

Министерство высшего и среднего
специального образования РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. С.П. КОРОЛЕВА

В.Т. Дудников

АВТОМАТИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Учебное пособие

Утверждено редакционно-издательским
советом института 6.10.77 г.

Куйбышев 1978

УДК 62 - 501 (075)

Настоящее учебное пособие содержит изложение основных вопросов теории автоматического управления, связанных с анализом работы и практическим использованием САУ и СЧПУ, которые являются основной материально-технической базой комплексной автоматизации современного авиадвигателестроения.

Пособие отражает часть курса "Автоматизации технологических процессов", изучаемого студентами (спец. 0537 и 0538) авиационного института.

Доп. план 1978 г., поз. 60.

Рецензенты: доктор технических наук
профессор К л е б а н о в М.К.,
кандидат технических наук
доцент В е р е т е н н и к о в Е.А.

Дудников Василий Тимофеевич

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие

Редакторы: О.Б.Хнырева, С.С.Рубан
Техн. редактор Н.М.Каленик

Подписано в печать 21.08.78. ЕО 05063

Формат 60x84/16. Бумага оберточная белая.

Оперативная печать. Усл.печ.л. 4,85.

Уч.-изд.л. 5,0. Тираж 700 экз. Заказ № 6368

Цена 18 коп.

Куйбышевский ордена трудового Красного Знамени
авиационный институт имени С.П.Королева,
ул. Молодогвардейская, 151.

Ротаприятный цех областной типографии им. В.Л.Мяги,
г. Куйбышев, ул. Венцека, 60.

© Куйбышевский авиационный институт, 1978

В В Е Д Е Н И Е

Слово "автоматизация" происходит от греческого слова " *автоматос* ", что означает "самодвижущийся".

Понятие "автоматизация технологических процессов авиадвигателестроения", как и других отраслей 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:

- малую автоматизацию или элементы автоматизации;

- автоматизацию операций производственного процесса;
- комплексную автоматизацию;
- автоматическое производство.

Применение средств малой автоматизации, таких как автоматические остановы, контроль размеров в процессе обработки, автоматическая защита от перегрузки приводов и рабочих от травматизма и т.п. решают 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 преимущественно применения серийного производства, в последнее время определились конкретные пути автоматизации всех технологических процессов.

Основной материально-технической базой автоматизации современного авиадвигателестроения является создание многокомнатного автоматизированного поточного производства на базе:

- для непрерывных процессов - систем автоматического управления (САУ),
- для циклических процессов - станков и других рабочих машин с системами числового программного управления (СЧПУ).

Особо важное значение для изготовления сложных крупногабаритных деталей имеет применение многоцелевых (многопозиционных) станков ЧПУ и агрегатных станков.

- для непрерывно-циклических процессов - комплексное использование САУ и ЧПУ.

Это, однако, не исключает применения автоматического оборудования, широко применяемого в массовом производстве двигателей в автомобилестроении и тракторостроении, с управлением на базе цикловой автоматики, в особенности для отдельных деталей с большой программой выпуска, таких как лопатки компрессоров и т.п. Комплексная автоматизация и в условиях серийного производства требует создания транспортных систем и накопителей, включающих автоматические питатели и промышленные роботы, и на этой основе создания автоматизированных участков однотипных деталей и узлов.

Успешное применение систем автоматизации производства авиационных двигателей предполагает организацию производства и календарного планирования на базе широкого применения ЭВМ.

Для видов автоматизации высокого уровня, таких как комплексная автоматизация и автоматическое производство, характерны качественные изменения не только в материально-технической базе производства, но и в его организации и управлении. При этом изменяется и труд самих рабочих, уменьшается доля ручных работ, возрастает значение квалифицированного 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 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 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 эксплуатации большого числа малоквалифицированных рабочих, не отвечает социальным проблемам автоматизации советского авиадвигателестроения.

XXV съезд КПСС наметил грандиозный план X пятилетки. С повышением эффективности и качества работы всех звеньев народного

хозяйства, в авиадвигателестроении, как одной из ведущих отраслей машиностроения, предусматривается дальнейшее улучшение надежности, ресурса и других качественных характеристик изделий, повышение производительности труда за счет внедрения достижений научно-технического процесса, более широкое применение приборов, средств автоматизации, систем автоматического управления, более производительных методов изготовления точных заготовок с малыми припусками, более полного использования производственного оборудования. Предусматривается создание комплексов оборудования, управляемых от ЭВМ. На основе совершенствования производства планируется значительное увеличение выпуска высококачественных двигателей для нужд народного хозяйства и обороны нашей Родины.

В настоящем пособии излагается лишь часть курса "Автоматизации технологических процессов в авиадвигателестроении".

В первой главе даются необходимые сведения теории автоматического управления с рассмотрением систем, получивших широкое применение.

Во второй главе излагаются системы ЧПУ с анализом типовых схем.

Излагаемый материал является теоретической основой для анализа работы и других систем автоматического управления, применяемых в авиадвигателестроении.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

§ 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; парового котла - уровень воды и давление пара; двигателя внутреннего сгорания - число оборотов; станков ЭХО - зазор между электродом и деталью; металлорежущих станков - точность размеров деталей.

Действия, связанные с достижением необходимых параметров процесса при работе промышленного объекта, называются у п р а в -

лением, 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 воздействуют 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. $x_{вх} = const$;

- 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 обеспечивают 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.

§ 2. Понятие о звеньях систем

Всякая САУ состоит из целевых конструктивных элементов или звеньев. Звенья классифицируются по физической природе (механические, электрические, гидравлические и др.), по целевому назначению и динамическим характеристикам.

Выделяют следующие звенья по целевому назначению:

- управляемые объекты;
- чувствительные элементы - датчики;
- промежуточные элементы - усилительные, преобразующие, вычислительные;
- исполнительные элементы, осуществляющие управляющее воздействие на промышленный объект.

В основе классификации звеньев по динамическим характеристикам лежат математические зависимости между их входной и выходной величиной, независимо от физической природы и других характеристик; в автоматике они принимаются за типовые звенья.

К типовым звеньям относятся:

- позиционные, простейшим из которых является усилительное, когда выходная величина $x_{вых} = K x_{вх}$;

- интегрирующие, когда

$$x_{вых} = \int x_{вх}(t) dt;$$

- дифференцирующие, когда $x_{вых} = \frac{dx_{вх}(t)}{dt}$.

Обычно выделяется 10 типовых звеньев, основные характеристики которых рассмотрены в § 5, табл.1.

Особенность типовых звеньев состоит в том, что они описываются дифференциальными уравнениями не выше второго порядка. Если реальные физические звенья могут описываться уравнениями более высокого порядка, то их можно разделить на эквивалентные типовые звенья. Это бывает необходимо для качественной оценки систем, или при анализе их работы методом логарифмических частотных характеристик, которые здесь не рассматриваются.

Деление звеньев на типовые имеет важное практическое значение при агрегатном принципе построения САУ. Для этого разработан и выпускается промышленностью ряд конструктивных блоков и прибо-

ров, соответствующих как отдельным звеньям, так и комплексу типовых звеньев. На основе этого принципа созданы электронная агрегатная унифицированная система ЭАУС, пневматическая ПАУС и унифицированная система автоматического контроля, сигнализации и регулирования УСАКР. Применение унифицированных блоков этих систем позволяет быстро создавать дешевые высококачественные САУ.

§ 3. Уравнения и передаточные функции звеньев САУ

Уравнения звеньев могут выражаться алгебраическими зависимостями, дифференциальными или интегральными уравнениями связи между выходной и входной величиной, а при необходимости и главными возмущающими воздействиями.

В автоматике эти уравнения связи принято выразить в малых отклонениях, в безразмерном виде и операторной форме. Выражение уравнений в малых отклонениях позволяет установить поведение звена при изменениях входной величины, его реакцию на внешние воздействия. Безразмерный вид уравнений упрощает их использование. дает возможность суммировать сигналы независимо от их физической природы, т.е. применять принцип суперпозиции (принцип независимости сигналов, аналогичный принципу независимости сил в механике).

При представлении дифференциальных и интегральных уравнений в операторной форме используется преобразование Лапласа, где функция $f(t)$ преобразуется в другую функцию $F(p)$, по формуле:

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt \quad (I)$$

где: $p = \sigma + i\varepsilon$, при $\sigma > 0$, p - комплексная переменная и записывается $f(t) \leftrightarrow F(p)$

(направление стрелки изменять нельзя).

$F(p)$ называется изображением функции $f(t)$.

Как правило, время подачи управляющего воздействия можно принимать за начало отсчета и рассматривать реакции звеньев и систем при нулевых начальных условиях, соответствующих отсутствию избытка энергии в системе.

В этом случае преобразование Лапласа упрощается и сводится к формальным правилам вида:

- алгебраические зависимости в виде коэффициентов при пара-

метрах и их производных не изменяются,

- дифференциальные зависимости преобразуются :

$$\frac{dx}{dt} \rightarrow \rho x; \quad \frac{d^2x}{dt^2} \rightarrow \rho^2 x; \quad \dots \quad \frac{d^n x}{dt^n} \rightarrow \rho^n x, \quad (2)$$

- интегральные зависимости:

$$\int x(t) dt \rightarrow \frac{x(\rho)}{\rho} \quad \iint x(t) dt^2 \rightarrow \frac{x(\rho)}{\rho^2}.$$

Таким образом, если уравнение связи параметров звена или системы получено в виде:

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^4 x_{\beta_0/x}}{dt^4} + a_1 \frac{d^3 x_{\beta_0/x}}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 x_{\beta_0/x}}{dt^2} + a_3 \frac{dx_{\beta_0/x}}{dt} + a_4 x_{\beta_0/x} = \\ = b_0 \frac{d^2 x_{\beta x}}{dt^2} + b_1 \frac{dx_{\beta x}}{dt} + a_2 x_{\beta x}, \end{aligned} \quad (3)$$

то при нулевых начальных условиях в операторной форме выразится:

$$\begin{aligned} a_0 \rho^4 x_{\beta_0/x} + a_1 \rho^3 x_{\beta_0/x} + a_2 \rho^2 x_{\beta_0/x} + a_3 \rho x_{\beta_0/x} + a_4 x_{\beta_0/x} = \\ = b_0 \rho^2 x_{\beta x} + b_1 \rho x_{\beta x} + a_2 x_{\beta x}. \end{aligned} \quad (4)$$

Отношение выходной величины к входной при нулевых начальных условиях, выраженное в операторной форме (изображении Лапласа), называется передаточной функцией звена (системы).

Для рассмотренного уравнения передаточная функция имеет вид:

$$W(\rho) = \frac{x_{\beta_0/x}(\rho)}{x_{\beta x}(\rho)} = \frac{b_0 \rho^2 + b_1 \rho + b_2}{a_0 \rho^4 + a_1 \rho^3 + a_2 \rho^2 + a_3 \rho + a_4}. \quad (5)$$

При этом обычно порядок производных в числителе меньше, чем в знаменателе.

Определение передаточной функции звеньев САУ производится в следующей последовательности:

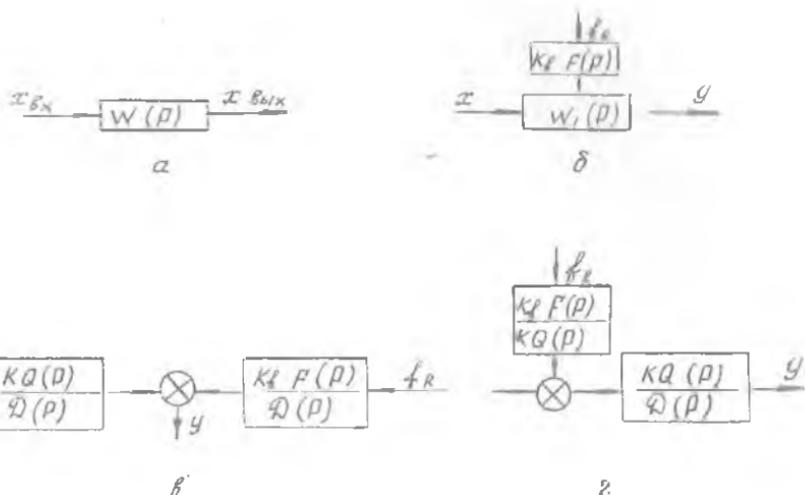
1. Исходя из физической природы звеньев, устанавливается связь между входными и выходными параметрами, а также главными возмущениями (чаще всего в форме дифференциальных уравнений). Значения коэффициентов и производных выходной координаты пишутся в левой части уравнения, а входной координаты и возмущений - в правой.

2. Эти уравнения выражаются в малых отклонениях параметров.

3. Получение выражения связи параметров делится на базисные значения этих же параметров. В результате этого получаются уравнения в малых отклонениях и безразмерном виде.

4. Применяя формулы преобразования, уравнения выражаются в операторном виде; определяются передаточные функции звеньев.

5. Затем звенья представляются в структурном виде (рис.1а).



Р и с. 1. Структурные схемы звеньев систем: а - структурная схема звена; б - структурная схема звена при наличии возмущения; в - представления возмущения на выходе звена; г - возмущение на входе звена

К технологическим системам автоматического управления, как правило, предъявляются повышенные требования по точности, и в этом случае приходится учитывать влияния 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:

$$D(p)y = Q(p)x + fF(p)f_R, \quad (6)$$

где: $D(p)$ - полином характеристического уравнения

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

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

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

$$W_i(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{Q(p)}{D(p)}, \quad (7)$$

где: f_R - безразмерное значение возмущения.

При $x = 0$ - передаточная функция по возмущению определяется:

$$W_2(p) = \frac{y(p)}{f_R(p)} = \frac{P(p)}{D(p)}. \quad (8)$$

В этом случае структурная система управляемого объекта или исполнительного органа представляется в другом виде (рис.1б).

Представим возмущение на выходе звена, для чего уравнение (6) выразим:

$$y = \frac{Q(p)}{D(p)} x + \frac{P(p)}{D(p)} f_R. \quad (9)$$

Структурная схема принимает вид, показанный на рис.1в.

Отсюда вытекает такое правило: для представления возмущения на выходе объекта, необходимо уравнение связи между входной, выходной величиной и главным возмущением разделить на характеристический полином.

Для изображения возмущения на входе объекта преобразуем уравнение (6) к виду:

$$D(p)y = Q(p) \left[x + \frac{P(p)}{Q(p)} f_R \right], \quad (10)$$

и тогда структурная схема объекта представится в виде, показанном на рис.1г.

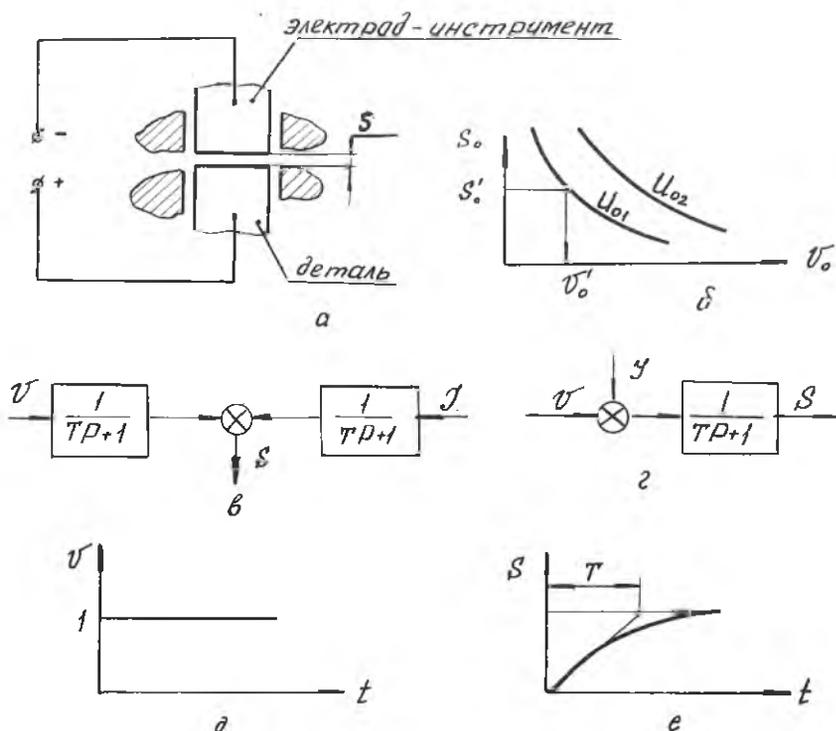
Сравнивая две последние структурные схемы, можно сформулировать правило переноса возмущений: при переносе возмущения на вход звена необходимо передаточную функцию по возмущению разделить на передаточную функцию по управляющему воздействию.

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

§ 4. Примеры реальных звеньев (элементов) систем автоматического управления. Определение передаточной функции электрохимической ячейки

В процессе электрохимической обработки происходит растворение обрабатываемой детали, являющейся анодом при относительной стабильности инструмента-катода. Анод-деталь и катод-инструмент в проточном электролите образуют электрохимическую ячейку (ЭХЯ). Зазор между электродами является выходной величиной, а скорость перемещения электрода-инструмента v - входной величиной (рис.2а).

Главными возмущающими воздействиями на управляемый объект являются колебания напряжения на электродах и изменение электропроводности электролита γ .



Р и с. 2. Электрохимическая ячейка: а - принципиальная схема; б - статическая характеристика; в, г - структурные схемы; д, е - единичное ступенчатое возмущение и временная переходная характеристика

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

За технологические параметры принимаются:

1. Напряжение на электродах U - 10 - 15в.
2. Плотность тока $j = 10-100$ а/см².
3. Скорость перемещения электрода-инструмента $v = 0,2 - 2$ мм/мин.

4. Зазор между электродами $S = 0,1 - 0,8$ мм.

Выбор оптимальных технологических параметров зависит от обрабатываемого материала, неравномерности припуска, состава и параметров потока электролита и от точности обработки.

Изменение межэлектродного зазора можно выразить уравнением

$$S = S_H - v dt + v_p dt, \quad (I1)$$

где S_H - начальный зазор;

v - скорость электрохимического растворения;

t - время.

Разделив на dt , получим:

$$S' = -v + v_p, \quad (I2)$$

где S' - скорость электрохимического растворения.

По закону Фарадея масса растворенного вещества определится из формулы

$$dm = \rho F v_p dt = \eta K J dt, \quad (I3)$$

где ρ - плотность обрабатываемого материала;

F - площадь поверхности электрода;

η - выход по току;

K - электрохимический эквивалент;

J - ток.

Из последнего равенства получим:

$$v_p = \frac{\eta K J}{\rho F} \quad (I4)$$

По закону Ома

$$\eta = \frac{(U - e) \nu F}{S} \quad (I5)$$

где $\frac{S}{e}$ - ЭДС поляризации,

ν - удельная электропроводность электролита.

Подставляя значения (I4) и (I5) в уравнение (I2), определим:

$$S' = -v + \frac{\eta K (U - e) \nu F}{\rho S} \quad (I6)$$

Для установившегося режима ($S' = 0$)

$$v_p = \frac{\eta K (U_0 - e) \nu_0}{\rho S_0} \quad (I7)$$

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:

$$\nu_0 = \beta \cdot S_0^m, \quad (I8)$$

где m - показатель степени;

S_0 - зазор [мм].

При обработке жаропрочных материалов с использованием водного раствора $NaCl$ $m \approx 0,35$; $\beta = 0,1 - 0,13$. С учетом этого связь между параметрами в установившемся режиме определится:

$$v_0 = \frac{\gamma K (U_0 - e) \beta}{\rho S_0^{1-m}} \quad (19)$$

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

Выражая уравнение (16) в малых отклонениях, получим

$$\frac{d}{dt} (\Delta S) - (\Delta v) + \frac{\gamma K v_0}{\rho S_0} \Delta U + \frac{\gamma K (U_0 - e)}{\rho S_0} \Delta v - \frac{\gamma K (U_0 - e) v_0}{\rho S_0^2} \Delta S.$$

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

$$S_0 \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta S}{S_0} \right) = -v_0 \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right) + \frac{\gamma K (U_0 - e) v_0}{\rho S_0} \left(\frac{\Delta U}{U_0 - e} \right) + \frac{\gamma K (U_0 - e) v_0}{\rho S_0} \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right) - \frac{\gamma K (U_0 - e) v_0}{\rho S_0} \left(\frac{\Delta S}{S_0} \right). \quad (20)$$

Разделяя переменные с учетом (17), получим уравнение электрохимической ячейки в отклонениях и безразмерном виде

$$T \bar{S}' + \bar{S} = -\bar{v} + \bar{U} + \bar{v}, \quad (21)$$

$$\text{где } T = \frac{S_0}{v_0}. \quad (22)$$

Выражая в операторном виде, получим:

$$T \bar{S}' + \bar{S} = -\bar{v} + f_R, \quad (23)$$

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

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

$$\bar{J} = \bar{U} + \bar{v}. \quad (24)$$

С учетом этого операторное уравнение электрохимической ячейки можно записать:

$$(T\rho + 1) \bar{S} = -\bar{v} + \bar{J} \quad (25)$$

$$\text{или } \bar{S} = -\frac{1}{T\rho + 1} \bar{v} + \frac{1}{T\rho + 1} \bar{J}.$$

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

$$W_1(\rho) = \frac{S(\rho)}{v(\rho)} = \frac{1}{T\rho + 1}. \quad (26)$$

Знак " - " показывает, что с увеличением скорости зазор уменьшается.

Передаточная функция по возмущениям

$$W_2(p) = \frac{S(p)}{f_R(p)} = \frac{1}{Tp+1} \quad (27)$$

Рассматриваемое звено можно представить структурными схемами, показанными на рис. 36 и г.

Постоянная T имеет размерность времени (сек) и называется постоянной времени.

§ 5. Переходная временная характеристика электрохимической ячейки.

Характеристики типовых звеньев

Если возмущение отсутствует (т.е. ток постоянный $\bar{J} = \frac{\Delta J}{J_0} = 0$) то изменение выходной величины (S) при единичном ступенчатом изменении входной величины (V) называется переходной характеристикой. Она является важной динамической характеристикой, показывающей характер изменения зазора при резком изменении скорости подачи электрода.

В соответствии с передаточной функцией (26) дифференциальное уравнение звена при $V=1$ запишется:

$$T \frac{dS}{dt} + S = 1. \quad (28)$$

Общее решение, описывающее собственное движение, выразится:

$$S_{ог} = C_1 e^{pt} = C_1 e^{-\frac{t}{T}}. \quad (29)$$

$$\text{Частное решение } S_{уст} = 1. \quad (30)$$

$$\text{При этом } S = C_1 e^{-\frac{t}{T}} + 1; \text{ При } t=0; C_1 = -1. \quad (31)$$

Следовательно,

$$S = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad (32)$$

График изменения параметров примет вид рис. 2д,е. Как видно из графиков и уравнения (32), при ступенчатом изменении входной величины (V) выходная величина изменяется медленно, т.е. наблюдается инерционность звена. Такие звенья в автоматике называются аperiodическими первого порядка.

Переходные и другие динамические характеристики типовых звеньев приводятся в справочниках и учебниках по автоматике (см. приложение). Поэтому, зная передаточную функцию звена, можно сразу установить его характеристики, не прибегая к решению дифференциальных уравнений.

§ 6. Электрические двигатели

Электродвигатели применяются как исполнительные элементы систем автоматического управления и как объекты управления.

При малых мощностях (до 100 Вт) применяются двухфазные асинхронные двигатели, т.к. 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 программного управления 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. Малоинерционные двигатели малого диаметра, но большой длины ротора – серии ПГ.

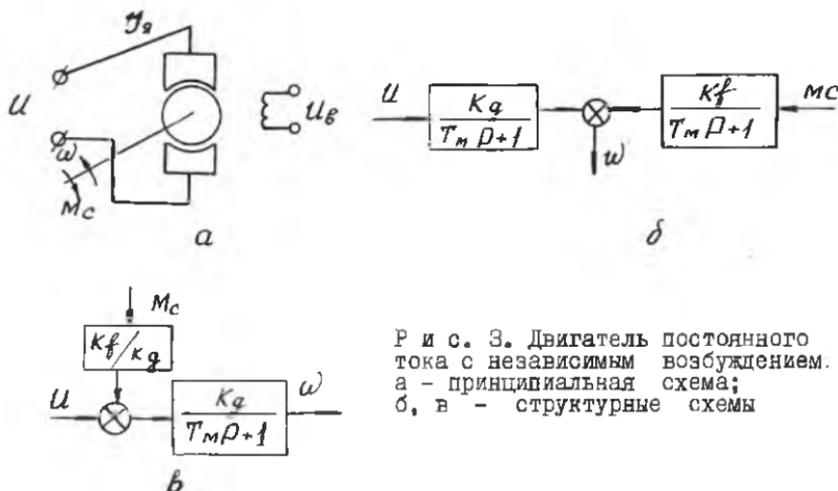
2. Двигатели с гладким беспазовым ротором, якорная обмотка которых заливается эпоксидной смолой, и каждый слой обмотки стягивается лентой из стеклоткани, что обеспечивает большой воздушный зазор, лучшее охлаждение и увеличение момента двигателя.

В отечественных станках ЧПУ наиболее широкое применение получили двигатели серии ПБСТ со встроенными тахогенераторами, обеспечивающие более линейные статические характеристики и десятикратную перегрузку в течение 1 сек и четырехкратную перегрузку в течение 1 минуты.

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 кг·с м и допускают более чем десятикратную временную перегрузку.

§ 7. Уравнения движения и передаточные функции
двигателя постоянного тока
с независимым возбуждением

Схема двигателя показана на рис.3а. Входной величиной звена



Р и с. 3. Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением. а - принципиальная схема; б, в - структурные схемы

является напряжение, подаваемое на обмотки якоря - U выходной - угловая скорость ω (или частота вращения в сек).

И с х о д н ы е у р а в н е н и я :

1. Уравнение моментов

$$J_0 \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (33)$$

где J_0 - момент инерции якоря;
 M - момент, развиваемый двигателем;
 M_c - момент сопротивления.

В свою очередь, $M = C_M J_a$, где: $C_M = \frac{M_H}{J_{aH}}$.

По данному Ома

$$U = R_a J_a + L_a \frac{dJ_a}{dt} + e, \quad (34)$$

где R_a - сопротивление якоря;
 J_a - ток якоря;

$L_{я}$ - индуктивность якорной цепи;
 e - обратная ЭДС двигателя.

При этом $e = U_e \omega$. (35)

Подставляя значение в уравнение (34), получим:

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

При установившемся режиме $\frac{dJ_{я}}{dt} = 0$. Из этих условий:

$$C_e = U_n - \frac{J_{яH} R_{я}}{\omega_n}. \quad (36)$$

Величина с индексом "H" соответствует номинальным значениям.

Из уравнения (33) определим

$$J_{я} = \frac{J_0 d\omega}{C_M dt} + \frac{M_c}{C_M}. \quad (37)$$

Подставляя значение (35) и (37) в уравнение (34), запишем

$$U = \frac{R_{я}}{C_M} \left(J_0 \frac{d\omega}{dt} + M_c \right) + \frac{L_{я}}{C_M} \left[J_0 \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{d}{dt} (M_c) \right] + C_e \omega.$$

Переносим значение выходной величины в левую часть уравнения, получим:

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

Выражая в отклонениях, запишем:

$$\frac{L_{я} J_0}{C_M} \frac{d^2(\Delta\omega)}{dt^2} + \frac{R_{я} J_0}{C_M} \frac{d(\Delta\omega)}{dt} + C_e \Delta\omega = \Delta U - \frac{L_{я}}{C_M} \frac{d(\Delta M_c)}{dt} + \frac{R_{я}}{C_M} (\Delta M_c).$$

Разделив на базисные значения, определим:

$$\frac{L_{я} J_0 \omega_0}{C_M} p^2 \bar{\omega} + \frac{R_{я} J_0 \omega_0}{C_M} p \bar{\omega} + C_e \omega_0 \bar{\omega} = u_0 \bar{u} - \frac{L_{я} M_n}{C_M} p \bar{m}_c = \frac{R_{я} M_n}{C_M} \bar{m}_c$$

Разделив на $C_e \omega_0$ окончательно получим:

$$(T_M T_{я} p^2 + T_M p + 1) \omega = K_g u - K_f (T_f p + 1) f_R$$

$$\text{где } T_M = \frac{R_{я} J_0}{C_e C_M}; T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}}; K_g = \frac{U_0}{C_e \omega_0}; K_f = \frac{M_n R_{я}}{C_M C_e \omega_0} \quad (38)$$

$$T_f = \frac{L_{я}}{R_{я}} \quad f_R = \frac{\Delta M_c}{M_c}.$$

При этом передаточная функция по управляющему воздействию (ω) определится в виде:

$$W_1(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{K_g}{T_M T_R p^2 + T_M p + 1} \quad (39)$$

Передаточная функция по возмущениям

$$W_2(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = \frac{K_f (T_f p + 1)}{T_M T_R p^2 + T_M p + 1} \quad (40)$$

Для большинства случаев $T_R \ll T_M$;

$$(T_M p + 1) \omega = K_g U - K_f f_R \quad (41)$$

Тогда

$$W_1(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{K_g}{T_M p + 1} \quad \text{и} \quad W_2(p) = \frac{\omega(p)}{f_R(p)} = \frac{K_f}{T_M p + 1} \quad (42)$$

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

§ 8. Гидравлические исполнительные механизмы (гидродвигатели, гидроусилители).

Определение передаточной функции ГИМ

Гидравлические исполнительные механизмы (ГИМ) применяются в приводах металлорежущих станков, прессов и транспортных устройств.

Гидравлические исполнительные механизмы различаются:

А. По числу рабочих кромок золотника и по конструкции цилиндра

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

Б. По характеру открытия щелей золотника

1. С положительным перекрытием.
2. С нулевым перекрытием.
3. С отрицательным перекрытием.

Схема гидравлического исполнительного механизма с четырех-

кромочным золотником и не дифференциальным цилиндром показана на рис. 4а.

Из условия неразрывности потока рабочей жидкости получим:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (43)$$

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

уравнение сил на штоке поршня

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = F(p_2 - p_1) - R; \quad (44)$$

$$p_H = p_1 + p_2. \quad (45)$$

Из гидравлики известно:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \mu e (\sigma_0 + \sigma) \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_H - p_2)}; \\ Q_2 &= \mu e (\sigma_0 - \sigma) \sqrt{\frac{2}{\rho} p_2}; \\ Q_3 &= F \frac{dy}{dt}; \quad Q_4 = \gamma v \frac{dp_2}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

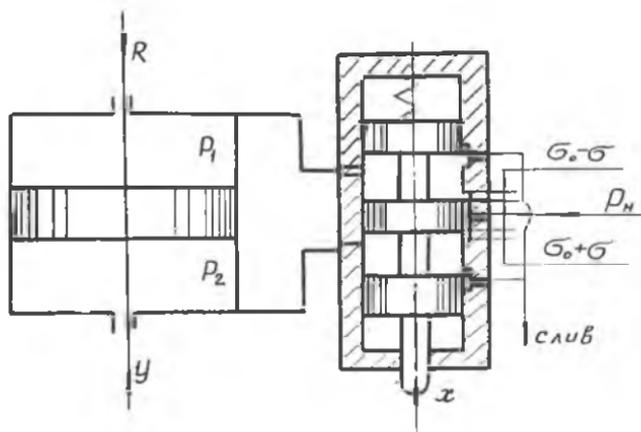
Выражая в отклонениях, получим

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_1 &= \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4; \\ \frac{M}{F} \frac{d^2(\Delta y)}{dt^2} &= \Delta p_2 - \Delta p_1 - \frac{\Delta R}{F}; \\ \Delta Q_1 &= \mu e \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_H - p_{20})} \Delta \sigma - \frac{\mu e \sigma_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}}}{2\sqrt{p_H - p_{20}}} \Delta p_2; \\ \Delta Q_2 &= -\mu e \sqrt{\frac{2}{\rho} p_{20}} \Delta \sigma + \frac{\mu e \sigma_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}}}{2\sqrt{p_{20}}} \Delta p_2; \\ \Delta Q_3 &= F \frac{d}{dt} (\Delta y); \quad \Delta Q_4 = \gamma v \frac{d}{dt} (\Delta p_2). \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

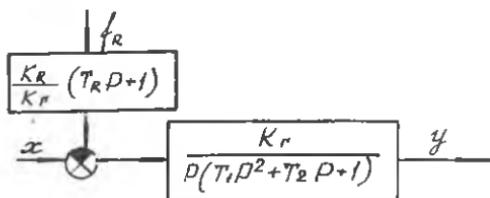
$$\left. \begin{aligned} \text{Принимая } x &= \frac{\Delta \sigma}{\sigma_0}; \quad y = \frac{\Delta y}{\sigma_0}; \quad f_R = \frac{\Delta R}{R_0}; \quad p_0 = \frac{p_H}{2}, \\ \text{получим } Q_0 &= \mu e \sigma_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} p_H}; \quad x_0 = y_0 = \sigma_0; \quad p_{10} = p_{20} = \frac{p_H}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

Решая уравнение (43) и (44), (45) с учетом значений (46), (47) и (48), определим:

$$(T_1 p^2 + T_2 p + 1) P_y = K_r x - K_R (T_R p + 1) f_R, \quad (49)$$



a



b

Р и с. 4. Гидравлический исполнительный механизм
 а - конструктивная схема; б - структурная схема

где

$$T_1 = \frac{M_1 v}{2F^2}; \quad T_2 = \frac{M \sigma_0 \mu e}{F^2 \sqrt{\frac{1}{\rho} \rho_H}}; \quad K_r = \frac{2\mu e}{F} \sqrt{\frac{1}{\rho} \rho_H}; \quad (50)$$

$$K_R = \frac{K_r}{2}; \quad T_R = \frac{2v \sqrt{\rho \rho_H}}{2\mu e \sigma_0}.$$

Структурная схема показана на рис.46.

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, как звенья, 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).

§ 9. Правила структурных преобразований

Знание передаточных функций отдельных звеньев позволяет получить передаточную функцию системы автоматического управления в целом. Для этого требуется знать правила структурных преобразований, которые основываются на принципе суперпозиции (независимости сигналов).

I. Передаточная функция последовательно соединенных звеньев

Как видно из рис. 5а

$$x_{\delta_0/x_1} = W_1(\rho) x_{\delta x}; \quad x_{\delta_0/x_1} = x_{\delta x_2};$$

$$x_{\delta_0/x_2} = W_2(\rho) x_{\delta x_2}, \quad x_{\delta_0/x_2} = x_{\delta x_3};$$

$$x_{\delta_0/x} = W_3(\rho) x_{\delta x_3} = W_1(\rho) W_2(\rho) W_3(\rho) x_{\delta x}.$$

значит

$$W(\rho) = \frac{x_{\delta_0/x}(\rho)}{x_{\delta x}(\rho)} = W_1(\rho) W_2(\rho) W_3(\rho). \quad (51)$$

Следовательно, передаточная функция последовательно соединенных звеньев равна произведению передаточных функций отдельных звеньев, что позволяет изобразить звенья в виде рис. 5б.

2. Параллельное соединение звеньев (рис. 5в)

$$x_{\delta_0/x_1} = W_1(\rho) x_{\delta x};$$

$$x_{\delta_0/x_2} = W_2(\rho) x_{\delta x};$$

$$x_{\delta_0/x_3} = W_3(\rho) x_{\delta x};$$

$$x_{\delta_0/x} = \sum x_{\delta_0/x_i} = [W_1(\rho) + W_2(\rho) + W_3(\rho)] x_{\delta x}.$$

Выходной сигнал параллельно соединенных звеньев равен сумме входных сигналов.

Следовательно

$$W(\rho) = \frac{x_{\delta_0/x}(\rho)}{x_{\delta x}(\rho)} = W_1(\rho) + W_2(\rho) + W_3(\rho). \quad (52)$$

Передаточная функция параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев.

3. Соединение отрицательной обратной связью (рис. 5г)

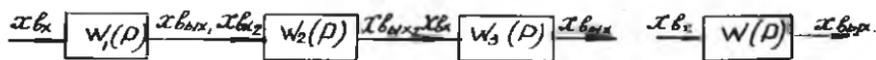
Как видно:

$$x_{\delta x_1} = x_{\delta x} - x_{\delta_0/x_2};$$

$$x_{\delta_0/x} = W_1(\rho) x_{\delta x_1};$$

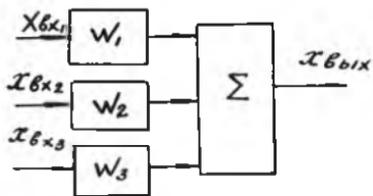
$$x_{\delta_0/x_2} = W_2(\rho) x_{\delta_0/x};$$

$$x_{\delta_0/x} = W_1(\rho)(x_{\delta x} - x_{\delta_0/x_2});$$

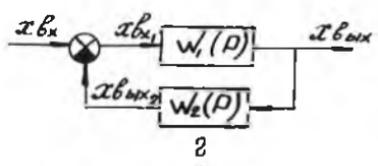


а

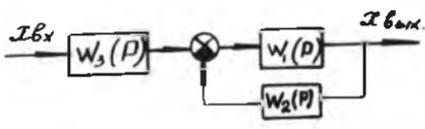
б



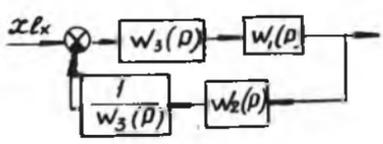
б



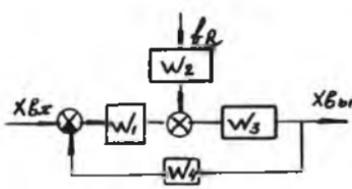
в



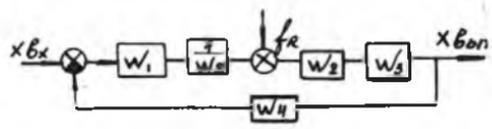
г



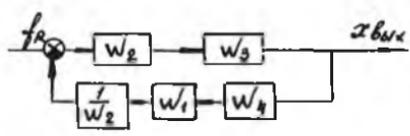
д



ж



з



и

Р и с. 5. Правила структурных преобразований: а - последовательное соединение звеньев; б - эквивалентная схема; в - параллельное соединение звеньев; г - звено, охваченное обратной связью; д, е - эквивалентные схемы при переносе звена через сумматор; ж, з, и - эквивалентные схемы при наличии всемоушений

$$x_{\delta oix} = W_2(p)[x_{\delta x} - W_2(p)x_{\delta oix}];$$

$$x_{\delta oix} = -W_1(p)W_2(p)x_{\delta oix} + W_1(p)x_{\delta x}.$$

Тогда получим:

$$W(p) = \frac{x_{\delta oix}(p)}{x_{\delta x}(p)} = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)}. \quad (53)$$

Передаточная функция звена, охваченного отрицательной обратной связью, равна передаточной функцией самого звена, деленного на 1 плюс произведение передаточной функции этого звена на передаточную функцию звена обратной связи.

Если передаточная функция обратной связи постоянна

$$W_2(p) = K = \text{const},$$

то обратная связь называется жесткой.

4. Перенос звена через сумматор

Эквивалентные структурные схемы показаны на рис. 5д,е.

Определяя передаточную функцию как в этом, так и в другом случае, получим:

$$W(p) = \frac{W_3(p)W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)}. \quad (54)$$

Следовательно, при переносе звена через сумматор он изображается в том же виде в цепи основного и в обратном значении в цепи обратной связи.

5. Введение возмущений в цепь управления

и определение передаточной функции по возмущению

На рис. 5ж,з,и показаны эквивалентные схемы. Передаточная функция по возмущающему воздействию определяется:

$$W(p) = \frac{x_{\delta oix}(p)}{f_{\delta}(p)} = \frac{W_2W_3}{1 + W_1W_2W_3}. \quad (55)$$

§ 10. Функциональные и структурные схемы систем автоматического управления

Определение САУ, данное ранее, как совокупность управляемого

объекта и управляющего автоматического устройства, является неполным, так как последнее обычно состоит из нескольких отдельных функциональных звеньев, т.е. представляет совокупность целевых устройств.

Так, для того чтобы обеспечить заданный закон управления, контролируемые (выходные) параметры управляемого объекта должны измеряться с помощью чувствительных элементов-датчиков и сравниваться с заданными (входными) параметрами. Разница между ними или отклонения выходных величин должны устраняться регулирующим устройством. В однопараметрических системах отклонение выходной величины должно быть усилено в усилительном устройстве и передано на исполнительный элемент, который воздействует на управляемый объект. Это воздействие обеспечивает требуемый закон изменения выходного параметра.

Схема передачи управляющих сигналов от одного звена к другому показывается на функциональных схемах управления или блок-схемах. Функциональная схема управления типичной САУ дана на рис.6а.

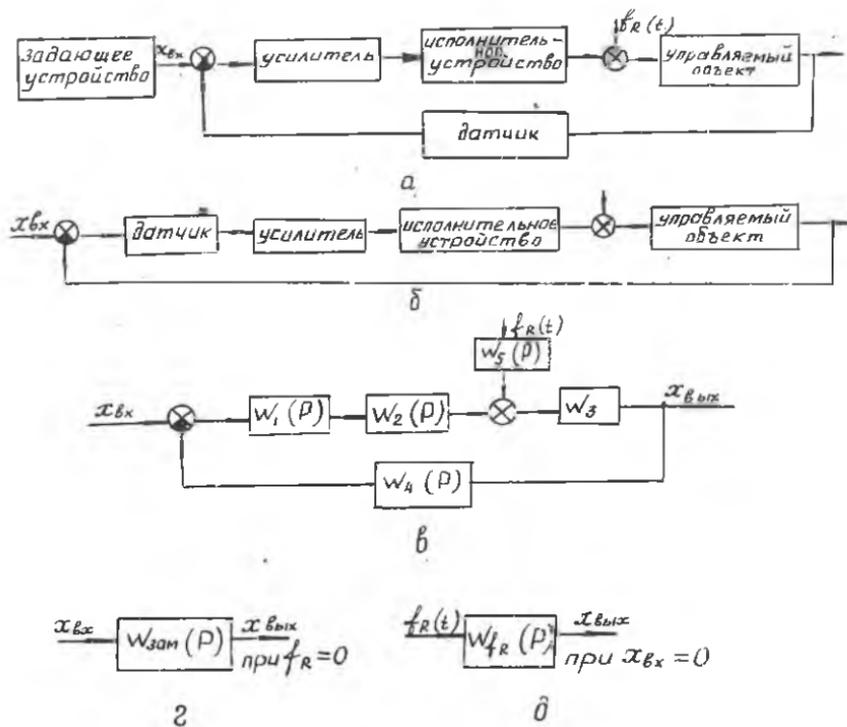
В системе автоматического управления создается замкнутая цепь передачи сигналов. Цепь управления, включающая датчик и сравнивающее устройство и связывающая входную величину с выходной, называется обратной связью. Кроме этого, как показано на схеме, на управляемый объект (или другое звено) могут действовать возмущающие воздействия $f_x(t)$, которые нарушают закон управления.

Во многих случаях значения входной и выходной величины сравниваются без измерения их абсолютных значений. В этих случаях датчик может сразу измерять их разницу (датчик показывается на схеме после устройства сравнения перед усилителем (рис.6б)). В простых САУ могут отсутствовать отдельные звенья.

Вне зависимости от сложности системы порядок прохождения сигналов показывается на функциональных схемах. Системы, в которых отсутствуют обратные связи называются разомкнутыми.

Анализ условий прохождения сигналов через звенья САУ является одним из основных вопросов теории автоматического управления.

При анализе систем после построения функциональной схемы САУ необходимо по ранее изложенной методике установить связи между входными и выходными параметрами и выразить их в виде передаточных функций отдельных звеньев.



Р и с. 6. Функциональные и структурные САУ: а, б - функциональные схемы типовых САУ, в, г, д - структурные схемы

На основе этих данных строится структурная схема управления (рис. 6в).

Затем, используя правила структурных преобразований, структурную схему можно представить в виде рис. 6г, д. На основе этих же правил можно установить зависимость между входной и выходной величинами системы в целом в виде передаточных функций по управляющему и возмущающему воздействиям:

$$W_{\text{удл}}^{x_{\text{вх}}}(\rho) = \frac{x_{\text{вх}}(\rho)}{x_{\text{вх}}(\rho)} = \frac{b_0 \rho^m + b_1 \rho^{m-1} + \dots + b_{m-1} \rho + b_m}{a_0 \rho^n + a_1 \rho^{n-1} + \dots + a_{n-1} \rho + a_n} \quad (56)$$

$$W(\rho) = \frac{x_{\text{вх}}(\rho)}{f(\rho)} = \frac{b_0 \rho^m + b_1 \rho^{m-1} + \dots + b_{m-1} \rho + b_m}{a_0 \rho^n + a_1 \rho^{n-1} + \dots + a_{n-1} \rho + a_n} \quad (57)$$

Следует отметить, что знаменатели передаточных функций по управляющему и возмущающему воздействиям одинаковы, а порядок производных $m < n$ и $k < n$.

§ II. Качественные характеристики систем автоматического управления

К главнейшим показателям качества систем автоматического управления относятся:

1. Устойчивость систем.
2. Переходные характеристики.
3. Точность работы в установившемся режиме.

Устойчивость равновесного состояния систем является предпосылкой их успешной работы, исключающей возникновение незатухающих колебаний.

Так как изменения внешних воздействий трудно учесть, то для оценки и сравнения качества САУ применяют типовые воздействия на входе, одним из которых является единичное ступенчатое воздействие, соответствующее быстрому изменению входной величины. Реакция системы на это воздействие называется переходной характеристикой, которая показывает изменение выходной величины во времени при единичном ступенчатом воздействии.

Точность работы в установившемся режиме оценивается величиной ошибки в виде разницы между входной и выходной величинами, что

имеет особое значение для следящих систем. В случае, если ошибка пропорциональна значению регулируемого параметра, то системы называются статическими, и для них характерны статические ошибки. Если ошибка пропорциональна скорости изменения регулируемого параметра, то систему называют астатической первого порядка, а ускорению- астатической второго порядка и т.д.

Если вводить дополнительные звенья в цепь управления САУ, можно изменять ее качественные показатели, включая и порядок астатизма системы, что является задачей синтеза, которая здесь не рассматривается.

§ 12. Устойчивость систем автоматического управления. Критерии устойчивости

Процесс автоматического управления состоит из переходной и установившейся (описывающая вынужденное движение) составляющих функций времени. Переходная составляющая, выражающая свободное или невозмущенное движение системы (или собственные колебания), описывается левой частью дифференциального уравнения движения, соответствующей знаменателю передаточной функции САУ. При возмущениях равных нулю дифференциальное уравнение свободного движения является однородным и записывается в виде

$$a_0 \frac{d^n x_{\text{в.о.х.}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_{\text{в.о.х.}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx_{\text{в.о.х.}}}{dt} + a_n = 0.$$

Если известны корни характеристического уравнения, которые могут быть либо вещественными, либо комплексно сопряженными, то свободное движение САУ описывается суммой экспонент вида

$$x_{\text{в.о.х.}} = \sum_{\lambda=1}^{n-n} C_{\lambda} e^{p_{\lambda} t}. \quad (58)$$

Для того, чтобы свободное движение или переходная составляющая функции времени была затухающей ($x_{\text{в.о.х.}} \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$), необходимо, чтобы вещественные части всех корней были отрицательными, что является основным показателем устойчивости САУ.

Учитывая трудности, связанные с определением корней характеристического уравнения, которые возрастают с увеличением порядка производных, для оценки устойчивости САУ применяются критерии (признаки) устойчивости. Известен ряд критериев: Гурвица, Вышнеградского, Михайлова, Найквиста. Здесь рассматриваются лишь два

критерия - Гурвица и Вышнеградского.

§ 13. Критерий устойчивости Гурвица

Критерий устойчивости Гурвица формулируется следующим образом.

Система устойчива в том случае, если коэффициенты характеристического уравнения положительны и определитель высшего порядка, составленный из коэффициентов этого уравнения, также положительный. Следует заметить, что вместо определения корней характеристического уравнения анализируются известные значения коэффициентов, что значительно проще.

При этом коэффициенты записываются в матрицу:

$$\Gamma = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots & \dots \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & \dots \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \dots & \dots \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & \dots & \dots \end{vmatrix}. \quad (59)$$

Для этой матрицы можно определить диагональные миноры.

$$\Delta_1 = a_1; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}.$$

Для системы n - порядка диагональный минор

$$\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}. \quad (60)$$

Поскольку $a_n > 0$, то из условия Гурвица следует $\Delta_{n-1} > 0$, и критерий Гурвица можно выразить в виде

$$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n > 0 \quad \text{и} \quad \Delta_{n-1} > 0$$

В результате получим условия устойчивости для систем до 4 порядка в виде табл. I.

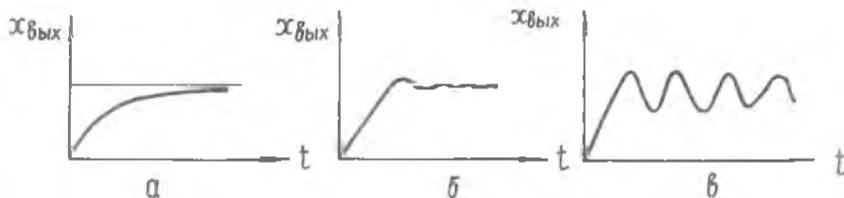
Характер переходного процесса (переходные характеристики при различных корнях характеристического уравнения) можно иллюстрировать графиками, показанными на рис. 7а, б и в:

а - в случае вещественных отрицательных корней;

б - в случае комплексных корней с отрицательными вещественными составляющими;

Т а б л и ц а 1

Порядок дифференциальных уравнений	Условия устойчивости по Гурвицу
1	$a_0 > 0, a_1 > 0$
2	$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0$
3	$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0$ и $\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$
4	$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_4 > 0$ и $\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_1 a_4 > 0$



Р и с. 7. Временные переходные характеристики САУ: а - аperiodический процесс; б - колебательный затухающий; в - колебательный неустойчивый

г - в случае комплексных корней с положительными вещественными составляющими (характерно для неустойчивых систем).

§ 14. 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 так-

же 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.

1. Электромеханические или гидравлические системы подачи 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.

2. Электромеханические системы, имеющие индуктивный датчик, вмонтированный в тело электрода

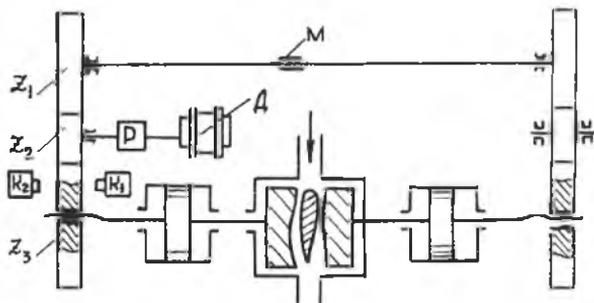
При этом зазор может быть выдержан постоянным в точке установки электрода. Данный способ практически может быть приемлем для ферромагнитных материалов.

3. Электромеханические системы управления с предварительной установкой зазора и автоматизацией цикла работы станка (типа ЭХО-1)

Схема системы управления показана на рис.8.

При включенном рабочем токе электроды-инструменты перемеща-

ются 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 .



Р и с.8. Схема регулирования ЭХО с предварительной установкой зазора

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 проходит 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 сек.

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

4. Система регулирования ЭХО с компенсацией возмущений (инвариантная САУ)

При создании непрерывно работающих систем ставится задача о поддержании зазора, обеспечивающего отсутствие коротких за-

мыкавий и допустимую погрешность формы поверхности в конце обработки.

Далее приводится описание и характеристики системы регулирования среднего значения межэлектродного зазора с компенсацией главных возмущений.

Конструктивные схемы системы для односторонней и двухсторонней обработки показаны на рис. 9 а и б.

В соответствии с конструктивными схемами (рис. 9а,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 R_1 и R_2 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 L 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 изготавливаются из графита и для повышения их стойкости провариваются в масле.

Как видно из закона Ома (15), при постоянном значении U и V изменение зазора эквивалентно изменению тока (при выражении в отклонениях и безразмерном виде), т.е.

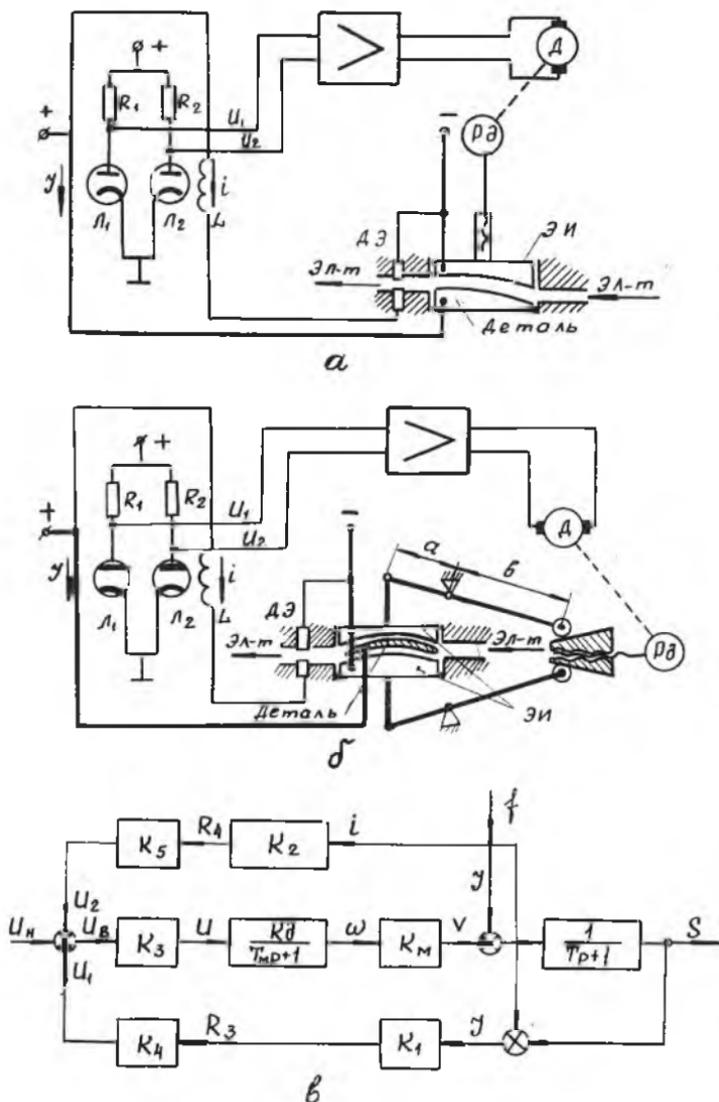
$$\bar{j} = \bar{s}. \quad (6I)$$

Таким образом, датчик тока II 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. 9 в.

В этой схеме представлены:

K_3 — передаточная функция усилителя;



Р и с. 9. Схема регулирования ЭДО с компенсацией возмущений: а, б - принципиальные схемы при односторонней и двусторонней обработке; в - структурная схема

- $\frac{K_5}{T_M \rho + 1}$ - передаточная функция двигателя постоянного тока с независимым возбуждением;
- K_M - передаточная функция механических звеньев (для одноходного винта $K_B = 2n \frac{T}{S_D}$ и для рычажного механизма $K_P = \frac{d}{\beta}$ (рис. 9в);
- K_4, K_5 - передаточная функция плеч электрического моста.
- Сопротивления диодов Л1 и Л2 (рис. 9а, б)

$$\Delta R_3 = K_1 \Delta J \text{ или } \bar{R}_3 = K_1 \frac{J}{R_3} \bar{J} = K_1 \bar{J}, \quad (62)$$

$$\Delta R_4 = K_2 \Delta i \text{ или } \bar{R}_4 = K_2 \frac{i}{R_4} \bar{i} = K_2 \bar{i}, \quad (63)$$

$$\text{где: } \bar{R}_3 = \frac{\Delta R_3}{R_3}; \bar{R}_4 = \frac{\Delta R_4}{R_4}; \bar{J} = \frac{\Delta J}{J}; \bar{i} = \frac{\Delta i}{i}.$$

Значения K_1 и K_2 определяются для линейного участка статической характеристики датчиков-диодов.

Напряжения, снимаемые с плеч моста (рис. 9а, 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

$$\Delta U_1 = U_0 \frac{R_1}{(R_1 + R_3)^2} K_1 \Delta J = K_{M1} \Delta J; \quad (64)$$

$$\Delta U_2 = U_0 \frac{R_2}{(R_2 + R_4)^2} K_2 \Delta i = K_{M2} \Delta i. \quad (65)$$

Коэффициенты K_{M1} и K_{M2} могут быть получены из вольтамперных характеристик моста.

Относительные значения напряжений определяются:

$$\bar{U}_1 = \frac{R_1 R_3}{(R_1 + R_3)^2} \bar{R}_3 = K_4 \bar{R}_3; \quad (66)$$

$$\bar{U}_2 = \frac{R_2 R_4}{(R_2 + R_4)^2} \bar{R}_4 = K_5 \bar{R}_4. \quad (67)$$

Напряжение, подаваемое на усилитель (рис. 9в)

$$U_B = U_H + U_2 - U_1.$$

При $U_H = const$, зависящем от положения диодов относительно шины и катушки при настройке, относительное значение напряжения определяется: $\bar{U}_B = U_2 - U_1 = K_2 K_5 \bar{i} - K_1 K_4 \bar{J}$.

Подставляя значения (62), (63), (66), (67), напряжение, подаваемое на усилитель, можно представить в абсолютных значениях параметров:

$$\Delta U_B = \Delta U_2 - \Delta U_1 = U_0 \left[\frac{X_2 R_2}{(R_2 + R_4)^2} \Delta i - \frac{X_1 R_1}{(R_1 + R_3)^2} \Delta j \right]. \quad (68)$$

Учитывая, что возмущение $f(u, j)$ влияет на изменение зазора по прямому каналу с инерционным запаздыванием, из-за больших значений постоянной T и передаются почти мгновенно на регулятор через датчик тока, условием инвариантности к этим возмущениям можно принять при $U_2 - U_1 = const$

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

При этом:

$$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = 1; \quad (69)$$

$$\frac{\bar{b}}{j} = \frac{K_1 K_4}{K_2 K_5}; \quad (70)$$

$$\frac{\Delta L}{\Delta j} = \frac{X_1 R_3 (R_2 + R_4)^2}{X_2 R_4 (R_1 + R_3)^2} \quad (71)$$

$$\text{или} \quad \frac{\Delta L}{\Delta j} = \frac{K_{M1}}{K_{M2}}. \quad (72)$$

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

$$W(p)_{раз} = \frac{K_3 K_4 K_M}{T_M T p^2 + (T_M + T)p + 1}; \quad (73)$$

$$W(p)_{зам} = \frac{K_3 K_2 K_M}{T_M T p^2 + (T_M + T)p + K_1 K_3 K_4 K_2 K_M + 1}. \quad (74)$$

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.

5. 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.

§ 15. Аналоговые системы автоматического управления.
Передачная функция двигателя серии ПБСТ
со встроенным тахогенератором

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

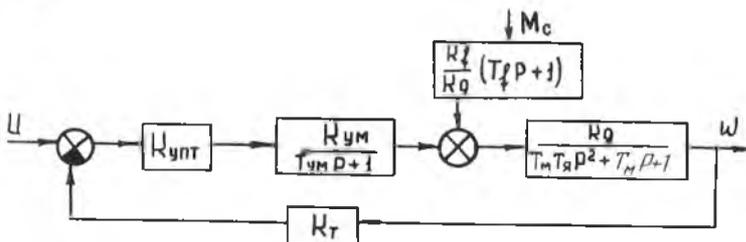
Как было указано, приводы станков ЧПУ наиболее широко применяются в двигателях серии ПБСТ со встроенным тахогенератором и тиристорным усилителем.

Структурная схема этих двигателей показана на рис.10, где $K_{упл}$ - коэффициент усиления тиристорного усилителя постоянного тока;

$K_{ум}$ - коэффициент усилителя мощности;

K_T - чувствительность тахогенератора;

$T_{ум}$ - постоянная времени усилителя мощности.



Р и с. 10. Структурная схема двигателя серии ПБСТ

Анализ показывает, что при обычном значении произведения $K_{yTn} K_{yM}$ порядка 10^3 влиянием нагрузки в виде момента M_c , как в статическом, так и динамическом режимах можно пренебречь.

При этом передаточная функция по управляющему воздействию определяется:

$$W(\rho)_{зам} = \frac{\omega(\rho)}{U(\rho)} = \frac{K_{yTn} K_{yM} K_g}{(T_M T_g \rho^2 + T_M \rho + 1)(T_{yM} \rho + 1) + K_{yTn} K_{yM} K_g K_T} \quad (75)$$

§ 16. Особенности работы копировальных следящих систем. Однокоординатное и двухкоординатное копирование

Различное технологическое назначение копировальных систем определяет разные предъявляемые к ним требования.

Так, при токарной обработке линейно-фасонных поверхностей тел вращения при сравнительно небольшой разнице диаметров преимущественно применяется однокоординатное копирование с постоянной задающей скоростью движения рабочего органа. При этом чистота 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 чистоты поверхностей и более широких возможностей технологического применения, при обработке поверхностей с большими изменениями их кривизны преимущественное применение получили двухкоординатные, а иногда и многокоординатные копировальные устройства. Последние создаются путем сочетания устройств однокоординатного и двухкоординатного копирования.

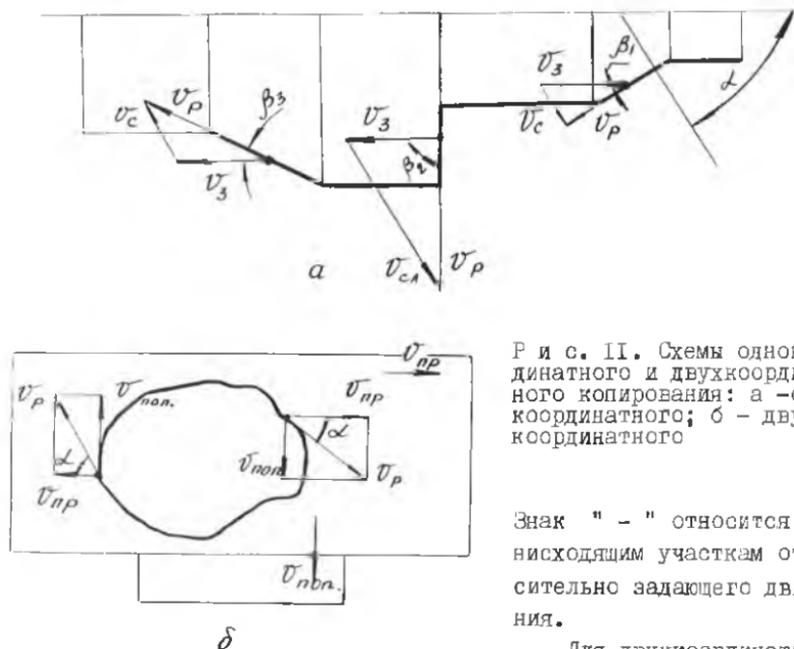
При однокоординатном копировании (рис. 11а) постоянной является скорость задающего движения как по модулю вектора, так и по его направлению. При этом постоянным является также и направление следящего движения.

Зависимость между скоростями выражается в следующем виде:

$$\frac{v_c}{\sin \alpha} = \frac{v_p}{\sin \beta} = \frac{v_s}{\sin(\alpha \pm \beta)}, \quad (76)$$

где α - угол установки суппорта;
 v_c - скорость следящего движения;

- v_p - скорость результирующего движения;
 v_3 - скорость задающего движения.



Р и с. II. Схемы однокоординатного и двухкоординатного копирования: а - однокоординатного; б - двухкоординатного

Знак " - " относится к нисходящим участкам относительно задающего движения.

Для двухкоординатного копирования постоянной является скорость результирующего движения по величине модуля вектора скорости (рис.IIб).

Для обеспечения этого условия принимаются значения составляющих скоростей (продольного и поперечного) в виде:

$$\begin{aligned} v_{np} &= v_p \cos \alpha; \\ v_n &= v_p \sin \alpha. \end{aligned} \quad (77)$$

Такая связь между составляющими скоростями обеспечивается синусными распределителями. В качестве таковых для гидроконтрольных устройств являются эксцентрики, воздействующие на золотниковые распределительные устройства, которые расположены в 2-х взаимно перпендикулярных направлениях, плоские потенциометры со щетками, расположенными под углом 90° при электромеханическом приводе, и другие устройства.

§ 17. Гидравлические следящие системы

Как было указано, гидравлические системы (ГСС) нашли применение в копируемых устройствах и в этом случае иногда называются гидрокопируемыми. Станкостроительная промышленность серийно выпускает гидросуппорты ГС-1, КСТ-1 и т.д. и целую гамму копируемых 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 копируемых устройствах получили ГСС с четырехкромочным золотником, имеющим нулевые или отрицательные перекрытия золотника и недифференциальный цилиндр. В токарных гидросуппортах широко применяются ГСС с однокромочным золотником и дифференциальным цилиндром. Схема гидравлической следящей системы с четырехкромочным золотником, отрицательными перекрытиями и недифференциальным цилиндром показана на рис. 12а, на примере гидрокопируемого станка.

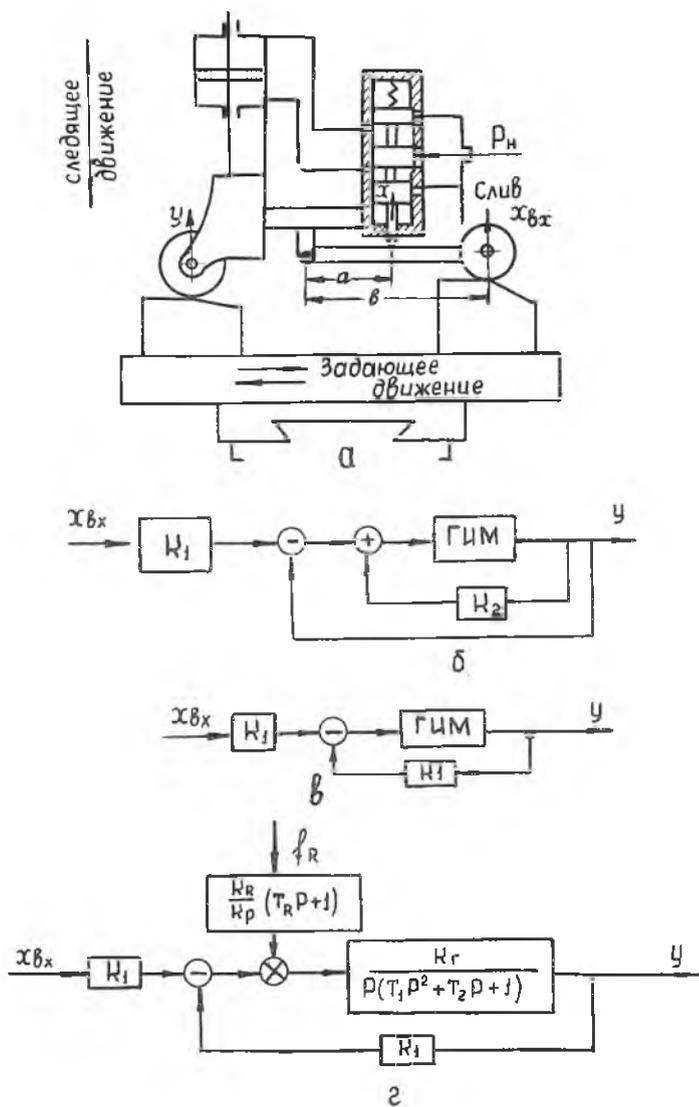
Фрезерная головка движется вместе со штоком от гидроцилиндра.

Входной величиной x_{f2} является движение копируемого ролика, выходной x_{f0} — 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 копируемом ролике.

При первом условии управляющее воздействие от копируемого ролика через рычаг, поворачиваемый по часовой стрелке, с коэффициентом усиления K_1 ($K_1 = \frac{a}{b}$, рис. 12а) передается золотнику, открывающему нижнюю щель между ним и золотниковой втулкой, что



Р и с.12. Гидравлическая следящая система: а - конструктивная схема; б, в - функциональные схемы; г - структурная схема

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 копировальном 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 копировального 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 показанную на рис.12б.

Складывая значения передаточных функций параллельных обратных связей, получим $K_2 - 1 = -K_1$. Заменяем эту сумму одним звеном и получим функциональную схему, показанную на рис. 12в.

Структурные схемы и передаточные функции ГСС

Подставляя значения передаточной функции гидравлического исполнительного механизма (ГИМ), получим структурную схему управления ГСС (рис.12г).

Переносим усилительное звено K_1 через сумматор, получим структурную схему ГСС в окончательном виде (рис.13а)

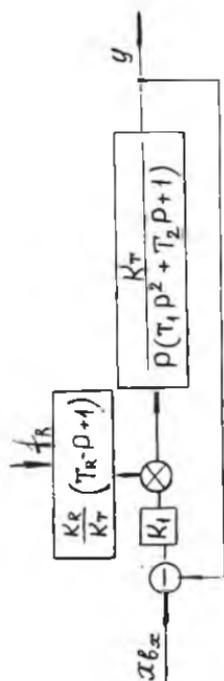
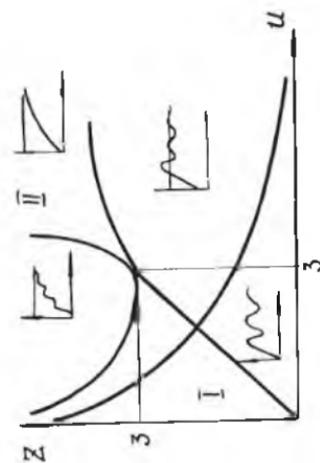
$$\text{При } R = \text{const}; f_R = \frac{\Delta R}{R_0} = 0$$

передаточные функции по управляющему воздействию определяются:

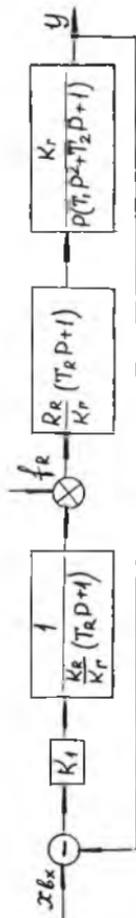
$$W(p)_{\text{раз}} = \frac{K_1 K_r}{p(T_1 p^2 + T_2 p + 1)}; \quad (78)$$

$$W(p)_{\text{зам}} = \frac{W_{\text{раз}}}{1 + W_{\text{раз}}} = \frac{K_1 K_r}{T_1 p^3 + T_2 p^2 + p + K_1 K_r}. \quad (79)$$

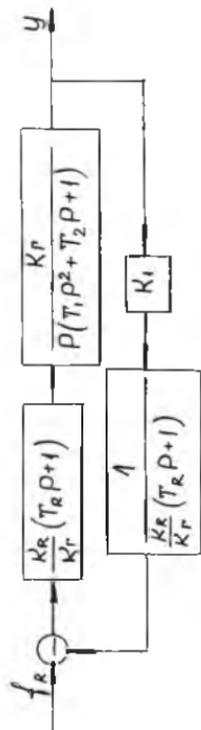
Уравнение движения ГСС в дифференциальной форме имеет вид:



a



б



в

Р и с. 13. Структурные схемы ГСС и диаграмма Вышнеградского: а, б — эквивалентные структурные схемы; в — структурная схема с возмущением на входе; г — диаграмма Вышнеградского

$$T_1 \frac{d^3 y}{dt^3} + T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} + K_1 K_r y = K_1 K_r x_{\text{вх}}.$$

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

$$\frac{dy}{dt} = K_1 K_r (x_{\text{вх}} - y) = K_1 K_r \sigma, \quad (80)$$

где σ - скоростная ошибка копирования.

При расчете систем предельное значение скоростной ошибки регламентируются. С учетом этого коэффициенты усиления определяются по формуле

$$K_1 K_r = \frac{v_{\text{сл. max}}}{\sigma_{\text{max}}}. \quad (81)$$

где $v_{\text{сл. max}}$ - наибольшая скорость слежения.

Для определения передаточной функции по возмущениям, связанным с нагрузкой, введем возмущение в цепь уравнения и получим структурную схему (рис. 1Зв).

В соответствии с приведенной схемой передаточная функция по возмущениям определится:

$$W_{\text{зам}}^{\text{лр}}(p) = \frac{K_R (T_R p + 1)}{T_1 p^3 + T_2 p^2 + p + K_1 K_r}. \quad (82)$$

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

$$\sigma_n = \frac{K_R f_R}{K_1 K_r}. \quad (83)$$

Подставляя значения для рассматриваемой ГСС, получим:

$$\sigma_n = \frac{\Delta R}{K_1 p_H F}. \quad (84)$$

При расчете систем значение позиционных ошибок также регламентируется. Их уменьшение связано с увеличением коэффициентов усиления ГСС и требует проведения исследования системы на устойчивость и, в необходимых случаях, - качественных показателей переходного процесса.

§ 18. Устойчивость ГСС

Как было указано, устойчивость системы является предпосылкой работоспособности системы. С точки зрения теории колебаний, устойчивая система обеспечивает затухающие собственные колебания. Свободное движение ГСС или ее собственные колебания выра-

жуются левой частью дифференциального уравнения движения или его характеристическим уравнением, которое имеет вид

$$T_1 p^3 + T_2 p^2 + p + K_1 K_r = 0. \quad (85)$$

В общем виде оно записывается:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0. \quad (86)$$

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

Принимая $A_0 \alpha^3 = 1$; $A_1 = \alpha^2 u$; $A_2 = \alpha z$,

получим

$$\alpha^3 = \frac{1}{A_0} = \frac{a_3}{a_0};$$

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{a_3}{a_0}}.$$

Тогда уравнение (86) приводится к виду

$$p^3 + u p^2 + z p + 1 = 0, \quad (87)$$

где

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

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

$$u > 0; \quad z > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} u & 1 \\ 1 & z \end{vmatrix} = uz - 1 > 0 \text{ или } zu > 1.$$

Подставляя значение параметра u и z , получим:

$$zu = \frac{a_1 a_2}{a_0 a_3} = \frac{T_2}{T_1 K_1 K_r} > 1 \quad (88)$$

или $K_1 K_r < \frac{T_2}{T_1}.$

Определяя значение корней характеристического уравнения, строится диаграмма Вышнеградского, которую можно разделить на четыре области где показаны характеристики переходного процесса (рис.13г).

I - область (где $zu < 1$) неустойчивых систем;

II - область аperiodического процесса;

III - область быстро затухающих колебаний;

IV - область затухающих колебаний.

Диаграмма Вышнеградского, применяемая для системы III порядка, позволяет по значениям параметров z и u 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:

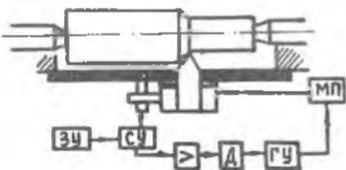
- уменьшение коэффициентов усилия рычага; и ГИМ (за счет снижения P_n);
- демпфирование золотника;
- увеличение площади гидроцилиндра;
- уменьшение диаметра или длины рабочих кромок золотника.

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 обеспечение дополнительных условий и более сложны по конструкции.

§ 19. Системы автоматического управления с компенсацией упругих перемещений системы СПИД

Упругие перемещения системы СПИД имеют в большинстве случаев доминирующее значение в суммарных погрешностях метода обработки. В последнее время проведены работы по созданию систем с компенсацией упругих перемещений системы СПИД. Одним из направлений, разработанным под руководством профессора Балакшина, являются системы, которые обеспечивают изменение подачи инструмента во время обработки. Схема одной из простейших систем показана на рис.14. При этом измерительный наконечник индуктивного датчика, закрепленного на суппорте, скользит по поверхности неподвижной лекальной линейки, установленной параллельно направляющим станка.

В случае отклонения измерительного наконечника (за счет смещения суппорта под действием сил резания) возникает электрический сигнал, который усиливается



Р и с.14. Схема простейшей системы с компенсацией упругих перемещений системы СПИД

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 валков за один проход.

В настоящее время разработано большое количество систем автоматического управления с компенсацией по нагрузке.

ЧИСЛОВОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

§ 1. Системы и станки числового
программного управления

Системы и станки 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 $x_{kr} = F(t)$, где $F(t)$ — постоянная нормированная функция времени.

Управляющее устройство СЧПУ представляет 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 ЧПУ (ст. ЧПУ).

В качестве основных целевых звеньев СЧПУ применяются:

1. Считывающие устройства ввода информации, обеспечивающие последовательное или параллельное считывание программы с программносителя.

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, фазорасшипители 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 для контроля программ. К ним относятся устройства для вычерчивания траекторий движения рабочих органов-координатографы.

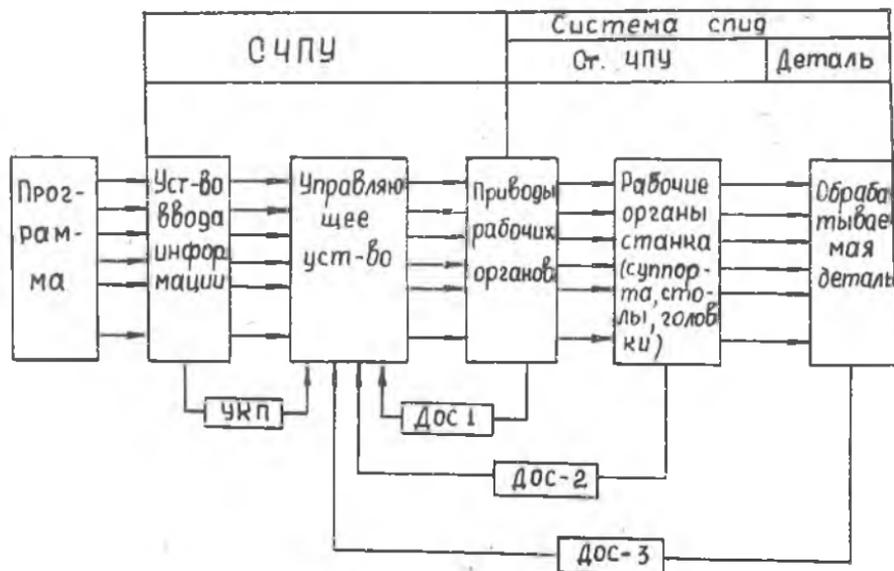
В характеристики СЧПУ включаются и вид привода рабочих органов станка, являющийся звеном единой системы управления.

Станки ЧПУ могут быть оснащены манипуляторами, автооператорами и промышленными роботами, обеспечивающими как подачу деталей в рабочую зону, так и их удаление. Не исключается для ст. ЧПУ и применение загрузочных устройств в виде бункеров и магазинов. В этих случаях станки ЧПУ будут являться станками-автоматами. Упрощенную функциональную схему СЧПУ и ст.ЧПУ можно представить в виде рис.15. В современных системах и станках ЧПУ широко применяется один из видов обратных связей. В качестве обратных связей могут применяться:

ОС-I 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 ст. ЧПУ).



Р и с. 15. Упрощенная схема СЧПУ и система СПИД

Очень часто применяются УКП - устройства контроля программы, как правило, методом избыточной информации (на честность 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 СЧПУ является одним из применений вычислительной техники в сфере материального производства, при совершенствовании которой происходит и изменение элементно-конструктивной базы.

По элементно - конструктивной базе СЧПУ, как и ЭВМ, разделяется 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 компонентов) и средним (50-100 компонентов) уровнем интеграции.

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

В настоящее время намечился переход к агрегатно-блочным методам построения СЧПУ на интегральных схемах, обеспечивающих высокую надежность.

Кроме этого, в последнее время имеются примеры применения мини-ЭМЛ в качестве составной части СЧПУ, заменяющей ряд функциональных блоков, таких как интерполятор, блоки памяти и т.п.

Практика промышленного применения СЧПУ показала, что оптимальными конструкциями датчиков обратной связи ДОС-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 ДОС-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 ДОС-3 пока не получили широкого применения.

В некоторых разомкнутых СЧПУ применяются датчики исходного положения рабочих органов ДП (рис. 18).

Более подробная функциональная схема типовой СЧПУ показана на рис. 16, а на рис. 17 наиболее распространена 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-косинус-

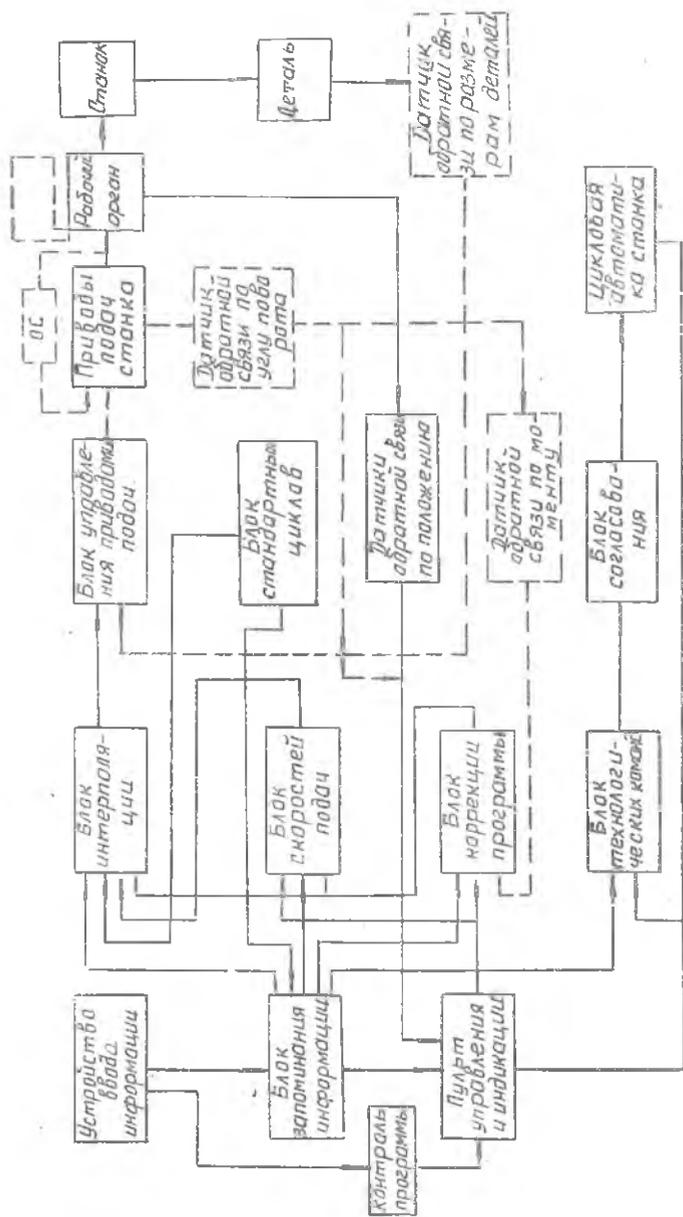
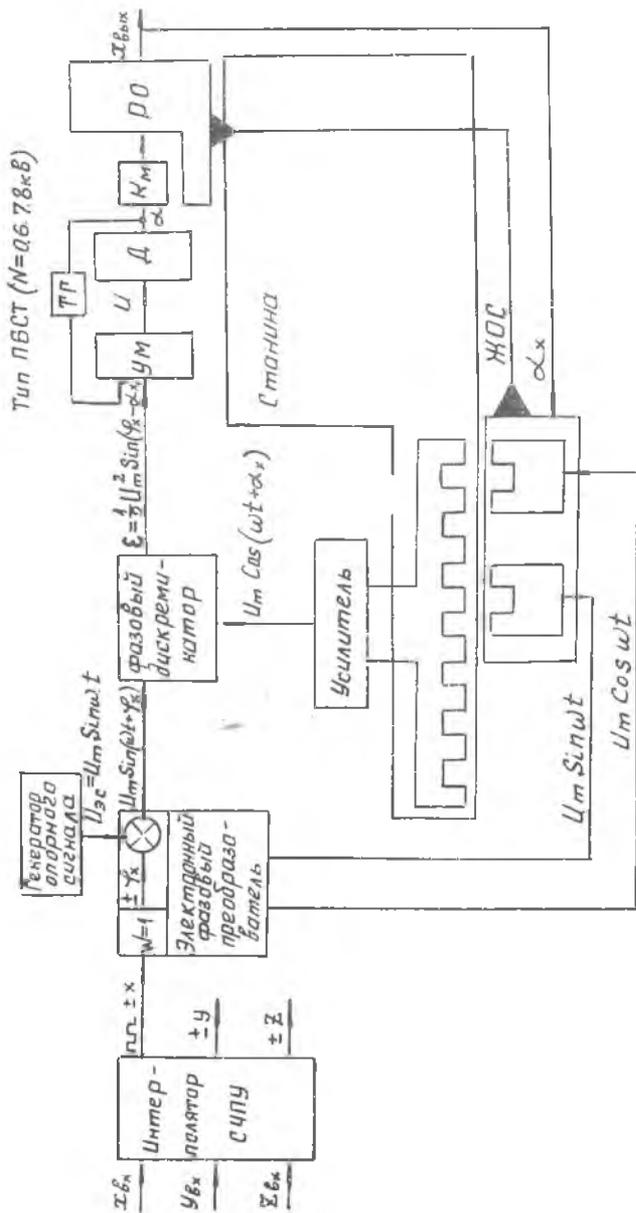


Рис. 16. Схема типовой СЧПУ и Ст. ЧПУ



Р и с. 17. Преобразование числовой информации фазовым преобразователем и индукционным

ные 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:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} U m^2 \sin \varphi, \quad (89)$$

где $\varphi = \varphi - \alpha$;

φ - угол сдвига фазы сигнала управления;

α - угол сдвига фазы сигнала обратной связи.

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

Эффективное использование систем и станков 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 СЧПУ, 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 СЧПУ.

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

§ 2. Классификация систем числового программного управления

Различное технологическое назначение систем и станков прог-

рамного 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 ЧПУ, основанная на комплексе классификационных признаков и положенная в основу каталога систем и станков СЧПУ. 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) п о з и ц и о н н ы е (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 сверлильными станками, отдельными моделями расточных и токарных станков);

б) н е п р е р ы в н ы е (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) у н и в е р с а л ь н ы е (У), обеспечивающие как позиционное, так и непрерывное управление (они нашли преимущественное применение в многоцелевых и многопозиционных станках).

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

По виду привода системы делятся на две категории:

1. С шаговым приводом для импульсных систем.

2. Со следящим или бесступенчатым приводом.

В последнее время широко применяется бесступенчатый тиристорный привод.

В соответствии с этой классификацией разработана маркировка систем ЧПУ (например, ПЗЭЗ, Н5Э1 и др.). Конструктивные модификации систем обозначаются буквами (например ПЗЭЗА, ПЗЭ1М, Н2Э1М и т.д.).

Наряду с этим, на заводах используются системы ЧПУ, имеющие другую маркировку. (В основном это системы более ранних выпусков). Напр. "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 интерполятор, что приводит к превращению СЧПУ в универсальные системы.

Непрерывные или контурные СЧПУ с вводом информации от перфоленты по сравнению с обычными позиционными системами 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, изме-

няющих положение детали, и обеспечивают как позиционную, так и контурную обработку на многоцелевых и многопозиционных станках. Они находят все более широкое применение при обработке сложных деталей в авиадвигателестроении. Применение многоцелевых и многопозиционных станков существенно сокращает цикл обработки этих деталей, обеспечивает высокую производительность процессов обработки и дает большой экономический эффект, несмотря на сравнительно высокую стоимость применяемого оборудования.

§ 3. 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 декодированном 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 перфоленту с применением ручного программирования; затем с помощью интерполяторов и пультов запись программы переписывалась на магнитную ленту. В то время считалось, что подготовка программы как наиболее трудно реализуемый процесс можно производить на одном СЧПУ (интерполаторе и пульте записи) и, размножив ее, использовать на 10-15 станках ЧПУ с применением простейшей и дешевой аналоговой системы управления станком с вводом программы на магнитной ленте. При этом для обработки мелких и средних деталей со временем обработки 20-30 минут 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 (девиацией частоты).

Распространению аналоговых систем управления с записью на

магнитной ленте способствовала возможность записи программы путем моделирования процессов обработки при ручном управлении и с использованием копируемых устройств, а также (позднее) - с применением созданной системы машинного программирования СИС-У 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 ($S \approx 1000 - 1500$ 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.д.

Все это вместе взятое привело к тому, что СЧПУ с записью на магнитной ленте заменяются СЧПУ с записью программы на перфоленте

§ 4. Классификация станков числового программного управления

Станки 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 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 СЧПУ, отмечаемой в паспортных данных, делятся на пять групп:

- Н - нормальной точности;
- П - повышенной точности;
- В - высокой точности;
- А - особо высокой точности;
- С - особой точности.

В каталоге 1972 года приводятся 117 моделей станков ЧПУ, выпускаемых станкостроительными заводами СССР. Кроме этого, в авиационной промышленности применяется большое количество станков, приобретенных из стран СЭВ, капиталистических государств: Италии, ФРГ, Англии, США и Японии.

Наряду с новыми обозначениями металлорежущих станков ЧПУ, таких как 1А616 Ф3, 1В616 Ф3, 1К62 Ф3, 1БП20М Ф3, 1К630 Ф3, 1К650 Ф3, 6М11 Ф3, 6П13 Ф3, 69904П Ф4, 6906ПМ ФЧ и др., на заводах применяются станки, имеющие другие обозначения: 1А616ПУ, КТ100А (Средневожжский завод) 1К62ПУ (Московский станкозавод "Красный Пролетарий"), АТ1р2М12У (Московский завод), РТ699 Ф3 (Рязанский завод), 6Н13ГЭ2 (Горьковский завод). Это связано, главным образом, с выпуском станков ЧПУ до установления единой классификации.

При относительном сходстве маркировки станки ЧПУ по сравнению с обычными приобретают все более заметные отличия. Рассматривая конструктивные особенности станков ЧПУ, их можно разделить на 4 поколения:

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

2 поколение характеризуется созданием специальных станков ст. ЧПУ. Они отличались:

- 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.;

- 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 верт. фрезерных станках ФП-27 и станках типа "Горизон 3" фирмы "Оливетти" к направляющим станин приклепляются пластины из антифрикционных пластмассовых материалов);

- ускоренным перемещением рабочих органов с целью уменьшения времени холостых ходов (с применением скоростных гидросистем для шаговых импульсных систем и электромеханических приводов с тиристорным усилителем);

- расширением эксплуатационных характеристик станков путем применения многоинструментальных головок, перемещающихся в горизонтальной плоскости столов у сверлильных станков и т.п.;

- созданием замкнутых систем управления с датчиками обратной связи.

3 поколение. Характеризуется созданием многоцелевых и многопозиционных станков ЧПУ (обрабатывающих центров), на которых при одной установке детали производится большое количество работ, обычно выполняемых на ряде сверлильных, расточных, фрезерных и (частично) токарных станках. 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.

4 поколение относятся станки ЧПУ адаптивного управления, инвариантных 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).

§ 5. Программы СЧПУ

Программа СЧПУ представляет собой точное алгоритмическое предписание порядка и режимов функционирования и управления станка ЧПУ. Она включает программноноситель и произведенную на ней запись.

В соответствии с ГОСТ 13052-1967 г., программноносителем информации принята восьмидорожечная бумажная перфолента, шириной 25,4 мм, с записью информация в коде *JSD-7bit* путем пробивки

отверстий в кодовых комбинациях.

В системах более ранних выпусков и частично в современных СЧПУ предусматривается (в соответствии с нормалью станкостроения Э68-1) использование пятидорожечной бумажной ленты, шириной 17,5 мм, с записью информации в кодовых комбинациях кода БЦК-5.

В станках иностранных фирм, поставляемых в СССР, используется также восьмидорожечные бумажные ленты, соответствующие ГОСТ 13052 и международному стандарту.

Порядок записи отдельных кадров программы СЧПУ на перфоленту определяется форматом кадра.

В аналоговых системах управления на магнитной ленте применяются многодорожечные магнитные ленты шириной 35 мм.

Вид программносителя и способ представления информации определяет конструкцию устройств ввода информации. Нанесенная на нем программа определяет последовательность и траекторию движения рабочих органов, параметры движения (скорость, ускорения) и обуславливает, в сочетании с характеристиками системы, характер и величину погрешностей обработки.

Траектории движения и требования к их параметрам различны для позиционных и непрерывных СЧПУ, которые рассматриваются далее.

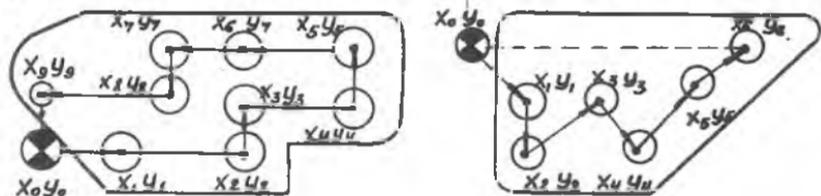
§ 6. Траектории движения инструментов позиционных СЧПУ

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 ин-

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



Р и с. 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 зазоров 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.

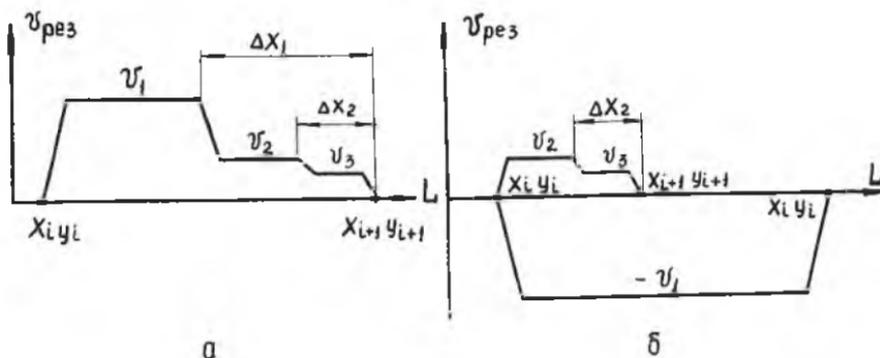
Изменение результирующей скорости при одностороннем подходе к точке позиционирования показано на рис. 19. В случае, если координата x_i исходного положения меньше, чем заданная координата x_{i+1} (рис. 19а), происходит ускоренное перемещение стола со скоростью v_1 . На расстоянии $\Delta x_1 \approx 10$ мм от точки позиционирования скорость движения снижается до v_2 и затем на расстоянии Δx_2 - до "ползучей скорости" v_3 . Расстояние Δx_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. 19б).

Двухсторонний подход 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.



Р и с. 19. Изменение результирующей скорости при подходе к точке позиционирования: а - при одностороннем подходе; б - при подходе с противоположной стороны

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

§ 7. Траектории движения инструментов непрерывных СЧПУ

Также как и в позиционных СЧПУ, определение траекторий движения рабочих органов 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 чистоты обработки модуль вектора должен иметь постоянное значение.

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

Точки перехода траектории от одного контура к другому, описываемому различными уравнениями (прямой, окружности, параболы и т.п.) называются опорными точками; координаты этих точек

$x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n$ определяются методами аналитической геометрии и, как правило, задаются в исходных данных, прилагаемых к операционным картам для расчета программ.

При кодированной записи на перфоленте 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 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 перфоленте, преобразуется в сигналы управления, соответствующие значениям координат 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 (рис.20г).

В более простых системах управления применяются линейные интерполяторы, при которых окружности и более сложные кривые заменяются многоугольниками (рис. 20в).

В редких случаях применяются более сложные системы с параболическими интерполяторами или мини ЭВМ. Последние могут

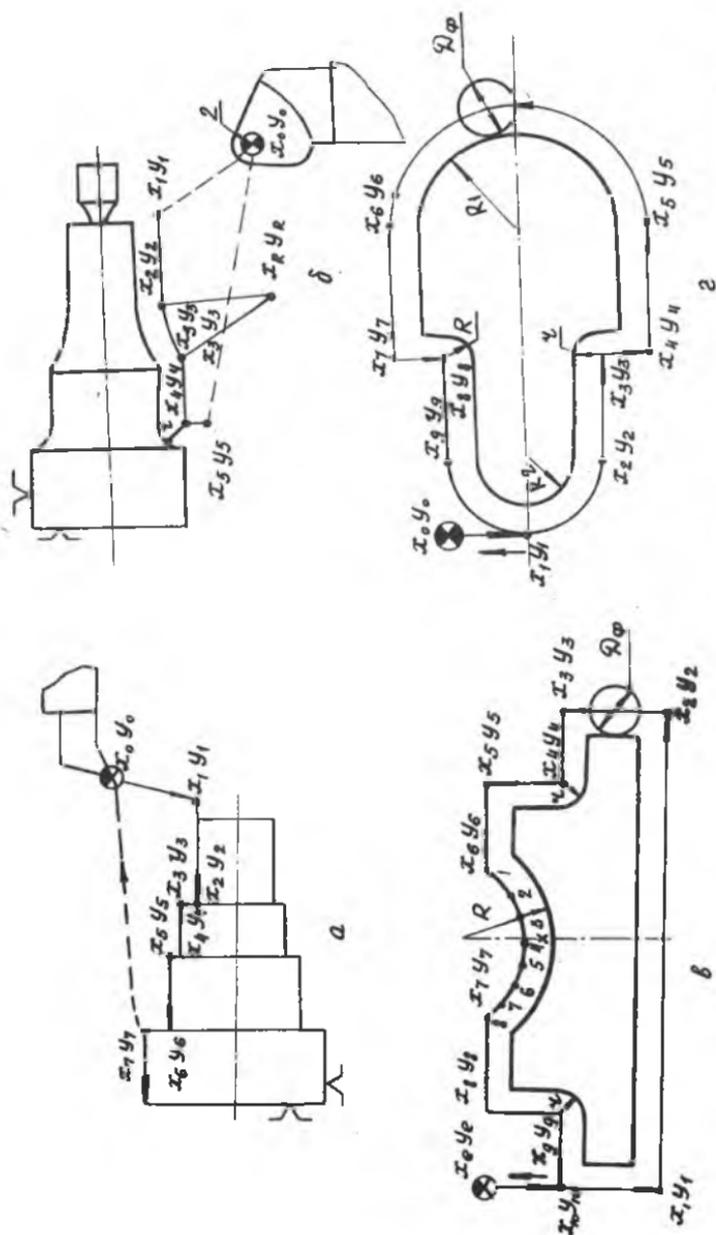


Рис. 20. Траектории движения непрерывных СЧУ: а, б - траектории движения при токарной обработке; в - траектория движения при фрезеровании с применением линейного интерполлятора; г - тоже - при применении линейно-кругового интерполлятора

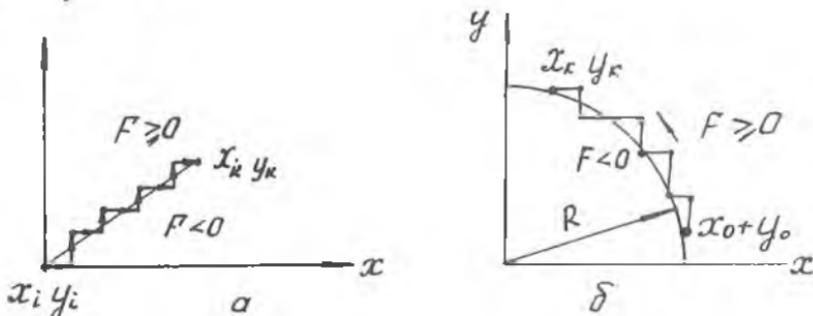
обеспечивать любые траектории движения.

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:

$$\frac{y_i}{x_i} = \frac{y_k}{x_k}$$

или

$$y_i x_k - y_k x_i = 0.$$



Р и с. 21. Интерполяция прямой и окружности методом оценочной функции: а - интерполяция прямой; б - интерполяция дуги окружности

Значение $F_i = y_i x_k - y_k x_i$ называется линейной оценочной функцией.

При подаче единичного импульса по оси ox :

$$F(x_i+1, y_i) = x_k y_i - y_k (x_i+1) = F(x_i, y_i) - y_k < F_i < 0$$

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

$$F(x_i, y_i+1) = x_k (y_i+1) - x_i y_k = F(x_i, y_i) + x_k > F_i > 0$$

делается шаг в направлении оси ox .

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 $+y$). Вычисления прекращаются при достижении заданной точки с координатами x_k, y_k .

При интерполяции окружности (рис. 21б) начало координат совмещается с центром окружности и промежуточные точки участка ок-

ружности 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 $-x$, а при $F < 0$ в направлении $+y$ 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 применении линейных интерполяторов траектории движения по кривым (окружностям, гиперболам, параболам и т.п.) заменяются прямыми, образующими многоугольники (рис. 22а и 22б).

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 (рис. 22а). В этом случае величина погрешности аппроксимации зависит от длины сторон многоугольника и при заданном радиусе фрезы определяется по формуле (рис. 22б)

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

где φ - угол аппроксимации.

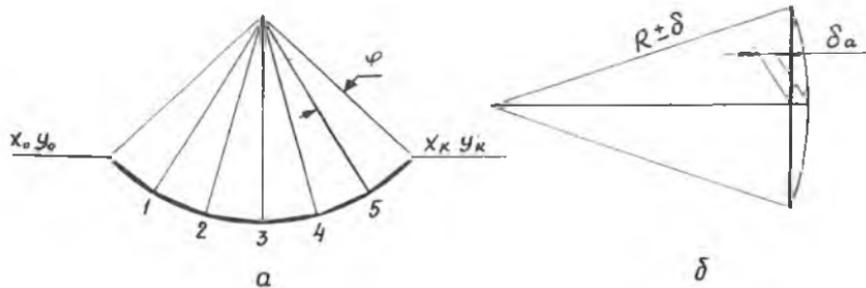
Погрешность аппроксимации принимается в зависимости от допустимых отклонений на радиус контура:

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

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 сиг-



Р и с.22. Аппроксимация дуги окружности: а - аппроксимация дуги окружности; б - погрешность аппроксимации

налов → от суммарного сдвига фазы относительно опорного сигнала. Точность воспроизведения траектории 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.

§ 8. Системы кодирования (символика) информации СЧПУ. Код БЦК-5

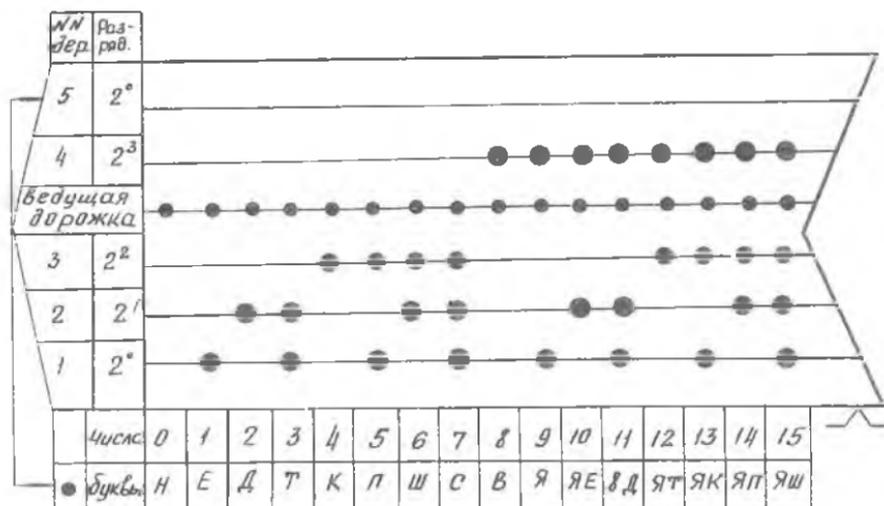
Система кодирования представляет собой совокупность условных обозначений, используемых при программировании информации управления СЧПУ. В сочетании с методом контроля записи и считывания информации она определяет число дорожек применяемой перфоленты.

При создании первых систем СЧПУ применялся простейший числовой код "215Г". Затем нормалью 368-1 Министерства станкостроительной промышленности СССР был рекомендован буквально - 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 происходит переход на код JSO-7bit, разработанный Международной ассоциацией стандартов с участием СССР.

Буквенно-цифровой код БЦК-5 предусматривает использование пятидорожечной перфоленты.

На первых 4-х дорожках перфоленты наносится цифровая информация в двоично-десятичном коде, а на пятой дорожке - признак буквы, в случае, если производится кодирование адреса команд. Таким образом, при кодировании числовых значений пробивки на пятой дорожке не производится.

Символика информации кода БЦК-5 показана на рис.23



Р и с. 23. Код БЦК - 5

Указанной нормалью рекомендуются следующие обозначения адресов команд:

- Е, Д, Т - перемещения по осям;
- К - признак номера кадра;
- П, Ш, С - признак команд, определяющих значения подачи, частоты вращения и смены инструмента (с указанием *N* инструмента);
- В - вспомогательные команды;
- Н - признак команды - конец кадра;
- ЯНН - признак конца программы, записываемый отдельным кадром.

Направления перемещений по осям координат " + " или " - " обозначаются обычно 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 $Z_1 = 2^5 = 32$ (5 bits). При этом число кодовых признаков, без использования резервных обозначений составляет $Z_2 = 10 \times 2 = 20$ 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 СЧПУ важнейшей характеристикой является структура отдельных фраз (или кадров), которая определяется форматом кадра. Формат кадра определяет и конструкцию считывающих устройств.

Например, для СЧПУ "Логина 2М" (Н22Г) токарного полуавтомата АГПр-2М 12У(1925Ф3) формат кадра можно представить в виде
М1К3Е ± 3,2Д ± 3, 2П2Ш2С2В2Н000.

М-Г означает "Контроль по модулю", т.е. в Г 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 записанного 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.

"B2" - обозначает вспомогательные команды. Для этого станка предусмотрены две вспомогательные команды:

B00 - работа без охлаждения;

B01 - работа с охлаждением.

"H000" отмечается конец кадра.

Специфичным для данной системы является обозначение знака ведущей координаты (имеющее большее численное значение импульсов), которое отмечается добавлением к числу "1" или "2", относящимся к знаку перемещения, числа 4.

Например $\Delta x_1 = 40,3$ мм; $\Delta y_1 = -100,6$ мм.

"Ведущей" координатой является Δy , и при шаге импульса $\sigma_x = 0,01$ и $\sigma_y = 0,055$ мм величина перемещений, выраженная в импульсах, составит: $x_1 = 4030$, $y_1 = -20120$ и запишется: E104030 D620120.

Кроме того, направление вращения шпинделя отмечается:

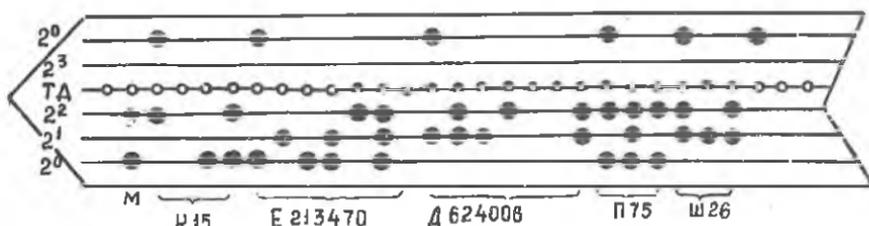
04 при правом вращении (по часовой стрелке),

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: I KO15 E2 13470 D624006 P75 W26H000.

"Контролем по модулю" является число "I", дополняющее до 80 сумму числовой информации, так как она составляет:

$$\sum Z = 4 + 1 + 5 + 1 + 2 + 1 + 3 + 4 + 7 + 2 + 6 + 2 + 4 + 6 + 5 + 7 + 5 + 6 + 2 + 6 = (79)$$



Р и с. 24. Информация кадра на перфоленте

Этот кадр будет зафиксирован на перфоленте, как показано на рис.24.

§ 9. Код JSO-7bit. Запись программы с использованием этого кода

Код JSO - 7bit является буквенно-цифровым-знаковым кодом. При его применении используется восьмидорожечная перфолента шириной 25,4мм. 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 дорожке делается пробивка отверстия. Символика информации в коде JSO-7bit показана на рис. 25.

Как видно из приведенного рисунка, число передаваемых признаков этим кодом

$$z = 2^4 \cdot 2^3 = 128 (7bit).$$

Рекомендуемые обозначения адресов команд показаны в табл.2.

Т а б л и ц а 2

Рекомендуемые обозначения при применении кода JSO-7bit

№ пп	Текстовое обозначение	Целевое назначение	Кодовое обозначение	
			признак	цифровой код
1	2	3	4	5
1	x, y, z	Перемещение по осям	5	8 ...10
2	u, v, w	Перемещение параллельно осям	5	5 ...8
3	A, B, C	Поворот относительно осей	4	1...3
4	$F (feed)$	Скорость перемещения (подача) или время выполнения кадра	4	6
5	$S (speed)$	Частота вращения шпинделя	5	3

1	2	3	4	5
6	<i>T (tool)</i>	№ инструмента	5	4
7	<i>G</i>	Подготовительные команды (коррекция, ускор. перемещения)	4	7
8	+ -	Знаки перемещения	2	II, I3
9	<i>M</i>	Вспомогательные команды (смена инструмента и т.п.)	4	I3
	<i>LF</i>	Типовые подпрограммы	0	10
10	%	Начало программы	2	5
11	:	Установка в исходную	3	10
12		точку		
	<i>N</i>	Номер кадра	4	I4
13	<i>Del</i>	Команда для печатающих		
14		машин ("забой") для поташения ошибки	7	I5

В некоторых СЧПУ в соответствии с кодом *ISO-7bit* могут применяться и другие обозначения команд.

В коде *ISO - 7bit*, также как и при коде БЦК-5, программа СЧПУ записывается в виде отдельных кадров или фраз, состоящих из слов, относящихся к отдельным адресам команд.

Структура отдельных фраз характеризуется также форматом кадра, определяющим конструкцию считывающего устройства.

Например, при формате кадра

N3G2X±3,2,Z±3,2J4K4F6S2T3M2LF.

(Система "Программатор ЭМ907" ст. IА616Ф3)

N3 - означает номер кода, записываемый трехразрядным числом;
G2 - вспомогательные команды, выраженные двухразрядным числом;

$x \pm 3,2, z \pm 3,2$ - перемещения по оси *ox* и *oz*, выраженные трехразрядными числами целых и двухразрядными сотых долей, мм;

J4 - команда по выбору шага резьбы по оси X;

K4 - такая же команда по оси *oz*;

- F6 - по выбору подачи, выраженная шестизрядным числом;
- S2, T3 - частота вращения и номер инструмента;
- M2 - вспомогательные команды;
- LF - конец кадра (фразы).

В этом случае программа кадра № 7, соответствующая ускоренному перемещению по $\Delta X = -74,5 \text{ мм}$, $\Delta Z = 0$ при $v = 600 \text{ мм/мин}$, цене импульса $h_x = 0,01 \text{ мм}$, при частоте вращения шпинделя $n = 560 \text{ об/мин}$ (код 42), при установке реза в переднем резцодержателе в I позиции (код T500) запишется в виде

N 0070 00X-07450 S 42T500M03M06M07M12.

Как видно, неиспользованные адреса команд не записываются.

При этом показано несколько вспомогательных команд:

600 - ускоренное перемещение по оси OX;

M03 - вращение шпинделя по часовой стрелке;

M06 - команда на поиск инструмента (T500);

M07 - включение охлаждения;

M12 - переключение II ступени скорости электродвигателя ($n_x = 1400 \text{ об/мин}$) соответствует коду S 42);

LF - конец фразы.

Указания об особенностях кодирования, формате кадра, числе одновременно записываемых вспомогательных команд, обычно указывается в паспорте станка, где отражаются и другие особенности СЧПУ.

§ 10. Последовательность разработки документации для СЧПУ и станков ЧПУ

Разработку технической документации для систем и станков ЧПУ обычно производят в 6 этапов:

1. Анализ исходных данных.

2. Составление маршрутной технологии.

3. Разработка операционных карт.

4. Определение данных для расчета программ.

5. Составление, кодирование программ и перенесение их на программноносители.

6. Контроль программ и качественных показателей изготавливаемых деталей.

Анализ исходных данных (чертежей деталей и ТУ, руководящих и справочных материалов) принципиально не отличается от обычных методов, применяемых при разработке групповых методов обработки.

Целью этого анализа является типизация обрабатываемых деталей, выбор оптимальных заготовок, методов обработки, оборудования и технологической оснастки, обеспечивающих наибольшую производительность при минимальных экономических затратах. При этом предполагается улучшение технологичности конструкций, проведение качественных инженерных оценок на базе накопленного опыта и технико-экономическое сравнение вариантов технологического процесса.

На основе выполнения I-го этапа составляется маршрутная технология и оформляются заказы на необходимую технологическую оснастку.

В процессе выполнения второго и третьего этапов определяются размерные связи и размеры, уточняются размеры заготовок, производится расчет режимов резания, оформляются операционные карты технологического процесса.

Характер и содержание данных для расчета программы зависит от применяемой СЧПУ и используемых методов программирования (ручного или машинного).

На форму представления данных расчета программ, относящихся к траекториям движения рабочих органов, влияет вид интерполятора СЧПУ. Для линейно-круговых интерполяторов требуется, как правило, определение только координат опорных точек траекторий движения инструмента и величины приращений этих координат. При применении линейных интерполяторов для широко применяемых участков траекторий по окружности, требуется определение и промежуточных точек, лежащих между опорными точками, с обеспечением заданной точности контуров.

В обоих случаях требуется учитывать способ определения настроечных размеров и возможность их коррекции.

При машинном программировании характер и особенности данных для расчета зависят от применяемой системы программирования (САП) и также — от настроечных размеров при обработке.

При ручном программировании программа СЧПУ записывается в принятом коде в виде столбца команд, соответствующих последовательности обработки детали на станке (в порядке номеров кадров).

Запись отдельных фраз (кадров) производится в строгом соответствии с формами кадра. Повторяющиеся команды, относящиеся к выбору приращений координат и другим указанным в паспорте СЧПУ данным, как правило, в следующие кадры не записываются.

Перенесение записанной программы на программноноситель осуществляется с помощью печатающих устройств — перфораторов.

Выбор метода контроля программы неразрывно связан с методами их разработки.

В качестве распространенных способов контроля программ применяются:

1. Перфорация программы, выполненная двумя исполнителями в виде 2-х лент и их сравнение на устройстве УПДЛ комплекта "Брест — I". При несоответствии программ процесс считывания прекращается.

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

3. Обработка деталей из легкообрабатываемых материалов (древесины, легких сплавов и т.п.).

4. Обработка детали с припуском при точении или с уменьшаемым диаметром фразы или фрезеровании.

5. Обработка первой детали с всесторонним контролем и последующей коррекцией размеров.

6. Комплект СЧПУ часто входит координатограф (например УКИ-1М), на котором также можно проверять траектории движения инструментов.

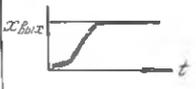
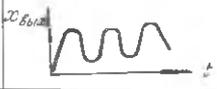
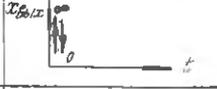
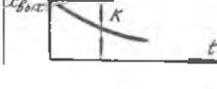
Точность станков ЧПУ обычно проверяется по тестовым программам, прилагаемым в паспорте станка.

Системный подход при подготовке производства на станках ЧПУ предусматривает не только внедрение групповых методов обработки, с целью сокращения оснастки и времени, затрачиваемого на программирование, но и создание банка заблаговременно проверенных программ, а также сочетание задачи обработки с учетом и планированием, обеспечение полной загрузки станков в течении двух и трех-сменной работы, кроме того организацию систематического контроля их использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы XXV съезда КПСС. М., Политиздат, 1976.
2. Евстигнеев М.И. Автоматизация технологических процессов в авиадвигателестроении. М., "Машиностроение", 1969.
3. Владзиевский А.П., Белоусов А.П. Основы автоматизации производства в машиностроении. М., "Высшая школа", 1974.
4. Основы автоматического регулирования и управления. Под редакцией В.М. Понамарева и А.П. Литвянова. М., "Высшая школа", 1974.
5. Малев А.Н., Иванов Ю.В. Основы автоматизации и автоматизация производственных процессов. М., "Машиностроение", 1974.
6. Руководящие технические материалы РМТЗЦ. Подготовка программ для обработки деталей на фрезерных станках ЧПУ. М., НИИТ, 1971.
7. Никитенко В.Д. Подготовка программ для станков с программным управлением. М., "Машиностроение", 1973.
8. Металлорежущие станки с числовым программным управлением (Каталог). М., НИИМАШ, 1972.
9. Харизмеров И.В. Электрооборудование и электроавтоматика металлорежущих станков. М., "Машиностроение", 1975.
10. Киселев В.М. Фазовые системы числового программного управления станками. М., "Машиностроение", 1976.
11. Станки с программным управлением. Справочник. М., "Машиностроение", 1975.
12. Автоматизация привода, управления и контроля в машиностроении. М., Наука, 1974.
13. Вопросы технологии производства летательных аппаратов. Труды КуАИ. Выпуск XX, XXII, XXIII и вып. 62. Куйбышев, 1965, 1973.

Характеристики типовых звеньев

Группы	№/п	Наименование звена	Передаточная функция	Переходные характеристики
Позиционные	1	Усилительное (безинерционное)	K	
	2	Апериодическое (инерционное) звено первого порядка	$\frac{K}{T\rho + 1}$	
	3	Апериодическое звено второго порядка	$\frac{K}{T_1 T_2 \rho^2 (\rho + T_1 + T_2) \rho + 1}$	
	4	Колебательное звено	$\frac{K}{T^2 \rho^2 + 2\zeta T \rho + 1}$ $0 < \zeta < 1$	
	5	Консервативное звено	$\frac{K}{T^2 \rho^2 + 1}$	
Интегрирующие	6	идеальное интегрирующее звено	$\frac{K}{D}$	
	7	Интегрирующее звено с запаздыванием	$\frac{K}{D(T\rho + 1)}$	
	8	Изодромное звено	$\frac{K(T_1 \rho + 1)}{D}$ где $K = \frac{K_1}{T_1}$	
Дифференцирующие	9	Идеальное дифференцирующее звено	$K\rho$	
	10	Дифференцирующее звено с замедлением	$\frac{K\rho}{T\rho + 1}$	

О Г Л А В Л Е Н И Е

В в е д е н и е	3
Г л а в а п е р в а я	
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	
§ 1. Основные понятия и определения.....	7
§ 2. Понятие о звеньях систем.....	9
§ 3. Уравнения и передаточные функции звеньев САУ..	10
§ 4. Примеры реальных звеньев (элементов) систем ав- томатического управления. Определение передаточной функции электрохимической ячейки.....	13
§ 5. Переходная временная характеристика электро- химической ячейки. Характеристики типовых звеньев...	17
§ 6. Электрические двигатели.....	18
§ 7. Уравнения движения и передаточные функции двига- теля постоянного тока с независимым возбуждением....	19
§ 8. Гидравлические исполнительные механизмы (гидро- двигатели, гидроусилители). Определение передаточной функции ГИМ.....	21
§ 9. Правила структурных преобразований.....	24
§10. Функциональные и структурные схемы систем авто- матического управления.....	27
§11. Качественные характеристики систем автоматичес- кого управления.....	30
§12. Устойчивость систем автоматического управления. Критерии устойчивости.....	31
§13. Критерий устойчивости Гурвица.....	32
§14. Системы регулирования процесса электрохимичес- кой размерной обработки.....	33
§15. Аналоговые системы автоматического управления. Передаточная функция двигателя серии ПБСТ со встроен- ным тахогенератором.....	40
§ 16. Особенности работы копировальных следящих систем. Однокоординатное и двухкоординатное копирование.....	41
§17. Гидравлические следящие системы	43

§ 18. Устойчивость ГСС.....	47
§ 19. Системы автоматического управления с компенсацией упругих перемещений системы СПИД.....	49

Г л а в а в т о р а я

ЧИСЛОВОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОРЕЗУЩИХ СТАНКОВ

§ 1. Системы и станки числового программного управления.....	51
§ 2. Классификация систем числового программного управления.....	57
§ 3. СЧПУ с вводом программы на магнитной ленте....	60
§ 4. Классификация станков числового программного управления.....	61
§ 5. Программы СЧПУ.....	63
§ 6. Траектории движения инструментов позиционных СЧПУ.....	64
§ 7. Траектории движения инструментов непрерывных СЧПУ.....	66
§ 8. Системы кодирования (символика) информации СЧПУ. Код БЦК-5.....	71
§ 9. Код <i>ISO-7bit</i> . Запись программы с использованием этого кода.....	75
§ 10. Последовательность разработки документации для СЧПУ и станков ЧПУ.....	78
Л и т е р а т у р а	81
П р и л о ж е н и е	82