

*Б. А. Руманов*

## **ПРОГРАММНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИБКИ — ПРОКАТКИ**

В последние годы в СССР и за рубежом интенсивно ведутся работы по созданию устройств автоматического регулирования процесса гибки-прокатки. Специфика процесса в сочетании с требованием высокой точности изделий создает ряд труднопреодолимых препятствий на пути его автоматизации. Подробное рассмотрение процесса относится к компетенции прикладной теории пластичности, в настоящей статье процесс будет рассмотрен в объеме, минимально необходимом для синтеза системы программного регулирования.

### **ПРОЦЕСС ГИБКИ—ПРОКАТКИ КАК ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Схемы процесса весьма разнообразны, однако сущность их заключается в протягивании (прокатке) деформируемого элемента между формообразующими роликами (валками). Широко распространенная асимметричная схема процесса изображена на рис. 1. Элемент 1 проталкивается между роликами 2, 3, 4. Ролик 4 закреплен на конце рычага, угол поворота которого определяет величину изгиба элемента 1. Для включения процесса в схему регулирования необходимо проводить его рассмотрение в координатах входа и выхода. Входной величиной (регулирующим воздействием) является угол поворота рычага гибочного ролика 4. Для отыскания выходной величины обратимся к некоторым специфическим особенностям процесса:

а) обратимость — наличие наряду с остаточными упругих деформаций.

б) формообразование детали происходит не в точке, а в зоне (рис. 1, зона между роликами 2, 3, 4).

Указанные особенности затрудняют измерение параметра процесса, определяющего формообразование детали. Очевидно, что

в качестве такого параметра должна быть принята величина пластической деформации  $K_{пл}$  ( $K$  — кривизна элемента). При выполнении условия формуемости, данного М. И. Лысовым [1] можно считать формообразующим сечение элемента под опорным роликом 2 рис. 1, совпадающее с нормалью к изогнутой линии в точке касания последней с роликом. Отсюда вытекает возможность

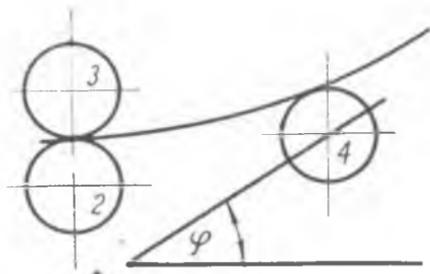


Рис. 1.

регулирования процесса по величине пластической деформации в точке А —  $K_{пла}$ . В случае невыполнения условия формуемости, кривизна сформированная в сечении в момент прохождения им точки А будет искажаться при дальнейшем прохождении сечением напряженной зоны. Ошибка, возникающая при этом может быть скорректирована за счет предискажения программы из-

готовления детали, т. е. сознательного введения в идеальную программу составляющей, компенсирующей возникающие в процессе изготовления ошибки. Реализация этого способа требует решения в общем виде динамической задачи упруго-пластического изгиба в процессе гибки-прокатки, что связано с практически непреодолимыми математическими трудностями. Далее будет изложен другой метод коррекции ошибок обработки детали, в том числе и ошибок, возникающих при несоблюдении условия формуемости.

Итак, в качестве выходной (регулируемой) величины принимаем  $K_{пла}$ . Зависимость  $K_{пла} = f(\tau, t)$ , где  $t$  — текущая координата времени — дает статическую и динамическую характеристику процесса. С точки зрения динамики процесс интерпретируется идеальным (безынерционным звеном), однако связь между формообразующим сечением и рабочим органом, осуществляемая через напряженную зону, описывается дифференциальными зависимостями, что иногда трактуется как «путевая динамика». Физические истоки указанного лежат в зональном формообразовании и зависимости процесса упругопластической деформации от его предистории. Для получения статической характеристики процесса необходимо составить и проинтегрировать дифференциальное уравнение изогнутой нейтральной оси стержня в режиме динамическом относительно положения рабочего органа (гибочного ролика). При этом для математического описания процесса делается ряд допущений:

- а) принимается гипотеза плоских сечений;
- б) напряженно-деформируемое состояние изгибаемого профиля рассматривается, как линейное;

в) принимается степенная зависимость напряжений от деформаций в зоне пластических деформаций  $\sigma = D\varepsilon^n$ ; в зоне упругих  $\sigma = E\varepsilon$ , где  $\delta$  — напряжение;  $\varepsilon$  — относительная деформация;  $D, E, n$  — константы, характеризующие материал;

г) не учитываются колебания механических свойств и геометрических размеров по длине элемента.

Наиболее полное аналитическое исследование формообразования в процессе гибки-прокатки дано проф. М. И. Лысовым [1]. Из [1] натуральное уравнение нейтрального слоя в функции от угла наклона касательной в точке к линии действия силы:

$$K_{(\theta)}^{n+1} = \left(\frac{dx}{de}\right)^{n+1} = \frac{2(n+1)P}{nH} \left(C - \sin^2 \frac{\alpha}{2}\right),$$

где  $K$  — кривизна;  $H$  — приведенная жесткость профиля;  $C$  — постоянная интегрирования.

Переход от натурального уравнения нейтрального слоя к уравнению в перемещениях сопряжен с большим объемом вычислений (эллиптические интегралы и т. д.). На основании теоремы о разгрузке задача о перемещении рабочего органа может быть сведена к задаче о перемещении точек стержня переменной кривизны при упругом изгибе. Решение этой задачи для частного случая, когда первоначальная форма стержня представляет собой дугу эллипса, дано в [1].

Упомянутые выше зависимости могут быть положены в основу построения статической характеристики процесса. Необходимо подчеркнуть, что они, устанавливая связь между мгновенными значениями параметров, вместе с тем не рассматривают процесс во времени и взаимосвязи с учетом предистории. Учет предистории объекта и перемещения рабочего органа по произвольному закону во времени приведет, вероятно, к невозможности аналитически получить статическую характеристику объекта. Очевидно, что в указанном случае статические характеристики будут являться функциями времени или другой координаты, в которой рассматривается процесс, например,  $l$  — текущей координаты длины. Необходимо также отметить, что вследствие ряда допущений и невозможности учета всех факторов аналитические зависимости описывают процесс в целом с точностью не выше 5—10%.

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И СИНТЕЗ СИСТЕМЫ

Выявим основные возмущающие воздействия на объект регулирования.

а) Изменение задаваемой величины. Задаваемая величина складывается из сигнала нескорректированной программы  $K_{np}$ , сигнала, пропорционального упругой деформации  $K_{np}$ , вырабатываемого вычислительным устройством и сигнала корректирующих устройств.

При применении линейной интерполяции сигнал нескорректированной программы есть линейная функция времени. Составляющая  $K_y$  определяется из приближенной зависимости

$$K^3 - K^2 \left( \frac{K_{\text{пр}}}{1-\mu} + A \right) + B = 0, [2]$$

где  $K$  — полная кривизна;  $K_{\text{пр}}$  — запрограммированная;  $A, B, M$  — постоянные, определяемые материалом и формой поперечного сечения элемента.

Характер изменения сигнала корректирующих устройств может быть рассмотрен с помощью вероятностных методов анализа, однако вследствие его относительной малости указанное рассмотрение опускается. Итак, изменение задаваемой величины описывается ориентировочно кривой 3-го порядка, т. е. происходит с постоянной скоростью изменения ускорения.

б) Непостоянство жесткости элемента по его длине, т. е.  $C = EI = f(l)$ , где  $C$  — жесткость,  $E$  — модуль упругости;  $I$  — момент инерции сечения.

В процессе упруго-пластического изгиба происходит деформация (искажение) поперечного сечения элемента и изменение его механических свойств, что также приводит к изменению жесткости. Воздействие изменения жесткости на процесс проходит по основному каналу регулирования (воздействие на объект) и по каналу коррекции программы, где в вычислительное устройство вводится постоянная величина жесткости.

Наличие возмущающих воздействий, неподдающихся предварительному учету, непостоянство во времени статических характеристик процесса и приближенность математического описания делает принципиально невозможным получение достаточно высокой точности с помощью разомкнутых систем управления. Необходимо подчеркнуть, что термин разомкнутая система здесь предполагает отсутствие обратных связей по основному параметру процесса — кривизне, с этой точки зрения системы программного управления процессом с обратными связями по положению рабочих органов также квалифицируются как разомкнутые. Стремление к получению высокой точности привело к созданию замкнутых систем регулирования процесса. При этом очень важным является выбор параметра обратной связи. Известны системы с обратной связью по кривизне элемента по выходе его из напряженной зоны. Такой выбор обратной связи вводит в систему регулирования звено с постоянным запаздыванием

$$\tau = \frac{l_{н.з} + l_u}{U},$$

где  $\tau$  — время запаздывания;  $l_{н.з}$  — длина напряженной зоны;  $l_u$  — зона измерений;  $U$  — скорость перемещения деформируемого элемента.

Введение запаздывания в систему снижает устойчивость и качество регулирования, налагает ограничения на характер изменения задаваемой величины (программы). Практически системы регулирования процесса гибки — прокатки с постоянным запаздыванием (обратной связью по кривизне вне напряженной зоны) приемлемы лишь для стабилизации при относительно небольшой интенсивности возмущающих воздействий. Постоянного запаздывания в системе можно избежать, применив обратную связь по кривизне в формообразующем сечении, однако в этом случае возникают затруднения с измерением величины пластической деформации —  $K_{\text{пла}}$ .

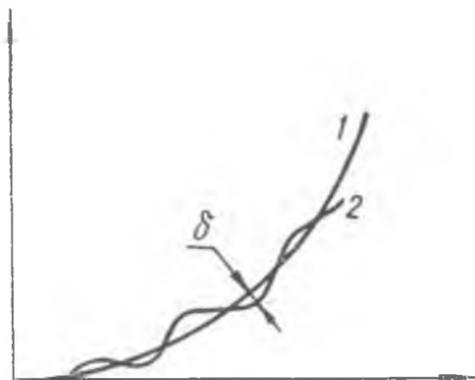


Рис. 2.

Ниже будут рассмотрены способы преодоления указанного затруднения. Для формирования требований к качественным показателям системы регулирования рассмотрим некоторые вопросы точности процесса (рис. 2).

Пусть программа детали задана уравнением нейтральной линии  $K=f(l)$ . Программа обрабатывается с ошибкой  $\Delta f(l)$ , где  $K$  — кривизна;  $l$  — текущая координата

длины. Ошибка по кривизне  $\Delta f(l)$  может быть названа локальной, критерием качества детали является расстояние между точками с одинаковым  $l$  идеальной 1 и искаженной 2 кривых. Это расстояние  $\delta$  — есть интегральная ошибка. Связь между  $K$  и  $\delta$  дается уравнением:

$$\delta = [ \{ \cos [ \int \{ f(l) + \Delta f(l) \} dl ] dl - \{ \cos [ \int f(l) dl ] dl \}^2 + \{ \sin [ \int \{ f(l) + \Delta f(l) \} dl ] dl - \{ \sin [ \int f(l) dl ] \}^2 \}^2 ]^{\frac{1}{2}}.$$

В случае относительно небольших величин  $\Delta f(l)$  уравнение может быть упрощено  $\delta = \int_0^e \int_0^e \Delta f(l) dl^2$ . Задачей регулирования процесса является обеспечение минимальной величины интегральной ошибки  $\delta$ . Следует отметить, что последняя не тождественна принятым в теории регулирования интегральным критериям качества регулирования. На основе рассмотренных вопросов об основных возмущающих воздействиях, о характеристиках процесса и его точности сформулируем следующие требования к системе:

- а) учет упругой составляющей деформации;
- б) обеспечение минимальной величины (в принципе уничтожения) статической ошибки для основного характера изменения входного воздействия;

в) обеспечение инвариантности системы к изменению жесткости;

г) введение в систему устройств коррекции интегральной ошибки;

д) обеспечение достаточного быстродействия системы и введение коррекции динамических ошибок.

Поставленные выше задачи решаются следующим образом:

а) величина упругой деформации  $K_y$  определяется по силовым параметрам процесса и вводится в виде корректирующего сигнала в программу. Для вычисления  $K_y$  используются зависимости:

$K = K_y + K_{пл}$ ;  $K_y = \frac{M}{EI}$ , где  $K$ ,  $K_{пл}$ ,  $K_y$  — соответственно полная, пластическая и упругая деформация;  $EI$  — жесткость;  $M$  — изгибающий момент в формообразующем сечении. Для схемы процесса, изображенной на рис. 1,

$$M = P_y \frac{a \cos \varphi - b \sin \varphi \cdot \cos \varphi - c \cos^2 \varphi + d \sin \varphi}{f \cdot \cos \varphi - g} - P_y \cdot \dot{\varphi}(\varphi),$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $g$  — постоянные;  $P_y$  — составляющая силы, нормальная к рычагу гибкого ролика.

В качестве вычислительных устройств используются операционные усилители и функциональные потенциометры. Структурная схема реализации по пункту а будет дана совместно со схемой по пункту в;

б) уничтожение в принципе статической ошибки системы при основном характере изменения задаваемой величины, описываемом кубическим уравнением, требует создания системы с астатизмом 4-го порядка. Практически системы со столь высокой степенью астатизма не выполняются, примем астатизм второго порядка, ликвидирующий в принципе статическую ошибку при линейно-изменяющемся входном воздействии. Такой выбор оправдан еще и тем, что линейная составляющая преобладает в сигнале входного воздействия. Двойной астатизм достигается последовательным включением в цепь основного регулирования интегрирующих электрического серводвигателя и гидравлического регулятора скорости. Так как системы с двойным астатизмом неустойчивы, охватим цепь основного регулирования гибкой обратной связью с введением 1 и 2-й производной. В цепь обратной связи введено дифференцирующее звено тахогенератор и корректирующая  $RC$  — цепочка, передаточная функция которой находится при исследовании системы;

в) с целью обеспечения инвариантности системы к изменению жесткости по длине элемента в вычислительное устройство, вырабатывающее сигнал коррекции программы  $K_y$ , вводится постоянное значение жесткости, а ее величина автоматически вычисляемая из динамических зависимостей процесса. Имеем  $K_y = \frac{M}{C}$ , где  $C$  — жесткость. Дифференцируя по времени, получим

$M_{y(t)} = K_{y(t)} C_{y(t)} + C_{y(t)} K'_{y(t)}$ , т. к. изменение жесткости по длине происходит относительно медленно то величиной  $K_{y(t)} C'_{y(t)}$  можно пренебречь. Тогда  $C_{y(t)} = \frac{M'_{y(t)}}{K_{y(t)}}$ . Структурная схема устройства изображена на рис. 3;

г) отработка заданной программы с абсолютной точностью без ошибки практически невозможна вследствие наличия погрешностей в системе регулирования, устройствах измерения и переработки информации, а также известной приближенности зависимостей, положенных в основу построения решающих устройств. Однако даже при значительных отклонениях по кривизне возможно обеспечение достаточно малой интегральной ошибки (рис. 2). Для построения корректирующего устройства используем зависимость  $\sigma = \int \int \Delta f l dl)^2$ . Коррекция осуществляется следующим способом (рис. 4).

Устройством 1 измеряется фактическая кривизна детали в точке А вне напряженной зоны. В вычислительном устройстве 2  $K_{факт}$  вычи-

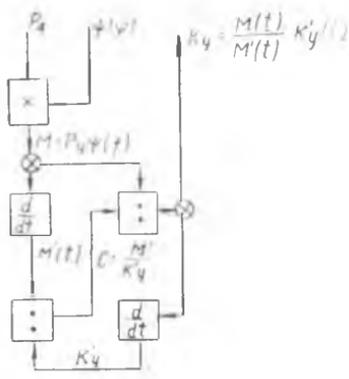


Рис. 3.

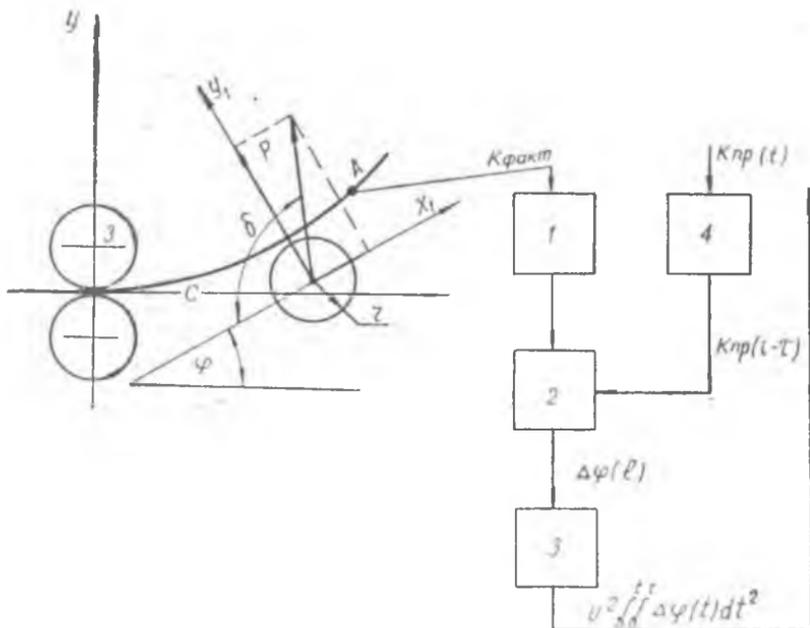


Рис. 4.

тается из запрограммированной величины  $K_{\text{пр}}$  для точки  $A$ . Так как  $K_{\text{пр}}$  вводится в систему в момент прохождения сечения  $A$  под опорным роликом  $3$ , то в вычислительное устройство величина  $K_{\text{пр}}$  подается через линию задержки  $4$ , с временем задержки  $\tau = \frac{l_3}{v}$ , где  $l_3$  — длина напряженной зоны;  $v$  — скорость перемещения элемента.

Величина ошибки ( $K_{\text{пр}} - K_{\text{факт.}}$ ) дважды интегрируется с помощью блоков операционных усилителей  $5$ . В интегрирующих блоках производится замена переменных на основе зависимости

$$l = v \cdot t.$$

$$\int_0^t \int_0^t \Delta f(t) dt^2 = \int_0^{tt} \int_0^{tt} \Delta \varphi(t) \left( \frac{dl}{dt} \right)^2 dt^2,$$

где  $\Delta \varphi(t) = \Delta f(vt)$ . Полагая  $v$  — постоянной, получим,

$$\int_0^{tt} \int_0^{tt} \Delta f(l) dl^2 = v^2 \int_0^{tt} \int_0^{tt} \Delta \varphi(t) dt^2.$$

Результат интегрирования вводится в виде корректирующего сигнала в программу.

Рассмотренный способ недостаточно эффективен вследствие того, что информация об интегральной ошибке в напряженной зоне неизвестна, последнее обстоятельство создает отрицательный эффект, аналогичный наличию постоянного запаздывания в системе регулирования. Ликвидировать указанный недостаток можно измерив величину пластической деформации в сечениях напряженной зоны и расширив область интегрирования при определении  $\delta$ ;

д) непосредственное измерение  $K_{\text{пл}}$  в напряженной зоне невозможно. Математические зависимости, полученные аппаратом теории пластичности, обладают недостаточной точностью. Однако имеются зависимости, не критичные к трудноучитываемым факторам и отражающие взаимосвязь параметров с достаточной точностью. (Например, зависимость  $K_y = \frac{M}{EI}$ ). Использование этих зависимостей в сочетании с получением максимума информации о процессе с помощью измерений создает возможность точного определения  $K_{\text{пл}}$  в напряженной зоне. Пусть  $K = f(l)$  — уравнение нейтрального слоя. Для произвольной точки  $C$  с координатой  $l_c$  угол  $\alpha = \int_0^c f(l) dl + c$ .  $C$  определим из граничных условий  $l=0$ ,  $\alpha=0$ ,  $c=0$ . (Полагая, что кривая касается опорного ролика в точке с координатами  $x=0$ ,  $y=0$ ).

Координаты точек  $B$  и  $C$

$$x_B = \int_0^l \cos \alpha dl = \int_0^{l_c} \cos \left[ \int_0^l f(t) dt \right] dl + c_1;$$

$$y_B = \int_0^l \sin \alpha dl = \int_0^{l_c} \sin \left[ \int_0^l f(t) dt \right] dl + c_2.$$

Аналогичны выражения для точки С.

Изгибающий момент в сечении, проходящем через точку С.  $M_c = P \cdot r = P_x r_y + P_y r_x$ , где  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $r_x$ ,  $r_y$  — проекции силы и плеча на оси координат.

$r_x = X_b - X_c$ ;  $r_y = Y_b - Y_c$ . Выразим  $P_x$  и  $P_y$  через составляющие силы  $P$  по осям  $x' y'$ , связанным с рычагом гибочного ролика.  $P_x = P'_x \cos \varphi + P'_y \sin \varphi$   $P_y = P'_y \cos \varphi - P'_x \sin \varphi$ .

Величина  $K_y$  в точке С равна  $\frac{M_c}{C_c}$ . Суммарная кривизна  $K = K_{пл} + \frac{M_c}{C_c}$ . В момент прохождения сечения С под роликом З, т. е. на время  $\tau$  ранее имело место равенство

$$K(t - \tau) = K_{пл} + \frac{M(t - \tau)}{C_c}$$

Очевидно, что  $K_{пл}$  и  $C_c$  не зависят от  $t$  при выполнении условия формируемости. Для момента  $t$ , аналогично

$$K(t) = K_{пл} + \frac{M_c(t)}{C_c}$$

Исключая

$$C_c = \frac{M(t - \tau)}{K(t - \tau) - K_{пл}}$$

получим

$$K(t) = K_{пл} + \frac{M_c(t)}{M(t - \tau)} (K(t - \tau) - K_{пл})$$

Откуда

$$K_{пл} = \frac{K(t) \cdot M(t - \tau) - M_c(t) \cdot K(t - \tau)}{M(t - \tau) - M_c(t)}$$

Получена величина фактической пластической деформации в произвольной точке напряженной зоны с некоторым запаздыванием  $\tau = \frac{l_c}{v}$ , где  $l_c$  — длина зоны от ролика 2 до точки С.

Очевидно, что величина  $l_c$  может быть выбрана достаточно малой, ограниченной лишь техническими возможностями измерительных устройств. Важно также, что полученное выражение не содержит в себе величины  $C_c$ , т. е. не критично к изменению жесткости. Фактическая величина  $K_{пл}$  сравнивается с заданной нескорректированной программной величиной  $K_{пр}(t - \tau)$ , далее производится замена переменных ( $l = vt$ ) и двойное интегрирование разности

$$[K_{фп}(t - \tau) - K_{пр}(t - \tau)]$$

Результат, равный

$$v^2 \int_0^t \int_0^t (K_{пр}(t - \tau) - K_{пл}) dt^2,$$



е) с целью уменьшения динамических ошибок в закон регулирования вводятся производные 1, 2, 3 порядков с помощью последовательных корректирующих звеньев, и обратных связей. Кроме того, вводится цепь регулирования по возмущению. Для уменьшения динамических ошибок применен также простой и эффективный метод изменения масштаба времени входного воздействия, т. е. снижение по программе скорости движения элемента. Структурная схема одного из вариантов системы программного регулирования процесса, синтезированной на основе изложенных в статье соображений приведена на рис. 5. Блоки вычислительных устройств в цепи обратной связи и цепях коррекции программы введены в схему идеальными усилительными звеньями.

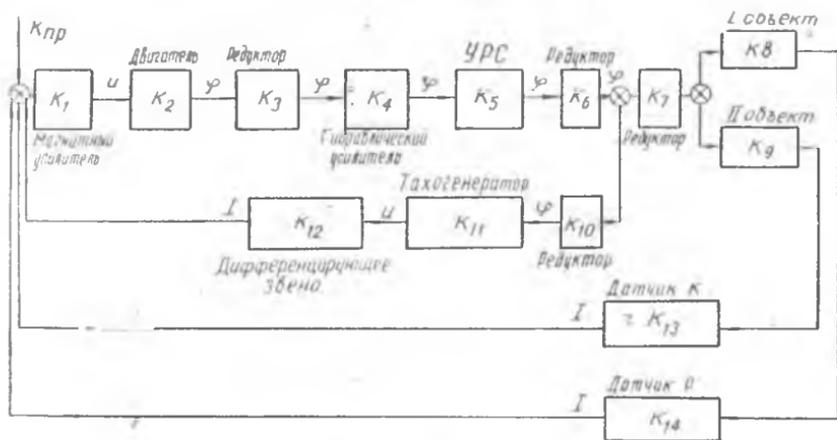


Рис. 6.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Исследование проведем частотными методами с использованием Л. А. Х.

Определим передаточные функции звеньев (рис. 6).

1. Магнитный усилитель

$$K_1(p) = \frac{k_1}{1 + pT_1} = \frac{30\,000}{1 + 0,0035p}, \quad \frac{в}{а}$$

2. Индукционный двухфазный двигатель с редуктором

$$K_2(p) = \frac{k_2}{(1 + pT_2)P} = \frac{18,1}{P(1 + 0,08p)}, \quad \frac{рад}{в}$$

3. Редуктор

$$K_3 = \frac{1}{40} = 0,025.$$

4. Гидроусилитель с регулятором УРС-5

$$K_{4(p)} = \frac{K_1}{1 + pT_4} = \frac{1}{1 + 0,03p}$$

5. Регулятор скорости УРС-5

$$K_{5(p)} = \frac{K_5}{P(1 + pT_5 + p^2T_5^2)} = \frac{100}{P(1 + 0,0002p + 0,00003p^2)}$$

Пренебрегаем  $T_5$ .

$$K_5 = \frac{100}{P(1 + 0,0002p)}$$

6. Редуктор  $K_6 = 1,33$ .

7. Редуктор  $K_7 = 0,012$ .

8. Объект регулирования разбиваем на два звена  $K_8$  и  $K_9$ .  
Проводим линеаризацию звеньев для номинального режима

$$K_8 = 1 \frac{\kappa_2 \cdot \text{см}}{\text{рад}}$$

9.  $K_9 = 1,57 \frac{1}{\text{см} \cdot \text{рад}}$

10. Редуктор  $K_{10} = 8,25$ .

11. Тахогенератор  $K_{11(p)} = K_{11}P$ .

12. Дифференцирующее звено  $K_{12(p)} = \frac{T_{12} \cdot P}{1 + T_{12}P}$

Параметры  $K_{11}$ ,  $K_{12}$  будут определены в процессе исследования.

13. Датчик кривизны в формообразующем сечении (индуктивный).

$$K_{13(p)} = \frac{K_{13}}{1 + T_{13} \cdot P} = \frac{500 \cdot 10^{-5}}{1 + 0,00007p} a \cdot \text{см}.$$

Пренебрегаем  $T_{13}$

$$K_{13(p)} = 500 \cdot 10^{-5}, a \cdot \text{см}.$$

14. Датчик усилий (индуктивный)

$$K_{14(p)} = \frac{K_{14}}{1 + T_{14} \cdot P} = \frac{780 \cdot 10^{-5}}{1 + 0,00007p} \approx 780 \cdot 10^{-5}, \frac{a}{\kappa_2}$$

Передаточная функция разомкнутой нескорректированной системы

$$K(p) = \frac{k_1 k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_7 \cdot k}{(1 + pT_1) p (1 + pT_2) (1 + pT_4) p (1 + pT_5)}$$

где  $k = k_8 \cdot k_{14} + k_9 \cdot k_{13} = 0,0156, \frac{a}{\text{рад}}$ . Пренебрегая  $T_5$

$$K(p) = \frac{336}{p^2 (1 + 0,0035p) (1 + 0,08p) (1 + 0,03p)}$$

Строим ЛАХ и ЛФК (рис. 7).

Строим желаемую ЛАХ, задавшись  $\sigma \ll 20\%$  — величиной пере-  
регулирования  $m \ll 3$  — число колебаний;

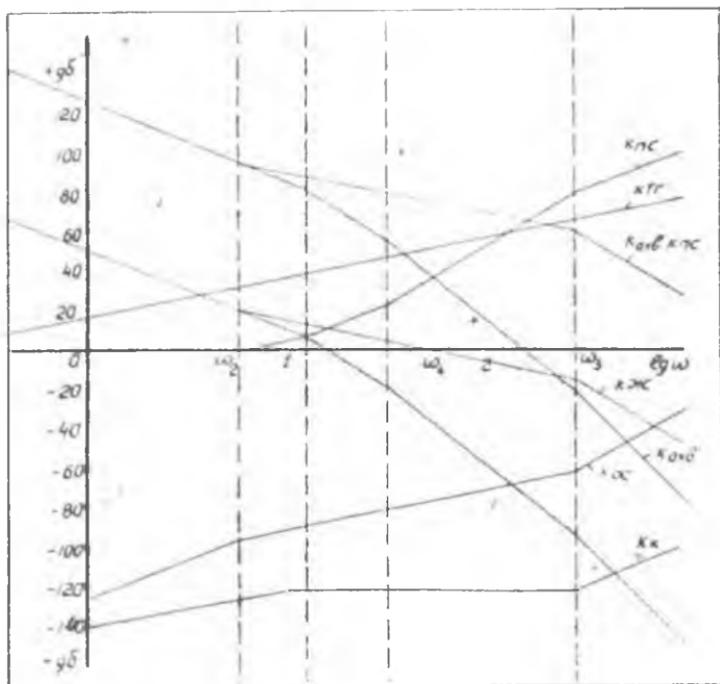


Рис. 7.

$t \ll 0,1$  сек., время переходного процесса;

$\varepsilon \ll 0,035^\circ$  — максимальная динамическая ошибка.

Характеристика гармонического воздействия  $T_{вх} = 3$  сек.

$$I_{вх} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ а.}$$

При двойном астатизме  $C_0 = 0$ ;  $C_1 = 0$ ;  $C_2 = \frac{2}{k} = \frac{2}{336}$ .

Низкочастотная часть: наклон  $40 \frac{дБ}{дек}$ .

Среднечастотная часть:  $\omega_c = 47$ , наклон  $20 \frac{дБ}{дек}$ .

Высокочастотная часть: наклон  $60 \frac{дБ}{дек}$ .

Проведя необходимые построения, находим параметры корректирующего звена (двойное дифференцирующее  $R_1 C_1 = 10^{-1}$ ).

При этом запас устойчивости по фазе  $\gamma > 40^\circ$ , по модулю  $I > 16 \text{ дб}$ .

Проведенный ориентировочный расчет одного из возможных вариантов системы регулирования свидетельствует о возможности обеспечения устойчивости и качества регулирования относительно простыми средствами.

## ВЫВОДЫ

1. Задача автоматизации процесса гибки — прокатки с обеспечением достаточной точности изделий может быть решена только на основе замкнутых систем программного регулирования.

2. Вследствие недостаточной точности математического описания объекта и наличия ряда неучитываемых возмущающих воздействий значительно снижается ценность регулирования по возмущению.

3. Регулирование по величине пластической деформации вне напряженной зоны малоэффективно, вследствие наличия постоянного запаздывания в цепи обратной связи.

4. Наиболее эффективным является регулирование по отклонению кривизны в формообразующем сечении напряженной зоны и силовым параметрам процесса в сочетании с автоматической коррекцией интегральной ошибки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Лысов. «Исследование технологических процессов свободной гибки и гибки прокатки деталей самолета». Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 1955.
2. В. А. Сахненко. «Холодная гибка и правка деталей». Машгиз, 1951.