:

$$Q_1 = \mu l (\sigma_0 + \sigma) \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_n - p_2)};$$

$$Q_2 = \mu l (\sigma_0 - \sigma) \sqrt{\frac{2}{\rho} p_2}; \quad (35)$$

$$Q_3 = F \frac{dy}{dt}; \quad Q_4 = \eta v \frac{dp_2}{dt}.$$

Выражая в отклонениях, получим

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4;$$

$$\frac{M}{F} \frac{d^2(\Delta y)}{dt^2} = \Delta p_2 + \Delta p_1 - \frac{\Delta R}{F};$$

$$\Delta Q_1 = \mu l \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_n - p_2)} \Delta \sigma - \frac{\mu l \sigma_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}}}{2 \sqrt{p_n - p_2}} \Delta p_2;$$

$$\Delta Q_2 = \mu l \sqrt{\frac{2}{\rho} p_2} \Delta \sigma - \frac{\mu l \sigma_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}}}{2 \sqrt{p_2}} \Delta p_2; \quad (36)$$

$$\Delta Q_3 = F \frac{d}{dt} (\Delta y) \quad \Delta Q_4 = \eta v \frac{d}{dt} (\Delta p_2).$$

Принимая  $x = \frac{\Delta \sigma}{\sigma_0} y = \frac{\Delta y}{\sigma_0}; \quad \dot{f}_R = \frac{\Delta R}{R_0}; \quad R_0 = \frac{p_n}{2}; \quad (37)$

получим  $Q_6 = \mu l \sigma_0 \sqrt{\frac{1}{\rho} p_n}; \quad x_6 = y_6 = \sigma_0 p_{16} = p_{26} = \frac{p_n}{2}.$

Решая уравнение (32), (33), (34) с учетом значений (35), (36) и (37), определим

$$(T_1 p^2 + T_2 p + 1) p y = K_r x - K_R (T_R p + 1) \dot{f}_R, \quad (38)$$

где:

$$T_1 = \frac{M \eta v}{2 F^2}; \quad T_2 = \frac{M \sigma \cdot \mu l}{F^2 \sqrt{\frac{1}{\rho} p_n}}; \quad K_r = \frac{2 \mu l}{F} \sqrt{\frac{1}{\rho} p_n}; \quad (39)$$

$$K_R = \frac{K_r}{2}; \quad T_R = \frac{l \sqrt{\rho p_n}}{2 \mu l \sigma_0};$$

$M$  — масса подвижных частей;  $\eta$  — коэффициент объемного сжатия масла;  $F$  — площадь гидроцилиндра;  $\mu$  — коэффициент расхода через щель;  $l$  — длина щели;  $\rho$  — плотность масла;  $V$  — половина объема гидроцилиндра;  $p_n$  — давление масла;  $K_r$  — коэффициент усиления ГИМ;  $T_1, T_2$  — постоянные времени.

Структурная схема показана на рис. 4,б.

Различные виды гидравлических исполнительных механизмов (ГИМ), отличающиеся числом рабочих кромок и конструкцией цилиндров с отрицательным перекрытием щелей, выражаются аналогичными уравнениями и структурными схемами с другими значениями коэффициентов и постоянных времени. ГИМ с положительными перекрытиями, редко применяемые в промышленных САУ, описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Приведенные зависимости для них

использовать неправомерно. ГИМ, не охваченные обратной связью, даже при наличии регуляторов перепада давлений, применяемых в гидроприводах станков, не обеспечивают постоянной скорости движения и точного положения рабочих органов при останове. При этом в конечных точках движения рабочих органов таких промышленных объектов, как агрегатные станки, наблюдаются «скачки», связанные с упругостью рабочей жидкости. Для улучшения их статических и динамических характеристик накладываются обратные связи, характерные для следящих приводов (см. гидравлические следящие системы).

### 1.7. ПРАВИЛА СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Знание передаточных функций отдельных звеньев позволяет получить передаточную функцию системы автоматического управления в целом. Для этого требуется знать правила струк-

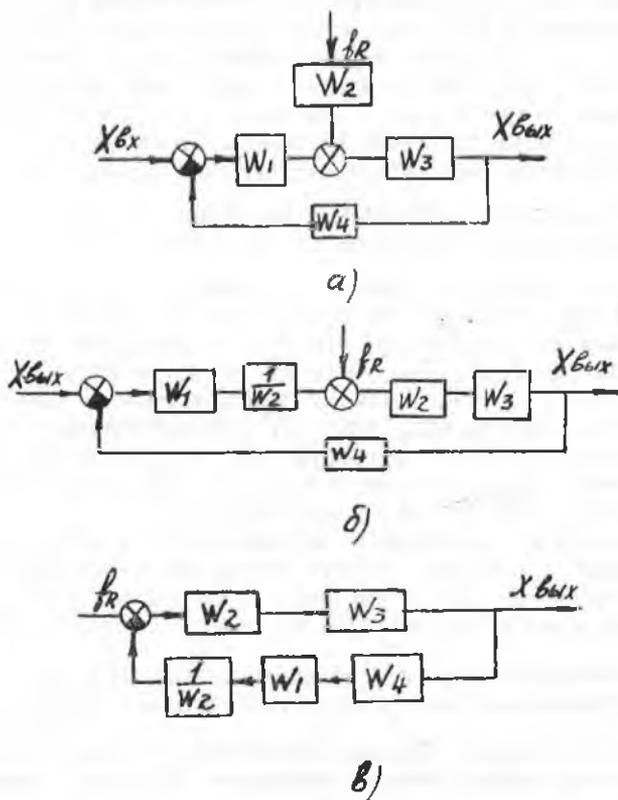


Рис. 5. Правила структурных преобразований: а), б), в) эквивалентные схемы при наличии возмущения

турных преобразований, которые основываются на принципе суперпозиции (независимости сигналов) и подробно изучаются в курсах теории автоматического управления.

Здесь рассмотрен лишь вопрос, относящийся к функциям возмущения, недостаточно освещаемый во многих учебниках по теории автоматического управления.

Определение передаточной функции по возмущениям, действующим на управляемый объект с передаточной функцией  $W_3$  (рис. 5,а), проводится в следующей последовательности: 1) вводится возмущение в цель управления (рис. 5,б); 2) схема преобразуется с переносом возмущения на вход (рис. 5,в). На основе этой схемы определяется передаточная функция по возмущению

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{f_R(p)} = \frac{W_2 W_3}{1 + W_1 W_2 W_3} \quad (40)$$

Следует при этом отметить, что знаменатели передаточных функций звеньев и САУ, характеризующие условия их устойчивости, одинаковы как по управляемому, так и возмущающему воздействиям. Вопросы методики определения устойчивости и качественных характеристик подробно не рассматриваются. Ниже дается лишь описание отдельных технологических САУ с указанием некоторых качественных характеристик.

### *1.8. СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ*

Как было отмечено ранее, в процессе электрохимической размерной обработки (ЭХО) необходимо обеспечивать постоянное значение зазора между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью. При наличии неравномерных припусков на обработку, а также влияния неоднородности многофазной среды потока электролита (за счет газонасыщения и наличия шлама), распределение плотности тока по площади обрабатываемой детали неравномерно, и в связи с этим постоянного зазора в процессе обработки не получается.

На основании отмеченных особенностей решается задача о поддержании в заданной точке постоянного зазора или его среднего значения. Для этой цели в настоящее время применяются следующие системы регулирования процесса ЭХО.

#### *Электрохимические или гидравлические системы поддачи электрода-инструмента с постоянной скоростью*

Этот способ основан на самовыравнивании процесса в электрохимической ячейке как устойчивом объекте управления. В соответствии с ее статической характеристикой, проведенной ранее, получается установившееся среднее значение зазора.

При этом на величину зазора будут влиять как изменения напряжения в сети, так и изменение удельной электропроводности электролита, что ведет к снижению точности обработки.

*Электрохимические системы, имеющие индуктивный датчик, смонтированный в тело электрода*

При этом зазор может быть выдержан постоянным в точке установки электрода. Данный способ практически может быть приемлем для ферромагнитных материалов.

*Электрохимические системы управления с предварительной установкой зазора и автоматизацией цикла работы станка типа ЭХО-1 (рис. 6)*

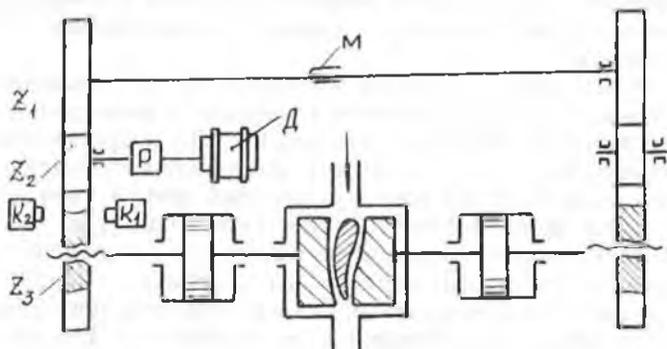


Рис. 6. Система регулирования ЭХО с предварительной установкой зазора

При включенном рабочем токе электроды-инструменты перемещаются посредством штоков, связанных с поршнем гидроцилиндра. При подаче масла в полости, противоположные электродам, последние перемещаются до касания с деталью. При этом должен включиться контакт  $K_1$ . Если не произошло этого, включается двигатель Д, который через редуктор Р поворачивает шестерню. За счет резьбы шестерня перемещается в осевом направлении до момента замыкания контакта  $K_1$ . После этого масло подается в противоположные стороны гидроцилиндров, и электроды отходят на величину зазора, который определяется положением контакта  $K_2$ . Затем включается силовой ток, и происходит процесс электрохимической обработки до момента достижения наибольшего допустимого зазора. Начальный зазор обычно принимается равным 0,2—0,25 мм. Длительность цикла установки зазора (время коммутации) составляет 1—2,5 с.

Для исключения смещения профилей лопатки относительно базовых поверхностей механизмы привода левого и правого электродов-инструментов имеют жесткую связь в виде шлицевой муфты М.

## Система регулирования ЭХО с компенсацией возмущений (швартиантная САУ)

При создании непрерывно работающих систем ставится задача о поддержании зазора, обеспечивающего отсутствие коротких замыканий и допустимую погрешность формы поверхности в конце обработки. Далее проводится описание и характеристика системы регулирования среднего значения межэлектродного зазора с компенсацией главных возмущений. В соответствии с конструктивными схемами (рис. 7,а, б) сигнал управления в виде напряжения поступает с неуравновешенного моста постоянного тока и передается через усилитель на двигатель постоянного тока, угловая скорость которого преобразуется механическими устройствами в скорость перемещения электрода инструмента.

Плечами моста являются постоянные сопротивления и датчики тока. В первоначальном варианте в качестве последних устанавливались ламповые диоды  $L_1$  и  $L_2$ , сопротивления которых изменялись в зависимости от напряженности внешнего магнитного поля, создаваемого токонесущей шиной (для диода  $L_1$ ) и катушкой цепи дополнительных электродов (для диода  $L_2$ ). Последний является компенсирующим звеном, в цепи которого ток изменяется в зависимости от колебания напряжения на электродах и электропроводности электролита зависящей, главным образом, от его состава и температуры. Дополнительные электроды (ДЭ) изготовляются из графита и для повышения их стойкости провариваются в масле.

Как видно из закона Ома (9), при постоянном значении изменение зазора эквивалентно изменению тока (при выражении в отклонениях и безразмерном виде), т. е.

$$\bar{I} = \bar{s}. \quad (40)$$

Таким образом, датчик тока  $L_1$  изменяет свое сопротивление как за счет изменения зазора  $s$ , чем обеспечивается обратная связь по управляющему воздействию, так и вследствие действия возмущений, связанных с отклонениями напряжения на электродах от номинального значения и с изменением электропроводности электролита. В соответствии с конструктивными схемами структурная схема управления показана на рис. 7,в. В этой схеме представлены:  $K_3$  — передаточная функция усилителя;  $K_4$  — передаточная функция двигателя постоянного тока с  $T_M p + 1$ -независимым возбуждением;  $K$  — передаточная функция механических звеньев (для одноходного винта  $K_b = 2 \frac{1}{s_0}$  и для рычажного механизма  $K_p = a/b$  (рис. 7,б);  $K_4, K_5$  — передаточная функция плеч электрического моста.

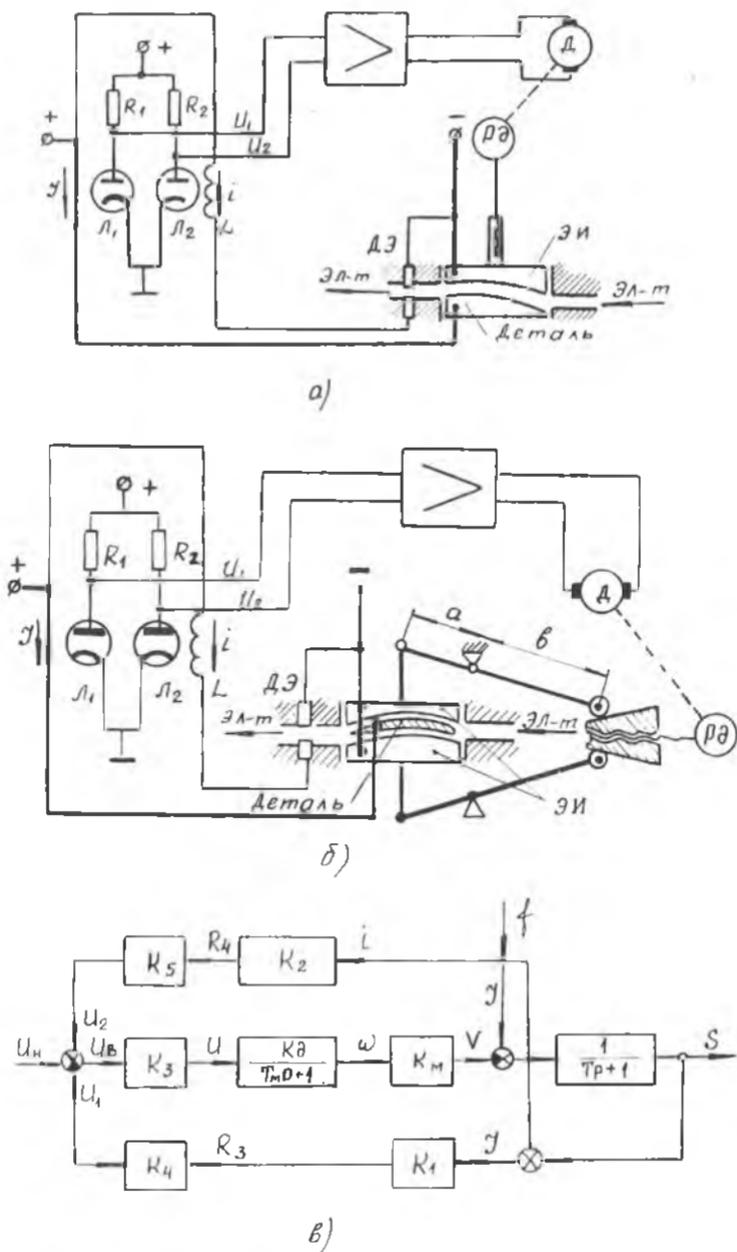


Рис. 7. Система регулирования ЭХО с компенсацией возмущений: а), б) принципиальные схемы при односторонней и двухсторонней обработке; в) структурная схема

Сопrotивление днoдoв  $J_1$  и  $J_2$  (см. рис. 7,а, б)

$$\Delta R_3 = K_1 \Delta I \text{ или } \bar{R}_3 = K_1 \frac{I}{R_3} I = K_1 I; \quad (41)$$

$$\Delta R_4 = K_2 \Delta i \text{ или } \bar{R}_4 = K_2 \frac{i}{R_4} i = K_2 i, \quad (42)$$

где  $R_3 = \frac{\Delta R_3}{R_3}; R_4 = \frac{\Delta R_4}{R_4}; I = \frac{\Delta I}{I}; \bar{i} = \frac{\Delta i}{i}.$

Значения  $K_1$  и  $K_2$  определяются для линейного участка статической характеристики датчиков-днoдoв. Напряжения, снимаемые с плеч моста (см. рис. 7,а, б)

$$U_1 = U_0 \frac{R_3}{R_1 + R_3} \text{ и } U_2 = U_0 \frac{R_4}{R_2 + R_4}.$$

Выражая в малых отклонениях, получим:

$$\Delta U_1 = \frac{\partial U_1}{\partial R_3} \Delta R_3 = U_0 \frac{R_1}{(R_1 + R_3)^2} \Delta R_3;$$

$$\Delta U_2 = \frac{\partial U_2}{\partial R_4} \Delta R_4 = U_0 \frac{R_2}{(R_2 + R_4)^2} \Delta R_4$$

или  $\Delta U_1 = U_0 \frac{R_1}{(R_1 + R_3)^2} K_1 \Delta I = K_{M1} \Delta I;$  (43)

$$\Delta U_2 = U_0 \frac{R_2}{(R_2 + R_4)^2} K_2 \Delta i = K_{M2} \Delta i. \quad (44)$$

Коэффициенты  $K_{M1}$  и  $K_{M2}$  могут быть получены из вольт-амперных характеристик моста. Относительные значения напряжений определяются:

$$\bar{U}_1 = \frac{R_1 R_3}{(R_1 + R_3)^2} \bar{R}_3 = K_1 \bar{R}_3; \quad (45)$$

$$\bar{U}_2 = \frac{R_2 R_4}{(R_2 + R_4)^2} \bar{R}_4 = K_2 \bar{R}_4. \quad (46)$$

Напряжение, подаваемое на усилитель (см. рис. 7,в)

$$U_b = U_{II} + U_2 - U_1.$$

При  $U_{II} = \text{const}$ , зависящем от положения днoдoв относительно шины и катушки при настройке, относительное значение напряжения определяется  $\bar{U}_b = \bar{U}_2 - \bar{U}_1 = K_2 K_5 \bar{i} - K_1 K_4 \bar{I}.$

Подставляя значения (41), (42), (45), (46), напряжение, подаваемое на усилитель, можно представить в абсолютных значениях параметров

$$\Delta U_b = \Delta U_2 - \Delta U_1 = U_0 \left[ \frac{K_2 R_2}{(R_2 + R_4)^2} \Delta i - \frac{K_1 R_1}{(R_1 + R_3)^2} \Delta I \right] \quad (47)$$

Учитывая, что возмущение  $f(u, \gamma)$  влияет на изменение зазора по прямому каналу с инерционным запаздыванием из-за боль-

ших значений постоянной  $T$  и передается почти мгновенно на регулятор через датчик тока, условием инвариантности к этому возмущению можно принять при  $U_2 - U_1 = \text{const}$

$$\bar{U}_b = \bar{U}_2 - \bar{U}_1 = 0.$$

При этом

$$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = 1; \quad (48)$$

$$\frac{\bar{i}}{\bar{I}} = \frac{K_1 K_4}{K_2 K_5} \quad (49)$$

$$\frac{\Delta i_i}{\Delta I} = \frac{K_1 R_3 (R_2 + R_4)^2}{K_2 R_4 (R_1 + R_3)^2} \quad (50)$$

или

$$\frac{\Delta i}{\Delta I} = \frac{K_{M1}}{K_{M2}}. \quad (51)$$

Таким образом, при соответствующей настройке параметров рассматриваемая система может быть инвариантной к основным возмущающим воздействиям. При возмущениях, равных нулю, передаточные функции по управляемому воздействию выразятся в виде

$$W(p)_{\text{раз}} = \frac{K_3 K_d K_M}{T_M T p^2 + (T_M + T) p + 1}; \quad (52)$$

$$W(p)_{\text{зам}} = \frac{K_3 K_d K_M}{T_M T p^2 + (T_M + T) p + K_1 K_3 K_4 K_d K_M + 1}. \quad (53)$$

Экспериментальные исследования и опыт промышленной эксплуатации показали, что применение этой системы позволяет увеличивать точность обработки примерно в два раза по сравнению с системой регулирования зазора по току без компенсации возмущений.

Такого вида системы относятся к системам комбинированного управления.

### *Системы регулирования по перепаду давлений на входе и выходе электролита*

Они основаны на том, что при увеличении зазора давление на выходе электролита уменьшается (при постоянном давлении на входе). Такие системы применяются при прошивке отверстий.

1.9. АНАЛОГОВЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.  
 ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ ДВИГАТЕЛЯ СЕРИИ ПБСТ  
 СО ВСТРОЕННЫМ ТАХОГЕНЕРАТОРОМ

К аналоговым САУ относятся следующие приводы, электро-механические и гидравлические следящие системы. Они являются замкнутыми САУ, поэтому в большей мере, чем разомкнутые, обеспечивают линейность статических характеристик и меньшие значения ошибок слежения.

Как было указано, приводы станков с ЧПУ наиболее широко применяются в двигателях серии ПБСТ со встроенным тахогенератором и тиристорным усилителем. Структурная схема этих двигателей показана на рис. 8.

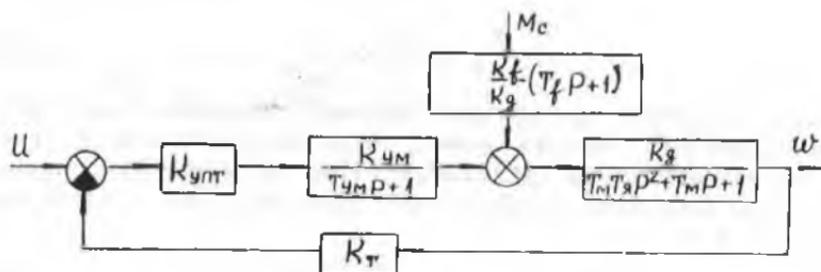


Рис. 8. Структурная схема двигателя серии ПБСТ;  $K_{ути}$  — коэффициент усиления тиристорного усилителя постоянного тока;  $K_{ум}$  — коэффициент усилителя мощности;  $K_т$  — чувствительность тахогенератора;  $T_{ум}$  — постоянная времени усилителя мощности

Анализ показывает, что при обычном значении произведения  $K_{ути} K_{ум}$  порядка  $10^4$  влиянием нагрузки в виде момента  $M_c$ , как в статическом, так и динамическом режимах можно пренебречь. При этом передаточная функция по управляющему воздействию определится

$$W(p)_{зм} = \frac{\omega(p)}{u(p)} = \frac{K_{ути} K_{ум} K_я}{(T_м T_я p^2 + T_м p + 1) (T_{ум} p + 1) + K_{ути} K_{ум} K_т} \quad (54)$$

1.10. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КОПИРОВАЛЬНЫХ  
 СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ.

ОДНОКООРДИНАТНОЕ И ДВУХКООРДИНАТНОЕ КОПИРОВАНИЕ

Различное технологическое назначение копируемых систем определяет разные предъявляемые к ним требования. Так, при токарной обработке линейно-фасонных поверхностей тел вращения при сравнительно небольшой разнице диаметров пре-

и преимущественно применяется однокоординатное копирование с постоянной задающей скоростью движения рабочего органа. При этом шероховатость обрабатываемых поверхностей может быть неодинаковой за счет переменной скорости результирующего движения.

При фрезерной обработке замкнутых контуров может также применяться однокоординатное копирование при вращении детали на круглом столе. Однако с целью обеспечения одинаковой шероховатости обрабатываемых поверхностей и более широких возможностей технологического применения при обработке поверхностей с большими изменениями их кривизны преимущество получают двухкоординатные, а иногда и многокоординатные копируемые устройства. Последние создаются путем сочетания устройств однокоординатного и двухкоординатного копирования.

При однокоординатном копировании (рис. 9,а) постоянной является скорость задающего движения как по модулю вектора, так и по его направлению. При этом постоянным является так-

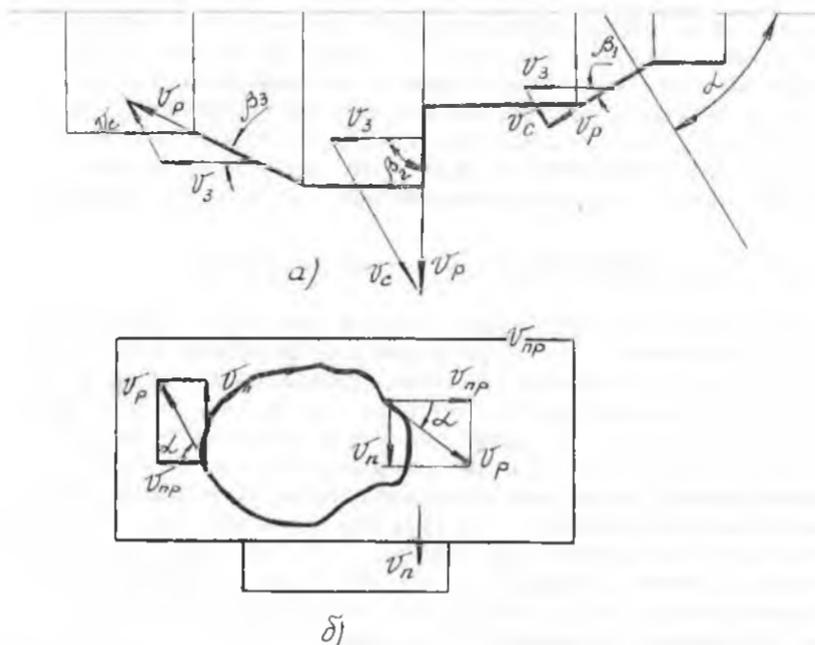


Рис. 9. Схемы однокоординатного (а) и двухкоординатного (б) копирования

же и направление следящего движения. Зависимость между скоростями выражается в следующем виде

$$\frac{v_0}{\sin \alpha} = \frac{v_p}{\sin \beta} = \frac{v_3}{\sin (\alpha \pm \beta)}, \quad (55)$$

где  $\alpha$  — угол установки суппорта;  $v_0$  — скорость следящего движения;  $v_p$  — скорость результирующего движения;  $v_3$  — скорость задающего движения.

Знак «—» относится к нисходящим участкам относительно задающего движения.

Для двухкоординатного копирования постоянной является скорость результирующего движения по величине модуля вектора скорости (см. рис. 9,б). Для обеспечения этого условия принимаются значения составляющих скоростей (продольного и поперечного) в виде

$$\begin{aligned} v_{np} &= v_p \cos \alpha; \\ v_n &= v_p \sin \alpha. \end{aligned} \quad (56)$$

Такая связь между составляющими скоростями обеспечивается синусными распределителями. В качестве таковых для гидрокопировальных устройств являются эксцентрики, воздействующие на золотниковые распределительные устройства, которые расположены в двух взаимно перпендикулярных направлениях, плоские потенциометры со щетками, расположенными под углом  $90^\circ$  при электромеханическом приводе, и другие устройства.

### 1.11. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ

Как было указано, гидравлические следящие системы (ГСС) нашли применение в копировальных устройствах и в этом случае иногда называются гидрокопировальными. Станкостроительная промышленность серийно выпускает гидросуппорты ГС-1, КСТ-1 и т. д. и целый ряд копировально-фрезерных станков однокоординатного и двухкоординатного копирования. ГСС применяются также как исполнительные устройства сложных систем автоматического управления летательных аппаратов, транспортных машин и различного технологического оборудования. Преимуществом их, также как и рассматриваемых ранее гидравлических исполнительных механизмов, является малый вес, габариты и возможность развивать большие усилия на исполнительном органе. Отличаются ГСС конструкцией гидравлических исполнительных механизмов.

Наибольшее применение в копировальных устройствах получили ГСС с четырехкромочным золотником, имеющим нулевые или отрицательные перекрытия золотника и недифференциаль-

ный цилиндр. В токарных гидросуппортах широко применяются ГСС с однокромочным золотником и дифференциальным цилиндром. Схема гидравлической следящей системы с четырех-

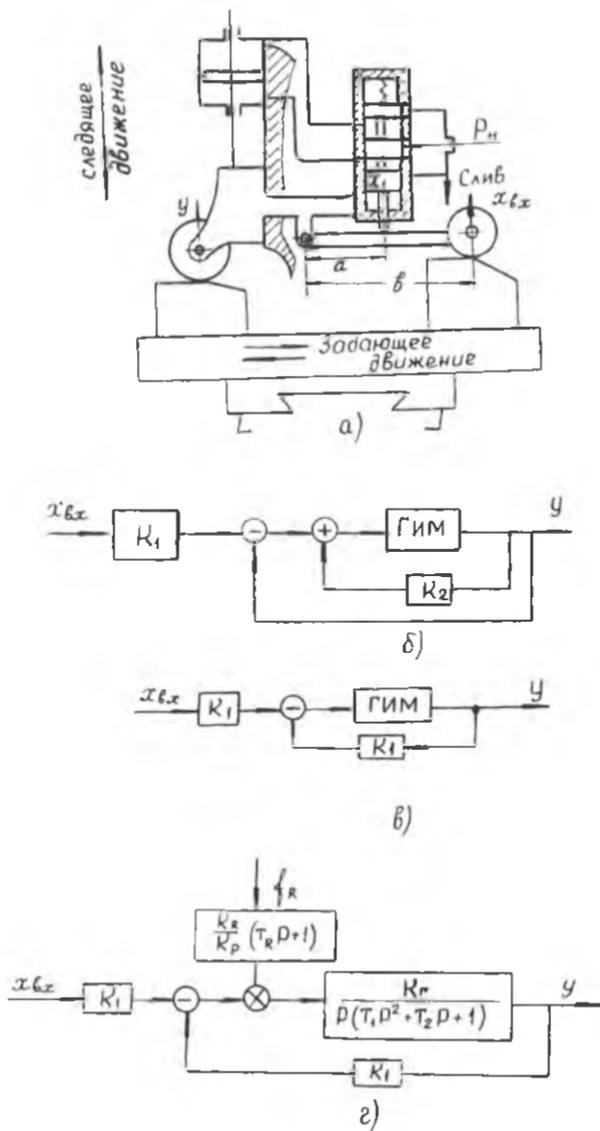


Рис. 10. Гидравлическая следящая система: а) конструктивная схема; б), в) функциональные схемы; г) структурная схема

кромочным золотником, отрицательными перекрытиями и недифференциальным цилиндром показана на рис. 10,а на примере гидрокопировального станка.

Фрезерная головка движется вместе со штоком от гидроцилиндра. Входной величиной  $x_{вх}$  является движение копирующего ролика, выходной  $x_{вых} = y$  — вертикальное перемещение фрезерной головки. Для исключения кинематических погрешностей диаметры фрезы и ролика должны быть одинаковыми.

Построим функциональную схему управления. Рассматривая движение системы вверх, условно разделим его на два движения: при неподвижной фрезерной головке и при неподвижном копирувальном ролике. При первом условии управляющее воздействие от копирующего ролика через рычаг, поворачиваемый по часовой стрелке, с коэффициентом усиления  $K_1$  ( $K_1 = a/b$  на рис. 10,а) передается золотнику, открывающему нижнюю щель между ним и золотниковой втулкой, что вызывает движение поршня вверх. Открытие этой щели будем считать за положительный сигнал в прямой цепи управления гидравлического исполнительного механизма. Движение системы при втором условии (неподвижном копирувальном ролике) можно разделить на две составляющие: перемещение опоры вместе с фрезерной головкой и корпусом золотника и поворот рычага в положение опоры.

При перемещении опоры рычага вверх вместе с фрезерной головкой и корпусом золотника нижняя щель между золотником и втулкой уменьшается, что равносильно наличию отрицательной обратной связи на входе гидравлического исполнительного механизма.

При повороте рычага относительно неподвижного копирующего ролика в положение его опоры нижняя щель также увеличивается, что равносильно положительной обратной связи с передаточным отношением  $K_2 = 1 - K_1$ . Таким образом можно построить функциональную схему ГСС (см. рис. 10,б).

Складывая значения передаточных функций параллельных образных связей, получим  $K_2 - 1 = -K_1$ . Заменяем эту сумму одним звеном и получим функциональную схему (см. рис. 10,в).

### *Структурные схемы и передаточные функции ГСС*

Подставляя значения передаточной функции гидравлического исполнительного механизма (ГИМ), получим структурную схему управления ГСС (см. рис. 10,г). Переносим усиленное

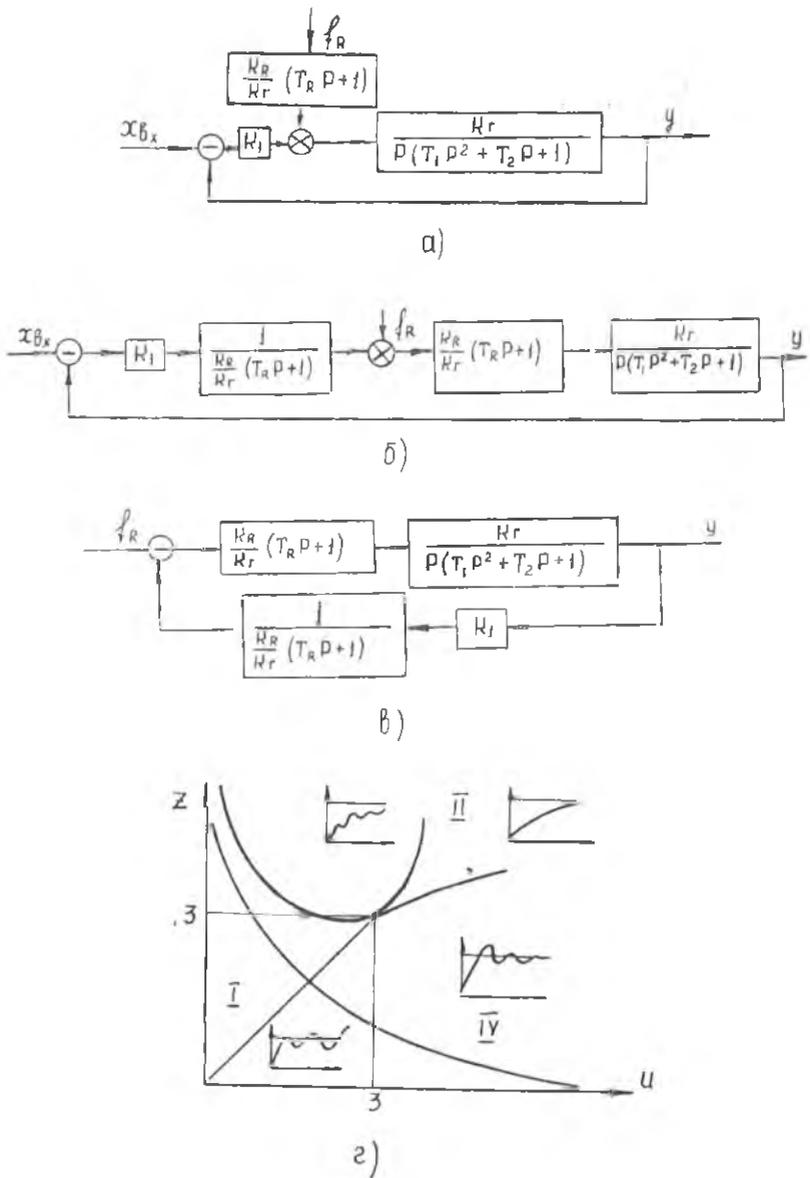


Рис. 11. Структурные схемы ГСС и диаграмма Вышнеградского: а), б) эквивалентные структурные схемы; в) структурная схема с возмущением на входе; г) диаграмма Вышнеградского

звено  $K_1$  через сумматор, получим структурную схему ГСС в окончательном виде (рис. 11,а).

При  $R = \text{const}$ ;  $\dot{f}_R = \Delta R / R_0 = 0$  передаточные функции по управляющему воздействию определяются

$$W(p)_{\text{раз}} = \frac{K_1 K_r}{p(T_1 p^2 + T_2 p + 1)}; \quad (57)$$

$$W_{\text{зам}} = \frac{W}{1 + W_{\text{раз}}} = \frac{K_1 K_r}{T_1 p^3 + T_2 p^2 + p + K_1 K_r}. \quad (58)$$

Уравнение движения ГСС в дифференциальной форме имеет вид

$$T \frac{d^3 y}{dt^3} + T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} + K_1 K_r y = K_1 K_r x_{\text{вх}}.$$

При установившемся режиме, когда производные высших порядков равны нулю, получим

$$\frac{dy}{dt} = K_1 K_r (x_{\text{вх}} - y) = K_1 K_r \delta, \quad (59)$$

где  $\delta$  — скоростная погрешность копирования.

При расчете систем предельное значение скоростной погрешности регламентируется. С учетом этого коэффициенты усиления определяются по формуле

$$K_1 K_r = \frac{v_{\text{ся max}}}{\delta_{\text{max}}}, \quad (60)$$

где  $v_{\text{ся max}}$  — наибольшая скорость слежения.

Для определения передаточной функции по возмущениям, связанным с нагрузкой, введем возмущение в цепь уравнения и получим структурную схему (см. рис. 11,б). В соответствии с приведенной схемой передаточная функция по возмущениям определится

$$W_{\text{зам}}^{JR} = \frac{K_R (T_L P + 1)}{T_1 P^3 + T_2 P^2 + P + K_1 K_r}. \quad (61)$$

Из этого выражения (при установившемся режиме и скорости слежения, равной нулю) значение позиционной ошибки

$$\delta_n = \frac{K_R f_R}{K_1 K_r}. \quad (62)$$

Подставляя значения для рассматриваемой ГСС, получим

$$\delta_n = \frac{\Delta R}{K_1 P_n f}. \quad (63)$$

При расчете систем значение позиционных ошибок также регламентируется. Их уменьшение связано с увеличением коэф-

коэффициентов усиления ГСС и требует проведения исследования системы на устойчивость и, в необходимых случаях, — качественных показателей переходного процесса.

### 1.12. УСТОЙЧИВОСТЬ ГСС

Как известно, устойчивость системы является предпосылкой работоспособности системы. С точки зрения теории колебаний устойчивая система обеспечивает затухающие собственные колебания. Свободное движение ГСС или ее собственные колебания выражаются левой частью дифференциального уравнения движения или его характеристическим уравнением, которое имеет вид

$$T_1 p^3 + T_2 p^2 + p + K_1 K_r = 0. \quad (64)$$

В общем виде оно записывается

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0. \quad (65)$$

Разделив последнее на  $a_3$ , получим

$$\frac{a_0}{a_3} p^3 + \frac{a_1}{a_3} p^2 + \frac{a_2}{a_3} p + 1 = 0$$

или  $A_0 p^3 + A_1 p^2 + A_2 p + 1 = 0$ .

Примем  $A \alpha^3 = 1$ ;  $A_1 = \alpha^2 U$ ;  $A_2 = \alpha z$ ,

получим

$$\alpha^3 = \frac{1}{A_0} = \frac{a_2}{a_0};$$

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{a_2}{a_0}}.$$

Тогда уравнение (65) приводится к виду

$$p^3 + U p^2 + z p + 1 = 0, \quad (66)$$

где  $U = \frac{a_1}{a_0^{2/3} a_1^{1/3}}$ ;  $z = \frac{a_2}{a_0^{1/3} a_3^{2/3}}$ .

Последний вид уравнения выражен в форме Вышнеградского, при которой коэффициенты при высшей производной и свободном члене равны единице.

Условие устойчивости по Гурвицу выразится в виде

$$U > 0; z > 0 \Delta_2 = \begin{vmatrix} U & 1 \\ 1 & z \end{vmatrix} = Uz - 1 > 0 \text{ или } Uz = 1.$$

Подставляя значение параметра  $U$  и  $z$ , получим

$$z U = \frac{a_0 a_3}{a_1 a_2} = \frac{T_2}{T_1 K_1 K_r} > 1 \quad (67)$$

или  $K_1 K_r < \frac{T_2}{T_1}$ .

Определяя значение корней характеристического уравнения, строим диаграмму Вышнеградского, которую можно разделить на четыре области, где показаны характеристики переходного процесса (см. рис. 11,г): I — область (где  $Uz < 1$ ) неустойчивых систем; II — область апериодического процесса; III — область быстротатахующих колебаний; IV — область затухающих колебаний.

Диаграмма Вышнеградского, применимая для системы 3-го порядка, позволяет по значениям параметров  $U$  и  $z$  производить анализ качества переходного процесса.

Анализ условий устойчивости показывает, что для ее повышения необходимо снижение коэффициентов усиления системы, что ведет к увеличению скоростных и позиционных ошибок. Из этого следует, что в качестве инженерных способов повышения устойчивости можно применить: уменьшение коэффициентов усиления рычага и ГИМ (за счет снижения  $p_n$ ); демпфирование золотника; увеличение площади гидроцилиндра; уменьшение диаметра или длины рабочих кромок золотника. Применяются обычно первые два способа.

В качестве дальнейших путей повышения качественных характеристик ГСС можно рекомендовать системы с компенсацией по нагрузке, для которых позиционные ошибки равны нулю, и системы с астатизмом второго порядка, обеспечивающие нулевые значения скоростных и позиционных ошибок. Эти системы требуют обеспечения дополнительных условий и более сложны по конструкции.

### 1.13. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СИСТЕМЫ СПИД

Упругие перемещения системы СПИД имеют в большинстве случаев доминирующие значения в суммарных погрешностях метода обработки. В последнее время проведены работы по созданию систем с компенсацией упругих перемещений системы

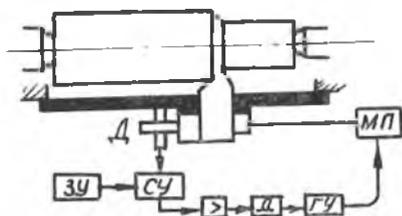


Рис. 12. Схема простейшей системы с компенсацией упругих перемещений системы СПИД

СПИД. Одним из направлений, разработанным под руководством профессора Балахина, являются системы, которые обеспечивают изменение подачи инструмента во время обработки (рис. 12). При этом измерительный наконечник индуктивного датчика, закрепленного на суппорте, скользит по поверхности

неподвижной лекальной линейки, установленной параллельно направляющим станины. В случае отклонения измерительного наконечника (за счет смещения суппорта под действием сил резания) возникает электрический сигнал, который усиливается и передается на механизм вращения ходового валика. При увеличении радиальной составляющей резания замедляется продольная подача суппорта, что ведет к снижению этой составляющей и сохранению положения суппорта от оси вращения на уровне, определяемом при настройке станка. Такая система применяется при обточке цилиндрических валиков за один проход. В настоящее время разработано большое количество систем автоматического управления с компенсацией по нагрузке.

## *2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА. ЧИСЛОВОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ*

### *2.1. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ОСНОВА АВТОМАТИЗАЦИИ ОПЕРАЦИИ*

Как было отмечено, технологические процессы в автотелестроении многообразны как по видам применяемого оборудования и методам их выполнения, так и по уровню автоматизации и производительности.

Наряду с процессами изготовления заготовок (отливок, штампованных и листовых заготовок) широко применяются процессы: механической обработки заготовок на металлорежущих станках, сварки, термической обработки, электрофизической и электрохимической обработки, контроля транспортировки, сборки и испытания изделий. Несмотря на разнообразие процессов, основной их частью, организационно-структурным элементом является операция. Как было отмечено ранее, по характеру выполнения технологические процессы разделяются на непрерывные, циклические и непрерывно-циклические.

Автоматизация операций непрерывных процессов, таких как поперечно-винтовая прокатка периодических профилей, термическая обработка в конвейерных печах, бесцентровое шлифование «на проход» — осуществляется системами автоматического управления, обеспечивающими, как правило, постоянные или закономерно-изменяющиеся значения выходных параметров промышленных объектов, таких как размеры деталей после их

обработки, температурный режим и т. п. Автоматизация циклических процессов выполняется в большинстве металлорежущих автоматов и полуавтоматов, непрерывно-циклических — в роторных автоматах, станках электрохимической размерной обработки.

Автоматы являются материально-технической основой автоматизации операций технологических процессов и представляют собой рабочую машину с системой механизмов и устройств целевого назначения, обеспечивающих как ее функционирование, так и управление без участия человека. Последовательность работы отдельных механизмов и устройств автомата во времени обычно определяется циклограммой его работы, являющейся простейшей формой алгоритма функционирования и управления. Для автоматизации операций механической обработки применяется большое разнообразие типов и моделей автоматов и полуавтоматов.

1. Станки-автоматы и полуавтоматы с механическим и гидравлическим приводом. Программа движений их рабочих органов осуществляется с помощью кулачков, располагаемых на распределительных валах или барабанах. Управление ими централизованное аналогового вида. Аналогами движения рабочих органов являются профили копиров.

2. Станки-автоматы и полуавтоматы с гидравлическими и электрическими следящими системами, рассмотренными ранее. Формообразующие движения их рабочих органов определяются формой копира. Эти системы относятся также к аналоговым.

3. Станки-автоматы и полуавтоматы специального технологического назначения. К ним относятся зубообрабатывающие, резьбообрабатывающие, хонинговальные, лентополлировальные (для лопаток), станки для суперфиниша и другие.

4. Агрегатные станки-полуавтоматы централизованного и путевого назначения.

5. Станки-автоматы и полуавтоматы общего назначения с путевым управлением.

6. Станки и системы числового программного управления. Они делятся на два основных вида: а) станки-автоматы и полуавтоматы программного управления с цифровой индикацией с барабанными и панельными коммутаторами; б) станки-полуавтоматы с числовым программным управлением.

Большинство перечисленных автоматизированных станков рассматриваются в курсе «Металлорежущие станки». Ниже излагается принцип работы автоматизированных станков путевого управления и более подробно — отдельные системы программного управления.

## 2.2. ПУТЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Этот вид управления строится на базе путевых переключателей, гидравлических и пневматических золотниковых устройств и кранов короткого хода. При этом после окончания движения одного рабочего органа создается воздействие на путевой переключатель (в электромеханических системах) или золотник (в гидравлических и пневматических системах), что ведет к началу следующего движения рабочего органа.

В качестве примера (рис. 13) показана схема путевого управления токарного станка 161 БК при обточке оси в виде пустотелого цилиндра. Исходное положение соответствует моменту обточки цилиндрической поверхности детали, закрепленной в центрах. При этом крутящий момент резания воспринимается передним центром благодаря рифлениям, нанесенным на его конической поверхности. Подача осуществляется от ходового валика и коробки скоростей через фрикционную муфту суппорта, включающую пружиной и выключаемую пневмокамерой  $A_4$ .

После воздействия суппортом на профилированный ползуна крана короткого хода Кр I его правый клапан закрывается, а левый открывается. Правая полость пневмокамеры пинноли задней бабки соединяется с атмосферой, и пружиной пневмокамеры совершается отвод центра задней бабки. При отводе связанная с ним планка переключает кран короткого хода Кр II, правый клапан которого поднимается и открывает доступ воздуха в верхнюю полость пневмоцилиндра  $m$  III и левую полость цилиндра  $A_1$ . Происходит раскрепление детали, перемещение золотника Кр III, выключение продольного перемещения суппорта за счет подачи воздуха в нижнюю полость пневмокамеры  $A_4$  и отвод суппорта по мере поступления воздуха в левую полость пневмоцилиндра  $A_1$ . Плавность движения суппорта достигается за счет гидротормоза  $A_5$ . При своем движении поршень пневмоцилиндра  $A_1$  открывает доступ воздуха в пневмокамеру  $A_3$ , осуществляется перемещение лотка с заготовками на линию центров. В конечном положении происходит перемещение золотника Кр IV и последующее переключение профилированного ползуна Кр I в начальное положение. Затем осуществляется подача воздуха в пневмокамеру пинноли задней бабки и последующее закрепление детали, отвод лотка и включение фрикционной муфты механизма продольной подачи, и цикл продолжается.

Таким образом осуществляется путевое управление следующим циклом движений рабочих органов станка: 1) обточка деталей с установкой в центрах; 2) отвод заднего центра с раскреплением детали; 3) отвод суппорта назад; 4) подача лотка на линию центров; 5) закрепление детали центром задней баб-

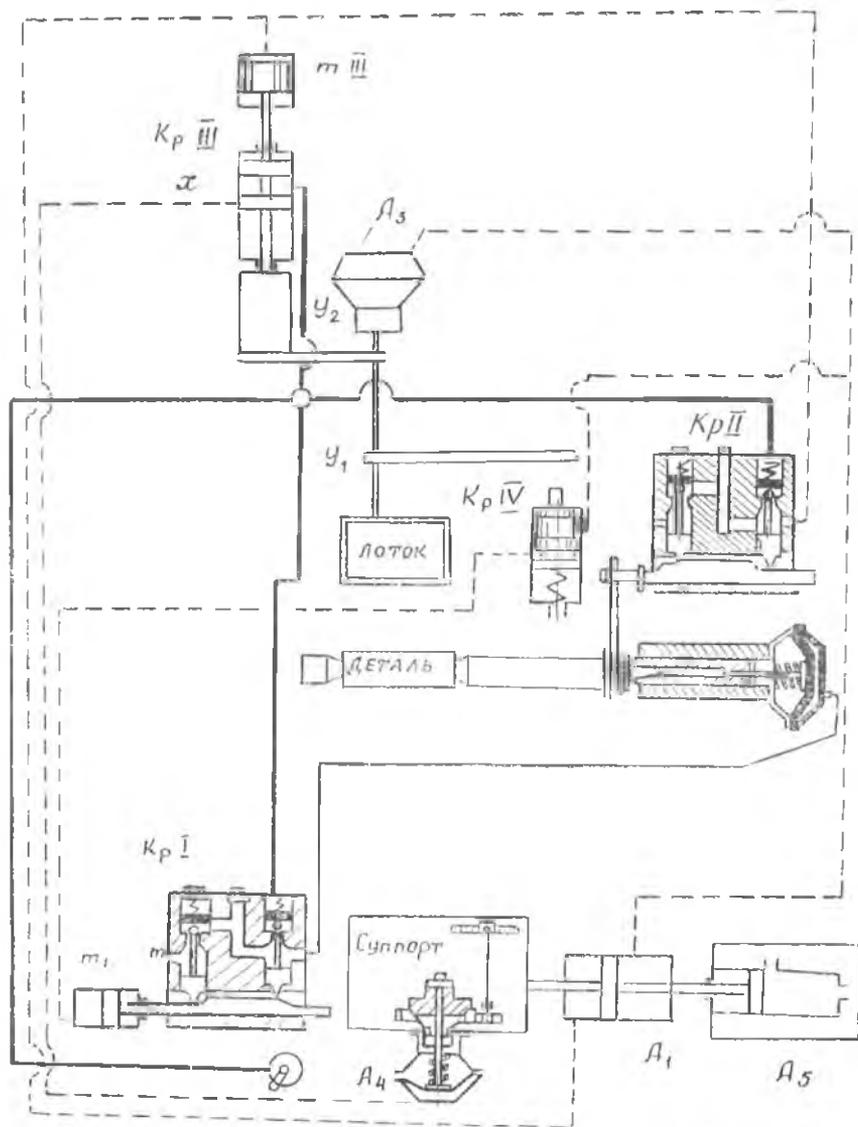


Рис. 13. Схема путевого управления токарного станка

ки; 6) отход лотка от линии центров; 7) начало нового цикла.

Путевое управление отличается высокой надежностью и широко используется для автоматизации простых циклов работы оборудования.

### 2.3. ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С ЦИФРОВОЙ ИНДИКАЦИЕЙ

В качестве примера станка программного управления с числовой индикацией рассмотрим управляющее устройство со штекерным коммутатором и шаговым искателем (рис. 14).

В этом устройстве на штекерном коммутаторе в виде барабана или панели осуществляется набор, соответствующий последовательному включению приводов рабочих органов и заданному режиму обработки. В качестве исполнительных органов используются электродвигатели или электромагнитные муфты, включаемые с помощью реле  $P_1 \dots P_4$ . В конце движения рабочего органа ставятся упоры, воздействующие на путевые переключатели ПВ. Сигнал от путевого переключателя передается на привод шагового искателя, представляющего собой многопозиционный и многоурядный переключатель.

После включения набора в цепь управления (см. рис. 14) рабочий орган движется до путевого переключателя ПВ<sub>1</sub>, который разрывает цепь питания реле электродвигателя привода рабочего органа или электромагнитной муфты. После переключения ПВ<sub>1</sub> включается электромагнит 8, который с помощью храпового механизма поворачивает рычаг 3 шагового искателя и происходит включение следующего набора (с переключателем ПВ<sub>2</sub>). Последовательность включений определяется циклограммой движения рабочих органов.

Программное управление с числовой индикацией применяется также для автоматизации сравнительно простых циклов работы оборудования, таких как револьверные, фрезерные станки и промышленные роботы первого поколения (работающие по жесткой программе).

### 2.4. СИСТЕМЫ И СТАНКИ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Системы и станки с ЧПУ применяются для выполнения сложных программ движения рабочих органов. Характеризуются они малыми затратами времени на подготовку производства, большой производительностью, соответствующей производительности 4—8 универсальных станков. Они вполне отвечают условиям мелкосерийного, серийного, а во многих случаях и массового производства, и их применение рассматривается как одно из основных направлений автоматизации в авиастроении.

Обычные системы программного управления определяются как совокупность управляющего устройства и объекта управления при  $x_{вх} = F(t)$ , где  $F(t)$  — постоянная нормированная функция времени. Управляющее устройство СЧПУ представля-

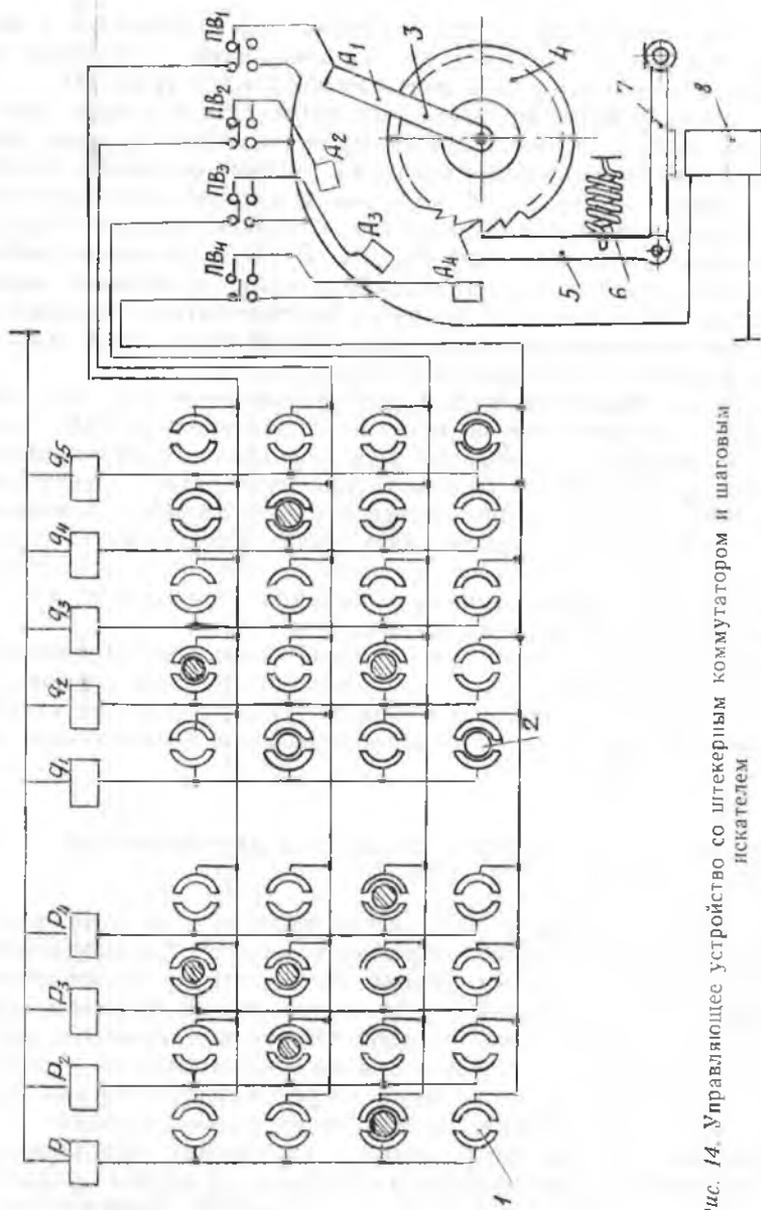


Рис. 14. Управляющее устройство со штекерным коммутатором и шаговым искателем

ет собой совокупность большого количества целевых элементов (достигая 30 и более) и является чаще всего более дорогим и сложным, чем сам станок, поэтому его называют системой числового программного управления (СЧПУ), а управляемый объект — станком с ЧПУ.

В качестве основных целевых звеньев СЧПУ применяются:

1) считывающие устройства ввода информации, обеспечивающие последовательное или параллельное считывание программы с программноносителя;

2) управляющее устройство, включающее: блоки контроля вводимой информации; блоки оперативной памяти; дешифрующие устройства, цифро-аналоговые преобразователи, интерполирующие устройства, устройства расчета эквидистант, цифровые делители напряжения, модуляторы, демодуляторы, фазорасщепители и другие устройства, служащие для преобразования информации в системах ЧПУ; генераторы импульсов, предназначенные для формирования импульсов напряжения или тока; реверсивные счетчики и сумматоры, служащие для операций сложения и вычитания сигналов; блоки сравнения — для количественной оценки сигналов и формирования результирующих управляющих сигналов; усилители — для усиления управляющих сигналов; коммутационные устройства и блоки управления, осуществляющие распределение управляющих сигналов по структурным звеньям системы; панели управления, служащие для пуска, остановки, контроля, ручного управления и коррекции программ;

3) исполнительные двигатели приводов рабочих органов, обеспечивающие заданные перемещения рабочих органов при эксплуатационных нагрузках;

4) датчики обратной связи для контроля параметров движения рабочих органов или размеров деталей в процессе обработки.

СЧПУ является многоканальной системой управления. В состав СЧПУ входят и устройства контроля программ. К ним относятся устройства для вычерчивания траекторий движения рабочих органов — координатографы. В характеристику СЧПУ включается и вид привода рабочих органов станка, являющийся звеном единой системы управления.

Станки с ЧПУ могут быть оснащены манипуляторами, автооператорами и промышленными роботами, обеспечивающими как подачу деталей в рабочую зону, так и их удаление. Не исключается для станков с ЧПУ и применение загрузочных устройств. В этих случаях станки с ЧПУ будут являться станками-автоматами. Упрощенную функциональную схему СЧПУ и станков с ЧПУ можно представить в виде (рис. 15). В современных

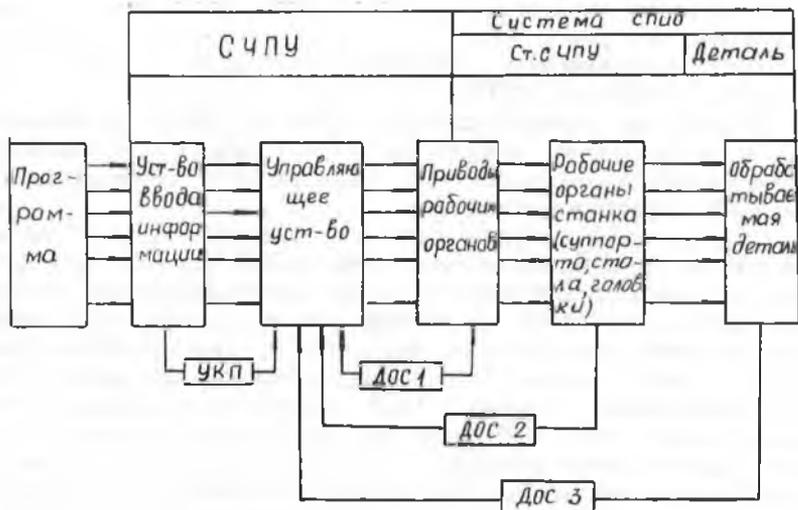


Рис. 15. Упрощенная схема СЧПУ и системы СПИД

системах и станках с ЧПУ широко применяется один из видов обратных связей. В качестве обратных связей могут применяться: ОС 1 — обратная связь по углу поворота вала привода рабочего органа; ОС 2 — обратная связь по положению рабочего органа (стола или суппорта, или инструментальной головки); ОС 3 — обратная связь по отклонению размеров обрабатываемых деталей (самоподстраивающиеся станки с ЧПУ).

Очень часто применяются УКП — устройства контроля программы, как правило, методом избыточной информации (на четность по строкам или кратность «10» или «9» суммарной цифровой информации кадра). Некоторые современные СЧПУ могут включать дополнительные подсистемы оптимизации режимов обработки (например, с обеспечением постоянства температуры в зоне резания).

Развитие СПЧУ является примером применения вычислительной техники в сфере материального производства, при совершенствовании которой происходит и изменение элементно-конструктивной базы. По элементно-конструктивной базе СЧПУ, как и ЭВМ, разделяются на четыре поколения:

- 1) ламповые СЧПУ, которые сняты с производства и не применяются;
- 2) полупроводниковые СЧПУ, схемы которых монтируются на отдельных полупроводниковых элементах;
- 3) СЧПУ на интегральных схемах с низким (10—20 компо-

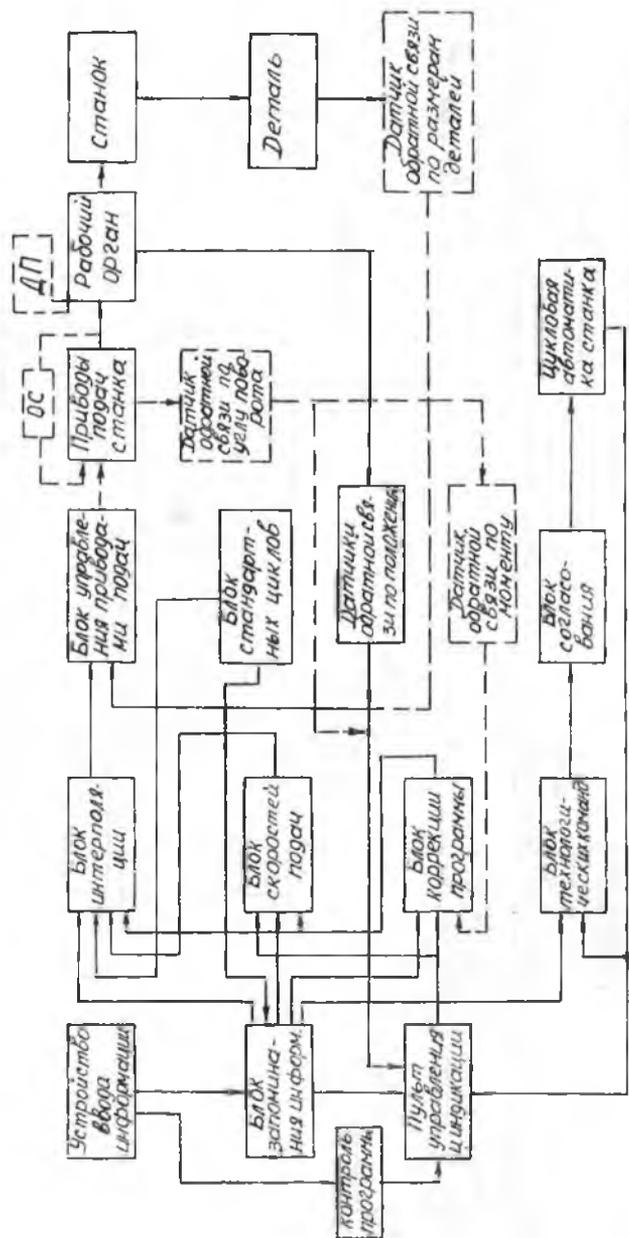


Рис. 16. Система таповой СЧПУ и станка с ЧПУ

Тип ПБСТ ( $N = 0.6 \cdot T.8 \text{ кВ}$ )

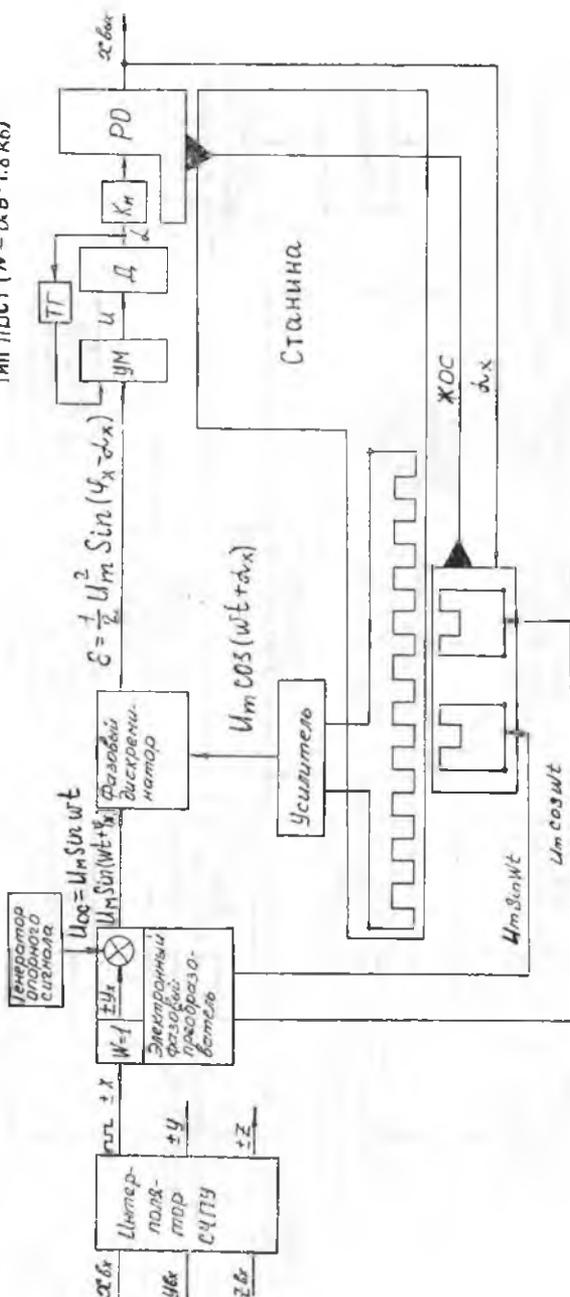


Рис. 17. Преобразование числовой информации фазовым преобразователем и индукционным

нентов) и средним (50—100 компонентов) уровнем интеграции;

4) СЧПУ на блочных интегральных схемах с высоким уровнем интеграции.

В настоящее время наметился переход к агрегатно-блочным методам построения СЧПУ на интегральных схемах, обеспечивающих высокую надежность. Кроме этого, в последнее время имеются примеры применения мини-ЭВМ в качестве составной части СЧПУ, заменяющей ряд функциональных блоков, таких как интерполятор, блоки памяти и т. д.

Практика промышленного применения СЧПУ показала, что оптимальными конструкциями датчиков обратной связи ДООС 1 являются синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы с двухфазной статорной обмоткой; резольверы, позволяющие получить сумму или разность углов сдвига фаз относительно опорного синусного сигнала; и более точные датчики, применяемые в делительных столах станков, работающие на таком же принципе — круговые индуктосины, обеспечивающие точность отсчета для обычных систем  $\pm 10''$  и точных  $\pm 2''$ .

В качестве датчиков обратной связи ДООС 2 оптимальными являются линейные индуктосины, обеспечивающие точность при печатной обмотке  $\pm 0,01$  мм, а при изготовлении обмотки по специальной технологии — нормальную точность  $\pm 2,5$  мкм и точность высокого класса в пределах  $\pm 1,5$  мкм. Датчики обратной связи ДООС 3 пока не получили широкого применения. В некоторых разомкнутых СЧПУ применяются датчики исходного положения рабочих органов ДП (рис. 16).

Более подробная функциональная схема типовой СЧПУ показана на рис. 16, а на рис. 17 — наиболее распространенная схема фазового преобразования числовой информации в аналоговую, где упрощенно показано включение линейных индуктосинов и характер преобразования информации в сигнал ошибки, передаваемый на следящий привод. Как видно, в линейных индуктосинах опорные синусно-косинусные сигналы высокой частоты (10 кГц) подаются на подвижные обмотки индуктосина. При их перемещении совместно с рабочим органом в обмотке неподвижной линейки индуктосина создается выходной сигнал, фаза которого пропорциональна величине перемещения рабочего органа (на котором крепится неподвижная линейка с двухфазной обмоткой).

В сравниваемом устройстве — фазовом дискриминаторе происходит перемножение прямого сигнала, идущего от фазового преобразователя, и сигнала обратной связи, снимаемого с неподвижной обмотки индуктосина, в результате чего после отфильтрации сигналов высоких гармоник получается сигнал ошибки

$$\varepsilon = 1/2 U_m^2 \sin \varphi, \quad (68)$$

где  $\psi = \varphi - \alpha$ ;  $\varphi$  — угол сдвига фазы сигнала управления;  $\alpha$  — угол сдвига фазы сигнала обратной связи.

Как было указано, в современных станках в качестве следящих приводов применяются двигатели серии ПБСТ со встроенным тахогенератором или высокомоментные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов с тиристорными усилителями мощности.

Эффективное использование систем и станков с ЧПУ является одной из комплексных задач, решаемых с применением системного подхода. К числу основных проблем практического применения СЧПУ относятся:

- 1) правильный выбор системы и станков с ЧПУ, отвечающих конкретным производственным задачам авиадвигателестроения;
- 2) разработка производительных способов и выбор оптимальных технических средств для расчета и записи программ;
- 3) организация эффективной эксплуатации систем и станков с ЧПУ.

Для решения этих проблем требуется знание систем, методов записи программ и других вопросов практического применения СЧПУ.

## 2.5. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ЧПУ

Различное технологическое назначение систем и станков программного управления, наличие нескольких способов задания программы, большое количество целевых звеньев и применение различных видов привода, конструктивные особенности узлов и механизмов, — все это является предпосылкой создания различных классификаций. Здесь приводится классификация систем и станков с ЧПУ, основанная на комплексе классификационных признаков и положенная в основу каталога систем и станков с ЧПУ. При этом все системы ЧПУ классифицируются по четырем признакам: 1) по целевому назначению систем и характеру движения рабочих органов; 2) по числу управляемых координат; 3) по числу одновременно управляемых координат; 4) по типу привода исполнительных органов.

По первому признаку все системы делятся на три типа:

а) *позиционные*, П — координатного или ступенчатого управления, обеспечивающие заданное (конечное) положение рабочих органов относительно системы координат, без функциональной связи перемещений рабочих органов по отдельным координатам (эти системы используются для управления свер-

лельными станками, отдельными моделями расточных и токарных станков);

б) *непрерывные*, Н — контурного управления, с функциональной зависимостью параметров движений рабочих органов, как правило, с обеспечением постоянства скорости результирующего движения (эти системы применяются для управления токарными, фрезерными и другими станками, на которых производится обработка с обеспечением точной формы и размеров поверхностей);

в) *универсальные*, У, обеспечивающие как позиционное, так и непрерывное управление (они нашли преимущественное применение в многоцелевых многопозиционных станках).

По числу одновременно управляемых функционально связанных координат СЧПУ бывают двух- и трехкоординатного управления, позволяющие вести обработку линейно-фасонных и объемно-фасонных поверхностей.

По виду привода системы делятся на две категории: с шаговым приводом для импульсных систем и со следящим или бесступенчатым приводом.

В последнее время широко применяется бесступенчатый тиристорный привод. В соответствии с этой классификацией разработана маркировка систем ЧПУ (например, П323, Н531 и др.). Конструктивные модификации систем обозначаются буквами (например, П323А, П321М, Н221М и т. д.). Первая цифра маркировки показывает число управляемых координат, вторая — число одновременно управляемых координат и третья — вид привода. Наряду с этим на заводах используются системы ЧПУ, имеющие другую маркировку. (В основном это системы более ранних выпусков). Например, «Координата С68», «Контур 5П», «Логика 2М» и др.

Сравнивая СЧПУ, следует отметить, что позиционные системы являются наиболее простыми. В последние годы они значительно усложняются за счет расширения эксплуатационных характеристик присоединяемых к ним станков. В последних вместо одного инструмента стали использоваться инструментальные блоки и магазины с установкой в них большого количества инструментов, а также поворотные столы, позволяющие увеличить число позиций обрабатываемой детали. Это, в свою очередь, требует устройств для изменения частоты вращения шпинделя, величины и диапазона подач.

Интеграция работ на станках, обеспечиваемая позиционной СЧПУ, обуславливает необходимость добавить к ней интерpolator, что приводит к превращению СЧПУ в универсальные системы.

*Непрерывные* или *контурные* СЧПУ с вводом информации от перфоленты по сравнению с обычными позиционными систе-

мами относительно более сложны за счет наличия интерполяторов, которые являются вычислительными устройствами и служат для преобразования кодированной информации в непрерывную. В настоящее время они также усложняются за счет улучшения эксплуатационных характеристик станков и упрощения процесса разработки программ.

В СЧПУ вводятся дополнительные устройства: блоки коррекции положения инструментов, позволяющие компенсировать их износ и ошибки при настройке; блоки расчета эквидистант, создающие возможность производить расчет траекторий движения инструментов при разработке программы по размерам чертежа для таких операций, как фрезерование контуров, токарная обработка резцом с радиусом при его вершине и т. п.

*Универсальные СЧПУ* позволяют осуществлять интеграцию процессов обработки на одном станке за счет применения многоинструментальных блоков, магазинов и поворотных столов, изменяющих положение детали, и обеспечивают как позиционную, так и контурную обработку на многоцелевых (многопозиционных) станках. Они находят все более широкое применение при обработке сложных деталей в авиадвигателестроении. Применение многоцелевых станков существенно сокращает цикл обработки этих деталей, обеспечивает высокую производительность процессов обработки и дает большой экономический эффект, несмотря на сравнительно высокую стоимость применяемого оборудования.

## *2.6. СЧПУ С ВВОДОМ ПРОГРАММЫ НА МАГНИТНОЙ ЛЕНТЕ*

В соответствии с рассмотренной классификацией, все системы с вводом информации на магнитной ленте можно отнести к непрерывным СЧПУ, так как информация при воспроизведении программ вводится с помощью аналоговых устройств непрерывно, в декадированном виде. Эти системы широко применяются в авиадвигателестроении, но постепенно заменяются более совершенными СЧПУ.

Дело в том, что в первый период развития СЧПУ производилось многократное преобразование информации: в большинстве случаев сначала производилась запись кодированной программы на перфоленду с применением ручного программирования; затем с помощью интерполяторов и пультов записи программа переписывалась на магнитную ленту. В то время считалось, что подготовку программы, как наиболее трудно реализуемый процесс, можно производить на одном станке с ЧПУ (интерполяторе и пульте записи) и, размножив ее, использовать на 10—15 станках с ЧПУ с применением простейшей и дешевой аналоговой системы управления станков с вводом про-

граммы на магнитной ленте. При этом для обработки мелких и средних деталей со временем обработки 20—30 мин. использовались шаговые системы управления, при которых величина перемещений соответствует числу импульсов, записанных на магнитную ленту, а скорость — их частоте. При обработке крупных деталей применялись фазовые системы, для которых величина перемещений задается суммарным сдвигом фазы относительно опорного сигнала, а скорость — величиной отклонения задаваемой частоты от частоты опорного сигнала (девятикратной частоты).

Распространению аналоговых систем управления с записью на магнитной ленте способствовала возможность записи программы путем моделирования процессов обработки при ручном управлении с использованием копируемых устройств, а также (позднее) — с применением созданной системы машинного программирования СПС-Ф на базе ЭВМ «Минск 22». Однако, как известно, число управляемых дорожек при фазовых СЧПУ равно числу управляемых координат плюс одна дорожка опорного сигнала, а при шаговых СЧПУ — удвоенному числу координат. Введение технологических команд приводит к увеличению числа дорожек.

Практика показала, что в этих системах трудно реализовать смену инструментов, изменение частоты вращения шпинделя, коррекцию размеров обрабатываемых деталей, большие значения ускоренных подач ( $S = 1000 - 1500$  мм/мин). Кроме этого, методу ввода программы на магнитной ленте присущ ряд неблагоприятных факторов, снижающих точность воспроизведения программы. К ним относятся: влияние температуры и влажности окружающей среды, скопление частиц магнитного порошка в воспроизводящей головке, неравномерность подачи ленты и возможность ее перекоса и т. п.

Все это вместе взятое привело к тому, что СЧПУ с записью на магнитной ленте заменяются СЧПУ с записью программы на перфоленте при обычных условиях эксплуатации станков с ЧПУ. Однако программноносители на магнитной ленте стали широко использоваться в системах управления от ЭВМ в гибких производственных системах.

## 2.7. КЛАССИФИКАЦИЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Станки с ЧПУ по аналогии с обычными станками делятся по целевому назначению, типам и размерам. Как известно, по целевому назначению металлорежущие станки делятся на 10 групп. Каждая группа подразделяется на 10 типов, а каждый тип — на 10 типоразмеров.

Для станков с ЧПУ вводятся дополнительные обозначения,

записываемые в конце обычной маркировки станка: Ф1—станки с цифровой индикацией; Ф2 — станки с позиционной СЧПУ; Ф3 — станки с непрерывной СЧПУ; Ф4 — станки с универсальной СЧПУ.

По точности станки с ЧПУ, отмечаемым в паспортных данных, делятся на пять групп: Н — нормальной точности; П — повышенной точности; В — высокой точности; А — особо высокой точности; С — особой точности.

В авиационной промышленности применяется большое количество станков с ЧПУ как отечественных, так и приобретенных из стран СЭВ, капиталистических государств: Италии, ФРГ, Англии, США и Японии.

Наряду с новыми обозначениями металлорежущих станков с ЧПУ, таких как 1А616Ф3, 1Б616Ф3, 1К62Ф3, 16К30Ф3, 16К50Ф3, 6М11Ф3, 6П13Ф3, 69904ПФ4, 69061МФЧ и др., на заводах применяются станки, имеющие другие обозначения: 1А616ПУ, КТ100А (Средневожский завод), 1К62ПУ (Московский станкозавод «Красный Пролетарий»), АТПр2МСН (Савеловский завод), РТ699Ф3 (Рязанский завод), 6Н13ГЭ2 (Горьковский завод). Это связано, главным образом, с выпуском станков с ЧПУ до установления единой классификации. При относительном сходстве маркировки станки с ЧПУ по сравнению с обычными приобретают все более заметные отличия. Рассматривая конструктивные особенности станков с ЧПУ, их можно разделить на 4 поколения.

*1-е поколение*, относящееся к начальному развитию станков с ЧПУ, мало отличалось от универсальных металлорежущих станков и характеризовалось дополнением к ним специальных узлов с ЧПУ.

*2-е поколение* характеризуется созданием специальных станков с ЧПУ. Они отличались: а) повышенной жесткостью за счет создания жестких элементов конструкции: узлов станка, увеличенных диаметров ходовых винтов (до  $\varnothing 100$  мм), шариковых беззазорных пар винт-гайка, гидростатических пар винт-гайка и т. п.; б) уменьшением трения в подвижных соединениях для обеспечения плавности движения рабочих органов, особенно при малых и больших скоростях, путем создания роликовых направляющих, а также путем применения антифрикционных материалов и покрытий направляющих станин (например, на вертикальных фрезерных станках ФП-27 и станках типа «Горизонт 3» фирмы «Оливетти» к направляющим станин прикрепляются пластины из антифрикционных пластмассовых материалов); в) ускоренным перемещением рабочих органов с целью уменьшения времени холостых ходов (с применением скоростных гидроусилителей для шаговых импульсных систем и электромеханических приводов с тиристорным усилителем); г) рас-

ширением эксплуатационных характеристик станков путем применения многоинструментальных головок; д) созданием замкнутых систем управления с датчиками обратной связи.

*3-е поколение* характеризуется созданием многоцелевых многопозиционных станков с ЧПУ (обрабатывающих центров), на которых при одной установке детали производится большое количество работ, обычно выполняемых на ряде сверлильных, расточных, фрезерных и (частично) токарных станков. Для них характерно наличие нескольких шпинделей, многоинструментального магазина с автоматической сменой инструментов с большим их числом (достигающих 100 и более) и поворотных столов, обеспечивающих обработку детали с нескольких сторон. Они отличаются высокой точностью обработки координатных отверстий, заменяя координатно-расточные станки, и находят все более широкое применение в авиадвигателестроении для обработки крупных корпусных деталей.

К *4-му поколению* относятся станки с ЧПУ адаптивного управления, инвариантные к нагрузкам, температурным изменениям положения рабочих органов, вибрациям и т. п.

В станках 2-го и 3-го поколений также вводятся отдельные элементы, характерные для адаптированных систем (например, в станках «Аутор Мультиплекс» фирмы «Оливетти» применяется температурная компенсация положения оси шпинделя).

### *3. ОСОБЕННОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНКОВ С ЧПУ*

Технология изготовления основных деталей авиадвигателей изложена в учебниках на базе обобщения опыта моторостроительных заводов с использованием универсальных, агрегатных, специальных станков и автоматических линий.

Применение отдельных станков с ЧПУ, не соединенных общей системой управления (без создания автоматизированных участков), не оказывает существенного влияния на общее построение технологических процессов большинства деталей, таких как валы, шестерни, диски и т. п. Однако при применении станков с ЧПУ наблюдается концентрация (интеграция) операций, ведущая к сокращению цикла обработки. При этом многоцелевые (многопозиционные, многооперационные, обрабатывающие центры) станки, используемые при обработке корпусных деталей, во многих случаях создают возможность изготовления сложных деталей в две—три операции вместо десятка операций, выполняемых на универсальных станках. Широкое

применение станков с ЧПУ в условиях серийного производства в дальнейшем приведет к организации автоматизированных участков, обеспеченных накопителями деталей, транспортными устройствами, промышленными роботами, к созданию систем, управляемых от ЭВМ.

Быстроперенастраиваемые системы называются гибкими. Это в свою очередь вызывает существенные изменения в планировании и организации производства. В будущем путем организации гибких автоматизированных производств (ГАП) предполагается органическое слияние процессов конструирования изделий, проектирования технологических процессов отдельных деталей и процессов разработки программ для станков с ЧПУ с применением ЭВМ, а также использовании этих программ на станках с ЧПУ, включаемых в автоматизированную систему управления производством (АСУП).

### *3.1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ*

Несмотря на преимущества станков с ЧПУ, обеспечивающих сокращение времени и средства на подготовку производства и высокую производительность обработки деталей, следует учитывать, что станки с ЧПУ и комплекс оборудования, включающий системы управления, устройства подготовки и контроля программ, в настоящее время являются дорогими, а процесс подготовки программ — весьма трудоемким. Исходя из этого, одной из главных проблем их использования является получение от станков с ЧПУ наибольшего экономического эффекта, обеспечивающего окупаемость оборудования в нормативные сроки. Решение этой проблемы требует системного подхода, предусматривающего правильную организацию работ по проектированию технологических процессов и созданию программ для станков с ЧПУ; организация гибких производственных комплексов (ГПК) должна быть на высоком уровне.

На основе опыта заводов рекомендуются следующие этапы проектирования технологических процессов для станков с ЧПУ: 1) технологический анализ, который включает разработку классификатора деталей и разработку рекомендаций по изменению чертежей; 2) выбор прогрессивных заготовок; 3) составление маршрутной технологии; 4) выбор станков и систем с ЧПУ; 5) разработка операционных карт; 6) разработка эскизов, операционных расчетно-технологических карт или исходной программы; 7) программирование операций обработки детали вручную или с применением ЭВМ; 8) изготовление и контроль программ.

### 3.2. РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАТОРА ДЕТАЛЕЙ

Разработку классификатора следует производить как в цеховых условиях, так и при выполнении дипломных проектов. В основе классификации деталей лежат принципы групповых методов обработки, предусматривающие деление деталей по сходству их конструктивно-технологических признаков. При этом детали авиадвигателей делаются по уровням, отражающим комплекс этих признаков. К первому уровню относятся классы деталей — корпуса, валы, диски, крыльчатки, шестерни, лопатки и т. п. Затем каждый класс делится на группы (второй уровень), подгруппы (третий уровень). Низшим уровнем такого деления являются типовые детали или типы, имеющие общие классификационные признаки.

Такая классификация позволяет создать программы для обработки нескольких однотипных деталей или использовать часть программ для обработки отдельных унифицированных конструктивных элементов. Кроме этого, использование групповых методов обработки на станках с ЧПУ позволяет сократить номенклатуру используемых приспособлений и инструментов, а также — провести специализацию технологов и программистов, что обеспечивает более высокую производительность их труда и способствует выбору более оптимальных решений, относящихся как к построению технологического процесса и выбору станков с ЧПУ для каждого типа деталей, так и назначению режимов обработки.

### 3.3. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЧЕРТЕЖЕЙ

Одной из задач при разработке рекомендаций является улучшение технологичности конструкций деталей в связи со специфическими особенностями, связанными с обработкой их на станках с ЧПУ. При этом обычно рекомендуется:

1. Использование координатной системы простановки размеров с показом на чертеже значений координат отверстий и наиболее важных узловых или опорных точек контуров детали (точек пересечения контурных линий), что позволяет уменьшить количество расчетов при разработке программ. В качестве осей координат обычно выбираются оси симметрии контуров деталей, а при отсутствии таковых — следует выбирать первый квадрант, обеспечивающий положительные значения координат точек.

2. Уменьшение разнообразия конструктивных форм и размеров отверстий и крепежных резьб, проводимое в порядке унификации элементов конструкции детали с целью сокращения числа применяемых инструментов при обработке и затрат вре-

мени на их смену в процессе обработки. При этом малые диаметры резьб ( $d < 5$  мм), обычно нарезаемые вручную, следует заменить на диаметры больших размеров, обеспечивая возможность обработки их на станке с ЧПУ.

3. Проведение унификации радиусов галтелей и их значений в соответствии с используемыми стандартными инструментами. Следует не допускать малых значений радиусов галтелей, что требует переточки стандартных инструментов или применения дополнительной обработки этих галтелей.

4. Радиусы внутренних сопряжений, образуемые торцевой частью фрез у колодцев, карманов и т. п. следует назначить равными радиусам стандартных фрез. Следует учитывать, что увеличение этих радиусов вызывает переточку стандартных фрез и увеличивает число проходов при фрезеровании дна колодцев за счет сокращения диаметра плоского участка торца фрезы. Радиусы внутренних сопряжений, образуемые цилиндрической частью фрезы, следует делать увеличенными, что позволяет использовать фрезы достаточной жесткости и применять высокие режимы резания. Для исключения зарезов в местах перехода сопряженных поверхностей радиусы сопряжений должны быть больше радиусов применяемых фрез.

Для повышения технологичности конструкции имеются и дополнительные рекомендации, связанные с использованием различных видов станков с ЧПУ, которые следует также учитывать.

При выполнении дипломных и курсовых проектов, учитывающих применение станков с ЧПУ, студентам следует разработать рекомендации по улучшению технологичности конструкции и отразить их в пояснительной записке.

### *3.4. ВЫБОР ПРОГРЕССИВНЫХ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ*

Для исключения аварий, преждевременного износа станков с ЧПУ и деформаций деталей после обработки за счет напряжений к заготовкам обрабатываемых деталей предъявляются повышенные требования по величине и равномерности припуска, а также к твердости обрабатываемого материала. Наиболее эффективное использование станков с ЧПУ получается при применении заготовок, изготавливаемых прогрессивными методами, такими как литье по выплавляемым моделям, литье в корковые формы и кокиль; а также заготовок, получаемых методом выдавливания, поперечно-винтовой прокаткой, ГКМ и т. п.

Заготовки должны иметь равномерный припуск (допускаются колебания  $\pm 0,5$  мм), исключаящий работу по литейным и ковочным коркам и определяющий равномерный износ инструментов. Для обеспечения стабильной скорости последних перед

механической обработкой следует предусматривать соответствующую термическую обработку заготовок в зависимости от их материала (отжиг, нормализация, высокий или стабилизирующий отпуск и т. п.).

При больших значениях припусков (например, при изготовлении деталей из прутка) рекомендуется производить обработку деталей за несколько проходов, что следует предусматривать в программе обработки. В отдельных случаях один дополнительный проход можно осуществить, используя блоки коррекции инструментов (при их наличии на станке). При несовершенных заготовках, таких как литье в песчаные формы и поковки свободной ковки, имеющих неравномерные припуски и трудно обрабатываемые корки, рекомендуется предусматривать дополнительную операцию предварительной обработки на универсальных станках, обеспечивая при этом невысокую точность (порядка 12—13 квалитета) и упрощенные контуры детали.

### *3.5. СОСТАВЛЕНИЕ МАРШРУТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ*

При использовании станков с ЧПУ наблюдается концентрация работ на отдельных операциях. Однако так же как и при использовании универсальных станков, при разработке маршрутной технологии учитываются особенности материала детали, наличие термической и термохимической обработки, точностные характеристики отдельных поверхностей, требования к качеству материала и поверхностного слоя детали. Все это вместе взятое определяет наличие стадий (этапов) обработки (предварительной, чистовой окончательной и отделочной) и обеспечивает постепенное приближение к требуемым качественным характеристикам детали. При этом должны учитываться величины допустимых деформаций детали за счет перераспределения внутренних напряжений, возникающих при снятии неравномерных слоев металла и различной степени упрочнения поверхностного слоя при различных методах обработки.

Маршрутная технология предусматривает и выбор оборудования, обеспечивающего необходимые режимы обработки, что особенно важно при окончательной и отделочной обработке с целью обеспечения качественных характеристик поверхностного слоя детали (шероховатости), а во многих случаях и качества поверхностного слоя (глубина и интенсивность наклепа и характер возникающих напряжений).

Учитывая изложенное, составление маршрутной технологии является одним из сложных и ответственных этапов разработки технологического процесса, требующего высокой квалификации технологов. Следует отметить, что выбор оптимальных решений производится на основе технико-экономического обоснования

различных вариантов и, в частности, используя методику определения экономической эффективности применения станков с ЧПУ.

### *3.6. УКАЗАНИЯ ПО ВЫБОРУ СТАНКОВ И СИСТЕМ С ЧПУ*

При изготовлении деталей авиадвигателей широко используется самое различное оборудование: как универсальные станки и станки специального технологического назначения, так и станки с ЧПУ. Использование обычных универсальных токарных, фрезерных, расточных и прочих станков следует предусматривать при обработке простых деталей с прямолинейными контурами поверхностей (при отсутствии копировальных устройств), а также при операциях предварительной грубой обработки в случаях применения несовершенных заготовок (отливок в песчаные формы, поковок свободной ковки и т. п.).

Для станков специального технологического назначения (зубообрабатывающие, фрезьобрабатывающие, станки для отделочных операций, таких как хонингование и суперфиниш) системы ЧПУ пока не получили широкого применения.

Станки с ЧПУ целесообразно применять в следующих случаях.

1. При операциях сложной и трудоемкой обработки деталей с малыми партиями запуска. По данным Оргавиапрома и ЭНИМС оптимальными являются партии по 30—80 штук при 8—10 запусках деталей в год. Меньшие значения относятся к наиболее сложным деталям.

2. При наличии большого количества координатных отверстий (особенно с повышенной точностью их расположения), для которых при обработке на универсальных станках требуется специальная технологическая оснастка.

3. При токарной обработке с большим количеством ступеней обработки (многоступенчатые валики, диски и т. п.) и повышенной точностью обработки, а также при наличии сложных фасонных поверхностей.

4. При обработке деталей из легкообрабатываемых материалов (магниевые, алюминиевые и медные сплавы, мягкие конструкционные стали и пластмассы) следует ожидать наибольшего экономического эффекта от применения станков с ЧПУ, так как при их обработке обеспечивается наибольшая производительность как за счет использования высоких скоростей резания, так и за счет сокращения вспомогательного времени при автоматическом цикле обработки.

5. Применение станков с ЧПУ при изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов (жаропрочные, никелевые и

титановые сплавы), как правило, дает меньший экономический эффект в связи с использованием низких скоростей резания. В связи с этим применение станков с ЧПУ при обработке этих материалов требует более тщательного экономического обоснования.

При выборе оборудования следует учитывать, что эксплуатационные характеристики станков с ЧПУ связаны с используемыми системами управления. Так, в системах ЧПУ с записью программы на магнитной ленте следует предусматривать применение одного инструмента на одном режиме обработки без использования блоков коррекции. В этом их недостаток, связанный с наличием ограниченного числа дорожек на магнитной ленте.

Позиционные системы ЧПУ с записью программы на перфолентах используются при прямолинейных траекториях движения инструментов при обработке деталей на токарно-карусельных, вертикально-сверлильных, координатно-расточных, горизонтально-расточных, горизонтально-сверлильно-фрезерных и отдельных видах многоцелевых станков. Они наиболее простые и дешевые из систем с записью программы на перфоленте. В них можно реализовать, как и в других нижеуказанных системах, изменение режимов обработки, коррекцию положения инструментов (при наличии соответствующих блоков).

При прямолинейных траекториях движения инструментов, реализуемых на токарных и фрезерных станках, широко используются непрерывные системы ЧПУ с линейными интерполяторами, отличающиеся от позиционных систем тем, что они обеспечивают функционально связанные движения по двум координатам. Они также сравнительно просты и дешевы, но не приспособлены для обработки фасонных поверхностей. При этом в случаях обработки по траекториям движения инструментов в виде окружностей и других кривых производится их замена прямолинейными отрезками (линейная аппроксимация), что затрудняет разработку программы и ведет к увеличению числа ее кадров.

При обработке деталей, имеющих сложные фасонные поверхности, следует предусматривать использование непрерывных систем с линейно-круговыми интерполяторами. Применение их значительно упрощает разработку программы обработки контуров, сочетающих прямые и окружности (без аппроксимации последних). Для обработки сложных корпусных деталей наиболее оптимальными являются универсальные системы ЧПУ, включающие достоинства позиционных и непрерывных систем. Однако они наиболее сложные и дорогие и обычно используются для управления многоцелевых станков.

Следует отметить, что в настоящее время проводятся боль-

шие работы и имеется опыт применения ЭВМ для управления группы станков с ЧПУ с созданием автоматизированных участков, что требует специального изучения и выходит за рамки этого пособия. При выборе моделей систем и станков с ЧПУ следует руководствоваться материалами или паспортами станков.

### *3.7. РАЗРАБОТКА ОПЕРАЦИОННЫХ КАРТ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ*

В операционных картах для станков с ЧПУ, также как и для универсальных станков, указывается эскиз обрабатываемой детали с обозначением установочных и обрабатываемых поверхностей (последние обводятся жирными контурными линиями), а также шероховатости обрабатываемых поверхностей и техниче-ский условий. В текстовой части указывается перечень переходов, применяемых инструментов, режимов обработки, а иногда и нормы времени. Дополнительно в операционных картах для станков с ЧПУ показывается эскиз заготовки с указанием ее размеров и допускаемых отклонений с целью возможности контроля заготовок перед началом обработки партии деталей.

Следует учитывать, что применяемые инструменты для станков токарной группы и многоцелевых станков должны соответствовать их номенклатуре, предусмотренной для данного станка с заданными настроечными размерами и соответствующей маркировкой инструментальных блоков.

При назначении последовательности переходов следует сначала предусматривать переходы по удалению излишних припусков, затем переходы, предусматривающие обработку поверхностей с невысокой точностью, таких как поверхности, заданные свободными размерами. Последними указываются переходы чистовой, окончательной, отделочной обработки и нарезанию резьб. При этом назначение точности обработки на последних переходах должно быть согласовано с паспортными данными, относящимися к точностным характеристикам станка.

Назначению режимов резания следует уделить особое внимание, так как практика показывает, что 50% ошибок при разработке программ связаны с неправильными их назначениями. Кроме того, изменение режимов резания ведет к корректировке программы. Рекомендуется следующий порядок выбора режимов.

1. Назначается глубина резания и число проходов с учетом припуска на обработку и жесткости системы СПИД.
2. Устанавливается подача, исходя из допустимой шероховатости обрабатываемых поверхностей.

3. Выбирается период стойкости и определяется скорость резания.

4. Производятся проверочные расчеты по мощности привода главного движения и усилию подачи, согласуются результаты расчета с паспортными данными станка.

### *3.8. РАЗРАБОТКА КАРТ ЭСКИЗОВ*

Этот этап работ направлен на определение и систематизацию данных для разработки программ и содержит эскизы, показывающие не только контуры детали и обрабатываемых поверхностей, но и траектории движения инструментов для каждого перехода в соответствии с вышесказанными указаниями.

Изображение контуров дополняется нанесением системы координат с указанием координат начальных точек движения инструментов, координат опорных точек контура детали (точек пересечения линий контура) — при ручном программировании и оптимальных способов задания геометрических образцов детали — при машинном программировании.

В случае образования контуров при фрезеровании или обточке резцами с радиусом при вершине наносится траектория эквидистанты контура, отстоящая на величину радиуса применяемого инструмента.

### *3.9. ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ПОЗИЦИОННЫХ СЧПУ*

В позиционных системах, применяемых главным образом в сверлильных, расточных и координатно-расточных станках, необходимо обеспечить точное положение осей обрабатываемых отверстий относительно принятой системы координат.

При этом сначала определяется начальная точка траекторий по нониусным или оптическим указателям значений координат. В случае, если они не отвечают условиям точности, на приспособлениях для установки и закрепления деталей могут создаваться специальные элементы для настройки в виде калиброванных стержней или гнезд.

От начальной точки устанавливаются траектории движения инструмента относительно детали, вид которых показан на рис. 18. На рис. 18,а траектория соответствует последовательным перемещениям по одной из координат, а на рис. 18,б — одновременному перемещению по двум осям координат. В последнем случае скорость результирующего движения как вектор будет равна геометрической сумме векторов скоростей в направлении осей координат.

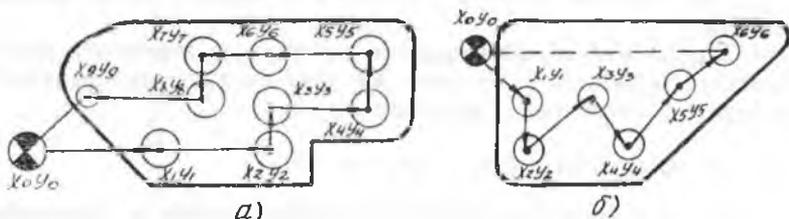


Рис. 18. Траектории движения позиционных СЧПУ: а) при последовательном движении в направлении осей координат; б) при одновременном движении

При подходе стола или инструментальной головки к требуемому положению, обеспечивающему заданные координаты обрабатываемого отверстия (в точку позиционирования), необходимо исключить или уменьшить влияние сил инерции движущихся масс, сил трения в подвижных соединениях и зазорах в кинематической цепи привода. Это достигается применением одностороннего подхода к точке позиционирования с уменьшением скорости движения стола при подходе к этой точке, что достигается автоматическим включением специального блока предварительных команд.

Изменение результирующей скорости при одностороннем подходе к точке позиционирования показано на рис. 19. В случае, если координата  $x_i$  исходного положения меньше, чем заданная координата  $x_i + 1$  (см. рис. 19,а), происходит ускоренное перемещение стола со скоростью  $v_1$ . На расстоянии  $\Delta x_1 = 10$  мм от точки позиционирования скорость движения снижается до  $v_2$  и затем на расстоянии  $\Delta x_2$  — до «ползучей»

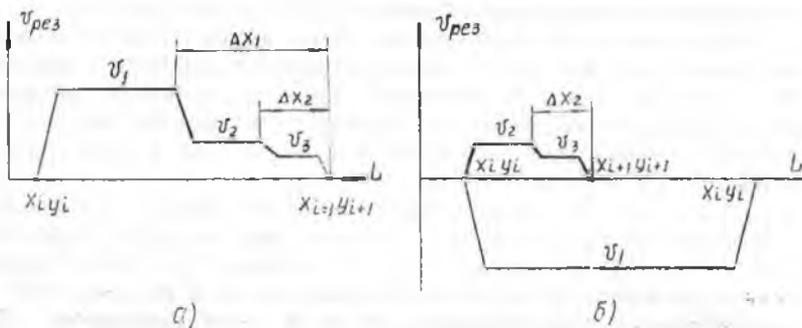


Рис. 19. Изменение результирующей скорости при подходе к точке позиционирования: а) при одностороннем подходе; б) при подходе с противоположной стороны

скорости  $v_3$ . Расстояние  $\Delta x_2$  устанавливается экспериментально. В случае подхода к точке позиционирования с другой стороны (при изменении направления движения) осуществляется дополнительный перебег стола с возвратом в точку позиционирования на уменьшенной скорости  $v_2$  и «ползучей» скорости  $v_3$  (рис. 19,б). Двустороннего подхода к точкам позиционирования в большинстве случаев можно избежать правильным назначением последовательности обработки.

Для повышения точности позиционирования применяются следующие приводы, а также замкнутые СЧПУ с датчиками положения столов или инструментальных головок.

Позиционные СЧПУ иногда применяются на отдельных моделях токарных и шлифовальных станков при простых ступенчатых траекториях движения инструментов относительно обрабатываемой детали.

### *3.10. ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ НЕПРЕРЫВНЫХ СЧПУ*

Так же как и в позиционных СЧПУ, определение траекторий движения рабочих органов в непрерывных СЧПУ начинается с выбора начального положения. Начальное положение выбирается вне зоны обработки с целью обеспечения возможности смены инструмента и контроля обрабатываемой детали. Из начального положения, как правило, производится ускоренный подвод инструмента к обрабатываемой поверхности заготовки на расстоянии 1—2 мм до касания с ней. Во избежание «зарезов» на поверхности детали подвод инструмента следует производить в направлении касательной к траектории его движения.

В отличие от позиционных, для непрерывных СЧПУ траектория движения инструмента должна с высокой точностью соответствовать контуру обрабатываемой детали. В этом случае направление вектора скорости результирующего движения (результирующей подачи) должно быть всегда по касательной к контуру, и для обеспечения одинаковой шероховатости обрабатываемой поверхности модуль вектора должен иметь постоянное значение.

Для резцов с радиусом при вершине (при токарной обработке) и фрез (при обработке на фрезерных станках) траектория движения должна соответствовать эквидистанте контура обрабатываемой детали, отстающей от него на величину заданного радиуса в случае отсутствия устройств коррекции (большого диапазона). Вид траектории движения инструментов показан на рис. 20.

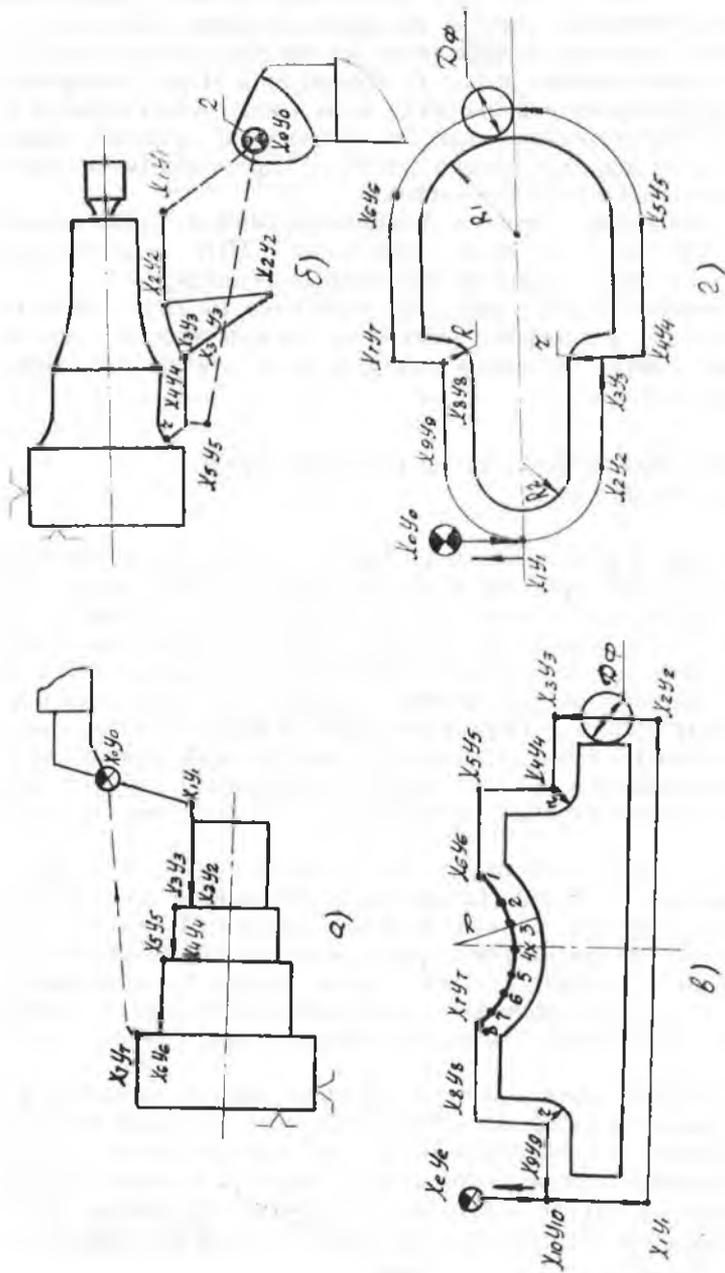


Рис. 20. Траектории движения непрерывных СЧПУ: а), б) траектории движения при токарной обработке; в) траектории движения при фрезеровании с приемом линейного интерполятора; г) то же — при изменении линейно-кругового интерполятора

Точки перехода траектории от одного контура к другому, описываемому различными уравнениями (прямой, окружности, параболы и т. п.) называются опорными точками; координаты этих точек  $x_1, y_1; x_2, y_2; \dots x_k, y_k$  определяются методами аналитической геометрии и, как правило, задаются в исходных данных, в виде расчетно-технологических карт (при ручном программировании).

При кодированной записи на перфокарте величина перемещений инструмента от одной опорной точки до другой задается отдельным участком программы — кадром в виде приращений координат  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$  или, в более редких случаях, в виде абсолютных значений координат опорных точек  $x_i, y_i, z_i$  относительно принятой системы координат.

При воспроизведении программы с помощью встроенных или автономных вычислительных устройств-интерполяторов, непрерывная кодированная программа СЧПУ, записанная на перфокарте, преобразуется в сигналы управления, соответствующие значениям координат точек обрабатываемого контура. Эти сигналы передаются на приводы станка. В настоящее время преимущественное применение получают линейно-круговые интерполяторы, позволяющие с минимальным значением исходных данных воспроизводить траектории прямых линий и окружностей, наиболее часто применяемых в чертежах при изображении контуров деталей (см. рис. 20,г). В более простых системах управления применяются линейные интерполяторы, при которых окружности и более сложные кривые заменяются многоугольниками (см. рис. 20,в). В редких случаях применяются более сложные системы с параболическими интерполяторами или мини-ЭВМ. Последние могут обеспечивать любые траектории движения.

Линейно-круговые интерполяторы рассчитывают промежуточные точки между двумя опорными точками методом оценочной функции. Для прямой, соединяющей точки  $x_i, y_i$  и  $x_k, y_k$  (рис. 21) в системе координат, начало которой совмещается с точкой  $x_i, y_i$ , справедливо равенство

$$y_i / x_i = y_k / x_k \quad (90)$$

или  $y_i x_k - y_k x_i = 0$ .

Значение  $F_i = y_i x_k - y_k x_i$  называется линейной оценочной функцией. При подаче единичного импульса по оси  $ox$

$$F(x+1, y_i) = x_k y_i - y_k (x_{i+1} + 1) = F(x_i, y_i) - y_k < F_i < 0$$

делается шаг в направлении  $oy$ . При подаче единичного импульса по оси  $oy$

$$F(x_i, y_{i+1}) = x_k (y_k + 1) - x_i y_k = F(x_i, y_i) + x_k > F > 0$$

делается шаг в направлении оси  $ox$ .

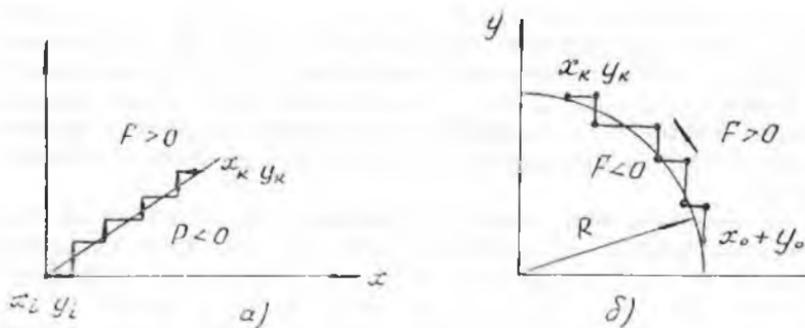


Рис. 21. Интерполяция прямой и окружности методом оценочной функции: а) интерполяция прямой; б) интерполяция дуги окружности

Таким образом строятся цикловые команды интерполятора, которые вычисляют непрерывно значения оценочной функции (при  $F > 0$  делается шаг в направлении оси  $ox - +x$ , а при  $F < 0$  — шаг в направлении  $oy - +y$ ). Вычисления прекращаются при достижении заданной точки с координатами  $x_k, y_k$ .

При интерполяции окружности (см. рис. 21, б) начало координат совмещается с центром окружности и промежуточные точки участка окружности между точками  $x_i, y_i$  и  $x_k, y_k$  определяются также автоматически по оценочной функции

$$F = x^2 + y^2 - R^2. \quad (91)$$

Для участка окружности, расположенного в I квадрате, при  $F > 0$  делается шаг в направлении  $ox - x$ , а при  $F < 0$  в направлении  $oy - +y$  и определяются координаты промежуточных точек.

Для рассмотренных случаев погрешность линейной и круговой интерполяции не превышает одного шага (для импульсных систем он равен перемещению рабочего органа, соответствующего одному импульсу).

При программировании перемещений по траекториям кривых более высокого порядка они заменяются прямыми или окружностями. Управляющие сигналы с интерполятора усиливаются и передаются на приводы рабочих органов станка. Для повышения точности воспроизведения траекторий движения рабочих органов применяются замкнутые СЧПУ с датчиками перемещений.

Как было указано, высокоточными и удобными для практического применения в цеховых условиях являются индуктосины — для линейных перемещений и вращающиеся трансформаторы и индуктосины — для угловых величин. При примене-

нии линейных интерполяторов траектории движения по кривым (окружностям, гиперболам, параболам и т. п.) заменяются прямыми, образующими многоугольники (рис. 22).

При такой замене возникает погрешность аппроксимации. Величина погрешности аппроксимации зависит от вида многоугольника вписанного, описанного или образованного секущими. Чаще всего применяется замена кривых вписанными многоугольниками (см. рис. 22,а). В этом случае величина погреш-

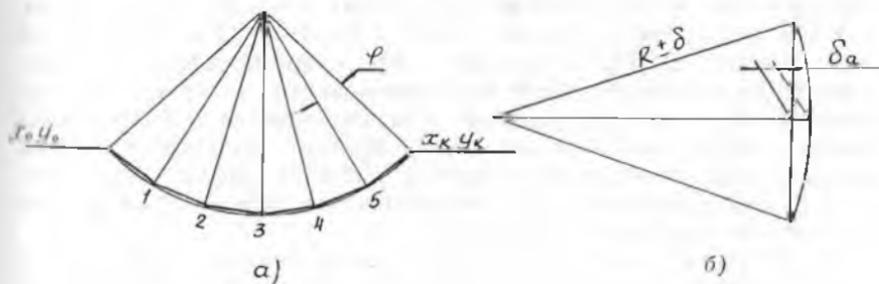


Рис. 22. Аппроксимация дуги окружности а); погрешность аппроксимации б)

ности аппроксимации зависит от длины сторон многоугольника и при заданном радиусе фрезы определяется по формуле (см. рис. 22,б)

$$\delta_a = R \left( 1 - \cos \frac{\varphi}{2} \right), \quad (92)$$

где  $\varphi$  — угол аппроксимации.

Погрешность аппроксимации принимается в зависимости от допустимых отклонений на радиус контура  $\delta$

$$\delta_a = (0,1 \dots 0,4) \delta. \quad (93)$$

Из этих условий определяется угол аппроксимации.

Как было указано, траектории движения рабочих органов при записи программы на магнитной ленте зависят от числа и характера сигналов, записанных на дорожках магнитной ленты. При записи программ единичными импульсами величина перемещения определяется величиной и знаком этих импульсов, а при фазовой модуляции сигналов она зависит от суммарного сдвига фазы относительно опорного сигнала. Точность воспроизведения траекторий движений при обработке также зависит от качественных характеристик считывающих головок, равномерности движения ленты, точности следящего привода рабочих органов, жесткости элементов системы СПИД и других факторов.

#### 4. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Следует отметить, что определение последовательности обработки поверхностей детали, режимов резания и настроечных размеров составляет технологическую часть проектирования процессов обработки.

Расчеты, связанные с определением траекторий движения инструментов и определением координат опорных точек, выполняются и в процессе составления программы. Под программой для станков с ЧПУ понимается программоноситель (преимущественно перфолента или магнитная лента) с записанной информацией в виде, пригодном для считывания в устройствах ввода информации станка. Сам процесс программирования, включая выполнение необходимых расчетов, может быть ручным с использованием простых вычислительных устройств или машинным с применением ЭВМ.

При ручном программировании информация записывается в том порядке, в котором наносится (с помощью перфоратора) на программоноситель в виде, пригодном для управления станком. Однако при машинном программировании записывается исходная программа на языке принятой системы автоматического программирования (САП) или в символическом виде (САП-2, САП-3, САПС-М22, АПТ-СМ, АПТ-ЕС и др.) или в табличном виде (САПП, СПС-Ф, СПС-Т, СППС и др.) и затем с помощью ЭВМ преобразуется и переносится также на программоноситель в виде, пригодном для считывания на станке. Преобразование информации при различных способах программирования показано на рис. 23.

Форма представления управляющей программы станка с ЧПУ определяется принятой системой ЧПУ, главной характеристикой которой является формат кадра. Формат кадра обуславливает: а) используемый код (БЦК-5 или ИСО); б) перечень и порядок записи команд; в) разряды чисел, используемых как в коде управляющих команд, так и определяющих величину перемещений рабочих органов станка.

##### 4.1. СИСТЕМЫ КОДИРОВАНИЯ (СИМВОЛИКА) ИНФОРМАЦИИ СЧПУ. КОД БЦК-5

Система кодирования представляет собой совокупность условных обозначений, используемых при программировании информации управления СЧПУ. В сочетании с методом контроля записи и считывания информации она определяет число дорожек применяемой перфоленты.

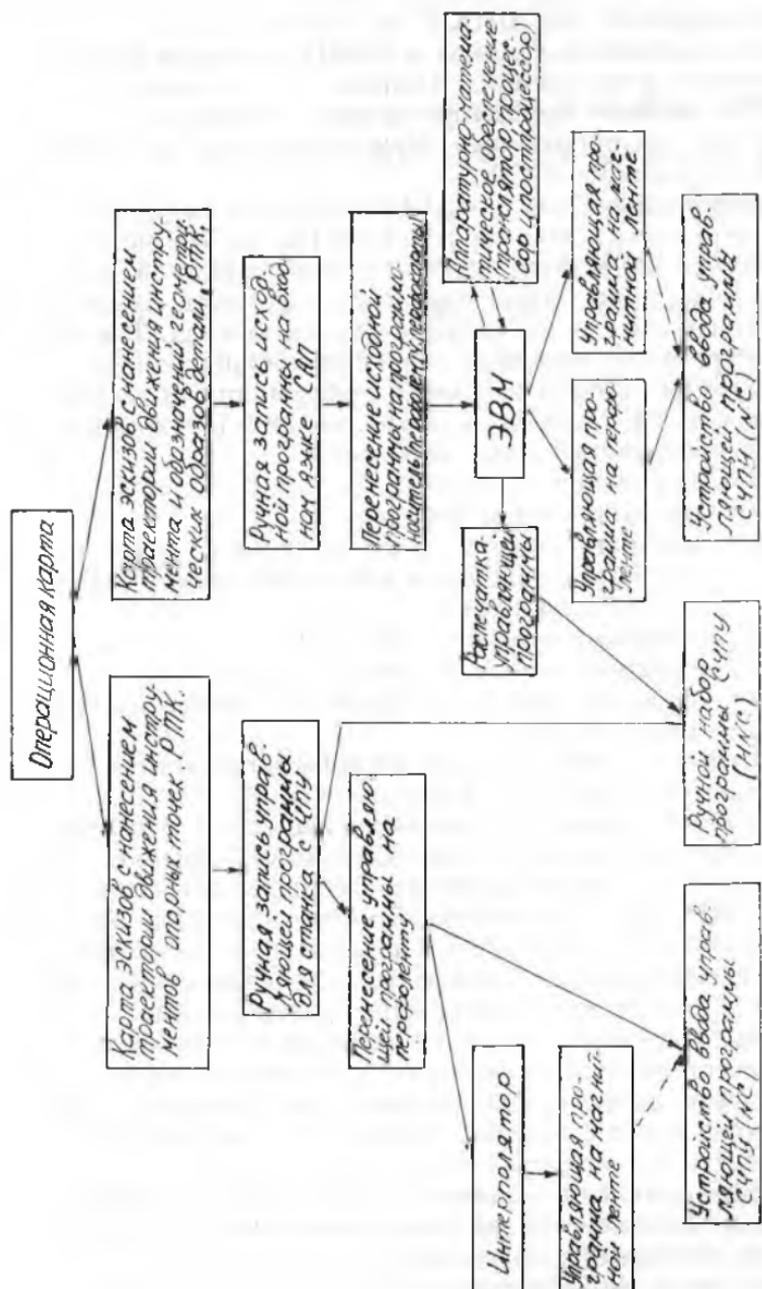


Рис. 23. Преобразование информации при различных способах программирования

При создании первых систем ЧПУ применялся простейший числовой код 2151. Затем нормалью Э68-1 Министерства станкостроительной промышленности СССР был рекомендован буквенно-цифровой код БЦК-5, на основе которого изготовлено большое количество станков и СЧПУ, которые применяются и в авиадвигателестроении. Однако в соответствии с ГОСТ 13052-67 сейчас преимущественно применяется код ИСО (*ISO-7 bit*), разработанный Международной ассоциацией стандартов с участием СССР.

Буквенно-цифровой код БЦК-5 предусматривает использование пятидорожковой перфоленты. На первые четыре дорожки перфоленты наносится цифровая информация в двоично-десятичном коде, а на пятую дорожку — признак буквы в случае, если производится кодирование адреса команд. Таким образом, при кодировании числовых значений пробивка на пятой дорожке не производится. Символика информации кода БЦК-5 показана на рис. 24. Указанной нормалью Э68-1 рекомендуются следующие обозначения адресов команд:

- Е, Д, Т — перемещения по осям X, Y и Z;
- К — признак номера кадра;
- П, Ш, С — признак команд, определяющих значения подачи, частоты вращения и смены инструмента (с указанием № инструмента);
- В — вспомогательные команды;
- Н — признак команды — конец кадра;
- ЯНН — признак конца программы, записываемый отдельным кадром.

Направления перемещений по осям координат «+» или «—» обозначаются цифрами 1 и 2.

При обозначении команд, относящихся к перемещениям по дополнительным координатам (например, поворот относительно осей и т. д.), используются резервные обозначения ЯЕ, ЯД, ЯТ, ЯК, ЯП, ЯШ. Кодом БЦК-5 можно передать число кодовых признаков  $n = 2^5 = 32$  (5 bit). При этом число кодовых признаков без использования резервных обозначений составляет  $n_0 = 10 \times 2 = 20$  признаков. При использовании этого кода контроль программы задается отдельным столбцом, в котором пробивается число, недостающее до числа, кратного десяти. При этом определяется сумма числовой и буквенной информации кадра (без учета признака буквы), и в первом столбце кадра пробивается это недостающее число.

Информация, относящаяся к последовательно записываемым командам, пробивается на перфоленте в виде отдельных фраз (кадров), состоящих из «слов».

*Для конкретной системы ЧПУ важнейшей характеристикой является структура отдельных фраз (или кадров), которая опре-*

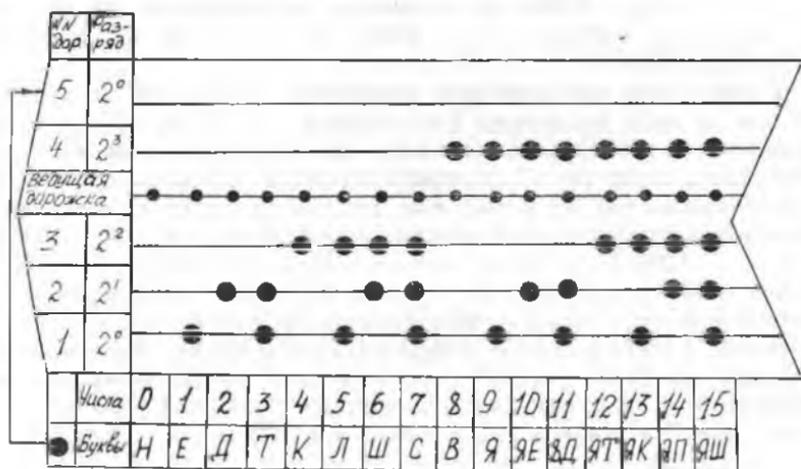


Рис. 21. Код БЦК-5

делется форматом кадра. Формат кадра определяет и конструкцию считывающих устройств.

Например, для СЧПУ «Логика 2М» токарного полуавтомата АТПр-2М 12У (1925Ф3) формат кадра можно представить в виде М1 К3 Е ± 3,2 Д ± 3,2 П2 Ш2 С2 В2 Н000.

М-1 означает «Контроль по модулю», т. е. в первом столбце программы пробивается число, недостающее до кратности 10 суммы всей числовой информации кадра. К3 обозначает номер кадра, выраженный двоично-десятичным трехразрядным числом. Например, кадр № 89 обозначается — К089. Обозначение Е ± 3,2 относится к перемещению по оси ОХ с указанием знака и величины перемещения записанных трехразрядным числом целых мм и двухразрядным — сотых долей мм; Д ± 3,2 обозначает знак и величину перемещения по оси ОУ (или ОZ). Обозначения П2, Ш2, С2 относятся к кодам величины подачи, частоты вращения шпинделя и номерам инструментов, выраженным двухразрядными числами. В2 обозначает вспомогательные команды. Для этого станка предусмотрены две вспомогательные команды: В00 — работа без охлаждения; В01 — работа с охлаждением; Н000 — конец кадра.

Специфичным для данной системы является обозначение знака ведущей координаты (имеющее большее численное значение импульсов), которое отмечается добавлением к числу 1 или 2, относящемуся к знаку перемещения, числа 4. Например,  $\Delta x_1 = 40,3$  мм;  $\Delta y_1 = -100,6$  мм.

«Ведущей» координатой является  $y$ , и при шаге импульса  $h_x = 00,1$  и  $h_y = 0,005$  мм величина перемещений, выраженная в импульсах, составит:  $x_1 = 4030$ ,  $y_1 = -20120$  и запишется: E104030 D620120.

Кроме того, направление вращения шпинделя отмечается: 04 при правом вращении (по часовой стрелке), 40 при левом вращении и суммируется с кодом частоты вращения шпинделя. Например, кадр № 15, соответствующий ускоренному подводу резца (суппорта) из начальной (нулевой) точки к поверхности обрабатываемой детали с величиной перемещений  $\Delta x = -134,7$  мм и  $\Delta y = -120,03$  при шаге импульса  $h_x = 0,01$  мм,  $h_y = 0,005$  мм, скоростной ступени 22 при правом вращении шпинделя и ускоренной подаче, обозначаемой кадром 75, запишется следующим образом: 1 K015 E2 13470 D624006 П75 Ш26H000. «Контролем по модулю» является число 1, дополняющее до 80 сумму числовой информации, так как она составляет:  $K = 4 + 1 + 5 + 1 + 2 + 1 + 3 + 4 + 7 + 2 + 6 + 2 + 4 + 6 + 5 + 7 + 5 + 6 + 2 + 6 = 79$ .

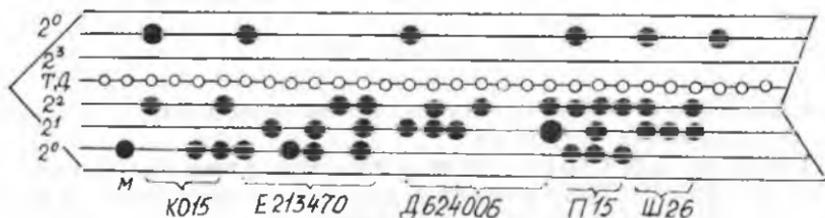


Рис. 25. Информация кадра на перфоленте

Этот кадр будет зафиксирован на перфоленте, как показано на рис. 25.

#### 4.2. КОД ИСО (ISO-7 bit). ЗАПИСЬ ПРОГРАММЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭТОГО КОДА

Код ИСО является буквенно-цифровым-знаковым кодом. При его применении используется восьмидорожковая перфолента шириной 25,4 мм. Первые четыре дорожки предназначены для нанесения цифровой информации, записываемой в двоично-десятичном коде. Последующие три дорожки — для кодирования признаков цифр, букв и знаков. Восьмая дорожка служит для контроля правильности записи и считывания программы также методом избыточной информации — на четность (или нечетность) по столбцам (строкам). Если сумма цифр числовой информации в строке (столбце) нечетна, то на восьмой



Таблица 1

Рекомендуемые обозначения при применении кода ИСО

№№ п/п	Текстовое обозначение	Целевое назначение	Кодовое обозначение	
			признак	цифровой код
1	<i>X, Y, Z</i>	Перемещение по осям	(5)	8...10
2	<i>U, V, W</i>	Перемещение параллельно осям	(5)	5...8
3	<i>A, B, C</i>	Поворот относительно осей	(4)	1...3
4	<i>F (feed)</i>	Скорость перемещения (подача) или время выполнения кадра	(4)	6
5	<i>S (speed)</i>	Частота вращения шпинделя	(5)	3
6	<i>T (tool)</i>	№ инструмента	(5)	4
7	<i>G</i>	Подготовительные команды (коррекция, ускорение, перемещения)	(4)	7
8	+ —	Знаки перемещения	(2)	11, 13
9	<i>M</i>	Вспомогательные команды (смена инструмента и т. п.)	(4)	13
10	%	Начало программы	(2)	5
11	<i>LF</i>	Конец программы	(0)	10
12	<i>N<sub>2</sub></i>	Номер кадра	(4)	14
13	<i>Del</i>	Команда для печатающих машин («забой») для погашения ошибки	(7)	15

*S2, T3* — частота вращения и номер инструмента;

*M2* — вспомогательные команды;

*LF* — конец кадра (фразы).

#### 4.3. ФОРМАТ КАДРА И КОМАНДЫ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ СИСТЕМЫ ЧПУ H221

Система ЧПУ с линейно-круговым интерполятором H221 широко используется на токарных станках с ЧПУ (АТПр-2М12СН и др.). Формат кадра ее записывается в следующем виде

(%) *N3, G2, F5, X±5...7, Z±5...7,*

*I±5...7, K±5...7, M2, S3, T2, L2, LF.*

Как было отмечено ранее, формат кадра определяет порядок записи команд программы и разряды используемых чисел. Знаком % отмечается начало программы, №3 — соответствует обозначению номера кадра, выраженного 3-разрядным числом.

Подготовительные команды *G2* — отмечаются 2-разрядными числами, но их применение требует особой внимательности, так как они отличаются как по характеру ввода и по времени их использования, определяющего «Сброс функции», так и по

## Применение подготовительных функций

Обозначение	Назначение команд	Ввод			Сбор		Повторение ввода		Примечания и дополнения
		I	II	III	I	II	I	II	
G01	Линейная интерполяция Н-размеров (00001...99999)	1	1	1	0	1	0	1	Повторный ввод требуется также после нарезания резьбы (G33) и возврата в точку 0 (G25)
G10	То же длинных (L) размеров (000001...999999)	1	1	1	0	1	0	1	
G11	То же коротких (K) размеров (0001...9999)	1	1	1	0	1	0	1	
G02, G20, G21	Круговая интерполяция по часовой стрелке Н, Д и К размеров.	1	1	1	0	1	0	1	При круговой интерполяции скорость подачи $S=600$ мм/мин
G03, G30, G31	Круговая интерполяция против часовой стрелки Н, Д и К размеров	1	1	1	0	1	0	1	
G04	Планируемый перерыв в работе станка	0	0	1	1	0	1	0	Кодируется числом импульсов за время перерыва
G25	Возврат в точку 0	0	0	1	1	0	0	0	Производится на ускоренной подаче. При отводе по 2-м координатам задается 2-мя кадрами
G26 G27	Работа в приращениях Работа в абсолютной системе	0	1	1	—	1	—	1	Обычно проводится в первом кадре, первым слезом после № кадра. При изменении режимов вводится в предыдущем кадре (не имеющ. функций)

При этом отмечено: Ввод: I — отдельным кадром, II — отдельным кадром с командами M, T или F, III — отдельным кадром с геометрической информацией, задаваемой «X», «Y», «Z», «U», «V», «W», «R». Сбор: I — в каждом обработанном кадре, II — при изменении G функций. Повторный ввод: I — в каждом последующем кадре, II — при изменении G функций.

условиям повторного ввода. Условия применения большинства подготовительных функций показаны в табл. 2, а для отдельных из них дается пояснение, изложенное ниже.

Для токарного станка АТПр-2М12СН системой Н221 принимается следующая система координат и положение начальной точки (рис. 27).

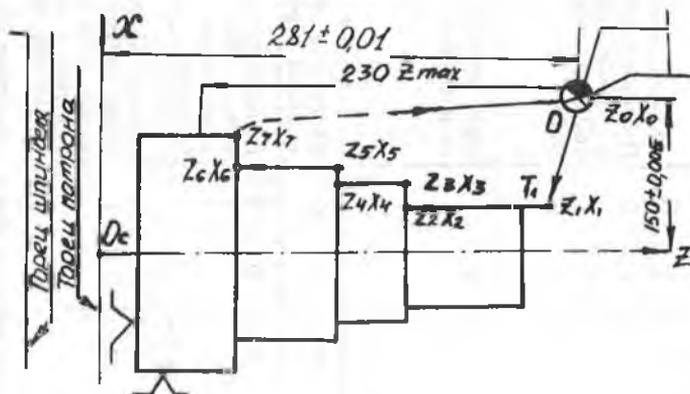


Рис. 27. Система координат токарного станка АТПр 2М12СН

$O_c$  — начало системы координат,

$O$  — начало движения инструмента (при совмещении формообразующей точки).

От начальной точки задается положение формообразующей точки инструмента ( $Z_0 X_0$ ) при настройке блока.

При работе в приращениях ( $G26$ ) для каждого участка траектории определяются величина приращения координат от одной опорной точки до другой. Так, для т. 1  $\Delta Z_1 = Z_0 - Z_1$ ;  $\Delta X_1 = X_0 - X_1$ . Для отрезка 1—2  $\Delta Z_2 = Z_1 - Z_2$ ;  $\Delta X_2 = 0$  и т. д. Величины приращений задаются 5-, 6- или 7-разрядными числами в зависимости от команд  $G01$ ,  $G10$  или  $G11$ .

При работе в абсолютной системе ( $G27$ ) за начало координат может быть принята как нулевая точка станка, так и любая точка детали (используя команду «сдвиг нулевой точки»  $G58$  рассмотренной ниже). При этом знак перемещений будет зависеть от квадранта, в котором находится рассматриваемая точка, а величина цифровой информации после адреса  $Z$  и  $X$  соответствует значению координат конечной точки рассматриваемого участка траектории движения инструмента. Как отмечалось ранее, при расчете опорных точек траекторий движения инструментов принимаются размеры детали, соответствующие середине поля допуска.

При планируемом перерыве работы системы (G04) время кодируется числом импульсов, создаваемых системой ЧПУ за время перерыва  $t_0$

$$N = f t_0 = F n_x t_0,$$

где  $f$  — частота подачи импульсов, мин;  
 $F$  — скорость подачи, мм/мин; (4-разрядное число в мм/мин);  
 $n_x$  — число импульсов, соответствующее 1 мм ( $n_x = 200$ ;  
 $n_z = 100$ ).

Так, например, в кадре № 5, записанном в виде № 005 04 X + 100000, предусмотрена задержка на время отработки 100000 импульсов. Если в предыдущих кадрах была задана скорость подачи  $F = 500$  мм/мин при числе импульсов в одном мм  $n_x = 200$ , время задержки составит

$$t = \frac{N}{F n_x} = \frac{100,000}{500 \cdot 200} = 1 \text{ мин.}$$

Эту же величину задержки можно написать

$$N \ 005 \ G \ 04 \ Z + 50000 .$$

При команде «возврат в нулевую точку» (G 25) предусматривается быстрый отвод суппорта (с положительным значением величины перемещения по осям координат) сначала в направлении оси  $OX$  (отход от детали), а затем — по оси  $OZ$  (отход от торца шпинделя). При этом величина перемещения не рассчитывается, а задается наибольшей при автоматическом осуществаемом диапазоне  $D$  размеров, т. е. сначала пишется кадр  $G \ 25 \ X + 999999$ , а  $G \ 25 \ Z + 999999$  (в следующем кадре). Кроме  $G$  в функциях, указанных в таблице, применяется  $G \ 33$  — режим *резьбонарезания*. С указанием этой команды в этом же кадре указывается длина нарезаемого участка (с адресом  $Z$ ), шаг резьбы (с адресом  $K$ ), выраженные в импульсах, а также число импульсов, соответствующее 1 обороту изделия (с адресом  $X$ ) и частота вращения шпинделя (с адресом  $S \leq 1800$  об/мин).

При этом зависимость между шагом резьбы ( $T$ ) и количеством импульсов, снимаемых с датчика резьбонарезания, следующая: при шаге резьбы при

$$\begin{aligned} T < 2,5 \text{ мм} & \ K2500 \ X = 256 \text{ импульсов;} \\ 2,56 < T < 5,12 \text{ мм} & \ K100 \ X = 512 \text{ импульсов;} \\ 5,12 < T < 10,24 \text{ мм} & \ K100 \ X = 1024 \text{ импульсов;} \\ 10,24 < T < 20,48 \text{ мм} & \ K100 \ X = 2048 \text{ импульсов;} \\ 20,48 < T < 40 \text{ мм} & \ K100 \ X = 4096 \text{ импульсов.} \end{aligned}$$

Все адреса записываются в порядке, соответствующем формату кадра в режиме длинных ( $D$ ) размеров (выражаемых шестизначными числами).

*Команда G 58 — смещение нулевой точки (ВВОД ПЛАВЛЮЩЕГО НУЛЯ)* осуществляется только в абсолютной системе (*G 27*) и является одним из видов коррекции, подобной коррекции положений инструментов, рассмотренной ниже. Эти два вида коррекции несовместимы в одном кадре. Величина и знак смещения набирается на пульте управления с помощью переключателей «смещение *OX*» и «смещение *OZ*».

Величина наибольшего смещения по каждой координате равна  $\pm 999999$  импульсов, что составляет  $\Delta Z = \pm 999,99$  мм и  $\Delta X = \pm 4999,995$  мм. Смещение нулевой точки обычно применяется с целью уменьшения расчетов при задании размеров детали от ее базовых поверхностей в двух случаях: а) смещение нулевой точки без задания величины перемещений и б) смещение нулевой точки при заданной величине перемещений. В первом случае с адресами команд *Z* и *X* пишутся нули, а величина смещения, набранная на переключателях, обрабатывается полностью, но с обратным знаком.

Например, если на переключателях набрано

$$\Delta Z = -1000, \text{ а } \Delta X = +800,$$

то система ЧПУ обрабатывает  $\Delta Z = +10$  мм и  $\Delta X = -4$  мм. В случае программирования величины перемещений по осям *Z* и *X* заданные координаты конечных точек при обработке будут изменены на величину коррекции, набранную на переключателях (также с обратным знаком). Так, при том же знаке значений  $-\Delta Z$  и  $+\Delta X$  и значениях координат конечных точек на ленте  $Z = -A$   $X = +B$  система образует

$$Z (A + \Delta Z) \text{ и } X (B - \Delta X).$$

Запись команд производится в следующей последовательности при скорости подачи 600 мм/мин (здесь функция *G 58* записывается отдельным кадром): № 001 *G 27 F 10600*; № 002 *G 58 LF*; № 003 *X + B Z - A, LF*. Функция *G 58* может записываться и в конце кадра после геометрической информации перед *LF*.

Рассмотрим особенности применения других команд.

*Величина подачи F* кодируется пятиразрядным числом. После *F* пишется цифра, выражающая режим движения: 1 — разгон, 2 — торможение, 7 — быстрый ход. Если скорость подачи в режиме разгона колеблется от 1 до 1200 мм/мин, то в режиме торможения она в 20 раз меньше. В режиме торможения диапазон подач шире за счет более широкого диапазона программируемых подач (от 1 до 2400 мм/мин). Значение скорости подачи программируется 4-разрядным числом, выраженным в мм/мин. Программируемая величина подачи сохраняется в последующих кадрах до ее изменения. Величина ускоренных

подач  $F_x = 2400$  мм/мин и  $F_z = 4800$  мм/мин записывается без указания их значения командой  $F 700000$ .

*Величины приращений по осям X и Z* для каждого участка траектории движения или значений координат конечной точки (при работе в абсолютной системе, как было указано ранее) выражаются 5-, 6- или 7-разрядными числами управляющих импульсов для коротких (при числе импульсов 0001...9999), средних (00001... 99999) или длинных (000001... 999999) размеров. При отсутствии паспорта станка выбор разряда чисел можно производить в зависимости от длины траекторий, выраженных в импульсах. После функций X и Z первым словом указывается знак приращений.

*При круговой интерполяции командой I 5...7 и K 5...7* указываются координаты начальной точки дуги окружности по осям OZ и OX 5-, 6- или 7-разрядным числом импульсов (в зависимости от K, C или D размеров) относительно начала координат (центра окружности). При этом координаты начальной точки указываются всегда со знаком «+». Дополнительно указываются величины приращений координат OX и OZ от начальной до конечной точки дуги с соответствующим знаком в зависимости от квадранта. Кроме этого следует учитывать, что в одном кадре задается отрезок дуги, соответствующий одному квадранту.

*Вспомогательные команды M3* выполняются, как правило, цикловой автоматикой станка, и они указываются в паспорте станка. Рекомендации ИСО приведены в табл. 3. При наличии после M цифры 1 вместо 0 отработка следующего кадра начинается после ответа автоматикой станка о выполнении команды (напр. M 105 вместо M 005 и др.). В кадре часто применяется несколько вспомогательных команд, не исключаящих одна другую.

*Частота вращения шпинделя S3.* Первое число после S также как и для функции M может быть 0 или 1 (с ответом о выполнении команды). Последующие два разряда указывают код скоростной ступени шпинделя по паспорту станка.

*Код № инструмента T3* относится к поиску инструмента при его замене другим инструментом. Последующее 2-разрядное число указывает номер инструмента. При этом для токарных станков прилагается спецификация нормализованных блоков, каждый из которых имеет инструмент с заданными настроечными параметрами относительно «0» точки блока. С помощью выступов на основании блока во время его смены происходит автоматический поиск блока с необходимым инструментом.

*Коррекция инструмента L2.* Условием для ее введения является режим линейной интерполяции (G01, G10 или G11). Ве-

Функции вспомогательных команд МЗ

Код	Назначение функции	Начало действия		Сохраняет до отмены или замены команды	Действует в пределах кадра	Примечание
		с начала обработки кадра	после завершения кадра			
M000	Запрограммированный стоп	0	1	0	1	Для продолжения работы нажать кнопку «пуск»
M001	Останов с подтверждением	0	1	0	1	
M002	Конец программы	0	1	0	1	Кнопка «Технологический останов» в положении «Включено»
M003	Вращение шпинделя по часовой стрелке	1	0	1	0	
M004	Вращение шпинделя против часовой стрелки	1	0	1	0	Выбор инструмента T3 (совместно)
M005	Останов шпинделя	0	1	1	0	
M006	Замена инструмента	0	1	0	0	Охлаждение туманом
M007	Включение охлаждения № 2	1	0	1	0	
M008	Включение охлаждения № 1	1	0	1	0	Охлаждение жидкостью
M009	Включение охлаждения	1	0	1	0	
M010	Зажим детали, стола	0	0	1	0	Отмена M7, M8, M50 и M51
M011	Отжим детали, стола	0	0	1	0	
M013	Вращение шпинделя по часовой и против часовой стрелки с включением охлаждения	1	0	1	0	
M014						
M015	Быстрое перемещение в направлении «+» и «-»	1	0	1	0	
M016						
M030	Конец с перемоткой ленты	0	1	0	1	
M036	Диапазоны подач № 1 и № 2	1	0	1	0	
M037						
M038	Диапазоны скоростей № 1 и № 2	1	0	1	0	
M039						
M050	Выключение и включение дополнительного охлаждения	1	0	1	0	
M051						
M055	Линейное смещение ин-та в положение № 1 и № 2	1	0	1	0	Жесткими упорами
M056						
M060	Смена заготовки	0	1	1	0	Фиксация по упорам
M061	Линейное смещение заготовки в положение № 1 и № 2	0	1	1	0	
M062						
M068	Зажим и отжим заготовки	0	0	1	0	
M069						
M071	Угловое смещение заготовки в положение № 1 и № 2	1	0	1	0	Фиксация по упорам
M072						
M079	Зажим стола	0	1	1	0	

Примечание. В пунктах 3, 4, 5, 6 цифрой «1» — показано применение функции G3, а «0» — ее отсутствие в кадре программы.

личина коррекции набирается перед началом работы на декадных переключателях (число декадных переключателей 18). Величина коррекции в пределах  $\pm 9999$  дискрет. Коррекция может быть трех видов: 1, 2 — одиночная коррекция по  $OX$  и 0; 3 — парная коррекция по обоим осям.

После буквы  $L$  указывается вид коррекции (1, 2 или 3), а затем № корректора (в младшем разряде), число которых 9 по каждой координате. Коррекция на переключателях набирается в виде количества дискрет, составляющих цену импульса 0,01 мм по  $OZ$  и 0,05 мм по оси  $OX$ . Величины коррекции, набранные на переключателях, алгебраически складываются с величинами приращений или конечных значений координат, указанных в кадре. Например, при кадре с работой в приращениях № 005  $26X + 4000Z - 5000G33LF$ . На декадном третьем переключателе координаты  $X$  было набрано  $L_x13 + 200$  и  $L_z23 - 300$ . В этом случае будет обработано:  $X = +4000 + (+200) = 4200$  импульсов;  $Z = -5000 + (-300) = -5300$  импульсов.

При работе в абсолютной системе в последующих кадрах коррекция отрабатывается до ее отмены. Например,

$$\begin{aligned} \text{№ 006 } G27 X - 030000 Z + 015000 L31 LF, \\ \text{№ 007 } X + 03000 LF. \end{aligned}$$

В первом корректоре  $L11$  набрано  $+200$  (по адресу  $X$ ); во втором корректоре  $L21$  набрано  $+100$  (по адресу  $Z$ ). Информация в накопителях  $H_x = -5000$ ;  $H_z = -2500$ .

В кадре № 6 будет отработано в виде координаты конечной точки

$$\begin{aligned} X &= -30000 + 200 - (-50000) = 20200 \text{ имп}; \\ Z &= +15000 + 100 - (-25000) = 40100 \text{ имп}. \end{aligned}$$

В кадре № 7 будет отработано

$$X = +3000 + 11 - H_x = 30000 + 200 - (-50000) = 80200 \text{ имп}.$$

При обработке многоступенчатых валиков на токарных полуавтоматах с ЧПУ величина на коррекции диаметральных размеров и длин вводится на координаты начальной точки участка траектории, выполняемой на рабочей подаче (соответствующей заданной шероховатости обрабатываемой поверхности). В качестве настроечных параметров при расчете программы принимаются размеры диаметров и длин детали, соответствующие середине поля допуска.

Величину коррекции рекомендуется определять как разность положений инструментов, соответствующих фактическим размерам, минимальному предельному размеру для вала и максимальному предельному размеру для отверстия. При этом

фактические размеры следует определять на специально отобранных деталях с минимальным припуском на обработку. В случае случайного выбора деталей следует учитывать возможность быстрого начального износа инструментов и погрешностей настройки в пределах 0,05...0,1 мм.

*Отмена коррекции* программируется командой G40 с дополнительным указанием номера корректора L2 на декадном переключателе и отрабатывается с противоположным знаком при работе в приращениях или суммируется с информацией в накопителях при работе в абсолютной системе. Например, на третьем переключателе координаты X было набрано L13" + 200" и координаты «Z» — 300". В кадре, программирующем отмену коррекции, будет записано значение перемещения в отклонениях без учета коррекции. Например, X = +3000 Z = —4000 в кодированной записи

G 40 X + 3000 Z — 4000 L 33 LF.

При этом будет отработано

$$\begin{aligned} X &= 3000 + (-200) = 2800 \text{ имп}; \\ Z &= -4000 + (+300) = 4300 \text{ имп}. \end{aligned}$$

При работе в абсолютной системе, если информация в накопителях была,  $H_x = -4000$  имп;  $H_z = -2000$  имп.

При этом же наборе переключателей будет отработано

$$\begin{aligned} X &= 4000 - H_x = 4000 - (-4000) = 8000 \text{ имп}. \\ Z &= 3000 - H_z = 3000 - (-2000) = 5000 \text{ имп}. \end{aligned}$$

Таким образом, команда отмены коррекции программируется отдельным кадром вместе с геометрической информацией. После выполнения вводится повторно в каждом кадре.

#### 4.4. ФОРМАТ КАДРА И КОМАНДЫ ПРИ ТРЕХКООРДИНАТНОЙ ОБРАБОТКЕ

Исходные данные при трехкоординатной обработке кодируются также в виде отдельных кадров программы, соответствующих отдельным участкам обрабатываемого контура и необходимой дополнительной информации. Кодирование информации покажем на примере применения системы ЧПУ «НЗЗ-2М», применяемой для фрезерных станков. Формат кадра этой системы ЧПУ можно записать в следующем виде

№ 3, G2, X±6, Y±6, Z±6, I±6; J±6, K±6, F4, T2, S2, M2, L2, LF,

Слово № 3 означает № кадра, выраженный трехразрядным числом (от №001 до №999). Слово G2 — код подготовительной

функции, выраженный двухразрядным числом. Значения кода подготовительной функции следующие;

G01 — линейная интерполяция;

G02 — круговая интерполяция по часовой стрелке;

G03 — круговая интерполяция против часовой стрелки;

G04 — блокировка (прекращение) подачи во время выполнения кадра;

G17 — обработка в плоскости $XU$	} Применяется только при круговой интерполяции.
G18 — обработка в плоскости $XZ$	
G19 — обработка в плоскости $YZ$	

G36 — установка в нулевое положение;

G40 — введение коррекции со знаком, противоположным набранному на переключателе блока коррекции;

G41 — коррекция на длину инструмента положительная;

G42 — коррекция на радиус инструмента положительная при движении инструмента по часовой стрелке;

G43 — коррекция на радиус инструмента положительная — против часовой стрелки;

G50 — отмена коррекции на радиус фрезы при отходе от контура;

G51 — коррекция на длину инструмента отрицательная;

G52 — коррекция на радиус инструмента отрицательная при движении инструмента по часовой стрелке;

G53 — коррекция на радиус инструмента отрицательная — против часовой стрелки;

Следует подчеркнуть, что *коррекция на радиус инструмента применяется лишь для участков окружности, соответствующих полному квадранту*, когда начальная и конечная точки лежат на осях координат. *Коррекция на радиус фрезы* (сдвиг траектории движения) *при ее движении по прямолинейным траекториям возможна только, если они параллельны осям координат.*

Слова  $X \pm 6$ ,  $Y \pm 6$  и  $Z \pm 6$  обозначают код величины перемещений по соответствующим осям, представленной величиной приращений координат данного участка от начальной точки участка до конечной и выраженной знаком перемещения и шестизначным числом импульсов (наибольшие перемещения в импульсах для данного станка по оси  $OX$  до 090000, по оси  $OY$  до 031000, по оси  $OZ$  до 042000).

Слова  $I + 6$ ,  $J + 6$  и  $K + 6$  обозначают код при круговой интерполяции, применяемой одновременно с подготовительными функциями G17 или G18, или G19 для участков дуги окружности, расположенных в соответствующих плоскостях. При этом числовая информация выражается 6-разрядным числом импульсов, соответствующих величине расстояния от центра окружности до начальной точки заданного участка окружности

в направлении соответствующих осей  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$ , что косвенным образом определяет радиус интерполируемого участка дуги.

Следует иметь в виду, что круговая интерполяция дуги окружности осуществляется только в одной из трех плоскостей, главным образом плоскости  $XU$ , методом оценочной функции, которая в плоскости  $XOU$  имеет вид

$$F = x^2 + y^2 - R^2,$$

где  $X$  и  $Y$  — приращения координат  $X$  и  $Y$ ;

$R$  — радиус дуги окружности, выраженной расстоянием от оси окружности до начальной точки этой дуги, в направлении осей  $X$  и  $Y$ .

Слово  $F4$  обозначает код величины скорости подачи, выраженный 4-разрядным числом.

Первая цифра кода обозначает режим подачи. Для рассматриваемого станка предусматриваются два режима.

1. *Нормальный режим*, обозначаемый цифрой «0», при котором в процессе обработки текущего кадра СЧПУ автоматически устанавливается режим разгона или торможения в случаях изменения скорости подачи в следующем кадре. Торможение происходит в конце текущего кадра, а разгон в начале следующего кадра.

2. *Режим с торможением до фиксированной скорости* обозначается цифрой 4. При этом в конце обработки текущего кадра происходит снижение скорости подачи до 240 мм/мин (400 Гц) с последующим разгоном до заданной скорости в следующем кадре.

Следует учитывать, что в случае, если скорость подачи в следующем кадре не изменяется, то при нормальном режиме она не указывается, а при режиме с торможением указывается в каждом кадре.

Вторая цифра кода подачи является десятичным множителем для последующих цифр, выражающих значение скорости подачи, величина которого на три больше, чем количество цифр слева от запятой значения величины скорости подачи.

Код подачи, $F$	Скорость подачи, мм/мин
0712	1200
0660	600
0640	400
0560	60
0525	25
0360	0,6
0310	0,1

Третья и четвертая цифры кода подачи показывают значение скорости подачи в мм в минуту с учетом десятичного множителя, выраженного второй цифрой кода. Например, при нормальном режиме код подачи F0748 выражает скорость подачи 4800 мм/мин (максимальная скорость подачи).

Следует учитывать, что минимальное значение скорости подачи равно 0,1 мм/мин.

Слова T2 и S2 — обозначают коды, указывающие соответственно номер инструмента и частоты вращения шпинделя, выраженные двухразрядными числами. В случаях, если смена инструментов и изменение частоты вращения шпинделя производятся оператором вручную, то эти команды обычно не программируются.

При определении режимов обработки для соответствующих участков контура следует иметь в виду, что на станке можно применять следующий ряд частот вращения шпинделя: 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250 и 1600 об/мин (с знаменателем геометрической прогрессии  $\varphi = 1,25$ ).

Слово M2 показывает коды вспомогательных команд (вспомогательные функции), выраженные двухразрядным числом. В рассматриваемой СЧПУ применяются следующие вспомогательные функции:

M03 — вращение шпинделя по часовой стрелке;

M04 — вращение шпинделя против часовой стрелки;

M05 — стоп шпиндель (отмена команд M03 и M04);

M06 — запрограммированный стоп, при котором происходит выключение вращения шпинделя, подачи и охлаждения (применяется перед сменой инструмента);

M08 — включение охлаждения;

M09 — выключение охлаждения.

Слово L3 обозначает код команды, применяемой при введении коррекции размеров обрабатываемого контура. Вид коррекции определяется одновременной записью одной из вспомогательных функций G41, G42, G43, G51, G52 или G53, как отмечено ранее; коррекция размеров осуществляется за счет изменения траектории движения инструмента при обработке участков с повышенной точностью при компенсации износа инструмента или компенсации погрешностей настройки.

Первая цифра кода обозначает корректируемые параметры по направлению осей координат:

Цифра	Коррекция
1	по оси X;
2	по оси Y;
3	по осям X и Y одновременно;

4	по оси $Z$
5	по осям $X$ и $Z$ одновременно;
6	по осям $Y$ и $Z$ ;
7	по осям $X$ , $Y$ , $Z$ одновременно.

Для СЧПУ НЗЗ-2М при коррекции радиуса окружности лежат на оси  $OX$ , а два — на оси  $OY$ .

*Вторая и третья цифры* кода указывают № переключателя блока коррекции, где оператором набирается величина коррекции, выражаемая числом импульсов со знаком коррекции, определяемой функциями  $G41...G53$  (см. обозначение этих функций). В процессе работы величину коррекции можно установить после обработки и контроля размеров первой детали, заготовку которой целесообразно подбирать с минимальным припуском по поверхности, размер которой подлежит коррекции. Слово *LF* обозначает конец кадра.

*Начало программы* обозначается символом %, а *конец* — вспомогательной функцией MO2. После записи программы в символическом виде в форме столбца со строчками, соответствующими порядковым номерам кадров, программа переносится на перфоленту с применением кода ИСО (*ISO-7 bit*).

#### 4.5. ПРИМЕР РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА

Составление таблицы исходных данных и символическую запись программы дополнительно рассмотрим на конкретном примере фрезерования наружного контура рычага и обработки отверстия на вертикально-фрезерном станке 6М 13ГН-1Н с СЧПУ НЗЗ-2М (рис. 28, вкладка). Отмечены начальная точка 0 и траектории движения инструмента при фрезеровании контура и расточной головки при расточке отверстия. При наладке станка происходит установка исходного положения фрезы с координатами  $X = 0$ ,  $Y = 60$  мм,  $Z = 50$  мм. Затем ускоренное перемещение в точку 1 и фрезерование контура с движением фрезы по эквидистанте к контуру детали через точки 1, 2...10, 2, 1 с возвратом в начальную точку. После этого происходит смена фрезы на расточную головку и осуществляется расточка отверстия. После обработки отверстия снова устанавливается фреза и цикл повторяется. Исходные данные для указанной операции показаны в табл. 4, а программа — в табл. 5.

Нанесение программы на перфоленту производится в порядке записи, соответствующей последовательности движения инструментов, показанной на карте эскизов (см. рис. 27) и табл. 4.

Таблица исходных данных (РГК)

№ п.к. Начных точек	Наименование перехода	Координаты точек		Приращение координат	об/мин	мм/мин	Охлаж- дение	Участки
		X	Y					
0	Начальная точка	0	60,00	0	0	0	нет	—
1	Ускоренный подвод	0—1	0	—2,00	0	480	нет	0—1
2	Подвод фрезы	1—2	15,00	—2,00	800	120	есть	1—2
3	Фрезерование прямого участка	2—3	45,00	—2,00	800	120	—	2—3
4	Фрезерование дуги	3—4	65,00	—2,00	800	120	—	3—4
5	Фрезерование прямого участка	4—5	107,00	—2,00	800	120	—	4—5
6	Фрезерование дуги	5—6	134,00	—2,00	800	120	—	5—6
7	Фрезерование дуги	6—7	107,00	—2,00	800	120	—	6—7
8	Фрезерование дуги	7—8	55,00	—2,00	800	120	—	7—8
9	Фрезерование дуги	8—9	35,00	—2,00	800	120	—	8—9
10	Фрезерование дуги	9—10	10,00	—2,00	800	120	—	9—10
12	Фрезерование дуги	10—2	15,00	—2,00	800	120	—	10—2
1	Отвод стола	0	0	—2,00	800	120	—	2—1
0	Ускоренный отвод	0	60,00	0	—	480	нет	1—0
	Смена инструмента	0	60,00	0	0	0	нет	0
11	Подвод инструмента	67,00	38,00	50,00	125	240	—	0—11
12	Подвод инструмента	67,00	38,00	25,00	125	240	—	0—11
13	Расточка	67,00	38,00	4,00	125	50	есть	11—11
14	Вывод инструмента	67,00	38,00	50,00	125	50	есть	11—11
15	Отвод инструмента в начальную точку	0	60,00	—67,00	125	480	нет	11—11

## Программа обработки детали

Программа	Пояснения и примечания
%	Начало программы
№ 001 G 01 Y—006000 Z—005200 F 0648 LF	Уч. 0—1 Подвод с $S = 480$ мм/мин
№ 002 X+001500 Y+002000 F 4612 M03 LF	Уч. 1—2. $S = 120$ мм/мин
№ 003 X+003000 Y+004000	Уч. 2—3
№ 004 G 17 LF	Выбор плоскости XY
№ 005 G 02+X+002000 Y+001000 I+002000 j+001500 LF	Уч. 3—4
№ 006 G 01 X+004200 LF	Уч. 4—5
№ 007 G 02642 X+002700 Y+002700 Z+002700 L 210	Уч. 5—6. Предусмотренная коррекция
№ 008 X+002700 Y+002700 T+002700 Z 111 LF	Уч. 6—7
№ 009 G 03 X—005200 Y—002600 J+006500 LF	Уч. 7—8
№ 010 G 02 X—002000 Y—001000 I+002000 j+001500 LF	Уч. 8—9
№ 011 X—002500 Y+002500 J+002500 LF	Уч. 9—10
№ 012 X+000500 Y+001500 I+002500 LF	Уч. 10—2
№ 013 01 X—001500 Y—002000 LF	Уч. 2—1
№ 014 Y+006000 Z+005200 F 4648 M 06 LF	Уч. 1—0 Ускоренный отвод и остановка вращения инструмента
№ 015 X+006700 Y—002200 F 4624 M 03 LF	Ускоренный подвод
№ 016 Z—002500 LF	
№ 017 Z—002100 F 0550 LF	Расточка отверстия
№ 018 Z+004600 LF	Вывод ин-га
№ 019 X—006700 Y+002200 F 4648 LF	Отвод в начальную точку
№ 020 M02 LF	Конец программы

## 4.6. КОНТРОЛЬ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ

Как было показано на рис. 23 и рассмотренном примере (п. 4.5), при ручном программировании программа сначала записывается в виде таблицы, затем переносится на перфоленту с помощью перфораторов. Как правило, в таком виде поступает в работу на устройство ввода программы пульта станка. При управлении станка от магнитной ленты производится запись программы с перфоленты на магнитную ленту. При ма-

шинном программировании с ЭВМ программа поступает в готовом виде.

Учитывая наличие разнообразных стадий при разработке программ и возможность ошибок, во избежание брака деталей осуществляется контроль управляющих программ. В качестве распространенных методов контроля применяются:

1. Предварительное прочерчивание траекторий движения инструментов на координатографе, что обычно применяется для фрезерных и токарных станков;

2. Для исключения ошибок при перфорации выполняется два экземпляра программы двумя исполнителями и производится сравнение их на приборе УПДЛ комплекта «Брест 1»;

3. Проверка программы на холостом ходу станка (без обработки детали);

4. Обработка детали из легкообрабатываемых материалов (древесины, легких сплавов);

5. Обработка детали с припуском при точении и уменьшенным диаметром фрезы при фрезеровании;

6. Обработка первой детали с тщательным контролем и при необходимости с введением коррекции размеров.

Точность работы станков с ЧПУ проверяется по тестовым программам, прилагаемым к паспорту станка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Евстигнеев М. И. и др.* Изготовление основных деталей авиадвигателей. /Под редакцией А. В. Подзья. — М., Машиностроение, 1972.
2. *Евстигнеев М. И.* Автоматизация технологических процессов в авиадвигателестроении. — М.: Машиностроение, 1982.
3. Основы автоматического регулирования и управления. /Под редакцией В. М. Пономарева и А. П. Литвинова. — М.: Высшая школа, 1974.
4. *Шарин Ю. С.* Подготовка программ для станков с ЧПУ. — М.: Машиностроение, 1980.
5. Станки с программным управлением. Справочник. — М.: Машиностроение, 1975.
6. Инструкция ЦКБ по программированию для Н221М, 1974.
7. Станки с программным управлением (специальные) /Под редакцией В. А. Леценко. — М.: Машиностроение, 1979.
8. *Дудников В. Т.* Автоматизация технологических процессов в авиадвигателестроении. — Куйбышев: КуАИ, 1978.

<b>О Г Л А В Л Е Н И Е</b>	
<b>В в е д е н и е</b>	<b>3</b>
<b>1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ</b>	<b>9</b>
1.1. Основные понятия и определения	9
1.2. Особенности звеньев технологических САУ	10
1.3. Определение передаточной функции электрохимической ячейки	11
1.4. Электрические двигатели	15
1.5. Уравнения движения и передаточные функции двигателя постоянного тока с независимым возбуждением	16
1.6. Гидравлические исполнительные механизмы. Определение передаточной функции ПИМ	18
1.7. Правила структурных преобразований	21
1.8. Системы регулирования процесса электрохимической размерной обработки	22
1.9. Аналоговые системы автоматического управления. Передаточная функция двигателя серии ПБСТ со встроенным тахогенератором	28
1.10. Особенности работы копируемых следящих систем. Однокоординатное и двухкоординатное копирование	28
1.11. Гидравлические следящие системы	30
1.12. Устойчивость ГСС	35
1.13. Системы автоматического управления с компенсацией упругих перемещений системы СПИД	36
<b>2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА. ЧИСЛОВОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ</b>	<b>37</b>
2.1. Материально-техническая основа автоматизации операций	37
2.2. Путевое управление	39
2.3. Программное управление с цифровой индикацией	41
2.4. Системы и станки с числовым программным управлением	41
2.5. Классификация систем ЧПУ	48
2.6. СЧПУ с вводом программы на магнитной ленте	50
2.7. Классификация станков с ЧПУ	51
<b>3. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНКОВ С ЧПУ</b>	<b>53</b>
3.1. Основные этапы проектирования технологических процессов изготовления деталей на станках с ЧПУ	54
3.2. Разработка классификатора деталей	55
3.3. Разработка рекомендаций по изменению чертежей	55

3.4. Выбор прогрессивных заготовок деталей . . . . .	56
3.5. Составление маршрутной технологии . . . . .	57
3.6. Указания по выбору станков и систем с ЧПУ . . . . .	58
3.7. Разработка операционных карт обработки на станках с ЧПУ . . . . .	60
3.8. Разработка карт эскизов . . . . .	61
3.9. Траектории движения инструментов позиционных СЧПУ . . . . .	61
3.10. Траектории движения инструментов непрерывных СЧПУ . . . . .	63
4. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ . . . . .	68
4.1. Системы кодирования (символика) информации СЧПУ Код БЦК-5 . . . . .	68
4.2. Код ИСО ( <i>ISO-7 bit</i> ). Запись программы с использованием этого кода . . . . .	72
4.3. Формат кадра и команды управляющих программ системы ЧПУ H221 . . . . .	74
4.4. Формат кадра и команды при трехкоординатной обработке . . . . .	83
4.5. Пример разработки программы для вертикально-фрезерного станка . . . . .	87
4.6. Контроль управляющих программ . . . . .	89
Л и т е р а т у р а . . . . .	90

Св. план 1985, поз. 917

*Василий Тимофеевич Дудников*

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Учебное пособие

Редактор Л. М. Балыкова  
Тех. редактор Н. М. Каленюк  
Корректор Н. С. Куприянова

Сдано в набор 13.08.85 г. Подписано в печать 4.11.85 г.  
ЕО 00444. Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.  
Усл. п. л. 5,3 + 1 вкладка. Уч.-изд. л. 5,0. Т. 500 экз.  
Заказ 589. Цена 20 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт им. академика С. П. Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Гип. УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.