

0-594  
Н.Г. СОКОЛОВ  
В.А. ЕЛИСЕЕВ

РАСЧЕТЫ

ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ

ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ

СТАНКОВ

**Н. Г. СОКОЛОВ,**

**В. А. ЕЛИСЕЕВ**

**РАСЧЕТЫ  
ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДУ  
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ  
СТАНКОВ**

ДОПУЩЕНО МИНИСТЕРСТВОМ ВЫСШЕГО  
И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР  
В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ВУЗОВ,  
ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ  
«ЭЛЕКТРОПРИВОД  
И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ  
УСТАНОВОК»



**ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА»**

**Москва 1970**

6П2.1.081 : 6П4.6.08

С 59

УДК 621.34 : 621.9-2-82.00

Соколов Н. Г. и Елисеев В. А.

С 59 Расчеты по автоматизированному электроприводу металлорежущих станков. Учеб. пособие для вузов по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок». М., «Высш. школа», 1969.  
296 с. с илл.

В книге содержатся расчеты по системам автоматизированных электроприводов с учетом особенностей технологического процесса и конструкций станков. Цель книги — помочь студентам при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов. Может быть использовано инженерно-техническими работниками промышленности, работающими в области проектирования и эксплуатации электрооборудования металлорежущих станков.

3—3—10

6П2.1.081

94—69

Рецензенты:

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ленинградского политехнического института

Канд. техн. наук А. М. Лебедев

## Условные обозначения величин

Обозначения	Названия величин	
	электрические	механические
$U, u$	напряжение	—
$I, i$	ток	передаточное отношение вращательного движения
$P$	мощность	мощность
$E, e$	э. д. с.	—
$A$	работа, энергия	работа, энергия
$M$	момент	момент
$\omega$	угловая частота	угловая скорость
$n$	—	скорость вращения
$\Phi$	магнитный поток	—
$\varphi$	относительный магнитный поток; сдвиг фаз; угол относительная э. д. с.	плавность регулирования
$\psi$	число фаз	—
$m$	индукция	модуль
$B$	напряженность магнитного поля	ширина колеса, круга, детали
$H$	момент инерции	твердость
$J$	намагничивающая сила	момент инерции
$F$	сопротивление активное	усилие
$R, r$	сопротивление индуктивное	—
$x$	полное сопротивление	отношение коэффициентов
$Z, z$	постоянная времени	число зубьев шестерен
$T$	емкость	стойкость резца
$C$	время	коэффициент величин резания; эксплуатационные расходы
$t$	условное время	глубина резания
$\tau$	вещественная, мнимая, амплитудная и фазовая частотные характеристики	число часов работы
$P(\omega), Q(\omega)$	коэффициент обратной связи по напряжению	—
$L(\omega), \theta(\omega)$	коэффициент обратной связи по току	угол наклона винтовой линии
$a$	коэффициент обратной связи по скорости	половина угла трапецеидальной резьбы
$\beta$	—	—
$\gamma$	диапазон регулирования частота	подача, площадь
$s$	магнитная проницаемость	диаметр изделия, инструмента
$D, d$	коэффициент усиления	коэффициент трения
$f$	коэффициент полезного действия	вязкость
$\mu$	—	коэффициент загрузки
$K, k$	коэффициент индуктивности	коэффициент полезного действия
$\eta$	удельное сопротивление	длина хода, длина обработки
$L, l$	—	производительность
$Q$	—	угол трения, передаточное отношение поступательного движения
$\rho$	—	—

493898

Обозначения	Названия величин	
	электрические	механические
$v$	—	скорость линейная
$\varepsilon$	перерегулирование, коэффициент рассеяния	предел пропорциональности
$\delta$	относительная неточность статической характеристики	погрешность слежения, зазор
$h$	—	износ, шаг винта
$w$	число витков	—
$\Delta$	приращение функции, параметр нелинейности	—
$\Pi$	произведение величин	произведение величин, припуск изделия
$\kappa$	безразмерная постоянная времени шагового двигателя	—
$\varepsilon$	угловое ускорение	—
$\mathcal{W}$	передаточная функция	—

## В е е д е н и е

Современный металлорежущий станок оборудован сложной системой автоматизированного электропривода, включающей в себя многие электрические машины, как генераторы, так и двигатели, всевозможные усилительные и преобразовательные устройства, многочисленную аппаратуру. В современных тяжелых и уникальных станках число электрических машин достигает нескольких десятков.

Между электродвигателями станка существуют электрические блокировочные и функциональные связи с использованием сложной электрической схемы управления.

В совокупности с механическими, гидравлическими и другими системами автоматизированный электропривод обеспечивает высокую производительность и качество работы современных металлорежущих станков, являясь основой комплексной автоматизации технологических процессов машиностроения. Быстрое развитие техники вызвало появление весьма сложных и разнообразных систем комплексной автоматизации в станкостроении, таких, как системы следящего электропривода, программные, самонастраивающиеся системы и др.

Увеличение производительности станка и уменьшение стоимости электрооборудования являются основными требованиями, предъявляемыми к системам автоматизированного электропривода, однако они противоречат друг другу. Усложнение систем влечет за собой удорожание электрической части станка за счет увеличения стоимости элементов электрооборудования. Кроме того, усложняется и удорожается его обслуживание и эксплуатация. Целесообразное решение этих вопросов получается путем использования комплексной автоматизации станков и применения перспективных по качеству, надежности и уменьшению стоимости элементов электрооборудования. Поиск целесообразных решений представляет собой нелегкую техническую и экономическую задачу. Наиболее сложной эта задача становится при выборе систем электропривода и способа регулирования скорости механизма станка. Возникает необходимость технических и экономических расчетов систем автоматизированного электропривода, чему и посвящается в основном настоящая книга.

Бурный технический прогресс последних лет дает возможность современным электрическим системам удовлетворять почти любым техническим требованиям. Новые бесконтактные элементы, так же как и магнитные и полупроводниковые усилители, твердые неуправляемые и управляемые вентили и другие элементы автоматики, позволяют создавать достаточно надежные системы комплексной автоматизации. При этом усложняются расчеты систем автоматизи-

Наименование метода	Примечание	Преимущества	Недостатки	Оценка точности
Классический метод [Л. 26]	Расчет переходного процесса в линейных САУ до 6-го порядка	Точный	Большая затрата времени при определении корней и постоянных интегрирования	Хорошая
Операторный метод [Л. 14]	Расчет переходного процесса в линейных САУ до 6-го порядка	Точный. Меньшие затраты времени при определении постоянных интегрирования	Большие затраты времени при определении корней. Непригодность для нелинейных САУ	Хорошая
Частотный метод [Л. 14]	Расчет переходного процесса в линейных САУ любого порядка	Меньшие затраты времени, чем в классическом и операторном методах	Непригодность для нелинейных САУ	Удовлетворительная
Метод кусочно-линейной аппроксимации с применением классического операторного и частотного методов	Расчет переходного процесса в линейных САУ с линеаризацией по участкам	Применимость для нелинейных САУ	Значительные затраты времени	Удовлетворительная. Зависит от точности линеаризации
Метод логарифмических частотных характеристик [Л. 14]	Синтез корректирующих цепей линейных САУ	Наглядность. Простота нахождения вещественной характеристики САУ	Непригодность для нелинейных САУ	Удовлетворительная
Метод фазовой плоскости [Л. 14]	Расчет переходных процессов в нелинейных САУ 2-го порядка	Простота, наглядность. Позволяет определять устойчивость нелинейных САУ по фазовой траектории	Ограниченность применения. Только для САУ 2-го порядка	Удовлетворительная

Метод взвешенных разностей [Л. 23, 26] (имеет разновидности: метод средних потерь; метод секущей и др.)	Расчет переходного процесса в нелинейных САУ любого порядка	Универсальность. Позволяет учитывать любое число нелинейностей	Кропотливый трудоемкий метод с большими затратами времени	Приближенное качественное решение с набегающей ошибкой. В замкнутой САУ набегающая ошибка несколько компенсируется
Метод фазовых срезов [Л. 14] (имеет разновидности: метод многих параметров в фазовых плоскостях и др.)	Расчет переходного процесса в нелинейных САУ любого порядка	Универсальность. Позволяет определять устойчивость нелинейных САУ по фазовым траекториям	Кропотливый трудоемкий метод с большими затратами времени	Аналогично методу конечных приращений
Графический метод Бальсина [Л. 36]	Расчет переходного процесса и синтез линейных САУ любого порядка	Универсальность. Позволяет производить синтез корректирующих цепей в процессе расчета	Кропотливый, трудоемкий метод	Аналогично методу конечных приращений
Метод математического моделирования [Л. 1, 47]	Расчет переходных процессов и синтез любых САУ	Удобство и универсальность. Сокращение затрат времени	Требует специального оборудования (ЭВМ)	Удовлетворительная
Метод гармонического баланса [Л. 14]	Определение устойчивости линейных САУ с одним нелинейным элементом (определенные амплитуды и частоты колебаний)	Удобство, наглядность и сравнительно небольшие затраты времени	Ограниченность применения. Только при одном нелинейном элементе	Удовлетворительная
Метод, основанный на теореме запаздывания операционного исчисления [Л. 14]	Расчет переходного процесса в линейных САУ с одним нелинейным элементом релейного действия	Удобство и наглядность. Меньшие затраты времени особенно при применении шаблона	Ограниченность применения. Только при одном релейном элементе	Удовлетворительная

рованного электропривода. Методика расчетов совершенствуется, при этом используются моделируемые математические установки и вычислительные цифровые машины. В гл. 10 данной книги приведены решения задач с использованием вычислительных устройств. Интересующиеся более подробной проработкой вопросов, связанных с применением этого прогрессивного метода, могут пользоваться специальной литературой [Л.1, 47 и др.].

Вычислительные машины являются пока достоянием научно-исследовательских и учебных институтов, поэтому книга посвящена «немашинной» расчетной методике, имеющей пока решающее значение. Среди большого количества существующих методов расчета не все равноценны применительно к конкретным случаям. Представляется целесообразным в данном учебном пособии дать классификацию наиболее известных методов с указанием их рационального применения и качественной оценкой точности результатов. Такая классификация приведена в табл. 1.

В книге даны конкретные примеры использования указанных методов для различных случаев практики и указания о целесообразности применения остальных методов. Следует помнить о роли экспериментальной проверки того или иного расчета. Эксперимент в технике современного электропривода металлорежущего станка имеет существенное значение вследствие нелинейности большинства протекающих в системе процессов, не всегда поддающихся точному теоретическому расчету. В связи с этим специалист электромеханик в области электропривода станков должен всегда помнить о значении экспериментальных работ при проектировании и расчете систем электропривода.

Разнообразие технологии металлообработки и конструкций станков требует постоянной творческой связи электриков, технологов и механиков станкостроения. Такая связь становится все более необходимой ввиду разработки и внедрения новых элементов и систем автоматизированного электропривода.

## ЧАСТЬ ПЕРВАЯ



### ОБЩИЕ



### РАСЧЕТЫ



### ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ



### МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ



### СТАНКОВ

## ГЛАВА 1.

### РАСЧЕТ ВЕЛИЧИН, ОБУСЛОВЛЕННЫХ РЕЗАНИЕМ МЕТАЛЛОВ НА СТАНКАХ

#### § 1-1. Скорость, усилие и мощность резания главного привода станков

По сложности электропривода наибольший интерес представляют универсальные станки общего назначения (индивидуального и мелкосерийного производства). За последние годы создан ряд моделей комбинированных станков (горизонтально-расточно-фрезерные, продольно-строгально-фрезерные и др.), объединяющих возможности производства различных работ.

При проектировании системы электропривода для универсальных и комбинированных станков важной задачей является правильный выбор мощности электродвигателей для различных приводов станка, для чего необходимо уметь определить такие параметры, как скорость, усилие и мощность резания. Если для простой технологической операции этот материал достаточно освещен в литературе, то для универсальных и комбинированных станков подобная задача нуждается в четкой формулировке.

Возможны три случая определения мощности.

1. Для универсального станка наибольшая мощность резания определяется самым тяжелым режимом обработки, который может быть задан в простейшем случае технологической картой станка, графиком зависимости усилия резания от скорости резания, таблицей для той же зависимости.

2. При отсутствии подобных данных наибольшая мощность резания должна быть определена расчетом по самой трудоемкой детали, которая задается технологическими картами для данной операции обработки. Так как конфигурация деталей, обрабатываемых на универсальном станке, весьма различна, то приходится находить наиболее тяжелый режим предварительным расчетом и подбором по чертежам различных деталей. При этом является необходимым строить нагрузочные диаграммы электропривода с учетом фактора времени обработки, пауз, а также наибольшей перегрузки станка.

3. Для комбинированного станка, кроме рассмотренных случаев, необходим выбор наиболее тяжелого режима обработки по самой трудоемкой операции из возможных на станке. Например, для фре-

зерно-сверлильного станка приходится рассчитывать также режимы для фрезерования и сверления в отдельности.

Во всех случаях необходимо уметь производить расчет, пользуясь понятиями режима резания. Наиболее общим видом обработки является точение, к которому с известным приближением могут быть сведены многие из видов, таких, например, как строгание, растачивание, фрезерование и некоторые другие.

Каждый вид обработки на станках характеризуется оптимальными (наивыгоднейшими по производительности) величинами скоростей, усилий и мощностей, найденными в результате большой

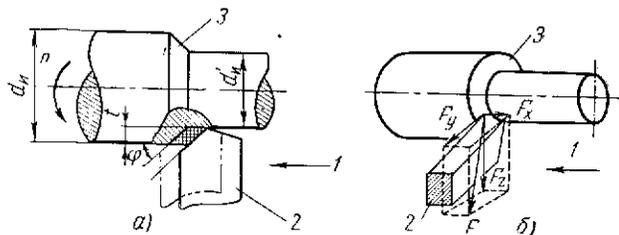


Рис. 1-1. Эскиз токарной обработки:  
1—направление движения подачи; 2—резец; 3—изделие

научно-исследовательской и экспериментальной работы и сосредоточенными в специальных нормативах и справочниках научно-исследовательского бюро технических нормативов. Для рационального проектирования электроприводов необходимо уметь определять эти величины в каждом конкретном случае.

Скорость, усилие и мощность можно определить по эмпирическим формулам, приводимым ниже, или, что предпочтительнее, по специальным картам технологических нормативов, имеющих, например, в [Л.4—9].

Расчет следует начинать с выбора марки инструментального материала, геометрической формы режущей части инструмента, назначения глубины резания и величины подачи, что производится по технологическим картам для различных видов обработки.

Точение (рис. 1-1, а, б). Линейная скорость при точении равна скорости резания

$$v = \frac{\pi d n}{1000}, \quad (1-1)$$

где  $d = d_n$  — диаметр изделия до обработки, мм;  
 $n$  — скорость шпинделя, об/мин.

Оптимальная скорость резания

$$v = \frac{C_v}{T^m t^x s^y} k_v, \quad (1-2)$$

Усилие резания

$$F_z = 9,81 C_{F_z} t^x F s^y v^q k_{F_z}, \quad (1-3)$$

где  $t = \frac{d_n - d_n'}{2}$  — глубина резания, мм;

$s$  — подача суппорта, мм/об;

$d_n'$  — диаметр изделия после одного прохода, мм;

$T$  — стойкость резца, мин.

Коэффициенты  $C_v$ ,  $C_{F_z}$ ,  $m$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $q$ ,  $k_v$ ,  $k_{F_z}$  берутся из литературы по режимам резания, например из [Л. 4—9].

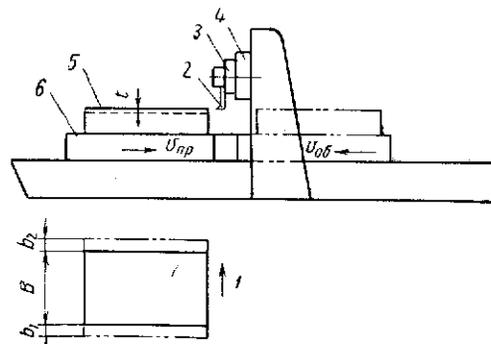


Рис. 1-2. Эскиз строгания:  
1—направление движения подачи; 2—резец; 3—суппорт;  
4 — поперечина; 5 — изделие; 6 — стол

Радиальное усилие  $F_y$  и усилие подачи  $F_x$  выражаются формулами, аналогичными (1-3), но со своими коэффициентами.

Мощность резания

$$P_z = \frac{F_z v}{60 \cdot 1000}. \quad (1-4)$$

Строгание (рис. 1-2). Для строгания формулы  $v$ ,  $F_z$  и  $P_z$  одинаковы с формулами для точения (1-2), (1-3) и (1-4), в которых глубина резания определяется как величина припуска на один ход стола. Скорость прямого хода стола есть скорость резания, скорость обратного хода значительно (в 2—3 раза) больше.

Сила трения стола о направляющие станины

$$F_{тр} = F_N f, \quad (1-5)$$

где  $F_N$  — сумма сил, нормальных к направляющим;  
 $f$  — коэффициент трения стола о направляющие.

Сверление (рис. 1-3). Режущий инструмент (сверло) здесь совершает одновременно главное движение резания и движение подачи.

Оптимальная скорость резания

$$v = \frac{C_v d_c^z}{T^m s^y v} \quad (1-6)$$

где  $d_c$  — диаметр сверла, мм.

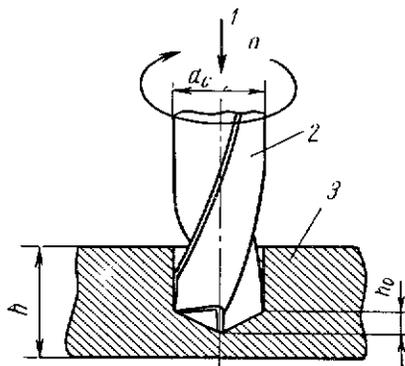


Рис. 1-3. Эскиз сверления:  
1 — направление движения подачи; 2 — сверло; 3 — изделие

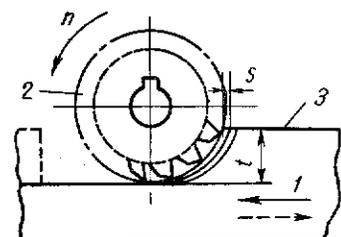


Рис. 1-4. Эскиз фрезерования:  
1 — направление движения подачи; 2 — фреза; 3 — изделие

Крутящий момент на сверле

$$M = 9,81 C_M d_c^z s^y v^M \quad (1-7)$$

Мощность резания

$$P_z = \frac{Mn}{9550} \quad (1-8)$$

где  $n$  — число оборотов сверла в минуту.

Коэффициенты  $C_v$ ,  $C_M$ ,  $y_v$ ,  $y_M$ ,  $z_v$ ,  $z_M$  берутся из литературы по режимам резания, например из [Л. 4].

Фрезерование (рис. 1-4).

Скорость резания при фрезеровании

$$v = \frac{\pi d \cdot n}{1000} \quad (1-1')$$

где  $d = d_\phi$  — диаметр фрезы, мм;

$n$  — число оборотов фрезы в минуту.

Оптимальная скорость резания

$$v = \frac{C_v d_\phi^q}{T^m t^x v s_z^y v B^r z_\phi^p} \quad (1-9)$$

где  $t$  — глубина фрезерования за один проход, мм;

$s_z$  — подача на один зуб фрезы, мм;

$B$  — ширина фрезерования, мм;

$z_\phi$  — число зубьев фрезы.

Усилие резания

$$F_z = 9,81 C_{F_z} t^{x_{F_z}} s_z^{y_{F_z}} B z_\phi^p d_\phi^q \quad (1-10)$$

Коэффициенты  $C_v$ ,  $C_{F_z}$ ,  $x_v$ ,  $x_{F_z}$ ,  $y_v$ ,  $y_{F_z}$ ,  $m$ ,  $q$ ,  $r$ ,  $p$ ,  $i$  берутся из литературы по режимам резания, например из [Л. 4].

Минутная подача

$$s_M = s_z z_\phi n, \text{ мм/мин.} \quad (1-11)$$

Шлифование (рис. 1-5).

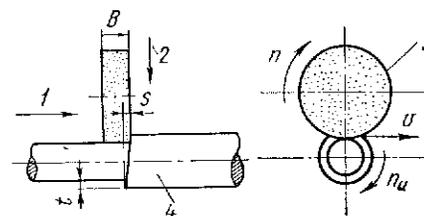


Рис. 1-5. Эскиз круглого наружного шлифования:

1 — направление движения продольной подачи;  
2 — направление движения поперечной подачи;  
3 — шлифовальный круг; 4 — изделие

Скорость резания при шлифовании

$$v = \frac{\pi d_k n}{60 \cdot 1000}$$

где  $d = d_k$  — диаметр шлифовального круга;

$n$  — скорость вращения шлифовального круга.

Остальные величины для шлифования принимаются по нормативам, например из [Л. 8].

1. Определить скорость, усилие и мощность резания, необходимые при наружном черновом точении с самым тяжелым режимом и наружном чистовом точении, на тяжелом токарном станке модели 1670. Материал изделия — стальное литье из углеродистой легированной стали  $\sigma_B = 737 \text{ Н/мм}^2$ . Диаметр изделия  $d_H = 1500 \text{ мм}$ . Расчет ведется по [Л. 5].

Для чернового точения принимается проходной резец с пластинкой из твердого сплава титановольфрамовой группы марки Т5К10 с главным углом в плане  $\varphi = 45^\circ$ , вспомогательным углом в плане  $\varphi_1 = 10^\circ$ , передним углом  $10^\circ$  и задним углом  $12^\circ$ . Стойкость резца  $T = 60$  мин.

Принимается максимальная глубина резания  $t = 40$  мм и максимальная подача  $s = 3$  мм/об, которая определяется прочностью державки резца размером  $50 \times 80$  мм и прочностью пластинки твердого сплава толщиной более 10 мм.

Скорость резания по (1-2)

$$v_{\text{черн}} = \frac{221}{60^{0,2} 40^{0,15} 3^{0,45}} 1 = 34,1 \text{ м/мин.}$$

С учетом поправочного коэффициента  $k_{nv} = 0,8-0,85$  на скорость резания для работы по литейной корке

$$v'_{\text{черн}} = k_{nv} v = 0,8 \cdot 34,1 = 27,3 \text{ м/мин.}$$

Этой скорости резания соответствует скорость шпинделя

$$n_{\text{шп}} = \frac{1000 v'_{\text{черн}}}{\pi d_n} = \frac{1000 \cdot 27,3}{3,14 \cdot 1500} = 5,8 \text{ об/мин.}$$

На станке ближайшая меньшая скорость  $n_{\text{шп}} = 5$  об/мин, которой соответствует скорость резания по (1-1)

$$v_{\text{черн}} = \frac{3,14 \cdot 1500 \cdot 5}{1000} = 23,6 \text{ м/мин.}$$

Усилие резания по (1-3)

$$F_z = 9,81 \cdot 300 \cdot 40^1 \cdot 3^{0,75} \cdot 23,6^{-0,15} \cdot 1 = 167\,000 \text{ н.}$$

Момент на шпинделе станка

$$M_{\text{шп}} = F_z \frac{d_n}{2} = 167\,000 \frac{1,5}{2} = 125\,000 \text{ н.м.}$$

Расчетное значение момента не превосходит допустимого, которое, например, для станка модели 1670 равно 147 000 н.м. Следовательно, станок обеспечивает осуществление назначенного режима резания.

Мощность, потребная на резание, по (1-4)

$$P_z = \frac{167\,000 \cdot 23,6}{60 \cdot 1000} = 65,8 \text{ квт.}$$

Для чистового точения принимается резец, оснащенный твердым сплавом Т30К4 с главным и вспомогательным углами в плане  $\varphi = 45^\circ$  и  $\varphi_1 = 10^\circ$ , передним и задним углами 10 и  $12^\circ$ . Стойкость резца принимается равной  $T = 60$  мин.

При чистовой обработке принимается глубина резания  $t = 1$  мм и назначается подача  $s = 0,25$  мм/об.

Скорость резания по (1-2)

$$v_{\text{чист}} = \frac{227}{60^{0,2} 1^{0,15} 0,25^{0,35}} 1 = 162,6 \text{ м/мин.}$$

С учетом поправочного коэффициента  $k_{nv} = 2,15$  на марку твердого сплава резца Т30К4 скорость резания

$$v'_{\text{чист}} = k_{nv} v_{\text{чист}} = 2,15 \cdot 162,6 = 350 \text{ м/мин.}$$

Этой скорости резания соответствует скорость шпинделя

$$n_{\text{шп}} = \frac{1000 \cdot 350}{3,14 \cdot 1500} = 74,3 \text{ об/мин.}$$

На станке имеются ближайшие значения скорости шпинделя: 56,5 и 80 об/мин. Скорость шпинделя принимается равной 80 об/мин, которая выше требуемой менее чем на 10%. Этой скорости шпинделя соответствует скорость резания

$$v_{\text{чист}} = \frac{3,14 \cdot 1500 \cdot 80}{1000} = 377 \text{ м/мин.}$$

Усилие резания

$$F_z_{\text{чист}} = 9,81 \cdot 300 \cdot 1^1 \cdot 0,25^{0,75} \cdot 377^{-0,15} = 448 \text{ н.}$$

Мощность, потребная на резание,

$$P_z_{\text{чист}} = \frac{448 \cdot 377}{60 \cdot 1000} = 2,82 \text{ квт.}$$

2. Определить скорость, усилие и мощность резания, необходимые для черновой обработки детали на карусельном станке, изображенной на рис. 1-6. Обработка детали включает в себя семь переходов: 1, 3, 5, 7 — подрезка торцев, 2, 4, 6 — наружное точение цилиндрических поверхностей. Материал изделия — стальное литье  $\sigma_{\text{из}} = 590$  н/мм<sup>2</sup>. Значения допустимого момента на планшайбе станка в зависимости от скорости ее вращения приведены на рис. 1-7. Расчет производится по таблицам — номограммам (картам) [1, 5].

Принимается резец с пластинкой из твердого сплава титановольфрамовой группы марки Т5К10 с главным углом в плане  $\varphi = 45^\circ$  и вспомогательным углом в плане  $\varphi_1 = 10^\circ$ , передним углом  $10^\circ$  и задним углом  $12^\circ$ . Стойкость резца принимается равной  $T = 60$  мин.

Припуск на механическую обработку для детали, имеющей габаритный и номинальный размеры 6000 мм, составляет 25 мм. Припуск на коробление заготовки составляет 1 мм/м · 6 м = 6 мм и

1 мм на прочие погрешности (погрешность установки детали, пространственное отклонение обрабатываемой поверхности заготовки и др.). Максимальный припуск получен равным 32 мм. Для поверхности 1, имеющей номинальный размер 1500 мм, припуск на механическую обработку составляет 14 мм, на коробление — 1,5 мм и литейный уклон 0°15' — 4,4 мм. Итого общий припуск составляет 20 мм. Аналогично определены припуски на всех переходах.

Подача принимается по карте 4. Значение подачи для первого перехода при глубине резания 20 мм составляет 1,5 мм/об. Скорость резания определяется по карте 12. Для обработки стального литья при  $\sigma_s = 590 \text{ н/мм}^2$  и глубине резания 20 мм, подаче 1,5

$$M_{пл} = F_z \frac{2\pi}{2} = 37\,400 \frac{6}{2} = 112\,200 \text{ н}\cdot\text{м}.$$

Расчеты режимов резания при обработке всех переходов детали приведены в табл. 1-1.

Таблица 1-1

Порядковый номер перехода	Глубина резания $t$ , мм	Подача $s$ , мм/об	Отношение $\frac{d}{d_n}$	Скорость резания (расчетная) $v_{расч}$ , м/мин	Скорость вращения планшайбы $n_{пл}$ , об/мин		Скорость резания $v$ , м/мин	Мощность резания $P_z$ , кВт	Сила резания $F_z$ , н	Момент на планшайбе $M_{пл}$ , н·м
					расчетная	имеющаяся на станке				
1	20	1,5	0,38	74	3,92	3,9	73,5	42,8	37 400	112 200
2	32	0,96	—	68	3,6	3,9	73,5	48,2	43 300	127 000
3	15	1,5	0,5	72	3,82	3,9	73,5	32,3	28 400	85 000
4	25	1,2	—	65	6,9	6,5	51,3	38,4	40 000	60 400
5	15	1,5	0,67	72	5,1	5,5	77,7	33,8	28 200	63 200
6	28	1,2	—	64	4,52	4,6	65,0	46,0	45 300	101 600
7	18	1,5	0,51	75	5,3	5,5	77,7	40,6	33 800	76 000

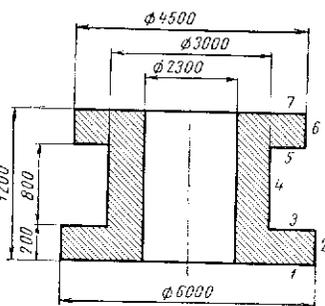


Рис. 1-6. Эскиз детали для обработки на карусельном станке

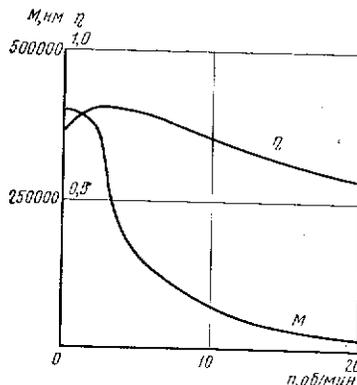


Рис. 1-7. График зависимости к. п. д. и допустимого момента на планшайбе карусельного станка

мм/об скорость резания равна 74 м/мин. Этой скорости резания соответствует скорость вращения планшайбы

$$n_{пл, расч} = \frac{1000 v_{расч}}{\pi d_n} = \frac{1000 \cdot 74}{3,14 \cdot 6000} = 3,92 \text{ об/мин}.$$

На станке имеется ближайшая скорость  $n_{пл} = 3,9 \text{ об/мин}$ , которой по (1-1) соответствует скорость резания

$$v = \frac{3,14 \cdot 6000 \cdot 3,9}{1000} = 73,5 \text{ м/мин}.$$

По карте 38 определяется мощность, необходимая на резание. При обработке первого перехода с выбранным режимом резания:  $t = 20 \text{ мм}$ ,  $s = 1,5 \text{ мм/об}$ ,  $v = 73,5 \text{ м/мин}$ , мощность  $P_z = 42,8 \text{ кВт}$ .

По карте 42 определяется тангенциальная сила резания, которая для первого перехода составляет  $F_z = 37\,400 \text{ н}$ . От этой силы на планшайбе возникает момент

Из табл. 1-1 видно, что расчетные значения момента на планшайбе не превышают допустимых, приведенных на рис. 1-7. Это указывает на то, что станок обеспечивает осуществление назначенных режимов резания на всех переходах.

3. Определить скорость, мощность и составляющие усилия резания  $F_z$ ,  $F_y$ ,  $F_x$ , необходимые при различных видах обработки изделий из стали и чугуна на расточном станке.

Материал изделия — углеродистая легированная сталь с  $\sigma_s = 640 - 830 \text{ н/мм}^2$  и чугун с HB = 180—200. Расчет производится по таблицам — номограммам (картам) [Л. 5, 7].

Сначала принимается инструментальный материал и геометрические параметры режущей части резцов. По картам 4, 6, 7 и 8 берется подача и скорость резания для черновой стали и чугуна на расточных станках при работе без борштанги (резец закреплен на суппорте планшайбы) и с резцами, закрепленными в двухопорной борштанге.

Так как обработка производится по карте с ударной нагрузкой, значения подачи и скорости резания умножаются соответственно на поправочные коэффициенты  $k_{zs} = 0,7$  и  $k_{zv} = 0,5$ .

По карте 33 принимается мощность резания, а по картам 42, 46 и 44 — значения тангенциальной силы  $F_z$ , радиальной силы  $F_y$  и силы подачи  $F_x$ . Результаты приведены в табл. 1-2.

4. Определить скорость, усилие и мощность резания, необходимые при черновом и чистовом строгании на продольно-строгоальном

станке. Материал изделий — серый чугун с  $HВ = 200$ , вес изделия 98 100 н, вес стола станка 49 050 н. Расчет производится по [Л. 5].

Таблица 1-2

Вид операции	Материал изделия	Материал резца	Глубина резания $t$ , мм	Подача $s$ , мм/об	Скорость резания $v$ , м/мин	Мощность резания $P_z$ , кВт	Сила, н		
							$F_z$	$F_y$	$F_x$
Растачивание отверстий $d=350$ мм резцами, закрепленными в двухопорной борштанге	сталь чугун	Т5К10 ВК8	12	0,26	29	3,4	8 050	2840	3090
			12	0,35	23	2,9	10 500	3390	3730
Растачивание отверстий $d=420$ мм резцами, закрепленными в суппорте планшайбы	сталь чугун	Т5К10 ВК8	12	0,26	29	3,4	8 830	2840	3730
			12	0,364	23	2,9	10 500	3390	4420
Торцевое точение $d=500$ мм резцами, закрепленными в суппорте планшайбы	сталь чугун	Т5К10 ВК8	8	0,27	29	2,4	6 770	2350	3090
			8	0,365	28,5	2,4	8 050	2840	3090

Для чернового строгания принимается проходной резец с пластинкой из твердого сплава марки ВК8 с плоской передней гранью без фаски. Главный угол в плане  $45^\circ$ , вспомогательный угол в плане  $10^\circ$ , передний угол  $8^\circ$ , задний угол  $6^\circ$ . Стойкость резца  $T = 120$  мин.

При черновом строгании назначается глубина резания  $t = 40$  мм и подача  $s = 1,8$  мм/дв.ход (карта 9).

При строгании чугуна при  $HВ = 200$  с глубиной резания 40 мм и подачей 1,8 мм/дв.ход скорость резания  $v = 21$  м/мин (карта 33), усилие резания  $F_z = 98\ 350$  н (карта 42).

Сила трения стола о направляющие по (1-5)

$$F_{тр} = (49\ 050 + 98\ 100) \cdot 0,08 = 11\ 772 \text{ н.}$$

Тяговое усилие на столе

$$F_{тяг} = F_z + F_{тр} = 98\ 350 + 11\ 772 = 110\ 122 \text{ н.}$$

Расчетное значение тягового усилия превышает допустимое по рис. 1-8, следовательно, станок не сможет обеспечить строгание с назначенными режимами резания.

Для этого вновь принимается глубина резания  $t = 30$  мм, а подача  $s = 1,2$  мм/дв.ход. Скорость резания  $v = 27,2$  м/мин (карта 33). Имеющаяся на станке скорость прямого хода стола принимается  $v_{пр} = 27$  м/мин. Тогда усилие резания (карта 42) составляет  $F_z = 57\ 500$  н.

Тяговое усилие на столе

$$F_{тяг} = 57\ 500 + 11\ 772 = 69\ 272 \text{ н.}$$

Это усилие не превышает допустимого (рис. 1-8). Таким образом, станок обеспечивает осуществление назначенного режима.

Мощность, потребная на резание при черновом строгании при  $t = 30$  мм,  $s = 1,2$  мм/дв.ход,  $v = 27$  м/мин, составляет  $P_z = 11,8$  кВт (карта 38).

Для чистового строгания принимается широкий резец с пластинкой ВК8. Назначается глубина резания  $t = 0,1$  мм и подача  $s = 10$  мм/дв.ход.

Скорость резания по (1-2)

$$v = \frac{174}{120^{0,2} \cdot 0,1^{0,2} \cdot 10^{0,4}} \left( \frac{190}{220} \right)^{1,25} = 39,52 \text{ м/мин.}$$

Усилие резания по (1-3)

$$F_z = 9,81 \cdot 300 \cdot 0,1^{1,1} \cdot 10^{0,75} \cdot 39,5^{-0,15} \left( \frac{190}{200} \right)^{0,4} = 955 \text{ н.}$$

Мощность, потребная на чистовое строгание, по (1-4)

$$P_z = \frac{955 \cdot 39,5}{60 \cdot 1000} = 0,62 \text{ кВт.}$$

5. Определить скорость, подачу и мощность резания при сверлении на сверлильном станке модели 255 Материал изделия — сталь  $\sigma_s \leq 900$  н/мм<sup>2</sup>. Сверло диаметром  $d_c = 32$  мм марки Р9, глубина сверления  $L = 100$  мм. Расчет производится по [Л.4].

Подача при сверлении стали с  $\sigma_s = 900$  н/мм<sup>2</sup> сверлом  $d_c = 32$  мм (первая группа подач) назначается равной  $s = 0,4-0,5$  мм/об. Поправочный коэффициент на подачу в зависимости от глубины

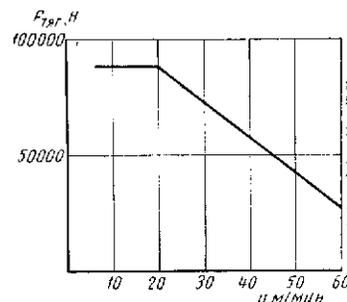


Рис. 1-8. График допустимого значения тягового усилия строгального станка

сверления в диаметрах сверла с  $L/d_c = 100/32$  принят равным единице. По паспорту станка принимается подача  $s = 0,5$  мм/об.

Скорость резания при подаче  $s = 0,5$  мм/об и диаметре сверла  $d_c = 32$  мм равна  $v = 21$  м/мин.

Поправочные коэффициенты на скорость резания в зависимости от периода стойкости сверла ( $T = 70$  мин), от состояния стали (горячий прокат), от длины отверстия ( $L/d_c \approx 3$ ) и от марки сверла (P9) приняты равными единице.

Скорость вращения сверла из (1-1)

$$n = \frac{1000 \cdot 21}{3,14 \cdot 32} = 210 \text{ об/мин.}$$

Согласно паспорту станка принимается скорость  $n = 190$  об/мин. Тогда скорость резания по (1-1)

$$v = \frac{3,14 \cdot 32 \cdot 190}{1000} = 19 \text{ м/мин.}$$

При  $v = 19$  м/мин мощность резания  $P_z = 3,94$  квт.

6. Определить скорость и мощность резания при черновом фрезеровании чугуной заготовки на вертикально-фрезерном станке модели 6А54. Материал изделия — чугун С-115—32 с НВ = 190. Размер обрабатываемой поверхности изделия  $500 \times 2000$  мм. Расчет производится по нормативам [Л. 4].

У изделия размером  $500 \times 2000$  мм припуск на механическую обработку составляет 8 мм, из которых  $3^{+1,2}$  мм приходится на чистовую обработку.

Принимается глубина чернового фрезерования  $t = 8 - 3 = 5$  мм. Для принятой глубины фрезерования выбирается торцевая фреза диаметром  $d_{\phi} = 110$  мм и с числом зубьев  $z_{\phi} = 12$ . Материал режущей части фрезы — твердосплавные вставные ножи, оснащенные пластинками ВК8. Главный угол в плане  $\varphi = 60^\circ$ , передний угол  $\gamma = +5^\circ$ . Период стойкости фрезы  $T = 180$  мин. Ширина фрезерования  $B = 90$  мм.

Назначается подача на один зуб фрезы. По таблице для твердого сплава ВК8 и твердости чугуна с НВ > 180 выбирается значение подачи  $s_{z \text{ табл.}} = 0,25$  мм/зуб. Определяется подача с учетом поправочных коэффициентов  $k_1$  — при смещенной установке фрезы — и  $k_2$  — при главном угле в плане  $\varphi = 60^\circ$ .

$$s_z = s_{z \text{ табл.}} k_1 k_2 = 0,25 \cdot 2 \cdot 1 = 0,5 \text{ мм/зуб.}$$

Определяется скорость резания

$$v = v_{\text{табл.}} k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 = 100 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,89 \cdot 1 = 57 \text{ м/мин,}$$

где  $v_{\text{табл.}} = 100$  м/мин определена по таблице в зависимости от размера фрезы  $d_{\phi}/z_{\phi} = 110/12$ , глубины фрезерования  $t = 5$  мм и подачи  $s_z = 0,5$  мм/зуб; поправочные коэффициенты:  $k_1$  — при

твердости чугуна с НВ = 190;  $k_2$  — при периоде стойкости фрезы  $T = 180$  мин;  $k_3$  — для твердого сплава фрезы ВК8;  $k_4$  — при поверхности с коркой;  $k_5$  — при отношении ширины фрезерования к диаметру фрезы  $B/d_{\phi} = 90/110$ ;  $k_6$  — при главном угле в плане  $\varphi = 60^\circ$ .

Потребная скорость вращения шпинделя из (1-1)

$$n = \frac{1000 \cdot 57}{3,14 \cdot 110} = 165 \text{ об/мин.}$$

Принимается имеющаяся на станке ближайшая скорость, равная 160 об/мин.

Тогда скорость резания по (1-1)

$$v = \frac{3,14 \cdot 110 \cdot 160}{1000} = 55,4 \text{ м/мин.}$$

Минутная подача по (1-11)

$$s_m = 0,5 \cdot 12 \cdot 160 = 960 \text{ мм/мин.}$$

Мощность, потребляемая на фрезерование,

$$P_z = P_{z \text{ табл.}} k_1 k_2 = 10,2 \cdot 1 \cdot 0,84 = 8,56 \text{ квт,}$$

где  $P_{z \text{ табл.}} = 10,2$  квт определяется по таблице в зависимости от твердости чугуна с НВ = 190, ширины фрезерования  $B = 90$  мм, подачи на зуб  $s_z = 0,5$  мм/зуб и минутной подачи  $s_m = 960$  мм/мин,  $k_1 = 1$  при  $\varphi = 60^\circ$  и  $k_2 = 0,84$  при  $\gamma = +5^\circ$ .

7. Определить мощность и радиальное усилие, затрачиваемые на шлифовальном станке при шлифовании роликовой дорожки на внутреннем кольце конического роликоподшипника (рис. 1-9). Изделие имеет следующие размеры:  $d_1 = 156,85$  мм;  $d_2 = 136,91$  мм;  $H = 50$  мм.

Для шлифования принимается шлифовальный круг ПП600  $\times 50 \times 505$ , материал — электрокорунд белый ЭБ, зернистость 46—60, твердость  $C_1 - C_2$ , связка керамическая К. Стойкость круга  $T = 12$  мин.

Припуск на шлифование заданного изделия (на одну сторону) составляет  $\Pi = 0,44$  мм, из которого  $\Pi_n = 0,32$  мм — на предварительную черновую обработку и  $\Pi_o = 0,12$  мм — на окончательную чистовую обработку.

Расчет производится по данным [Л. 8] — последовательно для чернового и чистового шлифования.

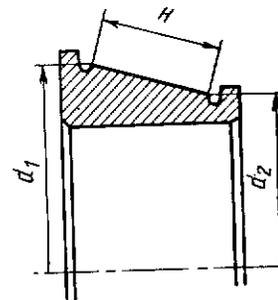


Рис. 1-9. Эскиз внутреннего кольца конического роликоподшипника

**Черновое шлифование.** Удельная интенсивность съема металла в единицу времени, отнесенная на 1 мм ширины шлифовального круга по данным завода,

$$Q_{уд} = C_{черн} d_n^{0,3} = 100 \cdot 147,76^{0,3} = 448 \frac{мм^3/мин}{мм},$$

где  $C_{черн} = 100$  — коэффициент, характеризующий режим чернового шлифования;  
 $d_n = \frac{d_1 + d_2}{2} + 2\Pi = 147,76$  мм — средний диаметр обрабатываемой поверхности изделия.

Эффективная удельная мощность шлифования на 10 мм ширины шлифовального круга

$$P_{э.уд} = 0,03 Q_{уд}^{0,7} = 0,03 \cdot 448^{0,7} = 2,14 \text{ кВт.}$$

Эффективная (потребляемая на шлифование) мощность

$$P_э = P_{э.уд} 0,1 B_k = 2,14 \cdot 0,1 \cdot 50 = 10,7 \text{ кВт,}$$

где  $B_k$  — длина шлифования при врезании, равная ширине круга.  
 Удельное давление на 10 мм ширины шлифовального круга

$$F_{у.уд} = 9,81 \cdot 0,12 Q_{уд}^{0,7} = 9,81 \cdot 0,12 \cdot 448^{0,7} = 84,4 \text{ н/мм.}$$

Радиальная составляющая усилия шлифования

$$F_y = F_{у.уд} 0,1 B_k = 84,4 \cdot 0,1 \cdot 50 = 422 \text{ н.}$$

**Чистовое шлифование.** Удельная интенсивность съема металла в единицу времени, отнесенная на 1 мм ширины шлифовального круга,

$$Q_{уд} = 20 \cdot 147,12^{0,3} = 89,5 \frac{мм^3/мин}{мм},$$

где  $C_{чист} = 20$  — коэффициент чистового шлифования;

$d'_n = d_n - 2\Pi_n = 147,12$  мм — средний диаметр изделия.

Удельная эффективная мощность шлифования на 10 мм ширины шлифовального круга

$$P_{э.уд} = 0,03 \cdot 89,5^{0,7} = 0,71 \text{ кВт.}$$

Эффективная мощность, необходимая при чистовом шлифовании,

$$P_э = 0,71 \cdot 0,1 \cdot 50 = 3,55 \text{ кВт.}$$

Удельное давление на 10 мм ширины круга

$$F_{у.уд} = 9,81 \cdot 0,12 \cdot 89,5^{0,7} = 28 \text{ н/мм.}$$

Радиальная составляющая усилия шлифования

$$F_y = 28 \cdot 0,1 \cdot 50 = 140 \text{ н.}$$

### § 1-2. Усилие, момент и мощность механизмов подачи станков

В тяжелых станках привод подачи имеет типовую кинематическую схему, приведенную на рис. 1-10. В зависимости от величины составляющих усилия резания  $F_z, F_y, F_x$  и веса перемещающихся частей расчет усилия, момента и мощности произ-

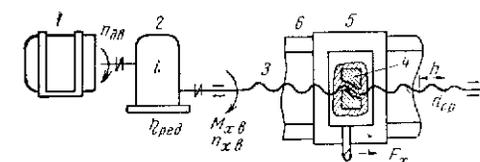


Рис. 1-10. Кинематическая схема механизма подачи:

1 — электродвигатель; 2 — редуктор; 3 — ходовой винт; 4 — гайка; 5 — суппорт; 6 — направляющие

водится различно. Радиальная и осевая составляющие усилия резания определяются формулами:

$$F_y = 9,81 C_{F_y} t^{x_{F_y}} s^{y_{F_y}} v^q k_{F_y}; \quad (1-3')$$

$$F_x = 9,81 C_{F_x} t^{x_{F_x}} s^{y_{F_x}} v^q k_{F_x}. \quad (1-3'')$$

Без учета веса движущихся частей суммарное усилие подачи при резании

$$F_n = k F_x + (F_z + F_y) f, \quad (1-12)$$

где  $k = (1,1-1,3)$  — коэффициент запаса, учитывающий перекосы;  
 $f = (0,05-0,15)$  — коэффициент трения при движении.

С учетом веса движущихся частей

$$F'_n = k F_x + (F_z + F_y + G_{ст} + G_{изд}) f, \quad (1-12')$$

где  $G_{ст}$  — вес суппорта или стола;  
 $G_{изд}$  — вес изделия.

Мощность, затрачиваемая на подачу при резании,

$$P_n = \frac{F_n v_n}{60 \cdot 1000}, \quad (1-13)$$

где  $v_n = sn$  — скорость подачи, мм/мин.

При трогании стола или суппорта с места [Л. 3]

$$F_n'' = (G_{ст} + G_{изл}) f_0 + \alpha_{пр} S_{пр}, \quad (1-12'')$$

где  $f_0 = (0,2 \div 0,3)$  — коэффициент трения в направляющих при трогании с места;

$\alpha_{пр} \approx 0,5$  н/см<sup>2</sup> — удельное усилие прилипания;

$S_{пр}$  — площадь прилипания направляющих, см<sup>2</sup>.

Момент на ходовом винте

$$M_{х.в} = \frac{F_n d_{ср} \operatorname{tg}(\alpha + \rho)}{2}, \quad (1-14)$$

где  $d_{ср}$  — средний диаметр винта;

$\alpha$  — угол наклона резьбы ходового винта;

$\rho$  — угол трения ходового винта.

В зависимости от величины  $F_n''$  или  $F_n'$  и соответствующих им моментов  $M_{х.в}$  производится дальнейший расчет привода подачи.

Несколько отлична по структуре формула для усилия подачи при сверлении

$$F_x = 9,81 C_F d_c^{z_F} s^{y_F} F. \quad (1-3''')$$

Значения коэффициентов  $C_F$ ,  $y_F$ ,  $z_F$  берут из [Л. 4].

1. Определить усилие и мощность механизма подачи суппорта токарного станка, имеющие место при черновой обработке стали с режимами, приведенными в примере (1-1-1)\* Тангенциальное усилие резания, преодолеваемое шпинделем станка,  $F_z = 167\,000$  н.

Радиальное усилие, создающее давление на суппорт, по (1-3')

$$F_y = 9,81 \cdot 243 \cdot 40^{0,9} \cdot 3^{0,6} \cdot 23,6^{-0,3} \cdot 1 = 49\,400 \text{ н.}$$

Осевое усилие подачи по (1-3'')

$$F_x = 9,81 \cdot 313 \cdot 40^1 \cdot 3^{0,2} \cdot 23,6^{-0,4} \cdot 1 = 43\,200 \text{ н.}$$

Суммарное усилие подачи, необходимое для перемещения суппорта с резцом в направлении подачи при резании по (1-12)

$$F_n = 1,2 \cdot 43\,200 + (167\,000 + 49\,400) 0,15 = 85\,260 \text{ н,}$$

где  $k = 1,2$ ;  $f = 0,15$ .

\* В приведенных номерах имеются в виду следующие обозначения: первая цифра — номер главы, вторая — номер параграфа и третья — номер примера.

Мощность, затрачиваемая на подачу, по (1-13)

$$P_n = \frac{85\,260 \cdot 3 \cdot 5}{60 \cdot 1000} = 21,4 \text{ вт,}$$

где  $s$  и  $n$  взяты из примера (1-1-1).

2. Определить усилие, момент и мощность подачи стола горизонтально-расточного станка для условий обработки, рассмотренных в примере (1-1-3). Кинематическая схема привода подачи стола приведена на рис. 1-10. Ходовой винт стола станка: средний диаметр  $d_n = 46$  мм, шаг нарезки  $h = 8$  мм, угол наклона резьбы  $\alpha = 3^\circ 10'$ . Вес стола станка  $G_{ст} = 9800$  н, максимальный вес детали  $G_{дет} = 10\,000$  н.

Усилие, необходимое для перемещения стола в направлении подачи в процессе резания, определяется по (1-12). При расчете принято  $k = 1,2$ ;  $f = 0,08$ . Значения усилий  $F_z$ ,  $F_y$  и  $F_x$  взяты из примера (1-1-3).

Вращающий момент на ходовом винте по (1-14)

$$M_{х.в} = \frac{F_n 0,046 \operatorname{tg}(3^\circ 10' + 5^\circ 43')}{2} = 0,0035 F_n \text{ н.м.}$$

Здесь  $f' = 0,1$ ;  $\rho = \operatorname{arctg} 0,1 = 5^\circ 43'$ .

Результаты расчета сведены в табл. 1-3.

Таблица 1-3

Вид операции	Материал изделия	Материал резца	Усилие подачи $F_n$ , н	Момент $M_{х.в}$ , н.м	Скорость вращения шпинделя $n$ , об/мин	Мощность подачи $P_n$ , вт
Растачивание отверстий $d = 350$ мм резцами, закрепленными в 2-опорной борштанге	сталь чугун	Т5К10 ВК8	8350 9560	29,2 33,5	26,4 21	0,96 1,17
Растачивание отверстий $d = 420$ мм резцами, закрепленными в суппорте планшайбы	сталь чугун	Т5К10 ВК8	9230 10400	32,3 36,4	22 17,4	0,88 1,1
Торцевое точение отверстий $d = 500$ мм резцами, закрепленными в суппорте планшайбы	сталь чугун	Т5К10 ВК8	8080 8350	28,3 29,2	18,5 18,1	0,67 0,92

Скорость вращения шпинделя определяется по формуле (1-1), где  $d_n$  — диаметр растачиваемого отверстия.

Мощность подачи определяется по (1-13). Значения подачи приняты из примера (1-1-3).

Усилие, необходимое при трогании стола с места, по (1-12')

$$F_{п.тр} = (9800 + 10\,000)0,3 + 0,5 \cdot 800 = 6340 \text{ н},$$

где  $f_0 = 0,3$ ;  $S_{пр} = 800 \text{ см}^2$ ;  $\alpha_{пр} = 0,5 \text{ н/см}^2$ .

Вращающий момент на ходовом винте при трогании стола с места по (1-14).

$$M_{х.в} = \frac{6340 \cdot 0,046 \operatorname{tg}(3^\circ 10' + 16^\circ 40')}{2} = 52,5 \text{ н}\cdot\text{м},$$

где  $\rho_0 = \operatorname{arctg} 0,3 = 16^\circ 40'$ ;  $f_0 = 0,3$ .

3. **Определить осевую силу подачи при сверлении для станка модели 255** (см. пример 1-1-5). Осевая сила подачи  $F_x$  по эмпирической формуле (1-3'') или [Л. 4] в зависимости от диаметра сверла  $d_c = 32 \text{ мм}$ , подачи  $s = 0,5 \text{ мм/об}$  и скорости резания  $v = 19 \text{ м/мин}$  равна  $F_x = 19\,600 \text{ н}$ .

Это усилие не превышает допустимого значения по условиям прочности станка.

### § 1-3. Машинное и вспомогательное время

Машинное время представляет собой необходимое время, в течение которого происходит обработка металла резанием. Расчет машинного времени для каждого вида обработки производится по формулам или нормативам [Л. 6-9].

Например, для токарной обработки машинное время

$$t_{маш} = \frac{L}{ns}, \quad (1-15)$$

где  $L$  — длина обработки, мм;  
 $v_n = ns$  — скорость подачи, мм/мин.

Для строгания эта формула преобразуется в зависимость

$$t_{маш} = \frac{B + b_1 + b_2}{is}, \quad (1-15')$$

где  $B$  — ширина строгания, мм;  
 $b_1, b_2$  — переходы резца в направлении подачи;  
 $i$  — число двойных ходов в минуту;  
 $s$  — величина подачи, мм, на один двойной ход.

Определение вспомогательного времени производится по нормативам, например [Л. 6-9].

1. **Определить машинное и вспомогательное время, затрачиваемое при обработке детали, изображенной на рис. 1-6, на карусельном станке** Вес детали 726 000 н. Деталь устанавливается на

столе и крепится в кулачках. Режимы обработки определены в (1-1-2).

Машинное время определяется на каждом переходе по (1-15), где  $s, n$  — подача и скорость вращения, берутся из табл. 1-4.

Вспомогательное время включает в себя:  $t_{всп1}$  — подготовительное-заключительное время, состоящее из времени на наладку станка — 23 мин, времени на ознакомление с чертежами и с технологическим нормировочной картой, осмотра отливки, осмотра и раскладки инструмента — 6 мин, времени на установку краном державки для резца — 4 мин;  $t_{всп2}$  — время, затрачиваемое на установку и снятие детали, подвод и отвод резца и включение подачи, на изменение режима работы станка и смену инструмента, на контрольные измерения;  $t_{всп3}$  — время на обслуживание рабочего места, отдых и естественные надобности. Указанное время установлено в процентах от операционного времени и составляет:

$$t_{обсл.раб.места} = 0,05 t_{опер}, \quad t_{отдых \text{ и ест. надобн}} = 0,04 t_{опер},$$

$$\text{где операционное время } t_{опер} = t_{маш} + t_{всп2}.$$

Результаты расчетов  $t_{маш}$  приведены в табл. 1-4, а  $t_{всп}$  — в табл. 1-5.

Таблица 1-4

Диаметр сверла	Расчетные размеры обработки, мм			Число проходов	Режимы обработки			Машинное время $t_{маш}$ , мин
	длина обработки $L$	переход $b$	расчетная длина обработки $L_p$		глубина резания $t$ , мм	подача $s$ , мм/об	скорость планшайбы $n_{пл}$ , об/мин	
1	1850	24	1874	1	20	1,5	3,9	322
2	200	34	234	1	32	0,96	3,9	62,5
3	1500	18	1518	1	15	1,5	3,9	260
4	800	28	828	1	25	1,2	6,5	106
5	750	18	768	1	15	1,5	5,5	93
6	200	30	230	1	28	1,2	4,6	42
7	1100	20	1120	1	18	1,5	5,5	135

2. **Определить время для шлифования роликовой дорожки подшипника** (рис. 1-9) на шлифовальном станке при обработке, рассмотренной в примере (1-1-7)

Радиальная составляющая усилия шлифования  $F_{у,черн} = 422 \text{ н}$  при черновом шлифовании и  $F_{у,чист} = 140 \text{ н}$  при чистовом шлифовании.

Время шлифования включает в себя: вспомогательное время и основное технологическое (машинное) время, которое в свою очередь состоит из времени на врезание, времени установившегося процесса чернового и чистового шлифования и времени на зачистку (выхаживание). Вспомогательное время определяется по [Л. 7, 9] и равно

Таблица 1-5

Номер перехода	Время, мин												
	$t_{исп}$		$t_{всп}$								$t_{всп}^3$		
	подготовительно-заключительное	установка и снятие детали	связанное с переходами			изменение режима работы			контрольное измерение	итого	операционное время	обслуживание рабочего места	отдых и естественные потребности
			подвод резака	включение подачи	отвод резака	смена инструмента	смена подачи	смена скорости					
1	57	250											
2	—	—	3,0	0,15	1,25	11,5	0,03	0,03	2,5				
	—	—	0,6	0,03	0,25	2,3	0,03	—	1,0				
Итого	57	250	3,6	0,18	1,5	13,8	0,06	0,03	3,5	272,67	657,2	32,82	26,3
3	57	250											
4	—	—	2,58	0,129	1,08	10,0	0,03	—	1,32				
5	—	—	0,96	0,048	0,4	3,7	0,03	0,03	1,32				
6	—	—	0,9	0,045	0,37	3,45	0,03	0,03	1,32				
7	—	—	0,6	0,03	0,25	2,3	0,03	0,03	1,0				
	—	—	1,32	0,066	0,55	5,2	0,03	0,03	2,0				
Итого	57	250	6,36	0,318	2,65	24,65	0,15	0,12	6,96	231,21	927,8	46,4	37,1

$t_{всп} = 11,6$  сек. В него входят: время установки и снятия кольца, время зажима и отжима кольца, время быстрого подвода и отвода шлифовальной бабки.

Время на врезание, необходимое для выбора упругих деформаций технологической системы «станок — инструмент — изделие», определяется формулой

$$t_{вр} = C_{вр} \frac{y_0}{s_n}, \quad (1-16)$$

где  $C = C_{вр} = 2,0$  — коэффициент врезания;  
 $y_0$  — упругая деформация (натяг);  
 $s_n$  — поперечная подача.

Упругая деформация определяется из уравнения, характеризующего жесткость системы,

$$\frac{1}{j_c} = \frac{1}{j_{ст}} + \frac{1}{j_{дет}}, \quad (1-17)$$

где  $j_c$  — жесткость системы;

$j_{ст}$  — жесткость станка, равная (6870—9810) н/мм;

$j_{дет}$  — жесткость детали.

Так как жесткость детали значительно выше жесткости станка, то членом  $1/j_{дет}$  можно пренебречь. Тогда жесткость системы равна жесткости станка

$$j_c = j_{ст} = 8400 \text{ н/мм.}$$

Упругая деформация системы при черновом шлифовании

$$y_0 = \frac{F_y}{j_c} = \frac{422}{8400} = 0,051 \text{ мм.} \quad (1-18)$$

Поперечная подача при шлифовании

$$s_n = \frac{C_{черн}}{\pi d_n^{0,7}} = \frac{100}{3,14 \cdot 147,75^{0,7}} = 0,96 \text{ мм/мин,} \quad (1-19)$$

где  $C_{черн} = 100$  — коэффициент из примера (1—1—7);

$d_n = 147,76$  мм — диаметр изделия.

Время на врезание по (1-16)

$$t_{вр} = 2 \frac{0,051}{0,96} = 0,106 \text{ мин} = 6,35 \text{ сек.}$$

Время установившегося процесса черного шлифования

$$t_{черн} = \frac{P_n}{s_n} = \frac{0,32}{0,96} = 0,333 \text{ мин} = 20 \text{ сек.}$$

Поперечная подача при чистовом шлифовании

$$s_{н.чист} = \frac{C_{чист}}{\pi d_{н.чист}^{0,7}} = \frac{20}{3,14 \cdot 147,2^{0,7}} = 0,192 \text{ мм/мин,}$$

где  $C_{чист} = 20$  — коэффициент для чистового шлифования из примера (1—1—7).

Время чистового шлифования

$$t_{чист} = \frac{0,12}{0,192} = 0,625 \text{ мин} = 37,5 \text{ сек.}$$

Упругая деформация системы при чистовом шлифовании

$$y_{0 \text{ чист}} = \frac{140}{8400} = 0,0167 \text{ мм.}$$

Время выхаживания по (1-16)

$$t_{вых} = 1,4 \frac{0,0167}{0,192} = 0,121 \text{ мин} = 7,3 \text{ сек,}$$

где  $C = C_{зач} = 1,4$  — коэффициент зачистки.

Полное машинное время

$$t_{\text{маш}} = t_{\text{вр}} + t_{\text{черн}} + t_{\text{чист}} + t_{\text{вых}} = 6,35 + 20 + 37,5 + 7,3 = 71,15 \text{ сек.}$$

Общее время

$$t_{\text{общ}} = t_{\text{маш}} + t_{\text{всп}} = 71,15 + 11,6 = 82,75 \text{ сек.}$$

## ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ СТАНКОВ

### § 2-1. Потери и к.п.д. механизмов станков

Потери в станках зависят от ряда причин; из которых основными являются: 1) тип и число звеньев кинематической цепи; 2) тип, состояние и температура смазки; 3) режим работы и пауз станка, что, в конечном счете, влияет на состояние смазки; 4) состояние покоя или движения механизма, т. е. зависимость коэффициента трения  $f$  от скорости; 5) конструкция опор (качения, скольжения); 6) качество изготовления узлов станка и его сборка (переходы и т. п.); 7) изменение нагрузки (увеличение сил трения в звеньях передач, выдавливание смазки).

Ввиду сложности учета всех перечисленных факторов наиболее точно и правильно потери и к. п. д. станка определяются экспериментально. Приближенное их определение, основанное на некоторых допущениях, приведено в § 2-2.

Для практических расчетов мы располагаем номинальными данными к. п. д. различных звеньев передачи, т. е. к. п. д. при полной нагрузке:

плоскоременная передача . . . . .	0,94—0,96
клиноременная передача . . . . .	0,93—0,95
зубчатая передача цилиндрическая . . . . .	0,98—0,99
» » коническая . . . . .	0,96—0,97
» » червячная . . . . .	0,7—0,8

Номинальный к. п. д. механизма вращательного движения станка

$$\eta_{\text{ст. н}} = \prod_1^n \eta_{i \text{ н}} \quad (2-1)$$

где  $\eta_{i \text{ н}}$  — номинальный к. п. д. отдельного звена.

Потери мощности в механизме

$$\Delta P = P \frac{1-\eta}{\eta}, \quad (2-2)$$

где  $P$  — полезная мощность механизма;

$\eta$  — коэффициент полезного действия механизма станка при его нагрузке  $P$ , равный

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P}. \quad (2-2')$$

Полезная мощность механизма  $P$  представляет собой для главного привода мощность резания  $P_z$ , которая является основной нагрузкой для механизмов главного движения. Для привода подачи полезной мощностью является мощность привода подачи  $P_{\text{под}}$ . Следует указать, что в механизмах подачи и вспомогательных механизмах основную нагрузку на механизм составляет трение.

Для механизмов станков, имеющих поступательное движение узлов по направляющим, потери мощности на трение

$$\Delta P_{\text{тр}} = \frac{F_N f v}{60 \cdot 1000}, \quad (2-2'')$$

где  $F_N$  — сумма сил, действующих нормально к направляющим (вес, составляющие усилий резания и др.),  $N$ ;

$f$  — коэффициент трения;

$v$  — скорость перемещения узла по направляющим,  $м/мин.$

Мощность электродвигателя любого механизма станка в статическом режиме

$$P_d = P + \Delta P, \quad (2-3)$$

или

$$P_d = \frac{P}{\eta}. \quad (2-4)$$

Тогда потери в механизме станка могут быть определены как

$$\Delta P = P_d (1 - \eta). \quad (2-2''')$$

### § 2-2. Потери и к.п.д. в главных приводах при разных нагрузках и скоростях

Определение к.п.д. в главных приводах станков осуществляется методом разделения потерь на постоянные и переменные:

а) постоянные потери холостого хода  $P_0$ , не зависящие от нагрузки на станок, определяются скоростью движения, вязкостью масла и весом вращающихся частей, включая заготовку. Они учитываются коэффициентом постоянных потерь  $a$

$$P_0 = a P_{zH}, \quad (2-5)$$

где  $P_{zH}$  — номинальная мощность резания;

$a$  — коэффициент постоянных потерь, равный

$$a = \frac{\Delta P_a}{P_{zH}} = \frac{P_0}{P_{zH}};$$

б) переменные потери  $\Delta P_b$ , зависящие от полезной нагрузки линейно, т. е.

$$\Delta P_b = b P_z, \quad (2-6)$$

где  $b = \text{const}$  — коэффициент переменных потерь;

$P_z$  — мощность резания.

Коэффициент загрузки станка

$$k = \frac{P_z}{P_{zH}}. \quad (2-7)$$

Суммарные потери в станке

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_b = a P_{zH} + b P_z. \quad (2-8)$$

С учетом (2-7) и (2-8) получается известная формула к.п.д. в зависимости от нагрузки [Л.2]

$$\eta_{\text{ст}} = \frac{P_z}{P_z + \Delta P} = \frac{P_z}{P_z + P_z \left( \frac{a}{k} + b \right)} = \frac{1}{1 + \frac{a}{k} + b}. \quad (2-9)$$

Частный случай при полной нагрузке  $k = 1$  дает номинальный к.п.д.

$$\eta_{\text{н. ст}} = \frac{1}{1 + a + b}. \quad (2-9')$$

Из исходной формулы для  $P_d$  имеем

$$P_d = P_z \left( 1 + \frac{a}{k} + b \right) \quad (2-10)$$

и мощность двигателя определяется при известных  $a$  и  $b$ .

Опытом доказано, что отношение

$$\frac{a}{b} = x_k \quad (2-11)$$

сохраняет приблизительно постоянную величину для данного станка. Оно зависит от конструкции станка, веса вращающихся частей механизма и сложности кинематической схемы. По данным экспериментальных работ величина  $x_k$  колеблется в пределах от одного — для легких станков с простой кинематикой — до двух — для тяжелых станков со сложной кинематической схемой. Можно считать, что для средних условий и постоянной скорости  $x_k = 1,5$ .

Таким образом, зная номинальный к.п.д. станка  $\eta_{\text{ст.н.}}$  и величину  $x_k$ , можно найти коэффициенты  $a$  и  $b$

$$a = \frac{x_k}{1 + x_k} \frac{1 - \eta_{ст.н}}{\eta_{ст.н}} \quad (2-12)$$

$$b = \frac{1}{1 + x_k} \frac{1 - \eta_{ст.н}}{\eta_{ст.н}} \quad (2-13)$$

и к. п. д. для произвольной нагрузки

$$\eta_{ст} = \frac{\eta_{ст.н}}{\eta_{ст.н} + \frac{1}{1 + x_k} (1 - \eta_{ст.н}) \left(1 + \frac{x_k}{k}\right)} \quad (2-9'')$$

Полученная формула дает приемлемые результаты только для односкоростных тихоходных приводов.

Для главных приводов с широким диапазоном регулирования скорости величина мощности холостого хода механизма не остается постоянной. Как показали многочисленные эксперименты со станками различных типов, мощность холостого хода станка увеличивается с увеличением скорости. Поэтому расчет по формуле, учитывающей только нагрузочные потери, дает завышенные значения к. п. д. для верхних ступеней скорости. Для станков, работающих на высоких скоростях, а также для станков, работающих при малых нагрузках резания, например при чистовых операциях, мощность холостого хода является основной нагрузкой электродвигателя. Мощность холостого хода станка  $P_0$  является своего рода критерием качества изготовления и сборки станка. Трудность определения  $P_0$  обуславливается ее непостоянством и зависимостью от ряда трудно учитываемых факторов, упомянутых выше. Даже для одной модели станка  $P_0$  может отличаться в 1,2—1,5 раза для одинаковых условий измерения. Поэтому расчет к. п. д. станка с учетом переменной  $P_0$  является приблизительным. В то же время в существующих литературных источниках изменение мощности холостого хода станка от скорости обычно не учитывается, что в ряде случаев является грубым допущением.

В данной работе предпринята попытка сблизить эти крайности и дать метод расчета влияния скорости на к. п. д. Следует указать, что экспериментальные графики мощности холостого хода в зависимости от скорости с достаточной для практики точностью могут считаться линейными относительно скорости, т. е.

$$P_{02} \approx P_{01} \frac{n_2}{n_1} \quad (2-14)$$

где цифрами «1» и «2» обозначаются величины, соответствующие меньшей и большей скоростям.

Коэффициент постоянных потерь  $a$  при невысокой скорости действительно может считаться постоянной величиной, однако с изменением скорости он также изменяется приблизительно по линейному закону. Экспериментальные графики  $P_0 = f(n)$  для станков раз-

личных типов приведены на рис. 2-1. Для расчета берутся графики только для самых высоких скоростей станка, где потери холостого хода начинают существенно сказываться. От графика  $P_0 = f(n)$  легко перейти к графику  $a = f(n)$ , взяв относительную величину мощности холостого хода согласно (2-5). График  $a = f(n)$  в общем виде приведен на рис. 2-2. Из него можно пайти

$$a = a_0 + (a_1 - a_0) \frac{n}{n_1} \quad (2-15)$$

Как показывают расчеты, величина  $a_0$  весьма невелика и составляет порядка 0,05. Пренебрегая ею, получаем

$$a \approx a_1 \frac{n}{n_1} \quad (2-15')$$

Для станков с механическим регулированием величину  $a_1$  можно принимать соответствующей наименьшей скорости последней наи-

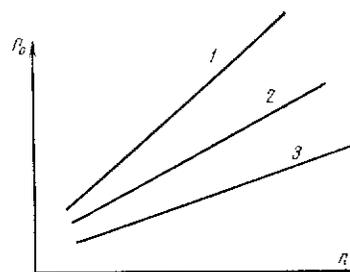


Рис. 2-1. Экспериментальные графики зависимости мощности холостого хода  $P_0$  от скорости вращения главного привода  $n$  для станков различных типов:

1 — карусельный станок; 2 — токарный станок; 3 — фрезерный станок

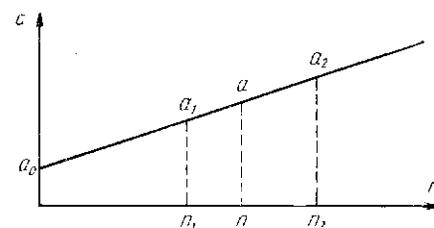


Рис. 2-2. График зависимости коэффициента  $a$  от скорости вращения  $n$ :  $a = f(n)$

вышей ступени, т. е.  $a_1 = a_{z\text{мин}}$ , где  $z$  — число ступеней. Для станков с электрическим регулированием  $a_1$  можно принимать соответствующей номинальной скорости электродвигателя  $n_n$ , т. е.  $a_1 = a_n$ .

Считая диапазон регулирования  $D = n_{\text{макс}}/n_{\text{мин}}$ , можно написать

$$a_{\text{макс}} = a_1 D.$$

В общем случае коэффициент полезного действия станка

$$\eta_{ст} = \frac{1}{1 + \frac{a}{k} + b} = \frac{1}{1 + \frac{a_1}{k} \frac{n}{n_1} + b} \quad (2-16)$$

где учтено как изменение нагрузки, так и изменение скорости привода станка. Формула имеет смысл только для величин  $n > n_1$  и  $a_1 > a_n$ . Для меньших величин  $a$  сохраняет силу формула к. п. д. (2-9) с учетом только изменения нагрузки.

1. Определить к. п. д. фрезерного станка и мощность электродвигателя при 75% нагрузке станка и потери холостого хода станка. Номинальная мощность станка  $P_{zn} = 6,3 \text{ квт}$ , коэффициент загрузки  $k = 0,75$ , номинальный к. п. д.  $\eta_{ст.н} = 0,84$ , соотношение постоянных и переменных потерь  $x_k = 1,5$ .

Номинальная мощность двигателя по (2-4)

$$P_{д.н} = \frac{6,3}{0,84} = 7,5 \text{ квт.}$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$  по (2-12) и (2-11)

$$a = \frac{1,5}{1+1,5} \frac{1-0,84}{0,84} = 0,114; \quad b = \frac{0,114}{1,5} = 0,076.$$

К. п. д. станка по (2-9)

$$\eta_{ст} = \frac{1}{1 + \frac{0,114}{0,75} + 0,076} = 0,815.$$

Мощность резания фактическая  $P_z = kP_{zn} = 0,75 \cdot 6,3 = 4,72 \text{ квт}$ . Мощность двигателя фактическая  $P_d = P_z / \eta_{ст} = 4,72 / 0,815 = 5,8 \text{ квт}$ . Мощность потерь холостого хода  $P_0 = aP_{zn} = 0,114 \cdot 6,3 = 0,72 \text{ квт}$ .

Мощность потерь холостого хода можно найти через номинальные потери станка:

$$\Delta P_n = P_{zn}(a + b).$$

В свою очередь

$$a + b = \frac{1 - \eta_{ст.н}}{\eta_{ст.н}} = \frac{1 - 0,84}{0,84} = 0,19;$$

$$\Delta P_n = 6,3 \cdot 0,19 = 1,2 \text{ квт.}$$

Отсюда мощность потерь холостого хода

$$P_0 = \frac{x_k}{1+x_k} \Delta P_n = \frac{1,5}{1+1,5} \Delta P_n = 0,6 \cdot 1,2 = 0,72 \text{ квт.}$$

2. Определить потери холостого хода, к. п. д. карусельного станка и мощность при различной нагрузке его, имеющей место при изготовлении детали, рассмотренной в примере (1-1-2), рис. 1-6. За номинальную мощность станка принимается максимальная мощность резания (табл. 1-1)

$$P_{zn} = P_{z \text{ макс}} = 48,2 \text{ квт.}$$

При максимальной нагрузке станка работают семь пар зубчатых колес и восемь пар подшипников качения (см. кинематическую схему на рис. 4-5).

К. п. д. станка при (номинальной) нагрузке

$$\eta_{ст.н} = \eta_{з.к}^7 \eta_{подш}^8 = 0,98^7 \cdot 0,99^8 = 0,8. \quad \checkmark$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$

$$a + b = \frac{1 - 0,8}{0,8} = 0,25, \quad \checkmark$$

при  $x_k = 1,5$

$$a = 0,6(a + b) = 0,6 \cdot 0,25 = 0,15; \quad \checkmark$$

$$b = 0,4(a + b) = 0,4 \cdot 0,25 = 0,1.$$

Потери холостого хода

$$P_0 = aP_{zn} = 0,15 \cdot 48,2 = 7,25 \text{ квт.}$$

К. п. д. станка при разной нагрузке определяется по формуле (2-9). К. п. д. станка определены для всех переходов и результаты расчетов приведены в табл. 2-1.

Таблица 2-1

Номер перехода по рис. 1-6	Мощность резания $P_z$ , квт	Коэффициент загрузки $k$	К. п. д. станка $\eta_{ст}$
1	42,8	0,89	0,795
2	48,2	1	0,80
3	32,3	0,675	0,76
4	38,4	0,798	0,78
5	33,8	0,705	0,765
6	46,0	0,955	0,798
7	40,6	0,844	0,793

3. Определить мощность на валу главного двигателя карусельного станка с учетом потерь. Максимальное усилие резания  $F_{z \text{ макс}} = 157 \text{ 000 н}$ , скорость резания  $v = 35 \text{ м/мин}$  (определена для случая черновой обработки стали  $\sigma_s = 750 \text{ н/мм}^2$  резцом Т5К10 двумя суппортами с максимальным усилием резания), максимальный диаметр изделия  $d_{и \text{ макс}} = 6300 \text{ мм}$ .

Зависимость момента резания от скорости вращения планшайбы  $M_z = f(n_{пл})$ , построенная по заводским материалам, приведена на рис. 2-3.

Расчетный диаметр изделия принимается равным

$$d_{пр} = 0,8d_{и \text{ макс}} = 0,8 \cdot 6300 = 5000 \text{ мм.}$$

Максимальный момент резания

$$M_{z \text{ макс}} = F_{z \text{ макс}} \frac{d_{\text{др}}}{2 \cdot 1000} = 157\,000 \frac{5000}{2000} = 393\,000 \text{ н.м.}$$

Мощность резания  $P_z$  определяется по (1-8). Значения  $M = M_z$  и  $n = n_{\text{пл}}$  берутся по кривой 1 (рис. 2-3). Значения  $P_z$  приведены в табл. 2-2, на основании которых построен график  $P_z = f(n_{\text{пл}})$  на рис. 2,4 (кривая 1).

Мощность потерь, затрачиваемая на преодоление трения в коробке скоростей при резании,

$$P_2 = \frac{P_z}{\eta_{\text{к.с}}} - P_z = P_z \frac{1 - \eta_{\text{к.с}}}{\eta_{\text{к.с}}},$$

где  $\eta_{\text{к.с}} = 0,85$  — к.п. д. коробки скоростей, значение которого взято из заводских материалов.

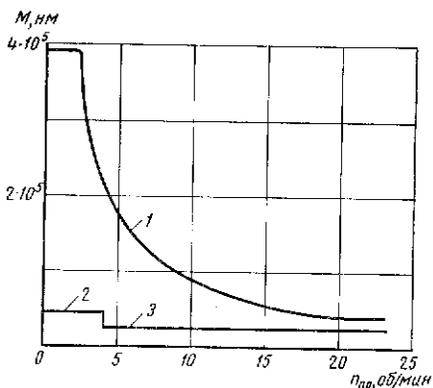


Рис. 2-3. Зависимость момента резания  $M_z$  и момента трения в направляющих планшайбы  $M_{\text{кр}}$  от скорости вращения планшайбы  $n_{\text{пл}}$  по заводским данным

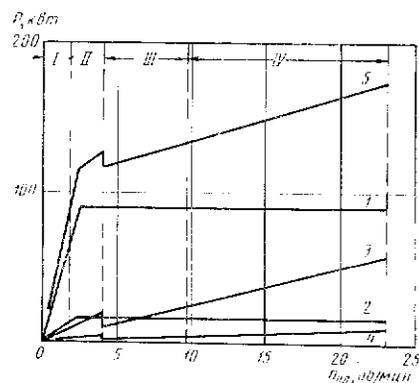


Рис. 2-4. Зависимость мощности от скорости вращения планшайбы  $n_{\text{пл}}$  по заводским данным:

1 — мощность резания  $P_z$ ; 2 — мощность потерь в коробке скоростей от резания  $P_2$ ; 3 — мощность потерь от трения в направляющих  $P_3$ ; 4 — мощность потерь в коробке скоростей от трения в направляющих  $P_4$ ; 5 — суммарная мощность станка  
 $P_{\text{ст}} = P_z + P_2 + P_3 + P_4$

Значения  $P_z$  приведены в табл. 2-2, а график  $P_z = f(n_{\text{пл}})$  — на рис. 2-4 (кривая 2). Мощность потерь, затрачиваемая на вращение планшайбы с деталью  $P_3$ , определяется по (1-8). Значения  $M = M_{\text{кр}}$  берутся по кривым 2 и 3 (рис. 2-3), построенным для деталей с массами 80 и 32 т. Значения  $P_3$  приведены в табл. 2-2, а график — на рис. 2-4 (кривая 3).

Таблица 2-2

Параметры	Механические ступени			
	I	II	III	IV
$n_{\text{пл}}$ , об/мин	0,28	1,7	4,9	11,6
$M_z$ , н.м	393 000	393 000	178 000	88 300
$P_z$ , кВт	11,4	70	91	91
$P_2$ , кВт	2,1	12,5	16	16
$P_3$ , кВт	1,3	9,2	12,8	25
$P_4$ , кВт	0,23	1,6	1,9	4,4
$P_{\text{ст}}$ , кВт	15,03	92	121,7	136,4
				142,2
				177,5

Мощность потерь, затрачиваемая на преодоление трения в коробке скоростей, возникающая от вращения планшайбы с деталью,

$$P_4 = \frac{P_3}{\eta_{к.с}} - P_3.$$

Значения  $P_4$  приведены в табл. 2-2, а график — на рис. 2-4 (кривая 4).

Полная мощность, потребляемая станком,

$$P_{ст} = P_z + P_2 + P_3 + P_4.$$

Значения  $P_{ст}$  приведены в табл. 2-2, а график — на рис. 2-4 (кривая 5).

4. Рассчитать к. п. д. главного привода токарного станка модели 1660 для различной скорости и нагрузки. Номинальный к. п. д.  $\eta_{ст.н} = 0,8$ ; коэффициенты  $a = 0,15$ ;  $b = 0,1$ ;  $x_k = 1,5$ .

Расчет производится по формуле (2-16). Результаты приведены в табл. 2-3. В таблице также приведены значения  $\eta/\eta_{н}$  при  $k = 1$ .

Таблица 2-3

	$k$	$\eta$					$\eta/\eta_{н}$ при $k=1$
		0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	
$a_{н}/k$		0,5	0,3	0,214	0,167	0,15	
К.п.д.	1	0,625	0,715	0,76	0,785	0,8	1
при	2	0,475	0,59	0,66	0,70	0,715	0,895
$\frac{n}{n_n} =$	3	0,385	0,50	0,575	0,625	0,645	0,81
	4	0,323	0,435	0,51	0,565	0,59	0,74

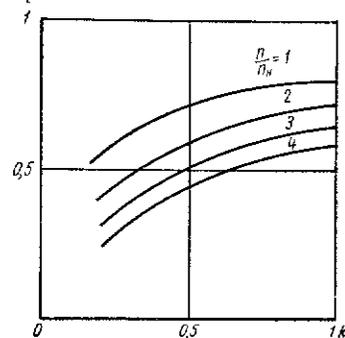


Рис. 2-5. Графики зависимости к. п. д. станка  $\eta$  от коэффициента загрузки  $k$  для различных скоростей вращения

Графики  $\eta = f(k)$  для различных отношений  $n/n_n$  приведены на рис. 2-5.

## РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТИПОВЫХ МЕХАНИЗМОВ СТАНКОВ

### § 3-1. Общие положения по расчету мощности

Расчет мощности электроприводов станков необходим для правильного выбора и установки электродвигателей. Завышение мощности двигателя увеличивает потери электропривода и ухудшает энергетические показатели (к. п. д.,  $\cos \varphi$ ). Занижение мощности ведет к перегрузке двигателя, быстрому выходу его из строя, вызывает необходимость ремонта и в результате уменьшает производительность станка. Правильное определение мощности и выбор электродвигателей станков должны обеспечивать надежную работу станка при минимальной стоимости капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

Мощность двигателя механизма станка в установившемся режиме определяется по (2-3) и (2-4).

Типовыми механизмами станка являются механизм главного привода, подачи и вспомогательные механизмы (зажима поперечины, перемещения узлов и др.). Каждый из них имеет свои особенности, обусловленные технологическим процессом и конструкцией. Во всех случаях определения мощности электродвигателя необходимо знать нагрузочную диаграмму механизма (зависимость момента или мощности от времени), а также потери в самом механизме или его к. п. д. Тогда может быть известна нагрузка на входном валу механизма или, что одно и то же, на валу электродвигателя. Условия работы механизмов станков по характеру нагрузки, режиму и регулированию скорости весьма различны. Этим объясняется большое разнообразие применяемых систем электропривода, начиная от нерегулируемого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и кончая сложными системами с большим диапазоном регулирования скорости и использованием глубоких обратных связей. Поэтому не представляется возможным дать какую-либо единую методику расчета и выбора мощности электродвигателя типовых механизмов станков.

Ограничиваясь общими соображениями, можно сказать, что определение мощности и предварительный выбор электродвигателя должны производиться для наиболее энергоемкого конкретного

технологического процесса по правилам и методам, изложенным в известных курсах электропривода [Л.1, 12].

Для главных приводов легких и средних станков характерной является нагрузка с постоянной мощностью на всем диапазоне регулирования. Для тяжелых станков начальную часть диапазона с меньшими скоростями занимает нагрузка с постоянным моментом, причем с увеличением веса изделий и станков и при наличии направляющих скольжения эта часть диапазона имеет тенденцию к увеличению, что показано на соответствующих примерах глав 3 и 4.

Для приводов подач и вспомогательных приводов преобладающей является нагрузка постоянным моментом трения с соответствующим выбором системы регулирования в приводах подач.

В отношении режимов работы приводы основных движений тяжелых станков (главный и подачи) работают, как правило, в длительном режиме с переменной нагрузкой. В легких и средних станках любых типов, а также в станках сверлильных, агрегатных и шлифовальных можно встретить приводы, работающие в повторно-кратковременном режиме. Вспомогательные приводы работают, как правило, в кратковременном режиме.

Выбор типа привода обуславливается требуемым диапазоном регулирования скорости механизма станка.

В главных приводах вращательного движения диапазон регулирования составляет значительную величину, порядка 100 : 1, и может осуществляться от асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором через многоступенчатую коробку скоростей или от регулируемого двигателя постоянного тока с коробкой скоростей на две, три или четыре ступени. Для тяжелых станков применяется регулируемый привод постоянного тока по системе преобразователь — двигатель (П—Д). Преобразователь переменного тока в постоянный может быть выполнен различно (машинный, магнитный, ионный, полупроводниковый и т. д.).

Аналогичные решения имеют место для приводов регулируемых механизмов подач с той разницей, что при меньших мощностях эти приводы имеют большие диапазоны регулирования, до величины 1000 : 1 и выше.

Вспомогательные приводы обычно выполняются от асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и являются нерегулируемыми. Проверка выбранного двигателя осуществляется по его начальному или пусковому моменту, а также по перегрузочной способности.

### § 3-2. Расчет мощности главных приводов станков

Характерными режимами работы главных приводов станков являются длительный и повторно-кратковременный режимы. Оба режима могут протекать при переменной нагруз-

ке. Расчет мощности двигателя возможен как методом средних потерь, так и методами эквивалентных величин с построением нагрузочных диаграмм [Л. 1, 12]. При пользовании методом средних потерь, а также при учете переходных процессов неизбежным является предварительный выбор двигателя с его последующим проверочным расчетом.

1. Определить мощность двигателя токарного станка модели 1К62 методом средних потерь. Эскиз обрабатываемой детали приведен на рис. 3-1. Материал изделия — хромоникелевая сталь  $\sigma_0 = 1080 \text{ н/мм}^2$ . Материал резца Т5К10. Глубина резания, подача, скорость, усилие, мощность резания, машинное и вспомогательное время, коэффициент загрузки и к. п. д. станка определены аналогично главам 1 и 2. Результаты приведены в табл. 3-1:  $t_{всп} = 2,12 \text{ мин}$ ,  $\eta_{ст.н} = 0,8$ ,  $a = 0,15$ ,  $b = 0,1$ .

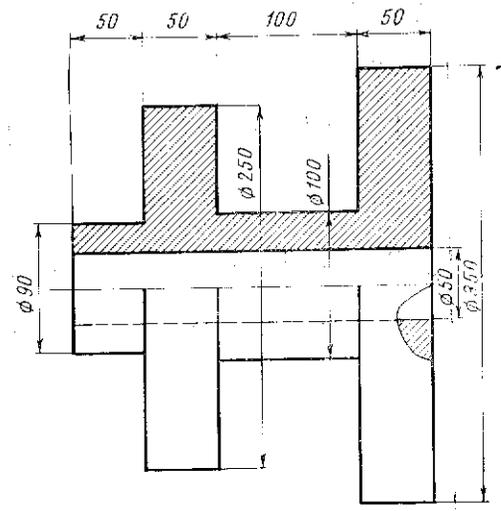


Рис. 3-1. Эскиз детали, обрабатываемой на токарном станке

Мощность на валу двигателя на каждом переходе определена по (2-4)

$P_{д(m)} = P_{z(m)} / \eta_{ст(m)}$ , где  $m$  — номер перехода или операции.

Мощность холостого хода станка по (2-5)

$$P_0 = 0,15 \cdot 14,5 = 2,17 \text{ квт.}$$

За номинальную мощность резания принято ее максимальное значение. На основании расчетных и заданных в табл. 3-1 величин на рис. 3-2 построена нагрузочная диаграмма двигателя.

Средняя мощность за цикл

$$P_{д. ср} = \frac{\sum_{k=1}^9 P_{д.к} t_k}{t_{ц}} = \frac{0,5 \cdot 3,44 \cdot 0,053 + 4,04 \cdot 0,053 + 7,48 \cdot 0,133 + 0,5 \cdot 9,86 \cdot 0,386 + 2,54 \cdot 0,386 + 15,6 \cdot 0,179 + 0,5 \cdot 4,4 \cdot 0,361 + 4,2 \cdot 0,361 + 8,4 \cdot 0,192 + 0,192 + 0,646 + 0,264}{0,053 + 0,133 + 0,386 + 0,179 + 0,361 + 0,192 + 0,646 + 0,264}$$

$$+ 0,5 \cdot 13,52 \cdot 0,646 + 18,1 \cdot 0,264 + 0,5 \cdot 14,72 \cdot 0,78 + 2,68 \cdot 1,78 + 2,17 \cdot 2,12 + 0,78 + 2,12 = 6,85 \text{ квт.} \quad (3-1)$$

Таблица 3-1

Номер пере- хода	Значения											
	$l, \text{ мм}$	$d, \text{ мм}$	$t, \text{ мм}$	$s, \text{ мм/об}$	$v, \text{ м/мин}$	$F_z, \text{ Н}$	$P_z, \text{ квт}$	$n_{пл}, \text{ об/мин}$	$k$	$\eta_{ст}$	$P_d, \text{ квт}$	$t_{маш}, \text{ мин}$
1	20	90	3,5	1,5	71	4070	4,82	251	0,322	0,645	7,48	0,053
		50	3,5	1,5	39,2	2600	1,7	251	0,117	0,42	4,04	
2	50	90	3,5	1,5	21	4070	4,82	251	0,332	0,645	7,48	0,133
3	80	250	4,35	2	81,2	6800	9,3	103,5	0,642	0,75	12,4	0,386
		90	4,35	2	28,3	3160	1,49	103,5	0,103	0,587	2,54	
4	50	250	5	3	73	10000	12,2	93	0,843	0,78	15,6	0,179
5	75	250	4,2	2	81,8	4280	5,85	104	0,403	0,68	8,6	0,361
		100	4,2	2	32,6	3340	1,83	104	0,126	0,437	4,2	
6	100	100	4,1	2	82	4130	5,65	261	0,39	0,674	8,4	0,192
7	125	350	6,0	3	70,7	11750	13,9	64,5	0,96	0,796	17,4	0,646
		100	6,0	3	20,3	4570	1,55	64,5	0,107	0,4	3,88	
8	50	350	6,5	3	69,7	12500	14,5	63,3	1	0,8	18,1	0,264
9	150	350	6,2	3	70,4	11900	13,9	64	0,96	0,796	17,4	0,78
		50	6,2	3	10	2770	0,462	64	0,0318	0,172	2,68	

Задаем мощность двигателя

$$P_d = (1,2 - 1,3) P_{cp} = 1,3 \cdot 6,85 = 8,9 \text{ квт.}$$

Предварительно выбирается двигатель типа АО62-4; 10 квт; 1440 об/мин;  $\Delta P_n = 1,5 \text{ квт}$ ; зависимость  $\eta_d = f(P_{д2})$  приведена на рис. 3-3.

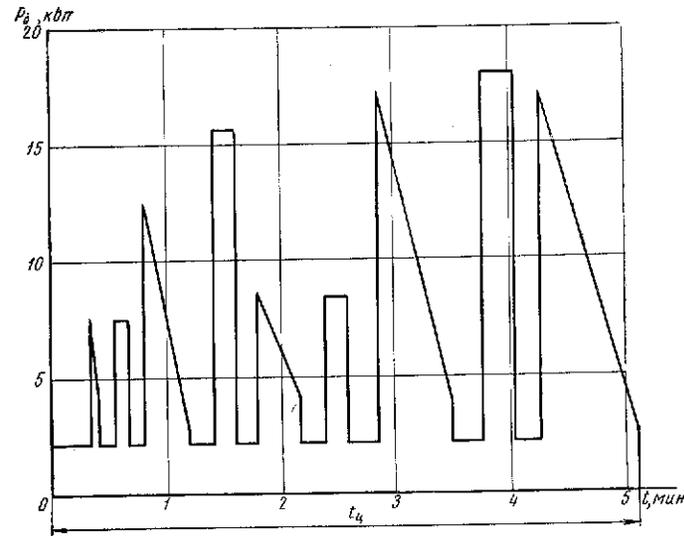


Рис. 3-2. Нагрузочная диаграмма главного привода токарного станка

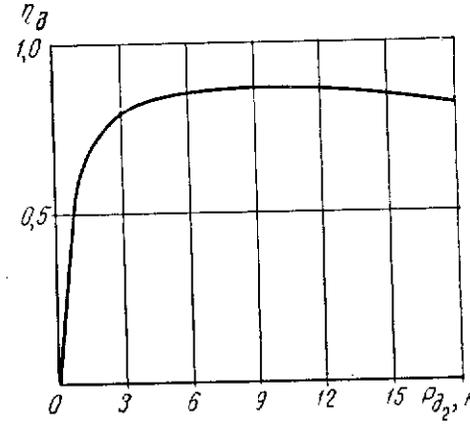


Рис. 3-3. Зависимость к. п. д. двигателя типа АО62-4

Потери в двигателе на каждом переходе

$$\Delta P_d = P_{д1} - P_{д2} = P_z \left( \frac{1}{\eta_d} - 1 \right). \quad (3-2)$$

Данные расчетов  $\Delta P_d$  сведены в табл. 3-2.

Таблица 3-2

Параметры	Номер перехода													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
$d, \text{мм}$	90	50	90	250	90	250	250	100	100	350	100	350	350	50
$\eta_d$	0,87	0,83	0,87	0,86	0,78	0,84	0,88	0,83	0,875	0,83	0,835	0,825	0,83	0,79
$\Delta P_{д. квт}$	1,12	0,85	1,12	1,98	0,71	2,95	1,2	3,882	1,18	3,65	0,775	3,8	3,65	0,695

Потери мощности при холостом ходе двигателя

$$\Delta P_0 = 0,65 \text{ квт.}$$

По данным табл. 3-2 на рис. 3-4 построен график потерь в двигателе  $\Delta P_{д.} = f(t)$  за цикл.

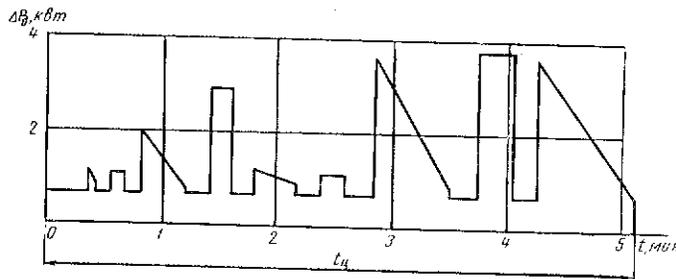


Рис. 3-4. Потери в двигателе в течение цикла

Средние потери в двигателе за цикл

$$\Delta P_{д. ср} = \frac{\sum_{k=1}^9 \Delta P_{д. к} t_k}{t_{ц}} = \frac{(0,5 \cdot 0,27 + 0,85) \cdot 0,053 + 1,12 \cdot 0,133 + (0,5 \cdot 1,27 + 0,71) \cdot 0,383 + 2,95 \cdot 0,179 + (0,5 \cdot 0,318 + 0,882) \cdot 0,361 + 1,18 \cdot 0,192 + (0,5 \cdot 2,875 + 0,775) \cdot 0,646 + 3,8 \cdot 0,234 + (0,5 \cdot 2,955 + 0,695) \cdot 0,78 + 0,65 \cdot 2,12}{5,14} = 1,43 \text{ квт.} \quad (3-3)$$

Так как  $\Delta P_{д. ср. расч} = 1,43 < \Delta P_{д. н} = 1,5 \text{ квт}$ , то двигатель типа АО62-4 выбран правильно.

2. Определить мощность двигателя стола продольно-строгального станка 724А. Определение мощности производится без учета переходных процессов и носит предварительный характер.

Необходимыми данными являются: наибольшая длина строгания  $l = 1 \text{ м}$ , скорость рабочего хода стола  $v_{пр} = 6 \div 60 \text{ м/мин}$ , наибольшая скорость обратного хода  $v_{обр} = 60 \text{ м/мин}$ . Наибольший вес детали  $G_{дет} = 100\,000 \text{ н}$ , вес стола  $G_{ст} = 50\,000 \text{ н}$ . Зависимость усилия резания  $F_z$  на столе и к. п. д. передач  $\eta_{пер}$  от скорости прямого хода приведены на рис. 4-8. Коэффициент трения стола о направляющие  $f = 0,05$ .

Расчет мощности на валу двигателя производится по максимальному усилию резания и максимальной скорости стола, ему соответствующей, согласно зависимости  $F_z = f(v_{пр})$  (см. рис. 4-8).

Тяговое усилие на столе при  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$

$$F_{тяг} = F_z + f(F_y + G_{дет} + G_{ст}) = 90\,000 + 0,05(36\,000 + 100\,000 + 50\,000) = 99\,300 \text{ н}, \quad (3-4)$$

где  $F_y$  — вертикальная составляющая усилия резания, которая принята

$$F_y = 0,4 F_z = 0,4 \cdot 90\,000 = 36\,000 \text{ н.}$$

Мощность на валу двигателя при  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$

$$P_d = \frac{F_{тяг} v_{пр}}{60 \cdot 1000 \cdot \eta_{пер}} = \frac{99\,300 \cdot 12}{60 \cdot 1000 \cdot 0,74} = 26,8 \text{ квт.} \quad (3-5)$$

Габаритная (номинальная) мощность двигателя

$$P_{н} = P_{д. расч} \frac{v_{макс}}{v_{расч}} \quad (3-6)$$

При однозонном регулировании скорости (регулирование напряжением на якоре двигателя во всем диапазоне изменения скоростей  $v = 6 \div 60 \text{ м/мин}$ )

$$P_{н} = 26,8 \frac{60}{12} = 134 \text{ квт.}$$

При двухзонном регулировании скорости (регулирование скорости в диапазоне  $v = 6 \div 30 \text{ м/мин}$  осуществляется изменением напряжения на якоре, в диапазоне  $v = 30 \div 60 \text{ м/мин}$  — изменением магнитного потока двигателя)

$$P_{н} = 26,8 \frac{30}{12} = 67 \text{ квт.}$$

Выбор двигателя:

при однозонном регулировании за максимальную скорость двигателя следует принять его номинальную скорость, так как регулирование производится вниз от основной. При имеющемся редукторе скорость двигателя для обеспечения  $v_{макс} = 60 \text{ м/мин}$  должна быть равна  $n_{д. макс} = n_{д. н} = 1200 \text{ об/мин}$ ;

при двухзонном регулировании скорость двигателя принимается равной  $n_n = 600 \text{ об/мин}$ , так как максимальная скорость стола обеспечивается ослаблением магнитного потока двигателя в диапазоне 2 : 1.

При однозонном регулировании принимается двигатель типа П102; 140 кВт; 220 в; 710 а; 1350 об/мин.

При двухзонном регулировании принимается двигатель типа П112; 70 кВт; 220 в; 353 а; 600 об/мин.

3. Построить нагрузочную диаграмму двигателя стола продольно-строгального станка модели 724А. Данные по станку взяты из (3—2—2). Схема систем автоматического управления главного привода станка приведена на рис. 6-8 и рассмотрена подробно в (6—3—5).

В системе имеются следующие электрические машины и аппараты.

Двигатель П112; 70 кВт; 220 в; 353 а; 600 об/мин. Генератор П101; 90 кВт; 230 в; 391 а; 1450 об/мин. Магнитные усилители УМЗП20-20;  $U_{с.н} = 220 \text{ в}$ ;  $U_{н.н} = 210 \text{ в}$ ;  $I_{н.н} = 4,8 \text{ а}$ .

Расчет установившихся режимов. Мощность двигателя при максимальном усилии резания и  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$  равна  $P_d = 26,8 \text{ кВт}$  (см. 3—2—2).

Потери на трение стола о направляющие при холостом ходе стола и  $v = 12 \text{ м/мин}$

$$\Delta P_{напр. 0} = \frac{(G_{дет} + G_{с.т})fv}{60 \cdot 1000} = \frac{(100 + 50) 10^3 \cdot 0,05 \cdot 12}{60 \cdot 1000} = 1,5 \text{ кВт.} \quad (3-7)$$

Потери в передачах при холостом ходе со скоростью  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$

$$\Delta P_{пер. 0} = 0,6 P_d (1 - \eta_{пер}) = 0,6 \cdot 26,8 (1 - 0,74) = 4,1 \text{ кВт.} \quad (3-8)$$

Мощность на валу двигателя при холостом ходе со скоростью стола  $v = 12 \text{ м/мин}$

$$\Delta P_{д. 0} = \Delta P_{напр. 0} + \Delta P_{пер. 0} = 1,5 + 4,1 = 5,6 \text{ кВт.} \quad (3-9)$$

Момент потерь холостого хода двигателя

$$M_0 = M_{э. н} - M_n = c_m I_n - 9550 \frac{P_n}{n_n} = 3,34 \cdot 353 - 9550 \frac{70}{600} = 65 \text{ н.м.} \quad (3-10)$$

Электромагнитный момент двигателя при холостом ходе

$$M_{э. 0} = M_0 + 9550 \frac{\Delta P_{д. 0}}{n_0} = 65 + 9550 \frac{5,6}{240} = 287 \text{ н.м.} \quad (3-11)$$

Ток якоря двигателя при холостом ходе стола (ток установившегося режима)

$$I_{д. 0} = \frac{M_{э. 0}}{c_m}; \quad (3-12)$$

при прямом ходе ( $\Phi_d = \Phi_n$ )

$$I_{д. 0 пр} = \frac{287}{3,34} = 86 \text{ а};$$

при обратном ходе ( $\Phi_d = 0,5 \Phi_n$ )

$$I_{д. 0 обр} = \frac{287}{0,5 \cdot 3,34} = 172 \text{ а}.$$

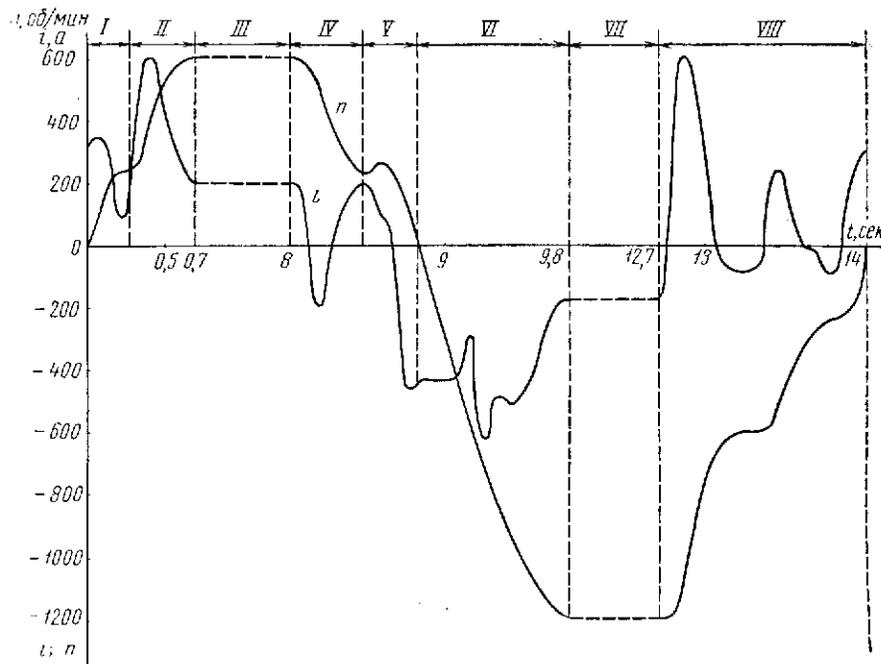


Рис. 3-5. Нагрузочная диаграмма двигателя продольно-строгального станка

Электромагнитный момент и ток якоря двигателя при полной нагрузке станка и скорости прямого хода, равной  $v_{пр} = 30 \text{ м/мин}$ , определены аналогично в (4—1—3) и равны

$$M_э = 685 \text{ н.м}; \quad I_{д. нагр} = I_{с. нагр} = 205 \text{ а}.$$

Расчет переходных процессов. Один двойной ход стола осуществляется по следующему циклу.

Реверсирование электропривода стола с прямого хода на обратный: снижение скорости стола с  $v_{пр} = 30 \text{ м/мин}$  до  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$ ; выход резца из металла со скоростью стола  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$ ; реверсирование электропривода стола со скорости  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$  до  $v_{обр} = 60 \text{ м/мин}$ .

Реверсирование электропривода стола с обратного хода на прямой: снижение скорости стола с  $v_{обр} = 60 \text{ м/мин}$  до  $v_{обр} = 12 \text{ м/мин}$ ; реверсирование электропривода стола с  $v_{обр} = 12 \text{ м/мин}$  до  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$ ; врезание резца в металл на скорости  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$ ; повышение скорости стола с  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$  до  $v_{пр} = 30 \text{ м/мин}$ .

Расчеты требуемых графиков переходных процессов производятся методом конечных приращений и рассмотрены в главе 6. Графики  $n, i = f(t)$  построены на рис. 3-5.

По графику  $n = f(t)$  находят величины путей, проходимых столом во время переходных процессов (рис. 3-5).

Определяются масштабы графика  $n = f(t)$ :

масштаб скорости  $m_n = 5 \text{ об/мин/мм}$ ;

масштаб времени  $m_t = 0,01 \text{ сек/мм}$ .

Определяется площадь, заключенная между кривой скорости и осью времени,  $S(n, t)$ .

Перемещение стола на всех участках переходных процессов

$$l = \frac{m_n \cdot m_t}{60} S(n, t) = \frac{5 \cdot 0,01}{60 \cdot 20} S(n, t) = 4,17 \cdot 10^{-5} S(n, t), \text{ м.} \quad (3-13)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 3-3.

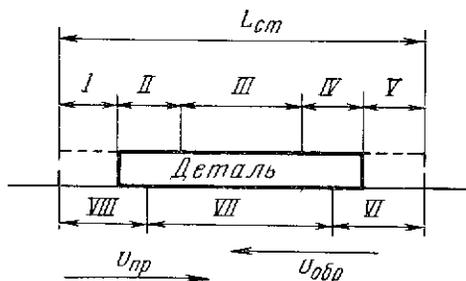


Рис. 3-6. Диаграмма перемещений стола

Перемещение стола во время установившихся режимов (см. диаграмму перемещений стола на рис. 3-6):

прямой ход стола

$$l_{III} = L - (l_{II} + l_{IV}) = 4 - (0,169 + 0,165) = 3,666 \text{ м};$$

обратный ход стола

$$l_{VII} = L_{ст} - (l_{VI} + l_{VIII}) = L + l_I + l_V - (l_{VI} + l_{VIII}) =$$

$$= 4 + 0,0374 + 0,0563 - (0,583 + 0,628) = 2,883 \text{ м.}$$

Продолжительность установившегося движения:  
прямой ход стола

$$t_{III} = \frac{60 l_{III}}{v_{пр}} = \frac{60 \cdot 3,666}{30} = 7,332 \text{ сек};$$

обратный ход стола

$$t_{VII} = \frac{60 l_{VII}}{v_{обр}} = \frac{60 \cdot 2,883}{60} = 2,883 \text{ сек.}$$

Проверка двигателя на нагрев производится методом эквивалентного тока. График тока  $i = f(t)$  приведен на рис. 3-5. Ухудшение

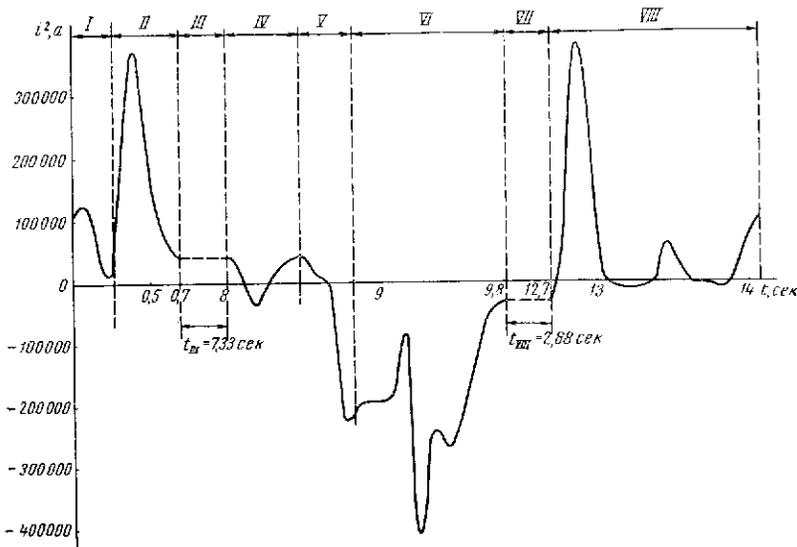


Рис. 3-7. Зависимость квадрата тока от времени

условий охлаждения двигателя при переходных процессах учитывается уменьшением времени цикла на 25%.

Выражение эквивалентного тока

$$I_{экв} = \sqrt{\frac{\int_0^{II-III} i^2 dt + I_{пр}^2 t_{III} + \int_0^{IV-V} i^2 dt + \int_0^{VI} i^2 dt + I_{обр}^2 t_{VII} + \int_0^{VIII} i^2 dt}{t_{III} + t_{VII} + 0,75(t_I + t_{II} + t_{IV} + t_V + t_{VI} + t_{VIII})}} \quad (3-14)$$

Строятся вспомогательные кривые  $i^2 = f(t)$  (рис. 3-7) и проводится графическое интегрирование.

Определяются масштабы:  
 масштаб квадрата тока  $m_{i^2} = 2500 \text{ а}^2/\text{мм}$ ;  
 масштаб времени  $m_t = 0,01 \text{ сек}/\text{мм}$ .  
 Тогда

$$\int i^2 dt = m_{i^2} m_t S(i^2, t) = 25 S(i^2, t), \text{ а}^2 \cdot \text{сек}. \quad (3-15)$$

Результаты расчета приведены в табл. 3-4.

Таблица 3-4

Участки	Площадь $S(i^2 t)$ , мм <sup>2</sup>	$\int i^2 dt$ , а <sup>2</sup> ·сек
I—II	4 018	100 450
IV—V	1 666	41 650
VI	11 670	291 750
VIII	5 180	129 500

Полученные значения проставляют в выражение для определения эквивалентного тока

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{100\,450 + 205^2 \cdot 7,33 + 41\,650 + 291\,750 + 172^2 \cdot 2,88 + 129\,500}{7,33 + 2,88 + 0,75(0,25 + 0,45 + 0,47 + 0,35 + 0,98 + 1,35)}} = 270 \text{ а}.$$

Полученное значение эквивалентного тока не превышает номинального тока двигателя

$$I_{\text{экв}} = 270 \text{ а} < I_{\text{д. н}} = 353 \text{ а}. \quad (3-16)$$

Такая проверка двигателя не является окончательной, так как при определении  $I_{\text{экв}}$  была принята деталь максимальной длины. Следует определить минимально допустимую длину детали по условиям охлаждения двигателя.

4. Определить минимально допустимую по условиям нагрева двигателя длину обрабатываемой детали. Данные приняты из примера (3-2-3). Так как длина обрабатываемой детали неизвестна, то пути, проходимые столом станка во время установившихся режимов, могут быть определены следующим образом (см. 3-2-3):  
 прямой ход

$$l_{\text{III}} = L - (l_{\text{II}} + l_{\text{IV}}) = L - (0,169 + 0,165) = L - 0,334;$$

обратный ход

$$l_{\text{VII}} = L + l_{\text{I}} + l_{\text{V}} - (l_{\text{VI}} + l_{\text{VIII}}) = 4 + 0,0374 + 0,0563 - (0,583 + 0,628) = L - 1,1173.$$

Продолжительность установившегося движения стола:

прямой ход

$$t_{\text{III}} = \frac{60 I_{\text{III}}}{v_{\text{пр}}} = \frac{60(L - 0,334)}{30} = 2L - 0,668;$$

обратный ход

$$t_{\text{VII}} = \frac{60 I_{\text{VII}}}{v_{\text{обр}}} = \frac{60(L - 1,1173)}{60} = L - 1,1173.$$

Полагая, что  $I_{\text{экв}} \ll I_{\text{дв.н}}$ , определяется минимальная длина детали из (3-14).

Значения токов и времени приняты из (3-2-3)

$$353^2 \geq \frac{100\,450 + 205^2(2L - 0,668) + 41\,650 + 291\,750 + 172^2(L - 1,1173) + 129\,500}{2L - 0,668 + L - 1,1173 + 0,75(0,25 + 0,45 + 0,47 + 0,35 + 0,98 + 1,35)},$$

откуда  $L \geq 1,41 \text{ м}$ .

При обработке деталей длиной  $L \geq 1,41 \text{ м}$  двигатель удовлетворяет условиям нагрева. При необходимости обработки деталей еще меньшей длины применяется независимая вентиляция двигателя.

5. Рассчитать и построить нагрузочную диаграмму электропривода шлифовального круга сферо-шлифовального станка модели ЛЗ-8М. На станке выполняется шлифование шариковой дорожки на наружном кольце подшипника. Станок ЛЗ-8М обеспечивает следующий цикл работы (после введения шлифовального круга в изделие): ускоренный подвод шлифовального круга к шлифуемой поверхности изделия, врезание и набор упругой деформации технологической системы «станок — инструмент — деталь», черновое шлифование, снижение упругой деформации, чистовое шлифование и ускоренный отвод шлифовального круга от шлифуемой поверхности изделия.

Мощность резания при черновом и чистовом шлифовании составляет  $P_{\text{черн}} = 2,86 \text{ кВт}$ ,  $P_{\text{чист}} = 1,5 \text{ кВт}$ .

Машинное и вспомогательное время определены аналогично (1-3-2) и приведены в табл. 3-5.

Таблица 3-5

Время, сек				
врезания (набор упругой деформации) $t_{\text{вр}}$	чернового шлифования $t_{\text{черн}}$	отвода и снижения упругой деформации $t_{\text{отв}}$	чистового шлифования $t_{\text{чист}}$	паузы $t_{\text{п}}$
2	12	0,18	10	9

К. п. д. шлифовального шпинделя и ременной передачи (шлифовальной бабки)  $\eta_{\text{ш.б}} = 0,94$ .

Мощность на валу двигателя по (2-4):  
при черновом шлифовании

$$P_{д. черн} = \frac{2,86}{0,94} = 3,04 \text{ квт};$$

при чистовом

$$P_{д. чист} = \frac{1,5}{0,94} = 1,6 \text{ квт.}$$

Мощность на валу двигателя при холостом ходе по (2-5) и (2-12)

$$P_0 = 0,6 \frac{1-0,94}{0,94} 2,86 = 0,11 \text{ квт.}$$

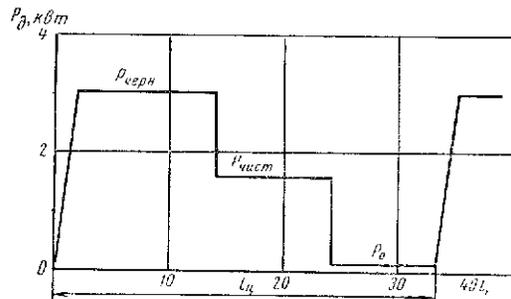


Рис. 3-8. Нагрузочная диаграмма двигателя шлифовального круга

За номинальную мощность станка принята максимальная мощность резания.

Нагрузочная диаграмма двигателя построена на рис. 3-8. По ней определяется эквивалентная мощность двигателя шлифовального круга

$$P_{эки} = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_0 + P_{черн}}{2}\right)^2 t_{вр} + P_{черн}^2 t_{черн} + \left(\frac{P_{черн} + P_{чист}}{2}\right)^2 t_{отв} + P_{чист}^2 t_{чист} + P_0^2 t_п}{t_{вр} + t_{черн} + t_{отв} + t_{чист} + t_п}}$$

$$= \sqrt{\frac{\left(\frac{0,11 + 3,04}{2}\right)^2 2 + 3,04^2 \cdot 12 + \left(\frac{3,04 + 1,6}{2}\right)^2 0,18 + 1,6^2 \cdot 10 + 0,11 \cdot 9}{2 \cdot 12 + 0,18 + 10 + 9}} = 2,1 \text{ квт.} \quad (3-17)$$

Выбирается асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа АО-42/2; 2,8 квт; 2880 об/мин; к. п. д. = 84%;  $M_{макс}/M_n = 2,5$ .

Проверка двигателя по нагреву. Условие проверки

$$P_{д. н} \geq P_{эки}. \quad (3-18)$$

Так как  $2,8 > 2,1$ , то двигатель по условиям нагрева выбран правильно.

Проверка двигателя по перегрузочной способности. Условие проверки

$$\frac{M_{макс}}{M_n} \leq 2,5 \text{ или при } n = \text{const} \quad \frac{P_{макс}}{P_n} \leq 2,5. \quad (3-19)$$

Так как  $\frac{P_{макс}}{P_n} = \frac{3,04}{2,8} = 1,085 < 2,5$ , то двигатель и по перегрузочной способности выбран правильно.

### § 3-3. Расчет мощности привода подачи

Особенность расчета статической нагрузки привода подачи отмечена в главе 1. Режим работы электродвигателя аналогичен режиму работы главного привода. Предварительно выбранный двигатель впоследствии проверяется. В случае применения регулируемого двигателя необходима проверка по моменту при наибольшей и наименьшей величине подачи.

При наименьших подачах вследствие резкого ухудшения условий охлаждения электродвигателя вводится поправочный коэффициент, предусматривающий уменьшение допустимого тока и момента при работе на малых скоростях.

1. Определить мощность двигателя подачи стола горизонтально-расточного станка модели 2614. При определении мощности двигателя подачи стола рассматриваются два случая работы электропривода:

а) рабочая подача, при которой максимальный момент на валу ходового винта определяется при растачивании отверстия  $d = 420 \text{ мм}$  в чугуном изделии резцом, закрепленным в суппорте планшайбы,

$$M_{х. в.} = 36,4 \text{ н} \cdot \text{м};$$

б) трогание стола с места, при котором момент на ходовом винте

$$M_{х. в. тр} = 52,5 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Величины моментов взяты из (1-2-2).

Определение мощности двигателя производится по значению момента на ходовом винте при рабочей подаче. Момент на валу двигателя

$$M_d = \frac{M_{х. в.}}{i\eta} = \frac{36,4}{12,04 \cdot 0,885} = 3,42 \text{ н} \cdot \text{м}, \quad (3-20)$$

где  $i = 12,04$  — передаточное отношение редуктора от ходового винта к двигателю;  
 $\eta = 0,96^3 = 0,885$  — к. п. д. редуктора от ходового винта к двигателю.

Мощность двигателя

$$P_d = \frac{M_d n_d}{9550} = \frac{3,42 \cdot 1500}{9550} = 0,537 \text{ квт}, \quad (3-21)$$

где  $n_d^l$  — предполагаемая скорость двигателя, которая может быть определена как

$$n_d = n_{x.в} i. \quad (3-22)$$

С учетом плохого охлаждения на низких скоростях при высоком диапазоне регулирования скорости расчетная мощность двигателя

$$P_d' = k P_d = 2 \cdot 0,537 = 1,074 \text{ квт}, \quad (3-23)$$

где  $k = (1,5-2)$  — коэффициент, учитывающий плохое охлаждение, который может быть найден по кривым допустимых потерь.

Принимается двигатель типа МИ-42Ф; 1,6 квт; 220 в; 9,1 а; 1500 об/мин; номинальный момент 10 н·м.

Момент трогания, приведенный к валу двигателя,

$$M_{д.тр} = \frac{52,5}{12,04 \cdot 0,885} = 5 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Двигатель по моменту трогания выбран правильно, так как

$$M_{д.тр} < M_n.$$

#### ГЛАВА 4.

### РАСЧЕТЫ, СВЯЗАННЫЕ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

#### § 4-1. Условия нагрузки, диапазон и плавность регулирования

Основными показателями регулирования скорости являются условия нагрузки, диапазон и плавность регулирования, стабильность и экономичность [Л.1, 2]. При регулировании скорости возникает необходимость выбора нового или проверки установленного электродвигателя. Одним из методов решения задачи является построение графиков зависимостей мощности, момента или тока электродвигателя на всем диапазоне регулирования. График тока, построенный для всего регулировочного цикла, дает возможность произвести экономическую оценку электропривода в целом. Регулирование скорости производится изменением напряжения на якоре или тока возбуждения двигателя.

Механические характеристики для главных приводов станков при малом моменте холостого хода  $M_c \approx \text{const}/n$ , для приводов подачи  $M_c \approx \text{const}$ . Следовательно, при регулировании скорости мощность, потребляемая механизмом главного привода, остается приблизительно постоянной  $P_c \approx \text{const}$ , потребляемая механизмом привода подачи — приблизительно пропорциональна скорости  $P_c \approx \text{const} n$ . Механические характеристики для реальных приводов станков несколько отличаются от приведенных.

Регулирование скорости электроприводов механизмов станков возможно различными способами. Регулировочные свойства электродвигателей для различных механизмов охарактеризованы в литературе [Л. 12]. С точки зрения допустимого по нагреву использования электродвигателя при различных способах регулирования и различных характеристиках нагрузки на рис.4-1 приведено графическое изображение для возможных их комбинаций в станочных приводах. Графики на рис. 4-1, а и б соответствуют условию нагрузки  $P_c = \text{const}$ , графики на рис. 4-1, в и г —  $M_c = \text{const}$ . Для обоих случаев нагрузки показано применение методов регулирования с постоянной мощностью  $P = \text{const}$  — графики на рис. 4-1, а, в и с постоянным моментом  $M = \text{const}$  — графики на рис. 4-1, б, г. Графики нагрузки показаны сплошными линиями  $M_c$ ,  $P_c$ , графики допустимых нагрузок электродвигателя — пунктирными линиями  $M$ ,  $P$ . При соответствии метода регулирования графиче-

кам нагрузки — рис. 4-1, а, г — получается полное использование электродвигателя на всем диапазоне регулирования от скорости  $n_1$  до  $n_2$ . При этом  $M = M_c$ ,  $P = P_c$ , номинальные величины для двигателя  $M_n = M_{c, \max}$ ;  $P_n = P_{c, \max}$ .

При способах регулирования, не соответствующих графикам нагрузки на рис. 4-1, б, в, получаются известные соотношения. Для графика (рис. 4-1, б) регулирования с постоянным моментом при постоянной мощности нагрузки номинальная мощность электродвигателя  $P_n = P_{\max} = P_c n_2/n_1$ , т. е. номинальная мощность получается завышенной в  $D$  (диапазон регулирования) раз по сравнению с  $P_c$ .

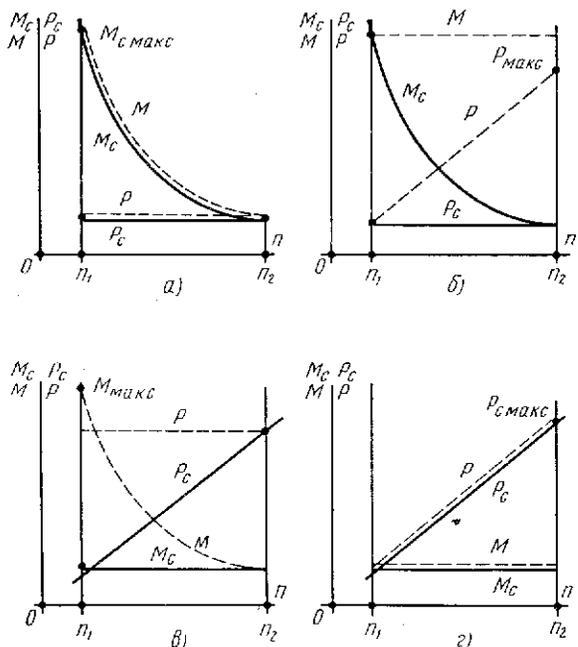


Рис. 4-1. Характеристики использования электродвигателя при различных нагрузках и способах регулирования:

$M, P$  — момент и мощность электродвигателя;  $M_c, P_c$  — момент и мощность нагрузки;  $n_1, n_2$  — минимальная и максимальная скорости привода

Электродвигатель по всему диапазону недогружен, что ухудшает экономические показатели электропривода  $\eta$  и  $\cos \varphi$ . Номинальный момент электродвигателя  $M_n$  используется полностью только в точке, соответствующей минимальной скорости  $n_1$ , где  $M_n = M_{c, \max}$ . Для графика (рис. 4-1, в) регулирования с постоянной мощностью при постоянном моменте нагрузки номинальный момент электродвигателя при минимальной скорости  $n_1$  —  $M_n = M_{c, \max} = M_c n_2/n_1$ ,

т. е. номинальный момент получается завышенным в  $D$  раз по сравнению с  $M_c$ , что увеличивает габариты двигателя. Номинальная мощность электродвигателя  $P_n$  используется полностью только в точке, соответствующей максимальной скорости  $n_2$ , где  $P_n = P_{c, \max}$ . Изменение мощности и момента нагрузки при регулировании скорости приводов станков отличается от только что рассмотренных. Главный привод станков имеет постоянную мощность только в верхней части диапазона регулирования. Использование величины такой мощности в нижней части диапазона, т. е. при низких скоростях, является нецелесообразным по причинам увеличения вращающего момента и, следовательно, увеличения габаритов передач. Малые скорости главных приводов станков предназначаются для медленных установочных перемещений или для технологических операций, требующих малых скоростей резания (обработка твердых сплавов, нарезка резьбы и т. п.), а следовательно, малой мощности. Принципиальным является наличие в диаграмме нагрузки главных приводов участка с постоянным моментом в зоне малых скоростей. Для станков с главным поступательным движением (продольно-строгальные станки и т. п.) участок с  $M_c = \text{const}$  занимает большую часть диапазона, для станков с главным вращательным движением (токарные, расточные и т. п.) — меньшую часть диапазона регулирования.

За последние годы в связи с применением уникальных тяжелых карусельных станков, благодаря наличию значительных потерь энергии в направляющих планшайбы, график постоянного момента занимает все больший диапазон скоростей в диаграмме нагрузки главного привода вращательного движения.

График нагрузки, создаваемой главным приводом современного тяжелого металлорежущего станка, приведен на рис. 4-2. Он состоит из участков  $M_c = \text{const}$ ,  $P_c = \text{const}$  и является типовым для главных приводов станков. Все рассуждения, относящиеся к рис. 4-1 применительно к оценке того или иного метода регулирования скорости, могут быть распространены на рис. 4-2. Рис. 4-2 представляет собой график двухзонного регулирования, который может быть реализован электроприводом от электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения. Современные системы регулируемых электроприводов широко используют этот электродвигатель с питанием непосредственно от сети постоянного тока или от преобразователя переменного тока в постоянный, в качестве которого для приводов станков применяются электромашинный усилитель ЭМУ, магнитный усилитель МУ, генератор Г, электронно-ионный преобразователь ЭИП, управляемый ртутный выпрямитель УРВ и за последние годы управляемый полупроводниковый вентиль (тиристор) УПВ.

С точки зрения наиболее полного использования электропривода, а следовательно, получения наилучших экономических показателей промышленной установки ( $\eta, \cos \varphi$ ) необходимо иметь на участ-

ке  $O_1-1$  регулирование с постоянным моментом, на участке  $1-O_2$  регулирование с постоянной мощностью. Применение электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения и соответствующей системы электропривода позволяет обеспечить экономичное регулирование скорости на всем диапазоне. Для этого, как известно, на участке  $O_1-1$  скорость двигателя регулируется изменением величины подаваемого на якорь напряжения, на участке  $1-O_2$  — изменением величины тока возбуждения двигателя.

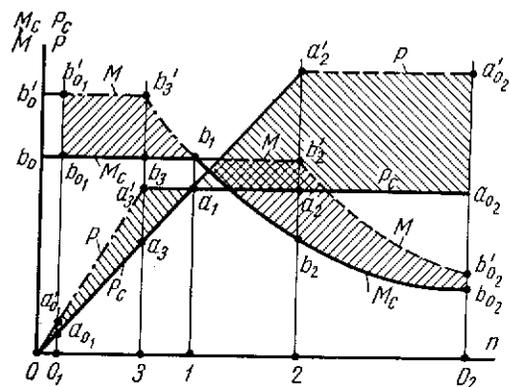


Рис. 4-2. Механическая характеристика главного привода при различных способах регулирования скорости:  
 $M, P$  — момент и мощность электродвигателя;  $M_c, P_c$  — момент и мощность нагрузки;  $n_1, n_2$  — минимальная и максимальная скорости привода

Практически не всегда удается обеспечить совпадение необходимых участков регулирования с возможностями электродвигателя и системы электропривода. Особенно это относится к участку с  $P = \text{const}$ , который у современных отечественных электродвигателей ограничивается величиной диапазона 5 : 1. В настоящее время ведутся работы по созданию электродвигателей с увеличенным диапазоном регулирования скорости изменением магнитного потока до 8 : 1, что для приводов станков является перспективным. Отсутствие возможности такого регулирования приводит к тому, что приходится применять регулирование напряжением на участке  $O_1-2$ , т. е. завышать номинальную мощность электродвигателя. Графически это представлено на рис. 4-2, где пунктиром  $a_1-a_2'$  показано построение для увеличенного участка регулирования напряжением  $O_1-2 > O_1-1$ .

Из графика видно, что при требуемой в точке 2 мощности  $P_c$  номинальная мощность электродвигателя должна быть взята равной  $P$ , причем из сравнения треугольников  $O_1a_1$  и  $O_2a_2'$  следует

$$\frac{2-a_2'}{1-a_1} = \frac{O-2}{O-1},$$

откуда

$$2-a_2' = (1-a_1) \frac{O-2}{O-1}$$

или

$$P = P_c \frac{n_2}{n_1}, \quad (4-1)$$

т. е. номинальная мощность электродвигателя должна быть больше требуемой в  $n_2/n_1$  раза, т. е. больше во столько раз, во сколько раз увеличивается диапазон регулирования с постоянным моментом (от точки 1 до точки 2).

Заштрихованные в разные стороны участки площади показывают недоиспользование двигателя: участок  $a_1a_2'a_0a_2'$  — по мощности, участок  $b_1b_2'b_0a_2'$  — по моменту. Иногда изменение положения точки 1 происходит в результате наладочных операций для конкретного привода или из-за изменения технологических условий.

Иногда нельзя использовать возможности регулируемого полям двигателя, установленного на станке, или если двигатель выбран с завышенной регулировочной способностью против требуемой, то при постоянном моменте нагрузки, превышающий который нельзя по условиям прочности станка, двигатель регулируется при постоянной мощности на участке нагрузки  $3-1$ .

Из равенства прямоугольников  $ob_0'b_3'3$  и  $ob_0b_11$  следует

$$Mn_3 = M_c n_1,$$

откуда

$$M = M_c \frac{n_1}{n_3} = M_n, \quad (4-2)$$

т. е. момент двигателя завышен во столько раз, во сколько раз увеличивается диапазон регулирования с постоянной мощностью (от точки 3 до точки 1). Заштрихованные в разные стороны участки площади показывают недоиспользование двигателя: участок  $b_{01}b_{01}'b_3'b_1$  — по моменту, участок  $a_{01}a_{01}'a_3a_1$  — по мощности.

На каждой скорости электродвигатель может работать длительно. Нагрев двигателя определяется величиной тока, следовательно на всем диапазоне регулирования двигатель не должен нагружаться током сверх номинального. Если двигатель имеет самовентиляцию, то при малых скоростях ток двигателя должен быть снижен или двигатель должен быть выбран по номинальному моменту больше, чем максимальный момент нагрузки. Таким образом загрузка двигателя током является объективным критерием оценки его использования. Возможно рассмотрение следующих случаев при регулировании скорости по графику рис. 4-2.

а. Соответствие способа регулирования графику нагрузки. На участке  $O_1-1$ :  $M = M_c = \text{const}$ . Так как поток двигателя  $\Phi =$

$= \text{const}$ , то на участке  $O_1-I$ :  $I_{0_1-1} = \text{const}$ . На участке  $I-O_2$ :  $P = P_c = \text{const}$ ; так как  $\Phi = \text{const}/n$ , то ток  $I_{1-0_2} = \text{const}$ . Для точки  $I$ :  $I_{0_1-1} = I_{1-0_2} = \text{const}$ . Следовательно, от  $n_{0_1}$  до  $n_{0_2}$   $I = \text{const} = I_n$ . Двигатель оказывается использованным по току на всем диапазоне регулирования.

б. Регулирование с постоянным моментом на участке  $I-2$  при постоянной мощности нагрузки.

Как было показано ранее на участке  $O_1-I$ :  $I_{0_1-1} = \text{const} = I_n$ .

На участке  $I-2$

$$M = k_M I_{1-2} \Phi = M_c = 9550 \frac{P_c}{n}. \quad (4-3)$$

Так как

$$\Phi = \Phi_n = \text{const} \quad \text{и} \quad P_c = \text{const},$$

то

$$I_{1-2} = \frac{M_c}{k_M \Phi_n} = \frac{9550 P_c}{k_M \Phi_n n} = \frac{A}{n}, \quad (4-4)$$

$$A = \frac{9550 P_c}{k_M \Phi_n} = \text{const}. \quad (4-5)$$

Ток  $I_{1-2}$  графически представляет собой понижающуюся гиперболу от  $I_{0_1-1} = I_n$  до  $I_2 < I_n$ . Ток  $I_2$  для точки 2 определяется из соотношения

$$M_2 = M_{0_2} = k_M \Phi_n I_2,$$

откуда

$$I_2 = \frac{9550 P_c}{k_M \Phi_n n_2},$$

где  $n_2$  — скорость, соответствующая точке 2.

На участке  $2-O_2$

$$I_{2-0_2} = \frac{9550 P_c}{k_M \Phi_n n},$$

причем, так как  $P_c = \text{const}$ , а  $\Phi = \Phi_n n_2/n_1$ , то

$$I_{2-0_2} = \frac{9550 P_c}{k_M \Phi_n n_2} = I_2 = \text{const},$$

причем  $I_2 < I_n$ . Таким образом на участках  $I-2$  и  $2-O_2$  двигатель не используется по току, который равен номинальному только на участке  $O_1-I$ .

в. Регулирование с постоянной мощностью на участке  $3-I$  при постоянном моменте нагрузки. В этом случае номинальный момент двигателя завышен и на участках  $O_1-3$  и  $3-I$  двигатель полностью не используется.

Если выбрать двигатель таким образом, что ток будет номинальным, начиная с точки  $I$ , когда  $P_c = \text{const}$ , то следует считать, что

ток до точки  $I$  меньше номинального за счет завышенного момента машины.

На участке  $O_1-3$  напряжение на двигателе изменяется от  $U_{0_1} < U_n$  до  $U_3 = U_n$ , при этом поток двигателя остается постоянным и равным номинальному  $\Phi = \Phi_n$ . Так как  $M_c = \text{const}$ , то  $M = k_M I_{0_1-3} \Phi_n < M_n$ , откуда ток  $I_{0_1-3} = \frac{M_c}{k_M \Phi_n} = \text{const}$  и меньше номинального.

В точке 3 напряжение двигателя достигает номинального значения и в дальнейшем остается постоянным. Начиная с точки 3, увеличение скорости осуществляется уменьшением потока двигателя. В точке  $b'_3$ :  $n_3 = n_n$  и  $\Phi = \Phi_n$ . Так как  $M_c < M_n$ , ток двигателя  $I_3 = I_{0_1-3} < I_n$ . По мере увеличения скорости от точки 3 до точки  $I$  поток двигателя уменьшается, ток возрастает.

Выражение для тока двигателя на участке  $3-I$  получается из соотношения

$$U_n = E + IR, \quad (4-6)$$

$$\text{где } E = k_e n \Phi \text{ — э. д. с. двигателя;} \quad (4-7)$$

$R$  — сопротивление якорной цепи;

$$\Phi = \frac{M}{k_M I}, \quad (4-8)$$

где  $M = M_c$ .

Подставляя известные значения в уравнение электрического равновесия, получаем

$$U_n = k_e n \Phi + IR = k_e n \frac{M}{k_M I} + IR = k_e n \frac{M_c}{k_M I} + IR, \quad (4-9)$$

откуда

$$I^2 - \frac{U_n}{R} I + \frac{k_e M_c}{k_M R} n = 0. \quad (4-10)$$

Получается уравнение параболы для тока относительно скорости  $n$

$$I = \frac{U_n}{2R} + \sqrt{\left(\frac{U_n}{2R}\right)^2 - \frac{k_e M_c}{k_M R} n} \quad (4-10')$$

или

$$I = A + \sqrt{A^2 - Bn}, \quad (4-10'')$$

где

$$A = \frac{U_n}{2R}; \quad B = \frac{k_e M_c}{k_M R};$$

в точке  $b_1$ :  $n > n_n$ ;  $\Phi < \Phi_n$  и  $I = I_n$ .

Таким образом, начиная с точки 3, ток изменяется от величины  $I_3 = M_c/k_M \Phi_n$  до точки  $I$ , где он становится равным номинальному току машины  $I = I_1 = I_n$ .

На участке  $1-O_2$  мощность нагрузки  $P_c$  остается постоянной и способ регулирования соответствует нагрузке. В точке  $b_1$  ток равен номинальному при скорости  $n = n_1$ . Закон изменения потока двигателя

$$\Phi = \text{const}/n. \quad (4-11)$$

Статический момент нагрузки  $M_c = \text{const}/n$  равен моменту двигателя, причем  $M = k_M I_{1-O_2} \Phi$ .

Используя приведенные соотношения, получаем

$$I_{1-O_2} = \text{const} = I_1 = I_n.$$

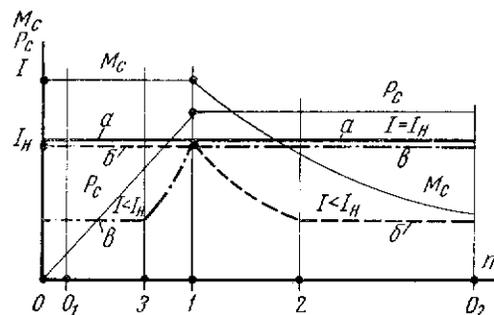


Рис. 4-3. Изменение тока электродвигателя при регулировании скорости:  
а — регулирование соответствует графику нагрузки; б — регулирование с постоянным моментом при постоянной мощности нагрузки; в — регулирование с постоянной мощностью при постоянном изменении нагрузки

Ток на участке  $1-O_2$  остается постоянным по величине и равным номинальному.

На основании приведенных расчетов по участкам построен график (рис. 4-3) для тока двигателя при различных способах регулирования скорости. Номинальный ток условно принят одинаковым для всех трех случаев.

Графики а и б на рис. 4-3 могут быть реализованы в нижней части диапазона только для электродвигателей с независимой вентиляцией. Для главных электроприводов независимая вентиляция экономически себя оправдывает. Что касается графика в, он подтверждает сказанное ранее о нецелесообразности его реализации для главных приводов в нижней части диапазона, где использование двигателя по току может быть значительным и, следовательно, весьма неэкономичным. Привод подачи имеет, как сказано ранее, приблизительно постоянный момент нагрузки на всем диапазоне регулирования скорости, который обуславливается главным образом моментом трения в направляющих и передачах механизма подачи.

Более детальное рассмотрение технологических факторов обработки металлов приводит к реальному уточненному графику момента на валу двигателя подачи в функции скорости по рис. 4-4.

Приблизительно постоянный момент сохраняется на большей части диапазона регулирования на участке  $1-2$ . В начальной части сохранить постоянство момента не удастся вследствие невозможности увеличения глубины резания при малых подачах. Этот вид графика момента, увеличивающегося с увеличением скорости подачи, весьма благоприятен для малых скоростей с точки зрения облегчения условий работы двигателя при самовентилиации. Электродвигатель автоматически разгружается в пужной части диапазона. Таким образом, на участках  $O_1-1$  и  $1-2$  единственным правильным способом регулирования является способ изменения напряжения при сохранении потока двигателя постоянным. Необходимость повышения номинального тока двигателя или устройство независимой вентиляции должны применяться в зависимости от положения точек  $b_{01}$  и  $b_1$  в каждом конкретном случае. Для небольших двигателей приводов подач устройство независимой вентиляции нельзя считать экономически целесообразным. Обычно идут по пути увеличения номинального тока и, следовательно, габаритов машины.

Участок  $2-O_2$  соответствует большой скорости подачи при большой скорости резания. Из-за ограничения допустимой мощности главного привода усилие подачи должно быть снижено, т. е. на участке  $2-O_2$  возможна только чистовая обработка. Следовательно, в верхней части диапазона возможно применение электродвигателя, скорость которого регулируется изменением потока. Это позволяет избежать увеличения габаритов электродвигателя по сравнению с тем, если бы скорость его регулировалась изменением напряжения на указанном участке.

Как видим из рассмотрения графика (рис. 4-4), электродвигатель с пезависимым возбуждением для приводов подачи может быть выбран достаточно экономично. Характеристики тока для электродвигателя подачи могут быть получены методами, аналогичными для характеристик (рис. 4-3).

В соответствии с требованиями плавности регулирования в станкостроении существуют три способа регулирования:

- ступенчатое механическое и электрическое регулирование;
- электромеханическое комбинированное регулирование;

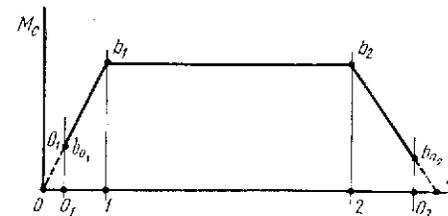


Рис. 4-4. Механическая характеристика привода подачи

в) бесступенчатое плавное механическое и электрическое регулирование.

В нижеследующих примерах проиллюстрированы имеющиеся в настоящее время способы регулирования с указанием методики расчета применительно к электроприводе станков.

Особое место принадлежит расчетам, связанным с непрерывным изменением диаметра обработки изделия при точении. В этом случае имеет место как статическая, так и динамическая нагрузка электропривода, проявляющаяся тем заметнее, чем ближе к центру изделия приближается обработка, что является специфическим для карусельных и токарно-лобовых станков. Такая псевдо-статическая нагрузка проиллюстрирована специальным примером расчета.

Следует обратить внимание на возможность чисто аналитического решения задачи при определении скорости вращения двигателя в функции времени по формуле

$$n = \frac{1000 v i}{\pi \sqrt{d_1^2 - \frac{4000 v s}{\pi} t}}, \quad (4-12)$$

где  $v$  — скорость резания,  $м/мин$ ;

$s$  — подача,  $мм/об$ ;

$i$  — передаточное отношение от планшайбы к двигателю;

$d_1$  — начальный наибольший диаметр точения,  $мм$ .

Текущее значение диаметра изделия в функции времени

$$d = \sqrt{d_1^2 - \frac{4000 s v}{\pi} t}. \quad (4-13)$$

В обеих формулах величины  $v$  и  $s$  считаются неизменными и заданными.

**1. Построить лучевую диаграмму скоростей главного привода тяжелого карусельного станка модели 1580Л.** Зависимость скорости резания  $v$  от диаметра обрабатываемого изделия  $d$  при постоянной скорости вращения  $n$  представляет собой уравнение прямой линии

$$v = (\pi n) d \quad (4-14)$$

или уравнение луча.

Кинематическая схема коробки скоростей приведена на рис. 4-5, где 1 — электродвигатель, 2 — планшайба. Число скоростей коробки  $y = 4$ .

Запишем передаточные отношения:

$$\begin{aligned} \text{1-я скорость } i_1 &= \frac{z_{14}}{z_{13}} \cdot \frac{z_{12}}{z_{11}} \cdot \frac{z_{10}}{z_9} \cdot \frac{z_7}{z_6} \cdot \frac{z_6}{z_4} \cdot \frac{z_2}{z_1} = \\ &= \frac{420}{35} \cdot \frac{71}{20} \cdot \frac{72}{34} \cdot \frac{72}{24} \cdot \frac{57}{37} \cdot \frac{57}{18} = 1320; \end{aligned}$$

$$\text{2-я скорость } i_2 = \frac{z_{14}}{z_{13}} \cdot \frac{z_{12}}{z_{11}} \cdot \frac{z_{10}}{z_9} \cdot \frac{z_7}{z_6} \cdot \frac{z_3}{z_1} =$$

$$= \frac{420}{35} \cdot \frac{71}{20} \cdot \frac{72}{34} \cdot \frac{72}{24} \cdot \frac{37}{18} = 555;$$

$$\begin{aligned} \text{3-я скорость } i_3 &= \frac{z_{14}}{z_{13}} \cdot \frac{z_{12}}{z_{11}} \cdot \frac{z_8}{z_6} \cdot \frac{z_5}{z_4} \cdot \frac{z_2}{z_1} = \\ &= \frac{420}{35} \cdot \frac{71}{20} \cdot \frac{18}{24} \cdot \frac{57}{37} \cdot \frac{57}{18} = 156; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{4-я скорость } i_4 &= \frac{z_{14}}{z_{13}} \cdot \frac{z_{12}}{z_{11}} \cdot \frac{z_8}{z_6} \cdot \frac{z_3}{z_1} = \\ &= \frac{420}{35} \cdot \frac{71}{20} \cdot \frac{18}{24} \cdot \frac{37}{18} = 65,5. \end{aligned}$$

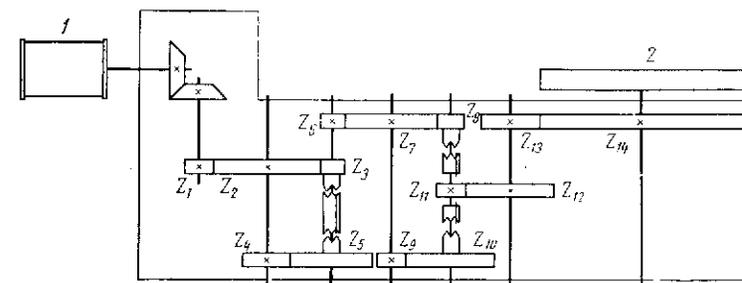


Рис. 4-5. Кинематическая схема коробки скоростей карусельного станка модели 1580Л

Число оборотов электродвигателя  $300 - 1200 \text{ об/мин}$ ,  $n_{\text{мин}} = 300 \text{ об/мин}$ .

Диапазон механического ступенчатого регулирования

$$D_{\text{мех}} = \frac{n_4}{n_1} = \frac{i_1}{i_4} = \frac{1320}{65,5} = 20,2.$$

Коэффициент плавности механического регулирования

$$\varphi_{\text{мех}} = \sqrt{y-1} \sqrt{D_{\text{мех}}} = \sqrt{4-1} \sqrt{20,2} = 2,72.$$

Минимальная скорость вращения планшайбы

$$n_1 = n_{\text{мин}} : i_1 = 300 : 1320 = 0,227 \text{ об/мин}.$$

Следующие скорости вращения планшайбы:

$$n_2 = n_1 \varphi_{\text{мех}} = 0,227 \cdot 2,72 = 0,618 \text{ об/мин};$$

$$n_3 = n_2 \varphi_{\text{мех}} = 0,618 \cdot 2,72 = 1,68 \text{ об/мин};$$

$$n_4 = n_3 \varphi_{\text{мех}} = 1,68 \cdot 2,72 = 4,58 \text{ об/мин}.$$

Наибольший диаметр изделия  $d_1 = 8$  м.  
Скорость резания на первой ступени

$$v_1 = \pi d_1 n_1 = 3,14 \cdot 8 \cdot 0,227 = 5,7 \text{ м/мин.}$$

Диаметры, соответствующие переключению скоростей, определяются по общей формуле

$$d_k = d_{k-1} \cdot \frac{n_{k-1}}{n_k} = d_{k-1} \cdot \frac{1}{\varphi_{\text{мех}}}, \quad (4-15)$$

где  $k$  — номер последующей ступени скорости.

Для остальных ступеней, начиная с первой ( $k = 2$ ).

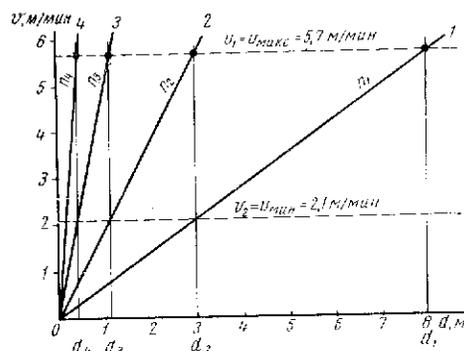


Рис. 4-6. Лучевая диаграмма коробки скоростей

$$d_2 = d_1 \frac{n_1}{n_2} = d_1 \frac{1}{\varphi_{\text{мех}}} = 8 \frac{1}{2,72} = 2,94 \text{ м;}$$

$$d_3 = d_2 \frac{n_2}{n_3} = d_2 \frac{1}{\varphi_{\text{мех}}} = 2,94 \frac{1}{2,72} = 1,08 \text{ м;}$$

$$d_4 = d_3 \frac{n_3}{n_4} = d_3 \frac{1}{\varphi_{\text{мех}}} = 1,08 \frac{1}{2,72} = 0,4 \text{ м.}$$

Минимальная скорость резания

$$v_2 = v_1 \frac{d_k}{d_{k-1}} = v_1 \frac{n_{k-1}}{n_k} = v_1 \frac{1}{\varphi_{\text{мех}}} = 5,7 \frac{1}{2,72} = 2,1 \text{ м/мин.}$$

По полученным данным  $v_1$ ,  $v_2$  и диаметрам  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ,  $d_4$  при скоростях вращения  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$  строим лучевую диаграмму, приведенную на рис. 4-6.

Между ступенями  $y$  регулирования скорости двигателя производится ослабление магнитного потока с диапазоном  $D_{\varphi} = 1200 : 300 = 4$ .

Общий диапазон регулирования главного привода

$$D = D_{\text{мех}} D_{\varphi} = 20 \cdot 4 = 80.$$

2. Выбрать число механических ступеней при регулировании скорости станка.

Число механических ступеней

$$y = \frac{\lg(D\varphi)}{\lg(D_{\text{эл}}\varphi)}, \quad (4-16)$$

где  $D$  — общий диапазон регулирования скорости;

$D_{\text{эл}}$  — диапазон только электрического регулирования;

$\varphi$  — коэффициент плавности регулирования.

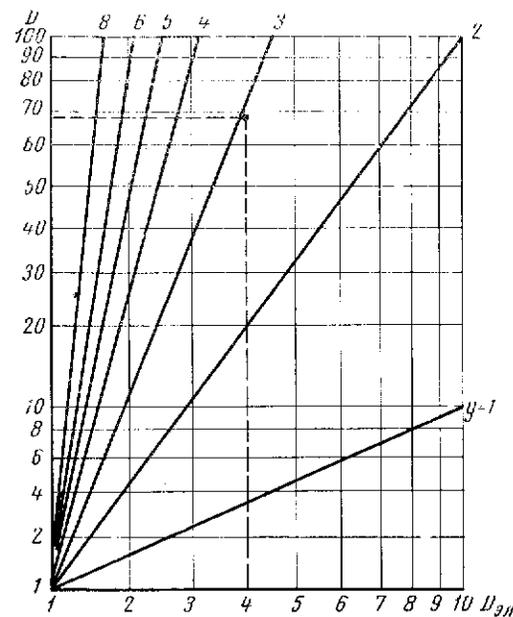


Рис. 4-7. Диаграмма к выбору числа ступеней коробки скоростей

При комбинированном регулировании коэффициент  $\varphi$  выбирается как угодно близким к единице (практически бесступенчатое регулирование).

Принимая  $\varphi \approx 1$ , получаем для числа ступеней  $y$  простейшее соотношение

$$y = \frac{\lg D}{\lg D_{\text{эл}}}. \quad (4-16')$$

В логарифмической системе координат для заданного количества ступеней  $y$  зависимость  $D$  и  $D_{эл}$  аналогична лучевой диаграмме (см. 4-1-1), что показано на рис. 4-7.

Применительно к тяжелому токарному станку модели 1660 электромеханическое регулирование обеспечивает диапазон  $D = (60-70) : 1$ .

Использование рис. 4-7 дает возможность при диапазоне электрического регулирования 4 : 1 найти число ступеней, равное трем ( $y = 3$ ), что и приведено на рисунке.

**3. Рассчитать зависимости момента и тока главного двигателя продольно-строгольного станка модели 724А в зависимости от скорости движения стола при двухзонном регулировании скорости.** Электрический двигатель главного привода типа П112; 70 квт; 220 в; 353 а; 600 об/мин;  $c_e = 0,35$  в/об/мин;  $c_m = 9,55 \cdot c_e = 3,34$  н·м/а. Передаточное отношение редуктора от двигателя к столу  $\rho = 20$  об/м.

Скорость стола регулируется напряжением генератора  $U_r$  в пределах скоростей  $v_{пр} = 6-30$  м/мин и магнитным потоком двигателя  $\Phi_d$  в пределах скоростей  $v_{пр} = 30-60$  м/мин. Заданная характеристика  $F_z = f(v_{пр})$  приведена на рис. 4-8. Остальные данные взяты из расчета (3-2-2).

Расчетные формулы статического режима главного электропривода станка.

Мощность на валу двигателя по (3-5)

$$P_d = \frac{F_{тяг} v_{пр}}{60 \cdot 1000 \eta_{пер}}, \text{ квт},$$

где  $F_{тяг}$  — тяговое усилие на реечной шестерне стола станка с учетом потерь в направляющих, подсчитывается по (3-4).

Скорость вращения двигателя

$$n_d = \rho v_{пр} = 20 v_{пр}, \text{ об/мин}. \quad (4-17)$$

Момент двигателя

$$M_d = 9550 \frac{P_d}{n_d}, \text{ н} \cdot \text{м}. \quad (4-18)$$

Электромагнитный момент двигателя

$$M_{эм} = M_d + M_0, \quad (4-19)$$

где  $M_0 = 65$  н·м — момент потерь холостого хода двигателя, определенный по (3-10) в примере (3-2-3).

Ток электродвигателя:

а) при регулировании скорости напряжением генератора

$$I_d = \frac{M_{эм}}{c_m}; \quad (4-20)$$

б) при регулировании скорости магнитным потоком двигателя

$$I_d = \frac{M_{эм}}{c_{м.н}} \frac{n_d}{n_{д.н}}, \quad (4-20')$$

где  $c_{м.н}$  — коэффициент момента при номинальном магнитном потоке. Результаты расчета сведены в табл. 4-1.

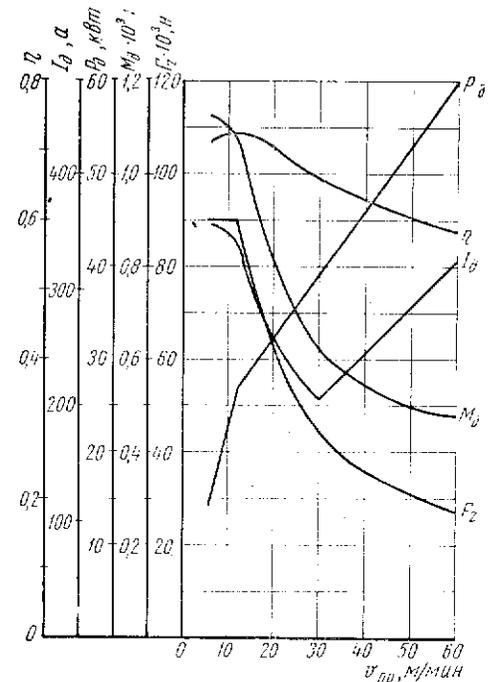


Рис. 4-8. Зависимости параметров главного привода от скорости стола продольно-строгольного станка

Таблица 4-1

Параметры	$v_{пр}, \text{ м/мин}$							
	6	10	12	20	30	40	50	60
$F_z \cdot 10^3, \text{ н}$	90	90	90	61,8	43	35,8	30,8	26,7
$F_{тяг} \cdot 10^3, \text{ н}$	99	99	99	70,6	51,5	44	38,8	34,7
$\eta$	0,71	0,72	0,74	0,7	0,66	0,64	0,61	0,58
$P_d, \text{ квт}$	14	23	26,8	33,6	39,0	45,8	53	59,8
$n_d, \text{ об/мин}$	120	200	240	400	600	800	1000	1200
$M_d, \text{ н} \cdot \text{м}$	1115	1100	1070	800	620	546	506	475
$M_{эм}, \text{ н} \cdot \text{м}$	1180	1165	1135	865	685	611	571	540
$I_d, \text{ а}$	354	350	341	259	205	244	284	324

По данным таблицы на рис. 4-8 построены графики  $\eta, P_d, M_d, I_d$  в зависимости от скорости движения стола.

4. Рассчитать характеристики процесса, имеющего место при торцевой обработке деталей на карусельном станке 1580Л при постоянной скорости резания. На станке обрабатывается стальная деталь резцом из быстрорежущей стали Р-9 со скоростью резания  $v = 9 \text{ м/мин}$ . Мощность резания при этом равна  $P_z = 21 \text{ кВт}$ , потери мощности в направляющих станка  $\Delta P_{\text{напр}} = 5,6 \text{ кВт}$ , потери мощности в коробке скоростей  $\Delta P_{\text{к.с}} = 7 \text{ кВт}$ .

Начальный и конечный диаметры обработки торца равны  $d_{\text{макс}} = 8 \text{ м}$ ,  $d_{\text{мин}} = 1 \text{ м}$ . К. п. д. станка  $\eta_{\text{ст}} = 0,88$ , передаточное отношение от планшайбы к валу двигателя  $i_{\text{ст}} = 521$ . Двигатель типа П133-4К; 100 кВт; 440 в; 254 а; 300—1500 об/мин;  $J_d = 20,5 \text{ кгм}^2$ .

Момент инерции планшайбы с деталью, приведенный к валу двигателя,

$$J_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}} + m_{\text{дет}}}{i_{\text{ст}}^2} \frac{r^2}{2} = \frac{(70,3 + 80) 10^3}{521^2} \frac{4^2}{2} = 4,45 \text{ кгм}^2.$$

Момент инерции коробки скоростей, приведенный к валу двигателя,

$$J_{\text{к.с}} = 0,1 J_d = 0,1 \cdot 20,5 = 2,05 \text{ кгм}^2.$$

Общий момент инерции, приведенный к валу двигателя,

$$J = J_{\text{л}} + J_{\text{к.с}} + J_{\text{п}} = 20,5 + 2,05 + 4,45 = 27 \text{ кгм}^2.$$

При обработке скорость двигателя регулируется изменением напряжения на якоре от  $U_{\text{мин}}$  до  $U_{\text{ном}}$  (при изменении  $d$  до 4 м) с последующим ослаблением магнитного потока.

Расчет производится по следующим формулам.

Время обработки

$$t = \frac{\pi}{v_s} (r_1^2 - r_2^2) = \frac{3,14}{9 \cdot 3,2 \cdot 10^{-3}} \frac{d_1^2 - d_2^2}{4} = 27,25 (d_1^2 - d_2^2), \text{ мин.} \quad (4-21)$$

Скорость двигателя

$$n_d = \frac{v i_{\text{ст}}}{\pi d} = \frac{9 \cdot 521}{3,14 \cdot d} = \frac{1490}{d}, \text{ об/мин.} \quad (4-22)$$

Статический момент нагрузки

$$M_c = \frac{9550}{n_d} \frac{P_z + \Delta P_{\text{напр}} + \Delta P_{\text{к.с}}}{\eta_{\text{ст}}} = \frac{9550 (21 + 5,6 + 7)}{n_d 0,88} = \frac{364 \cdot 10^3}{n_d}, \text{ н} \cdot \text{м.} \quad (4-23)$$

Динамический момент двигателя

$$M_{\text{дин}} = \frac{J}{9,55} \frac{dn_d}{dt} = \frac{27}{9,55} \frac{dn_d}{dt} \approx 2,83 \frac{\Delta n_d}{\Delta t}, \text{ н} \cdot \text{м.} \quad (4-24)$$

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем,

$$M_{\text{эм}} = M_c + M_{\text{дин}} + M_0, \quad (4-25)$$

где  $M_0$  — момент холостого хода двигателя, равный

$$M_0 = M_{\text{эм. н}} - M_{\text{н}} = c_m I_{\text{н}} - \frac{9550 P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = 12,86 \cdot 254 - \frac{9550 \cdot 100}{300} = 83 \text{ н} \cdot \text{м.}$$

Ток якоря двигателя по (4-20) и (4-20'):

а) при  $\Phi = \text{const}$   $I_{\text{я}} = \frac{M_{\text{эм}}}{c_m}$ ;

б) при  $\Phi = \text{var}$   $I_{\text{я}} = \frac{M_{\text{эм}}}{k_{\text{м}} \Phi} = \frac{M_{\text{эм}}}{c_{\text{м. н}} \frac{n_{\text{п}}}{n_d}}$ ,

где  $c_{\text{м. н}} = 12,86 \text{ н} \cdot \text{м/а}$ .

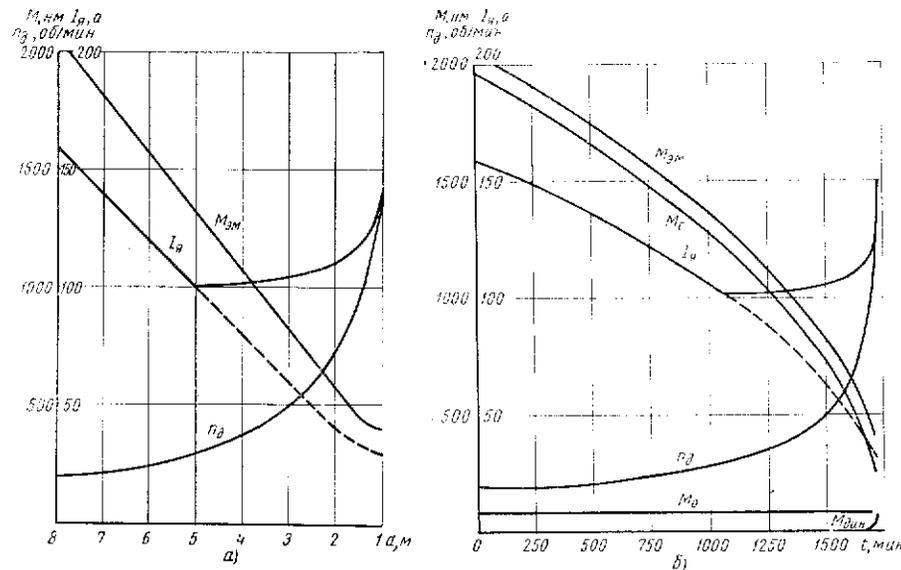


Рис. 4-9. Характеристики главного привода карусельного станка: а — в зависимости от диаметра; б — в зависимости от времени

Результаты расчетов приведены в табл. 4-2. Характеристики электропривода  $M_{эм}$ ,  $n_d$ ,  $I_a$  при различных способах регулирования приведены на рис. 4-9, а, б.

Таблица 4-2

Параметр	$d, м$	$t, мин$	$\Delta t, мин$	$n_d, об/мин$	$\Delta n_d, об/мин$	$M_c, н.ж$	$M_{дин}, н.ж$	$M_{эм}, н.ж$	$\frac{n_n}{n_d}$	$I_a, а$	$I_a$ при $\Phi = \cos \alpha$
$U = var$	8	0	0	186	0	1954	0	2037	—	158,4	158,4
	7	409	409	213	27	1710	0,18	1793,18	—	139,4	139,4
	6	763	354	248	35	1466	0,28	1549,28	—	120,5	120,5
	4,97	1072	309	300	52	1213	0,47	1296,47	—	100,8	100,8
$\Phi = var$	4	1308	236	372	72	977	0,87	1060,87	0,805	102,4	82,5
	3	1499	191	497	125	733	1,85	817,85	0,604	105,3	63,6
	2	1635	136	745	248	489	5,16	577,16	0,403	111,4	44,8
	1,5	1683	48	993	248	366	14,74	463,74	0,302	119,5	36,1
	1,2	1705	22	1242	249	293	31,84	407,84	0,242	131,3	31,7
	1,1	1711	6	1354	112	269	51,0	403,0	0,222	141,4	31,3
	1,1	1711	6	1354	112	269	51,0	403,0	0,222	141,4	31,3
	1,0	1716	5,7	1490	136	244	67,0	394,0	0,201	152,3	30,7

### § 4-2. Стабильность и коэффициент усиления системы

В системах электроприводов металлорежущих станков большую роль играет стабильность поддержания скорости при регулировании. Стабильность определяется изменением скорости при изменении нагрузки в ограниченных пределах и зависит от жесткости характеристики двигателя в системе. Изменение скорости в свою очередь определяется диапазоном регулирования и коэффициентом усиления системы. Далее приводятся коэффициенты усиления преобразователя  $K_n$  в зависимости от относительного изменения скорости  $\delta$  и диапазона регулирования скорости  $D$  для различных видов обратных связей в замкнутой системе автоматического управления электропривода станка.

За относительное изменение скорости принимается

$$\delta = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0}, \quad (4-26)$$

где  $n_0$  — скорость идеального холостого хода;  
 $n_n$  — скорость при номинальной нагрузке;  
 $\Delta n$  — падение скорости при номинальной нагрузке.

Обобщенная схема приведена на рис. 4-10. Расчет производится для системы П—Д (преобразователь — двигатель) при наличии обратных связей по скорости, напряжению и току в статическом режиме.

Система автоматического управления должна обеспечить регулирование скорости двигателя изменением напряжения на якоре в диапазоне  $D$ .

Падение скорости двигателя при изменении нагрузки от нуля до номинальной для станков не должно превышать 5—10% ( $\delta = 0,05—0,1$ ) от скорости идеального холостого хода на всем диапазоне регулирования.

Характеристики системы в требуемом диапазоне регулирования приведены на рис. 4-11, где  $n_1 = n_n$  — на характеристике 1,  $n_2 = n_n/D$  — на характеристике 2 при номинальной нагрузке.

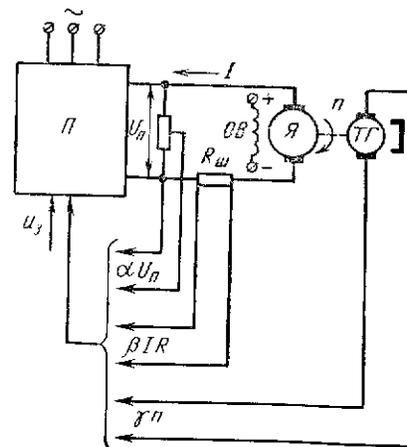


Рис. 4-10. Система автоматического управления с двигателем постоянного тока

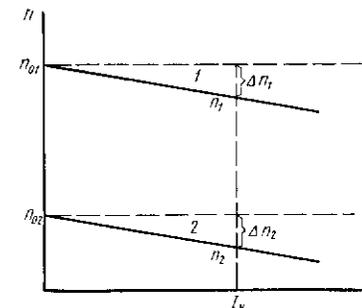


Рис. 4-11. Статические характеристики: 1 — наибольшая скорость; 2 — наименьшая скорость

Система автоматического управления с обратной отрицательной связью по скорости.

Система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_s - \gamma n &= U_y; \\ U_y K_n &= E_n; \\ E_n &= \frac{n}{K_d} + IR. \end{aligned} \right\} \quad (4-27)$$

Уравнение скоростной характеристики

$$n = n_0 - \Delta n = \frac{U_s K_d K_n}{1 + \gamma K_d K_n} - \frac{IR K_d}{1 + \gamma K_d K_n}. \quad (4-28)$$

Здесь  $E_n$  — э. д. с. преобразователя;  
 $U_s$  — задающее напряжение САУ;  
 $I$  — ток якоря двигателя;  
 $K_n$  — коэффициент усиления преобразователя;  
 $K_d$  — коэффициент передачи двигателя;  
 $R$  — сопротивление якорной цепи «преобразователь — двигатель»;  
 $\gamma$  — коэффициент обратной связи по скорости.

Коэффициент усиления преобразователя определяется из выражения  $\Delta n$  (4-28) по нижней характеристике двигателя (характеристика 2 рис. 4-11) исходя из  $\Delta n_2$ , равного

$$\Delta n_2 = \delta n_{02} = \delta \frac{n_{01}}{D} = \frac{n_n}{D} \frac{\delta}{1-\delta}, \quad (4-29)$$

где  $n_n$  — номинальная скорость двигателя.  
 Тогда коэффициент усиления преобразователя

$$K_n = \frac{1}{\gamma K_d} \left( \frac{I_n R K_d}{\frac{n_n}{D} \frac{\delta}{1-\delta}} - 1 \right) = \frac{1}{\gamma K_d} \left( \frac{\Delta n_{\text{раз}}}{\Delta n_{\text{треб}}} - 1 \right), \quad (4-30)$$

где  $\Delta n_{\text{раз}}$  — падение скорости двигателя при номинальной нагрузке в разомкнутой САУ;

$\Delta n_{\text{треб}} = \Delta n_2$  — требуемое падение скорости при номинальной нагрузке на минимальной скорости.

Если в выражении (4-30) принять  $K_n \leq 0$ , то получается условие, указывающее на отсутствие необходимости применять замкнутую САУ, а именно

$$\frac{I_n R K_d}{\frac{n_n}{D} \frac{\delta}{1-\delta}} = \frac{\Delta n_{\text{раз}}}{\Delta n_{\text{треб}}} \leq 1. \quad (4-31)$$

Система автоматического управления с обратной отрицательной связью по напряжению.

Система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_s - \alpha (E_n - IR) &= U_y; \\ U_y K_n &= E_n; \\ E_n &= \frac{n}{K_d} + IR. \end{aligned} \right\} \quad (4-32)$$

Уравнение скоростной характеристики

$$n = \frac{U_s K_d K_n}{1 + \alpha K_n} - \frac{IR K_d \left( 1 + \alpha K_n \frac{R}{R} \right)}{1 + \alpha K_n}, \quad (4-33)$$

где  $R_n$  — сопротивление преобразователя;  
 $R_d$  — сопротивление двигателя;  
 $\alpha$  — коэффициент обратной связи по напряжению.  
 Коэффициент усиления преобразователя

$$K_n = \frac{1}{\alpha} \frac{\frac{I_n R K_d}{\frac{n_n}{D} \frac{\delta}{1-\delta}} - 1}{1 - \frac{I_n K_d K_n}{\frac{n_n}{D} \frac{\delta}{1-\delta}}} = \frac{1}{\alpha} \frac{\frac{\Delta n_{\text{раз}}}{\Delta n_{\text{треб}}} - 1}{1 - \frac{n_{\text{ест}}}{\Delta n_{\text{треб}}}}, \quad (4-43)$$

где  $\Delta n_{\text{ест}}$  — падение скорости на естественной характеристике двигателя при номинальной нагрузке.

Из выражения (4-34) вытекают два условия: во-первых, сохраняется условие (4-31), указывающее на отсутствие необходимости применять замкнутую САУ, во-вторых, величина  $K_n$  может также получиться отрицательной, если соблюдается другое условие

$$\frac{I_n R_d K_d}{\frac{n_n}{D} \frac{\delta}{1-\delta}} = \frac{\Delta n_{\text{ест}}}{\Delta n_{\text{треб}}} > 1. \quad (4-35)$$

При этом  $K_n$  теряет физический смысл, так как это условие указывает на неспособность обратной отрицательной связи по напряжению обеспечить заданный диапазон САУ П—Д и относительное падение скорости  $\delta$ . Следовательно, в замкнутой САУ П—Д с обратной отрицательной связью по напряжению коэффициент усиления преобразователя имеет физический смысл только при следующих значениях диапазона регулирования скорости:

$$\frac{\frac{n_n}{D} \frac{\delta}{1-\delta}}{I_n R K_d} \leq D \leq \frac{n_n}{I_n R_d K_d} \frac{\delta}{1-\delta}. \quad (4-36)$$

Система автоматического управления с обратной положительной связью по току.

Система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_s + \beta IR \frac{k_w}{k_r} &= U_y; \\ U_y K_n &= E_n; \\ E_n &= \frac{n}{K_d} + IR. \end{aligned} \right\} \quad (4-37)$$

Уравнение скоростной характеристики

$$n = U_s K_d K_n - IR K_d \left( 1 - K_n \beta \frac{k_w}{k_r} \right), \quad (4-38)$$

где  $\beta = \frac{R_{ш}}{R}$  — коэффициент обратной связи по току;  
 $k_w, k_r$  — коэффициенты приведения по виткам и сопротивлениям;  
 $R_{ш}$  — сопротивление шунта в цепи якоря.  
 Коэффициент усиления преобразователя

$$K_n = \frac{1}{\beta \frac{k_w}{k_r}} \left( 1 - \frac{n_{ш}}{D} \frac{\delta}{1-\delta} \right) = \frac{1}{\beta \frac{k_w}{k_r}} \left( 1 - \frac{\Delta n_{греб}}{\Delta n_{раз}} \right). \quad (4-39)$$

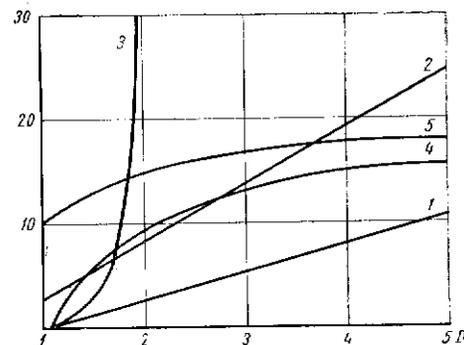


Рис. 4-12. Зависимости коэффициента усиления преобразователя от диапазона регулирования при различных обратных связях

Из выражения (4-39) видно, что сохраняется условие (4-31). Кроме этого, видно, что при повышении диапазона регулирования коэффициент усиления преобразователя стремится к постоянной величине, равной

$$K_n = \frac{1}{\beta \frac{k_w}{k_r}}. \quad (4-39')$$

1. Для системы управления П—Д с обратной отрицательной связью по скорости определить коэффициент усиления преобразователя  $K_n$  при  $\delta = 0,1$  и  $\delta = 0,05$  в зависимости от диапазона регулирования. Двигатель типа П91; 55 квт; 283 а; 1500 об/мин; 220 в;  $R_{\lambda 75^\circ} = 0,04$  ом;  $K_n = 7,2$  об/мин/в.

Генератор типа П92; 70 квт;  $R_{\Gamma 75^\circ} = 0,038$  ом.

Сопротивление якорной цепи  $R = R_{\lambda} + R_{\Gamma} = 0,078$  ом.

Коэффициент обратной связи по скорости принимается равным  $\gamma = 0,5$  в/об/мин.

Уравнение (4-30) получает следующий вид:

$$\text{при } \delta = 0,1 \quad K_n = \frac{1}{0,36} (0,95 D - 1); \quad (4-30')$$

$$\text{при } \delta = 0,05 \quad K_n = \frac{1}{0,36} (2D - 1). \quad (4-30'')$$

При  $\delta = 0,1$  коэффициент усиления для данной замкнутой САУ имеет физический смысл, начиная с  $D = 1,05$ .

Построенные по (4-30') и (4-30'') графики 1 и 2 приведены на рис. 4-12.

2. Для системы регулирования П—Д с обратной отрицательной связью по напряжению определить коэффициент усиления преобразователя  $K_n$  при  $\delta = 0,1$  и  $\delta = 0,05$ . Двигатель и генератор приняты по 4—2—1. Для коэффициента обратной связи принимается значение  $\alpha = 0,5$ . Согласно условию (4-36), диапазон регулирования скорости равен:

$$\text{при } \delta = 0,1 \quad 1,05 \leq D \leq 2,05;$$

$$\text{при } \delta = 0,05 \quad 0,5 \leq D \leq 0,97.$$

Следовательно, коэффициент усиления преобразователя имеет физический смысл только при  $\delta = 0,1$ . Расчет  $K_n$  производится по уравнению (4-34), которое при  $\delta = 0,1$  получает следующий вид

$$K_n = \frac{1}{0,5} \frac{0,95 D - 1}{1 - 0,487 D}. \quad (4-34')$$

Результаты расчета  $K_n$  приведены в табл. 4-3 и на рис. 4-12 (график 3).

Таблица 4-3

$D$	1,05	1,25	1,5	1,75	2	2,05
$K_n$	0	0,98	3,15	8,9	72	$\infty$

Относительное падение скорости, равное  $\delta = 0,05$ , принятая САУ с обратной связью по напряжению обеспечить не может даже на высокой скорости ( $D=1$ ).

3. Для системы регулирования П—Д с обратной положительной связью по току определить коэффициент усиления преобразователя  $K_n$  при  $\delta = 0,1$  и  $\delta = 0,05$ . Двигатель и генератор приняты по 1—2—1. Коэффициент обратной связи принимается равным  $\beta = 0,01$  и коэффициент приведения  $\frac{k_w}{k_r} = 5$ .

Уравнение (4-39) получает вид:

$$\text{при } \delta = 0,1 \quad K_n = 20 \left( 1 - \frac{1,05}{D} \right); \quad (4-39'')$$

при  $\delta = 0,05$   $K_n = 10 \left( 2 - \frac{1}{D} \right)$ . (4-39'')

Построенные по зависимостям (4-39'') и (4-39''') графики 4 и 5 приведены на рис. 4-12.

**§ 4-3. Экономичность и технико-экономические показатели при регулировании скорости**

Перечисленные в § 4-1 и 4-2 показатели регулируемого привода являются основными техническими величинами. Показателем, которым следует руководствоваться при окончательном выборе рабочего варианта, является экономичность системы электропривода. Экономичность в свою очередь характеризуется продолжительностью цикла обработки или производительностью установки, коэффициентом ее полезного действия или потерей электроэнергии и, наконец, суммой затрат, включающей в себя капитальные

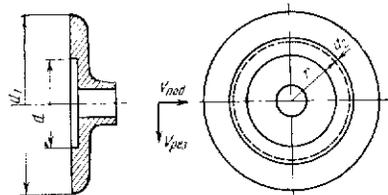


Рис. 4-13. Эскиз детали

затраты и эксплуатационные расходы. При некоторых обстоятельствах критерием производительности станка может служить величина машинного времени. Для этого машинное время должно быть достаточно большим по сравнению с общим временем цикла обработки. В свою очередь машинное время для обработки одной и той же детали зависит от способа регулирования скорости привода станка. Применение того или другого способа регулирования скорости с точки зрения экономичности проиллюстрировано рядом примеров настоящего параграфа.

**1. Определить машинное время при черновой обработке торца чугунной детали, изображенной на рис 4-13.** Обработка производится резцом из быстрорежущей стали ЭИ262 с подачей  $z = 1$  мм/об. изделия и скоростью резания  $v = 15,8^* м/мин$ .

Принимаются следующие варианты регулирования скорости:

- а) нерегулируемый асинхронный двигатель с к. з. ротором. Число оборотов шпинделя  $n_{ш} = const$ ;
  - б) четырехскоростной асинхронный двигатель с к. з. ротором с синхронным числом оборотов:  $n_d = 500/750/1000/1500$  об/мин;
  - в) плавное бесступенчатое регулирование  $n_{ш} = var$ .
- Подсчитывается машинное время для каждого варианта:
- а) нерегулируемый двигатель.
- Скорость вращения шпинделя из (1-1)

$$n_{ш} = \frac{1000 \cdot 15,8}{3,14 \cdot 2000} = 2,5 \text{ об/мин.}$$

Машинное время по (1-15)

$$t_{\text{маш. а)}} = \frac{875}{2,5 \cdot 1} = 350 \text{ мин,}$$

где длина обработки

$$L = \frac{d_1 - d}{2} = \frac{2000 - 250}{2} = 875 \text{ мм}$$

б) четырехскоростной двигатель.

Необходимо определить моменты переключения двигателя с одной скорости на другую. С уменьшением диаметра обработки скорость вращения должна возрастать, чтобы сохранять  $v = const$ . Начало обработки соответствует условиям: диаметр  $d_1 = 2000$  мм, скорость двигателя  $n_{д1} = 500$  об/мин, скорость шпинделя  $n_{ш} = 2,5$  об/мин. Скорости шпинделя, на которых будет производиться обработка, определяются пропорционально скоростям двигателя.

Диаметры изделия, при которых необходимо производить переключения, определяются исходя из выражения

$$v_{\text{макс}} = \pi d_1 n_{ш1} = \pi d_2 n_{ш2} = \pi d_3 n_{ш3} = \pi d_4 n_{ш4} = const.$$

Результаты расчетов  $n_{ш}$  и  $d$  приведены в табл. 4-4.

Лучевая диаграмма скоростей приведена на рис. 4-14, где 1, 2, 3, 4 — ступени регулирования скорости. Распределение скорости и диаметров получилось неравномерным, так как скорости четырехскоростного двигателя не составляют геометрический ряд

$$\varphi_1 = \frac{1500}{1000} = 1,5; \quad \varphi_2 = \frac{1000}{750} = 1,33; \quad \varphi_3 = \frac{750}{500} = 1,5.$$

Машинное время на каждой ступени определено по формуле (1-15) и приведено в табл. 4-4.

Таблица 4-4

Ступень	$d_{\text{нач.}}$ мм	$d_{\text{кон.}}$ мм	$L$ , мм	$n_{\text{д.}}$ об/мин	$n_{\text{ш.}}$ об/мин	$t_{\text{маш. б)}$ , мин
1	2000	1330	335	500	2,5	134
2	1330	1000	165	750	3,75	44
3	1000	666	167	1000	5,0	33,4
4	666	250	208	1500	7,5	27,8

Итого  $t_{\text{маш. б)}} = 239,2$

В этом случае резание идет в среднем с большей скоростью, нежели в случае  $n_{ш} = \text{const}$ ;

в) плавное регулирование скорости  $n_{ш} = \text{var}$ .

Скорость подачи показана на рис. 4-13.

$$v_{\text{под}} = n_{ш} S = \frac{dr}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dd}{dt}$$

Подставляя вместо  $n_{ш}$  его значение  $n_{ш} = v_{\text{макс}}/\pi d$  и разделяя переменные, получаем

$$dt = \frac{\pi d}{2sv_{\text{макс}}} dd$$

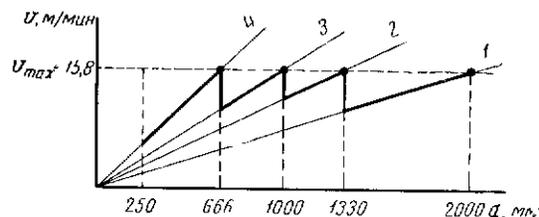


Рис. 4-14. Лучевая диаграмма при ступенчатом регулировании скорости

Машинное время

$$t_{\text{маш}} = \int_d^{d_1} \frac{\pi d}{2sv_{\text{макс}}} dd = \frac{\pi d}{4sv_{\text{макс}}} \Big|_d^{d_1} = \frac{\pi}{4sv_{\text{макс}}} (d^2 - d_1^2) \quad (4-13')$$

$$t_{\text{маш. в}} = \frac{3,14}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 15,8} (2^2 - 0,25^2) = 196 \text{ мин.}$$

В заключение производится сравнение рассматриваемых вариантов привода по машинному времени. Результаты расчета сведены в табл. 4-5.

Таблица 4-5

Вариант регулирования скорости	Машинное время $t_{\text{маш}}, \text{мин}$	В процентном отношении к варианту «а»	Выигрыш времени, %
а	350	100	—
б	239	68	32
в	196	56	44

Преимуществом регулируемого привода является значительный выигрыш времени, но при этом система электропривода получается значительно сложнее (варианты б и в).

2. Произвести технико-экономическое сравнение способов регулирования скорости главного электропривода токарного станка. Рассматриваются два способа электрического регулирования скорости двигателя в системе Г—Д:

а) изменение напряжения на якоре  $U$  и магнитного потока двигателя  $\Phi$ ;

б) изменение только магнитного потока двигателя  $\Phi$  при неизменном напряжении на якоре.

Таблица 4-6

Способ регулирования скорости	Наименование электрооборудования	Тип оборудования	Вес, кг	Стоимость, руб.	Потери электроэнергии, кВт
а) $\Phi = \text{var}$ $U = \text{var}$	Двигатель	ПН-1750; 165 кВт; 220 в; 820 а; 970—1250 об/мин; к. п. д. 92%	21 600	1700	14,4
	Генератор	П104-1; 200 кВт; 230 в; 870 а; 1000 об/мин; к. п. д. 91%	20 900	2100	19,8
	Возбудитель	ПН-100; 13,5 кВт; 230 в; 970 об/мин; к. п. д. 82%	2900	390	2,96
	Приводной двигатель	АМ-116; 100 кВт; 380 в; 1000 об/мин; к. п. д. 92%	12 500	680	8,7
Итого			57 900	4870	45,86
б) $\Phi = \text{var}$ $U = \text{const}$	Двигатель	МП 11-13/2; 60 кВт; 220 в; 304 а; 300—1200 об/мин; к. п. д. 90%	30 200	3200	6,7
	Генератор	ПН-550; 70 кВт; 230 в; 348 а; 1470 об/мин; к. п. д. 87,5%	9350	950	10,0
	Возбудитель	ПН-68; 4,8 кВт; 230 в; 1450 об/мин; к. п. д. 83%	1380	155	0,98
	Приводной двигатель	А91-4; 75 кВт; 380 в; 140 а; 1460 об/мин; к. п. д. 91,5%	5900	277	6,7
Итого			46 830	4582	24,38

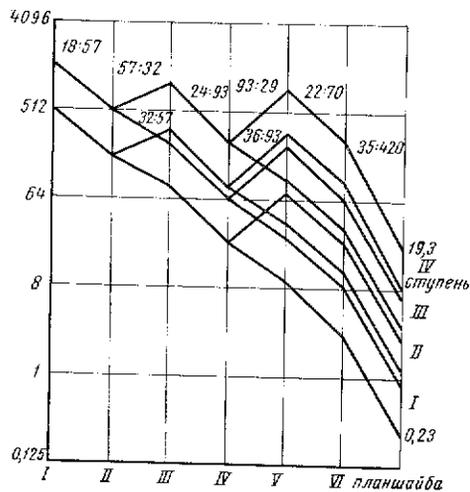
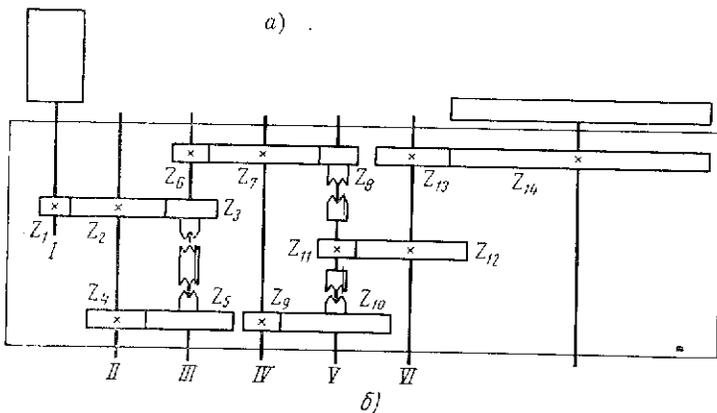


Рис. 4-15. Графики чисел оборотов и кинематическая схема четырехступенчатой коробки скоростей



Сравнение производится по весу и стоимости электрооборудования, а также по потерям электроэнергии в системе при электрическом регулировании скорости двигателя. Расчетная мощность двигателя  $P_{расч} = 53 \text{ кВт}$ . Диапазон регулирования скорости (при постоянной мощности)  $D = 4 : 1$ . Выбор электрооборудования производится по расчетной мощности двигателя:

для варианта (а) требуемая мощность двигателя  $P_d = P_{расч} D_U = 53 \cdot 3,1 = 164,3 \text{ кВт}$ . Принят двигатель с диапазоном регулирования скорости изменением магнитного потока  $D_\Phi = 1250/970 = 1,29$  и регулированием напряжения  $D_U = 4/1,29 = 3,1$ ;

для варианта (б) требуемая мощность двигателя  $P_d = P_{расч} = 53 \text{ кВт}$ .

Выбранные электрические машины для обоих вариантов (а) и (б), их веса и стоимости приведены в табл. 4-6.

Потери электроэнергии определяются по (2-2).

При требуемом диапазоне регулирования  $D = 4 : 1$  целесообразно применять регулирование скорости изменением магнитного потока двигателя при  $U = const$ ; при этом вес оборудования меньше на 11 070 н, система дешевле и потери в ней меньше на 21,48 кВт, т. е. на 47%.

3. Произвести технико-экономическое сравнение и выбор варианта коробки скоростей главного электропривода карусельного

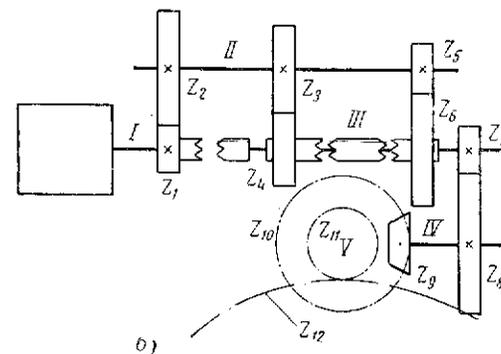
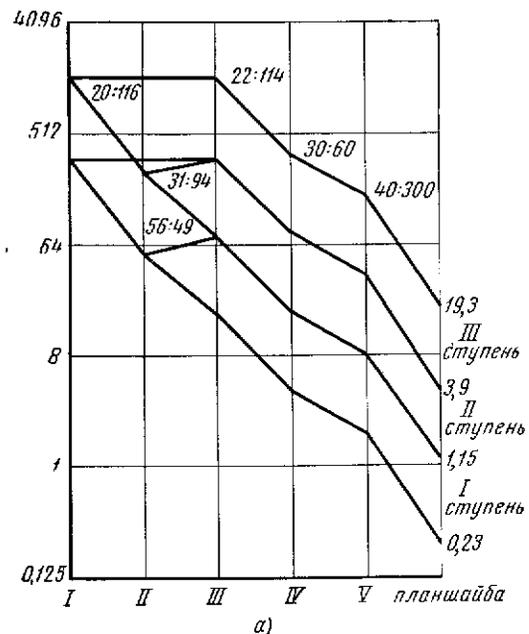


Рис. 4-16. Графики чисел оборотов и кинематическая схема трехступенчатой коробки скоростей

станка. Диапазон регулирования скорости планшайбы станка модели 1580Л при постоянной мощности  $P_{II} = 100 \text{ кВт}$  составляет  $D = 84 : 1$  (0,23—19,3 об/мин).

При регулировании скорости планшайбы с постоянной мощностью целесообразно применять электромеханическое регулирование.

Рассматриваются три варианта регулирования скорости:

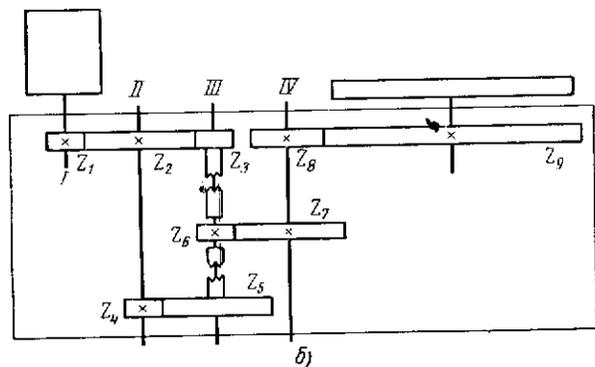
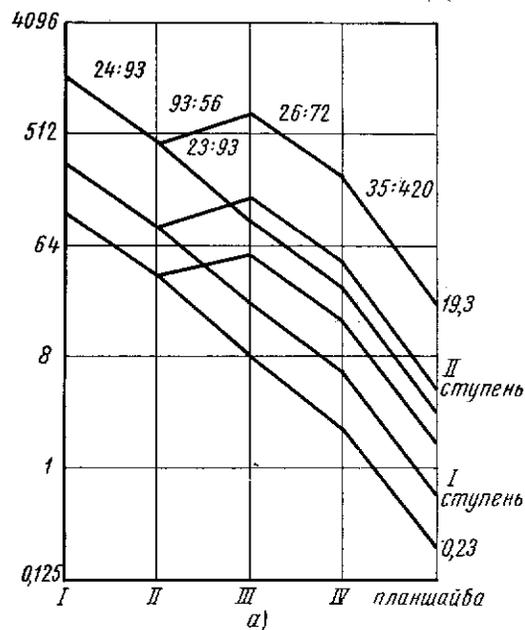


Рис. 4-17. Графики чисел оборотов и кинематическая схема двухступенчатой коробки скоростей

а) регулирование скорости двигателя изменением магнитного потока в диапазоне 3 : 1 и механическое регулирование в диапазоне 28 : 1. Принимается двигатель типа П131-4К; 100 кВт; 500—1500 об/мин. Строится график скоростей вращения планшайбы (рис. 4-15, а) требуемого диапазона  $D_{\text{мех}} = 28 : 1$  [Л. 16]. Из графика видно, что для такого диапазона требуется четырехступенчатая коробка скоростей. Кинематическая схема такой коробки показана на рис. 4-15, б;

б) регулирование скорости двигателя изменением магнитного потока в диапазоне 5 : 1 и механическое регулирование в диапазоне 16,8 : 1. Принимается двигатель П133-4К; 100 кВт; 300—1500 об/мин. Строится график скоростей вращения планшайбы (рис. 4-16, а), из которого видно, что для обеспечения  $D_{\text{мех}} = 16,8$  требуется трехступенчатая коробка скоростей, кинематическая схема которой приведена на рис. 4-16, б;

в) регулирование скорости двигателя изменением напряжения в диапазоне 2,5 : 1, изменением магнитного потока в диапазоне 5 : 1 и механическое регулирование в диапазоне 6,7 : 1. Принимается двигатель П133-4К; 100 кВт; 300—1500 об/мин. Строится график скоростей вращения планшайбы (рис. 4-17, а), из которого видно, что для обеспечения  $D_{\text{мех}} = 6,7$  требуется двухступенчатая коробка скоростей. Кинематическая схема такой коробки приведена на рис. 4-17, б.

Сравнение вариантов производится по количеству валов, муфт, зубчатых колес и отверстий в корпусе коробки скоростей, весу и

Таблица 4-7

Показатели сравнения		Коробка скоростей		
		четырёхступенчатая	трехступенчатая	двухступенчатая
Количество, шт.	валов	6	5	4
	муфт	2	2	1
	зубчатых колес	13	11	8
	отверстий в корпусе	6	5	4
Вес, кг	коробки скоростей	49 000	44 100	34 400
	двигателя	23 300	31 900	31 900
	общий	72 300	76 000	66 300
Стоимость, руб.	коробки скоростей	4900	4410	3440
	двигателя	3160	3810	3810
	общая	8060	8220	7250

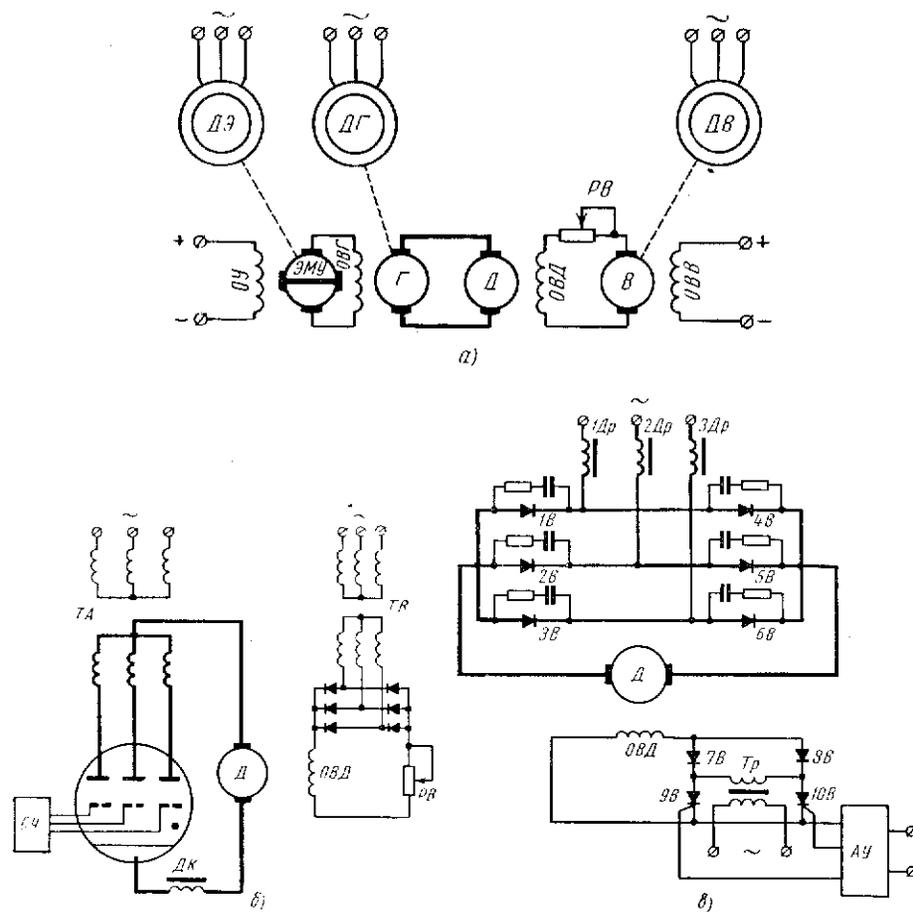


Рис. 4-18. Системы главного электропривода тяжелого токарного станка: а — система Г—Д; б — система УРВ—Д; в — система ПВ—Д

стоимости коробки скоростей и двигателя. Стоимость коробки скоростей определяется из условия, что 10 н веса стоит 1 руб.

Результаты расчетов сведены в табл. 4-7.

Анализ таблицы показывает, что наиболее рациональным является электропривод с двухзонным регулированием и двухступенчатой коробкой скоростей (рис. 4-17, б).

**4. Произвести экономическое сравнение систем главного электропривода тяжелого токарного станка.** На станке применяется электромеханическое регулирование скорости в диапазоне 64 : 1, из которого 16 : 1 достигается с помощью трехступенчатой коробки скоростей с передаточным отношением от двигателя к шпинделю, равным 96; 24; 6, и 4 : 1 — регулирование скорости двигателя от

$\omega_{н} = 33,5 \text{ рад/сек}$  до  $\omega_{макс} = 134 \text{ рад/сек}$  изменением его магнитного потока.

Главный электропривод токарного станка может быть выполнен по трем системам (рис. 4-18, а, б, в): а) генератор — двигатель Г—Д с электромашинным усилителем; б) управляемый ртутный выпрямитель — двигатель УРВ—Д; в) полупроводниковый кремниевый выпрямитель — двигатель ПВ—Д.

Сравнение систем электропривода производится по капитальным затратам  $K$  и эксплуатационным расходам  $C_3$ .

Капитальные затраты  $K$  рассмотренных вариантов систем приведены в табл. 4-8. Выбор электрооборудования производится исходя из заданной мощности двигателя, равной 63 квт. Стоимость двигателя в расчетах не учитывается, так как она примерно одинаковая (двигатели отличаются только напряжением).

Эксплуатационные расходы  $C_3$  состоят из амортизационных отчислений  $C_a$ , расходов на планово-предупредительные ремонты  $C_p$  и стоимости потерь электроэнергии  $C_{п}$ :

$$C_3 = C_a + C_p + C_{п} \quad (4-40)$$

Амортизационные отчисления принимаются в размере 10% от капитальных затрат, т. е.

$$C_a = 0,1 K \quad (4-41)$$

Затраты на планово-предупредительные ремонты складываются из основной зарплаты за ремонт, дополнительной зарплаты и начислений на соцстрах. Дополнительная зарплата принимается равной 22% от основной, начисление на соцстрах — 7,6 % от основной зарплаты.

Основная зарплата подсчитывается как произведение часовой ставки рабочего на число часов ремонта. Часовая ставка рабочего принята равной 40,7 коп/ч. Число часов ремонта оборудования определяется исходя из категории сложности, периодичности и трудоемкости ремонтов [Л.17].

Категории сложности ремонта  $C$  выбранного оборудования приведены в табл. 4-8. Периодичность ремонтов и число ремонтов  $m$  за 10 лет приведены в табл. 4-9. Трудоемкость одного ремонта  $T_1$  при категории сложности в 1 ремонтную единицу составляет: малый ремонт — 1,2; средний — 7; капитальный — 15.

Трудоемкость всех ремонтов оборудования электропривода за 10 лет эксплуатации

$$T_2 = CT_1 m, \quad (4-42)$$

так, например, для системы Г—Д трудоемкость малого ремонта оборудования (генератор, ЭМУ, возбудитель, приводные двигатели, регулятор возбуждения) равна

$$T_{2 Г-Д} = (10 + 2,5 + 2,5 + 7 + 1,3 + 2,1 + 1,6) 1,2 \cdot 30 = 973 \text{ ч.}$$

Таблица 4-8

Сис-тема	Наименование	Обозна-чение по схеме	Тип оборудования	Количество	К, руб.	Сложность ремонта в единицах С
Г—Д	Генератор	Г	П92; 70 квт; 230 в	1	880	10
	Двигатель генера-тора	ДГ	А91-4; 75 квт; 380 в	1	235	7
	Усилитель	ЭМУ	ЭМУ25А; 2,5 квт; 230 в	1	196	2,5
	Двигатель ЭМУ	ДУ	А41-2; 2,8 квт; 380 в	1	20	1,3
	Возбудитель	В	П41; 2,7 квт; 230 в	1	176	2,5
	Двигатель возбуди-теля	ДВ	А51-2; 7 квт; 380 в	1	32	2,1
	Регулятор возбуж-дения	РВ	РВМ-1; 30 а	1	128	1,6
	Фундамент	—	Надбавка 15%	—	230	
Итого					1897	
УРВ-Д	Ртутный выпрями-тель	УРВ	РМ-200; 400 в; 200 а;	1	1160	18
	Анодный транс-форматор	ТА	ТС-30/0,38; 180 кВа	1	1010	12
	Катодный дроссель	ДК	ФРОС-200; 200 а	1	400	2
	Вентили	1В—6В	ВК-10; 10а; 300 в	6	57,3	—
	Трансформатор цепи возбуждения	ТВ	ТС-25/0,5; 2,5 кВа	1	32	1,8
	Регулятор возбуж-дения	РВ	РВМ-1; 30 а	1	128	1,6
Итого					2787,3	
ПВ-Д	Анодные дроссели	1ДА-3ДА	ФРОС-200; 200 а	3	1200	2
	Вентили	1В-6В	ВК-200; 200 а; 600 в	6	432	—
	Вентили	7В, 8В	ВК-10; 10 а; 400 в	2	24	—
	Тиристоры	1Т, 2Т	ВКУ-10; 10 а; 400 в	2	50	—
	Трансформатор це-пи возбуждения	ТВ	ТБ-3; 3 кВа;	1	31	1,8
	Система управле-ния	СУ	380/245 в	1	110	2
Итого					1847	

Таблица 4-9

Наименование оборудования	Периодичность ремонтов в месяцах			Число ремонтов за 10 лет		
	малого	сред-него	капи-таль-ного	малого	сред-него	капи-таль-ного
Электродвигатели постоянного и переменного тока	4	8	120	30	15	1
Трансформаторы маломощные и дроссели	12	2	36	10	—	3
Трансформатор силовой	6	—	84	20	—	1,43
Ртутный выпрямитель	6	24	60	20	5	2
Шкафы управления	2	8	120	60	15	1

Результаты расчета трудоемкости ремонтов приведены в табл. 4-10. Там же даны окончательные результаты расчета затрат на планово-предупредительные ремонты.

Таблица 4-10

Система электропри-вода	Трудоемкость ремонта Т, ч				Затраты на ремонты, руб.			
	малого	среднего	капиталь-ного	итого	зарплата		начислен-ные на соцстрах	итого
					основная	дополни-тельная		
Г-Д	973	2840	406	4219	1717	378	130	2225
УРВ-Д	785	798	1041	2624	1068	235	81	1384
ПВ-Д	238	210	381	829	337,4	74,3	25,7	437,4

Для определения потерь электроэнергии рассматривается наиболее энергоемкий технологический процесс, состоящий из режима черновой и чистовой обработки детали диаметром 600 мм и длиной 6000 мм. Ориентировочный вес детали —  $130 \cdot 10^3$  н. Резцы — твердосплавные. Режимы резания выбраны по [Л. 6] аналогично примерам главы 1 и приведены в табл. 4-11.

Таблица 4-11

Режим работы	t, мм	s, мм/об	v, м/мин	P <sub>з</sub> , кВт	ω, рад/сек	t <sub>мап</sub> , мин	t <sub>всп</sub> , мин
Черновая обработка	34	3,9	25	49	1,4	15	19,73
Чистовая обработка	2	1,5	100	4,2	5,6	75	

Черновая обработка производится при скорости двигателя  $\omega_d = 33,5 \text{ рад/сек}$  на второй механической ступени. Скорость шпинделя  $1,4 \text{ рад/сек}$ . К. п. д. станка на этой скорости  $\eta_{ст} = 0,89$ . Загрузка станка при черновой обработке принята равной номинальной нагрузке станка  $P_{2н} = 49 \text{ квт}$ .

Мощность двигателя при черновой обработке по (2-4)

$$P_{д. черн} = \frac{49}{0,89} = 55 \text{ квт.}$$

Требуемая скорость вращения шпинделя при чистовой обработке составляет  $5,6 \text{ рад/сек}$ . Такую скорость шпинделя можно получить двумя способами:

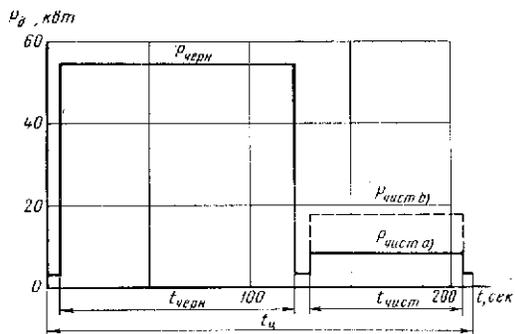


Рис. 4-19. Нагрузочная диаграмма двигателя

а) работа на III ступени коробки скоростей станка с номинальной скоростью двигателя ( $\omega_{д.н} = 33,5 \text{ рад/сек}$ ) (механическое регулирование);

б) работа на III ступени коробки скоростей с максимальной скоростью двигателя ( $\omega_{д.макс} = 134 \text{ рад/сек}$ ) при ослабленном магнитном потоке (электрическое регулирование).

К. п. д. станка при чистовой обработке по (2-9) и (2-16):

$$а) \eta_{ст} = \frac{1}{1 + \frac{0,072}{0,086} + 0,048} = 0,53;$$

$$б) \eta_{ст} = \frac{1}{1 + \frac{0,072}{0,086} \cdot \frac{134}{33,5} + 0,048} = 0,227,$$

где  $a = 0,072$ ;  $b = 0,048$ ;  $k = \frac{4,2}{49} = 0,086$  (см. 2-9).

Мощность двигателя по (2-4):

$$а) P_д = \frac{4,2}{0,53} = 8 \text{ квт}; \quad б) P_д = \frac{4,2}{0,227} = 18,5 \text{ квт.}$$

Нагрузочная диаграмма двигателя при обработке детали имеет вид, представленный на рис. 4-19. По нагрузочной диаграмме определяется к. п. д. технологического цикла и потери энергии за год. К. п. д. технологического цикла

$$\eta_{т.ц} = \frac{P_{2.р}}{P_{1.р}}; \quad (4-43)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{2.ср} &= \frac{\Sigma P_2 \cdot \Delta t}{t_{ц}} = \frac{P_{2.черн} \cdot t_{черн} + P_{2.чист} \cdot t_{чист}}{t_{ц}} \\ P_{1.ср} &= \frac{\Sigma P_1 \Delta t}{t_{ц}} = \frac{P_{1.черн} \cdot t_{черн} + P_{1.чист} \cdot t_{чист}}{t_{ц}} \end{aligned} \right\} (4-44)$$

Здесь  $P_2$  — мощность на валу двигателя;

$P_1$  — мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_{д.} \cdot \eta_{пр}}; \quad (4-45)$$

$\eta_{д.}$  — к. п. д. двигателя: при черновой обработке  $\eta_{д. черн} = 0,875$ ; при чистовой: а)  $\eta_{д. чист} = 0,48$ ; б)  $\eta_{д. чист} = 0,71$ ;

$\eta_{пр}$  — к. п. д. преобразователя в системе:

$$\Gamma-Д \quad \eta_{пр} = \eta_{г} \eta_{д.г} = 0,872 \cdot 0,93 = 0,83; \quad (4-46)$$

$$\begin{aligned} \text{УРВ-Д} \quad \eta_{пр} &= \eta_{УРВ} \eta_{пр} = \left(1 - \frac{\Delta U_{дуги}}{U_{д.}}\right) \eta_{пр} = \\ &= \left(1 - \frac{20}{440}\right) 0,98 = 0,94; \end{aligned} \quad (4-46')$$

$$\text{ПВ-Д} \quad \eta_{пр} = \eta_{пв} \eta_{д.а} = 0,98 \cdot 0,98 = 0,96; \quad (4-46'')$$

$t_{ц}$  — время цикла

$$t_{ц} = \Sigma t_{ман} + t_{всп} = 115 + 75 + 19,73 = 209,73 \text{ мин.} \quad (4-47)$$

Энергия, полученная двигателем за цикл,

$$A_n = P_{1.ср} t_{ц}. \quad (4-48)$$

Энергия, отданная двигателем за цикл,

$$A_0 = P_{2.ср} t_{ц}. \quad (4-48')$$

Потери энергии за год (квт·ч)

$$\Delta A = \frac{A_n - A_0}{60} N, \quad (4-49)$$

где  $N$  — число циклов в году,

$$N = \frac{T60}{t_{ц}} = \frac{2860 \cdot 60}{209,70} = 820 \frac{\text{циклов}}{\text{год}}; \quad (4-50)$$

$T$  — число часов использования оборудования в год,

$$T = nk_{нps} = 2860 \text{ ч.} \quad (4-51)$$

Здесь  $n = 365 - 52 - 6 = 307$  — рабочие дни в году;

$k_n = 0,7$  — коэффициент использования оборудования;

$p = \frac{6 \cdot 7 - 2}{6} = 6,66$  — продолжительность рабочего процесса в смену;

$s = 2$  — число смен.

Результаты расчета потерь электроэнергии за год в рассматриваемых системах электропривода приведены в табл. 4-12.

Таблица 4-12

Система	Тип регулирования	$P_{2\text{ср}}$ , квт	$A_{01}$ , квт× ×мин	$P_{1\text{ср}}$ , квт	$A_{11}$ , квт× ×мин	ηт.д	ΔА, квт·ч
Г—Д	Электрическое	36,9	7720	52,7	11 060	0,7	45 800
	Механическое	33,1	6940	48,6	10 200	0,68	44 600
УРВ—Д	Электрическое	36,9	7720	46,6	9 780	0,79	28 100
	Механическое	33,1	6940	43,2	9 030	0,768	28 600
ПВ—Д	Электрическое	36,9	7720	45,7	9 590	0,808	25 600
	Механическое	33,1	6940	42,4	8 840	0,782	25 700

Стоимость потерь электроэнергии определяется за один год эксплуатации электропривода

$$C_n = c \Delta A, \quad (4-52)$$

где  $c = 0,012$  руб/квт·ч — стоимость 1 квт·ч электроэнергии.

Суммарные эксплуатационные расходы, определенные по (4-52), за один год эксплуатации электропривода приведены в табл. 4-13.

Таблица 4-13

Система электропривода	$C_a$ , руб.	$C_p$ , руб.	$C_n$ , руб.	$C_z$ , руб.
Г—Д	189,7	222,5	550,0	962,5
УРВ—Д	278,7	138,4	343,0	750,1
ПВ—Д	184,7	437,4	309,0	731,1

Сумма затрат по каждому варианту

$$Z = \varepsilon K + C_z, \quad (4-53)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент использования капиталовложений для машиностроения, составляет 0,15:

$$Z_1 = 0,15 \cdot 1897 + 962,5 = 1247,3 \text{ руб.}$$

$$Z_2 = 0,14 \cdot 2787 + 750,1 = 1167,6 \text{ руб.}$$

$$Z_3 = 0,15 \cdot 1847 + 731,1 = 1007,8 \text{ руб.}$$

Наиболее экономичной по сумме общих затрат является система ПВ—Д.

## ЧАСТЬ ВТОРАЯ

### РАСЧЕТЫ

### СИСТЕМ

### ТИПОВЫХ

### СТАНКОВ

ГЛАВА 5.

**РАСЧЕТ СИСТЕМ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ  
СТАНКОВ ТОКАРНОЙ ГРУППЫ**

**§ 5-1. Системы управления  
и регулирования скорости**

Токарные станки составляют весьма многочисленную первую группу металлорежущих станков согласно индекса́тору ЭНИМСа [Л. 2]. В эту группу входят и карусельные станки. Габариты станков первой группы весьма разнообразны, начиная с малых легких станков, имеющих электроприводы от асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором до тяжелых и уникальных станков моделей 1660—1682 и 1563—1591 с глубокорегулируемыми главными приводами и приводами подачи. Диапазоны регулирования главных приводов составляют величины порядка 100:1 и выше, а приводы подачи с механическим регулированием имеют диапазоны до 10 000 : 1. Для электроприводов тяжелых станков токарной группы используют в качестве электродвигателей двигатели постоянного тока, регулируемые как напряжением (приводы подачи), так и потоком возбуждения (главные приводы).

Плавный, но достаточно быстрый пуск и торможение тяжелых станков являются основным требованием, обусловленным, с одной стороны, производительностью станков, с другой — ограничением моментов с целью сохранения механических передач и точности работы станков. В современных электроприводах широко используется полупроводниковая техника, представленная в настоящем пособии двумя расчетами:

- а) электропривод с питанием главного привода от неуправляемых вентилях, включенных по мостовой трехфазной схеме и с питанием обмотки возбуждения двигателя от управляемых вентилях;
- б) электропривод подачи карусельного станка, питаемый от системы управляемых вентилях или тиристоров.

**§ 5-2. Главный электропривод  
по системе генератор—двигатель  
(Г—Д) с вибрационным управлением**

Электрическая схема приведена на рис. 5-1; двигатель МП11-13/2; 60 квт; 220 в; 300—1200 об/мин; генератор П92; 70 квт; 230 в. Вибрационное управление применяется для обес-

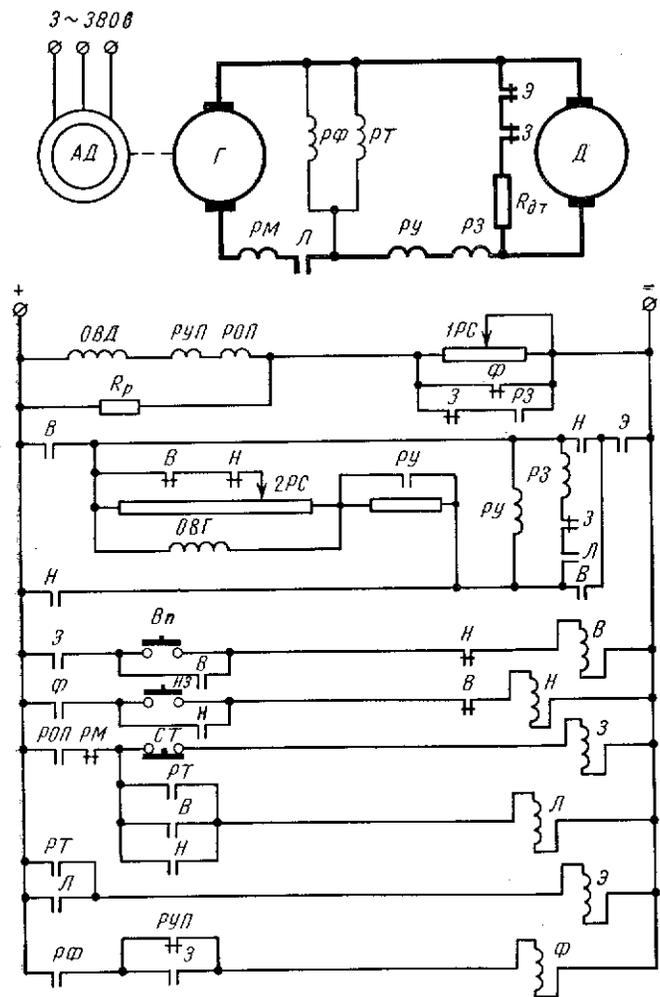


Рис. 5-1. Схема главного привода токарного станка по системе Г—Д с вибрационным управлением

печения достаточно быстрого и плавного пуска и торможения двигателя.

1. Рассчитать переходные процессы пуска и торможения двигателя. Расчет осуществляется графоаналитическим методом [Л. 18].

Предварительные построения. Кривая намагничивания генератора [Л. 19] пересчитывается в зависимость  $\psi = f(i_{в.г.})$ , а кривая намагничивания двигателя — в зависимость  $\varphi = f(i_{в.д.})$ , где  $\psi = \frac{E_{г.}}{E_{г.у}}$ ,  $\varphi = \frac{\Phi_{д.}}{\Phi_{д.у}}$  — относительные значения э. д. с. генератора и магнитного потока двигателя,  $i_{в.г.}$ ,  $i_{в.д.}$  — токи возбуждения генератора и двигателя,  $E_{г.у} = 240$  в,  $\Phi_{д.у} = 0,049$  вб — установившиеся значения.

Для расчета переходных процессов необходимо также предварительное построение зависимостей  $\psi$  и  $\varphi$  при их нарастании и спадаении во времени  $\psi = f(t)$  и  $\varphi = f(t)$ . Расчетное уравнение нарастания и спадаения относительного значения э. д. с. генератора

$$\Delta\psi = (I_{в.г.} - i_{в.г.ср}) \frac{\Delta t}{a}, \quad (5-1)$$

где  $I_{в.г.}$  — установившийся ток возбуждения генератора;  
 $i_{в.г.ср}$  — среднее значение тока возбуждения за время  $\Delta t$ ;  
 $a$  — постоянный коэффициент, равный:

а) при нарастании э. д. с. генератора

$$I'_{в.г.} = 4a;$$

$$a' = E_{г.у} \frac{2\rho\omega_{н.г}\sigma}{k_{э.г}\omega_{г}R_{в.г}} = 240 \frac{4 \cdot 830 \cdot 1,2}{67 \cdot 152 \cdot 1,2 \cdot 31,8} = 2,47a \cdot \text{сек};$$

б) при спадаении э. д. с. из-за включения в цепь обмотки возбуждения сопротивления  $R_{доб}$

$$I''_{в.г.} = 1,35 a;$$

$$a'' = a' \frac{R_{в.г.}}{R_{в.г.} + R_{доб}} = 2,47 \frac{1,2 \cdot 31,8}{1,2 \cdot 31,8 + 62,5} = 0,935 a \cdot \text{сек};$$

в) при спадаении э. д. с. из-за отключения обмотки возбуждения и замыкания  $е_{г}$  на разрядное сопротивление  $R_p = R_{в.г.}$

$$I'''_{в.г.} = 0;$$

$$a''' = a' \frac{R_{в.г.}}{R_{в.г.} + R_p} = 2,47 \cdot 0,5 = 1,235 a \cdot \text{сек}.$$

Расчетные зависимости  $\Delta\psi = f(t)$  построены на рис. 5-2 [кривые 1, 2, 3 соответственно для случаев (а), (б), (в)].

Расчетное уравнение спадаения и нарастания относительного значения магнитного потока двигателя

$$\Delta\varphi = (I_{в.д.} - i_{в.д.ср}) \frac{\Delta t}{b}, \quad (5-2)$$

где  $I_{в.д}$  — установившееся значение тока возбуждения двигателя;  
 $i_{в.д.ср}$  — среднее значение тока возбуждения двигателя за время  $\Delta t$ ;

$b$  — постоянный коэффициент, равный:

а) при ослаблении магнитного потока из-за включения в цепь обмотки возбуждения сопротивления  $R_{доп}$

$$I'_{в.д} = 1,4 \text{ а};$$

$$b' = \Phi_{д.у} \frac{2p\omega_{в.д}^{\sigma}}{R_{в.д} + R_{доп}} = 0,049 \frac{6 \cdot 750 \cdot 1,2}{1,2 \cdot 21,6 + 105} = 2,03 \text{ а} \cdot \text{сек};$$

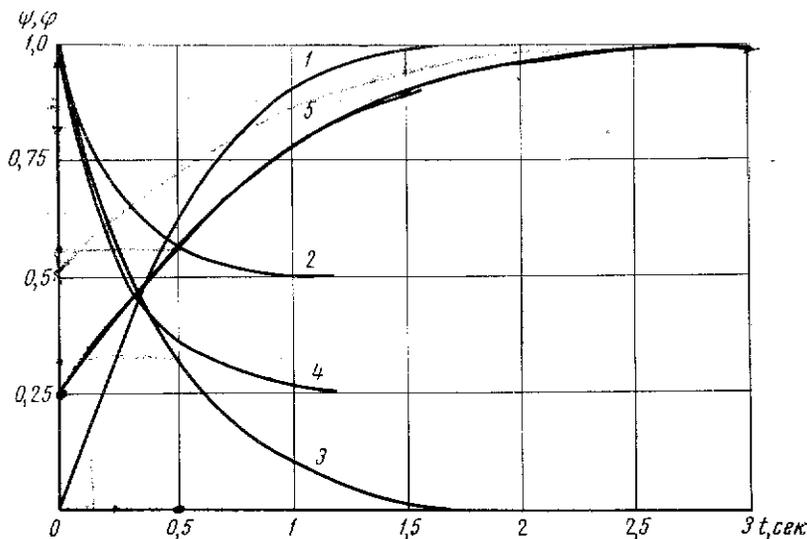


Рис. 5-2. Зависимости относительных величин э. д. с. генератора  $\psi$  (кривые 1, 2, 3) и магнитного потока двигателя  $\varphi$  (кривые 4, 5) от времени

б) при усилении магнитного потока

$$I''_{в.д} = 9 \text{ а};$$

$$b'' = 0,049 \frac{6 \cdot 750 \cdot 1,2}{1,2 \cdot 21,6} = 10,25 \text{ а} \cdot \text{сек}.$$

Расчетные зависимости  $\varphi = f(t)$  приведены на рис. 5-2 (кривые 4 и 5 соответственно при ослаблении и усилении потока).

Расчет кривых переходного процесса пуска двигателя. Процесс пуска можно разбить на два этапа: пуск двигателя до основной скорости и пуск двигателя выше основной скорости.

Пуск двигателя до основной скорости:  
 исходные уравнения

$$e_r = E_{г.у} \psi = c'_e \omega + iR; \quad (5-3)$$

$$c'_m i = J \frac{d\omega}{dt} + (M_c + M_0). \quad (5-4)$$

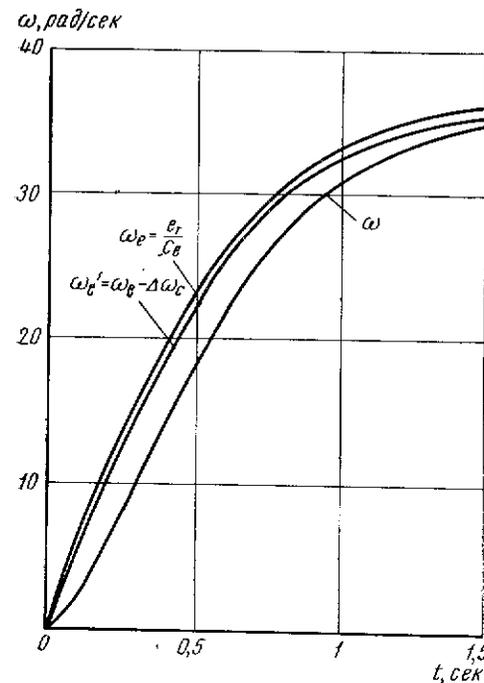


Рис. 5-3. Построение зависимости скорости двигателя от времени

Заменив производную отношением конечных приращений и решая относительно  $\Delta\omega$ , получаем расчетное уравнение приращения скорости с учетом имеющейся кривой  $\psi(t)$

$$\Delta\omega = [\omega_{о.у} \psi(t) - \Delta\omega_{с.п} - \omega] \frac{\Delta t}{T_m}, \quad (5-5)$$

где

$$\omega_{о.у} = \frac{E_{г.у}}{c'_e} = \frac{240}{6,57} = 36,5 \text{ рад/сек};$$

$$\Delta\omega_{с.п} = \frac{(M_c + M_0) R}{c_e c'_m} = \frac{(229 + 90) 0,079}{6,57 \cdot 6,57} = 0,584 \text{ рад/сек};$$

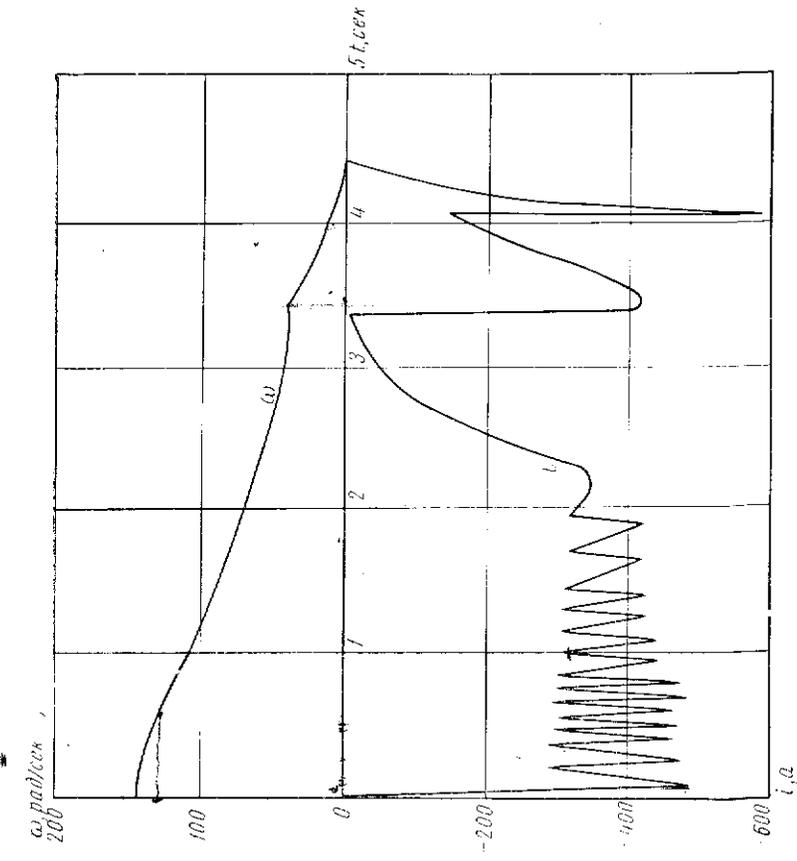
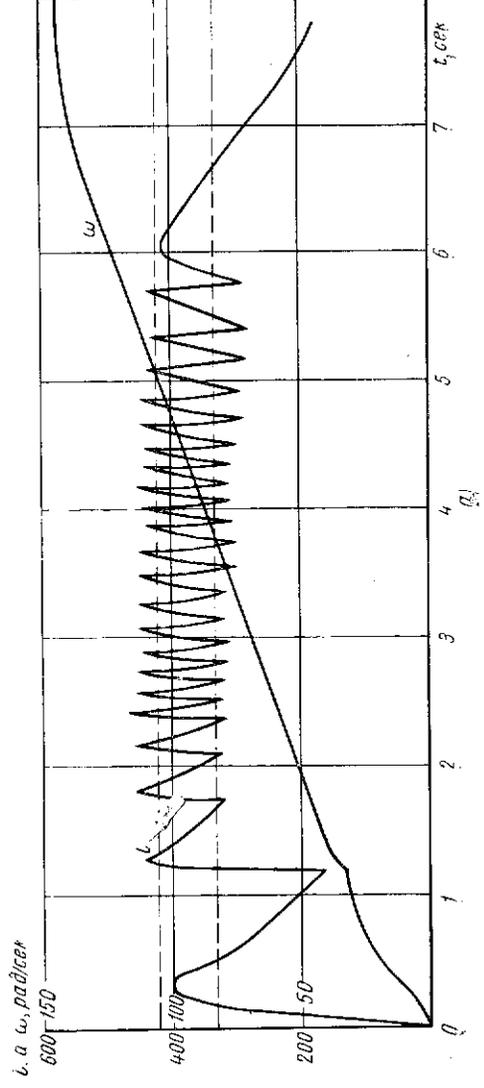


Рис. 5-4. Зависимости скорости и тока двигателя от времени:  
а — при пуске; б — при торможении

$$R = 1,2 (R_{я.г} + R_{дп.г} + R_{я.д} + R_{дп.д}) = 0,079 \text{ ом};$$

$$T_m = \frac{JR}{c_e' c_m'} = \frac{54,2 \cdot 0,079}{6,57 \cdot 6,57} = 0,1 \text{ сек};$$

$$J = 54,2 \text{ кгм}^2.$$

Расчет кривой  $\omega = f(t)$  производится графически по уравнению (5-5) на рис. 5-3. Сначала строятся кривые  $\omega_e(t) = \omega_{о.у} \psi(t)$  и  $\omega_e'(t) = \omega_e(t) - \Delta\omega_{с.н}$ , а затем, разбивая ось времени на отрезки  $\Delta t = T_m = 0,1 \text{ сек}$ , определяются значения  $\Delta\omega$  и  $\omega$ . Значения  $\psi(t)$  принимаются по кривой 1 (рис. 5-2).

Расчетное уравнение тока двигателя получено из уравнения (5-5)

$$i(t) = I_k \left[ \psi(t) - \frac{\omega(t)}{\omega_{о.у}} \right] = 3030 \left[ \psi(t) - \frac{\omega(t)}{36,5} \right], \quad (5-6)$$

где

$$I_k = \frac{E_{г.у}}{R} = \frac{240}{0,079} = 3030 \text{ а}.$$

Значения  $\psi(t)$  принимаются по кривой 1 (рис. 5-2). Расчетная зависимость  $i = f(t)$  приведена на рис. 5-4, а.

Пуск двигателя от основной до максимальной скорости:  
исходные уравнения

$$e_r(t) = E_{г.у} \psi(t) = k_e \Phi_{д.у} \varphi(t) \omega(t) + i(t) R; \quad (5-3')$$

$$i(t) = \frac{J}{k_m \Phi_{д.у} \varphi(t)} \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_c + M_0}{k_m \Phi_{д.у} \varphi(t)}. \quad (5-4')$$

Перейдя к конечным приращениям и принимая  $\Delta t = T_m$ , получим расчетную формулу скорости двигателя для  $(m+1)$  интервала

$$\begin{aligned} \omega_{(m+1)} &= \frac{\omega_{(m)} + \omega_{о.у} \psi(t) \varphi(t) - \Delta\omega_{с.н}}{1 + \varphi^2(t)} = \\ &= \frac{\omega_{(m)} + 36,5 \psi(t) \varphi(t) - 0,584 \xi}{1 + \xi \varphi^2(t)} \end{aligned} \quad (5-5')$$

и расчетную формулу тока

$$i_{(m)} = I_k \left[ \psi(t) - \frac{\omega_{(m)}}{\omega_{о.у}} \varphi(t) \right] = 3030 \left[ \psi(t) - \frac{\omega_{(m)}}{36,5} \varphi(t) \right]. \quad (5-6')$$

Значения  $\psi(t)$  и  $\varphi(t)$  принимаются по кривым 2 и 4 (рис. 5-2).

Результаты расчетов приведены в табл. 5-1.

Кривые  $\omega = f(t)$  и  $i = f(t)$  построены на рис. 5-4, а.

Таблица 5-1\*

$\xi$	$t, \text{сек}$	$\psi(t)$	$\varphi(t)$	$\omega, \text{рад/сек}$	$i, \text{а}$	Положение реле РУ
	1,2			33,6		Включилось
0,5	1,25	0,974	0,84	36	448	Отключилось
1	1,35	0,82	0,645	38,8	412	
1	1,55	0,637	0,445	42,5	382	
1	1,75	0,538	0,35	45	328	Включилось
0,5	1,8	0,588	0,335	45,9	460	Отключилось

\* Дальнейшие расчеты аналогичны.

Расчет кривых переходного процесса торможения двигателя. Электрическое торможение двигателя в схеме производится в три этапа:

1 этап. Торможение с максимальной скорости  $\omega_{макс}$  до номинальной  $\omega_n$ . При этом нарастает поток двигателя до номинального значения с вибрационным управлением (работает реле РЗ). Обмотка возбуждения генератора не отключается, и э. д. с. генератора постоянна.

2 этап. Торможение с номинальной скорости  $\omega_n$  до скорости  $\omega'$ , соответствующей  $\approx 0,2 E_{г.у}$ . Обмотка возбуждения генератора отключена. Магнитный поток двигателя номинальный  $\varphi = 1$ .

3 этап. Динамическое торможение.

Расчетные уравнения для первого и второго этапов торможения те же, что и при пуске.

1 этап. Торможение начинается со скорости  $\omega = 146 \text{ рад/сек}$ . Э. д. с. генератора остается неизменной  $\psi = 1$ .

Расчетные уравнения

$$\omega_{(m+1)} = \frac{\omega_{(m)} + \omega_{о.у} \varphi(t) - \Delta\omega_{с.н}}{1 + \varphi^2(t)}; \quad (5-5'')$$

$$i_{(m)} = I_k \left[ 1 - \frac{\omega_{(m)}}{\omega_{о.у}} \varphi(t) \right]. \quad (5-6'')$$

Кривые  $\omega = f(t)$  и  $i = f(t)$  построены на рис. 5-4, б.

При номинальном значении тока возбуждения двигателя включится реле РУП и отключится обмотка возбуждения генератора. Это происходит при скорости  $\omega = 38,2 \text{ рад/сек}$  и времени переходного процесса  $t = 3,35 \text{ сек}$ . Начинается второй этап торможения.

2 этап. Обмотка возбуждения генератора отключена. Э. д. с. генератора спадает, магнитный поток двигателя постоянен,  $\varphi = 1$ .

Расчетные формулы

$$\omega_{(m+1)} = \frac{\omega_{(m)} + \omega_{о.у} \psi(t) - \Delta\omega_{с.н}}{2}; \quad (5-5''')$$

$$i_{(m)} = I_k \left[ \psi(t) - \frac{\omega_{(m)}}{\omega_{0,y}} \right]. \quad (5-6''')$$

Кривые  $\omega = f(t)$  и  $i = f(t)$  построены на рис. 5-4, б. При достижении  $\psi = 0,2 E_{г.у} = 48$  в якорь двигателя отключается от генератора и замыкается на сопротивление  $R_{д.т}$ . Происходит динамическое торможение.

3 этап. Динамическое торможение.

Сопротивление динамического торможения выбирается из допустимого значения тока двигателя

$$R_{д.т} = \frac{E_{\max}}{I_{\text{доп}}} - R_{\kappa} = 0,0544 \text{ ом.}$$

Уравнение движения при динамическом торможении

$$-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (5-4'')$$

Кривые  $\omega = f(t)$  и  $i = f(t)$  при динамическом торможении построены на рис. 5-4, б.

### § 5-3. Главный электропривод по системе «управляемый ртутный выпрямитель — двигатель» (УРВ — Д).

Электрическая схема приведена на рис. 5-5.

Двигатель МП11—12/2; 63 квт; 440 в; 163 а; 320—1240 об/мин (33,5—130 рад/сек);  $R_{\text{д}} = 1,2 (R_{\text{я}} + R_{\text{л.п}} + R_{\text{ш}}) = 0,19 \text{ ом}$ ;  $c_e' = 12,1 \text{ в/рад/сек}$ ;  $c_m' = 12,1 \text{ н.м/а}$ .

САУ должна обеспечить перепад скорости двигателя не выше 5% от  $\omega_0$  при колебании нагрузки от нуля до номинальной и колебании напряжения сети в пределах  $\xi = +10, -15\%$ .

1. Рассчитать параметры и выбрать ртутный выпрямитель, силовой трансформатор и катодный дроссель [Л. 20]. Выбор ртутного выпрямителя производится по напряжению и току. Принимается металлический запаянный ртутный выпрямитель РМ-200; 600 в; 200 а с панелью сеточного питания ПСП-11А и фазорегулятором ФС-13.

Выбирается схема соединения обмоток трансформатора — звезда — звезда с нулем.

Фазовая э. д. с. вторичной обмотки трансформатора, полагая  $\omega = \omega_{\text{н}}$  и  $\psi = 0$ ,

$$E_{2\text{н}} = \frac{c_e' \omega_{\text{н}} + \Delta U_{\text{дуги}} + \lambda I_{\text{н}} \left[ R_{\text{л}} + (0,35 \div 0,6) \frac{s_1 f}{c^2} \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} \frac{\Delta p_{\text{м}} \%}{100} \right]}{a \left( 1 - \frac{\xi \%}{100} \right) - \frac{\lambda d}{c} \cdot \frac{u_{\text{к}} \%}{100}}$$

$$= \frac{12,1 \cdot 33,8 + 20 + 1,1 \cdot 163 \left[ 0,19 + 0,4 \frac{1,35 \cdot 1}{0,472^2} \frac{440}{163} 0,0165 \right]}{1,17 (1 - 0,15) - \frac{1,1 \cdot 0,478}{0,472} \frac{5,5}{100}} = 520 \text{ в,}$$

где  $\Delta U_{\text{дуги}}$  — падение напряжения в дуге ртутного выпрямителя;  
 $\lambda$  — кратность тока якоря;

$a, s, f, c, d$  — коэффициенты, зависящие от схемы преобразователя.

Предварительно принимаются напряжение к. з.  $u_{\text{к}} = 5,5\%$  и потери в меди трансформатора  $\Delta p_{\text{м}} = 1,65\%$ .

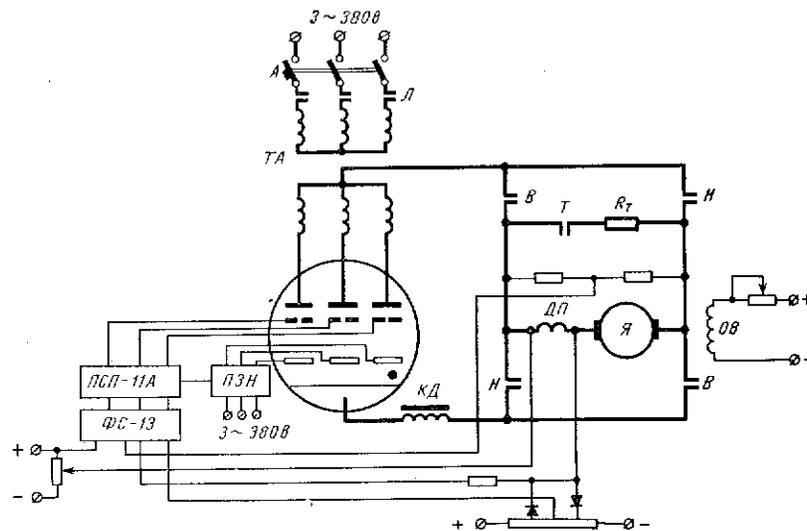


Рис. 5-5. Схема главного электропривода токарного станка по системе УРВ—Д

Типовая (расчетная) мощность трансформатора

$$S_{\text{T}} = saE_{2\text{н}}I_{\text{н}} = 1,35 \cdot 1,17 \cdot 520 \cdot 163 = 134 \text{ квa,}$$

где  $s, a$  — коэффициенты, зависящие от схемы соединения трансформатора.

Принимается трансформатор типа ТСУ 180/0, 38; 180 квa;  $\Delta p_{\text{м}} = 1,15\%$ ;  $u_{\text{к}} = 6,5\%$ . Обмотки трансформатора перематываются на напряжение  $U_{1\text{н.ф}}/E_{2\text{н.ф}} = 380/525 \text{ в}$ .

Коэффициент трансформации трансформатора

$$k_{\text{T}} = \frac{U_{1\text{н.ф}}}{E_{2\text{н.ф}}} = \frac{220}{525} = 0,42.$$

Номинальный фазовый ток первичной обмотки трансформатора

$$I_{1н} = \frac{cI_H}{k_T} = \frac{0,472 \cdot 163}{0,42} = 183 \text{ а.}$$

Приведенное активное сопротивление трансформатора

$$R_T = \frac{s\Delta p_M \%}{3k_T^2 I_{1н}^2 100} = \frac{U_{1н}\Delta p_M \%}{k_T^2 I_{1н}^2 100} = \frac{220 \cdot 1,15}{0,42^2 \cdot 183 \cdot 100} = 0,0785 \text{ ом.}$$

Приведенное индуктивное сопротивление трансформатора

$$x_T = \frac{U_{1н}}{k_T^2 I_{1н}} \cdot \frac{u_K \%}{100} = \frac{220 \cdot 6,5}{0,42^2 \cdot 183 \cdot 100} = 0,444 \text{ ом.}$$

Сглаживающий катодный дроссель выбирается из условия обеспечения работы ртутного выпрямителя в режиме непрерывных токов, согласно следующей зависимости:

$$L_{к.д} = \frac{BE_{2н}}{\omega' I_{x.x}} - l \frac{x_T}{\omega'} - L_d = \frac{0,46 \cdot 525}{314 \cdot 27} - 1 \frac{0,444}{314} - 0,0121 = 0,015 \text{ гн,}$$

где  $L_d$  — индуктивность якоря двигателя;  
 $B, l$  — коэффициенты, зависящие от схемы преобразователя;  
 $I_{x.x} = 27 \text{ а}$  — ток двигателя при  $P_{x.x}$  станка.

Выбирается дроссель типа ФРОС-200; 200 а; 0,15 гн.

2. Рассчитать характеристику «вход-выход» управляемого ртутного выпрямителя и определить его коэффициент передачи. Характеристика панели сеточного питания ПСП-11А с фазорегулятором ФС-13 приведена на рис. 5-6.

При применении трехфазного ртутного выпрямителя угол регулирования должен меняться в пределах  $0-90^\circ$ . Поэтому на характеристике панели сеточного питания выбирается участок, обеспечивающий угол сдвига отпирающих импульсов на сетках РВ в пределах  $\vartheta = 0-90^\circ$ .

Схема сеточного управления настраивается так, чтобы при  $I_y = 0$  выпрямитель был бы заперт. При этом  $\vartheta_p = 0, \vartheta = 90^\circ$ .

Для этого в дросселе насыщения фазорегулятора вводится смещение  $I_{сн} = 80 \text{ ма}$  (рис. 5-6).

Намагничивающая сила задающей обмотки

$$F_y = I_y \omega_3 = 200 I_y \text{ ав.}$$

Э. д. с. нерегулируемого ртутного выпрямителя

$$E_{РВ(0)} = \sqrt{2} E_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} = a E_{2н} = 1,17 \cdot 525 = 614 \text{ в,}$$

где  $m = 3$  — число фаз схемы выпрямления;

$a = 1,17$  — коэффициент, зависящий от схемы преобразователя.

Э. д. с. регулируемого (управляемого) ртутного выпрямителя

$$E_{РВ\vartheta} = E_{РВ(0)} \cos \vartheta = E_{РВ} \sin \vartheta_p = 614 \sin \vartheta_p, \quad (5-7)$$

где угол регулирования  $\vartheta_p = 90 - \vartheta$ .

Коэффициент передачи ртутного выпрямителя с системой управления

$$K_{РВ} = \frac{E_{РВ}}{F_y}, \frac{\text{в}}{\text{ав}}. \quad (5-8)$$

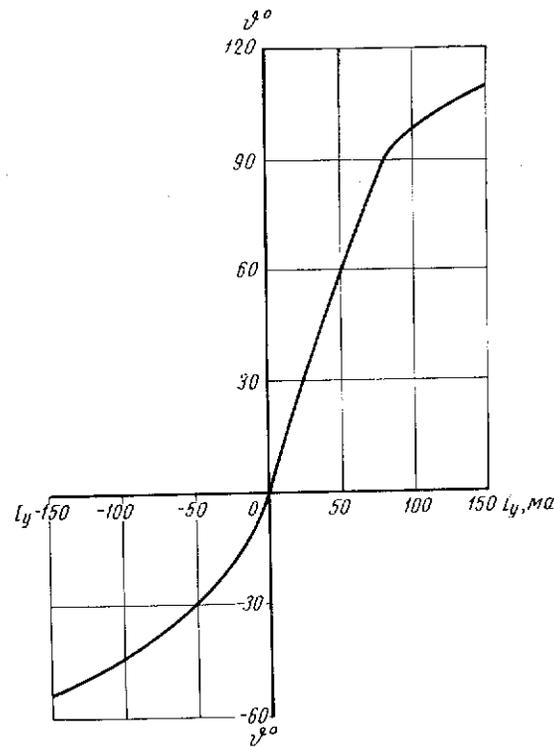


Рис. 5-6. Характеристика панели сеточного питания с фазорегулятором ФС-13

Характеристика выпрямителя и коэффициент передачи (рис. 5-7) рассчитываются при номинальном значении напряжения сети (кривая 2), а также при колебании его на  $+10\%$  (кривая 1) и  $-15\%$  (кривая 3).

Задаваясь значениями тока управления  $I_y$  и определяя угол  $\vartheta$  с учетом смещения, определяются значения  $F_y, \vartheta_p, E_{РВ}$  и  $K_{РВ}$ . Расчетные характеристики приведены на рис. 5-7.

3. Выбрать обратные связи и определить их коэффициенты [Л. 21]. Для обеспечения требуемой жесткости механических характеристик принимается замкнутая САУ с отрицательной обратной связью по напряжению и положительной по току двигателя. Для защиты двигателя и ртутного выпрямителя применяется отрицательная связь по току с отсечкой.

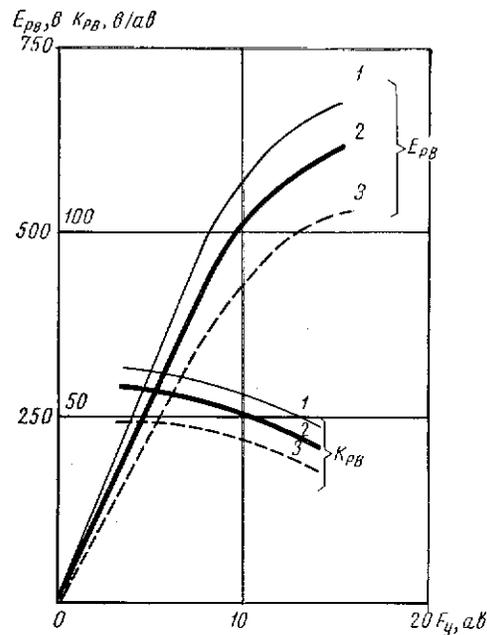


Рис. 5-7. Характеристики ртутного выпрямителя:  
1 — при повышенном; 2 — при номинальном; 3 — при пониженном напряжении сети

Составляются уравнения системы в статике

$$F_y = F_z - F_n + F_T - F_{T.о} \cdot 1 [I - I_{отс}]; \quad (5-9)$$

$$F_n = \alpha' (c'_e \omega + IR_d); \quad (5-10)$$

$$F_T = \beta' I; \quad (5-11)$$

$$F_{T.о} = \beta'' (I - I_{отс}); \quad (5-12)$$

$$F_y K_{PB} = E_{PB} = c'_e \omega + IR_s + \Delta U_{дуги}. \quad (5-13)$$

где  $F_z$ ,  $F_y$ ,  $F_n$ ,  $F_T$ ,  $F_{T.о}$  — намагничивающие силы: задающая управления и обратных связей по напряжению, току и току с отсечкой;

$\alpha'$ ,  $\beta'$ ,  $\beta''$  — коэффициенты обратных связей по напряжению, току и току с отсечкой;

$I_{отс}$  — ток отсечки;

$R_s$  — эквивалентное сопротивление якорной цепи РВ-Д

$$R_s = R_d + R_{к.д} + R_T + \frac{mX_T}{2\pi} =$$

$$= 0,19 + 0,0196 + 0,0785 + \frac{3 \cdot 0,444}{2 \cdot 3,14} = 0,5 \text{ ом};$$

$1 \cdot [I - I_{отс}]$  — единичная функция, равная нулю при значениях  $I < I_{отс}$  и равная единице при  $I > I_{отс}$ .

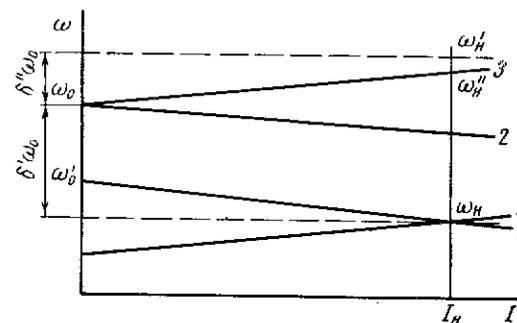


Рис. 5-8. Статические характеристики для расчета коэффициентов обратных связей

Определение коэффициентов обратных связей производится из условия обеспечения заданной точности поддержания скорости  $\Delta\omega = 5\%$  при изменении нагрузки двигателя от нуля до номинальной. При определении коэффициентов учитывается также влияние колебания напряжения сети на  $+10, -15\%$ , в связи с чем повышаются колебания скорости двигателя (рис. 5-8, характеристики 3, 4).

Заданная неточность поддержания скорости двигателя  $\delta = 0,05$  разбивается на два значения:  $\delta' = 0,04$  и  $\delta'' = 0,01$  (рис. 5-8).

Скорость идеального холостого хода двигателя

$$\omega_0 = \frac{\omega_n}{1 - \delta'} = \frac{33,5}{1 - 0,04} = 34,9 \text{ рад/сек.}$$

Максимальная скорость при номинальной нагрузке двигателя

$$\omega'_n = \omega_0 (1 + \delta'') = 34,9 (1 + 0,01) = 35,3 \text{ рад/сек.}$$

Обратная отрицательная связь по напряжению.

Связь подается на четвертую обмотку ДН фазорегулятора ( $\omega_n = 200$  витков,  $R_n = 6,64$  ом).

Величина коэффициента обратной связи определяется из уравнения (5-10) при допустимом значении намагничивающей силы  $F_{н. доп}$  обмотки ДН

$$\alpha' \leq \frac{F_{н. доп}}{c_e' \omega_n' + I_n R_n} = \frac{87}{12,1 \cdot 35,3 + 163 \cdot 0,19} = 0,19 \frac{ав}{в}$$

где

$$F_{н. доп} = I_{о. у 4} \omega_4 = 0,435 \cdot 200 = 87 ав.$$

Принимается  $\alpha' = 0,19 ав/в$ . Проверяется, не окажется ли, что  $\omega_0 < \omega_n$  при принятом значении  $\alpha'$ . Э. д. с. ртутного выпрямителя и н. с. обмотки управления ДН фазорегулятора:

при идеальном холостом ходе двигателя

а) при  $\omega_0$

$$E_{РВ(0)} = c_e' \omega_0 + \Delta U_{дуги} = 12,1 \cdot 34,9 + 20 = 442 в;$$

$F_{у(0)} = 7,1 ав$  (найдено по характеристике РВ при повышенном напряжении сети);

б) при  $\omega_n$

$$E'_{РВ(0)} = 12,1 \cdot 33,5 + 20 = 425 в;$$

$F'_{у(0)} = 9,9 ав$  (найдено по характеристике РВ при пониженном напряжении сети).

Значение коэффициента обратной связи по напряжению при пониженном напряжении сети

$$(\alpha')' = \frac{F'_{у(0)} - F_{у(0)}}{c_e' (\omega_0 - \omega_n)} = \frac{9,9 - 7,1}{12,1 (34,9 - 33,5)} = 0,165 \frac{ав}{в}$$

Так как  $(\alpha')' < \alpha'$ , то  $\omega_0 > \omega_n$ .

Задающая н. с. САУ при наименьшей скорости двигателя. Задающая н. с. определяется при повышенном напряжении сети

$$F_3 = F_{у(0)} + \alpha' c_e' \omega_0 = 7,1 + 0,19 \cdot 12,1 \cdot 34,9 = 87,3 ав.$$

Обратная положительная связь по току. Связь заводится на первую обмотку ДН фазорегулятора ( $\omega_r = 100$  витков;  $R_r = 1,1$  ом).

Величина коэффициента обратной связи по току определяется из уравнений (5-9)–(5-11) при номинальной нагрузке двигателя

$$\beta' \geq \frac{F_r}{I_n} = \frac{F_y - F_3 + \alpha' (c_e' \omega_n + I_n R_n)}{I_n};$$

$$\beta' = \frac{13,3 - 87,3 + 0,19 (12,1 \cdot 33,5 + 163 \cdot 0,19)}{163} = 0,054 \frac{ав}{а}$$

где  $F_y = 13,3 ав$  — н. с. управления, определяемая по характеристике РВ при пониженном напряжении сети и соответствующая э. д. с. ртутного выпрямителя

$$E_{РВ} = c_e' \omega_n + \Delta U_{дуги} + I_n R_n = 12,1 \cdot 33,5 + 20 + 163 \cdot 0,5 = 506,9 в.$$

Принимается  $\beta' = 0,054 ав/а$ . Проверка полученного значения  $\beta'$  производится из условия, что  $\omega_n' \leq \omega_n''$  (рис. 5-8). Для этого в уравнение (5-11') подставляется значение  $\omega_n'$  вместо  $\omega_n$  и  $F_y$  вместо  $F_{y'}$ .

Э. д. с. ртутного выпрямителя при  $\omega_n'$

$$E'_{РВ} = c_e' \omega_n' + \Delta U_{дуги} + I_n R_n = 12,1 \cdot 35,3 + 20 + 163 \cdot 0,5 = 528,5 в;$$

$F_y' = 8,9 ав$ , соответствующая  $E'_{РВ}$ , найдена по характеристике РВ при повышенном напряжении сети.

Коэффициент обратной связи по току при этом

$$(\beta')' = \frac{8,9 - 87,3 + 0,19 (12,1 \cdot 35,3 + 163 \cdot 0,19)}{163} = 0,054 \frac{ав}{а}$$

Так как  $(\beta')' = \beta'$ , то, следовательно,  $\omega_n'' = \omega_n'$ .

Связь снимается с дополнительных полюсов двигателя  $R_{д.п} = 0,03$  ом. Последовательно с обмоткой токовой связи включается  $R_{доп} = 0,01$  ом.

Обратная отрицательная связь по току с отсечкой.

Связь заводится на вторую обмотку ДН фазорегулятора ( $\omega_{т.о} = 100$  витков,  $R_{т.о} = 1,1$  ом).

Принимается: ток отсечки  $I_{отс} = 175 а$ ; ток стопорения  $I_{ст} = 225 а$ .

Э. д. с. выпрямителя при токе стопорения

$$E_{РВ_{ст}} = I_{ст} R_n + \Delta U_{дуги} = 225 \cdot 0,5 + 20 = 132,5 в.$$

Намагничивающая сила, соответствующая этой э. д. с., определяется по характеристике РВ при повышенном напряжении сети  $F_{у.ст} = 2,1 ав$ .

Намагничивающая сила задающей обмотки при токе стопорения

$$F_y = F_3 - \alpha' I_{ст} R_n + \beta' I_{ст} = 87,3 - 0,19 \cdot 225 \cdot 0,19 + 0,054 \cdot 225 = 91,35 ав.$$

Необходимая н. с. обмотки обратной отрицательной связи по току с отсечкой

$$F_{т.о. необх} = F_y - F_{у.ст} = 91,35 - 2,1 = 89,24 ав.$$

Необходимый коэффициент отрицательной связи по току с отсечкой из (5-12)

$$\beta'_{необх} = \frac{F_{т.о. необх}}{I_{ст} - I_{отс}} = \frac{89,24}{225 - 175} = 1,78 \frac{ав}{а}$$

Связь снимается с сопротивления дополнительных полюсов двигателя  $R_{ш} = R_{дп} = 0,03 \text{ ом}$ . Коэффициент обратной отрицательной связи по току с отсечкой

$$\beta'' = \frac{F_{т.о}}{I_{ст} - I_{отс}} = \frac{\omega_{т.о} R_{ш}}{R_{т.о} + R_{в}} = \frac{100 \cdot 0,03}{1,1 + 0,5} = 1,875 \frac{ав}{а},$$

где  $R_{в}$  — сопротивление вентиля, предварительно принятое равным  $0,5 \text{ ом}$ .

**4. Рассчитать статические характеристики электродвигателя.** Расчет производится по уравнениям (5-9)—(5-13).

Уравнения решаются совместно относительно тока двигателя

$$I = \frac{F_y - F_3 + \alpha' (E_{PB} - \Delta U_{дуги}) - \beta'' I_{отс} 1 [I - I_{отс}]}{\alpha' (R_3 - R_d) + \beta' - \beta'' 1 [I - I_{отс}]} \quad (5-14)$$

Из уравнения (5-13) определяется скорость двигателя

$$\omega = \frac{E_{PB} - \Delta U_{дуги} - IR_3}{c_e} \quad (5-13')$$

При расчете задаются значениями  $F_y$  и по характеристике ртутного выпрямителя определяют значения  $E_{PB}$ , а затем значения  $I$  по уравнению (5-14) и  $\omega$  по уравнению (5-13').

Расчет характеристики производится для двух значений скорости двигателя  $\omega_{мин}$  и  $\omega_{макс}$ .

Расчетные уравнения

$$I = \frac{F_y - 87,3 + 0,19 (E_{PB} - 20) - 1,875 \cdot 175 \cdot 1 [I - 175]}{0,19 (0,5 - 0,19) + 0,054 - 1,875 \cdot 1 [I - 175]} =$$

$$= \frac{F_y - 91,1 + 0,19 E_{PB} - 328 \cdot 1 [I - 175]}{0,113 - 1,875 \cdot 1 [I - 175]},$$

$$\omega = \frac{E_{PB} - 20 - 0,5 I}{c_e},$$

где  $c_e = 12,1 \text{ в/рад/сек}$  при  $\omega_{мин} = 33,5 \text{ рад/сек}$ ;

$c_e = 3,03 \text{ в/рад/сек}$  при  $\omega_{макс} = 134 \text{ рад/сек}$ .

Статические характеристики построены на рис. 5-9: а) для напряжения сети  $U_c = 1,1 U_{н}$ ; б) для  $U_c = U_{н}$ ; в) для  $U_c = 0,85 U_{н}$ .

**5. Рассчитать графики переходных процессов двигателя для  $\omega_{макс}$ .** Пуск главного двигателя токарного станка осуществляется вхолостую. Нагрузка двигателя обусловлена потерями в станке и двигателе. При соприкосновении резца с заготовкой происходит приложение нагрузки.

Для быстрой остановки двигателя применяется электрическое торможение.

Следовательно, характерными переходными процессами главного электропривода токарного станка являются: пуск двигателя вхолостую, приложение нагрузки и торможение.

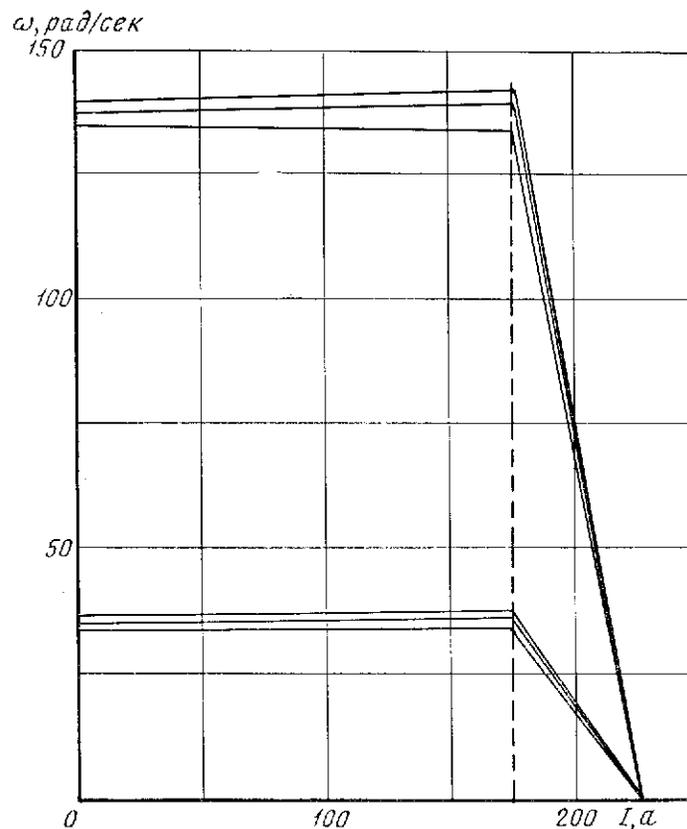


Рис. 5-9. Статические характеристики привода

Расчет переходных процессов, имеющих место при пуске и приложении нагрузки, производится методом фазовой плоскости (канонических полигонов), так как дифференциальное уравнение САУ имеет второй порядок (управляемый ртутный выпрямитель считается безынерционным).

Составляются дифференциальные уравнения САУ

$$[F_3 - \alpha' (c_e'' \omega + i R_d) + \beta' i - \beta'' (i - I_{отс}) 1 [i - I_{отс}]] K_{PB} = e_{PB}; \quad (5-15)$$

$$e_{PB} = c_e'' \omega + iR_3 + \Delta U_{\text{дуги}} + L \frac{di}{dt}; \quad (5-16)$$

$$i - I_c = \frac{J_{\text{пр}}}{c_M} \frac{d\omega}{dt}, \quad (5-17)$$

где  $L$  — индуктивность якорной цепи;

$$L = L_d + L_{к.д} + L_r = 0,43 \text{ гн}; \quad (5-18)$$

$J$  — момент инерции привода, приведенный к валу двигателя, равен  $26,54 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Из уравнений (5-16) и (5-17) находятся производные

$$\frac{di}{dt} = \frac{e_{PB}(\omega, i) - c_e'' \omega - iR_3 - \Delta U_{\text{дуги}}}{L}; \quad (5-16')$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{i - I_c}{J/c_M}. \quad (5-17')$$

Основное уравнение метода канонических полигонов. Направление вектора поля

$$\text{tg } \nu = \frac{d\omega}{di} = \frac{(i - I_c) L \frac{c_M''}{J_{\text{пр}}}}{e_{PB}(\omega, i) - (c_e'' \omega + iR_3 + \Delta U_{\text{дуги}})}. \quad (5-19)$$

Уравнения нулевой и бесконечной изоклин

$$\frac{d\omega}{dt} = 0 \quad \text{или} \quad i = I_c; \quad (5-20)$$

$$\frac{di}{dt} = 0 \quad \text{или} \quad e_{PB}(\omega, i) = c_e'' \omega + iR_3 + \Delta U_{\text{дуги}}. \quad (5-13')$$

Пуск двигателя до максимальной скорости. Уравнения нулевой и бесконечной изоклин

$$i = I_c = I_{x,x} = 19,4 \text{ а};$$

$$\omega = \frac{e_{PB}(\omega, i) - 0,5i + 20}{3,03};$$

где  $I_{x,x}$  — ток статической нагрузки двигателя при холостом ходе станка.

Уравнение бесконечной изоклины является уравнением скоростной характеристики. Нулевая и бесконечные изоклины построены на фазовой плоскости рис. 5-10, а. Точка пересечения изоклин является точкой покоя и соответствует установившемуся движению в системе при

$$\omega_{\text{уст}} = 137,5 \text{ рад/сек}; \quad i = 19,4 \text{ а}.$$

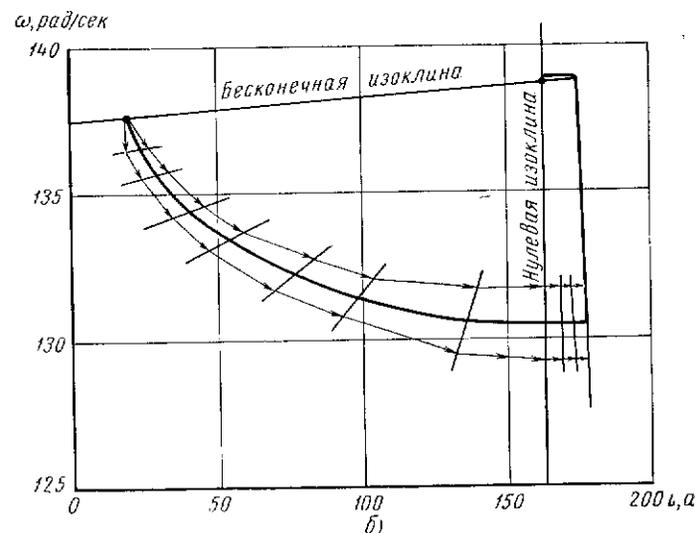
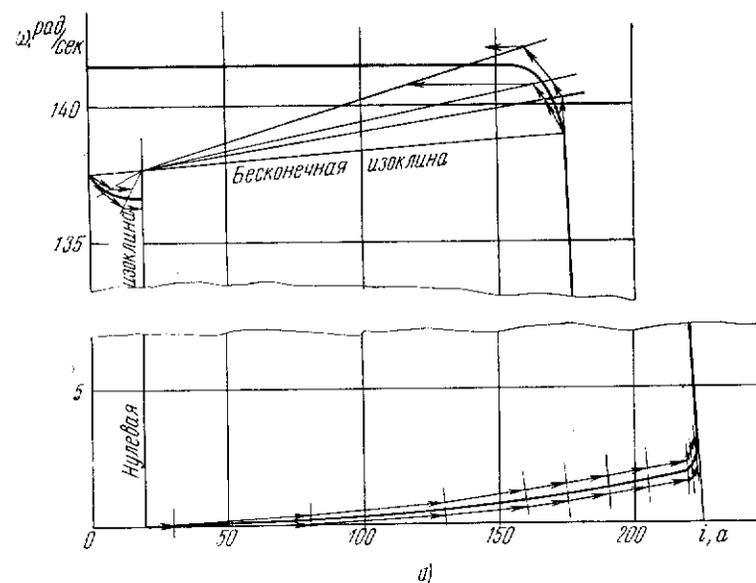


Рис. 5-10. Построение фазовой траектории:  
а — при управляющем воздействии; б — при возмущающем воздействии

Расчет правоканонического полигона.

Расчетное уравнение

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{\Delta \omega}{\Delta i} \approx \frac{(i - 19,4) 0,43 \frac{3,03}{26,54}}{e_{PB}(\omega, i) - (3,03\omega + 0,42i + 20)} = \frac{(i - 19,4) 0,049}{e_{PB}(\omega, i) - (3,03\omega + 0,42i + 20)}, \quad (5-19')$$

где  $e_{PB}(\omega, i)$  — определяется по характеристике преобразователя  $E_{PB} = f(F_y)$  (рис. 5-7).

Намагничивающая сила управления  $PB(F_y)$  определяется по уравнению

$$F_y = F_3 - \alpha' (c_e'' \omega + iR_{\lambda}) + \beta' i - \beta'' (i - I_{отс}) 1 [i - I_{отс}] = 87,3 - 0,19(3,03\omega + i 0,19) + 0,054 i - 1,875 (i - 175) 1 [i - 175] = 87,3 - 0,575\omega + 0,018 i - 1,875 (i - 175) 1 [i - 175].$$

Результаты расчетов сводятся в табл. 5-2.

Таблица 5-2

Номер шага	$i, a$	$e_{PB}, e$	$\frac{\operatorname{tg} \nu, \text{рад/сек}}{a}$	$\Delta i, a$	$\Delta \omega, \text{рад/сек}$	$\omega, \text{рад/сек}$
1	19,4	615	0	10,6	0	0
2	30	615	0,000875	50	0,044	0
3	80	615	0,0053	50	0,265	0,044
4	130	615	0,0099	30	0,297	0,309
5	160	615	0,0131	15	0,197	0,606
6	175	615	0,0147	15	0,22	0,803
7	190	615	0,0164	15	0,247	1,023
8	205	615	0,018	15	0,27	1,27
9	220	480	0,028	2	0,056	1,54
10	222	325	0,048	1	0,048	1,6
11	223	170	0,2	1	0,2	2,08
12	224	140	0,53	—	—	2,28

Правоканонический полигон построен на фазовой плоскости (рис. 5-10, а).

Построение левоканонического полигона. Построение производится на фазовой плоскости методом, описанным в [Л. 14].

Промежуточные изоклины определяются следующим способом: а) при  $i < I_{отс}$  изоклины с допустимой погрешностью считаются прямолинейными и проводятся через точку покоя;

б) при  $i > I_{отс}$  изоклины нелинейны, но на малом участке могут считаться линейными. Этот участок определяется, если задаваться значениями скорости двигателя, близкими к расчетным на данном шаге и по известному  $\operatorname{tg} \nu$  ( $\operatorname{tg} \nu$  на одной изоклине постоянен) определять значения тока из выражения

$$i = \frac{\operatorname{tg} \nu [e_{PB}(\omega, i) - 3,03\omega - 20] + 0,049 \cdot 19,4}{0,42 \operatorname{tg} \nu + 0,049}. \quad (5-19'')$$

Задаемся скоростью  $\omega = 5 \text{ рад/сек}$  и определяем значение тока  $i$  на каждом шаге расчета правоканонического полигона (начиная с 5-го шага).

Результаты расчета сведены в табл. 5-3.

Таблица 5-3

Номер шага	$\omega, \text{рад/сек}$	$e_{PB}, e$	$\operatorname{tg} \nu, \frac{\text{рад/сек}}{a}$	$i, a$
5	5	615	0,013	155
6		615	0,0147	171
7		615	0,0164	186
8		615	0,018	203
9		480	0,028	219
10		325	0,048	220

Построение фазовой траектории. Фазовая траектория проводится посередине между правым и левым каноническими полигонами. Начиная с 12-го шага расчета, фазовая траектория сливается с бесконечной изоклиной до значений  $\omega = 139,2 \text{ рад/сек}$  и  $i = 175 a$ . Далее расчет производится аналогично и приводится на рис. 5-10, а.

При скорости двигателя  $\omega = 141,5 \text{ рад/сек}$ ,  $e_{PB} = 450 e$  и она полностью уравновешивается противо-э. д. с. двигателя и падением напряжения в дуге

$$c_e'' \omega + \Delta U_{\text{дуги}} = 3,03 \cdot 141,5 + 20 = 450 e.$$

Ток при этом становится равным нулю. Э. д. с.  $PB$  уменьшается, так как прекращает действовать обратная положительная связь по току. С этого момента начинается выбег двигателя, который будет проходить до тех пор, пока противо-э. д. с. двигателя  $c_e'' \omega$  не сравняется с э. д. с.  $PB$  ( $e_{PB} - \Delta U_{\text{дуги}}$ ). Это произойдет при скорости  $\omega = 137,3 \text{ рад/сек}$ , когда противо-э. д. с. двигателя будет

$$c_e'' \omega = 3,03 \cdot 137,3 = 418 e,$$

н. с. управления  $PB$

$$F_y = F_3 - \alpha' c_e'' \omega = 87,3 - 0,19 \cdot 418 = 7,7 a e;$$

$e_{PB} = 438 e$  (определяется по характеристике  $PB$ ).

Напряжение  $PB$  с учетом падения напряжения в дуге

$$U_{PB} = e_{PB} - \Delta U_{\text{дуги}} = 438 - 20 = 418 e.$$

Время выбега двигателя

$$t_{\text{выб}} = J_{\text{пр}} \frac{\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{кон}}}{M_c} = 26,54 \frac{141,5 - 137,3}{235} = 0,48 \text{ сек.}$$

При дальнейшем снижении скорости двигателя начинает расти ток якоря двигателя и расчет может быть продолжен методом фазовой плоскости (рис. 5-10, а).

Приложение нагрузки.

Нулевая изоклина  $i = I_c = 163 \text{ а.}$

Бесконечная изоклина остается той же.

Точка покоя  $\omega_{\text{уст}} = 139 \text{ рад/сек.}, i_{\text{уст}} = 163 \text{ а.}$

Расчетное уравнение

$$\text{tg } \nu = \frac{(i - 163) 0,049}{e_{\text{РВ}}(\omega, i) - (3,03\omega + 0,49i + 20)}. \quad (5-19'')$$

Расчет полигонов и фазовой траектории проводится аналогично и приведен на рис. 5-10, б.

Расчет кривых переходного процесса производится графоаналитическим интегрированием уравнения (5-17), в котором дифференциалы заменяются конечными приращениями и определяется приращение времени

$$\Delta t = \frac{J_{\text{пр}} \Delta \omega}{c_M (i - I_c)}, \quad (5-21)$$

где  $I_c = 19,4$  — для процесса пуска;

$I_c = 163$  — для процесса приложения нагрузки.

Задавая значение тока  $i$ , определяют по фазовой траектории значение скорости  $\omega$ , затем определяют  $\Delta \omega_m = \omega_m - \omega_{m-1}$ ,  $\Delta t$  по (5-21) и время  $t_{(m)} = t_{(m-1)} + \Delta t_{(m)}$ .

Расчетные кривые рассмотренных переходных процессов приведены на рис. 5-11, где 1 — пуск; 2 — приложение нагрузки.

Расчет динамического торможения производится классическим методом по уравнениям [Л. 2]

$$\omega(t) = -\Delta \omega_c + (\omega_{\text{нач}} + \Delta \omega_c) e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (5-22)$$

$$i(t) = I_c - (I_{\text{нач}} + I_c) e^{-\frac{t}{T_M}}, \quad (5-23)$$

где

$$T_M = \frac{J_{\text{пр}}(R_d + R_{д.т})}{c_e c_M} = \frac{26,54(0,19 + 1,93)}{3,03 \cdot 3,03} = 6,14 \text{ сек.}$$

Графики переходных процессов приведены на рис. 5-11 (участок 3).

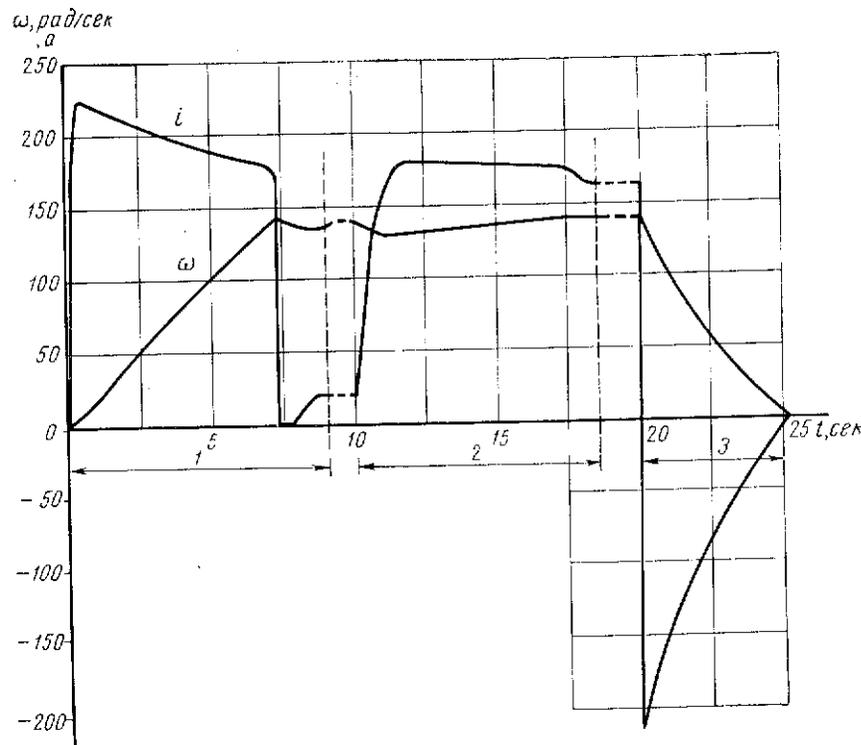


Рис. 5-11. Графики переходных процессов

#### § 5-4. Главный электропривод по системе «полупроводниковый выпрямитель — двигатель» (ПВ—Д)

Упрощенная схема системы ПВ—Д приведена на рис. 5-12 [Л. 22]. Двигатель П133-4К; 100 кат; 440 в; 254 а; 300 — 1500 об/мин;  $k_e = 15 \text{ в/об} \cdot \text{мин}$ ;  $k_m = 9,55 \text{ к}_e = 143 \text{ н} \cdot \text{м/вб} \cdot \text{а}$ ;  $R_B = 3,96 \text{ ом}$ . Трансформатор ТСУ-120/0,5; 120 ква;  $U_1/U_2 = 380/330 \text{ в}$  (вторичная обмотка трансформатора перемотана). Тахогенератор  $\gamma = 0,146 \text{ в/об} \cdot \text{мин}$ .

САУ должна обеспечить перепад скорости не выше 10% от скорости идеального холостого хода при колебании нагрузки от нуля до номинальной. Допускается, что колебания напряжения сети незначительны.

**1. Выбрать вентили.** Выбор вентиля производится исходя из требуемых значений тока вентиля и обратного напряжения [Л. 23]. Среднее значение прямого тока вентиля

$$I_{\text{в. ср}} = \frac{I_{\text{д. н}}}{m} = \frac{254}{3} = 84,6 \text{ а.}$$

Обратное напряжение, приложенное к вентилю,

$$U_{обр} = 1,045 U_d = 1,045 \cdot 440 = 460 \text{ в.}$$

Максимальное обратное напряжение, равное амплитудному значению вторичного напряжения трансформатора,

$$U_{обр, макс} = \sqrt{2} \sqrt{3} U_{2\phi} = \sqrt{2} \sqrt{3} \cdot 190 = 466 \text{ в.}$$

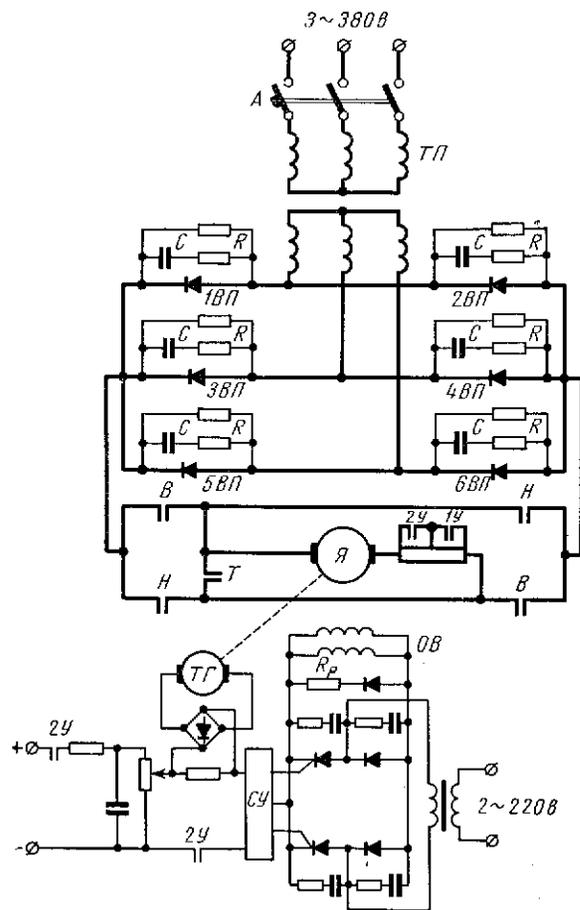


Рис. 5-12. Схема главного электропривода токарного станка по системе полупроводниковый выпрямитель — двигатель (ПВ—Д)

Ток и обратное напряжение вентиля с учетом запаса по току и напряжению

$$I_B = k_{зI} I_{расч} = 2 \cdot 84,6 = 169,2 \text{ а;}$$

$$U_{обр} = k_{зU} U_{расч} = 1,5 \cdot 466 = 700 \text{ в,}$$

где  $k_{зI}$ ,  $k_{зU}$  — коэффициенты запаса по току и напряжению. Принимаются вентили типа ПВК-200-7Б; 200 а; 700 в.

**2. Рассчитать статические характеристики двигателя.** В разомкнутой системе падение скорости двигателя при номинальной нагрузке превышает допустимое значение 10%. Поэтому для повышения жесткости механической характеристики применяется замкнутая система.

Так как преобразователь, питающий двигатель, неуправляемый, то применяется замкнутая САУ с обратной связью по скорости двигателя, включенной в цепь обмотки возбуждения двигателя (рис. 5-11).

Уравнение статики для идеального холостого хода:

$$U_{y0} = U_s - \gamma n_0; \quad (5-24)$$

$$U_{B0} = U'_B - K_n U_{y0}; \quad (5-25)$$

$$E_{d0} = k_e \Phi_0 n_0 = U_{d0}; \quad (5-26)$$

$$\Phi_0 = K'_d U_{B0}, \quad (5-27)$$

где  $U_s$ ,  $U_y$ ,  $U_B$  — напряжения задающее, управления и возбуждения;  $U'_B$  — напряжение на обмотке возбуждения при  $U_y = 0$ , принятое по характеристике преобразователя (рис. 5-13);

$K'_d = f(U_n)$  — коэффициент передачи двигателя (рис. 5-14);

$K_n$  — коэффициент усиления преобразователя.

При изменении нагрузки двигателя в системе будут изменяться напряжение на обмотке возбуждения, ток, поток и скорость двигателя.

Уравнения с учетом приращений величин будут иметь следующий вид:

$$U_{y0} - \Delta U_y = U_s - \gamma (n_0 - \Delta n); \quad (5-24')$$

$$U_{B0} - \Delta U_B = U'_B - K_n (U_{y0} + \Delta U_y); \quad (5-25')$$

$$k_e (\Phi_0 - \Delta \Phi) (n_0 - \Delta n) = U_{d0} - \Delta IR; \quad (5-26')$$

$$\Phi_0 - \Delta \Phi = K'_d (U_{B0} - \Delta U_B). \quad (5-27')$$

Исключая значения, соответствующие идеальному холостому ходу и пренебрегая приращением второго порядка, получаем уравнения в приращениях:

$$\Delta U_y = \gamma \Delta n; \quad (5-24'')$$

$$\Delta U_B = K_n \Delta U_y; \quad (5-25'')$$

$$k_e n_0 \Delta \Phi + k_e \Phi_0 \Delta n = \Delta IR; \quad (5-26'')$$

$$\Delta\Phi = K'_d \Delta U_B. \quad (5-27'')$$

Решаем уравнения относительно падения скорости двигателя

$$\Delta n = \frac{\Delta I R}{k_e (K_n K'_d \gamma n_0 + \Phi_0)}, \quad (5-28)$$

где  $R$  — эквивалентное сопротивление якорной цепи

$$R = R_d + R_r + 2R_{вп} + \frac{m x_r}{2\pi} = 0,26 \text{ ом};$$

$x_r, R_r$  — индуктивное и активное сопротивления фазы вторичной обмотки трансформатора;

$R_{вп}$  — сопротивление вентиля.

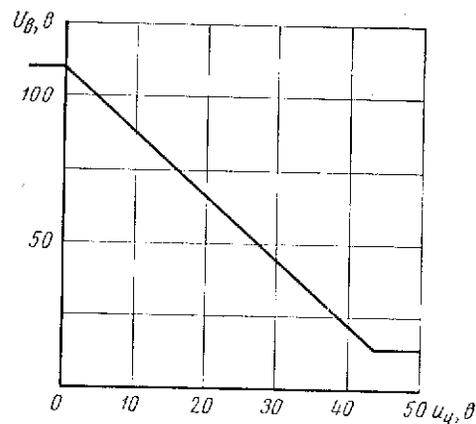


Рис. 5-13. Характеристика преобразователя в обмотке возбуждения двигателя

Расчет характеристики для номинальной скорости двигателя. Скорость идеального холостого хода

$$n_0 = \frac{n_n}{1-\delta} = \frac{300}{1-0,1} = 333 \text{ об/мин.}$$

Магнитный поток двигателя, соответствующий скорости двигателя  $n_0 = 333 \text{ об/мин.}$

$$\Phi_0 = \frac{U_{д0}}{k_e n_0} = \frac{445}{15 \cdot 333} = 0,089 \text{ вб},$$

где  $U_{д0} = 1,35 U_{2T} = 1,35 \cdot 330 = 445 \text{ в.}$

Напряжение возбуждения

$$U_B(\Phi_0) = I_B(\Phi_0) \cdot 1,2 R_B = 23,1 \cdot 1,2 \cdot 3,96 = 110 \text{ в}$$

$I_B(\Phi_0)$  определяется по кривой  $\Phi_0 = f(I_B)$ , рис. 5-14).

Коэффициент передачи двигателя [определяется по кривой (рис. 5-14)]

$$K'_d = 2,3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{вб}}{\text{в}}$$

Задающее напряжение

$$U_3 = U_{y0} + \gamma n_0 = \frac{U'_B - U_B(\Phi_0)}{K_n} + \gamma n_0 = \frac{110 - 110}{2,2} + 0,146 \cdot 333 = 48,6 \text{ в.}$$

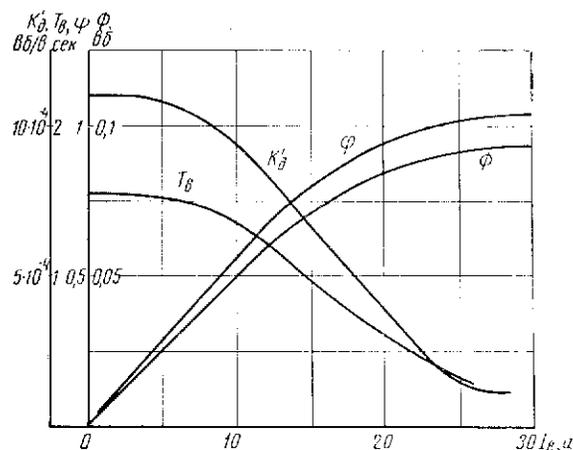


Рис. 5-14. Зависимости магнитного потока, коэффициента передачи и постоянной времени обмотки возбуждения двигателя от его тока возбуждения

Расчет производится методом последовательных приближений. Падение скорости при  $\Delta I = 50 \text{ а}$  по формуле (5-28)

$$\Delta n = \frac{50 \cdot 0,26}{15 (2,2 \cdot 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,146 \cdot 333 + 0,089)} = 7,6 \text{ об/мин.}$$

Проверка коэффициента преобразования двигателя

$$U_B = U_{B0} - \Delta U_B = U_{B0} - K_n \gamma \Delta n = 110 - 2,2 \cdot 0,146 \cdot 7,6 = 107,5 \text{ в};$$

$$K'_d = 2,63 \cdot 10^{-4} \frac{\text{вб}}{\text{в}}$$

Принимаем  $K'_d = 2,6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{вб}}{\text{в}}$ ;

$$\Delta n = \frac{50 \cdot 0,26}{15 (2,2 \cdot 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,146 \cdot 333 + 0,089)} = 7,4 \text{ об/мин.}$$

Проверка

$$U_B = 110 - 2,2 \cdot 0,146 \cdot 7,4 = 107,7 \text{ в};$$

$$K'_d = 2,6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{вб}}{\text{в}}$$

Аналогично рассчитаны другие точки характеристики и все остальные характеристики, приведенные на рис. 5-15.

Падение скорости в процентах при номинальной нагрузке получается согласно табл. 5-4.

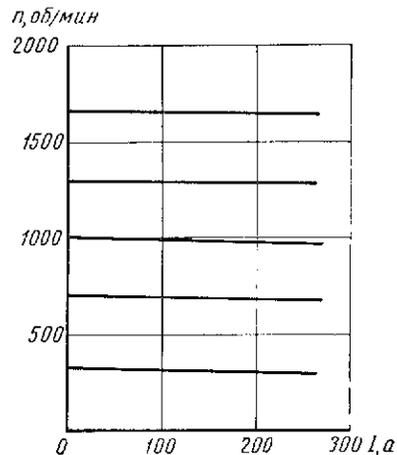


Рис. 5-15. Статические характеристики

Таблица 5-4

$n_0$ , об/мин	333	700	1000	1300	1670
$\Delta n$ , %	9,9	2,26	1,16	0,665	0,432

3. Рассчитать кривые переходного процесса пуска и торможения двигателя. Составляется система дифференциальных уравнений.

$$u_B = U_B - K_{\Pi}(u_3 - \gamma n); \quad (5-29)$$

$$u_B = i_B R_B + L_B \frac{di_B}{dt}; \quad (5-30)$$

$$\Phi = K_{\Phi} i_B; \quad (5-31)$$

$$u_d = c_e n + iR; \quad (5-32)$$

$$i = \frac{M_c}{c_M} + \frac{J}{9,55 c_M} \frac{dn}{dt}. \quad (5-33)$$

Индуктивность якорной цепи в расчете не учитывается.

Пуск двигателя выше основной скорости и до  $n_{\max} = 1500$  об/мин. Этот процесс имеет место за счет ослабления магнитного потока двигателя при включении контактора ускорения 2У и замыкании системы автоматического управления.

Начальные условия. Начальная скорость двигателя, имеющая место в момент включения 2У, —  $n_{\text{нач}} = 287$  об/мин. Начальный ток якоря  $i_{\text{нач}} = 254$  а. Напряжение на обмотке возбуждения двигателя  $u_B = 110$  в. Ток обмотки возбуждения  $i_B = 23,1$  а. Магнитный поток двигателя  $\Phi_{\text{нач}} = \Phi_{\Pi} = 0,089$  вб [определяется по кривой  $\Phi = f(i_{\Pi})$  (рис. 5-14)].

При пуске двигателя с ослаблением магнитного потока могут возникать недопустимые броски тока якоря. Поэтому задающее напряжение подается не скачком, а по экспоненциальному закону, определяемому схемой (рис. 5-12).

Расчет производится методом конечных приращений.

Заменяя в уравнениях (5-30)—(5-33) производные отношением конечных приращений и производя некоторые преобразования, получаем расчетные формулы

$$\Delta i_B(m) = \frac{[I_B(m) - i_B(m)]}{\frac{T_n(i_B)}{\Delta t} + \frac{1}{2}}, \quad (5-34)$$

где

$$I_B(m) = \frac{110 - 2,2[u_3(m) - 0,146n(m)]}{1,2 \cdot 3,96};$$

$$u_3 = 286 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad T = 1 \text{ сек};$$

$$i_B(m) = i_B(m-1) + \Delta i_B(m-1);$$

$$\Delta n(m) = \frac{\Phi_{\text{II}}^2(m)}{\frac{T_M}{\Delta t} + \frac{\Phi_{\text{II}}^2(m)}{2}} \left[ \frac{\frac{U_d}{k_{e\Phi} \Phi_{\Pi}} - \Delta n_{c.\Pi}}{\Phi_{\text{II}}^2(m)} - n(m) \right], \quad (5-35)$$

где  $\Delta t = 0,025$  сек (принимается);

$$\Phi_{\text{II}}(m) = \frac{\Phi(m)}{\Phi_{\Pi}} = f(i_B(m)); \quad (\text{см. рис. 5-14});$$

$$T_M = \frac{JR}{9,55 k_{e\Phi} k_{M\Phi} \Phi_{\Pi}^2} = \frac{51,25 \cdot 0,26}{9,55 \cdot 15 \cdot 143 \cdot 0,089^2} = 0,082 \text{ сек};$$

$$\frac{U_d}{k_{e\Phi} \Phi_{\Pi}} = \frac{445}{15 \cdot 0,089} = 333 \text{ об/мин};$$

$$\Delta n_{с.н} = \frac{M_c R}{k_{ен} k_{Мн} \Phi_n^2} = \frac{250 \cdot 0,26}{15 \cdot 143 \cdot 0,089^2} = 3,8 \text{ об/мин};$$

$$n_{(m)} = n_{(m-1)} + \Delta n_{(m-1)};$$

$$i_{(m)} = \frac{U_d - c_{ен} \varphi_{(m)} n_{(m)}}{R} = \frac{445 - 15 \cdot 0,089 \varphi_{(m)} n_{(m)}}{0,26} = 1710 - 5,15 \varphi_{(m)} n_{(m)}. \quad (5-36)$$

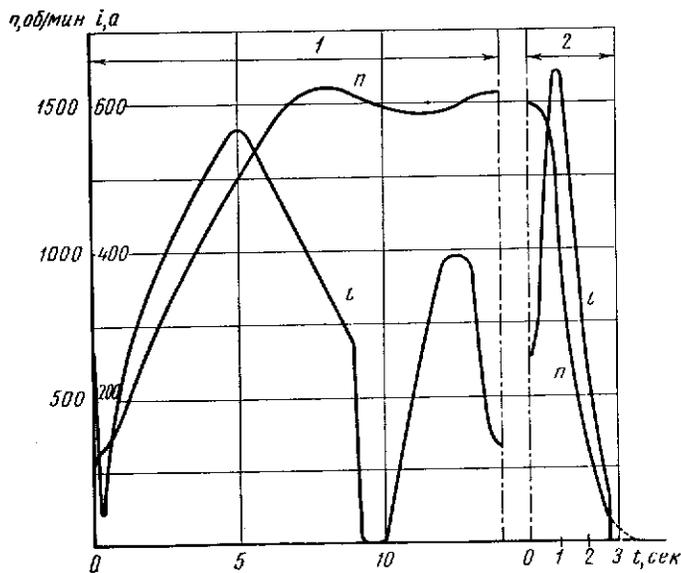


Рис. 5-16. Графики переходных процессов

Начало расчета приведено в табл. 5-5. Кривые переходного процесса пуска двигателя построены на рис. 5-16, где 1 — пуск; 2 — торможение.

Из графика скорости видно, что переходный процесс разгона двигателя заканчивается за 6,92 с, т. е. скорость двигателя входит в область 5% отклонений.

Перерегулирование скорости

$$\sigma = \frac{n_{\max} - n_{уст}}{n_{уст}} 100 = \frac{1555 - 1505}{1505} 100 = 3,32\%.$$

Динамическое торможение двигателя со скорости  $n = 1505 \text{ об/мин}$  до нуля. При динамическом торможении со скорости выше основной с одновременным усилением магнитного потока двигателя до номинального также могут возникнуть

Параметры	Номер шага							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$t, \text{сек}$	0,025	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200
$u_3, \text{в}$	7,2	14	20,6	27,2	33,8	39,8	44	51,8
$\gamma_n, \text{в}$	42	43,5	44,7	45,6	46,3	46,8	47	47,4
$u_y, \text{в}$	34,8	29,5	24,1	18,4	12,5	7	3	4,4
$u_b, \text{в}$	110	110	110	110	110	110	110	100
$I_b, \text{а}$	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	21
$i_b, \text{а}$	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1
$T_n, \text{сек}$	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
$\Delta I_b, \text{а}$	0	0	0	0	0	0	0	-0,12
$\varphi$	1	1	1	1	1	1	1	1
$n, \text{об/мин}$	287	298	306	312	317	320	322	324
$\Delta n, \text{об/мин}$	11	8	6	5	3	2	2	1
$i, \text{а}$	233	175	133	100	80	60	50	40

недопустимые значения тока. Поэтому задающее напряжение спадает по экспоненциальному закону.

Начальные условия:  $n_{\text{нач}} = 1505 \text{ об/мин}$ ;  $i_{\text{нач}} = 250 \text{ а}$ ;  $\Phi_{\text{нач}} = 0,0187 \text{ вб}$ ;  $i_{в.нач} = 3,35 \text{ а}$ . Расчетные формулы те же, что и при разгоне двигателя, только изменяются формулы задающего напряжения, приращения скорости двигателя и тока.

Они выглядят следующим образом:

$$u_3 = 286e^{-\frac{t}{T}},$$

где  $T = 1 \text{ сек}$ ;

$$\Delta n_{(m)} = - \frac{\varphi_{(m)}^2}{\frac{T_M}{\Delta t} + \frac{\varphi_{(m)}^2}{2}} \left[ \frac{\Delta n_{с.н}}{\varphi_{(m)}^2} - n_{(m)} \right], \quad (5-35')$$

где  $\Delta t = 0,1 \text{ сек}$ ;

$$T_M = \frac{J R_{д.т}}{9,55 k_{ен} k_{Мн} \Phi_n^2} = \frac{51,25 \cdot 1,67}{9,55 \cdot 15 \cdot 143 \cdot 0,089^2} = 0,53 \text{ сек};$$

$$R_{д.т} = R_y + R_T = 0,15 + 1,52 = 1,67 \text{ ом};$$

$$\Delta n_{с.н} = \frac{M_c R_{д.т}}{k_{ен} k_{Мн} \Phi_n^2} = \frac{250 \cdot 1,67}{15 \cdot 143 \cdot 0,089^2} = 24,7 \text{ об/мин};$$

$$i_{(m)} = \frac{k_{ен} \Phi_n \varphi_{(m)} n_{(m)}}{R_{д.т}} = \frac{15 \cdot 0,089 \varphi_{(m)} n_{(m)}}{1,67} = 0,798 \varphi_{(m)} n_{(m)}. \quad (5-36')$$

Расчеты производятся аналогично. Кривые переходного процесса при динамическом торможении построены на рис. 5-16.

При противо-э. д. с. двигателя, равной 73,5 в, отпадает реле торможения РТ, прекращается динамическое торможение и двигатель тормозится под действием статического момента.

Скорость двигателя при этом

$$n = \frac{E}{k_{\text{ен}} \Phi_{\text{кон}}} = \frac{73,5}{15 \cdot 0,065} = 75,3 \text{ об/мин.}$$

Время торможения

$$t_{\text{т}} = \frac{J}{9,55} \frac{n}{M_{\text{с}}} = \frac{51,25 \cdot 75,3}{9,55 \cdot 250} = 1,6 \text{ сек.}$$

### § 5-5. Электропривод подачи по системе «управляемый полупроводниковый выпрямитель (тиристор) — двигатель» (УПВ — Д)

Электрическая схема электропривода подачи с тиристорным преобразователем приведена на рис. 5-17. Электропривод разработан в ЭНИМСе [Л. 24]. Он включает в себя двигатель типа П41; 6 кВт; 110 в; 66,5 а; 3000 об/мин; питающий трансформатор; управляемый тиристорный преобразователь с системой управления и промежуточный усилитель на транзисторах.

Тиристорный преобразователь имеет шесть тиристоров типа УПК-50; класса 2,5; 50 а; 250 в; включенных по трехфазной мостовой схеме. От коммутационных перенапряжений тиристоры защищаются разрядными цепочками R—C, включенными параллельно вентилям и вторичной обмотке трансформатора. Для уменьшения перенапряжений, возникающих при отключении привода контактором, разрывается цепь вторичной обмотки трансформатора. Защита от токов к. з. и перегрузок осуществляется автоматом.

Система управления тиристорами работает по вертикальному принципу. Каждый тиристор имеет индивидуальный блок управления БУ. Коэффициент усиления усилителя  $K_{\text{у}} \geq 30$ .

Электропривод содержит также блок пилообразного напряжения БПН и блок питания БП. Структурная схема системы автоматического управления представлена на рис. 5-18, а.

Система автоматического поддержания постоянства скорости двигателя является замкнутой с обратной отрицательной связью по скорости, осуществляемой с помощью тахогенератора типа ТМГ-30П; 250 в; 4000 об/мин. Расчет статических характеристик аналогичен рассмотренному в § 5-3 и здесь не приводится.

Ограничение нагрузки двигателя выше значений  $(2-2,5)I_{\text{д.н}}$  обеспечивается обратной отрицательной связью по току с отсечкой, осуществляемой с помощью блока токоограничения БТ.

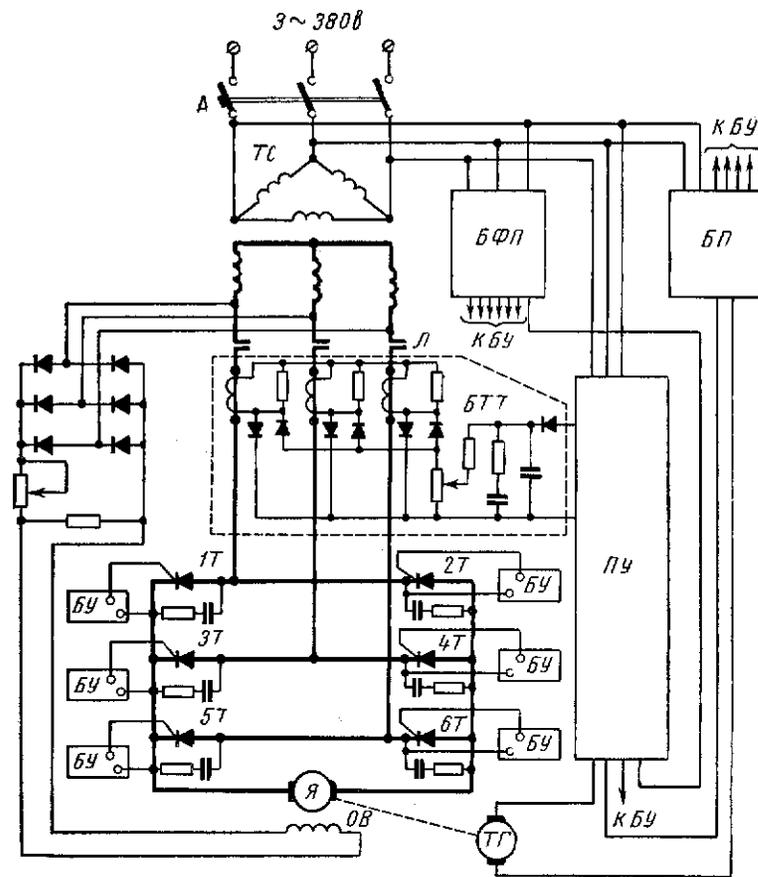


Рис. 5-17. Схема привода подачи карусельного станка по системе тиристорный преобразователь—двигатель

Регулирование скорости двигателя осуществляется изменением задающего напряжения САУ и тем самым изменением напряжения на якоре двигателя.

При изменении задающего напряжения происходит сдвиг управляющего импульса на управляющих электродах тиристоров и тем самым происходит изменение момента открытия тиристоров и, следовательно, изменение выпрямленного напряжения на якоре двигателя.

1. Определить передаточные функции звеньев и передаточную функцию разомкнутой системы. Передаточная функция промежуточного усилителя

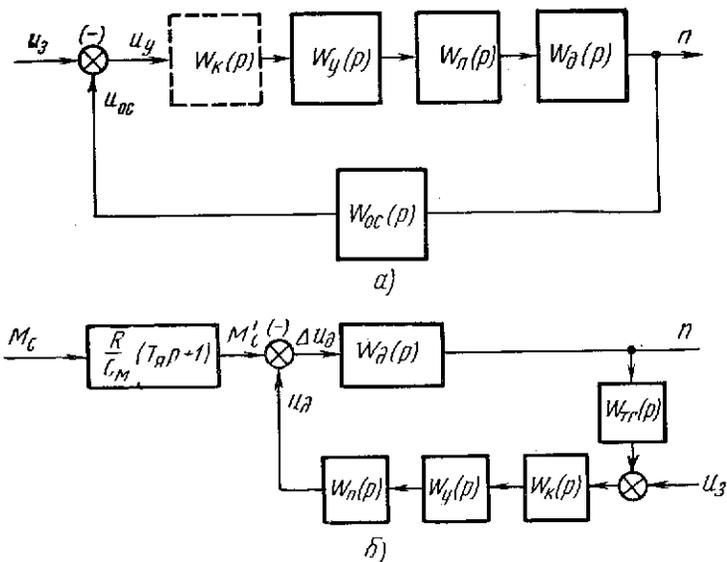


Рис. 5-18. Структурная схема САУ:  
а — при управляющем воздействии; б — при возмущающем воздействии

$$W_y(p) = \frac{K_y}{T_y p + 1} = \frac{17,2}{0,005p + 1} \quad (5-37)$$

Передаточная функция преобразователя с системой управления

$$W_n(p) = K_n e^{-\tau p} = 11e^{-0,0033p} \quad (5-38)$$

где  $\tau = \frac{0,5}{f_m} = \frac{0,5}{50 \cdot 3} = 0,0033$  сек — время чистого запаздывания.

Передаточная функция двигателя с учетом, что  $4T_x < T_m$

$$W_d(p) = \frac{K_n}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} = \frac{29}{(0,083p + 1)(0,0092p + 1)} \quad (5-39)$$

где

$$K_n = \frac{n_n}{U_n - I_n R_d} = \frac{3000}{110 - 66,5 \cdot 0,1} = 29 \frac{\text{об/мин}}{\text{в}}$$

$$T_x = \frac{L_{я.д} + L_T}{R_я} = \frac{(1,57 + 0,25) \cdot 10^{-3}}{0,22} = 0,0083 \text{ сек};$$

$$T_m = \frac{J R_я}{9,55 c_{em}} = \frac{0,045 \cdot 0,22}{9,55 \cdot 0,0345 \cdot 0,33} = 0,092 \text{ сек};$$

$$T_{1,2} = \frac{T_m}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4T_x}{T_m}} \right) = \frac{0,092}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,0083}{0,092}} \right)$$

Откуда  $T_1 = 0,083$  сек;  $T_2 = 0,0092$  сек.

Передаточная функция тахогенератора

$$W_{TG}(p) = K_{TG} = \frac{U_{TG}}{n_{TG}} = \frac{230}{4000} = 0,0575 \frac{\text{в}}{\text{об/мин}} \quad (5-40)$$

Передаточная функция разомкнутой системы без отрицательной связи по току

$$W(p) = W_y(p) W_n(p) W_d(p) W_{TG}(p) = \frac{315e^{-0,0033p}}{(0,083p + 1)(0,0092p + 1)(0,005p + 1)} \quad (5-41)$$

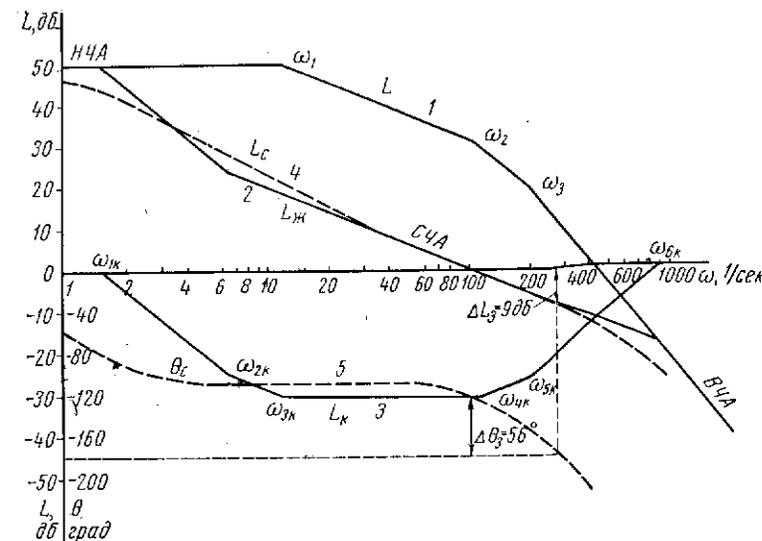


Рис. 5-19. Логарифмические частотные характеристики разомкнутой системы тиристор-двигатель при управляющем воздействии

2. Произвести синтез корректирующей цепи. Синтез осуществляется с помощью логарифмических частотных характеристик. Строится ЛАЧХ трудноизменяемой части разомкнутой системы (без учета запаздывания) — кривая 1 (рис. 5-19), где ЛАЧХ коэффициента усиления САУ

$$L(\omega) = 20 \lg 315 = 50 \text{ дБ.}$$

Частоты сопряжения

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = 12 \text{ рад/сек}, \quad \omega_2 = \frac{1}{T_2} = 109 \text{ рад/сек},$$

$$\omega_3 = \frac{1}{T_y} = 200 \text{ рад/сек.}$$

Строится желаемая ЛАЧХ (кривая 2).

Выбирается частота среза желаемой ЛАЧХ, равная  $\omega_{сж} = 100 \text{ рад/сек}$ . Частота среза выбирается из условия, чтобы дополнительный угол отставания, определяемый чистым запаздыванием управляемого усилителя, был бы достаточно мал

$$\Delta\theta = \tau\omega_{сж} = 0,0033 \cdot 100 = 0,33 \text{ рад/сек} = 19^\circ.$$

Через частоту среза  $\omega_{сж} = 100 \text{ рад/сек}$  проводится среднечастотная асимптота СЧА желаемой ЛАЧХ с наклоном  $-20 \text{ дб/дек}$ .

За высокочастотную ВЧА и низкочастотную НВА асимптоты желаемой ЛАЧХ принимаются участки ЛАЧХ трудноизменяемой части при высокой и низкой частотах.

Сопряжение среднечастотной асимптоты с высокочастотной производится отрезком с наклоном  $-20 \text{ дб/дек}$  (среднечастотная асимптота продолжается до высокочастотной).

Сопряжение среднечастотной асимптоты с низкочастотной производится отрезком с наклоном  $-40 \text{ дб/дек}$ , с частотой сопряжения  $6,5 \text{ рад/сек}$ , так чтобы ЛАЧХ корректирующего устройства была симметричной.

Определение ЛАЧХ последовательного корректирующего устройства (кривая 3) производится вычитанием

$$L_k(\omega) = L_{ж}(\omega) - L(\omega).$$

Составляется передаточная функция последовательного корректирующего звена

$$W_k(p) = \frac{(T_{2к}p + 1)(T_{3к}p + 1)(T_{4к}p + 1)(T_{5к}p + 1)}{(T_{1к}p + 1)^2(T_{6к}p + 1)^2} = \frac{(0,15p + 1)(0,083p + 1)(0,0092p + 1)(0,005p + 1)}{(0,65p + 1)^2(0,00114p + 1)^2}, \quad (5-42)$$

где

$$T_{1к} = \frac{1}{\omega_{1к}} = \frac{1}{1,54} = 0,65 \text{ сек}; \quad T_{4к} = \frac{1}{\omega_{4к}} = \frac{1}{108} = 0,0092 \text{ сек};$$

$$T_{2к} = \frac{1}{\omega_{2к}} = \frac{1}{6,5} = 0,15 \text{ сек}; \quad T_{5к} = \frac{1}{\omega_{5к}} = \frac{1}{200} = 0,005 \text{ сек};$$

$$T_{3к} = \frac{1}{\omega_{3к}} = \frac{1}{12} = 0,083 \text{ сек}; \quad T_{6к} = \frac{1}{\omega_{6к}} = \frac{1}{880} = 0,00114 \text{ сек}.$$

В качестве последовательного корректирующего контура принимается двойное интегро-дифференцирующее звено. Включение его в структурную схему показано пунктиром (см. рис. 5-18, а).

Определение запаса устойчивости системы автоматического управления по модулю и фазе. Запас устойчивости по модулю и фазе определяется по амплитудной и фазовой логарифмическим частотным характеристикам разомкнутой скорректированной системы с учетом чистого запаздывания управляемого выпрямителя.

Передаточная функция скорректированной разомкнутой системы

$$W_{с.р}(p) = \frac{315e^{-0,0033p}(0,15p + 1)}{(0,65p + 1)^2(0,00114p + 1)^2}. \quad (5-43)$$

Амплитудная логарифмическая частотная характеристика скорректированной разомкнутой системы

$$L_c(\omega) = 20 \lg \frac{K \sqrt{(0,15)^2 \omega^2 + 1}}{[(0,65)^2 \omega^2 + 1][(0,00114)^2 \omega^2 + 1]}. \quad (5-44)$$

Фазовая логарифмическая частотная характеристика скорректированной разомкнутой системы

$$\Theta_c(\omega) = -\arctg 0,0033\omega + \arctg 0,15\omega - 2 \arctg 0,65\omega - 2 \arctg 0,00114\omega. \quad (5-45)$$

Амплитудная и фазовая логарифмические частотные характеристики рассчитаны по точкам, задаваясь различными значениями  $\omega$ , и построены на рис. 5-19 пунктиром (кривые 4 и 5).

Запас по модулю определяется по амплитудной характеристике при частоте  $\omega = 300 \text{ рад/сек}$ , когда фаза системы  $\Theta = -180^\circ$ , и  $\Delta L = 9 \text{ дб}$ .

Запас по фазе определяется по фазовой характеристике при частоте среза скорректированной разомкнутой системы  $\omega_{с.с} = \omega_{сж} = 100 \text{ рад/сек}$  и равен

$$\Delta\theta = -180 - (-124) = -56^\circ.$$

3. Рассчитать переходный процесс при пуске двигателя (управляющее воздействие). Расчет производится частотным методом [Л.14]. Передаточная функция замкнутой системы

$$W_s(p) = \frac{U_{о.с}(p)}{U_s(p)} = \frac{W_c(p)}{1 + W_c(p)}, \quad (5-46)$$

где

$$W_c(p) = W_k(p)W_y(p)W_n(p)W_r(p)W_{тг}(p).$$

Вещественная частотная характеристика замкнутой системы рассчитана по номограмме  $P(\omega) = f[|L(\omega)|, \Theta(\omega)]$  [Л. 14] по известным амплитудной и фазовой логарифмическим частотным характеристикам разомкнутой системы, рассчитанным в 5-5-2.

Результаты расчета приведены в табл. 5-8.

Таблица 5-8

$\omega, \text{ рад/сек}$	0	20	70	120	160	200	300	400
$L(\omega), \text{ дб}$		16	4	-1	-3,5	-4	-9,5	-12,5
$\Theta(\omega), \text{ град}$		-109	-114	-130	-144	-157	-186	-218
$P(\omega)$	1	1,03	0,84	0,35	-0,25	-0,76	-0,5	-0,18

Кривая  $P(\omega)$  построена на рис. 5-20, а. Она заменяется ломаной линией, состоящей из трех прямолинейных участков, образующих две трапеции I и II, параметры которых приведены в табл. 5-9.

Таблица 5-9

Трапеция	$P_0$	$\omega_0$ , рад/сек	$\omega_1$ , рад/сек	$x$
I	1,8	200	70	0,35
II	-0,8	450	200	0,445

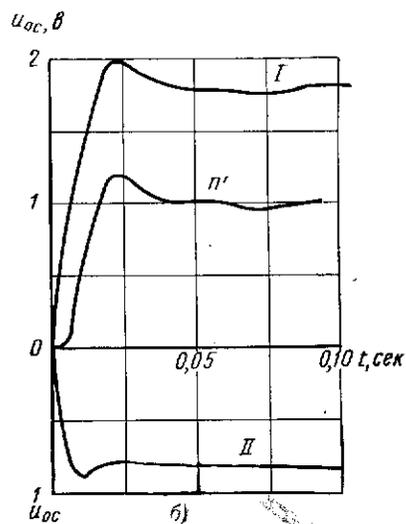
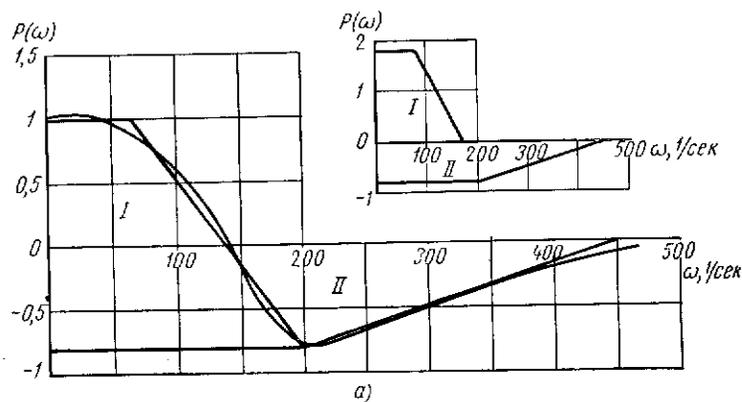


Рис. 5-20. Вещественная частотная характеристика (а) и график переходного процесса (б) при управляющем воздействии

Задаваясь различными значениями условного времени  $\tau$ , для каждой трапеции из таблиц  $h$ -функций находят  $h(\tau)$ . Условное время  $\tau$  пересчитывается в действительное  $t = \frac{\tau}{\omega_0}$ .

Значения  $h$ -функции пересчитываются в значения искомой величины

$$u_{o.c}(t) = h(\tau) P_0.$$

Расчет приведен в табл. 5-10.

Таблица 5-10

I трапеция	$\tau$	2	4	8	12	16	20	24	28
	$h(\tau)$	0,761	1,090	1,011	0,994	0,992	1,001	1,006	0,999
$u_{o.c}(t)_I$	1,37	1,96	1,82	1,79	1,78	1,8	1,8	1,8	
$t$	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	
II трапеция	$\tau$	4,5	9	13,5	18	22,5	27	36	45
	$h(\tau)$	1,128	0,979	0,989	1,010	0,999	0,997	1,001	1,001
$u_{o.c}(t)_{II}$	0,9	0,784	0,791	0,808	0,8	0,798	0,8	0,8	
$t$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	

Кривая переходного процесса при единичном входном сигнале, полученная алгебраическим сложением кривых  $u_{o.c}(t)_I$  и  $u_{o.c}(t)_{II}$ , построена на рис. 5-20, б.

Перерегулирование составляет

$$\sigma = \frac{u_{o.c \max} - u_{o.c \text{уст}}}{u_{o.c \text{уст}}} 100 = \frac{1,18 - 1}{1} 100 = 18\%.$$

Для получения кривой переходного процесса скорости двигателя  $n = \dot{i}(t)$  при  $U_3 \neq 1$  ординаты полученной кривой  $u_{o.c}(t)$  следует умножить на  $U_3$  и разделить на  $K_{T,r}$

$$n(t) = \frac{u_{o.c}(t)U_3}{K_{T,r}}.$$

4 Рассчитать переходный процесс при приложении нагрузки к двигателю (возмущающее воздействие). Определяется передаточная функция замкнутой системы при возмущении по нагрузке.

Э. д. с. преобразователя

$$e_n = c_e n + iR + L \frac{di}{dt}; \quad (5-47)$$

ток якоря

$$i = \frac{J}{9,55c_M} \frac{dn}{dt} + \frac{M_c}{c_M}. \quad (5-48)$$

Таблица 5-11

$\omega, \text{ рад/сек}$	Передаточная функция						$P(\omega)$
	$1 + T_M p$		$1 + W_p(p)$		$\Delta n(p)$		
	$M_1$	$\theta, \text{ град}$	$M_2$	$\theta, \text{ град}$	$M$	$\theta, \text{ град}$	
10	1,36	42,5	13	106	5,7	148,5	4,8
40	3,8	75	2,7	87	9,8	162	9,3
63	5,9	80	1,7	79	10	159	9,5
120	11	85	0,79	61	11,2	146	9,3
200	18,4	86	0,48	22,5	11,4	108,5	3,6
250	23	87	0,61	11	7,1	98	1,0

Решение уравнений относительно  $e_n$

$$e_n = c_e n + \frac{JR}{9,55c_M} \frac{dn}{dt} + \frac{M_c R}{c_M} + \frac{JL}{9,55c_M} \frac{d^2n}{dt^2} + \frac{L}{c_M} \frac{dM_c}{dt} \quad (5-49)$$

Запись в операторной форме

$$E_n(p) = c_e n(p) (1 + T_M p + T_J T_M p^2) + \frac{M_c(p) R}{c_M} (1 + T_J p) \quad (5-50)$$

Передаточная функция двигателя при возмущении по нагрузке

$$W_d(p) = \frac{n(p)}{E_n(p) - \frac{R}{c_M} M_c(p) (T_J p + 1)} = \frac{K_d}{T_J T_M p^2 + T_M p + 1} \quad (5-51)$$

Составляется структурная схема замкнутой системы автоматического управления с возмущением по нагрузке (рис. 5-18, б).

Передаточная функция замкнутой системы с возмущением по нагрузке при  $U_3 = 0$

$$W_3(p) = \frac{n(p)}{M_c(p)} = \frac{R}{c_M} (T_J p + 1) \times \frac{W_d(p)}{1 + W_k(p) W_y(p) W_n(p) W_{TГ}(p) W_d(p)} = \frac{R}{c_M} (T_J p + 1) \frac{W_d(p)}{1 + W_p(p)} \quad (5-52)$$

где  $W_p(p) = W_k(p) W_y(p) W_n(p) W_{TГ}(p) W_d(p)$  — передаточная функция разомкнутой скорректированной системы при управляющем воздействии.

Расчет производится при возмущающем воздействии, равном  $\Delta M = 0,25 M_n = 0,25 \cdot 18,84 = 4,71 \text{ н.м.}$

Пренебрегая  $T_J$  (так как  $T_J = 0,0083$ ,  $T_M = 0,092$ ) и изображая двигатель одним ампероинерционным звеном, получаем расчетную функцию замкнутой системы

$$W_3(p) = \frac{\Delta n(p)}{\Delta M(p)} = \frac{R}{c_M} \frac{K_d}{(T_M p + 1) [1 + W_p(p)]} \quad (5-52')$$

откуда

$$\Delta n(p) = \frac{4,71 \cdot 0,5 \cdot 29}{0,33 (0,092 p + 1) [1 + W_p(p)]} = \frac{68}{(0,092 p + 1) \left[ 1 + \frac{315 e^{-0,0033 p} (0,15 p + 1)}{(0,65 p + 1)^2 (0,00114 p + 1)^2} \right]}$$

Вещественная частотная характеристика замкнутой системы рассчитана по точкам по модулю  $M$  и фазе  $\theta$ . Результаты приведены в табл. 5-11.

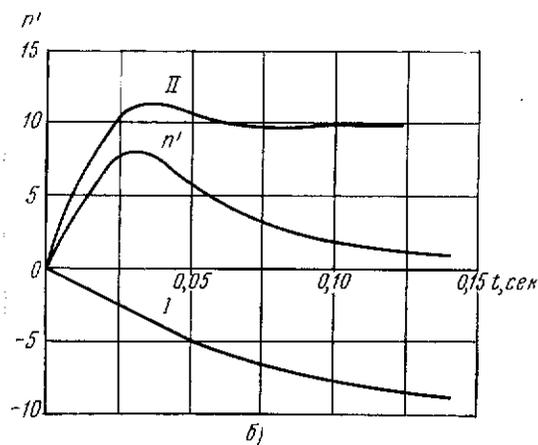
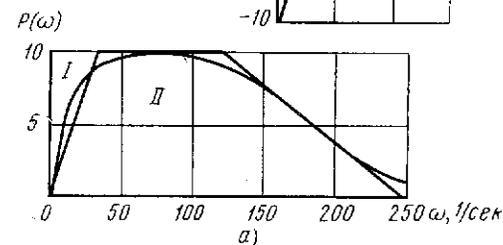
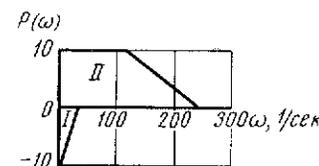


Рис. 5-21. Вещественная частотная характеристика (а) и график переходного процесса (б) при возмущающем воздействии

Кривая  $P(\omega)$  построена на рис. 5-21, а. В кривую  $P(\omega)$  вписаны две трапеции с параметрами, приведенными в табл. 5-12.

Таблица 5-12

Трапеция	$P_0$	$\omega_0$ , рад/сек	$\omega_d$ , рад/сек	$x$
I	10	34	0	0
II	10	240	120	0,487

Кривая переходного процесса, рассчитанная частотным методом, приведена на рис. 5-21, б.

## ГЛАВА 6.

## РАСЧЕТ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЛАВНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРОДОЛЬНО-СТРОГАЛЬНЫХ СТАНКОВ

### § 6-1. Применяемые системы главных электроприводов

Главный электропривод продольно-строгальных станков в значительной части диапазона регулирования требует регулирования с постоянным моментом и только на высоких скоростях резания — регулирования с постоянной мощностью. Диапазон регулирования главных приводов продольно-строгальных станков, как приводов, осуществляющих возвратно-поступательное движение, меньше диапазона регулирования станков с главным приводом вращательного движения. Для тяжелых станков максимальный диапазон регулирования находится в пределах (10—30):1.

До недавнего времени (до 1950 г.) как в СССР, так и за рубежом значительное применение получила система с электромашинным возбудителем продольного поля. В силу присущих ей недостатков (малое быстродействие, треугольная кривая тока в переходных процессах и др.) система Г—Д с ЭМУ продольного поля была вытеснена сначала системой Г—Д с ЭМУ поперечного поля, а в последнее время — системой Г—Д с магнитными усилителями в цепи возбуждения генератора.

Получили распространение две системы: а) с самовозбуждением генератора; б) с независимым возбуждением генератора.

В этой главе приведен числовой расчет технико-экономического сравнения систем Г—Д с ЭМУ поперечного поля и с магнитным усилителем в цепи возбуждения генератора.

### § 6-2. Электропривод стола по системе Г—Д с питанием обмотки возбуждения генератора от ЭМУ поперечного поля

Принципиальная схема электропривода по системе Г—Д с ЭМУ приведена на рис. 6-1. В системе применяются две жесткие отрицательные обратные связи: по скорости с отсечкой и по току с отсечкой.

Данные машин. Двигатель П101; 55 кВт; 220 в; 282 а; 1000 об/мин. Генератор П92; 70 кВт; 230 в; 304 а; 1450 об/мин. ЭМУ25; 1,2 кВт; 230 в; 5,2 а; 1440 об/мин. Тахогенератор П21; 0,37 кВт; 230 в; 1,61 а; 1500 об/мин.

САУ должна обеспечить электрическое регулирование скорости двигателя в диапазоне  $D=10:1$  и поддержание скорости в пределах 5% при изменении нагрузки двигателя от нуля до номинальной.

1. Выбрать комплект обмоток ЭМУ [Л. 14, 15]. Для обеспечения заданной точности поддержания постоянства скорости вра-

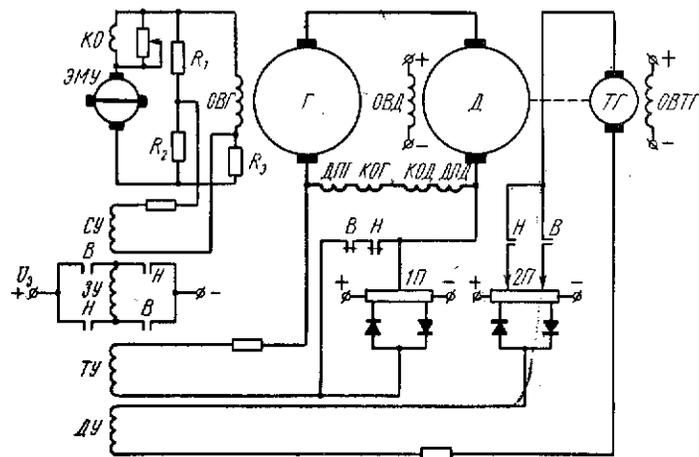


Рис. 6-1. Схема главного привода продольно-строгального станка по системе Г—Д с ЭМУ поперечного поля

щения двигателя на всем диапазоне регулирования требуемые коэффициенты усиления ЭМУ от различных обмоток определяются из условия работы двигателя на минимальной скорости вращения  $n_{\min}$ . При этом все характеристики звеньев системы считаются линейными.

Скорость идеального холостого хода

$$n_{0\min} = \frac{n_n}{D} \frac{1}{1-\delta} = \frac{1000}{10} \frac{1}{1-0,05} = 105 \text{ об/мин.}$$

Задающая обмотка. Величина задающего сигнала в замкнутой системе  $F_3$  выбирается исходя из кратности форсировки и принимается равной 3—4-кратному значению сигнала разомкнутой системы при номинальной скорости двигателя. Этой скорости соответствует э. д. с. генератора  $E_g = 230$  в, напряжение на обмотке возбуждения генератора  $U_{в.г} = 172$  в, э. д. с. ЭМУ  $E_э = 205$  в и н.с. управления ЭМУ  $F_y = 33$  ав. Тогда  $F_3 = 4F_y = 132$  ав.

Дифференциальная обмотка (обмотка обратной связи по скорости). Дифференциальная обмотка обеспечивает заданную точность поддержания скорости двигателя при изменении нагрузки. Выбор обмотки производится исходя из требуемого коэффициента усиления ЭМУ по напряжению от дифференциальной обмотки  $K_{э.д.треб}$ .

Записываются уравнения статического режима при действии обратной отрицательной связи по скорости без отсечки

$$[(U_3 K_{э.э} - \gamma n K_{э.д}) - I_{в.г} R_э] K_r = c_e n + IR \quad (6-1)$$

и определяется требуемый коэффициент усиления ЭМУ по напряжению от дифференциальной обмотки

$$K_{э.д} = \frac{RK_a - a_{треб}}{\gamma K'_r K_{д.треб}} = \frac{0,0673 \cdot 0,74 - 0,018}{0,154 \cdot 1,1 \cdot 4,74 \cdot 0,018} = 21,1,$$

где  $K'_r$  — коэффициент усиления генератора по напряжению с учетом падения напряжения в якоре ЭМУ

$$K'_r = \frac{K_r}{1 + \frac{R_э}{R_{в.г}}} = \frac{1,33}{1 + \frac{12,2}{58,2}} = 1,1;$$

$$K_r = \frac{E_g}{U_{в.г}} = \frac{230}{173} = 1,33;$$

$$K_{д} = \frac{1}{c_e} = \frac{n_n}{U_n - I_n R_{л}} = \frac{1450 \cdot 1000}{220 - 282 \cdot 0,03} = 4,74 \frac{\text{об/мин}}{\text{в}};$$

$$R = R_r + R_{д} = 0,0373 + 0,03 = 0,0673 \text{ ом};$$

$$a_{треб} = \frac{\Delta n_{треб}}{I_n} = \frac{0,05 \cdot 100}{282} = 0,018 \frac{\text{об/мин}}{\text{а}}.$$

Обмотка токовой отсечки. Для выбора параметров обмотки отрицательной обратной связи по току якоря с отсечкой необходимо определить требуемый коэффициент усиления ЭМУ по напряжению от токовой обмотки  $K_{э.т}$  исходя из требуемых значений стопорного тока  $I_{ст}$  и тока отсечки  $I_{отс}$ .

Записывается уравнение статического режима при токе стопорения

$$[U_3 K_{э.э} - R_{ш} (I_{ст} - I_{отс}) K_{э.т}] K'_r = I_{ст} R, \quad (6-2)$$

откуда

$$K_{э.т.треб} = \frac{U_3 K_{э.э} K'_r - I_{ст} R}{R_{ш} K'_r (I_{ст} - I_{отс})} = \frac{U_3 K_{э.э} \cdot 1,1 - 635 \cdot 0,0673}{0,0235 \cdot 1,1 (635 - 300)} = 0,127 U_3 K_{э.э} - 4,94,$$

где  $R_{ш} = 0,0235$  ом — сопротивление шунта;  
 $I_{отс} = 300$  а,  $I_{ст} = 635$  а.

Определение  $K_{э.г}$  производится после выбора комплекта обмоток ЭМУ и определения  $U_3$  и  $K_{э.з}$ .

Для получения требуемых коэффициентов усиления ЭМУ наиболее подходящим является комплект обмоток 4Л. В качестве задающей обмотки принимается первая обмотка управления. Задающее напряжение

$$U_3 = F_3 \frac{R_{о.у.з}}{\omega_{о.у.з}} = 132 \frac{1,2 \cdot 340}{1300} = 41,5 \text{ в.}$$

Коэффициент усиления ЭМУ по напряжению от задающей обмотки

$$K_{э.з} = \frac{E_{э.н}}{I_{о.у.з} R_{о.у.з}} = \frac{230}{0,056 \cdot 1,2 \cdot 340} = 10,1.$$

Требуемый коэффициент усиления ЭМУ по напряжению от токовой обмотки

$$K_{э.г.треб} = 0,127 \cdot 41,5 \cdot 10,1 = 4,94 = 48.$$

Результаты расчетов коэффициентов усиления ЭМУ 25-4Л приведены в табл. 6-1

Таблица 6-1

Номер обмотки	Параметры обмоток управления				Коэффициент усиления ЭМУ $K_э$	Требуемые коэффициенты усиления	Требуемый ток, протекающий по обмотке, ма	Назначение обмоток
	число витков $\omega_{о.у}$	сопротивление при $15^\circ \text{C}$ $R_{о.у}, \text{ом}$	номинальный ток $I_{о.у.н}, \text{ма}$	длительно-допустимый ток $I_{дл.д}, \text{ма}$				
I	1300	340	56	225	10,1			задающая
II	330	18,5	220	1100	47	21,1	102	дифференциальная
III	330	15,5	220	1100	56	48	508	токовая
IV	330	18,5	220	1100	47			

**2. Рассчитать характеристику преобразователя ЭМУ—Г.** Расчет произведен графически (рис. 6-2). Предварительно наносятся во втором квадранте характеристика холостого хода генератора  $E_r = f(I_a)$ , в четвертом квадранте — характеристика холостого хода ЭМУ  $E_3 = f(F_y)$ , в третьем — зависимость  $E_3 = (R_3 + R_{в.г})I_a$ , где  $R_3 + R_{в.г} = 12,2 + 58,2 = 70,4 \text{ ом}$ .

Построение характеристики преобразователя производится в первом квадранте. Задавая ряд значений  $F_y$ , находят соответствующие ей  $E_3$ ,  $I_a$  и  $E_r$ . Ход построения для одной точки показан стрелками.

**3. Рассчитать статические характеристики двигателя стола станка модели 7231А.** Записываются уравнения системы автоматического управления

$$F_3 - F_n 1[n - n_{отс}] - F_T 1[I - I_{отс}] = F_y; \quad (6-3)$$

$$F_n = \gamma' (n - n_{отс}); \quad (6-4)$$

$$F_T = \beta' (I - I_{отс}); \quad (6-5)$$

$$F_y K_n (F_y) = E_r; \quad (6-6)$$

$$E_r = c_e n + IR, \quad (6-7)$$

где  $1[n - n_{отс}]$ ,  $1[I - I_{отс}]$  — единичные функции, равные нулю при  $n < n_{отс}$  и  $I < I_{отс}$  и равные единице при  $n > n_{отс}$  и  $I > I_{отс}$ .

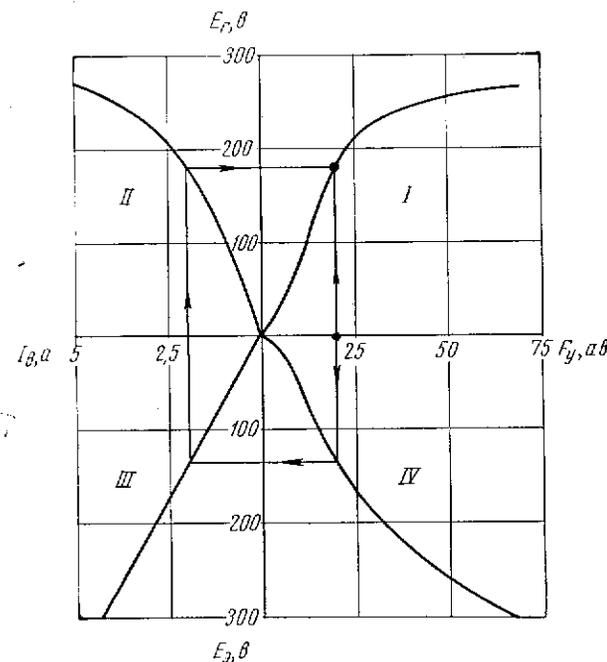


Рис. 6-2. Построение характеристики преобразователя

Исключая из (6-3) — (6-7) скорость двигателя, получаем расчетное уравнение для тока якорной цепи в зависимости от результирующей намагничивающей силы обмоток управления ЭМУ при фиксированном значении задающей  $n$ .

$$I = \frac{F_3 - F_y - \gamma' (E_r K_n - n_{отс}) 1[n - n_{отс}] + \beta' I_{отс} 1[I - I_{отс}]}{\beta' 1[I - I_{отс}] - R K_n \gamma' 1[n - n_{отс}]}, \quad (6-8)$$

где  $\gamma'$  — коэффициент обратной связи по скорости

$$\gamma' = \frac{\gamma \omega_{д.у}}{R_{д.у} + R_B} = \frac{0,154 \cdot 330}{22,2 + 1,7} = 2,14 \frac{ас}{об/мин};$$

$\beta'$  — коэффициент обратной связи по току

$$\beta' = \frac{R_{ш} \omega_{т.у}}{R_{т.у} + R_B} = \frac{0,0235 \cdot 330}{18,7 + 1,7} = 0,376 \frac{ас}{а}.$$

Скорость двигателя определяется из (6-7)

$$n = K_d (E_r - IR). \quad (6-7')$$

Расчет скоростных характеристик произведен для четырех значений скорости стола продольно-строгального станка  $v = 5, 12, 50, 75$  м/мин (скорости двигателя соответственно 100, 240, 1000, 1500 об/мин).

Характеристика при  $v_{стола} = 5$  м/мин.

Э. д. с. генератора при номинальной нагрузке по (6-7)

$$E_r = 0,211 \cdot 100 + 282 \cdot 0,0673 = 40,1 \text{ в.}$$

Намагничивающая сила управления ЭМУ  $F_y = 5,8$  ав (определена по характеристике преобразователя).

Намагничивающая сила дифференциальной обмотки

$$F_{д.у} = F_n = F_3 - F_y = 132 - 5,8 = 126,2 \text{ ав.}$$

Скорость отсечки, при которой начинает действовать дифференциальная обмотка

$$n_{отс} = n - \frac{F_n}{\gamma'} = 100 - \frac{126,2}{2,14} = 41 \text{ об/мин.}$$

При расчете скоростной характеристики задаются рядом значений результирующей н. с.  $F_y$ , по характеристике преобразователя  $E_r = f(F_y)$  (рис. 6-2) находятся значения э. д. с. генератора и по (6-8) и (6-7') определяются значения тока и скорости двигателя.

Расчет характеристики производится по трем участкам. В качестве примера показан расчет одной точки каждого участка нижней характеристики.

Участок действия отрицательной обратной связи по скорости. Задаемся  $F_y = 5,9$  ав, ей соответствует  $E_r = 41,3$  в

$$I = \frac{5,9 - 132 + 2,14(41,3 \cdot 4,74 - 41)}{0,0673 \cdot 2,14 \cdot 4,74} = 300 \text{ а;}$$

$$n = 4,74(41,3 - 300 \cdot 0,0673) = 100 \text{ об/мин.}$$

Участок действия отрицательной обратной связи по току якоря с отсечкой и отрицательной обратной связи по скорости  $F_y = 7$  ав,  $E_r = 51,2$  в

$$I = \frac{7 - 132 - 2,14(51,2 \cdot 4,74 - 41) - 0,376 \cdot 300}{0,0673 \cdot 2,14 \cdot 4,74 - 0,376} = 632 \text{ а;}$$

$$n = 4,74(51,2 - 632 \cdot 0,0673) = 41 \text{ об/мин.}$$

Участок действия отрицательной обратной связи по току якоря с отсечкой  $F_y = 6$  ав,  $E_r = 43$  в

$$I = \frac{F_3 - F_y}{\beta'} + I_{отс} = \frac{132 - 6}{0,376} + 300 = 635 \text{ а;}$$

$$n = 4,74(43 - 635 \cdot 0,0673) = 0.$$

Аналогично производится расчет статических характеристик для остальных значений скорости стола станка. Результаты расчетов сведены в табл. 6-2. Расчетные скоростные характеристики приведены на рис. 6-3.

Таблица 6-2

$v_{стола}$ , м/мин	$n_{отс}$ , об/мин	$F_y$ , ав	$E_r$ , в	$I$ , а	$n$ , об/мин	$v_{стола}$ , м/мин	$n_{отс}$ , об/мин	$F_y$ , ав	$E_r$ , в	$I$ , а	$n$ , об/мин
5	41	3,0	21,4	0	102	50	954	35	233	376	985
		5,0	34	191	101			40	238	545	954
		5,9	41,3	300	100			30	223	571	875
		6,5	46	460	75			27	213	580	825
		7,0	46	632	41						
		6,5	43	634	16						
50	954	6,0	43	635	0	75	1454	26,5	212	0	1502
		33	230	282	1000			33	230	282	1500
		33,5	231	300	999			33,5	231	300	1500
		26,5	212	0	1002			37	235	384	1490
		33	230	282	1000			43	241	537	1454
		33,5	231	300	999			30	223	571	1310
								27	213	580	1240

**4. Рассчитать переходный процесс реверса двигателя главного привода продольно-строгального станка типа 7231А.** Схема управления электроприводом стола станка приведена на рис. 6-1. Двигатель П102; 125 кВт; 220 в; 624 а; 1500 об/мин. Генератор П111; 150 кВт; 230 в; 653 а; 1450 об/мин;  $U_B = 110$  в. Обмотка возбуждения генератора соединена в две параллельные ветви ( $\omega_{в.г} = 425$  витков;  $R_{в.г} = 7$  ом). ЭМУ25-4И; 2,5 кВт; 230 в; 10,9 а; 2925 об/мин. Тахогенератор П22; 0,8 кВт; 115 в; 5,22 а; 1450 об/мин;  $\gamma = 0,094$  в/об/мин.

Рассчитывается реверс с обратного хода стола на прямой. Он разбивается на следующие этапы (см. рис. 6-7):

а) замедление электропривода с  $v_{обр} = -75$  м/мин до  $v_{обр} = -12$  м/мин;

б) реверс электропривода с  $v_{обр} = -12$  м/мин до  $v_{пр} = 12$  м/мин;  
 в) врезание резца в металл (набор нагрузки) на  $v_{пр} = 12$  м/мин;  
 г) разгон электропривода с  $v_{пр} = 12$  м/мин до  $v_{пр} = 50$  м/мин.  
 Записываются дифференциальные уравнения звеньев системы автоматического управления с допущениями, приведенными в [Л. 26].

Измерительный элемент

$$U_3 = i_3 R_3 + \omega_3 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (6-9)$$

$$-u_d = -\gamma(n - n_{отс}) 1[n - n_{отс}] = -i_d R_d + \omega_d \frac{d\Phi}{dt}; \quad (6-10)$$

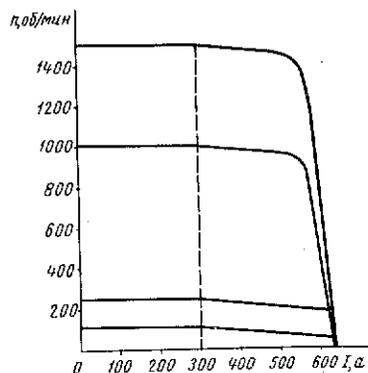


Рис. 6-3. Статические характеристики привода

$$-u_T = -R_{ин}(i - I_{отс}) 1[i - I_{отс}] = -i_T R_T + \omega_T \frac{d\Phi}{dt}; \quad (6-11)$$

$$-u_c = -k_{д.м} \frac{de_r}{dt} = -i_c R_c + \omega_c \frac{d\Phi}{dt}; \quad (6-12)$$

$$0 = i_{к.о} R_{к.о} + \omega_{к.о} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6-13)$$

где  $u_3, u_d, u_T, u_c$  — напряжения задающей, дифференциальной, токовой и стабилизирующей обмоток управления ЭМУ;

$i_3, i_d, i_T, i_c, i_{к.о}$  — токи задающей, дифференциальной, токовой и стабилизирующей обмоток управления и компенсационной обмотки ЭМУ;

$r_3, r_d, r_T, r_c, r_{к.о}$  — сопротивления задающей, дифференциальной, токовой и стабилизирующей обмоток управления и компенсационной обмотки ЭМУ;

$\omega_3, \omega_d, \omega_T, \omega_c, \omega_{к.о}$  — числа витков задающей, дифференциальной, токовой и стабилизирующей обмоток управления и компенсационной обмотки ЭМУ;

$R_3 = r_3 + R_{3.доб}, R_d = r_d + R_{д.доб}, R_T = r_T + R_{Т.доб}$  — сопротивления цепей задающей, дифференциальной и токовой обмоток ЭМУ с учетом добавочных сопротивлений  $R_{доб}$  и сопротивления тахогенератора  $R_{Тг}$ ;

$k_{д.м}$  — коэффициент динамического моста [Л. 27].  
 Остальные обозначения те же, что в (6-2-3).

Выражая уравнения (6-9) — (6-13) в намагничивающих силах (умножив каждый член уравнения соответственно на  $\omega_i/R_i$ ) и складывая их, получаем уравнение суммарного управляющего воздействия, подаваемого на вход САУ

$$IW_y = i\omega_y + T_y \frac{di\omega_y}{dt}, \quad (6-14)$$

где  $IW_y$  — н. с. суммарного управляющего воздействия на входе ЭМУ;

$i\omega_y$  — текущее значение результирующей намагничивающей силы управления ЭМУ;

$T_y$  — суммарная постоянная времени цепей управления ЭМУ. Суммарное управляющее воздействие определяется по формуле

$$IW_y = U_3 \frac{\omega_3}{R_3} - \gamma'(n - n_{отс}) 1[n - n_{отс}] - \beta'(i - I_{отс}) 1[i - I_{отс}] - \alpha_c(i\omega_{в.г}) \frac{di\omega_{в.г}}{dt}, \quad (6-15)$$

где  $\gamma', \beta', \alpha_c$  — соответственно коэффициенты обратных связей по скорости, току двигателя и производной н. с. обмотки возбуждения генератора.

Постоянная времени цепей управления ЭМУ

$$T_y = \left( \sum_{i=1}^4 \frac{\omega_i^2}{R_i^2} \right) \frac{d\Phi}{di\omega}. \quad (6-16)$$

ЭМУ (без обмоток управления)

$$\left. \begin{aligned} I_k &= f(i\omega_y) \text{ см. рис. 6-4;} \\ e_k &= i_k R_k + L_k \frac{di_k}{dt}; \\ E_3 &= f(i_k) \text{ см. рис. 6-5.} \end{aligned} \right\} \quad (6-17)$$

Генератор (без учета якорной цепи)

$$\left. \begin{aligned} e_g &= i_{в.г} (R_{в.г} + R_g) + L_{в.г} \frac{di_{в.г}}{dt}; \\ E_r &= f(i\omega_{в.г}) \text{ см. рис. 6-6.} \end{aligned} \right\} \quad (6-18)$$

Двигатель (с учетом якорной цепи генератора)

$$e_r = c_e n + iR + L \frac{di}{dt}; \quad (6-19)$$

$$M - M_c = \frac{J}{9,55} \frac{dn}{dt}. \quad (6-20)$$

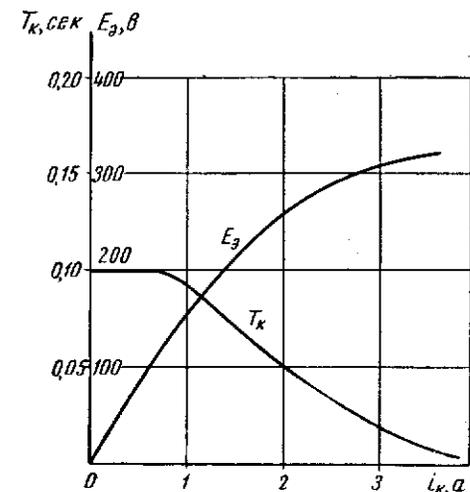
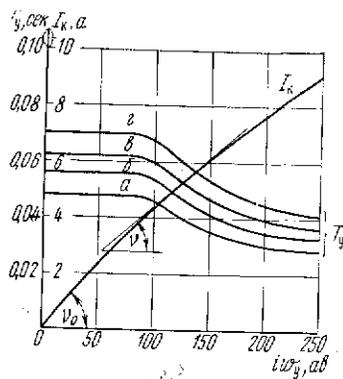


Рис. 6-4. Характеристика первого каскада и суммарная постоянная времени обмоток управления ЭМУ

Рис. 6-5. Характеристика второго каскада и постоянная времени короткозамкнутой цепи ЭМУ

Разрешая уравнения относительно производных и переходя к конечным приращениям, получим расчетные уравнения приращений. Приращение результирующей намагничивающей силы на входе САУ на шаге  $m$

$$\Delta i\omega_{(m)} = [IW_{y(m)} - i\omega_{y(m)}] \frac{\Delta t}{T_y(i\omega_y, n, i)_{(m)}}, \quad (6-21)$$

$$\begin{aligned} IW_{y(m)} &= IW_3 - \gamma' (n_{(m)} - n_{отс}) 1 [n - n_{отс}] - \\ &- \beta' (i_{(m)} - I_{отс}) 1 [i - I_{отс}] - \alpha_c (i\omega_{в.г})_{(m)} \frac{\Delta i\omega_{в.г} (m-1)}{\Delta t} = \\ &= IW_3 - IW_{n(m)} 1 [n - n_{отс}] - IW_{i(m)} 1 [i - I_{отс}] - IW_{д.м(m)}. \end{aligned}$$

$$IW_3 = \frac{U_3 \omega_3}{r_3 + R_{3, доб}} = \frac{85 \cdot 2800}{1,24 \cdot 1500 + 7500} = 25,6 \text{ ав};$$

$$\gamma' = \frac{\gamma \omega_1}{r_d + R_{ГГ} + R_{д. доб}} = \frac{0,094 \cdot 400}{1,24 \cdot 21,7 + 3,5 + 100} = 0,288 \frac{\text{ав}}{\text{об/мин}};$$

$$\beta' = \frac{R_m \omega_r}{r_r + R_{r. доб}} = \frac{0,086 \cdot 400}{1,24 \cdot 21,7 + 50} = 0,045 \frac{\text{ав}}{a};$$

$$R_m = 1,24 (R_{дп.г} + R_{дп.д} + R_{с.г} + R_{с.д}) = 1,24 (0,00308 + 0,00271 + 0,00077 + 0,00035) = 0,0086 \text{ ом};$$

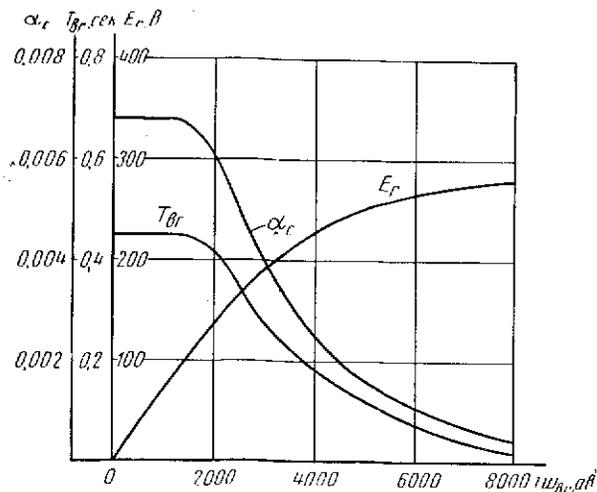


Рис. 6-6. Характеристика генератора, коэффициент  $\alpha_c$  и постоянная времени цепи обмотки возбуждения генератора

$$\begin{aligned} \alpha_c (i\omega_{в.г}) &= \frac{\omega_c k_{д.м} k_n (i\omega_{в.г})}{r_c + R_{с. доб}} = \frac{2800 \cdot 0,102}{1,24 \cdot 1500 + 1000} \frac{dE_r}{di\omega_{в.г}} = \\ &= 0,1 \frac{dE_r}{di\omega_{в.г}}. \end{aligned}$$

Зависимость  $\alpha_c(i\omega_{в.г})$  рассчитана по характеристике холостого хода генератора  $E_r = f(i\omega_{в.г})$  и приведена на рис. 6-6.

Намагничивающая сила управления на шаге  $m$

$$i\omega_{y(m)} = i\omega_{y(m-1)} + \Delta i\omega_{y(m-1)}. \quad (6-22)$$

Суммарная постоянная времени цепей управления ЭМУ определяется для четырех случаев в зависимости от значений единичных функций:

а) при  $n < n_{отс}$  и  $i < I_{отс}$  работают только задающая и стабилизирующая обмотки управления ЭМУ

$$T_{y(0)} = T_z + T_c + T_{к.о} = 0,01 + 0,032 + 0,006 = 0,048 \text{ сек};$$

б) при  $n > n_{отс}$  и  $i < I_{отс}$  работают задающая, дифференциальная и стабилизирующая обмотки управления ЭМУ

$$T_{y(0)} = T_z + T_d + T_c + T_{к.о} = 0,01 + 0,008 + 0,032 + 0,006 = 0,056 \text{ сек};$$

в) при  $n < n_{отс}$  и  $i > I_{отс}$  работают задающая, токовая и стабилизирующая обмотки управления ЭМУ

$$T_{y(0)} = T_z + T_T + T_c + T_{к.о} = 0,01 + 0,014 + 0,032 + 0,006 = 0,062 \text{ сек};$$

г) при  $n > n_{отс}$  и  $i > I_{отс}$  работают задающая, дифференциальная, токовая и стабилизирующая обмотки управления ЭМУ

$$T_{y(0)} = T_z + T_d + T_T + T_c + T_{к.о} = 0,01 + 0,008 + 0,014 + 0,032 + 0,006 = 0,07 \text{ сек}.$$

Нелинейные зависимости  $T_y(i\omega_y)$  приведены на рис. 6-4. Они рассчитаны с учетом нелинейности кривой  $I_k = f(i\omega_y)$  по уравнению [Л. 26].

$$T_y = T_{y(0)} \frac{\text{tg } \nu}{\text{tg } \nu_0}.$$

Приращение тока к. з. цепи ЭМУ

$$\Delta i_{к(m)} = [I_{к(m)} - i_{к(m)}] \frac{\Delta t}{T_{к(i_{к(m)})}}, \quad (6-23)$$

где

$$I_{к} = \frac{e_{к}}{R_{к}} = f(i\omega_y);$$

$$T_{к} = \frac{L_{к}}{R_{к}} = f(i_{к}).$$

Ток к. з. цепи ЭМУ

$$i_{к(m)} = i_{к(m-1)} + \Delta i_{к(m-1)}. \quad (6-24)$$

Зависимость  $T_{к}(i_{к})$  рассчитана с учетом  $T_{к(0)} = 0,1 \text{ сек}$  и кривой  $E_g = f(i_{к})$ .

Приращение намагничивающей силы обмотки возбуждения генератора

$$\Delta i\omega_{в.г(m)} = [IW_{в.г(m)} - i\omega_{в.г(m)}] \frac{\Delta t}{T_{в.г(i\omega_{в.г(m)})}}, \quad (6-25)$$

где

$$IW_{в.г} = \frac{\omega_{в.г} e_g}{R_{в.г} + R_3 + \frac{R_3}{R_1 + R_2} (R_1 + R_2 + R_3 + R_{в.г})} = \frac{425 e_g}{1,24 \cdot 7 + 5 + \frac{3,37}{100 + 57,6} (100 + 57,6 + 5 + 1,24 \cdot 7)} = 24,5 e_g;$$

$$T_{в.г} = \frac{2\rho\omega_{в.г}^2}{(R_{в.г} + R_3 + R_3) k_{eг} n_{г}} \frac{dE_{г}}{d i\omega_{в.г}} = \frac{4 \cdot 425}{(1,24 \cdot 7 + 3,37 + 5) 4,2 \cdot 1450} \frac{dE_{г}}{d i\omega_{в.г}} = 6,95 \frac{dE_{г}}{d i\omega_{в.г}}.$$

Намагничивающая сила обмотки возбуждения генератора

$$i\omega_{в.г(m)} = i\omega_{в.г(m-1)} + \Delta i\omega_{в.г(m-1)}. \quad (6-26)$$

Зависимость  $T_{в.г}(i\omega_{в.г})$  рассчитана по кривой  $E_{г} = f(i\omega_{в.г})$  и приведена на рис. 6-6.

Приращение тока якоря двигателя

$$\Delta i_{(m)} = [I_{(m)} - i_{(m)}] \frac{\Delta t}{T_{я}}, \quad (6-27)$$

где

$$I_{(m)} = \frac{e_{г(m)} - c_e n_{(m)}}{R} = \frac{e_{г(m)} - 0,141 n_{(m)}}{0,0303};$$

$$T_{я} = \frac{L_{я.г} + L_{я.д}}{R} = \frac{(692 + 672) 10^{-6}}{0,0303} = 0,045 \text{ сек};$$

$$L_{я.г} = 11,4 \frac{U_{г.н}}{I_{г.н} n_{г.н} 2\rho} = 692 \cdot 10^{-6} \text{ гн};$$

$$L_{я.д} = 11,4 \frac{U_{д.н}}{I_{д.н} n_{д.н} 2\rho} = 672 \cdot 10^{-6} \text{ гн}.$$

Ток якоря двигателя

$$i_{(m)} = i_{(m-1)} + \Delta i_{(m-1)}. \quad (6-28)$$

Приращение скорости двигателя

$$\Delta n_{(m)} = [i_{(m)} - I_c] \frac{9,55 c_M}{J} \Delta t = [i_{(m)} - I_c] \frac{9,55 \cdot 1,34}{3,58} \Delta t = 3,6 [i_{(m)} - I_c] \Delta t, \quad (6-29)$$

где ток статической нагрузки  $I_{с.х.х} = 68,5 \text{ а}$  — при холостом ходе стола,  $I_c = 322 \text{ а}$  — при резании.

Скорость двигателя

$$n_{(m)} = n_{(m-1)} + \Delta n_{(m-1)} \quad (6-30)$$

Расчет переходного процесса реверса электропривода стола с обратного хода ( $v_{обр} = 12$  м/мин) на прямой ( $v_{пр} = 12$  м/мин).

Начальные условия. Скорость двигателя, соответствующая  $v_{стола} = 12$  м/мин,

$$n = v_{пр} = \frac{v_{прел}}{i_{дз}} = \frac{12 \cdot 7 \cdot 10^3}{37,68 \cdot 10} = 223 \text{ об/мин,}$$

где  $\rho$  — передаточное отношение от стола к двигателю.

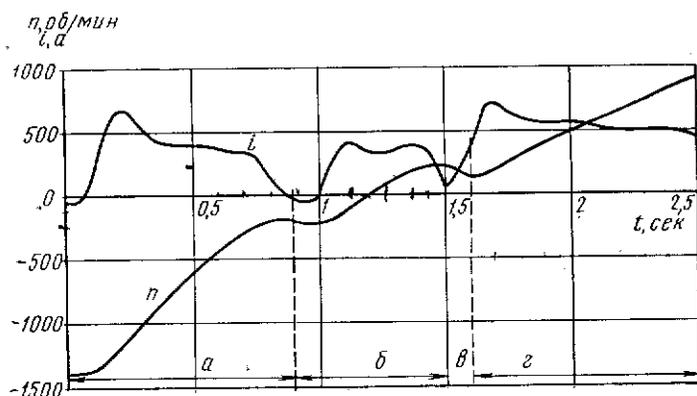


Рис. 6-7. Графики переходного процесса

Скорость отсечки [определена аналогично (6-2-3)]

$$n_{отс} = 144 \text{ об/мин.}$$

Ток якоря двигателя при холостом ходе стола

$$i = I_c = 68,5 \text{ а.}$$

Э. д. с. генератора по (6-7)

$$e_r = E_r = 0,141 \cdot 223 + 68,5 \cdot 0,0303 = 33,3 \text{ в.}$$

Н. с. обмотки возбуждения генератора, постоянная времени и коэффициент  $\alpha_c$  (см. рис. 6-6).

$$i_{w_{в.г}} = IW_{в.г} = 500 \text{ ав,} \quad T_{в.г} = 0,254 \text{ сек,} \quad \alpha_c = 0,0068.$$

Э. д. с. ЭМУ

$$e_3 = E_3 = \frac{IW_{в.г}}{24,5} = \frac{500}{24,5} = 20,4 \text{ в.}$$

Ток и постоянная времени к. з. цепи ЭМУ (см. рис. 6-6)

$$i_k = I_k = 0,15 \text{ а;} \quad T_k = 0,1 \text{ сек.}$$

Результирующая н. с. обмотки управления ЭМУ и постоянная времени при  $n < n_{отс}$  и  $i < I_{отс}$  (см. рис. 6-5)

$$i_{w_y} = IW_y = 3,5 \text{ ав;} \quad T_y = 0,048 \text{ сек.}$$

Начальные условия приведены в первой строке расчетной табл. 6-3. Сопоставляя постоянные времени звеньев системы, принимаем шаг интегрирования  $\Delta t = 0,01$  сек. Расчеты сводятся в таблицы. В табл. 6-3 приведено начало расчета. Аналогично рассчитаны все этапы переходного процесса реверса стола с  $v_{обр} = 75$  м/мин до  $v_{пр} = 50$  м/мин. Расчетные графики переходных процессов приведены на рис. 6-7.

Таблица 6-3

Параметры	Начальные условия	Номер шага $m$					
		0	1	2	3	4	5
$t = m \Delta t, \text{ сек}$		0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
$IW_y, \text{ ав}$	3,5	-25,6	-25,6	-25,6	-24,3	-20,8	-19,6
$i_{w_y}, \text{ ав}$	3,5	3,5	-2,6	-7,4	-11,2	-13,8	-15,2
$I_y, \text{ сек}$	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
$\Delta i_{w_y}, \text{ ав}$	0	-6,05	-4,8	-3,8	-2,6	-1,4	-0,8
$I_k, \text{ а}$	0,15	0,15	-0,11	-0,32	-0,51	-0,64	-0,7
$i_k, \text{ а}$	0,15	0,15	0,15	0,124	0,08	0,021	0,045
$T_k, \text{ сек}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$\Delta i_k, \text{ а}$	0	0	-0,026	-0,044	-0,059	-0,066	-0,064
$e_3, \text{ в}$	20,4	20,4	20,4	17	11	3	-5
$IW_{в.г}, \text{ ав}$	500	500	500	416	270	73,5	-122,6
$i_{w_{в.г}}, \text{ ав}$	500	500	500	500	498	493	484
$T_{в.г}, \text{ сек}$	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
$\Delta i_{w_{в.г}}, \text{ ав}$	0	0	0	-1,9	-5,1	-9,3	-13,5
$\alpha_c$	0,0068	0,0068	0,0068	0,0068	0,0068	0,0068	0,0068
$IW_{д.м}, \text{ ав}$	0	0	0	1,3	3,5	6,3	9,2
$e_r, \text{ в}$	33,52	33,52	33,52	33,52	33,04	32,51	32,00
$n, \text{ об/мин}$	223	223	223	223	223	223	222,9
$e_d = c_d n, \text{ в}$	31,44	31,44	31,44	31,44	31,44	31,44	31,43
$I, \text{ а}$	68,5	68,5	68,5	68,5	52,8	35,3	18,8
$i, \text{ а}$	68,5	68,5	68,5	68,5	68,5	65	58,4
$\Delta i, \text{ а}$	0	0	0	0	-3,5	-6,6	-8,8
$IW_i, \text{ ав}$	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta n, \text{ об/мин}$	0	0	0	0	0	-0,1	-0,4
$IW_n, \text{ ав}$	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1

### § 6-3. Электропривод стола по системе Г—Д с магнитным усилителем и с критическим самовозбуждением генератора

Принципиальная схема управления главным двигателем станка приведена на рис. 6-8. Двигатель П112: 70 кВт; 220 в; 353 а; 600 об/мин. Генератор П101; 90 кВт; 230 в; 391 а; 1450 об/мин.

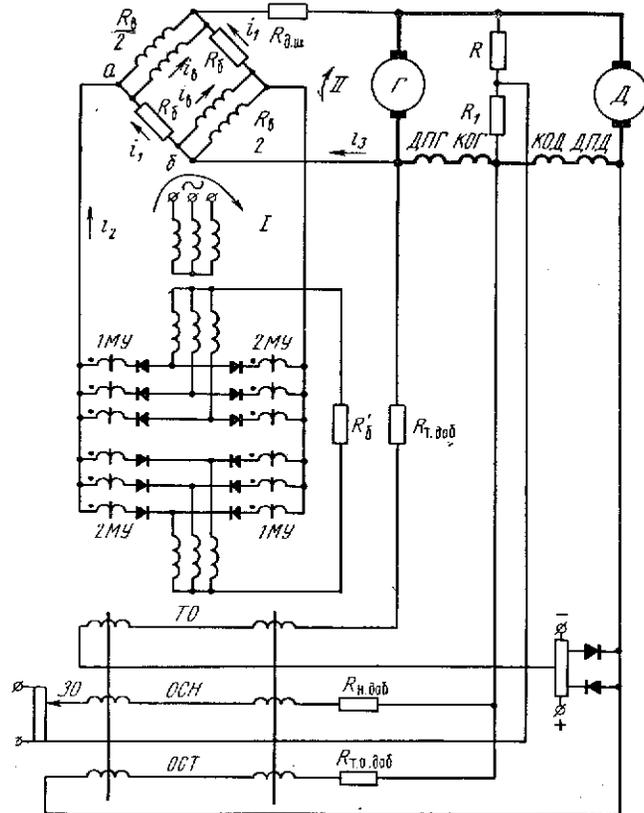


Рис. 6-8. Схема главного привода продольно-строгольного станка по системе Г—Д с магнитным усилителем и с критическим самовозбуждением генератора

1. Рассчитать параметры схемы возбуждения генератора и выбрать магнитные усилители [Л. 23]. Для возбуждения генератора применяется схема с критическим самовозбуждением генератора и с магнитными усилителями. Обмотка возбуждения генератора пере-

соединяется в две параллельные ветви, включенные в плечи моста. Для данного случая магнитные усилители оказываются наиболее рационально нагруженными.

Тогда число витков и сопротивление обмотки возбуждения

$$\omega_b = 0,5 \omega_{0.в.г} = 0,5 \cdot 950 = 475 \text{ витков};$$

$$R_b = 0,25 \cdot 1,2 R_{0.в.г} = 0,25 \cdot 1,2 \cdot 37,8 = 11,4 \text{ ом.}$$

Балластное сопротивление в цепи моста

$$R_6 = \frac{R_b}{2} = \frac{11,4}{2} = 5,7 \text{ ом.}$$

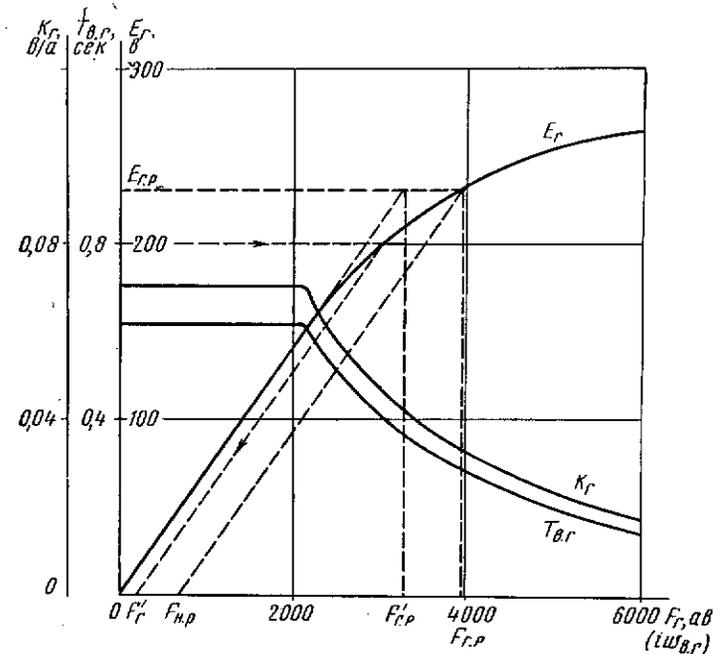


Рис. 6-9. Характеристика, коэффициент передачи генератора и постоянная времени обмотки возбуждения генератора

Эквивалентное сопротивление моста

$$R_9 = \frac{R_6 + 0,5 R_b}{2} = \frac{5,7 + 0,5 \cdot 11,4}{2} = 5,7 \text{ ом.}$$

Критическое сопротивление самовозбуждения

$$R_{кр} = \frac{E_{г.р}}{F'_{г.р}} \cdot \frac{\omega_b}{2} = \frac{230,7}{3300} \cdot \frac{475}{2} = 16,6 \text{ ом,}$$

где  $E_{г.р}$  и соответствующая ей н. с. возбуждения  $F'_{г.р}$  принимаются по линеаризованной характеристике генератора (рис. 6-9).

Добавочное сопротивление в цепи моста

$$R_{д.ш} = R_{кр} - R_s = 16,6 - 5,7 = 10,9 \text{ ом.}$$

Магнитные усилители выбираются из условия обеспечения наибольшей н. с. возбуждения генератора в установившихся режимах работы электропривода (условия статики) и наибольшего напряжения, необходимого для получения форсировки возбуждения генератора, обеспечивающей заданную длительность переходных процессов (условия динамики).

Условия статики э. д. с. генератора при номинальной нагрузке двигателя

$$E_{г.н} = c_{eд} n_{д.н} + I_{д.н} R = 0,35 \cdot 600 + 353 \cdot 0,586 = 230,7 \text{ в.}$$

Расчетный ток магнитного усилителя

$$I_{р.с} = 2 \frac{F_{п.р}}{\omega_n} = 2 \frac{642}{475} = 2,71 \text{ а,}$$

где  $F_{н.р} = 642 \text{ ав}$  — дополнительная н. с. возбуждения генератора, обеспечиваемая за счет магнитного усилителя сверх самовозбуждения и соответствующая э. д. с.  $E_{г.н} = 230,7 \text{ в}$ , определяется по характеристике рис. 6-9.

Расчетное напряжение МУ

$$U_{р.с} = I_{р.с} \frac{R_B}{2} = 2,71 \frac{11,4}{2} = 15,5 \text{ в.}$$

Расчетная мощность МУ

$$P_{р.с} = U_{р.с} I_{р.с} = 15,5 \cdot 2,71 = 42 \text{ вт.}$$

Условия динамики. Допустимым ускорением стола тяжелого продольно-строгального станка можно считать

$$a_{дон} = \left( \frac{dv}{dt} \right)_{дон} = 50 \frac{\text{м/мин}}{\text{сек}}.$$

Тогда допустимый темп нарастания э. д. с. генератора

$$\left( \frac{de_{г.р}}{dt} \right)_{дон} = c_{eл} \left( \frac{dn}{dt} \right)_{дон} = c_{eл} \rho \left( \frac{dv}{dt} \right)_{дон} = 0,35 \cdot 20 \cdot 50 = 350 \frac{\text{в}}{\text{сек}}.$$

Расчетное напряжение магнитного усилителя

$$U_{р.д} = \frac{R_B + R_{д.ш}}{R_B + 2R_{д.ш}} \cdot \frac{R_B}{\omega_B} \cdot \frac{T_{в.г}}{K_{г.р}} \left( \frac{de_{г.р}}{dt} \right) = \\ = \frac{11,4 + 10,9}{11,4 + 2 \cdot 10,9} \cdot \frac{11,4 \cdot 0,615}{475 \cdot 0,07} 350 = 50 \text{ в,}$$

где  $T_{в.г}$  — постоянная времени обмотки возбуждения генератора на линейном участке характеристики намагничивания

$$T_{в.г} = 2\rho \frac{\omega_B^2}{R_B} \frac{E_{г.р}}{k_{eг} n_{г.р} F'_{г.р}} = 4 \frac{475^2}{11,4} \frac{230,7}{6,2 \cdot 1450 \cdot 3300} = 0,615 \text{ сек;}$$

$K_{г.р}$  — коэффициент передачи генератора на линейном участке характеристики холостого хода

$$K_{г.р} = \frac{E_{г.р}}{F'_{г.р}} = \frac{230,7}{3300} = 0,07 \frac{\text{в}}{\text{ав}}.$$

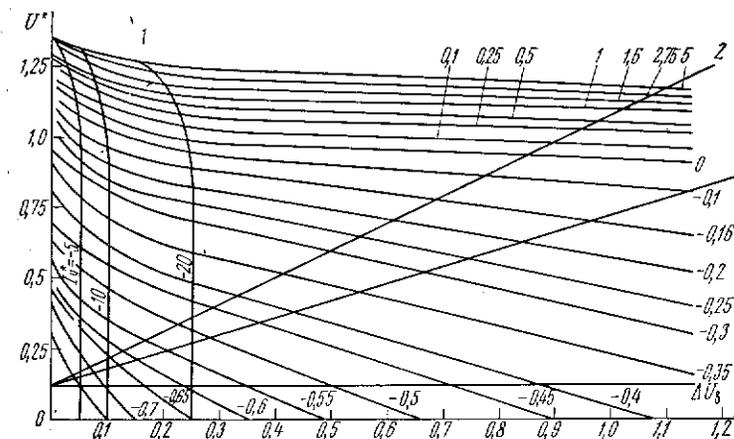


Рис. 6-10. Внешние характеристики магнитных усилителей серии УМЗП с линиями нагрузки

Расчетный ток МУ

$$I_{р.д} = \frac{U_{р.д}}{R_B + R_{д.ш}} = \frac{50}{11,4 + 10,9} = 2,24 \text{ а.}$$

Расчетная мощность МУ

$$P_{р.д} = U_{р.д} I_{р.д} = 50 \cdot 2,24 = 111,5 \text{ вт.}$$

Магнитные усилители включаются в дроссельно-мостовую схему (см. рис. 6-8), тогда условия их выбора следующие:

$$U_n \geq 2,1 U_{р.д} = 2,1 \cdot 50 = 105 \text{ в;}$$

$$I_n \geq 1,05 I_{р.с} = 1,05 \cdot 2,71 = 2,84 \text{ а.}$$

Выбираются два магнитных усилителя типа УМЗП 15.15.12;

$$U_{с.н} = 127 \text{ в; } U_{п.н} = 108 \text{ в; } I_{в.н} = 2,8 \text{ а.}$$

2. Рассчитать характеристики преобразователя (магнитного усилителя и генератора).

Расчет характеристик магнитного усилителя производится по внешним характеристикам усилителей серии УМЗП (рис. 6-10) [Л.28], на которые наносятся линии нагрузки усилителя

$$U_{н.у}^* = U_n^* + \Delta U_{в}^* = \frac{I_n^* I_{н.н} R_n}{U_{с.н}} + \Delta U_{в}^* \quad (6-31)$$

Нагрузочная характеристика МУ строится по точкам пересечения линии нагрузки  $U_{н.у}$  с вольтамперными характеристиками. Текущие значения тока и н. с. определяются по зависимостям

$$I_n = I_{н.н} I_n^* = 2,8 I_n^* \quad (6-32)$$

$$I_y = 0,5 I_{y.н} I_y^* = 0,5 \cdot 1,4 I_y^* = 0,7 I_y^* \quad (6-33)$$

$$F_y = I_y \omega_y = 50 I_y \quad (6-34)$$

Нагрузочные характеристики усилителя определяются для статического и динамического режимов.

Статический режим. В статике МУ нагружен на активное сопротивление, равное  $R_n = R_{ст} = R_{б1} + \frac{R_n}{2} = 21,2 + 5,7 = 26,9 \text{ ом}$ , где  $R_{б1}$  — балластное сопротивление, принимается равным [Л. 23]

$$R_{б1} = 0,55 \frac{U_{н.н}}{I_{н.н}} = 0,55 \frac{108}{2,8} = 21,2 \text{ ом}$$

Линия нагрузки усилителя в статике по (6-31) при  $R_n = R_{ст}$  (рис. 6-10, прямая 1)

$$\text{при } I_n^* = 0, \quad U_{н.у.ст}^* = \Delta U_{в}^* = 0,12;$$

$$\text{при } I_n^* = 1, \quad U_{н.у.ст}^* = \frac{1 \cdot 2,8 \cdot 26,9}{127} + 0,12 = 0,72.$$

Результаты расчета нагрузочной характеристики приведены в табл. 6-4.

По данным таблицы на рис. 6-11 построены характеристики однотактного (кривая 1) и двухтактного (кривая 2) магнитного усилителя.

Динамический режим. В динамике усилитель нагружен на активное сопротивление

$$R_n = R_{дин} = R_{б1} + R_{в} + R_{д.ш} = 21,2 + 11,4 + 10,5 = 43,1 \text{ ом}$$

Таблица 6-4

$I_n^*$	0,08	0,165	0,435	0,84	1,28	1,425	1,55
$I_{н.а}$	0,224	0,463	1,22	2,35	3,59	4,0	4,35
$I_y^*$	-0,7	-0,6	-0,4	-0,2	0	0,25	1,0
$I_{y.а}$	-0,49	-0,42	-0,28	-0,14	0	0,175	0,7
$F_{y.ав}$	-24,5	-21	-14	-7	0	8,75	35

Линия нагрузки усилителя в динамике (рис. 6-10, прямая 2) при  $I_n^* = 0$ ,  $U_{н.у.дин}^* = \Delta U_{в}^* = 0,12$ ;  
при  $I_n^* = 1$ ,  $U_{н.у.дин}^* = \frac{1 \cdot 2,8 \cdot 43,1}{127} + 0,12 = 1,07$ .

Нагрузочная характеристика усилителя строится так же, как и для статического режима. Расчетные кривые однотактного (кривая 3) и двухтактного (кривая 4) усилителей приведены на рис. 6-11.

Расчет характеристик преобразователя в статике. Э. д. с. генератора определяется намагничивающей силой его обмотки возбуждения, которая складывается из н. с., создаваемой генератором (цепь самовозбуждения)  $F_r$ , и н. с., создаваемой магнитным усилителем  $F_r'$ .

На прямолинейном участке характеристики холостого хода генератора до  $E_r = 150 \text{ в}$  происходит самовозбуждение генератора и  $F_y = 0$ . При  $E_r > 150 \text{ в}$  требуется дополнительная н. с. генератора  $F_r'$ , определяемая графически по характеристике холостого хода (порядок определения  $F_r'$  для  $E_r = 200 \text{ в}$  показан на рис. 6-9 стрелками).

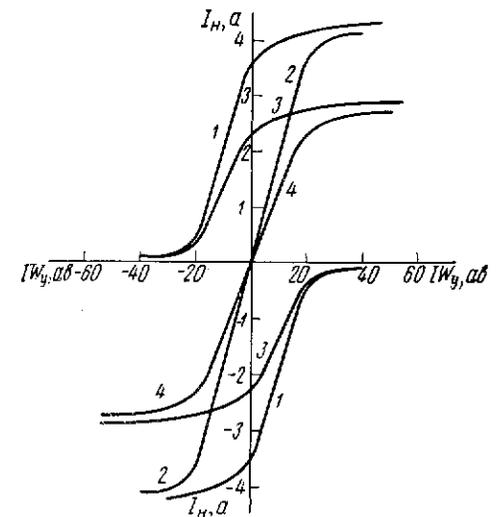


Рис. 6-11. Характеристики магнитного усилителя

Дополнительная н. с. генератора  $F_r'$  создается за счет тока в ОВГ от магнитного усилителя и равна

$$F_r' = I_{н. у} \omega_{в. г} = 475 I_{н. у}. \quad (6-35)$$

Из уравнения (6-35) определяется ток нагрузки магнитного усилителя и по характеристике МУ — ток управления его. Намагничивающая сила управления усилителя определяется по уравнению (6-34).

Результаты расчета характеристики преобразователя при  $I_{я.г} = 0$  приведены в табл. 6-5. Кривая построена на рис. 6-12.

Таблица 6-5

$E_r, в$	0—150	160	180	200	230	250
$F_r', ав$	0	47,5	95	190	640	1200
$I_{м. у}, а$	0	0,1	0,2	0,4	1,4	2,5
$I_y, а$	0	0,01	0,02	0,04	0,14	0,24
$F_y, ав$	0	0,5	1	2	7	12

При повышении нагрузки двигателя ток в обмотке возбуждения генератора будет уменьшаться за счет падения напряжения в якорной цепи генератора на величину

$$\Delta I = \frac{I R_r}{\frac{R_B}{2} + R_{доб}} = \frac{1,24 \cdot 0,013}{\frac{11,4}{2} + 10,9} I = 9,75 \cdot 10^{-4} I. \quad (6-36)$$

Для сохранения критического самовозбуждения изменение тока  $\Delta I$  компенсируется магнитным усилителем, обеспечивающим дополнительный ток  $\Delta I_y = \Delta I$ .

Дополнительная н. с. магнитного усилителя определяется по характеристике усилителя (рис. 6-11).

Результаты расчетов приведены в табл. 6-6.

Таблица 6-6

$I, а$	100	200	300	353	400	500	600	706
$\Delta I_y, а$	0,0975	0,195	0,292	0,344	0,390	0,487	0,585	0,690
$F_y, ав$	0,48	0,96	1,44	1,72	1,92	2,4	2,88	3,44

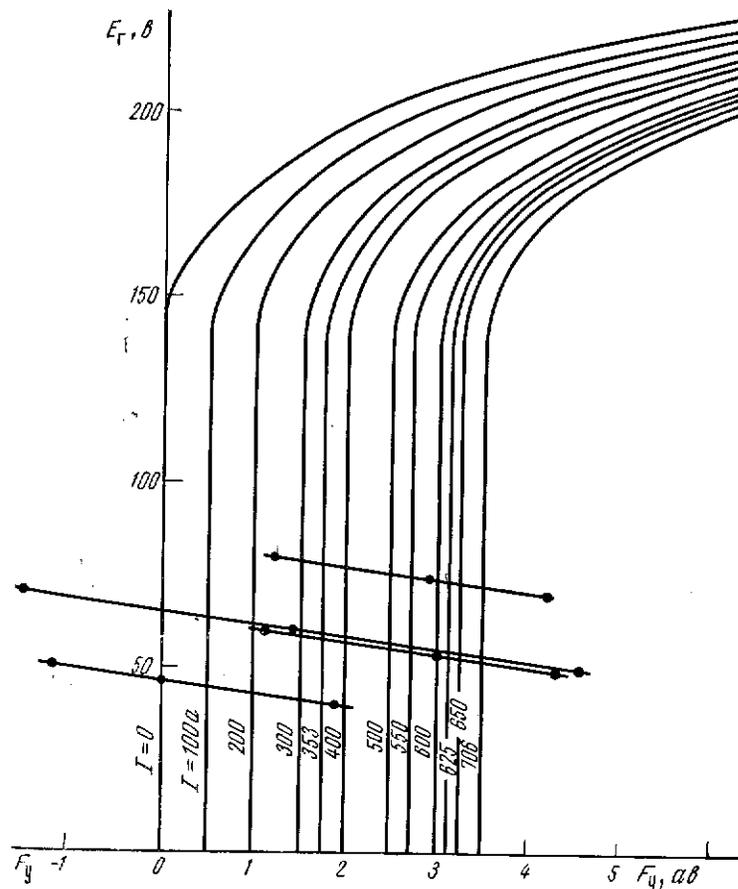


Рис. 6-12. Характеристики преобразователя

По имеющейся зависимости  $E_r = f(F_y)$  при  $I = 0$  и учитывая изменение  $F_y$  при токе якоря  $I = (0-2) I_n$ , по табл. 6-6 параллельным переносом точек строятся остальные характеристики.

Таким образом э. д. с. генератора зависит от намагничивающей силы магнитного усилителя и тока якоря двигателя, а характеристика преобразователя представляет семейство характеристик.

**3. Выбрать задающий сигнал и рассчитать параметры обратных связей.** Уравнение результирующей намагничивающей силы управления магнитного усилителя

$$F_y = F_3 - F_n + F_T - F_{т. о}, \quad (6-37)$$

где  $F_3$  — задающая н. с.;  
 $F_n$  — н. с. отрицательной связи по напряжению;

$F_T$  — н. с. положительной связи по току;

$F_{T.о}$  — н. с. отрицательной связи по току с отсечкой.

Задающая намагничивающая сила принимается произвольно, но с учетом того, что магнитный усилитель будет работать в зоне насыщения. Принято  $F_{з.мин} = 14 \text{ ав}$  для скорости  $n_{мин} = 120 \text{ об/мин}$  и соответственно  $F_{з.макс} = 70 \text{ ав}$  для скорости  $n_{макс} = 600 \text{ об/мин}$ .

Обратные связи по напряжению и току выбираются из условия обеспечения заданной жесткости механической характеристики. Определение параметров обратных связей производится при наименьшей скорости двигателя  $n_{мин} = 120 \text{ об/мин}$ .

Обратная отрицательная связь по напряжению.

Э. д. с. генератора, соответствующая скорости  $n_{о.мин}$  при  $I = 0$

$$E_r = c_e n_o = c_e \frac{n_{н. мин}}{1 - \delta} = 0,35 \frac{120}{1 - 0,1} = 46,5 \text{ в.}$$

Намагничивающая сила обмотки обратной связи по напряжению

$$F_n = F_z - F_y = 14 - 0 = 14 \text{ ав.}$$

В качестве обмотки обратной связи принята обмотка МУ, имеющая  $\omega_n = 400$  витков,  $r_n = 2 \cdot 13 \text{ ом}$ .

Ток в обмотке обратной связи

$$I_n = \frac{F_n}{\omega_n} = \frac{14}{400} = 0,035 \text{ а.}$$

Сопротивление цепи обратной связи

$$R_n = \frac{a' E_{r.о}}{I_n} = \frac{0,5 \cdot 46,5}{0,035} = 660 \text{ ом.}$$

Дополнительное сопротивление в цепи обратной связи

$$R_{н. доб} = R_n - r_n = 660 - 2 \cdot 13 = 634 \text{ ом.}$$

Уравнение намагничивающей силы обмотки обратной связи по напряжению

$$F_n = \frac{U_n}{R_n} \omega_n = \frac{a' (E_r - I R_r)}{R_n} \omega = \alpha (E_r - I R_r) = 0,304 (E_r - 0,0256 I), \quad (6-38)$$

где  $\alpha' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,5$ ;

$\alpha = \frac{\alpha' \omega_n}{R_n} = \frac{0,5 \cdot 400}{660} = 0,304$  — коэффициент обратной связи по напряжению.

Обратная положительная связь по току.

Э. д. с. генератора, соответствующая скорости  $120 \text{ об/мин}$  при  $I = I_{д.н} = 353 \text{ а}$ .

$$E_r = c_e n_n + I_n R = 0,35 \cdot 120 + 353 \cdot 0,0586 = 62,7 \text{ в.}$$

Результирующая намагничивающая сила управления  $F_y = 1,72 \text{ ав}$  (определяется по характеристике преобразователя для  $E_r = 62,7 \text{ в}$  и  $I = 353 \text{ а}$ ).

Намагничивающая сила обмотки обратной связи по напряжению

$$F_n = 0,304(62,7 - 0,0256 \cdot 353) = 16 \text{ ав.}$$

Намагничивающая сила обмотки обратной связи по току

$$F_T = F_y - F_z + F_n = 1,72 - 14 + 16 = 4,02 \text{ ав.}$$

В качестве обмотки обратной связи по току принята обмотка номер 1<sup>л</sup>, имеющая  $\omega_T = 100$  витков,  $r_T = 2 \cdot 0,8 \text{ ом}$ .

Ток в обмотке обратной связи

$$I_T = \frac{F_T}{\omega_T} = \frac{4,02}{100} = 0,0402 \text{ а.}$$

Сопротивление цепи обратной связи

$$R_T = \frac{U_T}{I_T} = \frac{I R_{ш}}{I_T} = \frac{353 \cdot 0,0118}{0,0402} = 103 \text{ ом,}$$

где  $R_{ш} = R_{д. п. д} + R_{к. о. д} = 1,24(0,00833 + 0,0012) = 0,0118 \text{ ом}$  — сопротивление шунта.

Дополнительное сопротивление в цепи обратной связи по току

$$R_{T. доп} = R_T - r_T = 103 - 2 \cdot 0,8 = 101,4 \text{ ом.}$$

Уравнение намагничивающей силы обмотки обратной связи по току

$$F_T = \frac{U_T}{R_T} \omega_T = \frac{I R_{ш}}{R_T} \omega_T = \beta' I = 0,0114 I, \quad (6-39)$$

где  $\beta' = \frac{R_{ш} \omega_T}{R_T} = \frac{0,0118 \cdot 100}{103} = 0,0114 \frac{\text{ав}}{\text{а}}$  — коэффициент обратной положительной связи по току.

Обратная отрицательная связь по току с отсечкой. Определение параметров обратной связи по току с отсечкой производится при скорости двигателя  $n = 600 \text{ об/мин}$ .

Принимаем  $I_{отс} = 1,7 I_{дн} = 1,7 \cdot 353 = 600 \text{ а}$ ;

$$I_{ст} = 2 I_{дн} = 2 \cdot 353 = 706 \text{ а.}$$

Э. д. с. генератора при  $n = 0$  и  $I = I_{ст}$

$$E_r = I_{ст} R = 706 \cdot 0,0586 = 41,4 \text{ в.}$$

Результирующая намагничивающая сила управления определяется по характеристике преобразователя при  $E_r = 41,4 \text{ в}$  и

$$I_{ст} = 706 \text{ а и равна } F_y = 3,4 \text{ ав.}$$

Таблица 6-7

Намагничивающая сила обмотки токовой отсечки из уравнения (6-37)

$$F_{T.o} = 70 - 3,4 - 0,304(41,4 - 0,0256 \cdot 706) + 0,0114 \cdot 706 = 67,5 \text{ ав.}$$

В качестве обмотки токовой отсечки приняты две обмотки, включенные последовательно, имеющие  $\omega_{T.o} = 2 \cdot 50 = 100$  витков,  $r_{T.o} = 2 \cdot 0,8 = 1,6 \text{ ом.}$

Ток в обмотке отсечки

$$I_{T.o} = \frac{F_{T.o}}{\omega_{T.o}} = \frac{67,5}{100} = 0,675 \text{ а.}$$

Сопротивление цепи обратной связи

$$R_{T.o} = \frac{R_{ш1}(I_{ст} - I_{отс})}{I_{T.o}} = \frac{0,0221(706 - 600)}{0,675} = 3,5 \text{ ом,}$$

где  $R_{ш1} = R_{д.п.г} + R_{к.о.г} + R_{д.п.д} + R_{к.о.д} = 1,24(0,0067 + 0,00161 + 0,00833 + 0,0012) = 0,0221 \text{ ом.}$

Уравнение намагничивающей силы обмотки обратной связи с отсечкой

$$F_{T.o} = \frac{U_{T.o}}{R_{T.o}} \omega_{T.o} = \frac{R_{ш1}(I - I_{отс})}{R_{T.o}} \omega_{T.o} = \beta_{T.o}(I - I_{отс}) = 0,632(I - I_{отс}), \quad (6-40)$$

где  $\beta_{T.o} = \frac{R_{ш1} \omega_{T.o}}{R_{T.o}} = \frac{0,0221 \cdot 100}{3,5} = 0,636 \frac{\text{ав}}{\text{а}}$  — коэффициент обратной связи по току с отсечкой.

#### 4. Рассчитать статические характеристики двигателя стола.

Принципиальная электрическая схема САУ приведена на рис. 6-8.

Расчет скоростных характеристик производится графо-аналитическим методом с учетом нелинейности характеристик преобразователя. Построение производится следующим образом. Зная заданную н. с. САУ  $F_3$  для заданной скорости, определяются результирующие н. с. для трех значений э. д. с. генератора при одном значении тока якоря с помощью уравнения (6-37). Полученную зависимость  $E_r = f(F_y)$  наносят на характеристику преобразователя (рис. 6-12) и определяют по точке пересечения значения  $E_r$  и  $F_y$ . Такие построения делаются для различных э. д. с. и различных токов якоря.

Полученные значения э. д. с. генератора рассматривают как функцию тока якоря, вычитают падение напряжения в якорной цепи и получают э. д. с. двигателя, по которой определяют скорость двигателя.

Результаты расчетов характеристики минимальной скорости для нескольких значений тока приведены в табл. 6-7. Аналогично рассчитывается характеристика максимальной скорости. Расчетные статические характеристики построены на рис. 6-13.

$E_r, \text{ в}$	$I, \text{ а}$	$F_3, \text{ ав}$	$F_T, \text{ ав}$	$F_H, \text{ ав}$	$F_{T.o}, \text{ ав}$	$F_y, \text{ ав}$	$IR, \text{ в}$	$E_d, \text{ в}$	$n, \text{ об/мин}$
40 46,5 50	0 1	14	0	12,5 14,0 15,2	—	1,85 0 -1,2	0	46,5	133
50 60,5 70	300	14	5,76	15,2 18,4 21,3	—	4,56 1,42 -1,52	1,76	43	123
70 74,1 80	600	14	11,5	21,3 22,6 24,3	—	4,2 2,9 1,2	35,1	39	111,5
50 53,8 60	610	14	11,7	15,2 16,34 18,22	6,36	4,28 3,0 1,1	35,7	18,1	51,7

5. Рассчитать переходные процессы при реверсировании стола с прямого хода на обратный и с обратного на прямой. Расчет переходных процессов производится при прямом ходе стола со скоростью  $v_{пр} = 30 \text{ м/мин}$  и обратном ходе со скоростью  $v_{обр} = 60 \text{ м/мин}$ .

Рассчитываются следующие переходные режимы.

Реверсирование электропривода стола с прямого хода на обратный:

а) снижение скорости стола с  $v_{пр} = 30 \text{ м/мин}$  до  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$ ;

б) выход резца из металла со скоростью стола  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$  (сброс нагрузки);

в) реверсирование электропривода стола со скоростью  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$  до скорости  $v_{обр} = 60 \text{ м/мин}$ .

Реверсирование электропривода стола с обратного хода на прямой:

а) снижение скорости стола с  $v_{обр} = 60 \text{ м/мин}$  до  $v_{обр} = 12 \text{ м/мин}$ ;

б) реверсирование электропривода стола со скорости  $v_{обр} = 12 \text{ м/мин}$  до скорости  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$ ;

в) врезание резца в металл со скоростью стола  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$  (наброс нагрузки);

г) повышение скорости стола с  $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$  до  $v_{пр} = 30 \text{ м/мин}$ .

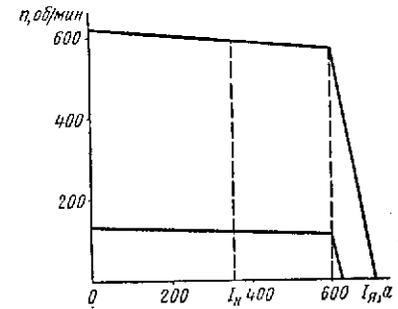


Рис. 6-13. Статические характеристики

Расчет производится методом конечных приращений. Составляются дифференциальные уравнения звеньев системы автоматического управления с допущениями, приведенными в [Л. 26].

Дифференциальное уравнение цепи управления [Л. 26]

$$IW_y = iw_y + T_y(iw_y) \frac{diw_y}{dt}, \quad (6-41)$$

где  $IW_y$  — суммарное управляющее воздействие на входе магнитного усилителя (системы управления);

$iw_y$  — мгновенное значение результирующей н. с. управления;

$T_y$  — суммарная постоянная времени цепей всех обмоток управления МУ, связанных с общим магнитным потоком.

Суммарное управляющее воздействие

$$\begin{aligned} IW_y &= IW_3 - \alpha(e_r - iR_r) + \beta i - \beta_{т.о.}(i - I_{отс}) 1[i - I_{отс}] = \\ &= IW_3 - 0,304(e_r - 0,0256i) + 0,0114i - 0,632(i - I_{отс}) 1[i - I_{отс}] = \\ &= IW_3 - 0,304e_r + 0,0192i - 0,632(i - I_{отс}) 1[i - I_{отс}]. \end{aligned} \quad (6-42)$$

Постоянная времени цепи управления МУ определяется по уравнению

$$T_y = \frac{d\Phi}{dt} \sum_{i=1}^3 \frac{w_i^2}{R_i}$$

и равна сумме постоянных времени обмоток обратных связей по напряжению, току (задающей) и токовой отсечки

$$\begin{aligned} T_y &= T_n + T_r + T_{т.о.} = 0,18 \frac{2 \cdot 13}{660} + 0,18 \frac{2 \cdot 0,8}{103} + 0,18 \frac{2 \cdot 0,8}{3,5} = \\ &= 0,092 \text{ сек.} \end{aligned}$$

Постоянные времени обмоток определены с учетом добавочных сопротивлений, включенных в цепи обмоток

$$T_y = T'_y \frac{R_{о.у}}{R_{о.у} + R_{доб}}$$

где  $T'_y = 0,18$  сек — величина, взятая из каталога.

Так как постоянная времени МУ примерно в шесть раз меньше постоянной времени обмотки возбуждения генератора, то ее изменением при насыщении магнитного усилителя можно пренебречь.

Дифференциальное уравнение МУ, записанное в конечных приращениях

$$\Delta iw_y = (IW_y - iw_y) \frac{\Delta t}{T_y}. \quad (6-43)$$

Выводится дифференциальное уравнение для цепи возбуждения генератора.

Записываются уравнения Кирхгофа (см. рис. 6-8)

$$u_{м.у} = \frac{R_b}{2}(i_b - i_1) + \frac{L_b}{2} \frac{di_b}{dt} \quad (\text{контур I}); \quad (6-44)$$

$$e_r = \frac{R_b}{2}(i_r + i_1) + R_{доб}i_3 + \frac{L}{2} \frac{di_b}{dt} \quad (\text{контур II}); \quad (6-45)$$

$$0 = i_2 + i_1 - i_b \quad (\text{точка а}); \quad (6-46)$$

$$0 = i_3 - i_1 - i_b \quad (\text{точка б}). \quad (6-47)$$

Уравнения (6-44)–(6-47) решаются относительно напряжения магнитного усилителя

$$u_{м.у} = -k_1 e_r + R_b i_b + k_2 L_b \frac{di_b}{dt}, \quad (6-48)$$

где

$$k_1 = \frac{R_b}{R_r + 2R_{д.ш}} = \frac{11,4}{11,4 + 2 \cdot 10,9} = 0,35;$$

$$k_2 = \frac{R_b + R_{д.ш}}{R_b + 2R_{д.ш}} = \frac{11,4 + 10,9}{11,4 + 2 \cdot 10,9} = 0,67.$$

Э. д. с. генератора можно представить как

$$e_r = K_r i_b,$$

тогда

$$u_{м.у} = (R_b - k_1 K_r) i_b + k_2 L_b \frac{di_b}{dt}, \quad (6-49)$$

где  $K_r$  — нелинейная зависимость от тока возбуждения, приведенная на рис. 6-9 в виде  $K_r = f(iw_{в.г})$ .

Индуктивность и постоянная времени обмотки возбуждения генератора

$$\begin{aligned} L_b &= \frac{d\psi}{di_b} = 2\rho w_b^2 \frac{d\Phi}{diw_{в.г}} = \frac{2\rho w_b^2}{k_{ст} n_r} \frac{dE_r}{diw_{в.г}} = \\ &= \frac{4 \cdot 475^2}{6,2 \cdot 1450} \frac{dE_r}{diw_{в.г}} = 100 \frac{dE_r}{diw_{в.г}}; \end{aligned}$$

$$T_{в.г} = \frac{L_b}{R_b} = \frac{100}{11,4} \frac{dE_r}{diw_{в.г}} = 8,8 \frac{dE_r}{diw_{в.г}}.$$

Постоянная времени рассчитана по кривой  $E_r = f(iw_{в.г})$  как функция н.с. возбуждения и приведена на рис. 6-9.

Дифференциальное уравнение в конечных приращениях

$$\Delta i_b = [u_{м.у} - (R_b - k_1 K_r) i_b] \frac{\Delta t}{k_2 R_b T_{в.г}(i_b)}. \quad (6-50)$$

Дифференциальные уравнения двигателя (с учетом якорной

цепи Г—Д) при постоянном магнитном потоке

$$e_r = e_d + iR + L \frac{di}{dt}; \quad (6-51)$$

$$M - M_c = \frac{J}{9,55} \frac{dn}{dt}, \quad (6-52)$$

где  $R$  — сопротивление якорной цепи  
 $R = R_x + R_r = 0,0586 \text{ ом};$   
 $L$  — индуктивность якорной цепи

$$L = L_x + L_r = \frac{4,8U_{д.н}}{I_{д.н} n_{д.н} 2p} + \frac{4,8U_{г.н}}{I_{г.н} n_{г.н} 2p} = \frac{4,8 \cdot 220}{353 \cdot 600 \cdot 4} + \frac{4,8 \cdot 230}{391 \cdot 1450 \cdot 4} = 0,00174 \text{ гн};$$

$T_x$  — электромагнитная постоянная времени якорной цепи Г—Д

$$T_x = \frac{L}{R} = \frac{0,00174}{0,0586} = 0,03 \text{ сек};$$

$J$  — момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя,

$$J = J_d + J_{ред} + (J_{ст} + J_{д.ст})_{пр} = 5,75 + 0,1 \cdot 5,75 + 0,97 = 7,295 \text{ кгм}^2.$$

Дифференциальные уравнения в конечных приращениях

$$\Delta i_{(m)} = \left[ \frac{e_r(m) - e_d(m)}{R} - i_{(m)} \right] \frac{\Delta t}{T_x} = [I(m) - i_{(m)}] \frac{\Delta t}{T_x}; \quad (6-53)$$

$$\Delta n_{(m)} = (i - I_c) \frac{\Delta t}{J/9,55 \text{ с}_м}. \quad (6-54)$$

Дифференциальное уравнение двигателя при регулировании магнитного потока то же, но

$$e_d = k_e \Phi n, \quad (6-55)$$

где

$$k_e = \frac{pN}{a60} = \frac{p2\omega_n}{a60} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 105}{1 \cdot 60} = 7 \frac{\text{в}}{\text{об} \cdot \text{об}/\text{мин}}.$$

Уравнение движения электропривода

$$k_m \Phi i - M_c = \frac{J}{9,55} \frac{dn}{dt}, \quad (6-56)$$

где  $k_m = 9,55 \text{ кг} = 9,55 \cdot 7 = 67 \text{ н} \cdot \text{м}/\text{а}.$

Дифференциальное уравнение в конечных приращениях

$$\Delta n_{(m)} = [k_m \Phi_{(m)} i_{(m)} - M_c] \frac{\Delta t}{9,55}. \quad (6-57)$$

Дифференциальное уравнение цепи обмотки возбуждения двигателя

$$U_{в.д} = i_{в.д} R_{в.д} + L_{в.д} \frac{di_{в.д}}{dt}, \quad (6-58)$$

где  $R_{в.д}$  — сопротивление цепи обмотки возбуждения;

$R_{в.д.у} = r_{в.д}$  — то же при усилении магнитного потока;  
 $R_{в.д.о} = r_{в.д} + R_{в.доб}$  — то же при ослаблении магнитного потока;  
 $r_{в.д} = 1,24 \cdot 24 = 29 \text{ ом}$  — сопротивление обмотки возбуждения;

$R_{в.доб}$  — дополнительное сопротивление, обеспечивающее уменьшение тока возбуждения до  $I_{осл} = 3,25 \text{ а}$  и ослабление магнитного потока в два раза до  $\Phi_{осл} = 2,33 \cdot 10^{-2} \text{ вб};$

$$R_{в.доб} = \frac{U_{в.д}}{I_{в.д}} - R_{в.д} = \frac{220}{3,25} - 29 = 39 \text{ ом};$$

$L_{в.д}$  — индуктивность обмотки возбуждения

$$L_{в.д} = 2p\omega_{в.д}^2 \frac{d\Phi_d}{di_{в.д}} = 2p\omega_{в.д} \frac{d\Phi_d}{di_{в.д}} = 4 \cdot 750 \frac{d\Phi_d}{di_{в.д}} = 3000 \frac{d\Phi_d}{di_{в.д}}, \text{ гн};$$

$T_{в.д}$  — постоянная времени цепи обмотки возбуждения, равная:

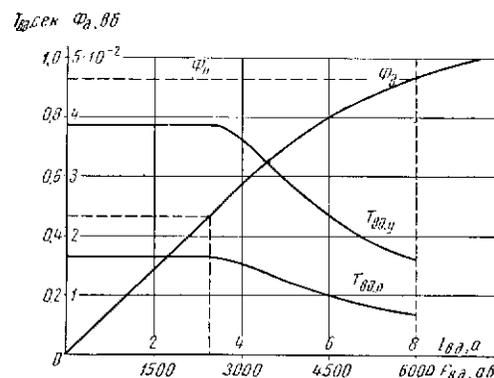


Рис. 6-14. Характеристика намагничивания и постоянная времени обмотки возбуждения двигателя

при ослаблении магнитного потока

$$T_{в.д.о} = \frac{L_{в.д}}{R_{в.д.о}} = \frac{3000}{29 + 39} \frac{d\Phi_d}{di_{в.д}} = 44,2 \frac{d\Phi_d}{di_{в.д}}, \text{ сек};$$

при усилении магнитного потока

$$T_{в.д.у} = \frac{L_{в.д}}{R_{в.д.у}} = \frac{3000}{29} \frac{d\Phi_d}{di_{в.д}} = 104 \frac{d\Phi_d}{di_{в.д}}, \text{ сек.}$$

Постоянные времени рассчитаны по кривой  $\Phi_d = f(i_b)$  как функции тока возбуждения и приведены на рис. 6-14.

Дифференциальное уравнение в конечных приращениях

$$\Delta i_{в.д(m)} = \left[ \frac{U_{в.д(m)}}{R_{в.д}} - i_{в.д(m)} \right] \frac{\Delta t}{T_{в.д}(i_{в.д})} = [I_{в.д(m)} - i_{в.д(m)}] \frac{\Delta t}{T_{в.д}(i_{в.д(m)})}. \quad (6-59)$$

Расчет переходного процесса реверса электропривода стола с прямого хода ( $v_{пр} = 12 \text{ м/мин}$ ) на обратный ( $v_{обр} = 60 \text{ м/мин}$ ).

Расчетные уравнения

$$IW_{y(m)} = IW_{з(m)} - 0,304e_{r(m)} + 0,0192i_{(m)} - 0,632(i_{(m)} - I_{отс}) 1[i - I_{отс}];$$

$$\Delta iw_{y(m)} = [IW_{y(m)} - iw_{y(m)}] \frac{\Delta t}{0,092} = IW_{з} - IW_E + IW_I - IW_{Iотс} 1[i - I_{отс}];$$

$$iw_{y(m)} = iw_{y(m-1)} + \Delta iw_{y(m-1)}; \quad (6-60)$$

$$\Delta i_{в(m)} = (u_{м.у(m)} - [11,4 - 0,35 K_r(i_b(m)) i_{в(m)}]) \frac{\Delta t}{0,765T_r(i_b(m))};$$

$$i_{в(m)} = i_{в(m-1)} + \Delta i_{в(m-1)}; \quad (6-61)$$

$$\Delta i_{(m)} = [I_{(m)} - i_{(m)}] \frac{\Delta t}{0,03};$$

$$i_{(m)} = i_{(m-1)} + \Delta i_{(m-1)}; \quad (6-62)$$

$$\Delta n_{(m)} = [i_{(m)} - 86] \frac{\Delta t}{0,225};$$

$$n_{(m)} = n_{(m-1)} + \Delta n_{(m-1)}. \quad (6-63)$$

Начальные условия приведены в первой строке расчетной табл. 6-8;  $M_c = 287 \text{ н.м}$ ,  $I_c = 86 \text{ а}$ .

Выписываются постоянные времени звеньев САУ  $T_y = 0,092 \text{ сек}$ ,  $T_r = 0,65 \div 0,15 \text{ сек}$ ,  $T_n = 0,03 \text{ сек}$ ;

$$T_m = \frac{JR}{9,55c_{\epsilon M}} = \frac{7,295 \cdot 0,0586}{9,55 \cdot 0,35 \cdot 3,34} = 0,038 \text{ сек.}$$

Параметры	Начальные условия	Номер шага					
		0	1	2	3	4	5
$t, \text{ сек}$		0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
$i\omega_y, \text{ ав}$	0,44	0,44	-10,26	-19,86	-28,21	-35,51	-41,91
$\Delta i\omega_y, \text{ ав}$	0	-10,7	-9,6	-8,35	-7,3	-6,4	-5,6
$u_{м.у}, \text{ в}$	0,8	0,8	-17	-32,5	-40	-43	-45
$i_{в.г}, \text{ а}$	1,35	1,35	1,35	1,348	1,313	1,260	1,178
$T_{в.г}, \text{ сек}$	0,615	0,615	0,615	0,615	0,615	0,615	0,615
$K_r$	65	65	65	65	65	65	65
$\Delta i_{в.г}, \text{ а}$	0	0	-0,002	-0,035	-0,053	-0,062	-0,067
$e_r, \text{ в}$	90	90	90	87	85	81	77
$e_d, \text{ в}$	84	84	84	84	84	84	83,5
$I, \text{ а}$	86	86	86	51	17	-51	-110
$i, \text{ а}$	86	86	86	86	76	56	18
$\Delta i, \text{ а}$	0	0	0	-10	-20	-38	-42,5
$n, \text{ об/мин}$	240	240	240	240	240	239,6	238,4
$\Delta n, \text{ об/мин}$	0	0	0	0	-0,44	-1,2	-2,8
$IW_{з}, \text{ ав}$	26,2	-70	-70	-70	-70	-70	-70
$IW_E, \text{ ав}$	-27,41	-27,41	-27,41	-26,5	-25,8	-24,6	-23,4
$IW_I, \text{ ав}$	1,65	1,65	1,65	1,65	1,36	1,02	0,35
$IW_y, \text{ ав}$	0,44	-96,76	-96,76	-95,85	-94,44	-93,6	-93,0

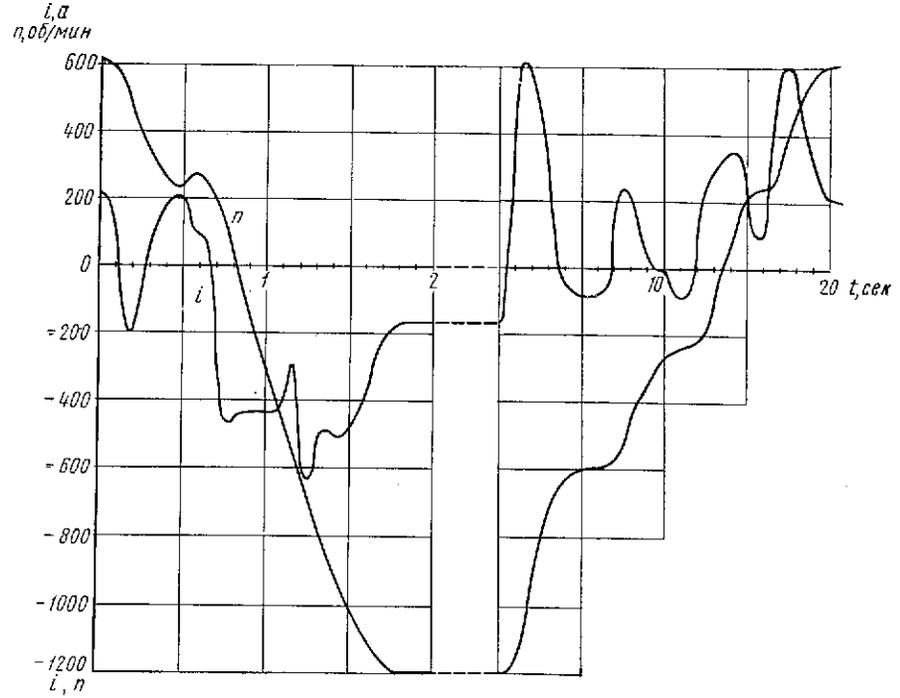


Рис. 6-15. Графики переходных процессов

Принимается  $\Delta t = 0,01$  сек (в три раза меньше самой малой постоянной времени  $T_{я}$ ). Расчет сведен в табл. 6-8, где приведено начало расчета.

При  $U_r = 205$  в включается реле РФ и начинается ослабление магнитного потока двигателя. При этом изменяется расчетная формула (6-54) и добавляются (6-65) и (6-66)

$$\Delta n_{(m)} = [67 \Phi_{д(m)} i_{(m)} - 287] \frac{\Delta t}{0,764}; \quad (6-64)$$

$$\Delta i_{в,д(m)} = [3,25 - i_{в,д(m)}] \frac{\Delta t}{T_{в,д}(i_{в,д})}; \quad (6-65)$$

$$i_{в,д(m)} = i_{в,д(m-1)} + \Delta i_{в,д(m-1)}. \quad (6-66)$$

Расчет сведен в табл. 6-9, где дано начало расчета. Все кривые переходных процессов  $n = f(t)$  и  $i = f(t)$  приведены на рис. 6-15.

Таблица 6-9

Параметры	Начальные условия	Номер шага					
		0	1	2	3	4	5
$t, \text{сек}$		0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
$i\omega, \text{ав}$	-25	-25	-23,5	-21,9	-20,43	-19,06	-17,91
$\Delta i\omega, \text{ав}$	1,5	1,5	1,64	1,47	1,37	1,1	0,97
$u_{м.у}, \text{в}$	-38	-38	-36,5	-35	-33,5	-31,5	-30
$i_{в,г}, \text{а}$	-3,75	-3,75	-3,86	-3,98	-4,1	-4,21	-4,31
$T_{в,г}, \text{сек}$	0,32	0,32	0,32	0,315	0,30	0,29	0,28
$K_r$	30	30	30	29	27,5	26	25
$\Delta i_{в,г}, \text{а}$	-0,11	-0,11	-0,132	-0,125	-0,113	-0,099	-0,087
$e_r, \text{в}$	-214	-214	-220	-224	-228	-230	-234
$i_{в,д}, \text{а}$	8	8	7,65	7,35	7,08	6,80	6,58
$I_{в,д}, \text{а}$	8	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
$\Delta i_{в,д}, \text{а}$	0	-0,35	-0,3	-0,261	-0,233	-0,213	-0,195
$\Phi \cdot 10^{-2}, \text{вб}$	4,66	4,66	4,50	4,45	4,30	4,25	4,20
$T_{в,д}, \text{сек}$	0,135	0,135	0,145	0,155	0,170	0,175	0,178
$e_d, \text{в}$	-198	-198	-194	-195	-191	-192	-195
$I, \text{а}$	-270	-270	-442	-475	-630	-650	-664
$i, \text{а}$	-297	-297	-288	-340	-385	-466	-527
$\Delta i, \text{а}$	0	9	-52	-45	-81	-61	-45
$n, \text{об/мин}$	-565	-565	-574	-582	-591	-602	-616
$\Delta n, \text{об/мин}$	0	-9	-8	-9	-11	-14	-16
$I\omega_3, \text{ав}$	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70
$I\omega_E, \text{ав}$	65,5	65,5	67	68	69,5	70	71
$I\omega_I, \text{ав}$	-5,7	-5,7	-5,55	-6,5	-7,4	-8,95	-10,1
$I\omega_y, \text{ав}$	-10,2	-10,2	-8,6	-8,5	-8,0	-8,95	-9,1

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАСТОЧНЫМИ СТАНКАМИ

### § 7-1. Электроприводы расточных станков

Во вторую группу индексатора станков [Л.2] входят сверлильные и расточные станки.

Электропривод сверлильных станков представляет собой многодвигательный привод, состоящий из асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, соединенных в общую систему автоматического управления с функциональными связями. Электропривод расточных и координатно-расточных станков включает регулируемые приводы постоянного тока с широким диапазоном регулирования скорости приводов подач. Главные электроприводы постоянного тока этих станков весьма сходны с аналогичными приводами станков токарной группы, описанных в главе 5. Электроприводы перемещенного тока, применяемые в качестве главных приводов расточных станков, в этой главе также не рассматриваются.

Данная глава посвящена вопросам приводов подач постоянного тока. В свою очередь приводы подач постоянного тока имеют отличительные особенности для координатно-расточных и универсально-расточных или тяжелых расточных станков второй группы.

В настоящее время эти приводы для координатных станков осуществляют от двигателей постоянного тока, регулируемых напряжением от преобразователей электромашинных и магнитных с обратными связями. Расчетам систем с магнитными усилителями отводится место в главе 8.

Приводы подач тяжелых расточных станков с полным основанием могут быть названы приводами широкого диапазона регулирования, который в этих станках достигает 2000 : 1 за счет использования регулирования магнитного потока двигателя. Основным элементом регулирования (до 1000 : 1) является электромашинный усилитель с поперечным полем. Такая система нашла широкое применение в расточных станках ленинградского завода. Эта система достаточно унифицирована, но несмотря на это приведенные в настоящей главе расчеты, по мнению авторов, имеют самостоятельное значение, так как в них использованы главным образом нелинейные методы.

### § 7-2. Электропривод подачи по системе «электромашинный усилитель — двигатель постоянного тока»

1. Рассчитать статические характеристики двигателя стола (са-лазок) координатно-расточного станка. Принципиальная схема электропривода стола приведена на рис. 7-1. Двигатель ЭП-245; 0,245 квт; 110 в; 3,27 а; 3600 об/мин. ЭМУ5А; 0,5 квт; 115 в; 4,35 а; 2850 об/мин; комплект обмоток ОД2104. Характеристика холос-

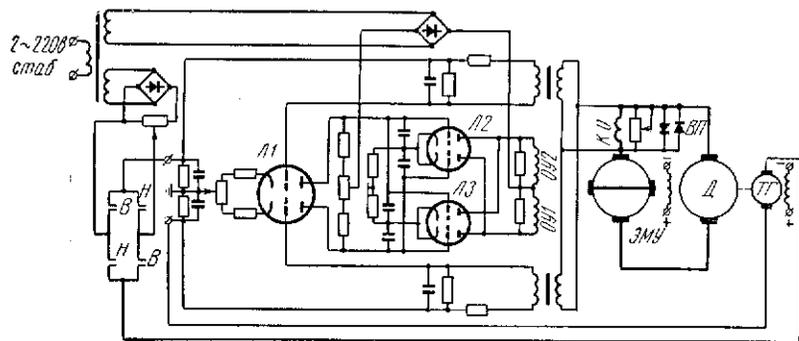


Рис. 7-1. Схема электропривода стола координатно-расточного станка

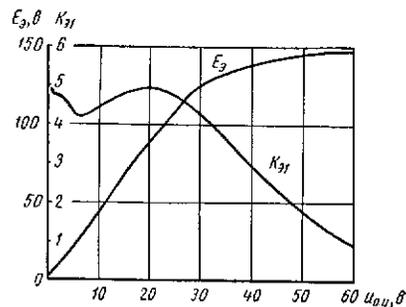


Рис. 7-2. Характеристика холостого хода и коэффициент усиления ЭМУ

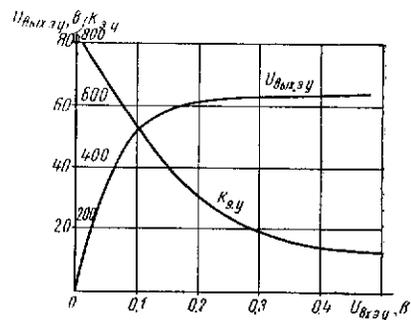


Рис. 7-3. Характеристика и коэффициент усиления электронного усилителя

того хода ЭМУ приведена на рис. 7-2. Тахогенератор СЛ-221; 110 в; 3600 об/мин. Электронный усилитель рассчитан по [Л.29]. Его характеристика приведена на рис. 7-3.

Составляются уравнения статики:

$$\left\{ U_3 - U_c - U_{т.о} \frac{k_w}{k_R} 1 [I - I_{отс}] \right\} K_{э.у} K_{э.1} = E_0; \quad (7-1)$$

$$U_c = \gamma n; \quad (7-2)$$

$$U_{т.о} = I_B R_{к.о}; \quad (7-3)$$

$$E_0 = \frac{n}{K_d} + IR. \quad (7-4)$$

Решение уравнений относительно скорости приводит к уравнению статической характеристики

$$n = \frac{U_3 K - IR K_d - I_B R_{к.о} K \frac{k_w}{k_R} 1 [I - I_{отс}]}{1 + \gamma K}, \quad (7-5)$$

где  $U_3$  — задающее напряжение;

$I, I_B$  — ток якоря двигателя и ток выпрямителя узла токовой отсечки;

$R, R_{к.о}$  — сопротивление якорной цепи и сопротивление компенсационной обмотки с учетом шунтирующего ее сопротивления

$$R = 1,2 (R_{я.д} + R_{д.п.д} + R_{я.э} + R_{д.п.э} + R_{к.о}) = 6,8 \text{ ом};$$

$$R_{к.о} = \frac{R'_{к.о} R_{ш}}{R'_{к.о} + R_{ш}} = \frac{1,3 \cdot 13}{1,3 + 13} = 1,2 \text{ ом};$$

(сопротивление, шунтирующее компенсационную обмотку, выбирается из условия полной компенсации реакции якоря при  $I < I_{отс}$  и принимается равным  $R_{ш} = 13 \text{ ом}$ );

$K = K_{э.у} K_{э.1} K_d$  — коэффициент усиления САУ;

$K_{э.у}, K_{э.1}$  — коэффициенты усиления электронного усилителя и ЭМУ от первой обмотки управления;

$K_d$  — коэффициент передачи двигателя

$$K_d = \frac{n_n}{U_n - I_n R_d} = 33,4 \frac{\text{об/мин}}{\text{в}};$$

$k_w, k_R$  — коэффициенты приведения

$$k_w = \frac{\omega_{к.о}}{\omega_{о.у1}} = \frac{105}{2650} = 0,04;$$

$$k_R = \frac{R_{к.о}}{R_{о.у1}} = \frac{1,2}{3000} = 0,0004;$$

$\gamma = 0,03 \frac{\text{в}}{\text{об/мин}}$  — коэффициент обратной связи по скорости.

Узел токовой отсечки рассчитан в (7—2—2). Расчет характеристик выполняется с помощью последовательных приближений с учетом нелинейности характеристик электронного и электромашинного усилителей.

Характеристика наименьшей скорости двигателя ( $n_{\text{мин}} = 3 \text{ об/мин}$  при  $I_{\text{к.х}} = 0,46 \text{ а}$ ).

Определяется задающее напряжение. Э. д. с. ЭМУ по (7-4)

$$E_3 = \frac{3}{33,4} + 0,46 \cdot 6,8 = 3,26 \text{ в.}$$

Напряжение на входе ЭМУ при  $E_3 = 3,26 \text{ в}$  равно  $U_{\text{вх.э}} = 0,8 \text{ в}$  [находится по характеристике ЭМУ (рис. 7-2)].

Коэффициент усиления ЭМУ

$$K_{\text{э1}} = \frac{E_3}{U_{\text{вх.э}}} = \frac{3,26}{0,8} = 4,4.$$

Напряжение на входе электронного усилителя ЭУ равно  $U_{\text{вх.э.у}} = 0,001 \text{ в}$  [находится по характеристике усилителя (рис. 7-3) для  $U_{\text{вх.э.у}} = U_{\text{вх.э}} = 0,8 \text{ в}$ ].

Коэффициент усиления ЭУ

$$K_{\text{э.у}} = \frac{U_{\text{вх.э.у}}}{U_{\text{вх.э.у}}} = \frac{0,8}{0,001} = 800.$$

Задающее напряжение системы

$$U_3 = U_{\text{вх.э.у}} + \gamma n = 0,001 + 0,03 \cdot 3 = 0,091 \text{ в.}$$

Скоростная характеристика рассчитывается по (7-5).

Задаются  $I = 4 \text{ а} < I_{\text{отс}}$

$$n = \frac{0,091 \cdot 800 \cdot 4,4 \cdot 33,4 - 4 \cdot 6,8 \cdot 33,4}{1 + 0,03 \cdot 800 \cdot 4,4 \cdot 33,4} = 2,77 \text{ об/мин.}$$

Уточняется  $K_{\text{э1}}$

$$\gamma n = 0,03 \cdot 2,77 = 0,081, U_{\text{вх.э}} = U_3 - \gamma n = 0,091 - 0,081 = 0,01 \text{ в,}$$

$$K_{\text{э.у}} = 800, K_{\text{э1}} = 4,2;$$

$$n = \frac{0,091 \cdot 800 \cdot 4,2 \cdot 33,4 - 4 \cdot 6,8 \cdot 33,4}{1 + 0,03 \cdot 800 \cdot 4,2 \cdot 33,4} = 2,75 \text{ об/мин.}$$

Уточнение

$$\gamma n = 0,082 \text{ в, } U_{\text{вх.э.у}} = 0,091 - 0,082 = 0,009 \text{ в, } K_{\text{э.у}} = 800, K_{\text{э1}} = 4,2 \text{ — дальнейшего пересчета не требуется.}$$

При  $I > I_{\text{отс}}$  задаются ток выпрямителя, шунтирующего компенсационную обмотку ЭМУ,  $I_{\text{в}} = 0,1 \text{ а}$  и по вольтамперной характеристике выпрямителя (см. рис. 7-5) находят напряжение на вентиле  $U_{\text{в}} = 8 \text{ в}$ . Определяют ток компенсационной обмотки  $I_{\text{к.о}}$  и ток якоря двигателя  $I$ :

$$I_{\text{к.о}} = \frac{U_{\text{в}}}{R_{\text{к.о}}} = \frac{8}{1,2} = 6,66 \text{ а;}$$

$$I = I_{\text{к.о}} + I_{\text{в}} = 6,66 + 0,1 = 6,76 \text{ а.}$$

По этому значению тока и рассчитывается скоростная характеристика. Аналогично рассчитывается характеристика при максимальной рабочей скорости  $n_{\text{д.макс}} = 700 \text{ об/мин}$ .

Ускоренное перемещение стола осуществляется при  $n_{\text{д.уск}} = 4500 \text{ об/мин}$ , полученной за счет ослабления магнитного потока тахогенератора. Определяется новое значение коэффициента обратной связи  $\gamma_0$  и дополнительное сопротивление в обмотке возбуждения тахогенератора  $R_{\text{доб}}$ . Задающее напряжение остается тем же, что и при скорости  $700 \text{ об/мин}$ ,  $U_3 = 21,015 \text{ в}$ . При этом  $E_3 = 138 \text{ в}$ ,  $U_{\text{вх.э}} = 39 \text{ в}$ ,  $K_{\text{э}} = 3,6$ ;  $U_{\text{вх.э.у}} = 0,06 \text{ в}$ ,  $K_{\text{э.у}} = 650$ ,  $\gamma_0 n = U_3 - U_{\text{вх.э.у}} = 21,015 - 0,06 = 20,955 \text{ в,}$

$$\gamma_0 = \frac{20,955}{4500} = 0,00465 \text{ в/об/мин.}$$

Дополнительное сопротивление определяется из равенства

$$\frac{\gamma_0}{\gamma} = \frac{R_{\text{в.т.г}}}{R_{\text{в.т.г}} + R_{\text{доб}}}; \quad (7-6)$$

$$R_{\text{доб}} = \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} - 1 \right) R_{\text{в.т.г}} = \left( \frac{0,03}{0,00465} - 1 \right) 3,6 = 19,6 \text{ ом.}$$

Результаты расчетов скоростных характеристик приведены в табл. 7-1.

Таблица 7-1

Характер подачи стола	$U_3, \text{ в}$	$\gamma, \text{ в/об/мин}$	$I_{\text{в}}, \text{ а}$	$I, \text{ а}$	$K_{\text{э.у}}$	$K_{\text{э1}}$	$n, \text{ об/мин}$
Минимальная подача	0,091	0,03	0,01	4,35	800	4,2	2,7
			0,05	5,88	750	4,2	2,34
			0,1	6,76	720	4,21	1,96
			0,2	7,3	660	4,3	1,24
			0,3	7,4	530	4,4	0
Максимальная рабочая подача	21,015	0,03	0,01	4,35	780	3	699,8
			0,1	6,76	530	3,4	699,5
			0,2	7,3	200	3,54	695
			0,4	7,5	72,3	4,42	670
			0,44	7,54	3,1	4,31	0
Ускоренное перемещение	21,015	0,00465	0,05	5,88	26,9	2,58	4000
			0,1	6,76	14,4	2,77	3500
			0,2	7,3	9,2	3,43	3000
			0,4	7,5	3,76	4,42	804
			0,44	7,54	3,1	4,3	0

По результатам табл. 7-1 на рис. 7-4 построены расчетные скоростные характеристики, где *a* — при минимальной подаче, *b* — при максимальной подаче (кривая 1), ускоренном перемещении (кривая 2).

2. Рассчитать узел токовой отсечки в схеме, приведенной на рис. 7-1. Узел токовой отсечки ограничивает перегрузки двигателя в статических и динамических режимах. Токовая отсечка обеспечивается за счет нескомпенсированной реакции якоря. При токах больше тока отсечки выпрямитель отсечки ВП пропускает ток, в результате чего уменьшается ток в компенсационной обмотке. При этом уменьшается компенсация реакции якоря ЭМУ по продольной оси и ЭМУ размагничивается. На вход ЭМУ как бы подается н. с. от действия реакции якоря, равная

$$F_{т.о} = (I - I_{к.о}) \omega_{к.о} = I_{в} \omega_{к.о}, \quad (7-7)$$

где  $I_{в} = I - I_{к.о}$  — ток выпрямителя отсечки.

Напряжение узла токовой отсечки, которое как бы подается на вход ЭМУ

$$U_{т.о} = \frac{F_{т.о}}{\omega_{т.о}} R_{т.о} = I_{в} R_{к.о}. \quad (7-8)$$

В рассматриваемой системе ток выпрямителя, так же как и ток стопорения двигателя, не зависит от задающего напряжения из-за нелинейности характеристики электронного усилителя, так как при подаче на вход электронного усилителя  $U_{вх.э.у} \geq 0,2$  в, что почти

всегда имеет место при  $n = 0$ , его выходное напряжение примерно постоянно.

Выпрямитель выбирается по требуемой вольтамперной характеристике из условия, чтобы при  $I < I_{отс}$  компенсационная обмотка полностью скомпенсировала бы реакцию якоря, а при  $I = I_{отс}$  — реакция якоря полностью размагнитила бы ЭМУ.

Принимается: ток отсечки  $I_{отс} = (1,2-1,5) I_{д.н} = 3,9-4,8$  а; ток стопорения  $I_{ст} = (2-2,5) I_{д.н} = 6,5-8$  а.

Выбирается селеновый выпрямитель типа 40ГД16А, вольтамперная характеристика которого приведена на рис. 7-5. Если считать, что выпрямитель начинает пропускать ток при  $U_{в} \approx 5$  в, то токовая отсечка начинает действовать при токе отсечки

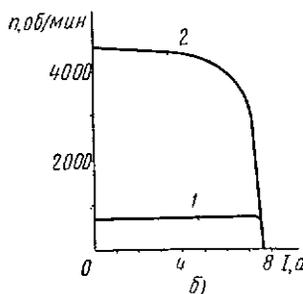
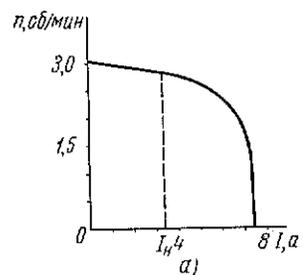


Рис. 7-4. Статические характеристики

$$I_{отс} = \frac{U_{в.о}}{R_{к.о}} = \frac{5}{1,2} = 4,2 \text{ а}$$

и обеспечивает ток стопорения

$$I_{ст} = \frac{U_{в.ст}}{R_{к.о}} = \frac{9}{1,2} = 7,5 \text{ а}$$

3. Найти передаточные функции звеньев системы автоматического управления электропривода подачи расточного станка модели 262 и составить ее структурную схему. Принципиальная электрическая схема САУ приведена на рис. 7-6. Двигатель типа МИ-42;

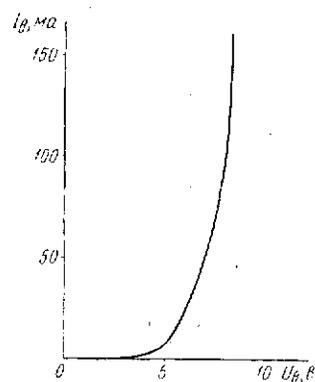


Рис. 7-5. Характеристика выпрямителя 40ГД16А

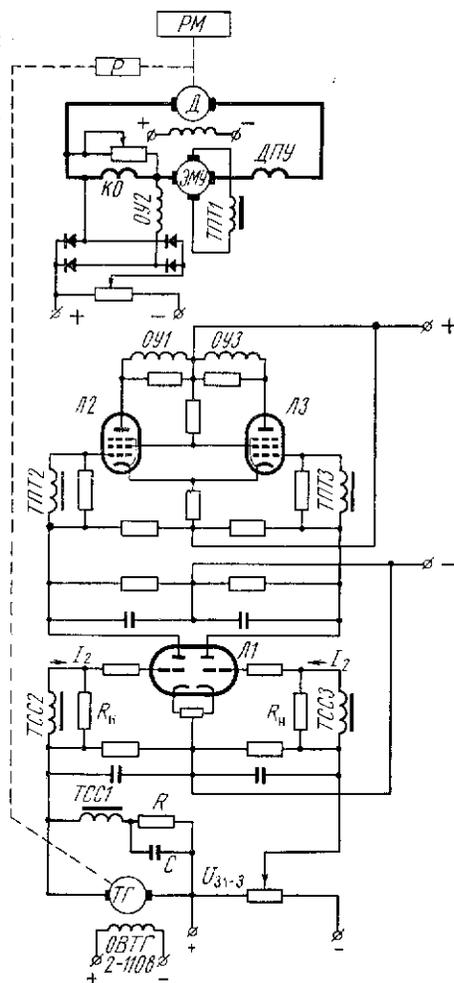


Рис. 7-6. Принципиальная схема электропривода стола горизонтально-расточного станка

1,6 кВт; 220 в; 9,1 а; 1500 об/мин;  $\omega_n = 157$  рад/сек;  $c_e' = 1,31$  рад/сек/в;  $c_m = 1,31$  н.м/а. ЭМУ50-4Д; 2,2 кВт; 230 в; 9,6 а; 1500 об/мин. Промежуточный электронный усилитель:  $K = 485$ ;  $\Delta = 0,0705$  в;  $B = 34,2$  в; рис. 7-7 (усилитель рассчитан по [Л.3]). Тахогенератор ДТ-100; 100 в; 800 об/мин;  $R_n = 200$  ом. Статические характеристики рассматриваемой системы могут быть рассчитаны по [Л.3] или аналогично (7-2-1).

Передаточная функция электронного усилителя (на линейном участке)

$$W_{э.у}(p) = K_{э.у} = 485. \quad (7-9)$$

Передаточная функция электромашинного усилителя

$$W_{э}(p) = \frac{K_1 K_2}{(T_{y,p} + 1)(T_{к,p} + 1)} = \frac{8,3}{(0,128p + 1)(0,16p + 1)}, \quad (7-10)$$

где  $K_1, K_2$  — коэффициенты усиления по напряжению первого и второго каскадов ЭМУ;

$T_y, T_k$  — постоянные времени продольной (управления) и поперечной (короткозамкнутой) цепей ЭМУ;

Постоянная времени  $T_y$  берется как суммарная постоянная времени всех контуров, сцепленных с общим магнитным потоком ЭМУ.

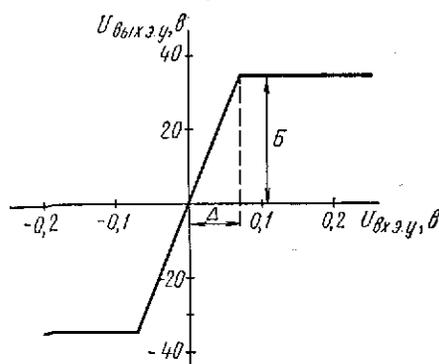


Рис. 7-7. Характеристика электронного усилителя

Постоянная времени обмотки управления с учетом внутреннего сопротивления лампы электронного усилителя

$$T_{о.у} = \frac{L_{о.у}}{R_{о.у} + R_l} = \frac{132}{2230 + 7700} = 0,013 \text{ сек},$$

где

$$L_{о.у} = \left( \frac{L}{\omega^2} \right) \omega_{о.у}^2 = 13 \cdot 10^{-6} \cdot 3200^2 = 132 \text{ гн};$$

$\frac{L}{\omega^2}$  — удельная индуктивность, принятая по [Л. 30] для ЭМУ50-4Д.

Постоянная времени компенсационной обмотки

$$T_{к.о} = \frac{60a}{\rho N n} \cdot \frac{\omega_{к.о}^2}{R_{к.о} + R_{ш}} \cdot \frac{de_{к}}{dF_y} = 0,102 \text{ сек}.$$

Суммарная постоянная времени цепи управления

$$T_y = 2T_{о.у} + T_{к.о} = 2 \cdot 0,013 + 0,102 = 0,128 \text{ сек}.$$

Постоянная времени к. з. цепи  $T_k = 0,16 \text{ сек}$  определена по кривым приложения [Л.30] для ЭМУ50-4Д, 1500 об/мин.

Передаточная функция двигателя

$$W_d(p) = \frac{K_d}{T_{я} T_{м} p^2 + T_{м} p + 1}, \quad (7-11)$$

где  $K_d$  — коэффициент передачи двигателя;  
 $T_{я}, T_{м}$  — электромагнитная и электромеханическая постоянные времени.

Коэффициент передачи двигателя

$$K_d = \frac{1}{c_e'} = \frac{1}{1,31} = 0,765 \frac{\text{в}}{\text{рад/сек}}.$$

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи

$$T_{я} = \frac{L_{я.д} + L_{я.э} + L_{к.о.э}}{R_{я.д} + R_{э}} = \frac{0,046 + 0,12 + 0,04}{5} = 0,041 \text{ сек},$$

где  $L_{я.д}$  — индуктивность якоря двигателя

$$L_{я.д} = \frac{11,4U_n}{2\rho n I_n} = \frac{11,4 \cdot 220}{4 \cdot 1500 \cdot 9,1} = 0,046 \text{ гн};$$

$L_{я.э}, L_{к.о.э}$  — индуктивность якоря и компенсационной обмотки ЭМУ.

Электромеханическая постоянная времени электропривода

$$T_{м} = \frac{(J_{л} + J'_{мех}) R}{c_e' c_m'} = \frac{(0,065 + 0,0085) 5}{1,31 \cdot 1,31} = 0,215 \text{ сек},$$

где момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя [Л.1],

$$J'_{мех} = \frac{365}{4} \cdot \frac{Gv^2}{n^2} = \frac{365}{4} \cdot \frac{1700 \cdot 1,11^2}{1500^2} = 0,0085 \text{ кгм}^2.$$

Так как  $4T_{я} < T_{м}$ , то двигатель можно изобразить двумя апериодическими звеньями с постоянными времени  $T_1$  и  $T_2$ , которые определяются из следующих соотношений:

$$T_1 T_2 = T_{я} T_{м};$$

$$T_1 + T_2 = T_{м};$$

$$T_{1,2} = \frac{T_{м}}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4T_{я}}{T_{м}}} \right),$$

откуда  $T_1 = 0,16 \text{ сек}$ ,  $T_2 = 0,055 \text{ сек}$ .

Передаточная функция двигателя

$$W_n(p) = \frac{K_d}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} = \frac{0,765}{(0,16 p + 1)(0,055 p + 1)} \quad (7-11')$$

Передаточная функция тахогенератора с редуктором

$$W_{TG}(p) = \gamma K_p = 1,19 \cdot 0,5 = 0,595 \frac{\text{в}}{\text{рад/сек}} \quad (7-12)$$

Структурная схема САУ приведена на рис. 7-8.

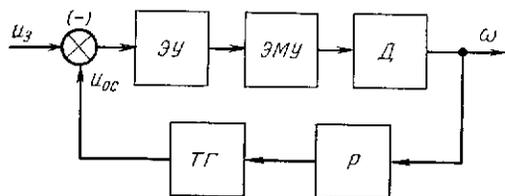


Рис. 7-8. Структурная схема электропривода подачи

**4. Определить устойчивость системы автоматического управления электропривода подачи расточного станка** Рассматриваемая САУ содержит электромашинный и электронный усилители, имеющие нелинейные характеристики. Если в первом приближении считать характеристики ЭМУ линейными, то возможно разделить систему на линейную и нелинейную части и проверку на устойчивость провести методом гармонического баланса.

Определяется амплитудно-фазовая характеристика нелинейного элемента (электронного усилителя) [Л.14]

$$W_n\left(\frac{A_1}{\Delta}\right) = \frac{4}{A_1 \pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(A_1 \sin \omega t) \sin \omega t d\omega t = \frac{2B}{\pi \Delta} \left[ \arcsin \frac{\Delta}{A_1} + \frac{\Delta}{A_1} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{A_1}\right)^2} \right], \quad (7-13)$$

где  $B = 34,2 \text{ в}$ ;  $\Delta = 0,07 \text{ в}$  — параметры нелинейности характеристики электронного усилителя (см. рис. 7-7).

Обратная амплитудно-фазовая характеристика нелинейного элемента без учета коэффициента усиления его на линейной части

$$E'_{н.о}\left(\frac{A_1}{\Delta}\right) = -\frac{1}{W_{н.о}\left(\frac{A_1}{\Delta}\right)} =$$

$$= \frac{1}{\frac{2}{\pi} \left[ \arcsin \frac{\Delta}{A_1} + \frac{\Delta}{A_1} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{A_1}\right)^2} \right]} \quad (7-14)$$

Задаваясь значениями  $A_1/\Delta$ , рассчитывается обратная АФХ нелинейного элемента. Результаты расчета сведены в табл. 7-2, характеристика построена на рис. 7-9.

Таблица 7-2

$A_1/\Delta$	1	2	3	4	5
$A_1, \text{ в}$	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35
$\Delta/A_1$	1	0,5	0,33	0,25	0,2
$E'_{н.о}\left(\frac{A_1}{\Delta}\right)$	-1	-1,63	-2,41	-3,18	-3,36

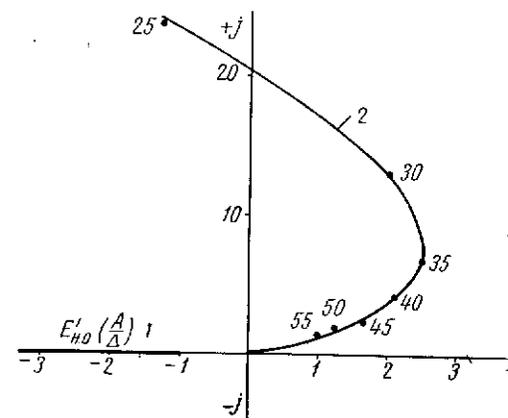


Рис. 7-9. Амплитудно-фазовая характеристика линейной части системы и обратная АФХ нелинейного элемента

АФХ линейной части САУ рассчитывается с учетом коэффициента усиления электронного усилителя

$$W_n(j\omega) = \frac{K_1 K_2 K_d K_{\text{Э.У}} \gamma K_p K_c}{(T_y j\omega + 1)(T_R j\omega + 1)(T_1 j\omega + 1)(T_2 j\omega + 1)} = \frac{1755}{(0,129 j\omega + 1)(0,142 j\omega + 1)(0,167 j\omega + 1)(0,055 j\omega + 1)} \quad (7-15)$$

Определяется модуль и фаза линейной части САУ по уравнениям

$$M = 1755 \prod_{i=1}^4 \frac{1}{\sqrt{T_i^2 \omega^2 + 1}}; \quad (7-16)$$

$$\varphi = \sum_{i=1}^4 - \arctg T_i \omega. \quad (7-17)$$

Результаты расчета сведены в табл. 7-3. АФХ линейной части САУ построена на рис. 7-9. Из рис. 7-9 видно, что линейная часть САУ неустойчива и далеко выходит за пределы устойчивости.

Таблица 7-3

$\omega, \text{ рад/сек}$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi$
25	0,371	0,272	0,700	0,186	23,9	68°10'	74°10'	45°30'	79°30'	267°
30	0,316	0,229	0,628	0,155	12,4	71°30'	76°40'	50°50'	81°10'	280°
35	0,275	0,198	0,570	0,133	7,25	74°10'	78°30'	55°10'	82°30'	290°
40	0,243	0,176	0,521	0,116	4,53	75°50'	80°00'	58°40'	83°20'	298°
50	0,196	0,141	0,438	0,093	1,97	78°40'	82°00'	64°00'	84°40'	309°

**5. Произвести синтез корректирующих цепей в САУ расточного станка.** Расчет производится согласно [Л. 31] в следующем порядке: строится АФХ желаемой САУ и подбираются корректирующие цепи, поворачивающие АФХ нескорректированной САУ (рис. 7-9) до АФХ желаемой.

АФХ скорректированной САУ строится по заданным показателям, определяющим качество переходного процесса: а) максимальное время переходного процесса  $\tau_{\text{макс}} = 0,8 \text{ сек}$ ; б) перерегулирование  $\sigma_{\text{макс}} = 50\%$ ; в) число колебаний  $\mu \leq 3$ ; г) желаемый запас по модулю  $\Delta M = 20\%$  и фазе  $\Delta \varphi = 20\%$ .

Используя заданные показатели с помощью номограмм  $\Delta \varphi = f(P_{\text{мин}}), \Delta M = f(P_{\text{мин}}, \Delta \varphi), \sigma_{\text{макс}} = f(P_{\text{мин}}, P_{\text{макс}}), \tau_{\text{макс}} = f(P_{\text{мин}}, P_{\text{макс}})$

[Л.31], подбираются минимальное и максимальное значения вещественной частотной характеристики желаемой САУ  $P_{\text{мин}}(\omega) = 0,8; P_{\text{макс}}(\omega) = 1,5$ . Такая система обеспечивает  $\Delta M = 32\%, \Delta \varphi = 22\%, \sigma_{\text{макс}} = 41\%$ .

Строится вещественная частотная характеристика на рис. 7-10, а по следующим показателям [Л.31]: интервал положительности

$$\omega_{\text{п}} = \frac{9\pi}{\tau_{\text{макс}}} = \frac{9 \cdot 3,14}{0,8} = 35,4 \text{ рад/сек};$$

начальная ордината

$$P_0 = \frac{K}{1+K} = \frac{1755}{1+1755} \approx 1,$$

где  $K = K_1 K_2 K_d K_{\text{э.у}} \gamma K_p K_c$ .

Значения  $\omega$  (рис. 7-10):  $\omega_d = x\omega_{\text{п}} = 0,5 \cdot 35,4 = 17,7 \text{ рад/сек}$ ;  $\omega_a = x_a \omega_d = 0,5 \cdot 17,7 = 8,85 \text{ рад/сек}$ ;  $\omega_2 = 44,5 \text{ рад/сек}$ ;  $\omega_3 = \frac{\omega_2}{\lambda_2} = \frac{44,5}{0,6} = 74 \text{ рад/сек}$ ;  $\omega_1 = \lambda_1 \omega_3 = 0,7 \cdot 74 = 52 \text{ рад/сек}$ .

Коэффициенты  $x, x_a, \lambda_1, \lambda_2$  приняты по [Л. 31].

Вещественная характеристика заменяется тремя трапециями со следующими показателями, приведенными в табл. 7-4 согласно рис. 7-10, б и единичной трапеции (рис. 7-10, в).

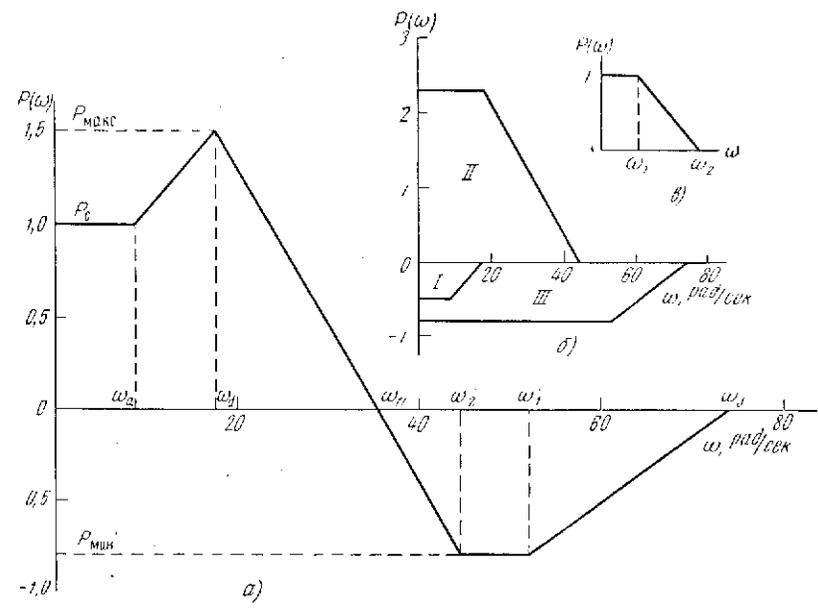


Рис. 7-10. Вещественная частотная характеристика

Таблица 7-4

Трапеция	$\omega_1, \text{ рад/сек}$	$\omega_2, \text{ рад/сек}$	$\omega_3, \text{ рад/сек}$	$\alpha$	$h$
I	8,85	17,7	13,27	0,331	-0,5
II	17,7	44,5	31,1	0,43	2,3
III	52	74	63	0,175	-0,8

Строится мнимая минимально-фазовая частотная характеристика. Расчет мнимой характеристики производится по номограмме  $Q = f\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$  [Л.31]. По значению  $\alpha$  для каждой трапеции выбирается соответствующая кривая на номограмме, и по заданному значению  $\omega/\omega_0$  определяют значение  $Q'(\omega)$ , а затем  $Q(\omega) = hQ'(\omega)$  и  $\omega = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\omega_0$ . Результаты расчетов приведены в табл. 7-5. Мнимые характеристики для каждой трапеции и суммарная мнимая частотная характеристика системы  $Q(\omega)$  построены на рис. 7-11.

Таблица 7-5

Трапеция	Значения	$\frac{\omega}{\omega_0}$								
		0,4	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2
I	$Q'_1$	0,24	0,7	0,96	0,82	0,48	0,35	0,28	0,24	0,22
	$Q_1$	0,12	0,35	0,48	0,41	0,24	0,17	0,14	0,12	0,11
	$\omega$	5,3	10,6	13,27	15,9	21,2	26,5	31,8	37,1	42,4
II	$Q'_2$	0,28	0,78	0,85	0,83	0,5	0,36	0,28	0,24	0,22
	$Q_2$	0,643	1,79	1,95	1,91	1,15	0,825	0,643	0,55	0,505
	$\omega$	12,4	24,8	31,1	37,3	49,8	62,2	74,5	87,0	99,5
III	$Q'_3$	0,24	0,7	1,1	0,8	0,47	0,35	0,28	0,25	0,22
	$Q_3$	0,192	0,56	0,88	0,64	0,376	0,28	0,224	0,200	0,176
	$\omega$	25,2	50,4	63,0	75,5	101	126	151	176	202

По вещественной и мнимой частотным характеристикам, данные которых приведены в табл. 7-6, строится АФХ желаемой скорректированной системы. Построение производится по следующим этапам (рис. 7-12): а) откладывается  $P(\omega)$  и  $Q(\omega)$ ; б) строятся векторы  $\Phi(j\omega)$  и  $1-\Phi(j\omega)$  и находят углы  $\varphi$  и  $\psi$ ; в) откладывается угол  $\varphi + \psi$  и проводится вектор  $K(j\omega)$ ; г) фиксируется конец вектора  $K(j\omega)$  по значению

$$|K(j\omega)| = \frac{|\Phi(j\omega)|}{|1 + \Phi(j\omega)|}$$

Такие построения производятся для каждого значения  $\omega$ . Результаты расчета АФХ приведены в табл. 7-6. Построена АФХ на рис. 7-13 (кривая I).

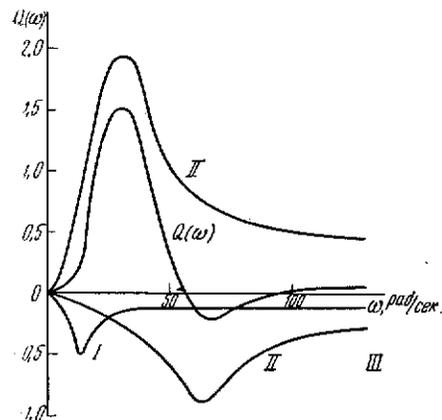


Рис. 7-11. Мнимые частотные характеристики.

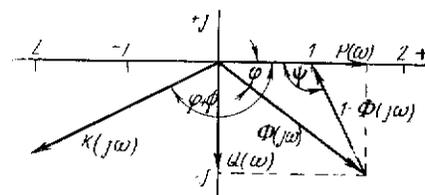


Рис. 7-12. Векторная диаграмма к построению вектора АФХ скорректированной системы

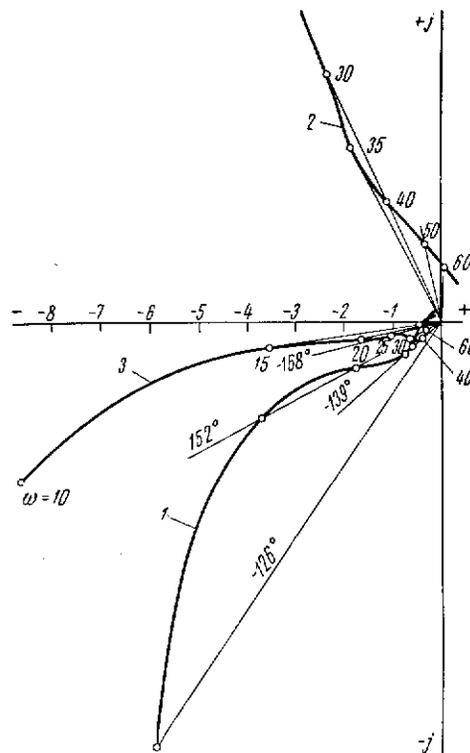


Рис. 7-13. Амплитудно-фазовые характеристики системы

Таблица 7-6

$\omega$ , рад/сек	10	14	18	30	35,4	50	57	67	74
$P(\omega)$	1,06	1,28	1,5	0,46	0	-0,8	-0,62	-0,25	0
$Q(\omega)$	-0,1	-0,22	-0,7	-1,32	-1,25	-0,34	0	0,22	0,2
$\varphi$ , град	5	10	25	73	90	157	180	228	270
$\psi$ , град	121	142	126	66	48	11	0	-10	-12
$\varphi + \psi$ , град	126	152	151	139	138	168	180	218	258
$K$	10,4	4,1	1,95	0,96	0,78	0,48	0,265	0,248	0,196

При сопоставлении значений АФХ скорректированной и нескорректированной систем при одинаковой частоте, например при  $\omega = 50$  рад/сек, видно, что вектор АФХ нескорректированной системы необходимо повернуть на значительный угол в положительном направлении.

Для подобной коррекции потребуется более чем одно корректирующее звено. Поэтому проводится сначала предварительная коррекция с помощью гибкой связи по второй производной по скорости, осуществляемой трансформатором ТСС и контуром RC (см. рис. 7-6). Применение обратной связи по второй производной от скорости объясняется тем, что передаточная функция такого звена содержит  $p^2$  и, переходя к АФХ, звено дает поворот вектора примерно на  $180^\circ$  в положительном направлении.

Определяется передаточная функция корректирующей обратной связи по второй производной от скорости.

Записываются уравнения

$$E_{TГ}(p) = (R_{1Г} + R_{TГ} + pL_{1Г} + \frac{1}{pC}) I_1(p); \quad (7-18)$$

$$K_T p L_1 I_1(p) = (R_{2Г} + R_{H} + pL_{2Г}) I_2(p); \quad (7-19)$$

$$E_{TГ}(p) = K_p \gamma \omega_d(p); \quad (7-20)$$

$$U_2(p) = I_2(p) R_H. \quad (7-21)$$

Передаточная функция

$$W_{к1}(p) = \frac{U_2(p)}{\omega_d(p)} = \frac{K_T K_p \gamma R_H T_{к1} T_c p^2}{(R_{2Г} + R_H)(T_{к1} T_c p^2 + T_c p + 1)(T_{к2} p + 1)} = \frac{18,4 \cdot 0,5 \cdot 1,19 \cdot 22\,000 \cdot 0,00945 \cdot 0,01 p^2}{(4000 + 22\,000)(0,00945 \cdot 0,01 p^2 + 0,01 p + 1)(0,032 p + 1)} = \frac{0,00088 p^2}{(0,0001 p^2 + 0,011 p + 1)(0,032 p + 1)}, \quad (7-22)$$

где

$$T_{к1} = \frac{L_{1Г}}{R_{1Г} + R_{TГ}} = \frac{2,8}{1,2(50 + 200)} = 0,00945 \text{ сек};$$

$$T_{к2} = \frac{L_{2Г}}{R_{2Г} + R_H} = \frac{830}{4000 + 22\,000} = 0,032 \text{ сек}.$$

Принимая  $T_c = 0,01$  сек, определяется

$$C = \frac{0,01}{1,2(50 + 200)} = 33 \text{ мкФ}.$$

АФХ системы, скорректированной обратной связью по второй производной от скорости,

$$W_{с1}(j\omega) = W(j\omega) [1 + W_{к1}(j\omega)] = \frac{1755}{(0,129j\omega + 1)(0,142j\omega + 1)(0,167j\omega + 1)(0,055j\omega + 1)} \times \left[ 1 + \frac{0,00088(j\omega)^2}{[0,0001(j\omega)^2 + 0,011j\omega + 1](0,032j\omega + 1)} \right] = M_{с1} e^{j\varphi_{с1}}. \quad (7-23)$$

Результаты расчета АФХ приведены в табл. 7-7. Кривая построена на рис. 7-13 (кривая 2).

Таблица 7-7

$\omega$ , рад/сек	25	30	35	40	50	60
$M_{с1}$	20,3	11,2	8,0	5,45	3,25	2,3
$\varphi_{с1}$ , град	-241	-245	-242	-245	-257	-273

Дальнейшая коррекция производится с помощью гибкой обратной связи по первой производной от тока поперечной цепи ЭМУ (от э. д. с. ЭМУ), осуществляемой с помощью дифференцирующего трансформатора (рис. 7-6). Обратная связь охватывает второй каскад электронного усилителя и оба каскада ЭМУ с передаточной функцией

$$W_0(j\omega) = \frac{5,7 \cdot 0,25}{(0,129j\omega + 1)(0,16j\omega + 1)}. \quad (7-24)$$

Определяются параметры обратной связи.

Расчет производится графо-аналитически. Принимается  $\omega = 60$  рад/сек (частота может быть принята любой внутри нужного интервала). На рис. 7-14, а откладывается вектор  $OB$  и определяется вектор  $O_1B$

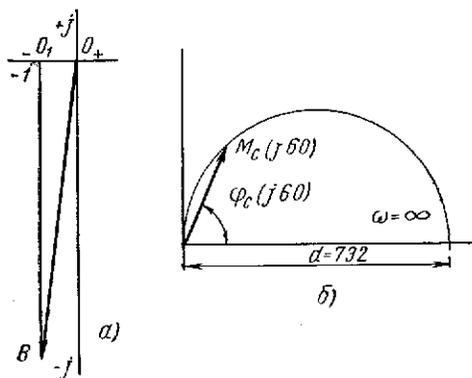
$$\overline{O_1B} = \frac{W_{с1}(j\omega)}{W_c(j\omega)} = \frac{M_{с1}}{M_c} e^{j(\varphi_{с1} - \varphi)}.$$

Так как при введении обратной связи вектор  $O_1B$  равен

$$\overline{O_1B} = 1 + W_0(j\omega) W_{к2}(j\omega),$$

то

$$\overline{OB} = \overline{O_1B} - 1 = W_0(j\omega) W_{к2}(j\omega) = 8,35 e^{-j90^\circ} - 1 = 8,4 e^{-j98^\circ}.$$



Тогда АФХ корректирующей обратной связи

$$W_{к2}(j\omega) = \frac{\overline{OB}}{W_0(j\omega)} = \frac{8,4e^{-j98^\circ}}{0,02e^{j164^\circ}} = 300e^{j66^\circ} = M_{к2}e^{j\varphi_{к2}} \quad (7-25)$$

АФХ гибкой обратной связи, осуществляемой трансформатором,

Рис. 7-14. Векторная диаграмма к определению АФХ корректирующей гибкой обратной связи  $W_{к2}(j\omega) = \frac{\alpha_{o.c} T' j\omega}{1 + T'' j\omega}$ . (7-26)

Она имеет вид полуокружности (рис. 7-14, б) с диаметром

$$d = \frac{M_{к2}}{\cos \varphi_{к2}} = \frac{300}{\cos 66^\circ} = 732.$$

Параметры трансформатора

$$(\alpha_{o.c} T')_{\text{треб}} = \frac{M_{к1}}{\omega \sin \varphi_{к2}} = \frac{d}{\omega \operatorname{tg} \varphi_{к2}} = \frac{732}{60 \operatorname{tg} 66^\circ} = 5,42;$$

$$T''_{\text{треб}} = \frac{1}{\omega \operatorname{tg} \varphi_{к2}} = \frac{1}{60 \operatorname{tg} 66^\circ} = 0,0074 \text{ сек.}$$

Принимается трансформатор со следующими параметрами:

$K_T' = 72$ ;  $T' = 0,272$ ;  $R' = 0,4 \text{ ом}$ ;  $L'' = 200 \text{ гн}$ ;  $R'' = 4000 \text{ ом}$ ;

$$T'' = \frac{L''}{R'' + R_H} = \frac{200}{4000 + 22000} = 0,0077 \text{ сек.}$$

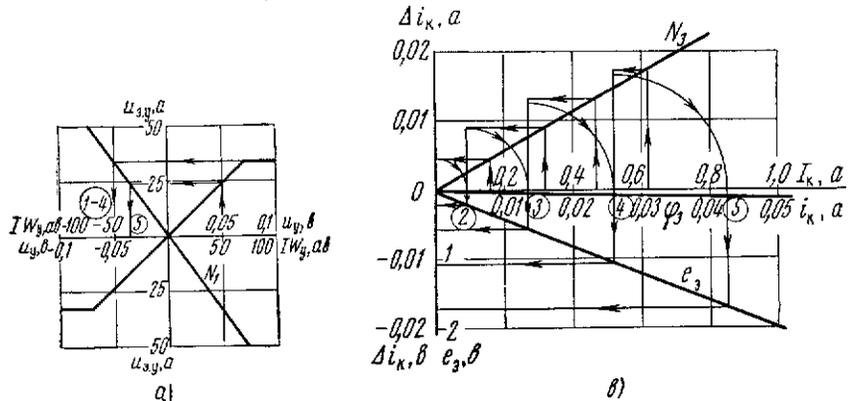


Рис. 7-15. Построение переходного процесса методом многих параметров в фазовых плоскостях

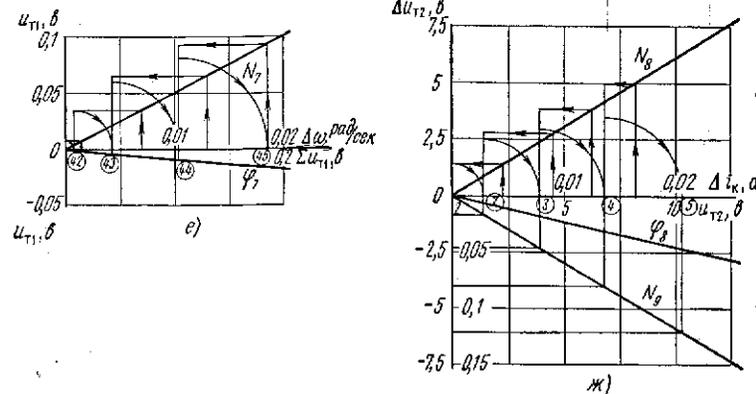
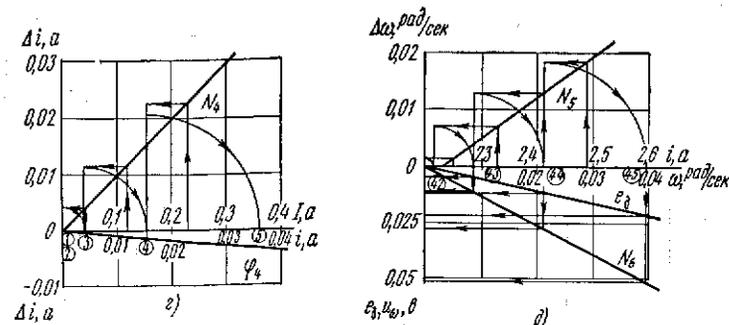
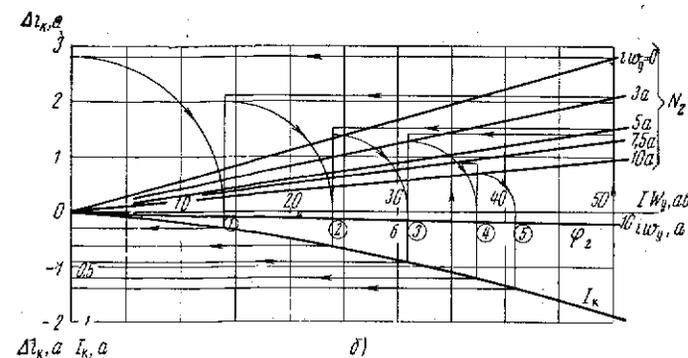


Рис. 7-15. (Продолжение).

$$\alpha_{o.c} T' = \frac{R_n R'}{R'' + R_n} K_T' T' = \frac{22\,000 \cdot 0,4}{4000 + 22\,000} 72 \cdot 0,272 = 5,5.$$

АФХ скорректированной (желаемой) системы

$$W_c(j\omega) = \frac{W_{c1}(j\omega)}{1 + W_0(j\omega) W_{к2}(j\omega)} = \frac{1755}{(0,129j\omega + 1)(0,142j\omega + 1)(0,167j\omega + 1)(0,055j\omega + 1)} \times$$

$$\times \left[ 1 + \frac{0,00088(j\omega)^2}{[0,0001(j\omega)^2 + 0,011j\omega + 1](0,032j\omega + 1)} \right] = M_c e^{j\varphi_c}. \quad (7-27)$$

Расчет АФХ  $W_c(j\omega)$  сведен в табл. 7-8. Кривая построена на рис. 7-13 (кривая 3).

Таблица 7-8

$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$	10	15	20	25	30	40	60
$M_c$	9,3	3,6	1,71	1,15	0,76	0,52	0,35
$\varphi_c, \text{град}$	-165	-172	-167	-165	-159	-145	-154

В результате введения двух корректирующих связей система стала устойчивой. Запас по фазе оказался несколько ниже заданного ( $\Delta\varphi = 16^\circ$ ).

**6. Рассчитать переходный процесс пуска двигателя подачи точного станка на низкую скорость.** Расчет производится методом многих параметров в фазовых плоскостях [Л.32]. Вся система условно разбивается на ряд элементов, каждый из которых описывается уравнением, решение которого осуществляется на фазовой плоскости.

Электронный усилитель ЭУ. Характеристика усилителя  $U_{э.у} = f(U_y)$  приведена на рис. 7-15, а.

Входное напряжение усилителя (напряжение управления)

$$u_y = u_s - u_o - \sum u_{т1} - u'_{т2}, \quad (7-28)$$

где  $u_s = 0,131$  в — задающее напряжение;

$u_o$  — напряжение обратной связи по скорости двигателя;

$\sum u_{т1}$  — напряжение обратной связи по второй производной скорости, снимаемое с трансформатора Т1;

$u'_{т2}$  — напряжение обратной связи по производной тока поперечной цепи ЭМУ, снимаемое с трансформатора Т2, приведенное ко входу ЭУ.

Электромашинный усилитель ЭМУ. Дифференциальное уравнение цепи управления ЭМУ

$$IW_y = iw_y + T_y(iw_y) \frac{diw_y}{dt}, \quad (7-29)$$

где  $IW_y$  — суммарное управляющее воздействие на входе ЭМУ;  
 $iw_y$  — текущее значение результирующей н. с. управления;  
 $T_y$  — постоянная времени цепи управления ЭМУ.  
 Суммарное управляющее воздействие на входе ЭМУ

$$IW_y = u_{э.у} \frac{w_{о.у}}{R_{о.у}} = N_1 u_{э.у}, \quad (7-30)$$

где

$$N_1 = \frac{3200}{2230} = 1,435 \text{ 1/ом.}$$

Зависимость  $IW_y = f(u_{э.у})$  (луч  $N_1$ ) наносится на рис. 7-15, а вместе с характеристикой ЭУ.

Постоянная времени цепи управления ЭМУ

$$T_y(iw_y) \approx T_{к.о}(iw_y) = \frac{60a}{pNn_s} \frac{w_{к.о}^2 R_k}{R_{к.о} + R_m} \frac{di_k}{diw_y} = 1,28 \frac{di_k}{diw_y}. \quad (7-31)$$

Значения  $\frac{di_k}{diw_y}$  принимаются по характеристике ЭМУ

$$I_k = f(iw_y)$$

(см. рис. 7-15, б).

Постоянной времени обмотки управления можно пренебречь из-за ее малости по сравнению с постоянной времени компенсационной обмотки ЭМУ.

Уравнение цепи управления ЭМУ в конечных приращениях

$$\Delta iw_y = \frac{\Delta t}{T_y(iw_y)} IW_y - \frac{\Delta t}{T_y(iw_y)} iw_y = N_2(iw_y) IW_y - \varphi_2(iw_y), \quad (7-32)$$

где  $\Delta t$  — интервал времени, принятый равным 0,004 сек. Зависимости коэффициентов  $N_2 = f(iw_y, IW_y)$  и  $\varphi_2 = f(iw_y)$  наносятся на фазовую плоскость  $\Delta iw_y = f(iw_y)$  (рис. 7-15, б). Лучи  $N_2$  рассчитываются для нескольких значений  $iw_y$ , при которых определяются  $T_y$ . На эту же плоскость также наносится характеристика первого каскада ЭМУ  $I_k = f(iw_y)$ , обеспечивающая связь цепи управления ЭМУ с его поперечной цепью.

Дифференциальное уравнение поперечной цепи ЭМУ

$$I_k = i_k + T_k \frac{di_k}{dt}. \quad (7-33)$$

В конечных приращениях

$$\Delta i_k = \frac{\Delta t}{T_k} I_k - \frac{\Delta t}{T_k} i_k = N_3 I_k - \varphi_3, \quad (7-34)$$

где

$$N_3 = \frac{0,004}{0,142} = 0,028.$$

Постоянная времени к. з. цепи ЭМУ определяется с учетом параметров дифференцирующего трансформатора и считается постоянной, так как  $\frac{de_3}{di_k} \approx \text{const}$

$$T_k = \frac{L_k + L_{T2}}{R_k + R_{T2}} = \frac{0,222 + 0,04}{1,39 + 0,4} = 0,142 \text{ сек.}$$

На плоскость  $\Delta i_k = f(i_k)$  (рис. 7-15, в) наносятся зависимости  $N_3 = f(I_k)$  и  $\varphi_3 = f(i_k)$  и характеристика второго каскада ЭМУ  $e_3 = f(i_k)$ .

Двигатель. Дифференциальное уравнение якорной цепи

$$\frac{e_3 - e_d}{R} = I = i + T_y \frac{di}{dt}, \quad (7-35)$$

где

$$e_d = c_e \omega_d = 1,31 \omega_d;$$

$$R = R_d + R_3 = 5 \text{ ом.}$$

В конечных приращениях

$$\Delta i = \frac{\Delta t}{T_y} I - \frac{\Delta t}{T_y} i = N_4 I - \varphi_4, \quad (7-36)$$

где

$$T_y = 0,041 \text{ сек} = \text{const};$$

$$N_4 = \frac{0,004}{0,041} = 0,0975.$$

На плоскость  $\Delta i = f(i)$  (рис. 7-15, г) наносятся зависимости  $N_4 = f(I)$  и  $\varphi_4 = f(i)$ .

Уравнение движения электропривода

$$M - M_c = J \frac{d\omega_d}{dt}. \quad (7-37)$$

В конечных приращениях

$$\Delta \omega_d = \frac{\Delta t}{J/c} (i - I_c) = N_5 (i - I_c), \quad (7-38)$$

где

$$N_5 = \frac{0,004 \cdot 1,31}{0,0735} = 0,071, \quad I_c = 2,23 \text{ а.}$$

Зависимость  $N_5 = f(i)$  наносится на плоскость (рис. 7-15, д).  
Обратные связи

Жесткая обратная связь по скорости

$$u_{\omega} = K_p \gamma K_c \omega_d = 0,5 \cdot 1,19 \cdot 0,96 \omega_d = 0,57 \omega_d = N_6 \omega_d.$$

Луч обратной связи  $[N_6]$  строится на плоскости  $\Delta \omega = f(\omega_d)$  (рис. 7-15, д).

На этой же плоскости нанесен луч э. д. с. двигателя  $e_d = 1,31 \omega_d$ .

Гибкая обратная связь по второй производной от скорости (передаточную функцию см. 7-2-5).

Дифференциальное уравнение

$$0,00088 \frac{d^2 \omega_d}{dt^2} = u_{T1} + 0,043 \frac{du_{T1}}{dt}. \quad (7-39)$$

Проинтегрировав это уравнение, получим

$$0,00088 \frac{d\omega_d}{dt} = \int_0^t u_{T1} dt + 0,043 u_{T1}.$$

В конечных приращениях

$$0,00088 \frac{\Delta \omega_d}{\Delta t} = \sum u_{T1} \Delta t + 0,043 u_{T1} \quad (7-40)$$

или при  $\Delta t = 0,004 \text{ сек}$

$$u_{T1} = 5 \Delta \omega - 0,093 \sum u_{T1} = N_7 \Delta \omega - \varphi_7. \quad (7-40')$$

Лучи  $N_7 = f(\Delta \omega_d)$  и  $\varphi_7 = f(\sum u_{T1})$  наносятся на плоскость  $u_{T1} = f(\Delta \omega, \sum u_{T1})$  (рис. 7-15, е).

Гибкая обратная связь по первой производной от тока поперечной цепи ЭМУ.

Дифференциальное уравнение

$$5,4 \frac{di_k}{dt} = u_{T2} + 0,0175 \frac{du_{T2}}{dt}, \quad (7-41)$$

где  $u_{T2}$  — напряжение гибкой обратной связи по производной тока поперечной цепи ЭМУ.

В конечных приращениях при  $\Delta t = 0,004 \text{ сек}$

$$\Delta u_{T2} = 309 \Delta i_k - 0,228 u_{T2} = N_8 \Delta i_k - \varphi_8. \quad (7-42)$$

Лучи  $N_8 = f(\Delta i_k)$  и  $\varphi_8 = f(u_{T2})$  наносятся на плоскость  $\Delta u_{T2} = f(u_{T2}, \Delta i_k)$  (рис. 7-15, ж). На этой же плоскости нанесен луч приведения напряжения  $u_{T2}$  к входу ЭУ

$$u'_{T2} = \frac{u_{T2}}{K_{э.у1}} = \frac{u_{T2}}{85} = 0,0118u_{T2} = N_9 u_{T2}, \quad (7-43)$$

где  $K_{э.у1}$  — коэффициент усиления первого каскада ЭУ.

Расчет переходного процесса производится графически на рис. 7-15, где показаны пять первых шагов расчета. На плоскостях  $\Delta\omega = f(i)$  и  $u_{T1} = f(\Delta\omega, \Sigma u_{T1})$  (рис. 7-15, *д* и 7-15, *е*) для при-

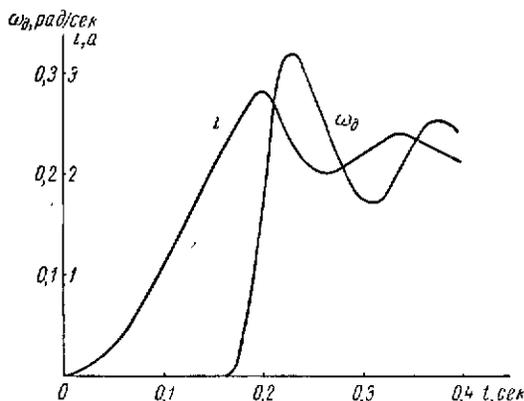


Рис. 7-16. Графики переходного процесса

Таблица 7-9

Параметры	Номер шага					
	0	1	2	3	4	5
$t$ , сек	0	0,004	0,008	0,012	0,016	0,020
$u_y$ , в	0,131	0,131	0,131	0,114	0,085	0,051
$u_{э.у}$ , в	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	24,5
$IW_y$ , а	50	50	50	50	50	35
$\Delta i \omega_y$ , а	2,8	2,0	1,4	1,3	0,7	0
$i \omega_y$ , а	0	2,8	4,8	6,2	7,5	8,2
$I_{к.}$ , а	0	0,16	0,32	0,47	0,62	0,71
$\Delta i_{к.}$ , а	0	0,005	0,009	0,012	0,016	0,018
$i_{к.}$ , а	0	0	0,005	0,014	0,026	0,042
$e_{э.}$ , в	0	0	0,22	0,60	1,15	1,75
$e_{д.}$ , в	0	0	0	0	0	0
$I$ , а	0	0	0,044	0,12	0,23	0,35
$\Delta i$ , а	0	0	0,004	0,011	0,021	0,03
$i$ , а	0	0	0	0,004	0,015	0,036
$\Delta\omega$ , рад/сек	0	0	0	0	0	0
$\omega$ , рад/сек	0	0	0	0	0	0
$u_{\omega}$ , в	0	0	0	0	0	0
$\Sigma u_{T1}$ , в	0	0	0	0	0	0
$\Delta u_{T2}$ , в	0	1,4	2,5	2,9	3,5	3,0
$u_{T2}$ , в	0	0	1,4	3,9	6,8	10,3
$u'_{T2}$ , в	0	0	0,017	0,046	0,08	0,121

мера показаны шаги 42—45, так как скорость двигателя до 42-го шага равна нулю. Порядок расчета показан стрелками. Номера шагов обозначены цифрами в кружочках. При расчете составляется табл. 7-9, в которой приведено начало расчета. Время при расчете определяется, как  $t = N_{э.у} \Delta t$ .

Кривые переходного процесса построены на рис. 7-16.

7. Рассчитать переходный процесс повышения скорости двигателя подачи расточного станка с  $n_1 = 10$  об/мин до  $n_2 = 500$  об/мин. Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 7-17. Двигатель и ЭМУ приняты те же, что в (7-2-3). Расчет производится методом фазовой плоскости [Л.14]

Система дифференциальных уравнений

$$\left[ U_{34} - \alpha_1 \left( u_3 + T_1 \frac{du_3}{dt} \right) - \beta' R_{к.у} (i - I_{отс}) + [i - I_{отс}] + \left( U_{31-3} - \gamma K_p n - \alpha_2 T_2 \gamma K_p \frac{dn}{dt} - \frac{\alpha_3 T_3}{K_{1э.у}} \frac{di_{к.}}{dt} \right) K_{э.у} \frac{k_{\omega}^{1-3}}{R^{1-3/4}} \right] \times K_4 = e_{к.}; \quad (7-44)$$

$$e_{к.}(i_y) = i_{к.} R_{к.} + T_{к.} R_{к.} \frac{di_{к.}}{dt}; \quad (7-45)$$

$$e_{э.}(i_{к.}) = c_e n + i R; \quad (7-46)$$

$$c_M (i - I_c) = \frac{J}{9,55} \frac{dn}{dt}; \quad (7-47)$$

$$u_3 = e_3 - i R_3, \quad (7-48)$$

где  $U_{31-3} = 100$  в;  $U_{34} = 36$  в;  $I_c = 2,23$  а;  $I_{отс} = 9,1$  а;  $R = 5$  ом;

$$R_{к.у} = 1,16 \text{ ом}; \quad R_3 = 3,46 \text{ ом}; \quad R_{к.} = 2,2 \text{ ом}; \quad \frac{k_{\omega}^{1-3}}{R^{1-3/4}} = k'_{1-3} = 1,11; \quad K_{1э.у} = 45; \quad K_{э.у} = 256; \quad K_p = 1,6; \quad c_e = 0,137 \text{ в/об/мин};$$

$$c_M = 1,31 \text{ н.м/а}; \quad \gamma = 0,125 \text{ в/об/мин}; \quad J = 0,075 \text{ кгм}^2, \quad \alpha_1 = 0,367; \quad \alpha_2 = 0,166; \quad \alpha_3 = 20; \quad \beta' = 17; \quad \beta' = K_{о2} \frac{k_{\omega 2/4}}{k_{R 2/4}} + K_{к.о} \frac{k_{\omega к.о/4}}{k_{R к.о/4}} [Л. 3];$$

$$T_1 = 0,063 \text{ сек}; \quad T_2 = 0,085 \text{ сек}; \quad T_3 = 0,089 \text{ сек}.$$

Уравнения решаются относительно производных

$$\frac{di_{к.}}{dt} = \frac{[A_0 + A_1 K_{э.у} + (A_2 + A_3 K_{э.у}) e_3(i_{к.}) + (A_4 + A_5 K_{э.у}) n + N I [i - I_{отс}] K_{к.} - i_{к.} R_{к.}]}{T_{к.}(i_{к.}) R_{к.} - [A_6 K_{э.у}^2(i_{к.}) + A_7 k_{э.у}] K_4}; \quad (7-49)$$

$$\frac{an}{dt} = B_0 + B_1 e_3(i_k) + B_2 n, \quad (7-50)$$

где

$$A_0 = U_{34} + \alpha_1 T_1 c_e \frac{R_3}{R} - \frac{9,55 c_M}{J} I_c = 36,8 \text{ в};$$

$$A_1 = k'_{1-3} \left( U_{31-3} + \alpha_2 T_2 \gamma K_p \frac{9,55 c_M}{J} I_c \right) = 101 \text{ в};$$

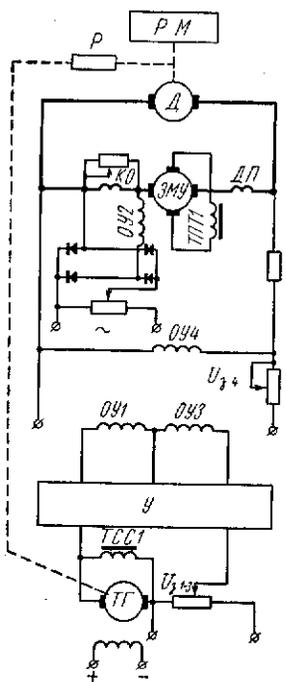


Рис. 7-17. Принципиальная схема электропривода стола горизонтально-расточного станка с обратными связями по напряжению и скорости

$$A_2 = \alpha_1 \left( \frac{R_3}{R} - 1 - T_1 c_e^2 \frac{R_3}{R^2} \frac{9,55 c_M}{J} \right) = -0,187;$$

$$A_3 = -\alpha_2 k'_{1-3} T_2 \gamma K_p \frac{9,55 c_M}{JR} = 0,0944;$$

$$A_4 = \alpha_1 c_e \frac{R_3}{R} \left( T_1 c_e \frac{9,55 c_M}{JR} - 1 \right) = -0,0247 \frac{\text{в}}{\text{об/мин}};$$

$$A_5 = k'_{1-3} \gamma K_p \left( \alpha_2 T_2 \frac{9,55 c_M c_e}{JR} - 1 \right) = -0,187 \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{об/мин}};$$

$$A_6 = -\alpha_1 T_1 R_k \left( 1 - \frac{R_3}{R} \right) = -0,0156 \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{a};$$

$$A_7 = -k'_{1-3} \frac{\alpha_3 T_3}{K_{13,y}} = -0,0396 \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{a};$$

$$A_8 = -\beta' \frac{R_{к.у}}{R} = -3,94;$$

$$A_9 = \beta' c_e \frac{R_{к.у}}{R} = 0,54 \frac{\text{в}}{\text{об/мин}};$$

$$A_{10} = \beta' R_{к.у} I_{отс} = 179 \text{ в};$$

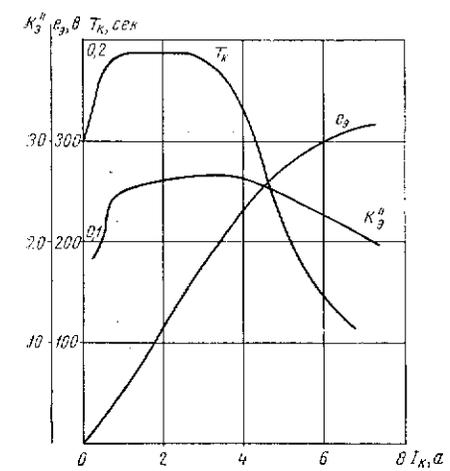


Рис. 7-18. Характеристика, коэффициент усиления второго каскада ЭМУ и постоянная времени к.з. цепи

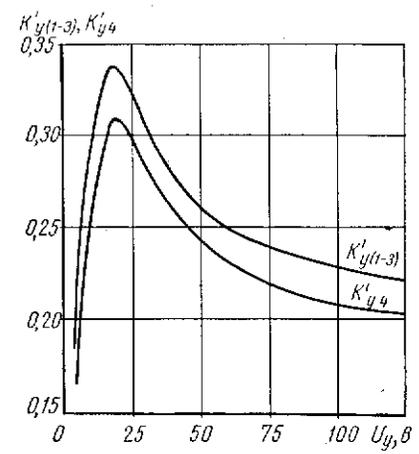


Рис. 7-19. Коэффициенты усиления первого каскада ЭМУ

$$N = A_9 e_3(i_k) + A_{10} n = -3,94 e_3(i_k) + 0,54 n + 179.$$

$$B_0 = -\frac{9,55 c_M}{J} I_c = -374 \frac{\text{об/мин}}{\text{сек}};$$

$$B_1 = \frac{9,55 c_M}{JR} = 33,5 \frac{\text{об/мин}}{\text{сек} \cdot \text{в}};$$

$$B_2 = -\frac{9,55 c_M c_e}{JR} = -4,6 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Направление вектора поля

$$\text{tg } \psi = \frac{dn}{di_k} = \frac{[B_0 + B_1 e_k(i_k) + B_2 n] \{T_k(i_k) R_k - [A_6 K'_y(i_k) + [A_0 + A_1 K_{3,y} + (A_2 + A_3 K_{3,y}) e_3(i_k) + A_7 K_{3,y}] K_4\}}{+(A_4 + A_5 K_{3,y}) n + N] K_4 - i_k R_k}. \quad (7-51)$$

В уравнениях имеются следующие нелинейности:

а)  $e_s = f(i_k)$  или  $K'_s = f(i_k)$  (рис. 7-18);

б)  $T_k = f(i_k)$  (рис. 7-18);

в)  $K_4 = K_{0,y4} = f\left(i_k, n, \frac{di_k}{dt}\right) = f(u'_{вх.э})$  (рис. 7-19),

где

$$u'_{вх.э} = A_0 + A_1 K_{э,y} + (A_2 + A_3 K_{э,y}) e_s(i_k) + (A_4 + A_5 K_{э,y}) n + [A_6 K'_s(i_k) + A_7 K_{э,y}] \frac{di_k}{dt} + N1 [i - I_{отс}]; \quad (7-52)$$

г)  $K_{э,y} = f\left(i_k, n, \frac{di_k}{dt}\right) = f(u_{вх.э,y})$  (рис. 7-7),

где

$$u_{вх.э,y} = A_1 + A_3 e_s(i_k) + A_5 n + A_7 \frac{di_k}{dt}. \quad (7-53)$$

Рассчитываются нулевая и бесконечная изоклины. Уравнение нулевой изоклины

$$\frac{dn}{dt} = B_0 + B_1 e_s(i_k) + B_2 n = -374 + 33,5 K'_s(i_k) i_k R_k - 4,6n = 0, \quad (7-54)$$

откуда

$$n = -81,3 + 16 K'_s(i_k) i_k.$$

Задаваясь значениями  $i_k$ , определяются  $K'_s(i_k)$  и  $n$ . Результаты расчетов сведены в табл. 7-10.

Таблица 7-10

$i_k, a$	0,25	0,5	0,8	1,2	1,6
$K'_s(i_k)$	1,72	20	24,2	25,2	25,6
$n, об/мин$	-12,5	82	231	403	580

Нулевая изоклина построена на рис. 7-20 (линия 1). Уравнение бесконечной изоклины

$$\frac{di_k}{dt} = \{A_0 + K_{э,y} [A_1 + A_3 e_s(i_k) + A_5 n] + A_2 e_s(i_k) + A_4 n + N1 [i - I_{отс}]\} K_4 - i_k R_k = 0. \quad (7-55)$$

Непосредственно по этому уравнению невозможно построить бесконечную изоклину, так как неизвестно, при каких значениях  $i_k$  начинают действовать токовая отсечка и отрицательная обратная связь по скорости. Поэтому сначала определяются области действия этих обратных связей.

Область действия токовой отсечки определяет условие

$$N = -3,94 i_k R_k K'_s(i_k) + 0,54 n + 179 < 0. \quad (7-56)$$

Граница этой области (рис. 7-20, линия 2)

$$n < -329 + 16 i_k K'_s(i_k). \quad (7-57)$$

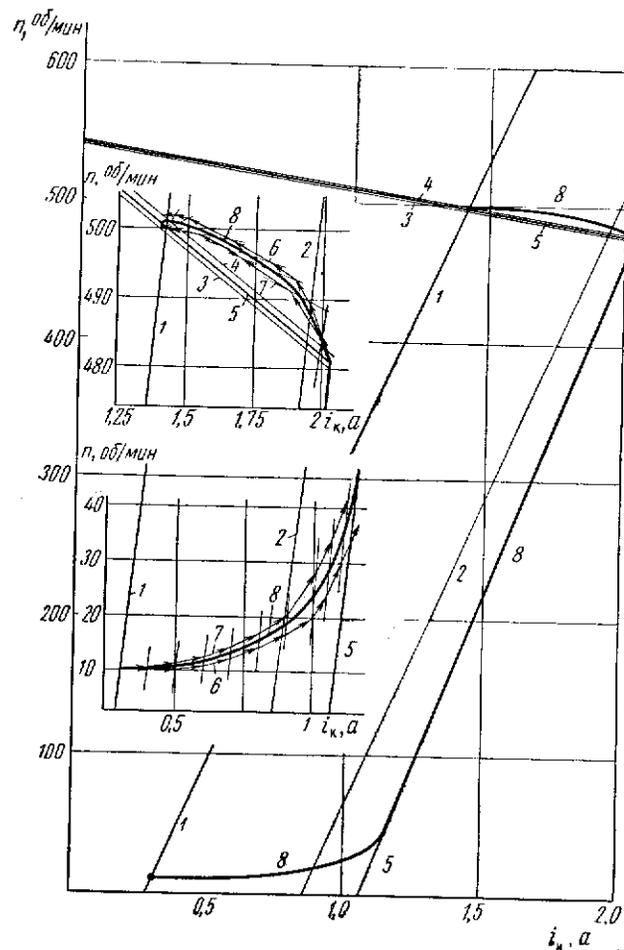


Рис. 7-20. Построение фазовой траектории

Таблица 7-11

Токовая отсечка действует в правой области от границы.  
Область действия обратной связи по скорости

$$-0,13 < u_{вх.э.у} < +0,13. \quad (7-58)$$

Границы этой области (рис. 7-20, линии 3 и 4)

$$-0,13 < 101 - 0,0944 e_э(i_k) - 0,187n < +0,13$$

или

$$539 - 1,11 i_k K_э''(i_k) < n < 541 - 1,11 i_k K_э''(i_k). \quad (7-59)$$

Построение бесконечной изоклины производится по трем участкам в зависимости от области действия обратной связи по скорости:

а) без действия токовой отсечки  $-1[i - I_{отс}] = 0$

$$K_4 [36,8 + 256 [101 - 0,0944 \cdot 2,2 K_э(i_k) - 0,187n] - 0,187 \cdot 2,2 i_k K_э''(i_k) - 0,0247n] - 2,2 i_k = 0,$$

откуда

$$n = 541 - \left[ 1,12 K_э''(i_k) + \frac{0,046}{K_4} \right] i_k; \quad (7-60)$$

б) при действии токовой отсечки  $-1[i - I_{отс}] = 1$

$$n = 550 - \left[ 1,31 K_э''(i_k) + \frac{0,046}{K_4} \right] i_k; \quad (7-61)$$

в) область действия токовой отсечки при  $u_{вх.э.у} > 0,13$  в

$$K_4 [70,1 - 0,411 i_k K_э''(i_k) - 0,0247n - 8,66 i_k K_э''(i_k) + 0,54n + 179] - 2,2 i_k = 0,$$

откуда

$$n = -484 + \left[ 17,6 K_э''(i_k) + \frac{4,28}{K_4} \right] i_k. \quad (7-62)$$

Все три участка бесконечной изоклины построены на рис. 7-20 (линия 5). Пересечение нулевой и бесконечной изоклин определяет точку покоя системы  $n_{уст} = 500$  об/мин;  $i_{к,уст} = 1,42$  а.

Начальное состояние системы

$$u_{э4} = 3,6 \text{ в}; \quad u_{э1-э} = 2 \text{ в}; \quad i_k = 0,3 \text{ а}; \quad n_0 = 10 \text{ об/мин}; \quad I_c = 2,23 \text{ а}.$$

Рассчитывается правоканонический полигон. Расчет производится по уравнению (7-51). Начало расчета приведено в табл. 7-11. Полигон построен на фазовой плоскости  $n, i_k$  (рис. 7-20, линии 6). Там же построены левоканонический полигон (линии 7) и фазовая траектория (кривая 8). Построение сделано согласно [Л.14].

Номер шага	$i_k, \text{ а}$	$n, \text{ об/мин}$	$e_э, \text{ в}$	$K_э''$	$N, \text{ в}$	$\frac{di_k}{dt}$	$u'_{вх.э.у}, \text{ в}$	$u'_{вх.э.у}, \text{ в}$	$K_4$	$T_k, \text{ сек}$	$\frac{dn}{dt}, \frac{\text{об/мин}}{\text{а}}$	$\Delta i_k, \text{ а}$	$\Delta, \text{ об/мин}$
0	0,3	10	12,5	18,7	—	47,7		53,6	0,23	0,172	0	0,1	0
1	0,4	10	16,9	19,2	—	46,9		52,8	0,239	0,179	3,12	0,1	0,3
2	0,5	10,3	22,2	20,2	—	44,0		51,8	0,240	0,184	7,34	0,1	0,7
3	0,6	11	29	22,0	—	42,8		49,7	0,241	0,187	12,8	0,1	1,3
4	0,7	12,3	36,5	23,7	—	41,8		47,6	0,244	0,189	18,9	0,1	1,9
5	0,8	14,2	42,5	24,2	—	40,7		46,4	0,247	0,191	24,0	0,1	2,4
6	0,9	16,8	49	24,7	-4,3	36,3	Более 0,13	42,2	0,254	0,192	32,6	0,1	3,3

Ток в якорной цепи определяется из уравнения (7-46)

$$i = \frac{e_э(i_k) - c_e n}{R} = \frac{e_э(i_k) - 0,137n}{5}.$$

Время определяется графическим интегрированием уравнения движения (7-47)

$$\Delta t = \frac{J}{9,55 c_m} \frac{\Delta n}{i - I_c} = \frac{0,075}{9,55 \cdot 1,31} \frac{\Delta n}{i - 2,23} = \frac{0,006 \Delta n}{i - 2,23}. \quad (7-63)$$

Значения  $n$  и  $i_k$  принимаются по фазовой траектории. Начальные результаты расчета приведены в табл. 7-12. Графики переходных процессов  $n = f(t)$  и  $i = f(t)$  построены на рис. 7-21.

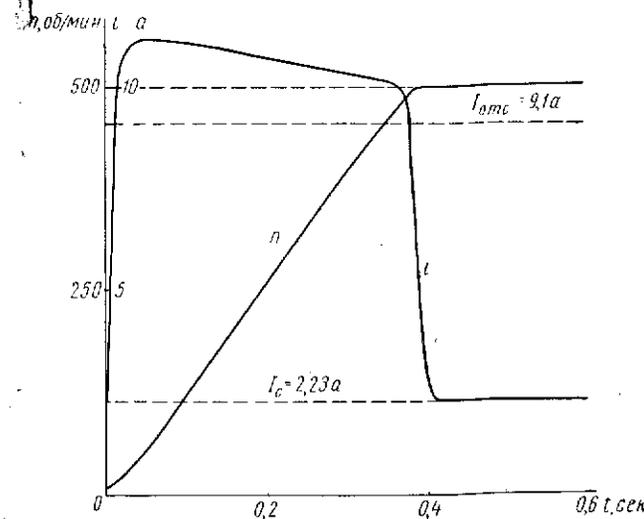


Рис. 7-21. Графики переходных процессов

Таблица 7-12

Номер шага	Значения						
	$i_k, a$	$n, об/мин$	$e_3, \phi$	$i, a$	$\Delta n, об/мин$	$\Delta t, сек$	$t, сек$
0	0,3	10	12,5	2,23	0	0	0
1	0,4	10	16,9	3,10	0,2	0,0014	0,0014
2	0,5	10,3	22,2	4,14	0,5	0,0016	0,0030
3	0,6	11	29	5,48	1,0	0,0018	0,0048
4	0,7	12,3	36,5	6,94	1,6	0,0020	0,0068

## ГЛАВА V.

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫМИ СТАНКАМИ

### § 8-1. Применяемые системы электроприводов

Шлифование характеризуется малыми припусками, повышенной точностью и чистотой обработки. В электрооборудовании шлифовальных станков самостоятельную роль приобретают устройства автоматического контроля размеров обрабатываемого изделия. Кроме главного привода шлифовального круга, шлифовальный станок имеет как минимум три привода подачи: продольной, поперечной и круговой (вращение изделия).

Скорость резания при шлифовании постоянна, главный привод нерегулируемый выполняется от асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Уменьшение скорости резания за счет износа шлифовального круга компенсируется ступенчатым переключением ременной передачи с увеличением скорости вращения. Перспективным для данного случая является поддержание скорости резания путем регулирования частоты переменного тока в требуемом диапазоне (около 2 : 1). Однако сложность схем и дороговизна преобразователей и инверторов переменного тока сдерживает пока внедрение этого способа регулирования.

Применение для главного привода двигателей постоянного тока нецелесообразно из-за уязвимости коллекторных машин в условиях зоны шлифования. В приводах подач шлифовальных станков большое развитие получил гидропривод.

В тяжелых станках электропривод подач включает системы электропривода с глубоким регулированием скорости, аналогичные рассмотренным в главах 5 и 7.

Увеличение производительности станка при хорошем качестве и чистоте шлифуемой поверхности возможно только при правильном выборе шлифовального круга и режима шлифования. Элементами режима при круглом шлифовании являются скорость резания  $v_k$  и скорости всех трех подач: продольной  $S_{пр}$ , поперечной  $S_{п}$  (глубины шлифования  $l$ ) и вращения изделия  $v_{из}$ . При большей скорости  $v_k$  уменьшается глубина врезания отдельных абразивных зерен (при постоянной величине съема металла), что улучшает чистоту шлифуемой поверхности. Допустимая для шлифовального круга окружная скорость указывается в его маркировке. В зави-

симости от связки применяемого круга скорость резания  $v_k$  выбирается от 20 до 50 м/сек.

Величина продольной подачи  $S_{пр}$  выбирается в пределах 0,7 — 0,8 высоты круга при черновом и 0,2—0,4 при чистовом шлифовании.

Увеличение поперечной подачи  $S_n$  или глубины резания приводит к более интенсивному износу круга, к росту радиальной силы резания и к снижению точности обработки. Здесь существенное влияние на качество обработки оказывает упругое отжатие системы СИД (станок — инструмент — деталь). При чистовом шлифовании такое явление необходимо учитывать, чтобы не вызвать ожога металла. В этой главе предусмотрен расчет новой следящей системы привода поперечной подачи внутри и сферошлифовальных станков 1 ГПЗ. В результате внедрения нового метода шлифования удалось повысить класс чистоты шлифуемых шарикоподшипниковых колец с шестого до седьмого, что соответствует уменьшению высоты гребешков поверхности с  $h_{ср} = 3,2—1,6$  до  $1,6—0,8$  мкм. В главе приведен наряду с описанием принципа работы следящей системы (слежение за мощностью главного привода) также расчет новых элементов ее составляющих (измеритель припуска, измеритель мощности главного привода и др.). Дан технико-экономический расчет новой системы. Расчет переходных процессов нелинейной следящей системы дан с учетом упругой деформации СИД.

Важным требованием к качеству работы станка является наличие в нем системы регулируемого привода вращения изделия или круговой подачи. С увеличением окружной скорости детали  $v_n$  улучшится отвод тепла и уменьшится опасность ожогов шлифуемой поверхности, что особенно важно при тонкостенных деталях. Но увеличение  $v_n$  приводит к увеличенному износу круга и ухудшению чистоты обработки. Поэтому при чистовых режимах надо уменьшать окружную скорость детали. При выборе величины окружной скорости детали следует учитывать свойство материала детали и характер ее термической обработки. Чем выше твердость обрабатываемого материала и круга, тем большая величина  $v_n$  может быть допущена. При вибрациях и плохо отбалансированных деталях  $v_n$  уменьшается. Такое же влияние на  $v_n$  оказывает увеличение поверхности соприкосновения в связи с ростом теплообразования в зоне резания. Удовлетворение всех этих требований приводит к тому, что диапазон изменения скорости вращения детали как по зарубежному так и по отечественному станкостроению составляет 10 : 1.

Развитие магнитных усилителей за последние годы проложило им широкую дорогу к регулируемым приводам небольшой мощности и относительно невысокого диапазона. Поэтому в данной главе приведены расчеты привода подачи, выполненного по системе «магнитный усилитель — двигатель постоянного тока небольшой мощности».

## § 8.2. Электропривод вращения изделия (круговой подачи) по системе «магнитный усилитель — двигатель постоянного тока»

Для этих приводов широкое распространение получил электропривод по системе «магнитный усилитель — двигатель постоянного тока». В данном параграфе рассматриваются расчеты статических характеристик и графиков переходного процесса электропривода.

1. Рассчитать графическим методом параметры обратных связей и построить механическую характеристику двигателя, питающегося от магнитного усилителя в САУ с отрицательной связью по напряжению и положительной по току. Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 8-1. Двигатель: П11; 0,7 квт; 220 в; 4,35 а; 3000 об/мин;  $R_a = 4$  ом,  $R_{д.п} = 1,3$  ом. Магнитный усилитель  $U_{с.н} = 380$  в,  $I_{н.н} = 5,2$  а. Усилитель имеет две одинаковые обмотки управления  $w_u = 200$  витков,  $R_y = 8$  ом. Выпрямители селеновые.

Система автоматического управления должна обеспечить регулирование скорости двигателя в диапазоне  $D = 10 : 1$  и поддержание скорости двигателя не ниже 15% при изменении нагрузки от 0,25  $M_n$  до номинальной ( $M_n$ ).

Предварительные построения. На семейство внешних характеристик МУ (рис. 8-2) наносятся:

а) вольт-амперная характеристика якоря двигателя

$$\Delta U_a^* = \frac{I_{н.н} 1,2 (R_a + R_{д.п})}{U_{с.н}} I_n^* = \frac{5,2 \cdot 1,2 (4 + 1,3)}{380} I_n^* = 0,087 I_n^* \quad (8-1)$$

где  $U_{с.н}$  — напряжение сети питающей МУ;

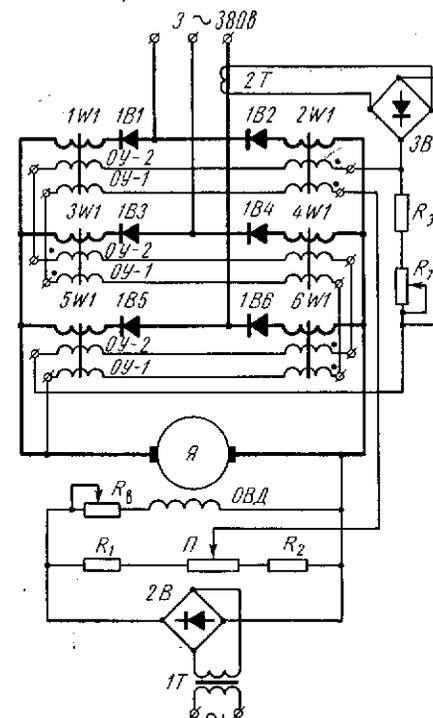


Рис. 8-1. Схема электропривода вращения изделия шлифовального станка с обратными связями по напряжению и току

$I_{н.н}$  — номинальный ток МУ на выходе дроссельного преобразователя;  
 $R_{я}, R_{д.п}$  — сопротивления якоря и дополнительных полюсов двигателя;

б) вольт-амперная характеристика выпрямительного моста  $\Delta U_{в}^*$  (взята из [Л.28]);

в) вольт-амперная характеристика якорной цепи

$$\Delta U_{я.ц}^* = \Delta U_{я}^* + \Delta U_{в}^* \quad (8-2)$$

Строятся вспомогательные лучи (рис. 8-2):

а) э.д. с. двигателя

$$E_{д}^* = \frac{c_e n}{U_{с.н}} = \frac{0,064}{380} n = 0,169 \cdot 10^{-3} n, \quad (8-3)$$

где

$$c_e = \frac{U_{д.н} - I_{н.н} R_{д}}{n_{н}} = \frac{220 - 4,35 \cdot 1,2(4 + 1,3)}{3000} = 0,064 \frac{в}{об/мин};$$

б) электромагнитный момент двигателя

$$M_{эм} = c_m I_{н.н} I_{н}^* = 0,61 \cdot 5,2 I_{н}^* = 3,18 I_{н}^*, \quad (8-4)$$

$$\text{где } c_m = 9,55 c_e = 9,55 \cdot 0,064 = 0,61 \text{ н} \cdot \text{м}/\text{а}.$$

Выбор коэффициентов обратных связей и определение задающего напряжения. Строится заданная по техническим условиям механическая характеристика  $n_{мин} = f(M)$  для минимальной скорости двигателя (рис. 8-2, прямая I, III квадрант). Построение производится по двум точкам: номинальная нагрузка двигателя

$$n_1 = \frac{n_{н}}{D} = \frac{3000}{10} = 300 \text{ об/мин};$$

$$M_1 = M_{эм.н} = c_m I_{д.н} = 0,61 \cdot 4,35 = 2,67 \text{ н} \cdot \text{м};$$

наименьшая нагрузка двигателя

$$n_2 = \frac{n_{н.мин}}{1-\sigma} = \frac{300}{1-0,15} = 350 \text{ об/мин};$$

$$M_2 = 0,25 M_{эм.н} = 0,25 \cdot 2,67 = 0,665 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

Строится вольт-амперная характеристика нагрузки  $U_{н}^* = f(I_{н}^*)$  для заданной скорости  $n = 300 \text{ об/мин}$  (прямая 2, I квадрант). Построение производится с помощью вспомогательных лучей  $E_{д}^* = f(n)$  и  $M_{эм} = f(I_{н}^*)$  согласно уравнению

$$U_{н}^* = E_{д}^* + \Delta U_{я.ц}^* \quad (8-5)$$

Характер построения показан стрелками для точек А и Б.

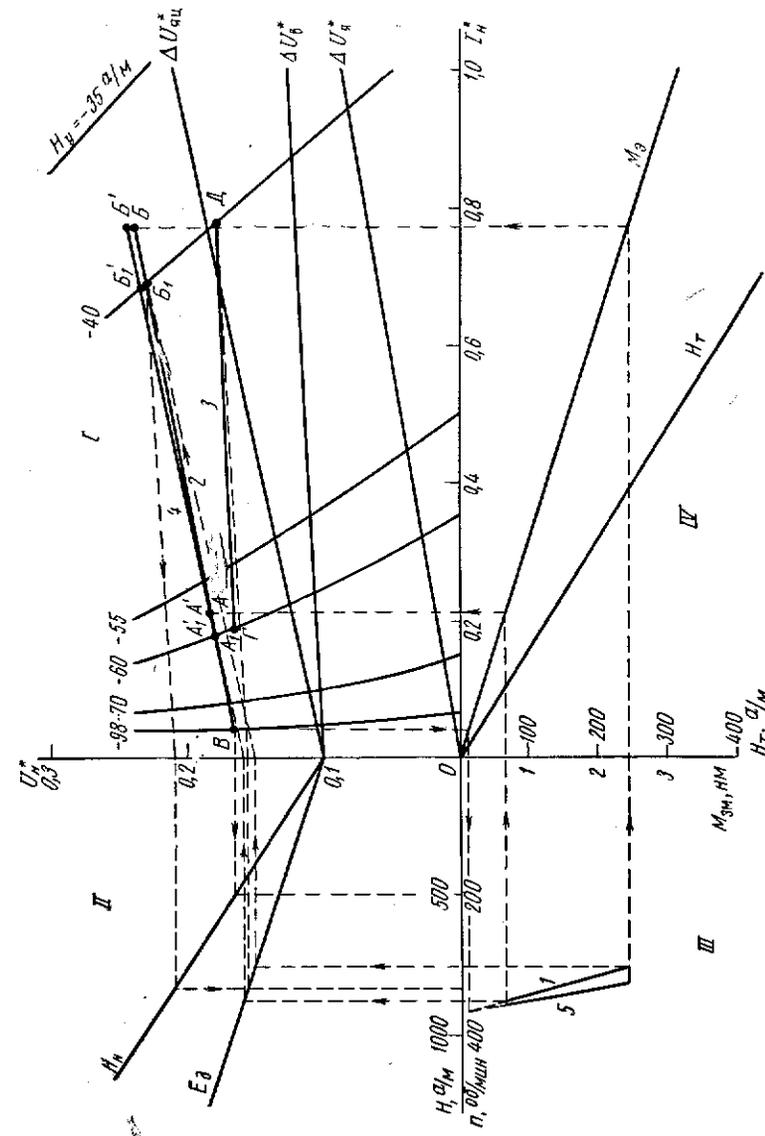


Рис. 8-2. Построение статической характеристики

Принимается обратная отрицательная связь по напряжению с коэффициентом обратной связи  $\alpha = 1$ . Строится луч обратной связи по напряжению  $H_n = f(U_n^*)$  (II квадрант) по уравнению

$$H_n = \frac{\alpha U_{c.n} \omega_n}{l_c R_n} U_n^* = \frac{1 \cdot 380 \cdot 200}{0,416 \cdot 3,8} U_n^* = 7600 U_n^*, \text{ а/м,} \quad (8-6)$$

где  $H_n$  — напряженность обратной связи по напряжению;  $\omega_n, R_n$  — число витков и сопротивление обмотки обратной связи по напряжению;

$l_c$  — длина средней силовой линии магнитопровода МУ.

Задающая напряженность и задающее напряжение определяются по точке  $B$  (прямая  $AB$  продолжена до крайней внешней характеристики МУ,  $H_y = -98 \text{ а/м}$ , для уменьшения влияния положительной токовой связи при определении задающего напряжения).

Напряжение на двигателе в точке  $B$

$$U_{д(B)}^* = U_{(B)}^* - \Delta U_{в}^* \quad (8-7)$$

и находится напряженность обратной связи  $H_{н(B)}$ , соответствующая этому напряжению. Для этого из точки  $B$  проводится прямая, параллельная  $\Delta U_{в}^*$ , до оси ординат и по лучу  $H_n = f(U^*)$  определяется  $H_{н(B)} = 500 \text{ а/м}$ .

Тогда задающая напряженность и задающее напряжение

$$H_3 = H_y + H_n = -98 + 500 = 402 \text{ а/м;} \quad (8-8)$$

$$U_3 = \frac{l R_1}{\omega_3} H_3 = \frac{0,416 \cdot 3,8}{200} 402 = 20 \text{ в,} \quad (8-9)$$

где  $\omega_3, R_3$  — число витков и сопротивление задающей обмотки МУ.

Можно построить вольт-амперную характеристику нагрузки МУ при действии одной обратной связи по напряжению (рис. 8-2, прямая 3, I квадрант). Для этого задаются напряженностью управления  $H_y = -60 \text{ а/м}$  (принимается внешняя характеристика, ближайшая к точке  $A$ ) и определяется напряженность обратной связи по напряжению

$$H_n = H_3 - H_y = 402 - (-60) = 462 \text{ а/м.} \quad (8-8')$$

Для  $H_n = 462 \text{ а/м}$  по лучу  $H_n = f(U^*)$  находится  $U_{н.о}^* = 0,16$ . Из этой точки проводится прямая, параллельная  $\Delta U_{в}^*$ , до пересечения с принятой внешней характеристикой (точка  $\Gamma$ ). Аналогично получена вторая точка вольт-амперной характеристики (точка  $D$ ).

Сравнивая полученные вольт-амперные характеристики  $AB$  и  $ГД$ , видно, что одна обратная связь по напряжению не обеспечивает требуемой жесткости механической характеристики. Поэтому применяется еще положительная связь по току.

Необходимая напряженность обмотки токовой связи может быть определена по точке  $B_1$  (принимается внешняя характеристика, ближайшая к точке  $B$ ,  $H_y = 40 \text{ а/м}$ );

$$H_{т.необх} = H_y + H_3 + H_n = -40 - 402 + 840 = 398 \text{ а/м,} \quad (8-10)$$

где  $H_n$  — определена графически по лучу  $H_n = f(U_n^*)$  для точки  $B_1$ .  
Необходимый коэффициент обратной связи по току

$$\beta_{необх} = \frac{I_{т.необх}}{I_{д}} = \frac{l_c H_{т.необх}}{\omega_t I_{д(B')}} = \frac{0,416 \cdot 398}{200 \cdot 3,6} = 0,23, \quad (8-11)$$

$$\text{где } I_{д(B')} = I_{(B')}^* I_{н.н} = 0,69 \cdot 5,2 = 3,6 \text{ а.}$$

Задающая напряженность, задающее напряжение и коэффициент обратной связи по току  $\beta$  могут быть также определены из двух уравнений напряженностей для точек  $A_1$  и  $B_1$  (принимаются ближайшие внешние характеристики к точкам  $A$  и  $B$ )

$$\left. \begin{aligned} H_{y(A_1)} &= H_3 - H_{н(A_1)} + H_{т(A_1)} = H_3 - H_{н(A_1)} + \\ &+ \frac{\beta \omega_t I_{н.н}}{l_c} I_{н(A_1)}^* ; \\ H_{y(B_1)} &= H_3 - H_{н(B_1)} + H_{т(B_1)} = H_3 - H_{н(B_1)} + \\ &+ \frac{\beta \omega_t I_{н.н}}{l_c} I_{н(B_1)}^* \end{aligned} \right\} \quad (8-10')$$

После определения числовых значений получаем

$$-60 = H_3 - 565 + 2500 \beta 0,176;$$

$$-40 = H_3 - 840 + 2500 \beta 0,69,$$

$$\text{откуда } \beta = 0,23 \text{ и } H_3 = -402 \text{ а/м.}$$

Расчет узла обратной связи по току может быть произведен по [Л.32]. После проектирования этого узла получилось  $\beta = 0,25$ .

Построение механической характеристики двигателя при действии обеих связей (см. рис. 8-2):

а) строится луч обратной связи по току  $H_t = f(I_n^*)$

$$H_t = \frac{\beta \omega_t I_{н.н}}{l_c} I_n^* = \frac{0,25 \cdot 200 \cdot 5,2}{0,416} I_n^* = 625 I_n^*; \quad (8-12)$$

б) строится вольт-амперная характеристика нагрузки МУ в системе с обеими связями (прямая 4).

Построение производится методом последовательных приближений по двум точкам  $A_1$  и  $B_1$ . В точке  $B_1$  принимается  $H_y = -40 \text{ а/м}$ ,  $I_n^* = 0,685$  (ток нагрузки берется несколько меньший,

чем в точке  $B_1$ , так как с увеличением  $\vartheta$  то же значение  $H_y$  получается при меньшем токе). Определяются  $H_n = 870 \text{ а/м}$  по лучу  $H_n = f(U^*)$  и  $H_r = 428 \text{ а/м}$  по лучу  $H_r = f(I_n)$ . Проверяется напряженность управления в точке  $B'_1$  по (8-10')

$$H_{y(B'_1)} = 402 - 870 + 428 = -40 \text{ а/м.}$$

Следовательно, точка  $B'_1$  выбрана правильно. Точка  $A'_1$  находится аналогично;

в) строится механическая характеристика двигателя (прямая б) по вольт-амперной характеристике системы  $A'B'$ . Определение произведено по точкам  $B'$  и  $B$ , так как скорость, соответствующая точке  $B$ , практически не изменилась;

г) определяется падение скорости двигателя при изменении нагрузки от  $0,25 I_n$  до  $1 I_n$

$$\Delta n = \frac{n_2 - n_1}{n_2} = \frac{355 - 320}{355} \cdot 100 = 9,9 \%$$

2. Рассчитать аналитическим методом статические характеристики двигателя постоянного тока при питании его от магнитного усилителя в САУ. Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 8-3. В САУ принята, как пример, иллюстрирующая методику расчета, обратная связь по скорости. Двигатель ПН-17,5; 1,75 кВт; 220 в; 10 а; 1450 об/мин;  $R_a = 1,42 \text{ ом}$ ;  $R_{a.n} = 0,276 \text{ ом}$ ;  $c_e = 0,135 \text{ в/об.мин.}$  Магнитный усилитель УМЗП 20.40 Д/11; 2 кВт; 220 в; 9,6 а; четыре обмотки управления,  $I_{y.n} = 0,56 \text{ а}$ ;  $\omega_y = 300 \text{ витков}$ ;  $R_y = 12 \text{ ом}$ ;  $I_c = 0,416 \text{ м.}$

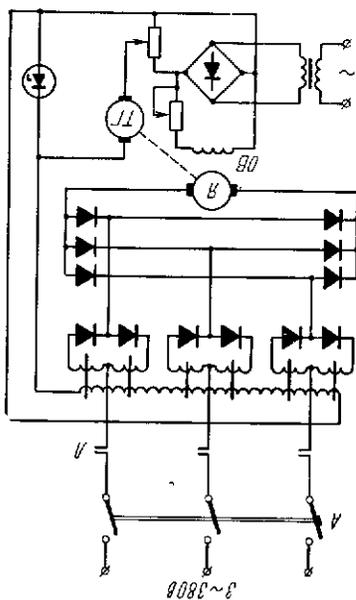


Рис. 8-3. Схема электропривода вращения изделия шлифовального станка с обратной связью по скорости

Вентили ВК-10; 10 а; 300 в. САУ должна обеспечить регулирование скорости двигателя в диапазоне  $D = 10 : 1$  и поддержание скорости не более 10% при изменении нагрузки от  $0,25 I_n$  до номинальной ( $I_n$ ).

Кремниевые вентили можно считать идеальными и не учитывать их при расчете.

По внешним характеристикам магнитного усилителя можно построить регулировочные характеристики его  $U_d = f(U_y)$  при различных (расчетных) значениях тока двигателя и определить коэффициенты усиления МУ при этих значениях тока.

Для построения регулировочных характеристик внешние характеристики (см. рис. 8-2) пересекаются прямыми, параллельными оси ординат при расчетных значениях тока двигателя. Точки пересечения этих прямых с внешними характеристиками определяют значения напряжения на двигателе  $U_d = 220 U_n^* \text{ в}$ , тока двигателя  $I = 9,6 I_n^* \text{ а}$  и напряженности управления  $H_y \text{ а/м}$ . По напряженности  $H_y$  определяется напряжение на обмотке управления  $U_y$

Для построения регулировочных характеристик внешние характеристики (см. рис. 8-2) пересекаются прямыми, параллельными оси ординат при расчетных значениях тока двигателя. Точки пересечения этих прямых с внешними характеристиками определяют значения напряжения на двигателе  $U_d = 220 U_n^* \text{ в}$ , тока двигателя  $I = 9,6 I_n^* \text{ а}$  и напряженности управления  $H_y \text{ а/м}$ . По напряженности  $H_y$  определяется напряжение на обмотке управления  $U_y$

$$U_y = I_y R_y = \frac{H_y I_c}{\omega_y} R_y = \frac{H_y \cdot 0,416}{300} \cdot 12 = 0,01664 H_y. \quad (8-13)$$

Расчетные регулировочные характеристики с учетом смещения  $U_{c.m} = 1,5 \text{ в}$  приведены на рис. 8-4. В пределах рабочей зоны регулировочные характеристики могут быть заменены прямыми линиями. Тогда коэффициент усиления магнитного усилителя по напряжению для каждой регулировочной характеристики можно считать постоянным и равным [Л.26]

$$K_{y(I_n = \text{const})} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_y}. \quad (8-14)$$

Расчетные значения  $K_y(I)$  приведены в табл. 8-1.

Записываются уравнения статики

$$(U_3 - \gamma n) = U_y; \quad (8-15)$$

$$[U_y - U_0(I)] K_y(I) = U_d; \quad (8-16)$$

$$U_d = c_e n + IR, \quad (8-17)$$

где  $U_3$  — задающее напряжение;

$U_0$  — величина напряжения, при котором продолженная регулировочная характеристика МУ пересекает ось  $U_y$  (рис. 8-4);

$\gamma$  — коэффициент обратной связи по скорости;

$R$  — сопротивление якорной цепи (без учета внутреннего сопротивления МУ)

$$R = R_a = 1,2(R_a + R_{a.n}) = 2,4 \text{ ом.}$$

Уравнение скоростной характеристики

$$n = \frac{[U_3 - U_0(I)] K_y(I) - IR}{c_e + \gamma K_y(I)}. \quad (8-18)$$

Необходимый коэффициент обратной связи по скорости

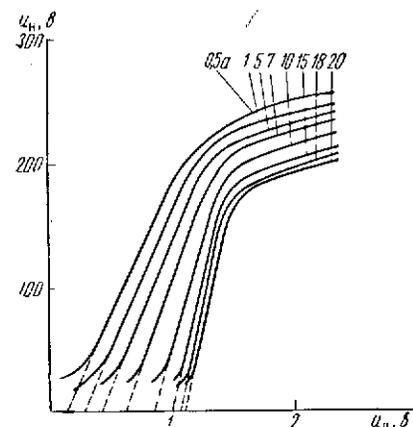


Рис. 8-4. Регулировочные характеристики магнитного усилителя при постоянном токе нагрузки

$$\gamma_{\text{необх}} = \frac{R - a c_e}{a K_y (I_n)} = \frac{2,4 - 1,6 \cdot 0,135}{1,6 \cdot 333} = 0,0041 \frac{a}{\text{об/мин}}, \quad (8-19)$$

где

$$a = \frac{\Delta n_{\text{зад. мин}}}{I_n} = \frac{16}{10} = 1,6 \frac{\text{об/мин}}{a};$$

$$\Delta n_{\text{зад. мин}} = \frac{n_n}{D} \frac{\delta}{1 - \delta} = \frac{1450}{10} \frac{0,1}{1 - 0,1} = 16 \text{ об/мин} -$$

заданный перепад скорости при номинальной нагрузке на минимальной скорости.

Для осуществления обратной связи по скорости принимается тахогенератор типа ЭТ-4/110; 13,2 вт; 110 в; 0,12 а; 1900 об/мин;  
 $\gamma = 110/1900 = 0,058 \text{ в/об/мин.}$

Задающие напряжения определяются при номинальной нагрузке двигателя

$$U_3 = \frac{c_e n_n + I_n R}{K_y (I_n)} + U_0 (I_n) + \gamma n_n; \quad (8-20)$$

для максимальной скорости

$$U_{3, \text{ макс}} = \frac{0,135 \cdot 1450 + 10 \cdot 2,4}{333} + 0,82 + 0,058 \cdot 1450 = 85,5 \text{ в};$$

для минимальной скорости

$$U_{3, \text{ мин}} = \frac{0,135 \cdot 145 + 10 \cdot 2,4}{333} + 0,82 + 0,058 \cdot 145 = 9,36 \text{ в.}$$

Расчет характеристик производится по (8-18). Задаются значением тока двигателя, определяют по нагрузочным характеристикам ему соответствующие  $K_y$  и  $U_0$  и вычисляют скорость двигателя. Расчет сведен в табл. 8-1.

Таблица 8-1

$I, a$	0,5	1	2,5	5	10	15
$K_y$	218	222	245	286	333	450
$U_0, \text{ в}$	0,12	0,26	0,4	0,6	0,82	0,98
$n_{\text{макс}}, \text{ об/мин}$	1460	1455	1453	1450	1450	1448
$n_{\text{мин}}, \text{ об/мин}$	158	155	153	149	145	142

Расчетные характеристики построены на рис. 8-5. Падение скорости двигателя (при  $n_{\text{мин}}$ ) при изменении нагрузки от 0,25  $I_n$  до  $I_n$  составляет

$$\Delta n = \frac{153 - 145}{153} \cdot 100 = 5,23\%.$$

3. Рассчитать переходный процесс пуска двигателя стола резьбодлифовального станка МВ13. Принципиальная схема электропривода приведена на рис. 8-1.

Двигатель и магнитный усилитель те же, что в (8-2-1). В усилителе использованы три обмотки управления: задающая, включенная на разность задающего напряжения и напряжения обратной связи по напряжению; обмотка положительной обратной связи по току, осуществляемой с помощью трансформатора тока, и обмотка смещения.

При пуске двигателя, в момент включения задающего напряжения, задающая обмотка оказывается включенной на полное задающее напряжение  $U_3 = 221,4 \text{ в}$ . В результате этого получается недопустимая форсировка, приводящая к большим величинам тока. Для ограничения тока при пуске параллельно задающей обмотке включен стабилитрон типа 20920А;  $U_{\text{ст}} = 120 \pm 10\% \text{ в}$ ;  $I_n = 50 \text{ ма}$ .

Рассматриваемая система автоматического управления является нелинейной из-за наличия магнитного усилителя, селеновых выпрямителей и стабилитрона. При составлении дифференциальных уравнений САУ принимаются допущения [Л.26]. В расчете также не учитывается индуктивность якоря двигателя.

Дифференциальные уравнения системы

$$U_3 - a U_n = i_3 R_3 + 3\omega_3 \frac{d\psi}{dt}; \quad (8-21)$$

$$-U_{\text{см}} = -i_{\text{см}} 3R_{\text{см}}; \quad (8-22)$$

$$U_T = i_T 3R_T + 3\omega_T \frac{d\psi}{dt}; \quad (8-23)$$

$$U_n = c_e n + iR; \quad (8-24)$$

$$U_T = i\beta 3R_T; \quad (8-25)$$

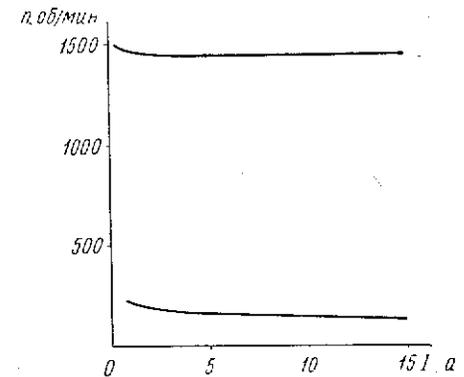


Рис. 8-5. Статические характеристики

$$M - M_c = \frac{J}{9,55} \frac{dn}{dt}, \quad (8-26)$$

где  $U_a, U_{cm}, U_T, U_y$  — напряжения задающее, смещения, на токовой обмотке и на якоре двигателя;

$i, i_s, i_{cm}, i_T$  — токи якоря двигателя и обмотки — задающая, смещения и токовой связи;

$R$  — сопротивление якорной цепи двигателя (без учета внутреннего сопротивления МУ);

$R_s, R_{cm}, R_T$  — сопротивления обмоток управления магнитного усилителя;

$w_s, w_{cm}, w_T$  — числа витков обмоток управления МУ;

$J$  — момент инерции привода, приведенный к валу двигателя.

Зависимость  $i = f(H_y, n)$  приведена на рис. 8-6.

Значения тока якоря двигателя  $i$  определяются по регулировочным характеристикам  $I_H = f(H_y)$  при  $n = \text{const}$  (рис. 8-6), построенным для ряда значений скоростей, которые могут иметь место при пуске двигателя. Регулировочные характеристики строятся по точкам пересечения нагрузочных характеристик с внешними характеристиками магнитного усилителя (см. рис. 8-2).

Подставляя в уравнения (8-21) ÷ (8-23) значения  $U_d$  и  $U_T$ , умножая каждый член на  $w_y/R_y l_c$  (так как все обмотки управления усилителя одинаковые) и складывая их, получаем уравнение входной цепи усилителя, записанное в напряженностях,

$$\frac{H_s w_y}{R_y l_c} - \frac{c_e n w_y}{R_y l_c} - \frac{i R w_y}{R_y l_c} - \frac{U_{cm} w_y}{R_y l_c} + \frac{i_s 3 R_y w_y}{R_y l_c} = H_y + \frac{6 w_y^2}{R_y l_c} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (8-27)$$

где

$$H_y = \frac{i_s 3 w_y}{l_c} - \frac{i_{cm} 3 w_y}{l_c} + \frac{i_T 3 w_y}{l_c}. \quad (8-28)$$

Заменяя магнитный поток индукцией, из уравнения

$$\Phi = m s B_0, \quad (8-29)$$

где  $s, m$  — сечение пакета и число пакетов сердечника, получим

$$\frac{w_y}{R_y l_c} (U_s - c_e n - i R - U_{cm} + 3 R_y \beta i) = H_y + \frac{6 m w_y^2 s}{R_y l_c} \frac{dB_0}{dt}. \quad (8-30)$$

Определение значений  $H_y$  производится по усредненной характеристике  $B_0 = f(H_y)$  магнитного усилителя с внутренней обратной связью, рассчитанной для стали Э310 [Л.26] и приведенной на рис. 8-8, а.

При решении (8-30) следует учитывать действие стабилитрона, включенного на задающую обмотку и имеющего напряжение стаби-

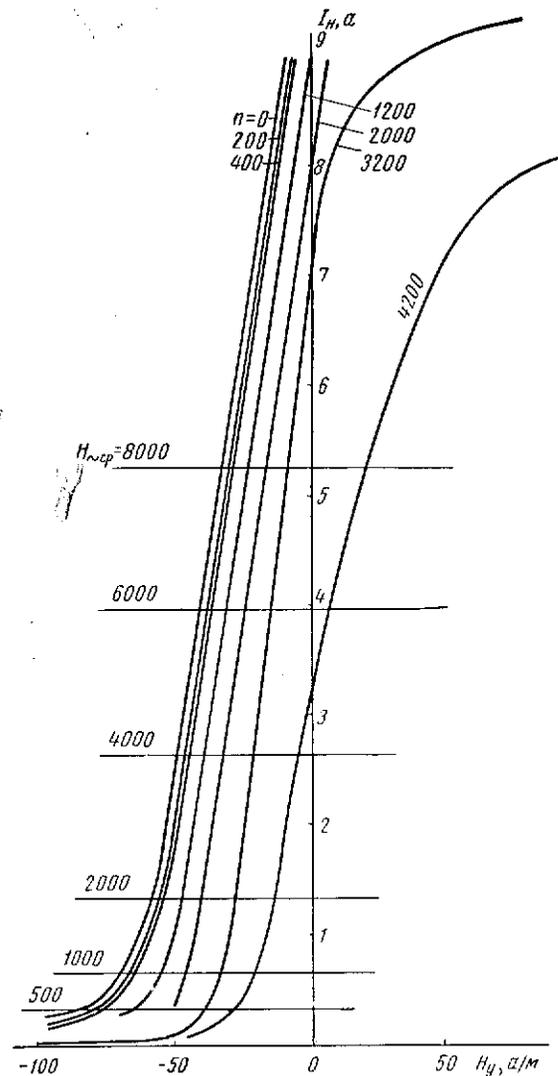


Рис. 8-6. Регулировочные характеристики магнитного усилителя при постоянной скорости двигателя

лизации  $U_{ст}$ . Это выражается в том, что при возникновении на задающей обмотке напряжения  $U_3 - U_{\pi} = U_3 - c_e n - iR > U_{ст}$  стабилитрон будет поддерживать на ней напряжение, равное  $U_{ст}$ ,

$$U_3 - c_e n - iR \leq U_{ст}. \quad (8-31)$$

Таким образом, переходные процессы в рассматриваемой системе со сделанными допущениями описываются двумя дифференциальными уравнениями первого порядка

$$\frac{\omega_y}{R_y l_c} [(U_3 - c_e n - iR) - U_{см} + 3R_y \beta i] = H_y + \frac{6m\omega_y^2 s}{R_y l_c} \frac{dB_0}{dt}, \quad (8-30')$$

$$i = \frac{J}{9,55c_m} \frac{dn}{dt} + I_c, \quad (8-26')$$

где  $B_0 = f(H_y)$ ;

$$i = f(H_y, n).$$

Решение этих дифференциальных уравнений может быть осуществлено любым методом решения нелинейных дифференциальных уравнений, например конечных приращений, фазовой плоскости, графическим методом Башарина и др.

В качестве примера приводится расчет, выполненный методом конечных приращений.

Исходные данные:  $U_3 = 221,4$  в,  $U_{см} = 5$  в,  $I_c = 1,1$  а,

$R = 5,54$  ом,  $c_e = 0,064 \frac{в}{об/мин}$ ,  $c_m = 0,61$  н·м/а,  $R_y = 8$  ом,

$\omega_y = 200$  витков,  $s = 7,45 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>,  $l_c = 0,416$  м,

$m = 6$ ,  $\beta = 0,00035$ ,  $J = 0,003$  кгм<sup>2</sup>.

Подставляя числовые значения, записываем расчетные уравнения

$$\Delta B_{0(m)} = \frac{59 [(221,4 - 0,064 n_{(m)} - 5,54 i_{(m)}) - 5 + 0,084 i_{(m)}] - H_{ym} \Delta t}{316} \Delta t; \quad (8-32)$$

$$B_{0(m)} = B_{0(m-1)} + \Delta B_{0(m-1)}; \quad (8-33)$$

$$\Delta n = 1950 (i_{(m)} - 1,1) \cdot 1 [i - 1,1] \Delta t; \quad (8-34)$$

$$n_{(m)} = n_{(m-1)} + \Delta n_{(m-1)}, \quad (8-35)$$

где

$$(221,4 - 0,066 n_{(m)} - 5,54 i_{(m)}) \leq 120;$$

$$i_{(m)} = f(H_y, n) \text{ (рис. 8-6);}$$

$$H_{y(m)} = f(B_0, n) \text{ (рис. 8-8, а);}$$

$1 [i_{(m)} - 1,1]$  — единичная функция, равная нулю при  $i < 1,1$  а и равная единице при  $i > 1,1$  а.

Начальные условия

$$H_y = H_{см} = \frac{5 \cdot 200}{3 \cdot 8 \cdot 0,416} = 100 \frac{а}{м}; \quad i = 0,16 \text{ а}; \quad n = 0.$$

Шаг интегрирования принимается равным  $\Delta t = 0,005$  сек. Расчет сводится в табл. 8-2 (приводится только начало расчета).

Таблица 8-2

Параметры	Номер шага $m$						
	0	1	2	3	4	5	6
$t = m\Delta t$ , сек	0	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025	0,030
$H_y$ , а/м	-100	-150	-103	-72	-42	-11	18
$\Delta B_0$ , вб/м <sup>2</sup>	0,112	0,113	0,112	0,111	0,111	0,11	0,11
$B_0$ , вб/м <sup>2</sup>	0	0,112	0,225	0,337	0,448	0,559	0,669
$i$ , а	0,16	0,16	0,16	0,5	3,6	8,7	10
$\Delta n$ , об/мин	0	0	0	0	24	75	88
$n$ , об/мин	0	0	0	0	0	24	99

Расчетные кривые переходного процесса пуска двигателя  $n = f(t)$  и  $i = f(t)$  приведены на рис. 8-7.

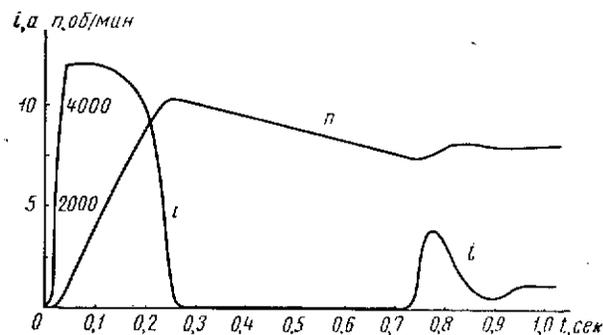


Рис. 8-7. Графики переходного процесса пуска двигателя

4. Рассчитать переходный процесс двигателя изделия и стола резьбошлифовального станка при возникновении нагрузки (возмущающее воздействие). Переходный процесс рассчитывается для случая работы электропривода на холостом ходу с  $n_x = 350$  об/мин,  $I_{x.x} = 1,1$ ,  $\alpha$  при внезапном приложении нагрузки  $I_c = I_{дл} = 4,35$  а,  $U_3 = 23,2$  в,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0,23$ ,  $R = 6,35$  ом. Остальные данные взяты из (8-2-1) и (8-2-3). Стабилитрон на задающей обмотке отключен.

Для расчета используются два дифференциальных уравнения первого порядка (8-30') и (8-26'), из которых находятся производные:

$$\frac{dB_0}{dt} = \frac{\omega_y}{R_y I_c} [(U_3 - c_e n - iR) + 3R_y \beta i] - H_y; \quad (8-30'')$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{9,55 c_M}{J} (i - I_c), \quad (8-26'')$$

где  $i = f(B_0, n)$ .

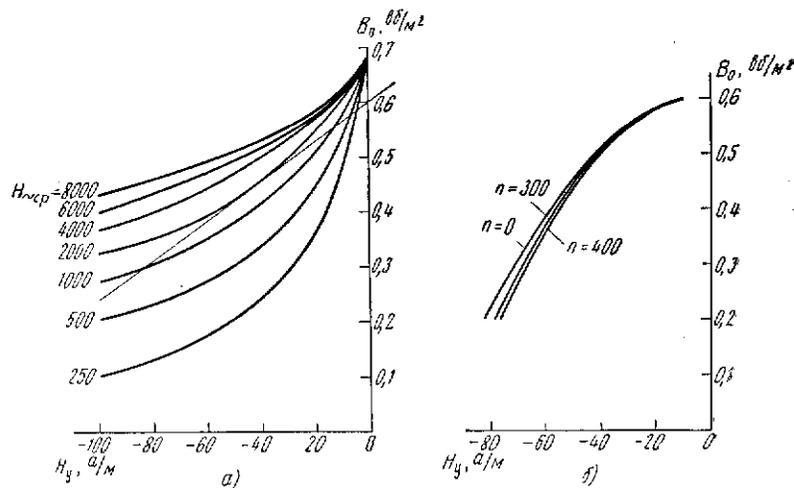


Рис. 8-8. Магнитные характеристики магнитного усилителя: а — при постоянном токе нагрузки; б — при постоянной скорости двигателя

В расчете учитываются следующие нелинейные характеристики: а)  $i = f(H_y, n)$  (рис. 8-6); б)  $B_0 = f(H_y, n)$  (рис. 8-8, б).

Зависимость  $B_0 = f(H_y, n)$  строится по семейству магнитных характеристик МУ  $B_0 = f(H_y, H_{cp})$  (рис. 8-8, а) и семейству токовых регулировочных характеристик  $I_n = f(H_y, n)$  (рис. 8-6)

с учетом соотношения между током якоря двигателя  $I$  и средним значением переменной составляющей напряженности поля МУ за половину периода  $H_{cp}$

$$0,75 I \omega_p = H_{cp} I_c$$

или

$$H_{cp} = \frac{0,75 \omega_p}{I_c} I = \frac{0,75 \cdot 846}{0,416} I = 1520 I, \quad (8-36)$$

где  $\omega_p$  — число витков рабочих обмоток МУ.

На регулировочных характеристиках проводятся прямые  $I_n = \text{const}$  и определяются значения  $H_y$  и  $n$ . По значениям  $H_y$  и  $H_{cp}$ , соответствующим  $I_n = \text{const}$ , на магнитных характеристиках определяются значения  $B_0$ .

Расчет производится методом канонических полигонов на фазовой плоскости с координатами  $B_0$  и  $n$  (рис. 8-9).

Находятся нулевая и бесконечная изоклипы.

Уравнение нулевой изоклипы

$$\frac{dn}{dt} = \frac{9,55 c_M}{J} [i(B_0, n) - I_c] = 0 \quad (8-37)$$

или

$$i(B_0, n) = I_c = 4,35 \text{ а.} \quad (8-37')$$

Для нахождения значений нулевой изоклипы на семейство регулировочных характеристик (рис. 8-6) наносится прямая  $I = 4,35$  а и затем, задаваясь различными значениями скорости двигателя  $n$ , находят значения напряженности усилителя  $H_y$  и по рис. 8-8, б — значения  $B_0$ . Результаты расчета нулевой изоклипы приведены в табл. 8-3.

Таблица 8-3

$n$ , об/мин	0	200	400	600
$H_y$ , а/м	-39,5	-37,5	-35,5	-33,5
$B_0$ , вб/м <sup>2</sup>	0,51	0,522	0,53	0,54

Уравнение бесконечной изоклипы после подстановки численных значений в (8-30'')

$$\frac{dB_0}{dt} = 4,34 - 0,012 n - 0,155 i(B_0, n) - 0,0031 H_y = 0. \quad (8-38)$$

Для расчета бесконечной изоклипы задаются рядом значений тока двигателя  $i$  и определяют значения  $H_y$  для разной скорости

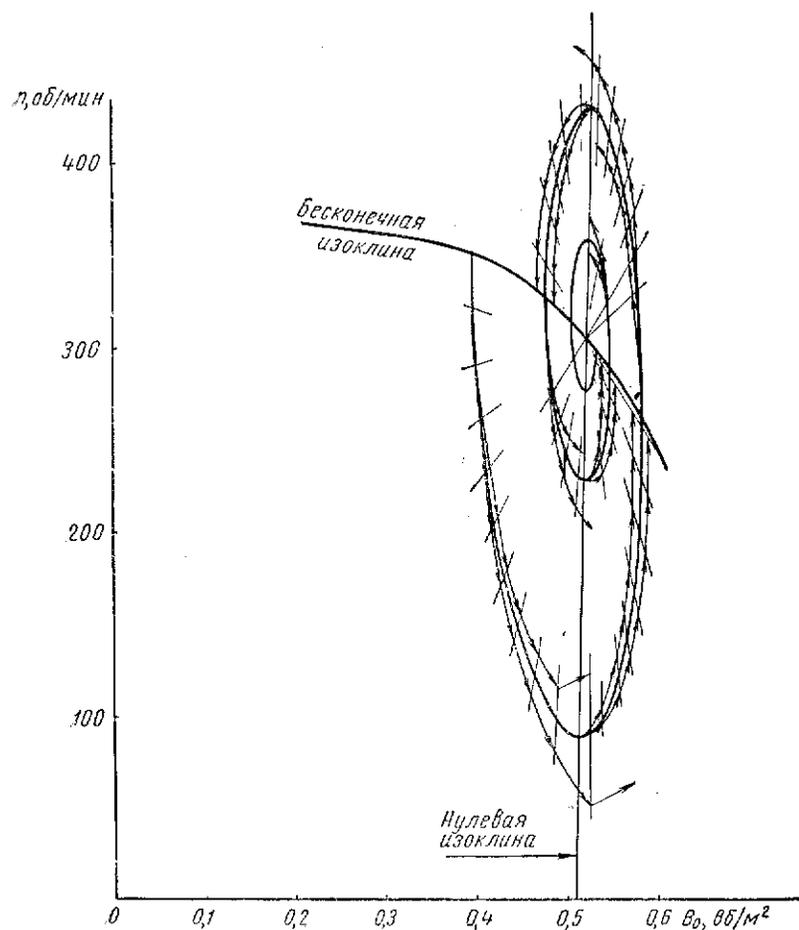


Рис. 8-9. Построение фазовой траектории  $B_0 = f(n)$

(рис. 8-6), а затем значения  $B_0$  (рис. 8-8, б). Результаты расчета бесконечной изоклины приведены в табл. 8-4. Нулевая и бесконечная изоклины наносятся на фазовую плоскость (рис. 8-9).

Таблица 8-4

$n$ , об/мин	250	275	300	325	350	375
$H_y$ , а/м	-12,5	-23,5	-34,5	-44,5	-56	-72
$B_0$ , вб/м <sup>2</sup>	0,6	0,57	0,535	0,485	0,405	0,275

Находятся начальная и конечная фазы процесса. Начальная фаза определяется из начальных условий  $n' = 350$  об/мин;  $I_c' = I_{x.z} = 1,1$  а;  $H_y' = -57$  а/м;  $B_0' = 0,4$  вб/м<sup>2</sup>. Конечная фаза (точка покоя) определяется из пересечения нулевой и бесконечной изоклин и имеет значения  $n'' = 302$  об/мин,  $B_0'' = 0,535$  вб/м<sup>2</sup>.

Рассчитывается правоканонический полигон.

Расчет производится по уравнению тангенса угла наклона вектора поля

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{dn}{dB_0} = \frac{9,55 c_M [i(B_0, n) - I_c] \frac{6m\omega_y^2 s}{R_y l_c}}{\frac{I_{wy}}{R_y l_c} \{ |U_3 - c_e n - i(B_0, n) R| + 3 R_y \beta i \}} \quad (8-39)$$

После подстановки численных значений получим расчетное уравнение

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\Delta n}{\Delta B_0} = \frac{1950 [i(B_0, n) - 4,35]}{4,34 - 0,012 n - 0,155 i(B_0, n) - 0,0031 H_y}$$

Расчет сводится в табл. 8-5 (приводится только начало расчета).

Таблица 8-5

Номер шага	$n$ , об/мин	$B_0$ , вб/м <sup>2</sup>	$H_y$ , а/м	$i$ , а	$\operatorname{tg} \gamma$ , об/мин / вб/м <sup>2</sup>	$\Delta n$ , об/мин	$\Delta B_0$ , вб/м <sup>2</sup>
1	350	0,400	-57	1,100	$-\infty$	-30	0
2	320	0,400	-57	1,145	-17500	-30	0,0017
3	290	0,402	-57	1,190	-8600	-30	0,0035
4	260	0,405	-56	1,385	-5600	-30	0,0054
5	230	0,411	-55,5	1,505	-4000	-30	0,0075

Расчет левоканонического полигона производится на фазовой плоскости методом, описанным в [Л.14]. Промежуточные изокли-

ны при расчете считаются линейными, проходящими через точку покоя. При расширении коридора расчет полигонов начинается со средней точки, например при  $n = 88$  об/мин и  $B_0 = 0,516$  вб/м<sup>2</sup>. Фазовая траектория проводится посередине между правым и левым каноническими полигонами.

Расчет кривых переходного процесса производится приближенным интегрированием уравнения (8-26''), в котором дифференциалы заменяются конечными приращениями и определяется приращение времени

$$\Delta t = \frac{J \Delta n}{9,55 c_m [i(B_0, n) - I_c]} = \frac{\Delta n}{1950 [i(B_0, n) - 4,35]} \quad (8-26''')$$

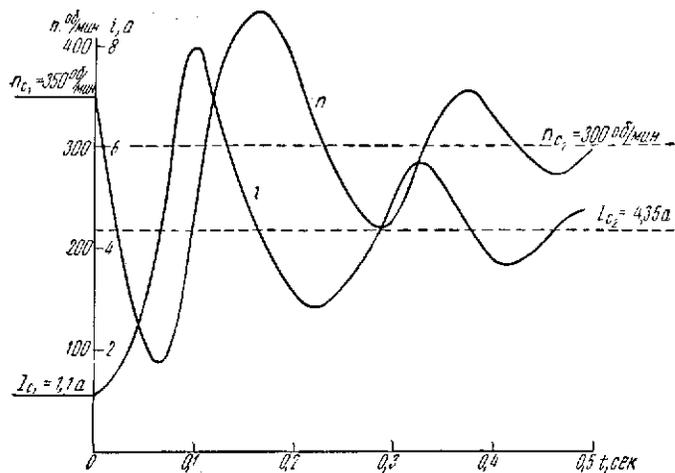


Рис. 8-10. Графики переходного процесса при приложении нагрузки

Задавая значения скорости  $n$  двигателя, определяют по фазовой траектории  $B_0$ , а по ним определяются  $\Delta n$ ,  $H_y$  и  $i$ . Начало расчета приведено в табл. 8-6. Расчетные кривые переходного процесса приведены на рис. 8-10.

Таблица 8-6

Номер шага	$n$ , об/мин	$\Delta n$ , об/мин	$B_0$ , вб/м <sup>2</sup>	$H_y$ , а/м	$i$ , а	$\Delta t$ , сек	$t$ , сек
1	350	0	0,400	-57	1,100	0	0
2	320	-30	0,401	-57	1,15	0,0047	0,0047
3	290	-30	0,402	-57	1,19	0,0048	0,0095
4	260	-25	0,406	-56	1,39	0,0051	0,0146
5	235	-30	0,41	-55,5	1,5	0,0044	0,0190

### § 8-3. Электропривод поперечной подачи сферо- и внутришлифовальных станков

Промышленность выпускает сферошлифовальные станки для шарикоподшипникового производства с электромеханическим приводом поперечной подачи. Такой привод не контролирует процесс шлифования, что является его принципиальным и существенным недостатком.

Он обеспечивает постоянную подачу и не учитывает влияния упругой деформации станка. Это приводит к затягиванию процесса шлифования, когда при осыпании шлифовального круга резко сбрасывается упругая деформация, и увеличению опасности возникновения ожога при засаливании шлифовального круга, когда упругая деформация возрастает.

Московским энергетическим институтом и И ГПЗ исследована

и внедрена на сферошлифовальных станках модели ЛЗ-8 новая следящая система электропривода поперечной подачи [Л. 35]. Эта система учитывает упругую деформацию станка и позволяет: повысить производительность, исключить брак изделий по ожогу, повысить стойкость шлифовальных кругов, значительно упростить кинематическую цепь, исключить вмешательство рабочего в процесс шлифования и полностью автоматизировать станок на современном техническом уровне.

Качественным и количественным критерием технологического процесса (на станке с новой системой подачи является мощность резания (шлифования), величина которой поддерживается на предельно допустимом уровне при черновой и чистовой обработке.

На станке обеспечивается следующий цикл работы (рис. 8-11): а) ускоренный подвод шлифовального круга к детали и его врезание; б) черновое шлифование с максимально допустимой мощностью; в) снятие упругой деформации; г) чистовое шлифование с пониженной мощностью; д) ускоренный отвод шлифовального круга от изделия.

Упрощенная схема поперечной подачи станка изображена на рис. 8-12. Система электропривода поперечной подачи представляет собой замкнутую систему автоматического поддержания мощности шлифования релейного действия. Контроль мощности шлифования ведется по мощности двигателя шлифовального круга  $D_k$ , потребляемой из сети.

Измерение мощности двигателя осуществляется с помощью ста-

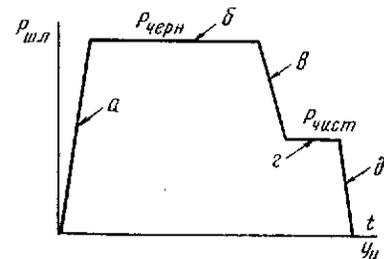


Рис. 8-11. Зависимость мощности шлифования от времени или от припуска изделия

тической фазочувствительной схемы, состоящей из трансформаторов тока  $ТТ$  и напряжения  $ТН$  [Л.35].

При колебании напряжения питающей сети изменяется сигнал обратной связи и, следовательно, мощность шлифования. Для устранения этого влияния задающее напряжение автоматически регулируется обратно пропорционально напряжению сети. Это обеспечивается узлом схемы, в котором задающее напряжение определяется как разность между стабилизированным напряжением

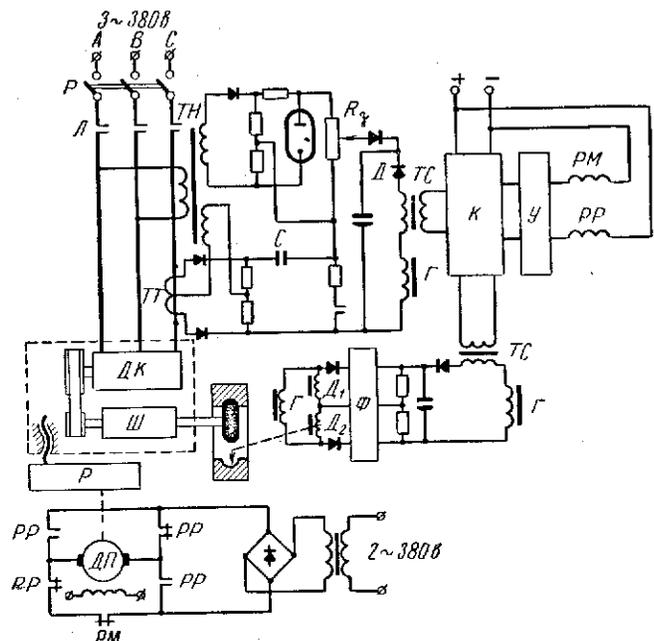


Рис. 8-12. Упрощенная схема электропривода поперечной подачи станка ЛЗ-8

$U_{ст}$  и напряжением, пропорциональным изменению  $U_{о.с}$ . Величина задающего напряжения снимается с потенциометра  $R_3$ .

При повышении потерь мощности в подшипниках шлифовального шпинделя  $Ш$  мощность резания уменьшается. Для исключения этого введена компенсация холостого хода двигателя круга. В период холостого хода к узлу обратной связи подключается запоминающий конденсатор, который в период шлифования повышает задающее напряжение пропорционально повышению мощности холостого хода двигателя.

Для сравнения напряжения обратной связи по мощности  $U_{о.с}$  с задающим напряжением  $U_3$  служит нуль-индикатор. Такой же нуль-индикатор сравнивает сигналы датчика размера с эталоном.

Нуль-индикатор включает в себя высокочастотный генератор  $Г$ , диод  $Д$  и сглаживающий трансформатор  $ТС$ . Работа нуль-индикатора основана на резком возрастании сопротивления полупроводникового диода при приложении к нему обратного напряжения постоянного тока.

Схема работает следующим образом. При  $U_3 > U_{о.с}$  на диод прикладывается обратное напряжение, равное  $U_3 - U_{о.с}$ . Сопротивление диода при этом высокое и он не пропускает сигнала генератора  $Г$ . Реле мощности  $РМ$ , получающее сигнал с согласующего трансформатора через усилитель  $У$ , не включается, а двигатель подачи, якорь которого соединен через размыкающий контакт реле  $РМ$ , включается и обеспечивает через редуктор  $Р$  поперечную подачу шлифовальной бабки. При  $U_3 < U_{о.с}$  сопротивление диода падает, сигнал генератора проходит, реле  $РМ$  включается, а двигатель подачи отключается. Так обеспечивается приблизительно постоянная мощность шлифования.

Контроль размера изделия осуществляется бесконтактным индуктивным датчиком размера, сконструированным на 1 ГПЗ. Датчик размера  $Д_1$  включен в дифференциальную схему с эталонным датчиком  $Д_2$ , сигнал которой подается на фильтр  $Ф$ . В конце операций чернового и чистового шлифования от сигнала датчика включается реле размера  $РР$  и реверсирует двигатель подачи.

Электронный коммутатор  $К$  служит для обеспечения работы реле  $РМ$  от датчика мощности и реле  $РР$  от датчика размера.

1. Рассчитать характеристику датчика обратной связи по мощности. Напряжение на выходе Т-образной схемы измерения мощности равно [Л.37]

$$U_{вых} \approx k \frac{U_T U_H}{U_T + U_H} \cos \varphi, \quad (8-40)$$

где  $U_H, U_T$  — вторичные напряжения трансформаторов напряжения и тока;

$\varphi$  — угол сдвига между линейным напряжением и током двигателя;

$k$  — коэффициент пропорциональности.

При  $U_H \gg U_T$  значением  $U_T$  в знаменателе можно пренебречь и тогда выходное напряжение схемы оказывается пропорциональным активной составляющей тока двигателя.

$$U_{вых} \approx k U_T \cos \varphi = k' I \cos \varphi = k' I_a. \quad (8-41)$$

Погрешности принятой схемы зависят в основном от двух факторов: а) от величины напряжения  $U_H$ , которое чем выше по сравнению с  $U_T$ , тем меньше погрешность измерения; б) от фазовой погрешности трансформатора тока, для уменьшения которой магнитопровод трансформатора не замкнут и работает в ненасыщенном режиме.

Векторная диаграмма узла измерения мощности (узла обратной связи) приведена на рис. 8-13, а.

Расчет зависимости напряжения обратной связи  $U_{o.c}$  (напряжения выхода узла измерения мощности) от мощности двигателя  $P_d$  может производиться графо-аналитически.

Для этого задаются значениями  $P_d$ , определяют ток в фазе С и напряжение на выходе трансформатора тока по уравнениям:

$$I_c = \frac{P_d}{\sqrt{3} U_{AB} \cos \varphi}; \quad (8-42)$$

$$U_T = k_T I_c, \quad (8-43)$$

где  $k_T$  — коэффициент трансформатора тока.

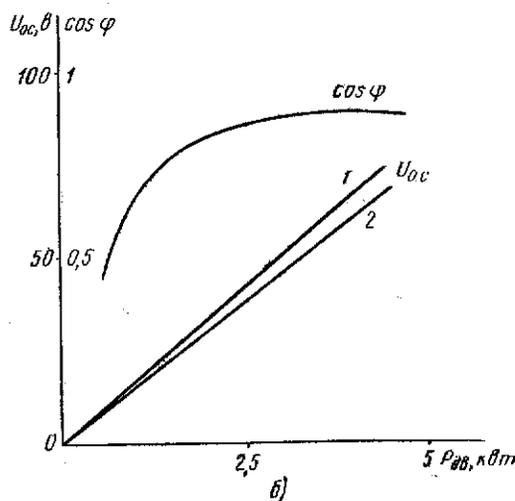
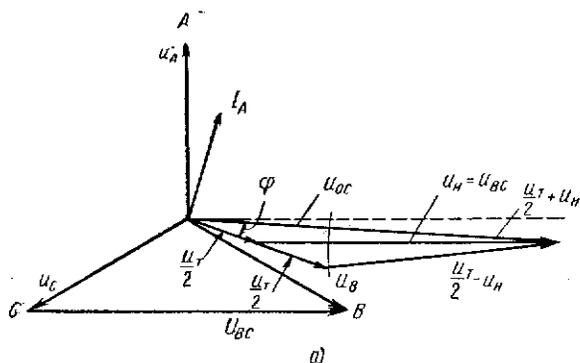


Рис. 8-13. Узел обратной связи по мощности:  
 а — векторная диаграмма; б — зависимость коэффициента мощности двигателя от мощности двигателя и характеристика датчика обратной связи  $U_{o.c}$  (1 — расчетная; 2 — экспериментальная)

Значения  $\cos \varphi$  принимаются по кривой  $\cos \varphi = f(P_d)$  (рис. 8-13, б). Далее на векторной диаграмме (рис. 8-13, а) откладывается вектор  $\bar{U}_T$  перпендикулярно вектору  $\bar{I}_c$  или, что то же, под углом  $\varphi$  к  $\bar{U}_n = \bar{U}_{AB}$  строятся векторы  $\frac{\bar{U}_T}{2} + \bar{U}_n$  и  $\frac{\bar{U}_T}{2} - \bar{U}_n$  и определяется напряжение обратной связи

$$U_{o.c} = \left| \frac{\bar{U}_T}{2} + \bar{U}_n \right| - \left| \frac{\bar{U}_T}{2} - \bar{U}_n \right|. \quad (8-44)$$

Расчетная зависимость  $U_{o.c} = f(P_d)$  приведена на рис. 8-13, б (кривая 1). Там же приведена экспериментальная зависимость (кривая 2).

2. Составить функциональную схему электропривода поперечной подачи. Функциональная схема приведена на рис. 8-14. Можно

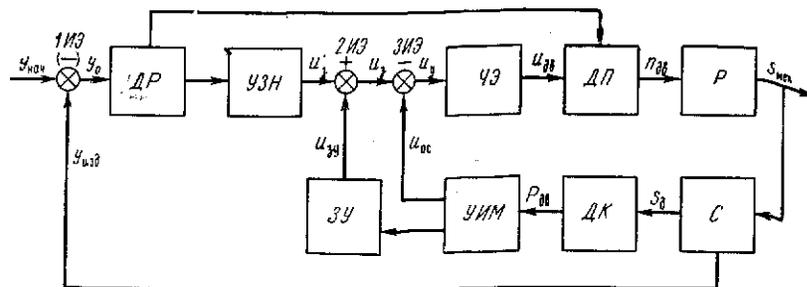


Рис. 8-14. Функциональная схема привода подачи

считать, что система имеет на входе начальный припуск изделия  $y_{нач}$ , из которого в процессе шлифования вычитается снимаемый припуск  $y_{изд}$ . Это вычитание условно производится с помощью измерительного элемента, обозначенного на схеме 1ИЭ. Оставшийся припуск изделия  $y_0$  измеряется датчиком размера ДР, сигнал которого подается на двигатель подачи ДП и в узел задающего напряжения УЗН. К этому напряжению добавляется напряжение запоминающего устройства ЗУ, пропорциональное мощности холостого хода двигателя круга. Сложение производится в 2ИЭ. Этот суммарный сигнал является задающим  $U_z$  в системе автоматического поддержания постоянства мощности двигателя шлифовального круга ДК. Разность суммарного задающего сигнала и сигнала обратной связи  $u_{o.c}$ , обеспечиваемого узлом измерения мощности УИМ и пропорционального мощности шлифования, подается на вход релейного чувствительного элемента ЧЭ. Эта разность получается в 3ИЭ. Чувствительный элемент с помощью реле включает и отключает двигатель подачи, который через редуктор Р и ходовой винт обеспечивает попереч-

ную подачу суппорта шлифовальной бабки станка С. При этом осуществляется черновое шлифование с примерно постоянной мощностью, определяемой задающим сигналом  $U_3$ . После снятия чернового припуска датчик размера дает команду на снижение  $U_3$ . Обеспечивается чистовое шлифование с пониженной мощностью. В конце процесса шлифования, когда заданный припуск изделия полностью снят, датчик размера подает сигнал на двигатель подачи, который обеспечивает ускоренный отвод шлифовального круга от изделия.

3. Составить структурную схему и определить передаточные функции звеньев системы автоматического поддержания постоянства мощности шлифования. Схема составляется на основании функциональной схемы (рис. 8-14). Первым звеном схемы является чувствительный элемент релейного действия, который объединяет нуль-индикатор, усилитель и реле, включающее двигатель. На вход звена подается сигнал управления  $u_y$  или  $i_y$ , а на выходе получается напряжение на якоре двигателя. Чувствительный элемент может быть инерционным. Поэтому его можно рассматривать как инерционный усилитель с передаточной функцией

$$W_y(p) = \frac{K_y}{T_y p + 1} \quad (8-45)$$

и безынерционный нелинейный элемент с характеристикой, приведенной на рис. 8-16.

Двигатель подачи может рассматриваться как аperiodическое звено с электромагнитической постоянной времени. Электромагнитная постоянная времени мала

$$W_d(p) = \frac{K_d}{T_d p + 1} \quad (8-46)$$

Редуктор и ходовой винт изображаются в схеме как безынерционный преобразователь скорости двигателя подачи в моторную подачу с коэффициентом передачи  $K_p$ .

Для учета влияния упругой деформации станка и износа шлифовального круга, которые соизмеримы со снимаемыми припусками изделия, в структурную схему включено звено, определяющее упругую технологическую систему «станок — инструмент — деталь», условно названное звеном «станок».

Для вывода уравнения этого звена можно воспользоваться зависимостью, имеющей место в любой момент времени в процессе шлифования,

$$y_c = y_n + y_{y.d} + y_{и.к.} \quad (8-47)$$

из которой видно, что перемещение суппорта  $y_c$  не равно припуску изделия  $y_n$ , а больше его на суммарную величину износа круга  $y_{и.к.}$  и упругой деформации  $y_{y.d}$ .

Продифференцировав (8-47) по времени, можно получить уравнение звена «станок»

$$s_m = s_d + s_{y.d} + s_{и.к.} \quad (8-48)$$

где  $s_m$  — подача суппорта (моторная подача);  
 $s_d$  — действительная подача или скорость съема припуска изделия;  
 $s_{y.d}$  — скорость упругой деформации;  
 $s_{и.к.}$  — скорость износа круга.

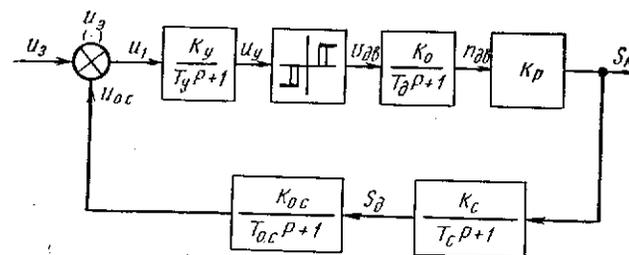


Рис. 8-15. Структурная схема системы поддержания мощности

Для расчета необходимо иметь экспериментальные зависимости для  $s_{y.d}$  и  $s_{и.к.}$ , которые допускают следующую линеаризацию (см. рис. 8-17):

$$s_{y.d} = c_1 \frac{ds_d}{dt} \text{ и } s_{и.к.} = c_2 s_d.$$

Уравнение звена «станок» примет вид

$$K_c s_m = s_d + T_c \frac{ds_d}{dt}, \quad (8-48')$$

что соответствует уравнению аperiodического звена.

Здесь  $K_c = \frac{1}{1 + c_2}$  — коэффициент усиления звена;

$$T_c = \frac{c_1}{1 + c_2} \text{ — его постоянная времени.}$$

Узел обратной связи по мощности двигателя объединен с преобразователем действительной подачи в мощность двигателя шлифовального круга. В структурной схеме он изображается как инерционный преобразователь действительной подачи в напряжение обратной связи по мощности двигателя круга с передаточной функцией

$$W_{o.c}(p) = \frac{K_{o.c}}{T_{o.c} p + 1} \quad (8-49)$$

Структурная схема приведена на рис. 8-15.

4. Рассчитать график мощности двигателя шлифовального круга в процессе шлифования. Методика расчета графика мощности в рассматриваемом примере представляет теоретический и практический интерес.

Расчет производится для конкретного случая черного шлифования на внутришлифовальном станке модели 3250Б со следящим электроприводом поперечной подачи релейного действия.

Методика расчета является общей для любого режима обработки. Расчет кривой мощности можно начинать с момента соприкосновения шлифовального круга с изделием при ускоренном подводе.

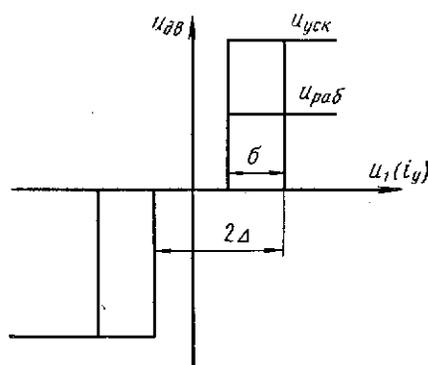


Рис. 8-16. Характеристика чувствительного элемента с магнитным усилителем

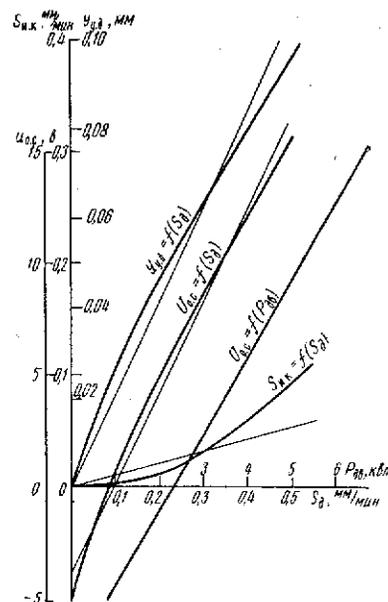


Рис. 8-17. Зависимость упругой деформации  $y_{y.d} = f(s_d)$ , скорости износа шлифовального круга  $s_{ш.к} = f(s_d)$  и напряжения обратной связи  $U_{o.c} = f(s_d)$  и  $U_{o.c} = f(P_d)$  на станке модели 3250Б

Данные звеньев системы рис. 8-15. Чувствительный элемент  $K_y = 0,8 \text{ ма/в}$ ;  $T_y = 0,6 \text{ сек}$ ;  $2\Delta = 2,2 \text{ ма}$ ;  $\delta = 0,3 \text{ ма}$ .

В системе применен магнитный усилитель, работающий в релейном режиме, характеристика которого приведена на рис. 8-16.

Двигатель типа МУН;  $K_1 = 15,4 \text{ об/мин/в}$ ;  $T_m = 0,02 \text{ сек}$ ;  $K_m = 488 \text{ об/мин/н·м}$ ;  $U_{д.у} = 112 \text{ в}$ ;  $U_{д.р} = 52 \text{ в}$ . Редуктор с ходовым винтом:  $K_p = 0,00217 \text{ мм/об}$ . Станок  $K_c = 0,91$ ;  $T_c = 11,5 \text{ сек}$  ( $C_1 = 12,5 \text{ сек}$ ,  $C_2 = 0,1$ ). Преобразователь  $K_n = 40 \text{ в·мин/мм}$ ,  $U_0 = 3,75 \text{ в}$ .

Характеристики узла «станок» и преобразователя приведены на рис. 8-17. Задающее напряжение в процессе черного шлифова-

ния постоянно и равно  $U_3 = 10 \text{ в}$ . При шлифовании на валу двигателя подачи приложен постоянный статический момент  $M_c = 0,1 \text{ н·м}$ . При расчете не учитываются инерционности двигателя подачи и узла обратной связи по мощности.

Составляются дифференциальные уравнения звеньев системы поддержания мощности

$$U_3 - U_{o.c}(s_d) = u_y; \quad (8-50)$$

$$K_y u_y = i_y + T_y \frac{di_y}{dt}. \quad (8-51)$$

Зависимость  $u_d = f(i_y)$  приведена на рис. 8-16.

$$K_d u_d - K_m M_c = n_d; \quad (8-52)$$

$$K_p n_d = S_m; \quad (8-53)$$

$$K_c s_m = s_d + T_c \frac{ds_d}{dt}; \quad (8-48')$$

$$K_n s_d - U_0 = U_{o.c} \quad (8-54)$$

Нелинейная зависимость  $U_{o.c} = f(s_d)$  (рис. 8-17) заменена линейной. Для расчета переходных процессов используется метод, основанный на теореме запаздывания операционного исчисления, согласно которому построение процесса производится по участкам. На каждом участке система считается линейной, а нелинейный элемент на выходе обеспечивает сигналы, одинаковые по величине и разные по знаку.

При расчете за входную величину принято напряжение на двигателе подачи, за выходную — ток управления нелинейного элемента. Записывая уравнения линейной части системы в изображениях и решив их относительно изображения тока управления нелинейного элемента, получим

$$I_y(p) = \frac{\{K_y [U_3(p) + U_0(p)] + T_y p i_y(0)\} (T_c p + 1) - K_1 U_d(p) + K_2 M_c(p)}{(T_c p + 1)(T_y p + 1)}, \quad (8-55)$$

где  $K_1 = K_y K_n K_c K_p K_d = 0,8 \cdot 40 \cdot 0,91 \cdot 0,00217 \cdot 15,4 = 0,97 \text{ ма/в}$ ;

$$K_2 = K_y K_n K_c K_p K_m = 0,8 \cdot 40 \cdot 0,91 \cdot 0,00217 \cdot 488 = 31 \text{ ма/н·м}.$$

В расчете не учтены инерционности двигателя подачи и узла обратной связи ввиду их малости по сравнению с другими инерционностями системы привода.

При работе системы в процессе шлифования на двигатель подачи подается напряжение в виде прямоугольных импульсов. Поэтому изображение напряжения двигателя подачи примет вид

$$U_x(p) = U_{\text{уск}}(1 - e^{-t_1 p}) + U_{\text{раб}}(e^{-t_2 p} - e^{-t_3 p} + e^{-t_4 p} - e^{-t_5 p} + \dots). \quad (8-56)$$

Подставляя значение  $U_x(p)$  из (8-56) в (8-55), получаем

$$I_y(p) = I_{y.l}(p) - I_{y.y}(p)(1 - e^{-t_1 p}) - I_{y.p}(p)(e^{-t_2 p} - e^{-t_3 p} + e^{-t_4 p} - e^{-t_5 p} + \dots), \quad (8-57)$$

где

$$I_{y.l}(p) = \frac{\{K_y [U_3(p) + U_0(p)] + T_y p i_y(0)\} (T_c p + 1) + K_2 M_c(p)}{(T_c p + 1)(T_y p + 1)}; \quad (8-58)$$

$$I_{y.y}(p) = \frac{K_1 U_{\text{уск}}(p)}{(T_c p + 1)(T_y p + 1)}; \quad (8-59)$$

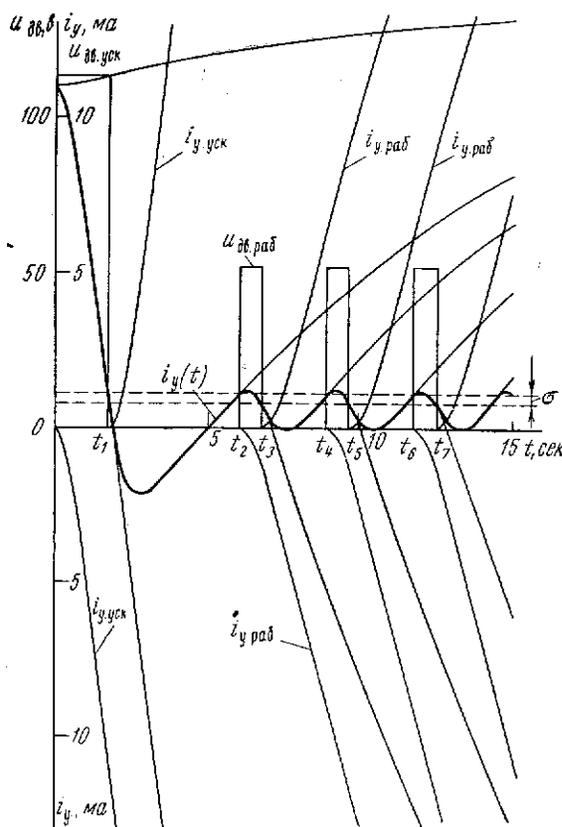


Рис. 8-18. Построение графика переходного процесса тока управления  $i_y = f(t)$

$$I_{y.p}(p) = \frac{K_1 U_{\text{раб}}(p)}{(T_c p + 1)(T_y p + 1)}. \quad (8-60)$$

В числовых значениях

$$I_y(p) = \frac{[0,8(10 + 3,75) + 0,6p + 11](11,5p + 1) + 31 \cdot 0,1}{(11,5p + 1)(0,6p + 1)} - \frac{0,97 \cdot 112,5}{(11,5p + 1)(0,6p + 1)}(1 - e^{-t_1 p}) - \frac{0,97 \cdot 52,5}{(11,5p + 1)(0,6p + 1)} \times (e^{-t_2 p} - e^{-t_3 p} + e^{-t_4 p} - e^{-t_5 p} + \dots). \quad (8-57')$$

Переходя к оригиналу, с помощью теоремы запаздывания операционного исчисления получаем

$$i_y(t) = i_{y.l}(t) - i_{y.y}(t) + i_{y.y}(t - t_1) - i_{y.p}(t - t_2) + i_{y.p}(t - t_3) - i_{y.p}(t - t_4) + i_{y.p}(t - t_5) - \dots \quad (8-61)$$

Зависимости  $i_{y.l}(t)$ ,  $i_{y.y}(t)$  и  $i_{y.p}(t)$  находятся с помощью теоремы разложения операционного исчисления

$$i_{y.l}(t) = 14,1 - 3,27e^{-0,087t} + 0,17e^{-1,67t}; \quad (8-62)$$

$$i_{y.y}(t) = 109 - 115e^{-0,087t} + 6e^{-1,67t}; \quad (8-63)$$

$$i_{y.p}(t) = 51 - 53,8e^{-0,087t} + 2,8e^{-1,67t}. \quad (8-64)$$

Построение кривой  $i_y = f(t)$  (рис. 8-18) производится графическим суммированием кривых уравнения (8-61) с использованием шаблона.

Далее графо-аналитическим методом по кривой  $i_y = f(t)$  и уравнению (8-51) определяется и строится зависимость  $u_y = f(t)$  (рис. 8-19), а по ней и уравнению (8-50) определяется и строится кривая  $U_{o.c} = f(t)$ .

Искомая зависимость  $P_x = f(t)$  определяется по кривой  $u_{o.c} = f(t)$  и зависимости  $u_{o.c} = f(P_x)$  (рис. 8-17).

Расчетная кривая  $P_x = f(t)$  дана на рис. 8-19. Там же приведена экспериментальная кривая  $P_x = f(t)$ , записанная осциллографом на внутришлифовальном

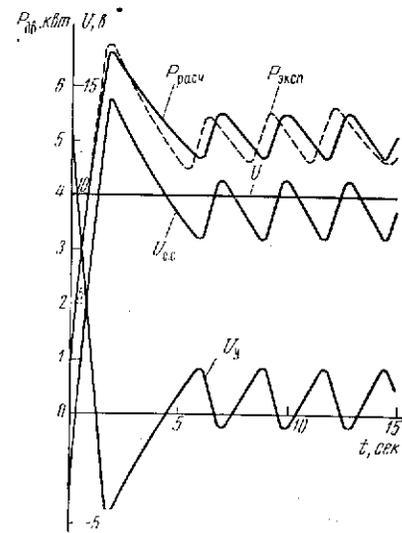


Рис. 8-19. Графики переходных процессов

станке. Как видно из рисунка, расчетная кривая достаточно хорошо совпадает с экспериментальной. Наибольшее расхождение кривых (на 10%) наблюдается в начале процесса шлифования.

Мощность шлифования может быть определена вычитанием из расчетных значений мощности двигателя мощности холостого хода (мощность потерь в двигателе и станке). На рис. 8-20 приведена расчетная кривая мощности двигателя шлифовального круга на сферошлифовальном станке ЛЗ-8 для всего цикла шлифования.

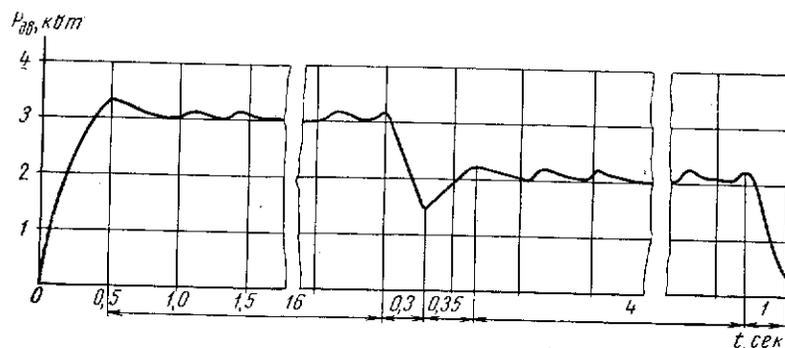


Рис. 8-20. Расчетная кривая мощности двигателя шлифовального круга за цикл

**5. Произвести технико-экономическое сравнение двух вариантов приводов подачи сферошлифовальных станков.** Экономический эффект, получаемый от оснащения сферошлифовального станка следящим электроприводом подачи, может быть определен по себестоимости обработки одного изделия.

Время работы станка в году

$$\tau = nkps = 3280 \text{ ч/год}, \quad (8-65)$$

где  $n = 365 - (52 + 6) = 307$  — число рабочих дней в году;

$k = 0,8$  — коэффициент загрузки станка;

$$p = \frac{6 \cdot 7 - 2}{6} = 6,67 \text{ — продолжительность работы станка в смену в ч/см};$$

$s = 2$  — число смен.

Время цикла обработки кольца

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{маш}} + t_{\text{всп}}, \quad (8-66)$$

где  $t_{\text{маш}}$  — машинное время;

$t_{\text{всп}}$  — вспомогательное время ( $t_{\text{всп}} = 15 \text{ сек}$ ).

Годовая производительность станка

$$П = \frac{\tau 3600}{t_{\text{ц}}}. \quad (8-67)$$

$$\text{Годовая заработная плата} \quad Z = 750 \text{ руб.} \quad (8-68)$$

$$\text{Амортизационные отчисления} \quad AO = 0,1C_{\text{ст}}, \quad (8-69)$$

где  $C_{\text{ст}}$  — стоимость станка с учетом расходов на переоборудование.

Стоимость выпускаемого станка составляет 2100 руб., расходы на переоборудование (по данным завода) составляют 520 руб. (500 руб. — привод и 20 руб. — редуктор).

$$\text{Накладные расходы} \quad NP = 3. \quad (8-70)$$

$$\text{Стоимость шлифовальных кругов} \quad C_k = \frac{2,862\Pi}{1000}; \quad (8-71)$$

$C_k$  определяется по действующим нормативам из расчета 2,862 руб. на каждые 1000 шт. изделий с учетом повышения стойкости кругов на 15% в связи с внедрением следящего привода.

Стоимость брака изделий по ожогу —  $C_6$ .

До внедрения следящей подачи на 33 сферошлифовальных станках стоимость брака составила 40 560 руб./год.

$$\text{Стоимость электрической энергии в год} \quad C_3 = c'A, \quad (8-72)$$

где  $c' = 0,013$  руб. — стоимость 1 кВт/ч электроэнергии;

$A$  — годовой расход электроэнергии

$$A = \frac{A_y \Pi}{3600}, \text{ кВт/ч}; \quad (8-73)$$

$A_y$  — удельный расход электроэнергии на одно изделие в кВт/сек

$$A_y = (P_{\text{ср,обр}} + \Sigma P) t_{\text{маш}} + P_{\text{х,х}} t_{\text{всп}} + P_{\text{пр}} t_{\text{ц}}, \quad (8-74)$$

где  $P_{\text{ср,обр}}$  — средняя мощность, потребляемая двигателем шлифовального круга при обработке изделия;

$P_{\text{х,х}}$  — то же, но при холостом ходе ( $P_{\text{х,х}} = 0,8 \text{ кВт}$ );

$$\Sigma P = P_{\text{н}} + P_{\text{к}} + P_{\text{п}} + P_{\text{и}} = 1,0 + 1,0 + 0,1 + 0,125 = 2,225 \text{ кВт}; \quad (8-75)$$

$P_{\text{н}}, P_{\text{к}}, P_{\text{п}}, P_{\text{и}}$  — мощность, потребляемая двигателями вращения и качания изделия, подачи и насоса охлаждающей жидкости;

$P_{\text{пр}}$  — средняя мощность, потребляемая прочими источниками энергии (двигатель подвода — отвода и схема управления) за цикл ( $P_{\text{пр}} = 0,1 \text{ кВт}$ ).

$$\text{Ежегодные расходы} \quad EP = Z + AO + NP + C_k + C_6 + C_3. \quad (8-76)$$

Себестоимость обработки изделия

$$C = \frac{EP}{P}. \quad (8-77)$$

Результаты расчетов для двух станков, из которых один имеет электромеханический, а другой—следящий привод, приведены в табл. 8-7.

Таблица 8-7

Показатель	Электро-механический привод	Следящий электро-привод	Показатель	Электро-механический привод	Следящий электро-привод
$\tau$ , ч	3280	3280	$C_6$ , руб.	126	—
$t_{\text{маш}}$ , мин	40	22	$P_{\text{ср.обр}}$ , кот	1,8	2,44
$t_{\text{ц}}$ , мин	55	37	$A_y$ , кот/сек	178,5	116,2
$\Pi$ , шт/год	214 500	319 000	$A_1$ , кот/ч	11640	10300
$Z$ , руб.	500	750	$C_2$ , руб.	151,3	133,9
$AO$ , руб.	210	262	$EP$ , руб.	2102,3	2673,9
$HP$ , руб.	500	750	$C$ , руб.	0,009805	0,00838
$C_k$ , руб.	615	778			

Оценивая полученные результаты, можно сделать вывод, что при внедрении следящего электропривода на сферошлифовальном станке:

повышается производительность станка на

$$\frac{P_2 - P_1}{P_1} 100 = \frac{319\,000 - 214\,500}{214\,500} 100 = 48,7\%;$$

снижается удельный расход электроэнергии на

$$\frac{A_{y1} - A_{y2}}{A_{y1}} 100 = \frac{178,5 - 116,2}{178,5} 100 = 29,3\%;$$

снижается себестоимость обработки изделия на

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1} 100 = \frac{0,009805 - 0,00839}{0,009805} 100 = 14,53\%.$$

## РАСЧЕТ СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КОПИРОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

### § 9-1. Расчет систем прерывного управления

Классификация систем управления электро-копировальных станков с описанием их принципа действия дана в [Л. 2, 38].

Статические режимы работ этих систем особенностей не имеют и в данной главе не рассматриваются. Аналогичные системы рассматриваются в главах 6 и 7 (системы ЭМУ—Д).

Переходные процессы электрокопировальных станков приведены для станков прерывного и непрерывного управления. Следует указать, что системы прерывного управления для станков разных типов работают аналогично и в данной главе рассматриваются применительно к токарно-копировальным станкам типа К62М. Расчет погрешности копирования для подобных станков аналогичен расчету копировально-фрезерных станков фирмы Пратт Витней и т. п., в которых участвуют электромагнитные муфты для передачи движения и контактные копировальные приборы, ошупывающие копир.

1. Рассчитать переходный процесс при копировании. Переходный процесс при копировании определяет точность работы станка. Переходный процесс возникает на валу коробки подач с электромагнитными муфтами. Ошибка при копировании складывается от запаздывания срабатывания реле, от запаздывания электромагнитных муфт и времени торможения вала с муфтами. Суммарная погрешность при копировании

$$\Delta s = s_p + s_s + s_t. \quad (9-1)$$

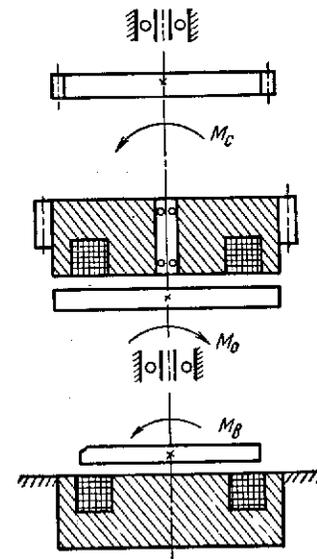


Рис. 9-1. Схема вала с рабочей и тормозной муфтами

Расчет переходного процесса позволяет найти два последних слагаемых. Выделяем вал с рабочей и тормозной муфтами из общей схемы коробки передач. Схема вала приведена на рис. 9-1.

Уравнение движения

$$M_0 - M_T - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (9-2)$$

Здесь  $M_0$  — момент отключения рабочей муфты;  
 $M_T$  — момент включения тормозной муфты;  
 $M_c$  — приведенный к валу статический момент;  
 $J$  — приведенный момент инерции.

Считаем зависимость момента муфты от тока линейной

$$M = k_1 i \Phi = k_2 \Phi^2. \quad (9-3)$$

Момент отключения

$$M_0 = M_{\max 1} e^{-\frac{2t}{T_0}}. \quad (9-4)$$

Момент включения

$$M_T = M_{\max 2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_B}}\right)^2, \quad (9-5)$$

где  $M_{\max}$  — максимальный момент муфты, принимается

$$M_{\max} = 2,5 M_c;$$

$T_0, T_B$  — постоянные времени отключения и включения муфт.

Считаем  $M_{\max 1} = M_{\max 2} = M_{\max}$ .

Перепишем уравнение в виде

$$M_{\max} \left( e^{-\frac{2t}{T_0}} - 1 + 2e^{-\frac{t}{T_B}} - e^{-\frac{2t}{T_B}} \right) - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Разделяем переменные и производим интегрирование

$$\omega = \frac{M_{\max}}{J} \left( \frac{T_B}{2} e^{-\frac{2t}{T_B}} - \frac{T_0}{2} e^{-\frac{2t}{T_0}} - 2T_B e^{-\frac{t}{T_B}} \right) - \left( \frac{M_{\max}}{J} + \frac{M_c}{J} \right) t + C.$$

Определяем по начальным условиям постоянную интегрирования  $C$ . При  $t = 0, \omega = \omega_1$

$$C = \omega_1 + \frac{M_{\max} T_B}{2J} \left( 3 + \frac{T_0}{T_B} \right),$$

где  $\omega_1$  — установившаяся скорость до начала торможения.

Подставляя значение  $C$ , получаем

$$\omega = \omega_1 + \frac{M_{\max} T_B}{2J} \left[ e^{-\frac{2t}{T_B}} - 4e^{-\frac{t}{T_B}} - \frac{T_0}{T_B} e^{-\frac{2t}{T_0}} - \frac{2}{T_B} \left( 1 + \frac{M_c}{M_{\max}} \right) t + 3 + \frac{T_0}{T_B} \right]. \quad (9-6)$$

В первое время после включения тормозной муфты и отключения ведущей муфты скорость в течение времени запаздывания  $t_3$  не меняется, оставаясь равной  $\omega_1$ . Следовательно, время запаздывания  $t_3$  определяется из уравнения

$$\frac{M_{\max} T_B}{2J} \left[ e^{-\frac{2t_3}{T_B}} - 4e^{-\frac{t_3}{T_B}} - \frac{T_0 e^{-\frac{2t_3}{T_0}}}{T_B} - \frac{2}{T_B} \left( 1 + \frac{M_c}{M_{\max}} \right) t_3 + 3 + \frac{T_0}{T_B} \right] = 0. \quad (9-7)$$

Подставляем числовые значения

$$M_c = 20 \text{ н} \cdot \text{м}; M_{\max} = 2,5 M_c = 2,5 \cdot 20 = 50 \text{ н} \cdot \text{м};$$

$$T_0 = 0,0015 \text{ сек}; T_B = 0,015 \text{ сек}; \frac{T_0}{T_B} = 0,1.$$

Пренебрегаем членом

$$\frac{T_0}{T_B} e^{-\frac{2t_3}{T_0}}.$$

Окончательное уравнение, решение которого производим графически на рис. 9-2, будет

$$\Sigma = e^{-\frac{2t_3}{T_B}} - 4e^{-\frac{t_3}{T_B}} - 2,8 \frac{t_3}{T_B} + 3,1 = 0.$$

Вычисление сводим в табл. 9-1, обозначив уравнение буквой  $\Sigma$ .

Таблица 9-1

$\frac{t_3}{T_B}$	0	0,25	0,5	1,0
$\Sigma$	+0,1	-0,12	-0,36	-1,03

Время запаздывания находится из графика  $\Sigma = f(\frac{t_3}{T_B})$  при  $\Sigma = 0$

$$t_3 = \left(\frac{t_3}{T_B}\right)_{\Sigma=0} T_B = 0,12 \cdot 0,015 = 0,0018 \text{ сек.}$$

При  $t > t_p + t_3$  начинается торможение привода подачи со скорости  $\omega_1 = 4,45 \text{ 1/сек}$  до нуля.

Определение скорости и времени торможения  $t_r$  производится по уравнению (9-6), в котором  $t = t_3 + t'$ , где  $t'$  — текущее время торможения.

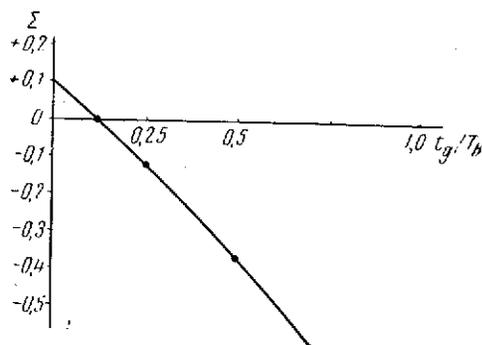


Рис. 9-2. Графическое решение показательного уравнения

Подставляем числовые значения

$$\omega_1 = 4,45 \frac{1}{\text{сек}}; J = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ кгм}^2; t_3 = 0,0018 \text{ сек}; T_B = 0,015 \text{ сек};$$

$$T_0 = 0,0015 \text{ сек}; \frac{T_0}{T_B} = 0,1; M_{\text{макс}} = 50 \text{ н·м}; M_c = 20 \text{ н·м};$$

$$\frac{2}{T_B} \left(1 + \frac{M_c}{M_{\text{макс}}}\right) = 187; \frac{M_c T_B}{2J} = 67.$$

Принимаем

$$\frac{T_0}{T_B} e^{-\frac{2}{T_0}(t_3+t')} \approx 0.$$

Тогда

$$\omega = 4,45 - 67 \left[ 4e^{\frac{-0,0018+t'}{0,015}} - e^{\frac{-2(0,0018+t')}{0,015}} + 187(0,0018 + t') - 3,1 \right].$$

Линейная скорость суппорта

$$v = k \omega, \quad (9-8)$$

$$\text{где } k = \frac{30h}{\pi i} = \frac{30 \cdot 5}{3,14 \cdot 0,25} = 191.$$

Здесь  $h$  — шаг винта;

$i$  — передаточное отношение от вала муфт к суппорту.

Расчет сводим в табл. 9-2. График скорости  $v = f(t)$  построен на рис. 9-3. При построении учтено время срабатывания реле, принятое равным  $t_p = 0,001 \text{ сек}$ .

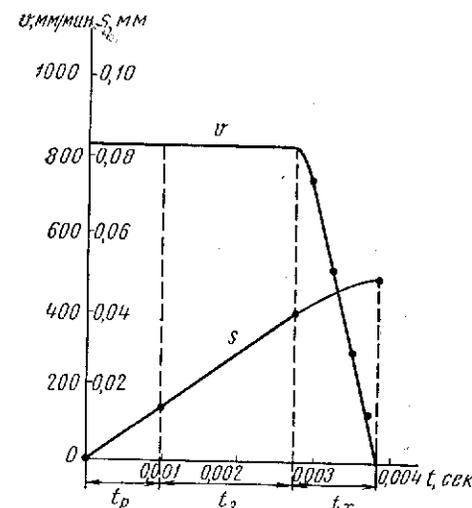


Рис. 9-3. Графики переходного процесса

Таблица 9-2

$t', \text{ сек}$	0	0,0002	0,0005	0,0007	0,0010	0,0012
$\omega, \frac{1}{\text{сек}}$	+4,45	+4,05	+2,57	+1,63	+0,69	-0,31
$v, \text{ мм/мин}$	850	775	490	312	132	—

Определяется путь суппорта:  
путь суппорта за время срабатывания реле

$$s_p = v t_p = \frac{850}{60} \cdot 0,001 = 0,0142 \text{ мм};$$

путь суппорта за время запаздывания

$$s_3 = vt_3 = \frac{850}{60} 0,0018 = 0,0255 \text{ мм.}$$

Путь суппорта за время торможения определен по графику скорости  $v = f(t)$

$$s_T = \int_0^{t_T} v dt = 0,0092 \text{ мм.}$$

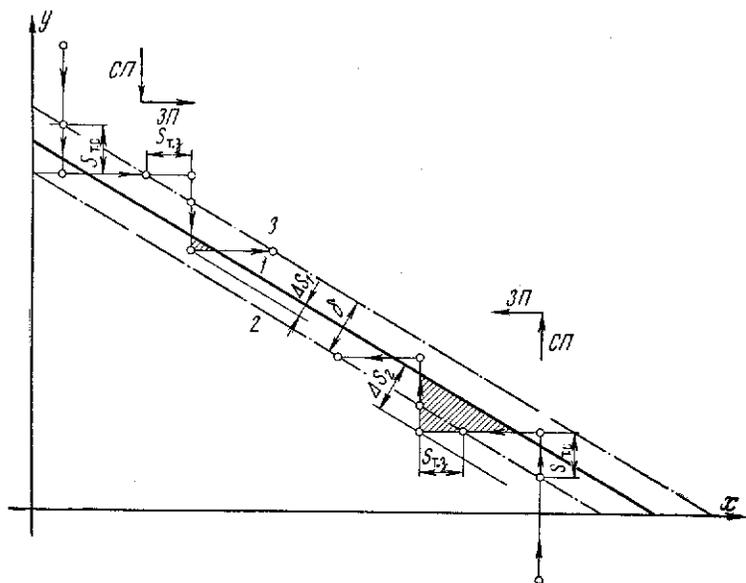


Рис. 9-4. Определение погрешности:

СП, ЗП — направления следящей и задающей подач; 1 — линия копира; 2, 3 — линии замыкания реле в направлении «вперед» и «назад»

Суммарная погрешность копирования

$$\Delta s = s_p + s_3 + s_T = 0,0142 + 0,0255 + 0,0092 = 0,0489 \text{ мм.}$$

Погрешность копирования составляет величину менее 0,05 мм, что обеспечивается копировальным устройством станка 1К62М.

График пути  $s = f(t)$  приведен на рис. 9-3.

2. Определить погрешность при обработке конической поверхности (рис. 9-4). Погрешность представляет собой отклонение пути резца или контура изделия от линии копира. Погрешность обозначена величиной  $\Delta s$ , причем максимальное значение ее при обработке конуса зависит не только от расстояния между контактами, но и от пути торможения, подачи и угла конуса. Эта зависимость погрешности

различна при различных направлениях обработки: при движении вверх по конусу она больше, чем при движении вниз. В расчетах приведены значения погрешности в относительных единицах при различных углах конуса  $\alpha$ . Как видно из рис. 9-4, формула погрешности:

для направления вниз по конусу

$$\Delta s_1' = s_{T.c} \cos \alpha - \frac{\delta}{2}; \quad (9-9)$$

для направления вверх по конусу

$$\Delta s_2 = s_{T.z} \sin \alpha + \frac{\delta}{2}, \quad (9-10)$$

где  $s_{T.c}$  — путь торможения следящей подачи;  
 $s_{T.z}$  — путь торможения задающей подачи;  
 $\alpha$  — угол конуса;  
 $\delta$  — зазор между контактами.

Расчет производится для двух значений угла конуса  $\alpha$  при  $s_{T.c} = s_{T.z} = 1 \text{ мм}$  и  $\delta = 1,2 \text{ мм}$ :

$$\alpha = 30^\circ$$

$$\Delta s_1 = 1 \cos 30^\circ - \frac{1,2}{2} = 0,266 \text{ мм;}$$

$$\Delta s_2 = 1 \sin 30^\circ + \frac{1,2}{2} = 1,1 \text{ мм.}$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$\Delta s_1 = 1 \cos 45^\circ - \frac{1,2}{2} = 0,107 \text{ мм;}$$

$$\Delta s_2 = 1 \sin 45^\circ + \frac{1,2}{2} = 1,307 \text{ мм.}$$

Путь торможения обеих подач взят одинаковым и меньшим величины зазора между контактами, что необходимо для получения аperiodического процесса обработки. При  $s > \delta$  процесс вследствие наличия инерционностей в системе может получиться колебательным.

## § 9-2. Следящий электропривод подачи станка 6441Б

Главной особенностью систем непрерывного управления является то, что управление следящей и задающей подачами осуществляется непрерывно и одновременно для обеих подач в процессе копирования. Важнейшим элементом этих систем является копировально-измерительный прибор бесконтактного исполнения. Общий вид прибора станка 6441Б приведен в [Л. 2, 38], станка 71553А — на рис. 9-5.

Таблица 9-3

В этой главе дается анализ количественных и качественных показателей двух следящих систем копировально-фрезерных станков 6441Б и 71553А с непрерывным электромеханическим управлением.

Расчет переходных процессов следящих систем этих станков произведен: для станка 6441Б — методом операционного исчисления, для станка 71553А — частотным методом.

Расчет многоконтурных следящих систем тяжелых копировально-фрезерных станков дан в [Л. 38, 40]. Для сравнения из [Л. 40] приводится лишь табл. 9-3 по ошибкам копирования тяжелого копировально-фрезерного станка 6441Б, в зависимости от скорости копирования.

Анализ и опыт заводов показывают, что в копировально-фрезерных станках необходимо применять механизмы привода подачи с малым полным зазором (с учетом упругих деформаций) и малыми потерями. Наибольшая величина зазора, приведенная к перемещению пальца копировального прибора, должна быть значительно меньше наибольшей допустимой ошибки копирования.

1. Составить функциональную схему следящей подачи станка 6441Б. Принципиальная электрическая схема следящей подачи станка 6441Б приведена на рис. 9-6. Функциональная схема характеризуется рядом выполняемых ее элементами функций (преобразование сигналов управления, усиление и т. п.).

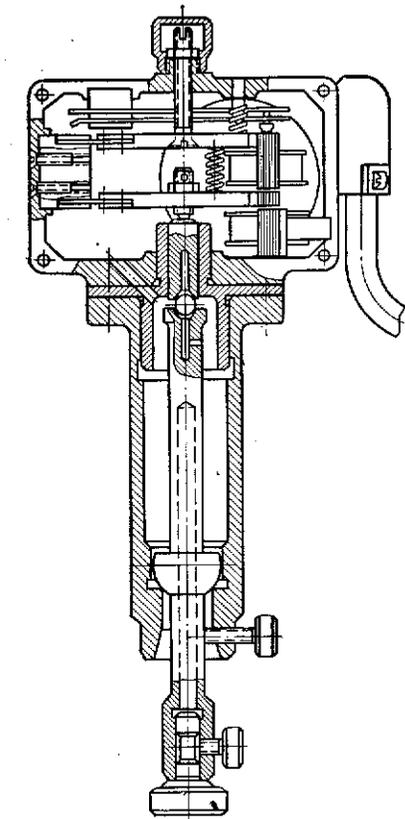


Рис. 9-5. Индуктивный датчик копировального станка

На основании принципиальной схемы и [Л. 39] можно составить функциональную схему следящей системы станка 6441Б.

Индуктивное следящее устройство (датчик или копировальный прибор) на функциональной схеме изображается преобразующим элементом  $KП$ , входной величиной которого является ошибка копирования или рассогласование  $\delta$ , а выходной — напряжение сигнала ошибки  $U_c$ .

Скорость копирования, мм/мин	42	95	160	255	600
Наибольшая ошибка копирования $\delta_{\max}$ , мм . . . . .	$\pm 0,04$	$\pm 0,04$	$\pm 0,04$	$\pm 0,10$	$\pm 0,15$

Элемент ЭС1 сравнивает входной сигнал системы  $s_{вх}$  с выходным  $s_{вых}$ , производя их вычитание. Следующий узел — это входной каскад или фазовый усилитель, который не только выполняет функции усиления сигнала, но и вырабатывает управляющие сигналы, пропорциональные производной и интегралу от ошибки. Входной каскад изображается двумя последовательно включенными элементами: усилительным У1 и корректирующим звеном КЗ.

Выходной каскад лампового электронного усилителя и электромашиный усилитель ЭМУ, как выполняющие одинаковую функцию, целесообразно объединить в один усилительный элемент У2. Этот элемент охватывается отрицательной обратной связью по напряжению ЭМУ, в соответствии с чем выделяется элемент обратной связи ОС и второй элемент сравнения ЭС2.

Последним элементом функциональной схемы является исполнительный двигатель, соединенный с механическим редуктором. Редуктор понижает скорость и преобразует вращательное движение вала двигателя в поступательное перемещение суппорта с фрезой и копировальным прибором. В последнее звено войдет и винтовая передача от редуктора к суппорту. Поступательное перемещение представляет собой выходную величину системы  $s_{вых}$ . Функциональная схема следящей системы станка 6441Б приведена на рис. 9-7.

2. Составить структурную схему следящей подачи станка 6441Б (рис. 9-8, а). Двумя первыми звеньями направленного действия считаются звенья с передаточными функциями  $W_{к.п}(p)$  и  $W_{У1}(p)$ , соответствующие копировальному прибору и первому каскаду фазового усилителя (усиление пропорциональной составляющей). Формирование дополнительных управляющих сигналов, пропорциональных первой производной и интегралу от ошибки, изображается на структурной схеме включением последовательного корректирующего звена с передаточной функцией  $W_k(p)$ .

Следующее звено направленного действия с передаточной функцией  $W_{У2}(p)$  характеризует динамические свойства ЭМУ, с которым объединен выходной каскад лампового усилителя.

Исполнительный двигатель совместно с редуктором и винтовой передачей представляется в виде звена с передаточной функцией  $W_d(p)$ . Входной величиной этого звена является э. д. с. якоря ЭМУ  $E_s(p)$ , а выходной — скорость вращения ходового винта  $v_{вых}(p)$ . В этом случае последним звеном направленного действия в прямой

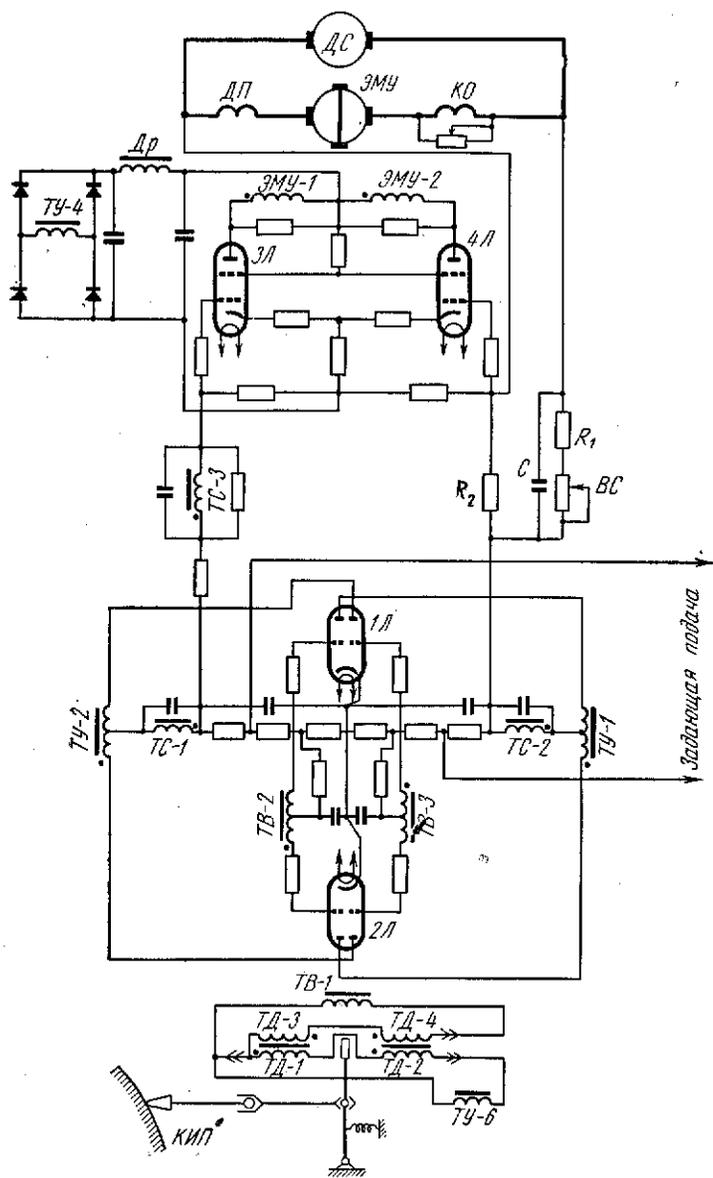


Рис. 9-6. Схема следящей подачи станка 6441Б

цепи системы будет интегрирующее звено, преобразующее скорость  $v_{\text{вых}}$  в перемещение фрезы  $s_{\text{вых}}$ .

Выходной каскад электронного усилителя и ЭМУ охвачены отрицательной обратной связью. Она может быть представлена на структурной схеме звеном направленного действия в цепи обратной связи с передаточной функцией  $W_{o.c1}(p)$ . Входной величиной этого звена является напряжение на зажимах якоря ЭМУ. Но при разделении прямой цепи системы на звенья направленного действия на

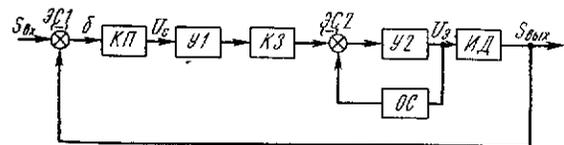


Рис. 9-7. Функциональная схема следящей подачи станка 6441Б

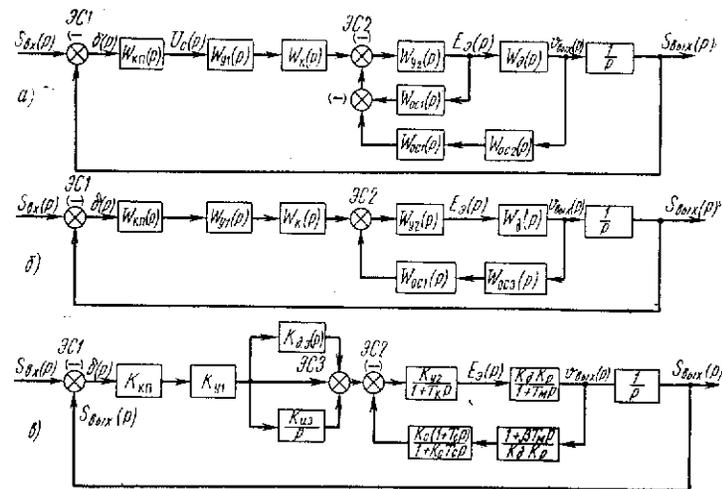


Рис. 9-8. Структурная схема следящей подачи станка 6441Б: а — до преобразования; б — промежуточное преобразование; в — после преобразования

структурной схеме имеется не напряжение, а э. д. с.  $E_3(p)$ , отличающаяся на величину падения напряжения в якоре ЭМУ, пропорционального току двигателя, который, в свою очередь, пропорционален ускорению, т. е. первой производной от  $v_{\text{вых}}$ . Поэтому в структурной схеме можно получить операторное изображение напряжения ЭМУ, если вычесть из э. д. с.  $E_3(p)$  величину, получаемую с выхода звена с передаточной функцией  $W_{o.c2}(p)$ , на вход которого поступает скорость вращения ходового винта следящей подачи  $v_{\text{вых}}(p)$ .

Полученная таким образом структурная схема (см. рис. 9-8, а) неудобна для составления передаточной функции, поэтому она преобразуется с помощью способа переноса связей (см. рис. 9-8, б и в). Перенесем начало обратной связи, поступающей на вход звена с передаточной функцией  $W_{o.c1}(p)$ , на выход звена с передаточной функцией  $W_d(p)$ . Это равносильно тому, что мы введем в цепь этой связи звено с передаточной функцией, равной  $W_d(p)$ . Чтобы результат не изменился, добавим в нее последовательное звено с передаточной функцией  $1/W_d(p)$ . Получим две параллельные связи, заменяя которые их алгебраической суммой

$$W_{o.c3}(p) = \frac{1}{W_d(p)} - W_{o.c2}(p), \quad (9-11)$$

получим структурную схему, удобную для расчета (рис. 9-8, в).

**3. Найти общий вид передаточной функции следящей системы для выходной величины  $s_{вых}$  и ошибки  $\delta$  станка 6441Б.** На рис. 9-8, в заменяют звенья ЭМУ с выходным каскадом электронного усилителя и двигателя, охваченные обратной связью, эквивалентным звеном с передаточной функцией

$$W_1(p) = \frac{W_{y2}(p) W_d(p)}{1 + W_{y2}(p) W_d(p) W_{o.c1}(p) W_{o.c3}(p)}. \quad (9-12)$$

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W(p) = W_{к.п}(p) W_{y1}(p) W_к(p) W_1(p) \frac{1}{p}$$

или

$$W(p) = \frac{W_{к.п}(p) W_{y1}(p) W_к(p) W_{y2}(p) W_d(p)}{1 + W_{y2}(p) W_d(p) W_{o.c1}(p) W_{o.c3}(p)} \cdot \frac{1}{p}. \quad (9-13)$$

Передаточные функции следящей системы:  
для выходной величины

$$\frac{s_{вых}(p)}{s_{вх}(p)} = \frac{W(p)}{1 + W(p)} = \frac{A(p)}{A(p) + B(p)}; \quad (9-14)$$

для ошибки

$$\frac{\delta(p)}{s_{вх}(p)} = \frac{1/W(p)}{1 + \frac{1}{W(p)}} = \frac{B(p)}{A(p) + B(p)}, \quad (9-15)$$

где

$$A(p) = W_{к.п}(p) W_{y1}(p) W_к(p) W_{y2}(p) W_d(p);$$

$$B(p) = p + W_{y2}(p) W_{o.c1}(p) [1 - W_d(p) W_{o.c3}(p)] p.$$

**4. Определить передаточные функции для выходной величины и ошибки следящей системы.** Определяем передаточные функции отдельных звеньев.

Копировальный прибор и первый каскад усилителя считаем безынерционными звеньями с передаточными функциями

$$W_{к.п}(p) = K_{к.п} = 10 \text{ в/мм}; \quad (9-16)$$

$$W_{y1}(p) = K_{y1} = 9,6. \quad (9-17)$$

Передаточная функция корректирующего звена

$$W_к(p) = 1 + K_{д.з} p + \frac{K_{и.з}}{p}, \quad (9-18)$$

где  $K_{д.з} = 0,573 \text{ сек}$  — передаточный коэффициент дифференцирующего звена;

$K_{и.з} = 1,22$  — передаточный коэффициент интегрирующего звена.

Передаточная функция ЭМУ с выходным каскадом лампового усилителя

$$W_{y2}(p) = \frac{K_{y2}}{1 + T_k p}, \quad (9-19)$$

где  $K_{y2} = 100$  — общий коэффициент усиления;

$T_k = 0,032 \text{ сек}$  — постоянная времени поперечной цепи ЭМУ.

Постоянными времени выходного каскада электронного усилителя и обмоток управления ЭМУ, включенных на выход электронного усилителя, пренебрегаем ввиду их малости.

Передаточная функция двигателя с учетом продольной цепи ЭМУ

$$W_d(p) = \frac{K_d K_p}{1 + T_m p}, \quad (9-20)$$

где  $K_d$  — коэффициент передачи двигателя;

$$K_d = \frac{1}{c_e} = \frac{\frac{\pi}{30} n_n}{U_{д.н} - I_{д.н} R_d} = \frac{3,14}{30} \frac{1000}{110 - 4,2 \cdot 1,4} = 1 \frac{\text{рад/сек}}{\text{в}};$$

$K_p = 0,0426 \text{ мм/рад}$  — коэффициент передачи редуктора с ходовым винтом;

$\frac{1}{K_p} = 23,5 \text{ рад/мм}$  — передаточное число редуктора с ходовым винтом.

Передаточная функция интегрирующего звена, преобразующего скорость перемещения фрезы  $v_{вых}(p)$  в перемещение фрезы  $s_{вых}(p)$ ,

$$W_{и}(p) = \frac{1}{p}. \quad (9-21)$$

Передаточная функция звена обратной связи, окружающей выходной каскад электронного усилителя и ЭМУ,

$$W_{o.c1}(p) = \frac{K_c(1 + T_c p)}{1 + K_c T_c p}, \quad (9-22)$$

где  $K_c = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0,081$  — коэффициент передачи звена;

$T_c = R_1 C = 2,47$  сек — постоянная времени звена.

На вход этого контура подается напряжение якоря ЭМУ  $U_3$ , отличающееся от э. д. с.  $E_3$  на величину падения напряжения в якоря ЭМУ

$$U_3 = E_3 - IR_3, \quad (9-23)$$

где  $R_3 = 5,5$  ом — эквивалентное сопротивление цепи якоря ЭМУ;  
 $I$  — ток в цепи якорей ЭМУ и двигателя.

Отрицательная связь по напряжению ЭМУ рассматривается как комбинированная связь — отрицательная по э. д. с. ЭМУ и положительная по току якоря двигателя. Связь по току рассматривается как связь по производной скорости перемещения фрезы  $v_{вых}$ . Для нахождения передаточной функции этой связи запишем уравнение движения при  $M_c = 0$

$$M(p) = c_m I(p) = Jp \Omega_d(p), \quad (9-24)$$

где  $M$  — вращающий момент двигателя;

$c_m$  — коэффициент двигателя по моменту;

$\Omega_d$  — угловая скорость вращения двигателя;

$J$  — момент инерции двигателя с учетом приведенной массы поступательно движущихся звеньев кинематической цепи системы.

Учитывая, что

$$v_{вых}(p) = K_p \Omega_d(p), \quad (9-25)$$

выразим ток двигателя через скорость перемещения фрезы

$$I(p) = \frac{Jp}{c_m K_p} v_{вых}(p)$$

или, умножив числитель и знаменатель коэффициента при  $p v_{вых}(p)$  на  $R_3 c_e$ , получим

$$I(p) = \frac{1}{R_3} \frac{T_m p}{K_d K_p} v_{вых}(p),$$

где  $R_3$  — сопротивление якорной цепи ЭМУ—Д,

$$R_3 = R_s + R_d = 5,5 + 1,4 = 6,9 \text{ ом};$$

$T_m$  — электромеханическая постоянная времени двигателя

$$T_m = \frac{J R_3}{c_e c_m} = 0,113 \text{ сек.}$$

Подставляя значение тока в (9-23), получим

$$U_3(p) = E_3(p) - \frac{R_3}{R_3} \frac{T_m p}{K_d K_p} v_{вых}(p).$$

Отсюда передаточная функция звена обратной связи по производной скорости перемещения фрезы

$$W_{o.c2}(p) = \frac{R_3}{R_3} \frac{T_m p}{K_d K_p}. \quad (9-26)$$

Передаточная функция  $W_{o.c3}(p)$  по (9-11)

$$W_{o.c3}(p) = \frac{1 + T_m p}{K_d K_p} - \frac{R_3}{R_3} \frac{1 + \beta T_m p}{K_d K_p},$$

где

$$\beta = \frac{R_d}{R_3} = \frac{1,4}{6,9} = 0,203.$$

Структурная схема следящей подачи после преобразований и с учетом полученных передаточных функций представлена на рис. 9-8, в.

Передаточная функция  $W_1(p)$  по (9-12)

$$W_1(p) = \frac{K_{y2} K_d K_p (1 + K_c T_c p)}{(1 + T_{kp})(1 + T_m p)(1 + K_c T_c p) + K_{y2} K_c (1 + T_c p)(1 + \beta T_m p)}$$

Передаточная функция разомкнутой системы по (9-13)

$$W(p) = \frac{K_{к.п} K_{y1} \left(1 + K_{д.з} p + \frac{K_{н.з}}{p}\right) K_{y2} K_d K_p (1 + K_c T_c p)}{(1 + T_{kp})(1 + T_m p)(1 + K_c T_c p) + K_{y2} K_c (1 + T_c p)(1 + \beta T_m p)}$$

Раскрывая скобки, получим

$$W(p) = \frac{b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3}{(c_0 p^3 + c_1 p^2 + c_2 p + c_3) p^2} = \frac{A(p)}{B(p)}$$

Передаточные функции следящей системы для выходной величины и ошибки по (9-14) и (9-15)

$$\frac{s_{вых}(p)}{s_{вх}(p)} = \frac{b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3}{a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5};$$

$$\frac{\delta(p)}{s_{вх}(p)} = \frac{c_0 p^3 + c_1 p^2 + c_2 p + c_3}{a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5} p^2.$$

Определяем значения коэффициентов

$$D = K_{к.п} K_{y1} K_{y2} K_d K_p = 10 \cdot 9,6 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 0,0425 = 408 \text{ 1/сек};$$

$$b_0 = D K_{д.з} K_c T_c = 408 \cdot 0,573 \cdot 0,081 \cdot 2,47 = 46,7;$$

$$b_1 = D (K_{д.з} + K_c T_c) = 408 (0,573 + 0,081 \cdot 2,47) = 315;$$

$$b_2 = D(1 + K_{и.з} K_c T_c) = 408(1 + 1,22 \cdot 0,081 \cdot 2,47) = 508;$$

$$b_3 = DK_{и.з} = 408 \cdot 1,22 = 498;$$

$$c_0 = T_K T_M K_c T_c = 0,032 \cdot 0,113 \cdot 0,081 \cdot 2,47 = 0,000724;$$

$$c_1 = T_K T_M + T_K K_c T_c + (1 + K_{y2}) T_M K_c T_c = 0,032 \cdot 0,113 + 0,032 \cdot 0,081 \cdot 2,47 + (1 + 100 \cdot 0,203) 0,113 \cdot 0,081 \cdot 2,47 = 0,49;$$

$$c_2 = T_K + T_M + (1 + K_{y2}) K_c T_c + K_{y2} K_c \beta T_M = 0,032 \times 0,113 + (1 + 100) 0,081 \cdot 2,47 + 100 \cdot 0,081 \cdot 0,203 \cdot 0,113 = 20,5;$$

$$c_3 = 1 + K_{y2} K_c = 1 + 100 \cdot 0,081 = 9,1;$$

$$a_0 = c_0 = 0,000724;$$

$$a_1 = c_1 = 0,49;$$

$$a_2 = b_0 + c_2 = 46,7 + 20,5 = 67,2;$$

$$a_3 = b_1 + c_3 = 315 + 9,1 = 324,1;$$

$$a_4 = b_2 = 508;$$

$$a_5 = b_3 = 498.$$

Подставляя численные значения коэффициентов в выражение передаточной функции для выходной величины и ошибки, получим

$$\frac{s_{\text{вых}}(p)}{s_{\text{вх}}(p)} = \frac{46,7p^5 + 315p^4 + 508p^3 + 498}{0,000724p^5 + 0,49p^4 + 67,2p^3 + 324p^2 + 508p + 498};$$

$$\delta(p) = \frac{0,000724p^5 + 0,49p^4 + 20,5p^3 + 9,1}{0,000724p^5 + 0,49p^4 + 67,2p^3 + 324p^2 + 508p + 498} p^2.$$

### 5. Рассчитать график переходного процесса выходной величины

$s_{\text{вых}} = f(t)$ . Определяются корни характеристического уравнения. Определение производится приближенным методом итераций [Л. 41].

Характеристическое уравнение

$$f(p) = 0,000724p^5 + 0,49p^4 + 67,2p^3 + 324p^2 + 508p + 498 = 0.$$

Приведенное уравнение

$$f_1(p) = p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 = 0 \quad (9-27)$$

или

$$f_1(p) = p^5 + 678p^4 + 92\,800p^3 + 448\,000p^2 + 702\,000p + 688\,000 = 0,$$

$$\text{где } a_1 = 0,678 \cdot 10^3; a_2 = 92,8 \cdot 10^3; a_3 = 448 \cdot 10^3;$$

$$a_4 = 702 \cdot 10^3; a_5 = 688 \cdot 10^3.$$

### Формулы итерационного исчисления

$$\lambda = \frac{a_4}{a_3 - \xi} - \frac{a_5(a_2 - \nu)}{(a_3 - \xi)^2};$$

$$\nu = \lambda(a_1 - \lambda) + \frac{a_5}{a_3 - \xi};$$

$$\xi = \lambda(a_2 - \nu) + \frac{a_5}{(a_3 - \xi)}(a_1 - \lambda).$$

(9-28)

Первое приближение при  $\nu = 0; \xi = 0$

$$\lambda = \frac{702 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 0} - \frac{688 \cdot 10^3(92,8 \cdot 10^3 - 0)}{(448 \cdot 10^3 - 0)^2} = 1,25;$$

$$\nu = 1,25(678 - 1,25) + \frac{688 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 0} = 846,5;$$

$$\xi = 1,25(92\,800 - 846,5) + \frac{688 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 0}(678 - 1,25) = 116,3 \cdot 10^3.$$

Второе приближение

$$\lambda = \frac{702 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 116,3 \cdot 10^3} - \frac{688 \cdot 10^3(92,8 \cdot 10^3 - 846,5)}{(448 \cdot 10^3 - 116,3 \cdot 10^3)^2} = 1,54;$$

$$\nu = 1,54(678 - 1,55) + \frac{688 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 116,3 \cdot 10^3} = 1050;$$

$$\xi = 1,54(92,8 \cdot 10^3 - 1050) + \frac{688 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 116,3 \cdot 10^3}(678 - 1,55) = 143,35 \cdot 10^3.$$

Третье приближение

$$\lambda = \frac{702 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 143 \cdot 10^3} - \frac{688 \cdot 10^3(92,8 \cdot 10^3 - 1050)}{(448 \cdot 10^3 - 143 \cdot 10^3)^2} = 1,62;$$

$$\nu = 1,62 \left( 678 - 1,62 + \frac{688 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 143 \cdot 10^3} \right) = 1098;$$

$$\xi = 1,62(92,8 \cdot 10^3 - 1098) + \frac{688 \cdot 10^3}{(448 \cdot 10^3 - 143 \cdot 10^3)}(678 - 1,62) = 149,7 \cdot 10^3.$$

Четвертое приближение

$$\lambda = \frac{702 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 149,7 \cdot 10^3} - \frac{688 \cdot 10^3(92,8 \cdot 10^3 - 1098)}{(448 \cdot 10^3 - 149,7 \cdot 10^3)^2} = 1,64;$$

$$\nu = 1,64(678 - 1,64) + \frac{688 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 149,7 \cdot 10^3} = 1113;$$

$$\xi = 1,64(92,8 \cdot 10^3 - 1113) + \frac{688 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 149,7 \cdot 10^3}(678 - 1,64) = 151,55 \cdot 10^3.$$

Различие  $\lambda$ ,  $\nu$  и  $\xi$  во втором и в третьем знаках, поэтому процесс итерации заканчиваем и принимаем:  $\lambda = 1,64$ ;  $\nu = 1113$ ;  $\xi = 151,5 \cdot 10^3$ .

Разлагаем  $f(p)$  на множители

$$f(p) = \left( p^2 + \lambda p + \frac{a_5}{a_3 - \xi} \right) [p^3 + (a_1 - \lambda)p^2 + (a_2 - \nu)p + a_3 - \xi] = 0;$$

$$f(p) = \left( p^2 + 1,64p + \frac{688 \cdot 10^3}{448 \cdot 10^3 - 151,5 \cdot 10^3} \right) [p^3 + (678 - 1,64)p^2 + (92,8 \cdot 10^3 - 1113)p + 448 \cdot 10^3 - 151,5 \cdot 10^3] = (p^2 + 1,64p + 2,32)(p^3 + 676,4p^2 + 91,68p + 296,5 \cdot 10^3) = 0.$$

Отсюда получаем два комплексных корня

$$p_{1,2} = -0,82 \pm \sqrt{(-0,82)^2 - 2,32} = -0,82 \pm j 1,285$$

и уравнение третьей степени

$$f_1(p) = p^3 + 676,4p^2 + 91,7 \cdot 10^3 p + 296,5 \cdot 10^3 = 0.$$

Обозначим  $a'_1 = 676,4$ ;  $a'_2 = 91,7 \cdot 10^3$ ;  $a'_3 = 296,5 \cdot 10^3$ . Считая, что младший по модулю корень действительный, будем иметь

$$\lambda = \frac{a'_3}{a'_2 - \nu}; \quad \nu = \lambda (a'_1 - \lambda).$$

Первое приближение

$$\lambda = \frac{296,5 \cdot 10^3}{91,7 \cdot 10^3 - 0} = 3,24;$$

$$\nu = 3,24 (676,4 - 3,24) = 2180.$$

Второе приближение

$$\lambda = \frac{296,5 \cdot 10^3}{91,7 \cdot 10^3 - 2180} = 3,31;$$

$$\nu = 3,31 (676,4 - 3,31) = 2225.$$

Третье приближение

$$\lambda = \frac{296,5 \cdot 10^3}{91,7 \cdot 10^3 - 2225} = 3,32;$$

$$\nu = 3,32 (676,4 - 3,32) = 2230.$$

Процесс итерации заканчиваем и принимаем

$$\lambda = 3,32; \quad \nu = 2230.$$

Разлагаем  $f_1(p)$  на множители

$$f_1(p) = (p + \lambda) [p^2 + (a_1 - \lambda)p + a_2 - \nu] = 0$$

или

$$f_1(p) = (p + 2,32) (p^2 + 673p + 89,45 \cdot 10^3) = 0.$$

Откуда получаем корни  $p_3 = -3,32$ ;  $p_{4,5} = -336,5 \pm \sqrt{(-336,5)^2 - 89,45 \cdot 10^3} = -336,5 \pm 154$ , откуда  $p_4 = -182,5$ ;  $p_5 = -490,5$ .

В результате последовательных приближений определяем корни характеристического уравнения  $p_1 = -0,82 + j 1,285$ ;  $p_2 = -0,82 - j 1,285$ ;  $p_3 = -3,32$ ;  $p_4 = -182,5$ ;  $p_5 = -490,5$ .

Кривую переходного процесса  $s_{\text{вых}} = f(t)$  будем строить исходя из того, что на вход системы подается единичное скачкообразное возмущение, т. е.  $s_{\text{вх}}(t) = 1(t)$  или в операторной форме  $s_{\text{вх}}(p) = 1/p$ .

Как было показано в (9-2-4), передаточная функция замкнутой системы для выходной величины имеет вид

$$\frac{s_{\text{вых}}(p)}{s_{\text{вх}}(p)} = \frac{46,7p^3 - 315p^2 + 508p + 498}{0,000724p^5 + 0,49p^4 + 67,2p^3 + 324p^2 + 508p + 498} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}.$$

Отсюда

$$s_{\text{вых}}(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} s_{\text{вх}}(p) \quad (9-29)$$

или

$$s_{\text{вых}}(p) = \frac{F_1(p)}{pF_2(p)}. \quad (9-29')$$

Применив теорему разложения, получим

$$s_{\text{вых}}(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{F_1(p_i)}{p_i F_2'(p_i)} e^{p_i t}, \quad (9-30)$$

где  $n = 4$ ;

$p_i$  —  $i$ -й корень характеристического уравнения.

Опуская промежуточные выкладки, получим выражение для выходной величины следящей системы

$$s_{\text{вых}}(t) = 1 + 0,486e^{-0,82t} \sin(1,285t + 5,1) - 0,341e^{-3,32t} - 0,295e^{-182,5t} + 0,0632e^{-490t}.$$

Задавая ряд значений  $t$ , получим  $s_{\text{вых}}(t)$ . Результаты расчета сведены в табл. 9-4, по данным которой строится график переходного процесса следящей системы (рис. 9-9).

Таблица 9-4

$t, \text{сек}$	0	0,02	0,04	0,05	0,07	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21
$s_{\text{вых}}(t)$	0	0,29	0,63	0,97	1,22	1,19	1,03	0,87	0,89	0,97

Определяется максимальная статическая ошибка при максимальной скорости подхода к копиру равной  $v_p = 315$  мм/мин.

$$\delta_{ст. макс} = \frac{v_p}{60D} = \frac{315}{60 \cdot 408} = 0,013 \text{ мм}, \quad (9-31)$$

где  $D$  — добротность системы.

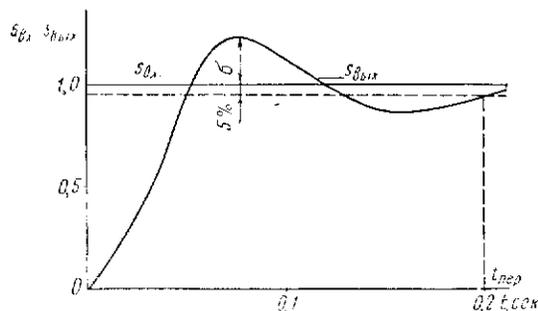


Рис 9-9. График переходного процесса

Полученные качественные показатели следящей системы станка 6441Б сведены в табл. 9-5

Таблица 9-5

$D$ , 1/сек	$\sigma$ , %	$t_{пер}$ , сек	$\mu$	$\delta_{ст. макс.}$ , мм
408	24	0,2	2	0,013

### § 9-3. Следящий электропривод подачи станка 71553А

Принципиальная электрическая схема следящей и задающей подач приведена в [Л. 42]. Для обеих подач схема имеет общие элементы, включая управляемый выпрямитель 6Л, и только, начиная с усилителя мощности 7Л и 8Л, следящая и задающая подачи разделяют свои элементы. Между собой обе подачи идентичны.

Копировальный прибор (см. рис. 9-5) представлен на функциональной схеме следящей подачи преобразовательным элементом КП, входной величиной которого является ошибка слежения  $\delta$ , а выходной — напряжение  $U_c$ .

Следующим звеном в принципиальной схеме является промежуточный двухкаскадный усилитель; на функциональной схеме он

представлен как У1. Так как коэффициент усиления вращающегося трансформатора равен единице, то на функциональной схеме отобразим только его вторую функцию — выработку дополнительного управляющего сигнала, пропорционального интегралу от ошибки; на схеме он представлен как корректирующее звено КЗ1.

Управляемый выпрямитель 6Л помимо усиления сигнала ошибки вырабатывает дополнительный управляющий сигнал, пропорциональный производной от ошибки. Поэтому на функциональной схеме он представлен двумя элементами У2 и КЗ2.

Усилитель мощности 7Л и электромашинный усилитель представлены на схеме соответственно элементами У3 и ЭМУ. Они охвачены обратной отрицательной связью по напряжению ЭМУ—ОН.

Последними элементами на функциональной схеме являются исполнительный двигатель и редуктор с винтовой парой, преобразующей вращательное движение вала двигателя в поступательное движение стола. Двигатель, ЭМУ и усилитель мощности охвачены отрицательной обратной связью по скорости двигателя ОС. Функциональная схема следящей подачи станка 71553А приведена на рис. 9-10.

1. Составить структурную схему следящей подачи. Определяются передаточные функции отдельных звеньев системы.

Копировальный прибор КП

$$W_{к.п}(p) = K_{к.п} = 10 \text{ в/мм}. \quad (9-32)$$

Предварительный усилитель У1

$$W_{у1}(p) = K_{у1} = 15,3 \quad (9-33)$$

Интегрирующее звено КЗ1

$$W_{к1}(p) = \frac{K_{к1}}{1 + T_{к1}p} = \frac{1,3}{1 + 0,048p}. \quad (9-34)$$

Управляемый выпрямитель У2

$$W_{у2}(p) = K_{у2} = 8,7. \quad (9-35)$$

Дифференцирующее звено КЗ2

$$W_{к2}(p) = \frac{K_{к2}}{1 + T_{к2}p} = \frac{0,22}{1 + 0,031p}. \quad (9-36)$$

Усилитель мощности У3

$$W_{у3}(p) = K_{у3} = 15,6. \quad (9-37)$$

Электромашинный усилитель ЭМУ (Л.19)

$$W_{э}(p) = \frac{K_{э}}{1 + \frac{\lambda}{v^2}p} = \frac{3,02}{1 + 0,062p}. \quad (9-38)$$

где

$$K_9 = \frac{m_1 m_q m_n}{1 + \chi m_q + \gamma_1 a m_q^2} = \frac{2,7 \cdot 25 \cdot 0,447}{1 + 0,033 \cdot 25 + 0,05 \cdot 0,26 \cdot 625} = 3,02;$$

$$\nu^2 = \frac{1 + \chi m_q}{T_y T_q} + \frac{\gamma_1 a m_q^2}{T_y T_q} = \frac{1 + 0,33 \cdot 25}{0,07 \cdot 0,089} + \frac{0,05 \cdot 0,26 \cdot 625}{0,07 \cdot 0,089} = 1568;$$

$$\lambda = 2h\nu = \frac{T_y + T_q}{T_y T_q} + \frac{\chi a m_q^2}{T_q} = \frac{0,07 + 0,089}{0,07 \cdot 0,089} + \frac{0,039 \cdot 0,26 \cdot 625}{0,089} = 96,9;$$

$$T_9 = \frac{\lambda}{\nu^2} = \frac{96,9}{1568} = 0,062 \text{ сек.}$$

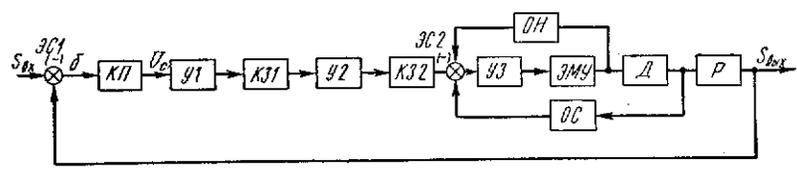


Рис. 9-10. Функциональная схема следящей подачи станка 71553А

Двигатель следящей подачи Д

$$W_d(p) = \frac{\Omega(p)}{U_d(p)} = \frac{K_d}{1 + T_m p} = \frac{3,17}{1 + 0,0382p}, \quad (9-39)$$

где  $K_d$  — коэффициент передачи двигателя, рад/сек.в.  
Редуктор с винтовой парой Р

$$W_p(p) = \frac{K_p}{p} = \frac{0,0267}{p}, \quad (9-40)$$

где  $K_p$  — коэффициент передачи редуктора с винтовой парой, мм/рад/сек

Обратная связь по скорости двигателя. Обратная связь по скорости осуществляется при помощи тахогенератора, в качестве которого используется двигатель постоянного тока типа СЛ-21

$$W_{\text{т.с}}(p) = \gamma = 0,23 \text{ в/рад/сек.} \quad (9-41)$$

Обратная связь по напряжению ЭМУ. Обратная связь осуществляется с помощью контура RC. Сопротивление по схеме  $R = 2200 \text{ ом}$ ; емкость  $C = 25 \text{ мкф}$ ;  $T_0 = RC = 2,2 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = 0,05 \text{ сек}$

$$W_{\text{о.н}}(p) = \frac{T_0 p}{1 + T_0 p} = \frac{0,05 p}{1 + 0,05 p}. \quad (9-42)$$

Имея передаточные коэффициенты звеньев системы и функциональную схему, составляется структурная схема следящей подачи станка 71553А (рис. 9-11).

2. Определить передаточную функцию разомкнутой следящей системы для выходной величины  $S_{\text{вых}}$  станка 71553А. Из рис. 9-11 передаточная функция разомкнутой следящей системы имеет вид

$$W(p) = K_{\text{к.п}} K_{y1} \left(1 + \frac{K_{\text{н}}}{1 + T_{\text{н}} p}\right) K_{y2} \left(1 + \frac{K_{\text{д.з}}}{1 + T_{\text{д.з}} p}\right) \times$$

$$\times \frac{K_{y3} \frac{K_9}{1 + T_9 p} \cdot \frac{K_{\text{л}}}{1 + T_{\text{м}} p}}{1 + K_{y3} \frac{K_9}{1 + T_9 p} \cdot \frac{K_{\text{л}}}{1 + T_{\text{м}} p} \left[ \frac{T_0 p}{1 + T_0 p} \cdot \frac{1}{K_d} (1 + \beta T_m p) + \gamma \right]} \times \frac{K_p}{p}; \quad (9-43)$$

где  $\beta = \frac{R_d}{R_{\text{н}}}$ .

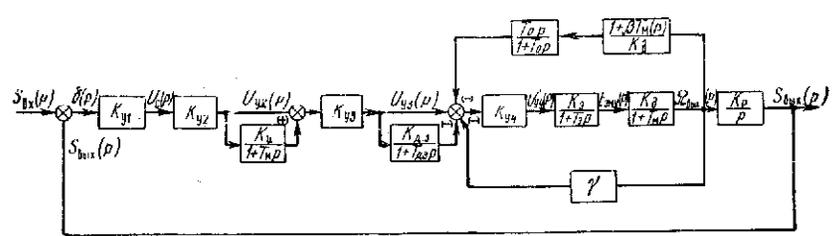


Рис. 9-11. Структурная схема следящей подачи станка 71553А (на месте  $K_{y1}$  должно быть  $K_{\text{к.п}}$ , на месте  $K_{y2}$  —  $K_{y1}$ ,  $K_{y3}$  —  $K_{y2}$ ,  $K_{y4}$  —  $K_{y3}$ )

Преобразовываем передаточную функцию разомкнутой системы в виде дроби

$$W(p) = \frac{s_{\text{вых}}(p)}{s_{\text{вх}}(p)} = \frac{A(p)}{B(p)},$$

где

$$A(p) = b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3;$$

$$B(p) = c_0 p^6 + c_1 p^5 + c_2 p^4 + c_3 p^3 + c_4 p^2 + c_5 p.$$

После преобразований и подстановки числовых величин получаем значения коэффициентов  $b_0 = 37,765$ ;  $b_1 = 2451$ ;  $b_2 = 46\,394$ ;  $b_3 = 144\,200$ ;  $c_0 = 0,0002$ ;  $c_1 = 0,309$ ;  $c_2 = 1,70$ ;  $c_3 = 41,22$ ;  $c_4 = 418$ ;  $c_5 = 113$ .

Передаточная функция разомкнутой системы после подстановки числовых значений имеет вид

$$W(p) = \frac{37,765 p^3 + 2451 p^2 + 46\,394 p + 144\,200}{20 \cdot 10^{-5} p^6 + 0,0309 p^5 + 1,7 p^4 + 41,22 p^3 + 418 p^2 + 113 p}$$

Таблица 9-6

$\omega$	$U(\omega)$	$V(\omega)$	$\omega$	$U(\omega)$	$V(\omega)$
0	-487	$\infty$	10	-9,1	-7,5
2	-102	50,8	20	-1,8	-3,25
5	-21,35	-13,27	50	-0,75	-0,5
			100	-0,26	-0,44

Исследование системы на устойчивость и построение переходного процесса производится частотным методом, так как характеристическое уравнение системы шестой степени и определение корней операторным методом невозможно.

**3. Построить амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой следящей системы станка 71553А и определить устойчивость.**

Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы

$$W(j\omega) = \frac{b_0 j^3 \omega^3 + b_1 j^2 \omega^2 + b_2 j \omega + b_3}{c_0 j^6 \omega^6 + c_1 j^5 \omega^5 + c_2 j^4 \omega^4 + c_3 j^3 \omega^3 + c_4 j^2 \omega^2 + c_5 j \omega} =$$

$$= \frac{-j\omega^3 b_0 - \omega^2 b_1 + j\omega b_2 + b_3}{-\omega^6 c_0 + j\omega^5 c_1 + \omega^4 c_2 - j\omega^3 c_3 - \omega^2 c_4 + j\omega c_5} = U\omega + jV(\omega). \quad (9-44)$$

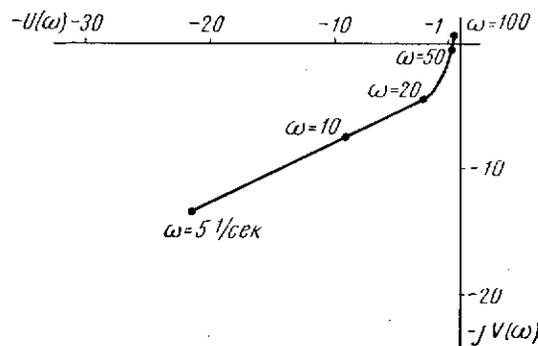


Рис. 9-12. Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы

Чтобы разделить вещественную и мнимую части, умножим числитель и знаменатель на сопряженный знаменатель, т. е. на

$$-\omega^6 c_0 + \omega^3 c_2 - \omega c_4 - j(\omega^4 c_1 - \omega^2 c_3 + c_5).$$

Разделяя вещественную и мнимую части  $W(j\omega)$  и подставляя в них численные значения параметров, получаем

$$U(\omega) = \frac{-0,68\omega^6 + 3001\omega^4 - 1,57 \cdot 10^6 \omega^2 - 55 \cdot 10^6}{0,04 \cdot 10^{-6} \omega^{10} - 0,28 \cdot 10^{-3} \omega^8 + 0,502 \omega^6 + 285 \omega^4 + 165,7 \cdot 10^3 \omega^2 + 113};$$

$$V(\omega) = \frac{7,5 \cdot 10^{-3} \omega^8 + 2,37 \omega^6 - 25,2 \cdot 10^3 \omega^4 - 13 \cdot 10^6 \omega^2 - 16,3 \cdot 10^6}{\omega (0,04 \cdot 10^{-6} \omega^{10} - 0,28 \cdot 10^{-3} \omega^8 + 0,502 \omega^6 + 285 \omega^4 + 165,7 \cdot 10^3 \omega^2 + 113)}$$

Задавая рядом значений  $\omega$ , вычисляется вещественная  $U(\omega)$  и мнимая  $V(\omega)$  части амплитудно-фазовой характеристики. Результаты вычислений сведены в табл. 9-6.

По табличным данным построена амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы (рис. 9-12).

Из построенной амплитудно-фазовой характеристики видно, что разомкнутая система устойчива, так как не охватывает точку с координатами  $(-1; j 0)$ .

Для определения запаса устойчивости по фазе проводится окружность радиусом, равным единице, с центром в начале координат. Отрезком прямой начало координат соединяется с точкой пересечения амплитудно-фазовой характеристики с окружностью единично-

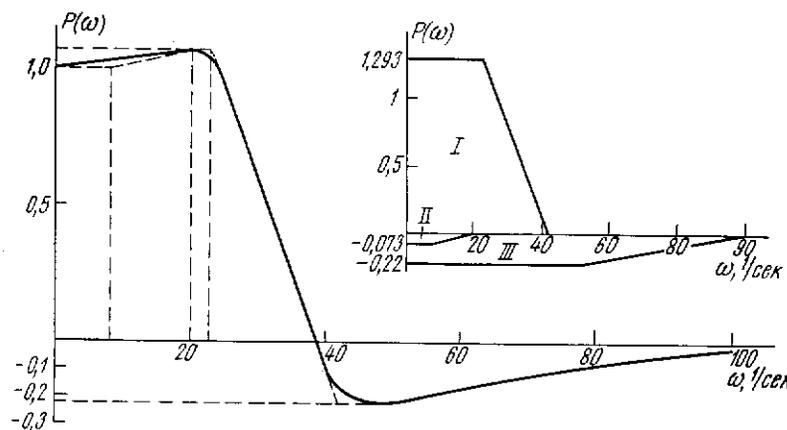


Рис. 9-13. Вещественная частотная характеристика замкнутой системы

го радиуса. Угол  $\Delta\varphi$ , образованный отрезком прямой с отрицательной вещественной осью, определяет запас устойчивости по фазе. Он равен  $\Delta\varphi = 40^\circ$ .

Запас устойчивости по модулю определяется как выраженное в процентах отношение отрезка вещественной оси, заключенного между точкой  $(-1, j 0)$  и точкой пересечения амплитудно-фазовой характеристики с вещественной осью, к отрезку, равному единице,  $\Delta M = 44\%$ .

**4. Построить вещественную частотную характеристику и рассчитать переходный процесс следящей системы.** Вещественная частотная характеристика замкнутой системы строится по амплитудно-

фазовой характеристике разомкнутой системы методом, изложенным в [Л. 43]. Полученные графо-аналитические результаты сведены в табл. 9-7 и по табличным данным строится вещественная частотная характеристика замкнутой системы на рис. 9-13.

Таблица 9-7

$\omega$ , рад/сек	0	2	5	10	20	50	100
$P(\omega)$	1,0	1,005	1,01	1,028	1,0735	-0,22	-0,01

Построенную вещественную частотную характеристику аппроксимируем тремя трапециями, параметры которых приведены в табл. 9-8.

Таблица 9-8

Номер трапеции	$P_0$	$\omega_d$ , рад/сек	$\omega_0$ , рад/сек	$\alpha = \frac{\omega_d}{\omega_0}$
I	1,293	23	42	0,548
II	0,073	8	20	0,4
III	-0,22	50	90	0,556

По таблицам  $h$ -функций рассчитываем отдельные составляющие переходного процесса, соответствующие трем трапециям в табл. 9-9, и, суммируя их, строим кривую переходного процесса

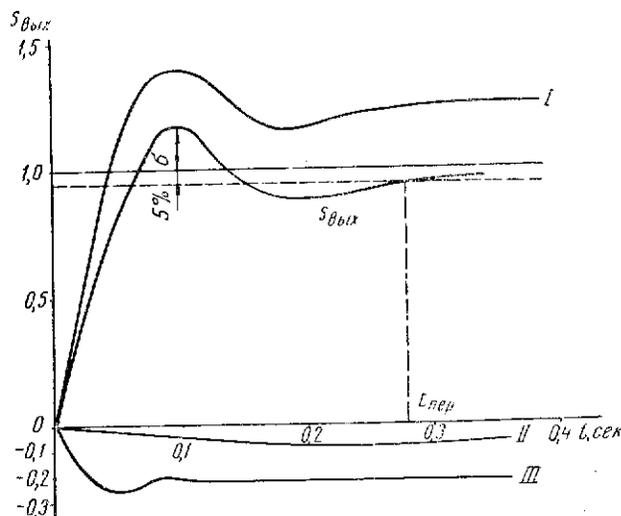


Рис. 9-14. График переходного процесса

$s_{\text{вых}}(t)$  при единичном управляющем воздействии на входе (рис. 9-14).

При этом используются соотношения:

$$s_{\text{вых}}(t) = P_0 h(\tau); \quad (9-45)$$

$$t = \frac{\tau}{\omega_0}. \quad (9-46)$$

Таблица 9-9

Номер трапеции	Параметры	$\tau$							
		0,5	2	4	6,5	8	10	12	16
I	$h(\tau)$	0,248	0,856	1,151	1,001	0,952	0,984	1,007	1,008
	$t$ , сек	0,019	0,148	0,095	0,155	0,19	0,238	0,286	0,38
	$s_{\text{вых}}(t)$	0,315	1,05	1,41	1,23	1,17	1,21	1,231	1,23
II	$h(\tau)$	0,223	0,785	1,12	1,043	0,992	0,994	0,988	0,985
	$t$ , сек	0,025	0,10	0,225	0,325	0,45	0,50	0,6	0,7
	$s_{\text{вых}}(t)$	-0,0163	-0,0573	-0,082	-0,0762	-0,0724	-0,0726	-0,0722	-0,0720
III	$h(\tau)$	0,248	0,856	1,151	1,001	0,952	0,984	1,007	1,008
	$t$ , сек	0,035	0,122	0,144	0,072	0,089	0,11	0,133	0,178
	$s_{\text{вых}}(t)$	-0,0546	-0,188	-0,254	-0,22	-0,21	-0,215	-0,22	-0,22

### 5. Определить ошибку копирования.

Добротность системы

$$D = \frac{K}{a} = \frac{15150}{113} = 134 \frac{1}{\text{сек}}, \quad (9-47)$$

где  $K$  — коэффициент усиления разомкнутой системы без учета обратных связей;

$$K = K_{к.п} K_{y1} K_{п} K_{y2} K_{д.з} K_{y3} K_{з} K_{д} K_{р} = 10 \cdot 15,3 \cdot 1,3 \cdot 8,7 \cdot 0,22 \cdot 15,6 \cdot 3,02 \cdot 3,17 \cdot 0,0267 = 15150;$$

$a = 113$  — коэффициент характеристического уравнения при  $p$ .  
Определяется максимальная статическая ошибка копирования при максимальной скорости подхода к копиру  $v_{\text{макс}} = 780$  мм/мин

$$\delta_{\text{макс}} = \frac{v_{\text{макс}}}{60D} = \frac{780}{60 \cdot 134} = 0,097 \text{ мм.}$$

Все полученные качественные показатели следящей подачи станка 7153А сведены в табл. 9-10.

Таблица 9-10

$D, 1/сек$	$\sigma, \%$	$t_{пер}, сек$	$n$	$\delta_{ст. макс}, мм$	$\Delta\varphi, град$	$\Delta M, \%$
134	18	0,28	2	0,097	40	44

На рис. 9-15 приведен график зависимости статической ошибки копирования от скорости следящей подачи для рассмотренных станков.

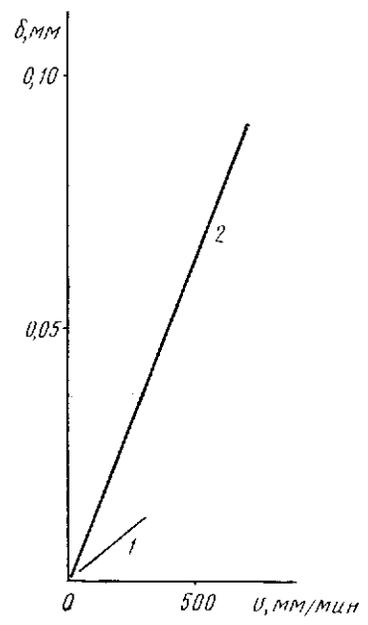


Рис. 9-15. Зависимость статической ошибки от скорости:  
1 — для станка 6441 Б; 2 — для станка 71553А

ГЛАВА 10.

**РАСЧЕТ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ**

**§ 10-1. Комплексная автоматизация металлорежущих станков**

Копировальные станки, рассмотренные в гл. 9, уже являлись в какой-то мере программными станками наряду с другими станками, обладающими аналоговыми устройствами других типов (переключатели, переставные упоры, профильные кулачки и т. п.). Однако в полном смысле программное управление осуществляется средствами современной электронной и вычислительной техники с запоминанием программы работы не на аналоговых устройствах, а на носителях цифровой информации (перфокарты, бумажные, магнитные ленты и т. п.). Системы программного управления, получившие реальное осуществление в серийных выпусках станков, построены как системы цифрового управления ЦПУ. В условиях индивидуального или мелкосерийного производства, характерного для тяжелого машиностроения, станки с ЦПУ имеют, как известно, ряд весьма существенных преимуществ: повышение производительности станков и точности обработки [Л. 1,2].

Самым важным вопросом в развитии станков с цифровым программным управлением является вопрос их экономической эффективности. По опыту зарубежных фирм особо эффективным по сравнению с другими методами обработки, например с копированием, становится применение станков с ЦПУ при уменьшении числа обрабатываемых деталей в партии (табл. 10-1).

Таблица 10-1

Число обрабатываемых деталей в партии . . . . .	300	200	150	100	50
Относительная стоимость обработки с ЦПУ и копиром . . . . .	1	0,9	0,8	0,75	0,66

Дальнейшим шагом в развитии кибернетических систем являются системы оптимального управления. Они отличаются от систем программного цифрового управления тем, что автоматически совершают поиск наилучшего, с точки зрения производительности, наибо-

лее эффективного условия работы станка. Их можно называть самонастраивающимися системами. Разработки подобных систем начаты в нашей стране и за рубежом с конца 50-х годов. Достаточного и систематизированного опыта по ним пока не накоплено. В настоящей главе дается расчет системы оптимального управления карусельного станка, которая осуществляет поиск экстремума производительности [Л. 49]. Производительность металлорежущего станка  $Q$  рассматривается как сложная функция скорости резания  $v$ , величины подачи  $s$ , стойкости резца  $T$  и припуска изделия на обработку  $\Delta$ . Специальное электронное устройство осуществляет непрерывный поиск экстремума (максимума) производительности, подавая в систему соответствующие команды. Таким образом, последняя работает в состоянии непрерывного переходного процесса, поддерживая производительность станка поблизости от максимальной величины.

### § 10-2. Система программного управления вертикально-фрезерным станком 6Н12П с силовыми шаговыми двигателями

Система программного управления осуществляется как модернизация серийного фрезерного станка 6Н12, предназначенного для обработки плоских кулачков сложного профиля.

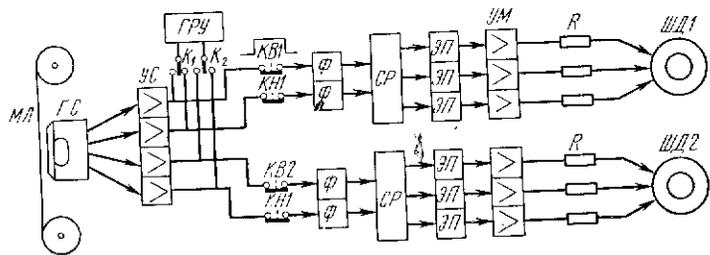


Рис. 10-1. Структурная схема системы программного управления станка 6Н12П:

МЛ — магнитная лента; ГС — головка считывания; УС — усилитель; ГРУ — генератор ручного управления; Ф — формирователь сигнала; СР — схема распределения импульсов; ЭП — эмиттерный повторитель; УМ — усилитель мощности; ШД — шаговый двигатель

Движения подачи стола и салазок в горизонтальных направлениях по осям  $x$  и  $y$  выполняются от двух- и трехфазных силовых шаговых двигателей посредством шариковых винтов с шагом 6 мм. Шаг двигателя подачи — 2,5 геометрических градуса при работе от шеститактного блока управления с 144 импульс/об. Таким образом шаг стола

на один импульс  $\alpha = 6/144 = 0,0415$  мм/импульс. Максимальный синхронизирующий момент шагового двигателя составляет 10 н.м. Структурная схема управления шаговыми двигателями подачи приведена на рис. 10-1. Часть СПУ, находящаяся у станка, включает в себя устройство воспроизведения программы, схемы управления шаговыми двигателями и генератор для установочных перемещений стола и салазок (ручное управление).

1. Рассчитать программу системы программного управления станка 6Н12П для изготовления кулачка (рис. 10-2). Материал кулачка углеродистая сталь с  $\sigma_b = 750$  н/мм<sup>2</sup>. Инструментом служит концевая фреза из стали ЭИ-262 с  $z=6$  и  $d_f = 40$  мм. Глубина фрезерования  $t = 5$  мм. Из расчетов режимов резания минутная подача составляет 205 мм/мин. Фреза к заготовке подводится из-за пределов детали из точки  $O$  и после обработки возвращается в исходное положение. Прежде чем приступить к изготовлению детали на станке с системой программного управления, необходимо подготовить программу для введения ее в считывающее (воспроизводящее) устройство станка.

При обработке контура на станке программируется не сам контур, а перемещение центра фрезы, называемое эквидистантой обрабатываемого контура.

Совмещаем центр фрезы с выбранным началом координат в точке  $O$ .

Проводим эквидистанту на расстоянии  $d_f/2$  от контура кулачка (рис. 10-2, обозначена пунктиром). Определяем координаты базовых точек  $A, B, C, D$ . Определяем интервал аппроксимации дуги окружности хордами от допуска на обработку  $\delta = (0,2-0,5)$

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{R - \delta}{R} = 1 - \frac{\delta}{R}. \quad (10-1)$$

Определяем координаты опорных точек  $B', B'', \dots$

$$x_{(k)} = R - R \cos (k-1)\alpha; \quad (10-2)$$

$$y_{(k)} = a_0 + a_y + R \sin (k-1)\alpha, \quad (10-3)$$

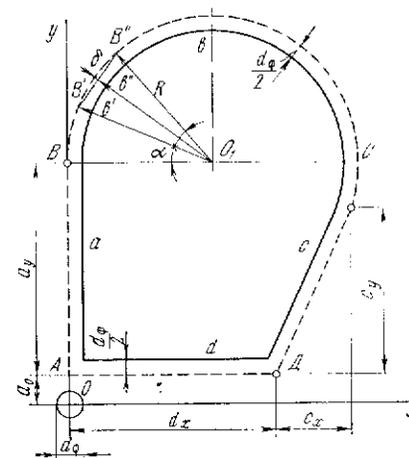


Рис. 10-2. Эскиз кулачка для примера расчета программы

где  $\alpha$  — элементарный шаг;  
 $k$  — номер кадра.

Рассчитываем число элементарных шагов (импульсов ШД) и направление движения фрезы по контуру детали для продольной и поперечной подач

$$N_{x(k)} = \frac{\Delta x_{(k)}}{\alpha}; \quad (10-4)$$

$$N_{y(k)} = \frac{\Delta y_{(k)}}{\alpha}, \quad (10-5)$$

где  $\Delta x_{(k)} = x_{(k)} - x_{(k-1)}$  — приращение в направлении продольной подачи;

$\Delta y_{(k)} = y_{(k)} - y_{(k-1)}$  — приращение в направлении поперечной подачи.

Линейное перемещение стола, соответствующее одному импульсу, составляет 41,5 мкм, тогда элементарный шаг  $\alpha = 0,0415$  мм/импульс.

Данные расчета сводим в табл. 10-2, в которой приведены расчеты четырех первых кадров. Дальнейшие расчеты аналогичны.

Таблица 10-2

Номер кадра	Обрабатываемый элемент контура	Траектория движения фрезы	Координаты точек			Приращения $\Delta$ , мм		Число импульсов ШД	
			точка	по оси x	по оси y	по оси x	по оси y	по оси x	по оси y
1	быстрый подвод детали к фрезе	OA	O	O	O	0	$a_0$	0	$\frac{a_0}{\alpha}$
2	a	AB	B	O	$a_y$	0	$a_y$	0	$\frac{a_y}{\alpha}$
3	b'	BB'	B'	$x_{(3)}$	$y_{(3)}$	$\Delta x_{(3)}$	$\Delta y_{(3)}$	$N_{x(3)}$	$N_{y(3)}$
4	b''	B'B''	B''	$x_{(4)}$	$y_{(4)}$	$\Delta x_{(4)}$	$\Delta y_{(4)}$	$N_{x(4)}$	$N_{y(4)}$

По данным табл. 10-2 программа пробивается на пятидорожечной телеграфной перфоленте при помощи аппарата СТ-35. Каждое отверстие ленты соответствует элементарному шагу. На дорожках перфоленты по направлению сверху вниз записана информация о движениях:

1 дорожка	+ $\Delta x$
2 »	- $\Delta x$
3 »	+ $\Delta y$
4 »	- $\Delta y$
5 »	свободна

Перфолента применяется обычно в качестве промежуточного программносителя, потому что плотность записи и срок службы ее невелики. При диаметре отверстия 1,8 мм минимальный шаг на ней составляет 2,55 мм. Рабочим программносителем служит магнитная лента, плотность записи на которой может быть до 40 импульсов/мм. Перезапись программы делается на специальном устройстве, изготовленном для станка. Перезапись на магнитную ленту осуществляется со скоростью 2 м/сек, рабочая скорость ленты 200 мм/сек.

Следует учитывать ограничения, накладываемые на величину подачи технологическими требованиями и СПУ. При фиксированной скорости протяжки ленты 1100 мм/сек и минимальном расстоянии между отверстиями 2,55 мм максимальная частота команд

$$f_{\max} = \frac{1100}{2,55} \approx 430 \text{ гц.}$$

В то же время максимальная допустимая частота управляющих импульсов в СПУ: при нагрузке равна 200 гц, на холостом ходу — 280 гц. Частота импульсов по условиям технологии для получения подачи 205 мм/мин составляет

$$f_{\text{техн}} = \frac{s_{\min}}{a60} = \frac{205}{0,0415 \cdot 60} = 82 \text{ гц.}$$

Технологическая частота  $f_{\text{техн}}$  является ограничивающей для данных конкретных условий записи на магнитную ленту. Действительно, если пробивку отверстий производить с шагом в пять раз больше минимального, т. е.  $2,55 \cdot 5 = 12,75$  мм для больших приращений  $\Delta x$  и  $\Delta y$  в каждом кадре, то наибольшая допустимая частота управляющих импульсов

$$f_{\text{доп}} = \frac{f_{\max}}{5} = 86 \text{ гц,}$$

что соответствует максимальной подаче

$$s_{\max} = f_{\text{доп}} \cdot 60 = 86 \cdot 0,0415 \cdot 60 = 215 \text{ мм/мин}$$

вместо  $s_{\min} = 205$  мм/мин.

Увеличение подачи в  $s_{\max} / s_{\min} = \frac{215}{205} = 1,05$  раза, т. е. на 5% считается допустимым. Интервалы между отверстиями для меньших приращений  $\Delta x$  и  $\Delta y$  определяются по их соотношениям из расчетной

таблицы. Рассчитанная по табл. 10-2 и пробитая на перфоленте программа может перезаписываться на магнитную ленту.

2. Рассчитать электропривод с шаговым двигателем. Шаговый двигатель нельзя исследовать в отрыве от системы привода, так как основной режим его работы неустановившийся. Шаговый электродвигатель ШД представляет собой разновидность синхронной машины, обмотки которой возбуждаются  $m$ -фазной системой прямоугольных импульсов напряжения. Любая синхронная машина при импульсном возбуждении обмоток может работать как ШД. Особенности использования ШД для СПУ привели к разработке специальных конструкций с малым моментом инерции ротора и большим числом шагов на оборот, т. е. к конструкции, удобной осуществляющей строго дозированное перемещение исполнительного органа в системе дискретного привода.

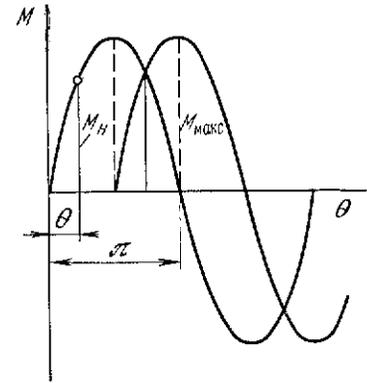


Рис. 10-3. Статическая характеристика ШД в электрических градусах

$$\alpha_m = \frac{360^\circ}{z_p m}, \quad (10-6)$$

$$\alpha = \frac{360^\circ}{m}, \quad (10-7)$$

где  $m$  — число фаз или тактов работы блока управления;  
 $z_p$  — число пар полюсов или зубцов реактивного ротора.  
 Скорость вращения ШД пропорциональна шагу и частоте управляющих импульсов

$$n = \frac{f \alpha_m}{6} \text{ об/мин.} \quad (10-8)$$

Силовые ШД с реактивным ротором работоспособны при частоте  $\omega = 400$  гц и моментах  $M = 1-50$  н.м. Минимальное число оборотов реверсивного ШД равно трем.

Как показали работы МЭИ оптимальной машиной является четырехфазный индукторный ШД с самоподмагничиванием [Л. 45, 46]. Статический режим работы ШД (фиксация под током) имеет место при установившемся значении тока в двух смежных фазах. Ротор неподвижен. График момента приведен на рис. 10-3, из которого можно написать выражение для статической ошибки  $M_{\max} \sin \Theta = M_n$ , откуда

$$\Theta = \arcsin \frac{M_n}{M_{\max}}, \quad (10-9)$$

где  $M_{\max}$  — максимальный статический синхронизирующий момент;  
 $M_n$  — момент нагрузки;  
 $\Theta$  — угол в электрических градусах.

Величина  $M_{\max}$  для четырехфазного индукторного ШД при одновременном возбуждении двух фаз определяется по формуле

$$M_{\max} = 2z_p I_1^2, \text{ н.м.} \quad (10-10)$$

где  $I_1$  — амплитуда первой гармоники коэффициента самоиндукции, являющегося периодической функцией положения ротора, гн;

$I = \frac{U}{R}$  — установившееся значение тока в фазе, а.

Из выражения  $M_{\max}$  для поверочного расчета ШД определяется величина  $I_1$ . Из экспериментальных данных [Л. 46, рис. 4] постоянная составляющая коэффициента самоиндукции  $l_0 \approx 2,5 I_1$ .

Средняя постоянная времени двигателя

$$T = \frac{3l_0}{R}, \quad (10-11)$$

где  $R = \frac{U}{I}$  — сопротивление фазы.

В табл. 10-3 приведены паспортные и расчетные данные силовых четырехфазных ШД с подмагничиванием.

Таблица 10-3

Тип	Параметры											
	$z_p$	$\alpha_m, \text{ град}$	$U_n, \text{ в}$	$I_n, \text{ а}$	$M_{\max}, \text{ н.м}$	$J, \text{ кг.м}^2$	$I_{пр}, \text{ гц}$	$R_{ф}, \text{ ом}$	$l_1, \text{ гн}$	$l_0, \text{ гн}$	$T, \text{ сек}$	$B_{вс}, \text{ н}$
ШД-4-0,2	34	2,65	110	4	3,5	$0,2 \cdot 10^{-3}$	450	28	$3 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	80
ШД-4-0,5	34	2,65	220	4	9,0	$1,6 \cdot 10^{-3}$	430	56	$8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	157
ШД-4-1,5	34	2,65	110	8	25,0	$3,5 \cdot 10^{-3}$	350	14	$6 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	390
ШД-4-2,5	18	5	220	16	60,0	$12 \cdot 10^{-2}$	200	14	$7 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	1180

Привод с  $m$ -фазным ШД описывается системой  $(m + 1)$  уравнений [Л. 46]:

$m$ -уравнений электрического равновесия в обмотках

$$U_k(t) = I_k(t)R + \frac{d}{dt} \Psi_k(\Theta, t); \quad (10-12)$$

уравнение движения ротора

$$M(\Theta, I_1, I_2, \dots, I_k) = \frac{J}{z_p} \cdot \frac{d^2\Theta}{dt^2} + M_n, \quad (10-13)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots, m$ ;

$U_k, I_k, \Psi_k$  — мгновенные значения напряжения, тока и потокосцепления  $k$ -й фазы;

$M$  — мгновенное значение синхронизирующего момента на валу ШД;

$R$  — активное сопротивление цепи фазы;

$J$  — суммарный момент инерции системы, приведенный к валу ШД;

$z_p$  — число зубцов ротора;

$\Theta$  — угол поворота ротора в электрических градусах;

$M_n$  — момент нагрузки.

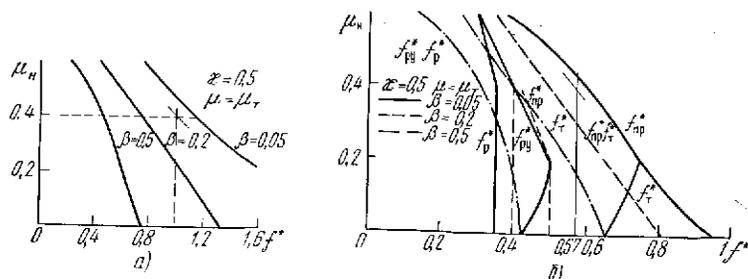


Рис. 10-4. Характеристики шагового привода: а — нагрузочная; б — динамическая

Развернутые уравнения шагового привода при известных величинах коэффициентов индуктивности и параметров нагрузки являются существенно нелинейными и возможно лишь их приближенное численное интегрирование. Как показал опыт, эффективным методом является использование аналоговых вычислительных машин. При этом целесообразно нормализовать уравнения, введя базовые величины напряжения, тока, момента и времени [Л. 46, 47]. В частном случае такой метод применительно к четырехфазному индукторному ШД дает возможность получить механические и динамические характеристики, по которым можно осуществить проверку выбранного двигателя. Такие характеристики приведены на рис. 10-4, а, б для случаев нагрузки моментом типа «сухого» трения. На рисунке приняты следующие обозначения:

$\mu_n = \frac{M_n}{M_{\max}}$  — относительный момент нагрузки;

$f^* = \frac{f}{\omega_0}$  — относительная частота,  $\omega_0$  — собственная частота ротора;

$\chi$  — безразмерная постоянная времени;

$\beta$  — общий эквивалентный коэффициент демпфирования.

Пусть заданы условия механизма, по которым надо выбрать двигатель и затем проверить его динамические свойства. Момент нагрузки типа «сухого» трения  $M_n = 10 \text{ н}\cdot\text{м}$ .

Кинематическая схема исполнительного механизма приведена на рис. 10-5. Шаговый двигатель через редуктор приводит в движение суппорт станка С. Момент инерции механизма, приведенный к

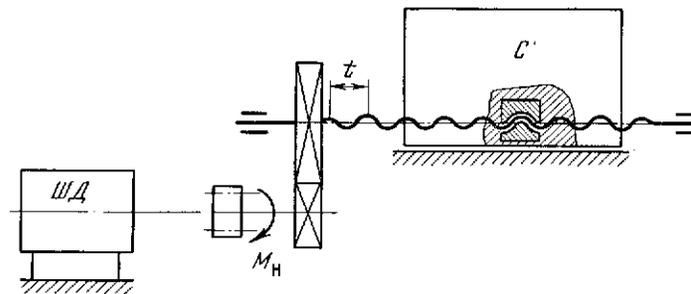


Рис. 10-5. Кинематическая схема привода подачи

валу двигателя,  $J_n = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Скорость перемещения суппорта  $v = 600 \text{ мм/мин}$ . Передаточное отношение шестерен  $i = 1,5$ . Шаг ходового винта  $t = 6 \text{ мм}$ . Скорость вращения двигателя заданная

$$n_3 = v \frac{i}{t} = 600 \frac{1,5}{6} = 150 \text{ об/мин.}$$

Относительный коэффициент вязкого трения  $\beta_m = 0,07$ .

Выбираем двигатель типа ШД-4-1,5;  $U_n = 110 \text{ в}$ ;  $I_n = 8 \text{ а}$ ;  $z_p = 34$ ;  $M_{\max} = 25 \text{ н}\cdot\text{м}$ ;  $J_p = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

Проверяем выбранный двигатель для заданных условий нагрузки и переходных процессов.

Собственная частота при малых отклонениях ШД от положения равновесия

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{M_{\max} z_p}{J_p + J_n}} = \sqrt{\frac{25 \cdot 34}{3,5 \cdot 10^{-3} + 0,7 \cdot 10^{-3}}} = 450 \text{ гц.}$$

Безразмерный параметр

$$\chi = \omega_0 \frac{3L_0}{R_{\phi} + R_{\text{доб}}} = 450 \frac{3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}}{14 + 28} = 0,48,$$

где

$$R_{\text{доб}} = 28 \text{ ом.}$$

Внутреннее демпфирование ШД

$$\beta_d = 0,5 \omega_0 \frac{I_1}{R_{\phi} + R_{доб}} = 0,5 \cdot 450 \frac{6 \cdot 10^{-3}}{42} \approx 0,03.$$

Общий коэффициент демпфирования

$$\beta = \beta_m + \beta_d = 0,07 + 0,03 = 0,10.$$

Относительный момент сопротивления нагрузке

$$\mu = \frac{M_{II}}{M_{макс}} = \frac{10}{25} = 0,4.$$

Свойства ШД при  $\mu = \mu_r = 0,4$ :

а) предельная частота установившегося вращения по кривой  $\beta = 0,1$  на рис. 10-4, а,  $f_{уст.вр}^* = 1,0$

$$f_{уст.вр} = \omega_0 f_{уст.вр}^* = 450 \cdot 1,0 = 450 \text{ гц};$$

б) допустимая скорость вращения при  $f_{уст.вр} = 450 \text{ гц}$

$$n_{доп} = 15 \frac{\omega_0}{z_p} f_{уст.вр}^* = 15 \frac{450}{34} \cdot 1,0 = 200 \text{ об/мин} > n_3 = 150 \text{ об/мин};$$

в) предельные частоты пуска, торможения, реверса с установившегося режима по кривой  $f_{пр}$  для  $\beta = 0,1$  на рис. 10-4, б  $f_{пр}^* = 0,57$

$$f_{пр} = \omega_0 f_{пр}^* = 450 \cdot 0,57 = 270 \text{ гц};$$

г) допустимая скорость вращения двигателя при пуске, торможении и реверсе с установившегося режима

$$n_{доп} = 15 \frac{\omega_0}{z_p} f_{пр}^* = 15 \frac{450}{34} \cdot 0,57 = 113 \text{ об/мин};$$

д) предельная частота реверса с переходного режима по кривой  $f_p$  для  $\beta = 0,05-0,2$  на рис. 10-4, б  $f_p^* = 0,40$

$$f_p = \omega_0 f_p^* = 450 \cdot 0,40 = 180 \text{ гц};$$

е) допустимая скорость вращения двигателя при внезапном реверсе с переходного режима

$$n_{доп} = 15 \frac{\omega_0}{z_p} f_p^* = 15 \frac{450}{34} \cdot 0,4 = 80 \text{ об/мин}.$$

### § 10-3. Экстремальная (самоадаптивная) система автоматического управления карусельным станком

1. Рассчитать производительность станка в зависимости от скорости резания. При токарной обработке режимы резания отличаются от расчетных за счет колебания припуска на обработку, колебания твердости заготовки и изменения состояния реза. В результате этого процесс резания может происходить не при наиболее выгоднейших режимах и с пониженной производительностью.

Производительность станка можно рассматривать как количество полезной работы  $A$ , выполненной в единицу времени,

$$Q = \frac{A}{t} = \frac{A}{t_{маш} + t_{всп}}. \quad (10-14)$$

Если оценивать производительность по площади обработанной поверхности изделия в единицу времени, то поверхность, обрабатываемая одним резцом за время, равное стойкости резца, будет

$$A = \sum_{i=1}^n v_i s_i \Delta t_{маш} = v s T, \quad (10-15)$$

где  $v_i, s_i$  — скорость резания и подача;  
 $\Delta t_{маш}$  — время обработки одного изделия;  
 $\sum \Delta t_{маш} = T$  — стойкость резца.

Следовательно, производительность станка

$$Q = \frac{v s T}{T + t_{всп}} = v s k_t, \quad (10-16)$$

где  $k_t$  — коэффициент, учитывающий потерю времени на смену резца.

В расчете учитывается только время на смену режущего инструмента.

Скорость резания

$$v = \frac{C_v k}{T^{m_t x y} \left( \frac{HB}{2000} \right)^n}. \quad (10-17)$$

Коэффициенты  $C_v, k$  и показатели степени  $m, x, y$  объяснены в главе I.

Расчет производится в зависимости от  $v s$ , но целесообразнее один фактор оставить постоянным, например подачу. Возмущающим воздействием является глубина резания —  $t$ . Твердость материала изделия считается постоянной. Расчет производится для карусельного станка 1551, на котором обрабатываются кольца подшипников диаметром от 700 до 1200 мм.

Материал изделия — сталь ШХ-15,  $HВ = 2000 \text{ н/мм}^2$ . Подача  $s = 0,8 \text{ мм/об}$ . Коэффициенты  $k = 0,83$ ;  $C_v = 259$ ;  $m = 0,125$ ;  $x = 0,18$ ;  $y = 0,45$ ;  $n = 0,75$  приняты по [Л.49]. Вспомогательное время (время смены резца)  $t_{\text{сш}} = 3 \text{ мин}$ .

После подстановки численных значений в уравнения (10-17) и (10-16) получаем расчетные формулы.

Стойкость резца

$$T = \left(\frac{240}{v}\right)^3 \frac{1}{t^{1,44}}, \text{ мин.} \quad (10-18)$$

Производительность

$$Q = \frac{0,8vT}{T+3}, \text{ см}^2/\text{мин.} \quad (10-16')$$

Расчет производится при нескольких значениях глубины резания  $t = 3, 5, 7, 10 \text{ мм}$  и приведен в табл. 10-4.

Таблица 10-4

$t, \text{ мм}$	$v, \text{ м/мин}$	40	80	110	120	140	160	180
3	$T, \text{ мин}$	341 000	1340	102	52,3	15,4	5,2	1,94
	$k_t$	1	1	0,973	0,945	0,8	0,636	0,4
	$Q, \text{ см}^2/\text{мин}$	320	640	854	906	936	811	566
5	$T, \text{ мин}$	164 000	642	49	25,1	7,42	2,5	0,94
	$k_t$	1	0,995	0,994	0,892	0,717	0,457	—
	$Q, \text{ см}^2/\text{мин}$	320	635	830	857	796	382	344
7	$T, \text{ мин}$	102 000	400	30,5	15,6	4,61	1,55	0,58
	$k_t$	1	0,993	0,912	0,836	0,612	—	—
	$Q, \text{ см}^2/\text{мин}$	320	634	801	805	680	436	234
10	$T, \text{ мин}$	60 500	237	18,1	9,27	2,74	0,92	0,34
	$k_t$	1	0,99	0,86	0,75	0,484	—	—
	$Q, \text{ см}^2/\text{мин}$	320	630	753	725	535	343	—

Расчетные зависимости производительности приведены на рис. 10-6. Из рисунка видно, что при постоянной подаче с повышением скорости резания производительность сначала растет, а затем начинает падать. Это происходит из-за ухудшения режущих свойств резца, сокращения его срока службы и повышения времени, затрачиваемого на его смену. Также видно, что существует оптимальная скорость резания, обеспечивающая максимальную производительность. При различных припусках на обработку  $t$  оптимальная скорость резания различна.

Можно произвести расчет зависимости производительности  $Q$  от подачи  $s$  при  $v = \text{const}$ . Получаются также экстремальные зави-

симости, но максимум в кривых очень растянут, что усложняет создание САУ.

2. Составить структурную схему самонастраивающейся САУ (рис. 10-7). Производительность оценивается по зависимости (10-16). Скорость резания оценивается по диаметру  $D$  и скорости вращения изделия  $n$ . Стойкость резца  $T$  зависит от скорости резания  $v$  и радиального усилия  $F_y$  и может быть ими определена. Глубина резания автоматически учитывается по усилию  $F_y$ , которое пропорционально глубине резания и времени работы резца.

Таким образом, для оценки производительности необходимы три параметра: диаметр обрабатываемой поверхности изделия  $D$ , скорость двигателя  $n$  и радиальное усилие  $F_y$ . Эти величины измеряются с помощью датчиков диаметра, скорости и усилия, которые изображаются на структурной схеме 8, 9, 10.

Формирование выходного сигнала, пропорционального производительности, осуществляет вычислительный блок 7, который производит вычисление согласно формуле (10-16').

Сигнал, пропорциональный производительности, подается на автоматический оптимизатор 6, который осуществляет поиск максимума производительности и формирует управляющий сигнал. Оптимизатор может быть применен любой [Л. 48]. В рассматриваемой схеме применен новый оптимизатор шагового типа, собранный на феррит-транзисторных элементах и подробно описанный в [Л. 49].

Управляющий сигнал с оптимизатора подается на элемент, формирующий сигнал привода задатчика входа 5. Этот элемент включает в себя схему управления шагового двигателя, который является приводом задатчика входа 4.

Задатчиком управляемого входа 3 является потенциометр, регулирующий ток в обмотке возбуждения главного двигателя станка, являющегося входным преобразователем 2. В качестве главного двигателя принят двигатель постоянного тока независимого возбуждения с регулированием скорости изменением магнитного потока. Станок в структурной схеме изображен как управляемый объект 1.

3. Составить структурную схему формирователя выходного сигнала (рис. 10-8). Вычислительное устройство формирователя решает следующее уравнение

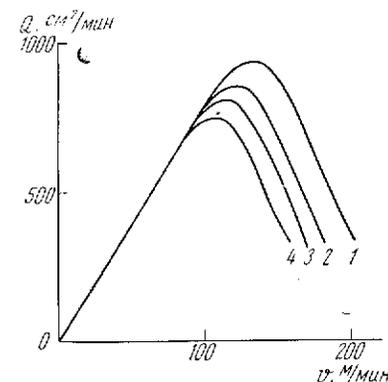


Рис. 10-6. Производительность станка в зависимости от скорости резания



5. Рассчитать график производительности карусельного станка при работе экстремальной системы. На детали диаметром  $d_n = 1200$  мм с припуском на обработку  $\Delta = 10$  мм.

Так как при обработке одного изделия для упрощения можно считать, что  $d_n = \text{const}$ ,  $\Delta = \text{const}$  и  $F_y = \text{const}$ , то производительность пропорциональна только скорости  $n$  главного двигателя. Поэтому расчет можно производить относительно скорости двигателя с последующим пересчетом в производительность по кривой 4 (рис. 10-6). Скорость двигателя

$$n = \frac{v_i}{\pi d_n} = \frac{v \cdot 32}{3,14 \cdot 1,2} = 8,5 v \text{ об/мин}, \quad (10-20)$$

где  $i$  — передаточное отношение от двигателя к шпинделю.

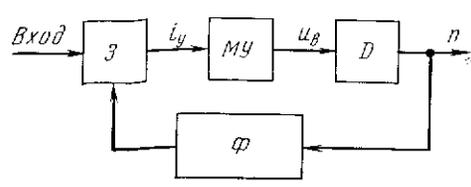


Рис. 10-10. Упрощенная структурная схема экстремальной системы карусельного станка

—  $Q_3 = \Delta Q \geq 20$  см<sup>2</sup>/мин блок-формирователь выдает сигнал, реверсирующий входной сигнал входа 3. На вход системы подается изменяющийся по времени входной сигнал от шагового двигателя, перемещающего реостат управления магнитного усилителя.

Расчет производится методом конечных приращений [Л. 12]. Для упрощения расчета магнитный усилитель, якорная цепь двигателя и система станок — инструмент — деталь считаются безынерционными.

Записывается система дифференциальных уравнений

$$u_y = i_y R_y; \quad (10-21)$$

$$u_B = f(i_y); \quad (10-22)$$

$$u_B = i_B R_B + w_B \frac{d\Phi}{dt}; \quad (10-23)$$

$$e_r = e_\lambda + i_r R; \quad (10-24)$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (10-25)$$

За входной сигнал принимается ступенчатое изменение сопротивления цепи управления  $R_y$  за каждый шаг шагового двигателя  $m$  на величину

$$\Delta R_p = \frac{R_p \xi_{шд}}{\xi_p i} = \frac{1200 \cdot 22,5}{330 \cdot 3} = 27 \text{ ом},$$

где  $R_p$  — полное сопротивление реостата управления;  $\xi_{шд}$ ,  $\xi_p$  — шаги шагового двигателя и реостата управления;  $i$  — передаточное отношение редуктора.

Ток управления МУ

$$i_y = \frac{U}{R_y},$$

где  $U = 15$  в — напряжение питания.

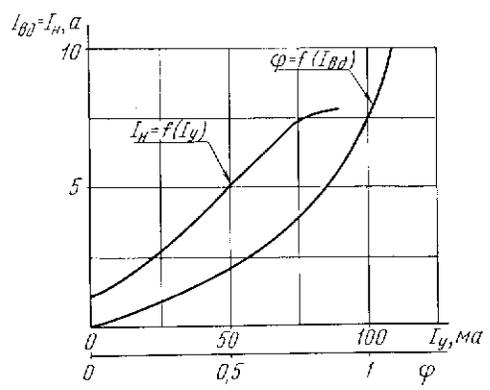


Рис. 10-11. Характеристика магнитного усилителя  $I_B = f(I_y)$  и кривая намагничивания двигателя  $\phi = f(I_B)$

Ток в обмотке возбуждения двигателя находится по характеристике МУ  $I_B = f(I_y)$ , магнитный поток двигателя находится по кривой намагничивания  $\phi = f(I_B)$  (рис. 10-11).

Так как магнитный поток падает и нарастает, когда САУ разомкнута, то зависимость  $\phi = f(t)$  рассчитывается заранее. Расчет производится по уравнению, в котором предполагается, что в пределах одного шага  $m$  магнитный поток линейно зависит от тока возбуждения

$$\phi = \Phi_{(m+1)} - (\Phi_{(m+1)} - \Phi_{(m)}) e^{-\frac{t}{T_B}}, \quad (10-26)$$

где  $\Phi = \frac{\Phi}{\Phi_{II}}$  — относительное значение магнитного потока;

$\Phi(m), \Phi(m+1)$  — начальное и конечное значения потока на шаге  $m$ ;

$T_B = 1,08 \text{ сек}$  — постоянная времени цепи обмотки возбуждения. Она принимается постоянной из-за незначительного изменения магнитного потока.

Начальные результаты расчета  $\varphi$  приведены в табл. 10-5. Кривая  $\varphi = f(t)$  приведена на рис. 10-12.

Таблица 10-5

$m$	$R_y, \text{ ом}$	$I_y, \text{ ма}$	$I_B, \text{ а}$	$\varphi(m)$	$\varphi(m+1)$	$t, \text{ сек}$	$\varphi$
0	204	73,5	7,15	1	—	—	—
1	235	63,8	6,3	1	0,95	0	1
						0,5	0,982
2	266	55,5	5,5	0,95	0,895	1,24	0,966
						1,74	0,94
3	297	50,5	5,05	0,895	0,86	2,48	0,915
						2,98	0,895
4	328	45,7	4,55	0,86	0,81	3,72	0,878
						4,22	0,853

По  $\varphi(t)$  находится приращение скорости двигателя, уравнение которой получено из (10-24) и (10-25)

$$\Delta\Omega_{(k)} = \frac{\varphi_{\text{ср}(k)} - \varphi_{\text{ср}(k)}^2 \Omega_{\text{нач}(k)} - \delta_c}{\frac{T_n}{\Delta t} - \frac{1}{2} \varphi_{\text{ср}(k)}}, \quad (10-27)$$

где  $\Omega = \frac{n}{n_0} = \frac{n}{820}$  — относительное значение скорости двигателя;

$\Omega_{\text{нач}(k)}$  — начальное значение скорости на шаге интегрирования  $k$ ;

$\varphi_{\text{ср}(k)}$  — среднее значение магнитного потока на шаге  $k$ ;

$$\delta_c = \frac{I_c R_n}{U} = \frac{71 \cdot 0,18}{220} = 0,058 \text{ — относительный перепад скорости двигателя при нагрузке током } I_c;$$

$$I_c = I_n \frac{M_c}{M_H} = 104 \frac{166}{245} = 71 \text{ а — ток статической нагрузки, отвечающий статическому моменту } M_c \text{ на естественной характеристике};$$

$M_n, M_c$  — номинальный момент двигателя и статический момент нагрузки,  $H \cdot M$ ;

$T_M = 0,0524 \text{ сек}$  — электромеханическая постоянная времени электропривода.

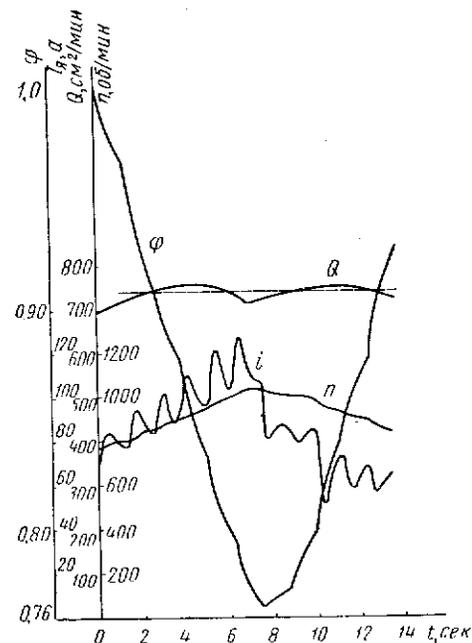


Рис. 10-12. Графики переходных процессов

Скорость и ток якоря двигателя

$$\Omega_{(k+1)} = \Omega_{(k)} + \Delta\Omega_k; \quad (10-28)$$

$$i = I_{к.з} [1 - \varphi_{(k)} \Omega_{(k)}], \quad (10-29)$$

где  $I_{к.з} = \frac{U}{R_n} = \frac{220}{0,18} = 1220 \text{ а}$  — ток короткого замыкания.

Начальные результаты расчетов приведены в табл. 10-6. Графики переходных процессов  $n = f(t)$ ,  $i = f(t)$  и  $Q = f(t)$  построены на рис. 10-12.

Таблица 10-6

Параметры	Номер шага $m$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$k$	0	1	2	3	4	5	6	7
$t$	0	0,5	1,24	1,74	2,48	2,98	3,72	4,22
$\varphi_{ср}$	1	0,99	0,975	0,952	0,929	0,905	0,886	0,865
$\Delta Q$	0	0,025	0,009	0,038	0,017	0,037	0,012	0,04
$\Omega$	0,938	0,963	0,972	1,01	1,027	1,064	1,076	1,116
$n$ , об/мин	770	790	797	828	842	873	882	915
$i$ , а	71	84,4	76,5	94,9	82,5	94,6	86,6	109,7
$Q_T$ , см <sup>2</sup> /мин	695	710	713	730	740	750	753	755
$Q_a$ , см <sup>2</sup> /мин	695	695	695	695	740	740	740	740
$\Delta Q$	0	15	18	35	0	10	14	15

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода. «Энергия», 1965.
2. Сандлер А. С. Электрооборудование производственных механизмов. Госэнергоиздат, 1958.
3. Разыграев А. М. и др. Проектирование и монтаж электрооборудования металлорежущих станков. Машгиз, 1961.
4. Долматовский Г. А. Справочник технолога по обработке металлов резанием. Машгиз, 1960.
5. НИБТН. Режимы резания на крупных и уникальных токарных, карусельных, расточных и продольно-строгальных станках. Машгиз, 1956.
6. НИБТН. Общепромышленные нормы режимов резания и времени для технического нормирования работ на токарных станках. Машгиз, 1959.
7. ЦБПНТ. Общемашиностроительные нормативы времени для технического нормирования работ на горизонтально-расточных станках. Машгиз, 1962.
8. НИБТН. Режимы скоростного шлифования. Круглое шлифование. Машгиз, 1965.
9. ЦБПНТ. Нормативы затрат рабочего времени на станочные работы. Metallurgizdat, 1949.
10. ЭНИМС. Определение потерь в элементах приводов подач станков и расчет направляющих скольжения по характеристикам трения. Руководящие материалы. ОНТИ, 1961.
11. ЭНИМС. Общие справочные данные по электрооборудованию, используемому при модернизации металлорежущих станков. Машгиз, 1956.
12. Голован А. Т. Основы электропривода. Госэнергоиздат, 1959.
13. Харизоменов И. В. Электрическое оборудование металлорежущих станков. Машгиз, 1958.
14. Сиротин А. А. Автоматическое управление электроприводами. Госэнергоиздат, 1959.
15. Яковлев В. И. Автоматическое управление электроприводами. МЭИ, 1965.
16. Ачеркан Н. С. Металлорежущие станки. Машгиз, 1956.
17. Единая система планово-предупредительного ремонта технологического оборудования машиностроительного предприятия. Машгиз, 1962.
18. Морозов Д. П. Теория электропривода и автоматика реверсивных станков. Госэнергоиздат, 1949.
19. ЭНИМС. Руководящие материалы по электрификации металлорежущих станков, ч. II. Электрические машины постоянного тока. ОНТИ, 1961.
20. Зимин Е. Н. Электропривод с управлением ртутными выпрямителями. МЭИ, 1964.
21. Зимин Е. Н. К расчету основных параметров и характеристик электроприводов с УРВ. Труды МЭИ, вып. 37, 1961.
22. Андреев Г. И. Серия комплектных электроприводов постоянного тока с кремневыми выпрямителями, мощностью от 6 до 25 квт. МДНТП, 1962.
23. «Учебное пособие по проектированию и расчету автоматизированного электропривода». Под ред. М. М. Соколова. Вып. 1, МЭИ, 1964.
24. ЭНИМС. Комплектный регулируемый электропривод постоянного тока на транзисторах типа ПТ-51. Руководящие материалы. ОНТИ, 1965.
25. Козинцева Л. П. Усилители на полупроводниковых триодах. «Высшая школа», 1965.
26. Соколов М. М., Терехов В. М. Приближенные расчеты переходных процессов в автоматизированном электроприводе. Госэнергоиздат, 1963.
27. Архангельский В. И. Бесконтактные схемы управления электроприводами прокатных станков. Госэнергоиздат, 1960.

28. Магнитные усилители УМП и блоки промежуточных усилителей БО. Информация на электротехнические изделия, № 42 (630), 1962.

29. Разыграев А. М. Электронное управление на металлорежущих станках. Машгиз, 1953.

30. Рудаков В. В. Электромашинные усилители в системах автоматики. Госэнергоиздат, 1961.

31. Верховлат М. Е., Фатеев А. В. Анализ работы и расчет элементов электроприводов. Машгиз, 1957.

32. Соколов М. М. Электрооборудование общепромышленных механизмов. Госэнергоиздат, 1959.

33. Петровский А. Я., Розман Я. Б. Регулируемый электропривод с магнитными усилителями. «Энергия», 1964.

34. Алеников Д. А. Метод расчета характеристик электропривода постоянного тока с дроссельным управлением, основанный на использовании семейств внешних характеристик выпрямительно-дроссельных преобразователей. ЦБТИ НИИЭлектротехнологии, 1959.

35. Сиротин А. А., Елисеев В. А. Автоматизированный электропривод шлифовальных станков со следящей подачей. «Электричество», 1960, № 7.

36. Башарин А. В. Расчет динамики и синтез нелинейных систем управления. Госэнергоиздат, 1960.

37. Майоров Ф. В. Электронные регуляторы. Гостехиздат, 1956.

38. Соколов Т. Н., Дружинский И. А. Электрокопировальный фрезерный полуавтомат модели 6441. ГНТИ, 1951.

39. Васильев Д. В., Чуич В. Г. Расчет систем автоматизированного управления. Машгиз, 1959.

40. Верховлат М. Е. Следящие электроприводы копировально-фрезерных станков. Доклады по IV Всесоюзному совещанию по автоматизированному электроприводу. ВНИЭМ, ОНТИ, 1964.

41. Айзерман М. А. Лекции по теории автоматического регулирования. Техиздат, 1956.

42. Арутюнян М. С. Копировально-фрезерный полуавтомат 71553А. «Станки и инструмент», 1958, № 3.

43. Гольдфарб Л. С. Конспект лекций по автоматическому регулированию. МЭИ, 1961.

44. Ратмиров В. А., Ивоботенко Б. А. Шаговые двигатели для систем автоматического управления. Госэнергоиздат, 1962.

45. Ратмиров В. А., Ивоботенко Б. А., Цапенкин В. К., Садовский Л. А. Системы с шаговыми двигателями. «Энергия», 1964.

46. Ивоботенко Б. А., Садовский Л. А., Чиликин М. Г. Обобщенные динамические и нагрузочные характеристики индукторных шаговых электродвигателей. ВНИЭМ, 1965.

47. Зильберман Б. З. Моделирование электроприводов. Госэнергоиздат, 1962.

48. Под ред. Б. Н. Петрова. «Автоматическая оптимизация управляемых систем». Издательство иностранной литературы, 1960.

49. Елисеев В. А., Прытков В. Г. Система экстремального управления металлорежущих станков. Труды МЭИ, вып. 56, 1964.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Условные обозначения величин . . . . .	3
Введение . . . . .	5
<b>Часть первая</b>	
<b>Общие расчеты электроприводов металлорежущих станков</b>	
<b>Глава 1.</b> Расчет величин, обусловленных резанием металлов на станках . . . . .	11
§ 1-1. Скорость, усилие и мощность резания главного привода станков . . . . .	11
§ 1-2. Усилие, момент и мощность механизмов подачи станков . . . . .	25
§ 1-3. Машинное и вспомогательное время . . . . .	28
<b>Глава 2.</b> Потери и коэффициенты полезного действия станков . . . . .	33
§ 2-1. Потери и к. п. д. механизмов станков . . . . .	33
§ 2-2. Потери и к. п. д. в главных приводах при разных нагрузках и скоростях . . . . .	34
<b>Глава 3.</b> Расчет мощности электроприводов типовых механизмов станков . . . . .	43
§ 3-1. Общие положения по расчету мощности . . . . .	43
§ 3-2. Расчет мощности главных приводов станков . . . . .	44
§ 3-3. Расчет мощности привода подачи . . . . .	57
<b>Глава 4.</b> Расчеты, связанные с регулированием скорости электроприводов металлорежущих станков . . . . .	59
§ 4-1. Условия нагрузки, диапазон и плавность регулирования . . . . .	59
§ 4-2. Стабильность и коэффициент усиления системы . . . . .	76
§ 4-3. Экономичность и технико-экономические показатели при регулировании скорости . . . . .	82
<b>Часть вторая</b>	
<b>Расчеты систем типовых станков</b>	
<b>Глава 5.</b> Расчет систем автоматического управления электроприводами станков токарной группы . . . . .	99
§ 5-1. Системы управления и регулирования скорости . . . . .	99
§ 5-2. Главный электропривод по системе генератор—двигатель (Г—Д) с вибрационным управлением . . . . .	99
§ 5-3. Главный электропривод по системе «управляемый ртутный выпрямитель—двигатель» (УРВ—Д) . . . . .	108
§ 5-4. Главный электропривод по системе «полупроводниковый выпрямитель—двигатель» (ПВ—Д) . . . . .	123
§ 5-5. Электропривод подачи по системе «управляемый полупроводниковый выпрямитель (тиристор) — двигатель» УПВ—Д . . . . .	132
<b>Глава 6.</b> Расчет систем автоматического управления главным электроприводом продольно-строгальных станков . . . . .	143
§ 6-1. Применяемые системы главных электроприводов . . . . .	143
§ 6-2. Электропривод стола по системе Г—Д с питанием обмотки возбуждения генератора от ЭМУ поперечного поля . . . . .	143
§ 6-3. Электропривод стола по системе Г—Д с магнитным усилителем и с критическим самовозбуждением генератора . . . . .	158
<b>Глава 7.</b> Расчет электроприводов и систем автоматического управления расточными станками . . . . .	177
§ 7-1. Электроприводы расточных станков . . . . .	177

§ 7-2. Электропривод подачи по системе «электромашинный усилитель — двигатель постоянного тока» . . . . .	178
Глава 8. Расчет электроприводов и систем автоматического управления шлифовальными станками . . . . .	209
§ 8-1. Применяемые системы электроприводов . . . . .	209
§ 8-2. Электропривод вращения маделия (круговой подачи) по системе «магнитный усилитель—двигатель постоянного тока» . . . . .	211
§ 8-3. Электропривод поперечной подачи сферо- и внутришлифовальных станков . . . . .	229
Глава 9. Расчет следящих электроприводов копировальных станков . . . . .	243
§ 9-1. Расчет систем прерывного управления . . . . .	243
§ 9-2. Следящий электропривод подачи станка 6441Б . . . . .	249
§ 9-3. Следящий электропривод подачи станка 71553А . . . . .	262
Глава 10. Расчет систем комплексной автоматизации металлорежущих станков . . . . .	271
§ 10-1. Комплексная автоматизация металлорежущих станков . . . . .	271
§ 10-2. Система программного управления вертикально-фрезерным станком 6Н12П с силовыми шаговыми двигателями . . . . .	272
§ 10-3. Экстремальная (самонастраивающаяся) система автоматического управления карусельным станком . . . . .	281
Литература . . . . .	291

СОКОЛОВ НИКОЛАЙ ГЕОРГИЕВИЧ  
ЕЛИСЕЕВ ВИКТОР АЛЕКСЕЕВИЧ

## Расчеты

по автоматизированному

электроприводу

металлорежущих

станков

Редактор — Фуфаева Г. И.  
Худ. редактор — Гуторов Н. К.  
Техн. редактор — Меркурьева Т. Д.  
Корректор Афанасьева Т. В.

Т—12044. Сдано в набор 3/III-69 г.  
Подп. в печать 24/IX-69 г. Формат 60×90/16.  
Объем 18,5 п. л. Уч.-изд. л. 15,21.  
Изд. № СТД-42. Заказ № 165.  
Тираж 15 000 экз. Цена 63 коп.

Тематический план изд-ва «Высшая школа»  
(вузы и техникумы) на 1969 г.  
Позиция № 94.

Москва К-51, Неглинная ул., д. 29/14,  
Издательство «Высшая школа»

Ярославский полиграфкомбинат Главполиграфпрома  
Комитета по печати при  
Совете Министров СССР.  
Ярославль, ул. Свободы, 97.