

<https://doi.org/10.24867/JPE-1993-10-217>

ORIGINALNI NAUČNI RAD

V. A. ТАРАНЕНКО*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ОБРАБОТКИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ УПРУГОДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ
НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ

1.0 УВОД

При отсутствии достаточно полной и точной информации об объекте управления, идеализация динамических свойств элементов САУ, ее расчетные характеристики могут существенно отличаться от реальных, а выбранные при проектировании параметры (настройки) регуляторов не обеспечат заданного качества управления и даже устойчивости системы. Кроме того, для рассматриваемых систем характерны широкие пределы вариаций параметров объекта управления. Причем в технологических системах, содержащих нежесткую заготовку, параметры могут значительно изменяться в течение цикла обработки одной детали. Указанные обстоятельства осложняют задачу обеспечения устойчивости САУ и требуют особенно тщательного подхода к вопросам выбора ее структуры и синтеза корректирующих устройств.

Разработка математической модели объекта управления в динамике, адекватной объекту - оригиналу, является необходимой предпосылкой для последующего обоснованного подхода к решению задачи анализа устойчивости по заданным показателям качества управления в переходных режимах. Причем в подобных системах показатели качества управления выходной координатой - упругими деформациями технологической системы в динамике непосредственно характеризуют погрешности формы детали, обусловленные действием быстроизменяющихся возмущений типа изменения припуска на обработку, вариаций физико-механических свойств обрабатываемого материала и т.п.

* Др. Виктор Тараненко, дипл. инж. рядовни професор
Севастопольски приборостроительны институт, Севастополь
(СНГ)

Rad je bio izložen (saopšten) 1992. god., kao jedan od radova slušaocima poslediplomskih studija na smeru Katedre za obradu metala skidanjem strugotine, prilikom boravka po pozivu Prof.dr V.A.Taranenka na Institutu za proizvodno mašinstvo

Изложенное делает целесообразным создание более совершенных моделей объекта управления - технологической системы с жесткой деталью, проведение оценки обработки с учетом динамических свойств и характеристик технологической системы.

2.0 ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ

На основании рассмотрения физической модели, сечения, срезаемого слоя при продольном течении с учетом внутренних связей в объекте и особенностей резания "по следу", когда компоненты срезаемого слоя металла в текущий момент времени определяются как положением режущей кромки резца в текущий момент времени t , так и координатами режущей кромки в момент времени $t - \tau$ предыдущего оборота заготовки, получена система уравнений в операторной форме, описывающих объект управления - технологическую систему токарной обработки в виде [1]

$$\begin{aligned}
 P_{\xi}(s) &= m_{\xi}(s)a(s) + n_{\xi}(s)b(s) + q_{\xi}(s)c(s), \\
 a(s) &= \frac{1}{s}(1 - e^{-s\tau})S_{ap}(s) - (1 - e^{-s\tau})Y_x(s) - K_{\varphi}(1 - e^{-s\tau})Y_y(s), \\
 b(s) &= \frac{1}{s\tau}(1 - e^{-s\tau})b_1(s) - Y_y(s), \\
 c(s) &= \frac{1}{s\tau}(1 - e^{-s\tau})c_1(s), \\
 Y_{\xi}(s) &= K_{\xi}(s)P_{\xi}(s) + \Delta Y_{f_{\xi}}(s).
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $P_{\xi}(s)$ - составляющие сил резания; $m_{\xi}(s) = (\partial P_{\xi} / \partial a)_0$, $n_{\xi}(s) = (\partial P_{\xi} / \partial b)_0$, $q_{\xi}(s) = (\partial P_{\xi} / \partial c)_0$ - коэффициенты для составляющих силы резания по приращению, соответственно, приведенной толщины среза $a(s)$ (здесь и в дальнейшем знак приращений Δ для упрощения опущен), глубины резания $b(s)$ и твердости обрабатываемого материала $c(s)$; $\xi = \{x, y, z\}$; $K_{\varphi} = ctg\varphi$. Дополнительные силовые воздействия, формируемые на технологическую систему с целью управления упругодеформированным состоянием детали, приводят, в общем случае к появлению дополнительных деформаций упругой системы по каждой из координат, что учитывается введением в последнее соотношение системы уравнений (1) второго слагаемого - $\Delta Y_{f_{\xi}}(s)$, конкретный вид взаимосвязей которых определяется различными силовыми управляющими воздействиями.

Учитывая, что время запаздывания $\tau = 1/n_{шп}$ обычно на порядок больше постоянных времени упругой системы и процесса резания, станок устойчив, можно положить передаточные функции $m_{\xi}(s)$, $n_{\xi}(s)$ и $K_{\xi}(s)$ в системе уравнений (1) равными, соответствующим коэффициентам передачи:

$$m_{\xi} = \left(\frac{\partial P_{\xi}}{\partial a} \right)_0, \quad n_{\xi} = \left(\frac{\partial P_{\xi}}{\partial b} \right)_0, \quad K_{\xi} = \left(\frac{\partial Y_{\xi}}{\partial P_{\xi}} \right)_0, \quad \xi \in \{X, Y, Z\}. \quad (2)$$

Таким образом, уравнения (1) с учетом (2) описывают динамические свойства технологической системы при продольном точении. Процесс поперечного точения может рассматриваться как частный случай продольного, и описанная обобщенная математическая модель может использоваться и при его алгоритмизации. Система уравнений при этом значительно упрощается благодаря тому, что при поперечном точении отсутствует осевая составляющая силы резания, а подача направлена по координате y .

Эквивалентные (суммарные) упругие перемещения технологической системы при обработке нежестких деталей целесообразно представить в виде двух слагаемых

$$Y_{\xi} = Y_{\xi c} + Y_{\xi g} \quad (3)$$

где $Y_{\xi c}$ и $Y_{\xi g}$ - соответственно упругие перемещения станка-приспособления-инструмента и детали по каждой координате, $\xi \in \{X, Y, Z\}$. Первое слагаемое в этом выражении для рассматриваемых технологических систем, как правило, на порядок меньше второго и им ^{МОЖНО} пренебречь.

3.0 ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ

Характерные особенности процесса обработки нежестких деталей учитываются введением соответствующих уравнений связи, отражающих в том числе и связь дополнительных упругих деформаций ΔY_{ξ} в последнем уравнении системы (1) с силовыми управляющими воздействиями. Упругие деформации технологической системы в радиальном направлении y в соответствии с уравнениями про-

гибов в установившихся режимах без учета замкнутости объекта управления рассматриваются как детерминированная нелинейная функция

$$Y_y = f(L, d, EI, P_z, P_y, P_x, P_{x1}, e, P_{gon.i}, M_i, M_{kp}, X). \quad (4)$$

Учитывая, что при реальных значениях величины продольной подачи скорость изменения координаты X относительно невелика, при анализе переходных процессов "в малом" можно пренебречь изменением координаты X в функции времени. Тогда уравнение (4) для приращений в операторной форме имеет вид

$$Y_y(s) = K_{xy}P_x(s) + K_{yy}P_y(s) + K_{zy}P_z(s) + K_{Px1}P_{x1}(s) + K_e e(s) + K_{Pgon.i}P_{gon.i}(s) + K_{Mi}M_i(s) + K_{Mkp}M_{kp}(s). \quad (5)$$

где двойные индексы при коэффициентах K означают, что коэффициенты K_{xy}, K_{zy} указывают влияние приращения составляющих P_x, P_z на приращения упругих деформаций по координате y , $K_e = K'_e \cdot P_{x10}$. Коэффициенты передачи линеаризованных уравнений определяются как частные производные от функций прогиба по соответствующей переменной. Так, например, для технологической системы обработки при действии растягивающей силы P_{x1} , создающей упругодеформированное состояние, коэффициенты передачи получены в виде:

$$K_{yy} = (\partial Y_y / \partial P_y)_0 = L^3 [1 - \cos(2\pi x_0 / L)]^2 / 2\pi^2 [4\pi^2 EI + P_{x10} L^2], \quad (6)$$

$$K_{Px1} = (\partial Y_y / \partial P_{x1})_0 = -Y_{y0} L^2 / (4\pi^2 EI + P_{x10} L^2). \quad (7)$$

где P_{x10} и Y_{y0} - значения растягивающей силы и упругой деформации детали по оси y в точке линеаризации (значений переменных относительно которых даются приращения переменных). В рассматриваемом частном случае остальные коэффициенты, входящие в соотношение (5), равны нулю.

Упругие деформации по координате Z при обработке жестких деталей малого диаметра оказывают влияние на изменение глубины резания и после линеаризации записываются в операторном виде

$$b_z(s) = K_{bz} Y_z(s) \quad (8)$$

где K_{bz} - коэффициент передачи, устанавливающий взаимосвязь

между приращением глубины резания δ и составляющей P_z сил резания.

Динамические свойства рассматриваемых технологических систем обработки нежестких упругодеформированных деталей описываются системой уравнений [2]

$$\begin{aligned}
 P_z(s) &= m_z a(s) + n_z b(s) + q_z C(s), \\
 a(s) &= \frac{1}{s} (1 - e^{-st}) S_{np}(s) - (1 - e^{-st}) Y_x(s) - K_{\phi} (1 - e^{-st}) Y_y(s), \\
 b(s) &= \frac{1}{st} (1 - e^{-st}) b_1(s) - Y_y(s) - K_{b_z} Y_z(s), \\
 Y_x(s) &= K_x P_x(s), \quad Y_z = K_z P_z(s), \\
 Y_y(s) &= K_{xy} P_x(s) + K_{yy} P_y(s) + K_{zy} P_z(s) + K_{pxl} P_{xl}(s) + K_e e(s) + \\
 &\quad + K_{p_{gon,i}} P_{gon,i}(s) + K_{M_i} M_i(s) + K_{M_{kp}} M_{kp}(s), \\
 c(s) &= \frac{1}{st} (1 - e^{-st}) c_1(s).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Обобщенная структурная схема, соответствующая системе уравнений (9), приведена на рис. 1. На этой схеме для упрощения не учтен канал воздействия, отражающий приращение твердости $C(s)$ обрабатываемого материала. Учет влияния составляющей силы P_z на глубину резания приводит к появлению в структуре объекта дополнительного контура отрицательной обратной связи. Следует отметить, что в случае растачивания и внутреннего шлифования связь через K_{β_z} превращается в положительную - приращение упругих деформаций по координате ведет к увеличению глубины резания, что может служить дополнительной причиной неустойчивости технологической системы.

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что коэффициенты передачи объекта управления изменяются в 20-50 раз, а его постоянные времени в 10 раз и более, что требует применения для управления адаптивных систем управления. При использовании в качестве регулирующего воздействия дополнительных внешних сил, изменяющих упругодеформированное состояние детали, а за выходную координат принимают приращение упругих деформаций U_y в радиальном направлении, передаточная функция технологической системы для обобщенной модели при точении имеет вид

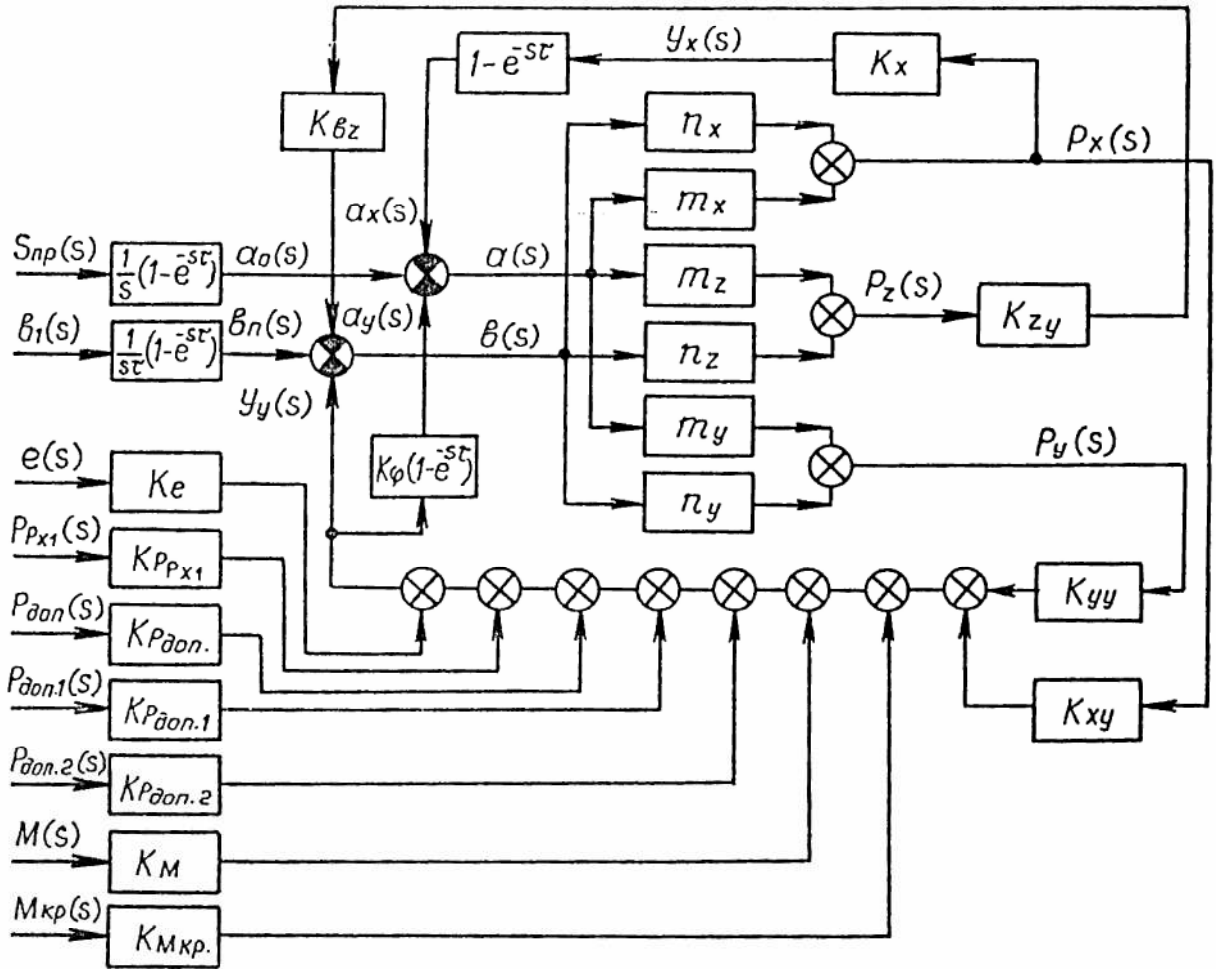


Рис. 1. Обобщенная структурная схема технологической системы при управлении упругодеформированным состоянием нежестких заготовок

$$W_{IT}(s) = \frac{Y_y(s)}{P_{x1}(s)} = \frac{[1 + A_1(1 - e^{-st})]}{[1 + B_1(1 - e^{-st})]} K_{OT}, \quad (10)$$

$$K_{OT} = K_{P_{x1}} K_o, \quad K_o = 1 / (1 + K_{xy} n_x + K_{bz} K_z n_z + K_{yy} n_y) \quad (11)$$

$$B_{IT} = K_o \{ m_x K_x + K_\varphi (m_y K_y + K_{xy} m_x + K_{xy} n_x K_y m_y) - K_{bz} K_z [m_z n_z K_x - n_z m_x K_x - K_\varphi (n_z K_y m_y + m_z)] - K_{yy} [m_y n_x K_x - n_y m_x K_x - K_\varphi (n_y m_y K_y + m_y)] \},$$

$$A_{IT} = m_x K_x + m_y K_y K_\varphi.$$

При известных значениях коэффициентов, входящих в (10), (11), коэффициенты A_{IT} и B_{IT} могут быть существенно упрощены и из обобщенной модели (10) технологической системы продольного точения упругодеформированных нежестких валов получен ряд частных моделей значительно облегчающих инженерные расчеты и анализ.

Аналогично на основе обобщенной структурной схемы (рис. 1) и системы уравнений (9) получены частные динамические модели технологических систем для других регулирующих воздействий, отличающихся от (11) только значениями коэффициента K_{OT} передачи объекта - вместо коэффициента $K_{P_{x1}}$ в выражении (11), в этом случае в качестве сомножителей входят коэффициенты передачи по соответствующему воздействию: $K_{P_{доп. i}}$, K_{M_i} .

На основании анализа физической модели и схемы формирования сечения среза при шлифовании упругодеформированных нежестких валов с продольными подачами при регулирующем воздействии в виде дополнительных силовых факторов разработана обобщенная математическая модель процесса и получена передаточная функция технологической системы для наружного шлифования нежестких упругодеформированных валов для выходной переменной в виде упругой деформации U_y системы.

Из анализа полученных результатов следует, что математическую модель технологической системы при шлифовании можно рассматривать как частный случай модели технологической системы токарной обработки [1, 2]

С достаточной для практических инженерных расчетов степенью точности аппроксимирующее выражение для передаточных функций целесообразно строить при удержании одного или двух членов разложения показательной функции e^{-st} в ряд Паде, при

Режимы резания, расчетные и экспериментальные значения постоянных времени переходных процессов при управляющем воздействии

Таблица 1.

| № пп | $n_{шп}$ | τ | φ | V_p | β | $S_{пр}$ | $У_0$ | $P_{У_0}$ | $T_{1э}$ | $T_{1р}$ | ΔT |
|---------|----------|--------|-----------|-------|---------|----------|-------|-----------|----------|----------|------------|
| | об/мин | с | град. | м/с | мм | мм/об. | мкм | Н | с | с | % |
| I | 250 | 0,24 | 45 | 0,065 | 0,5 | 0,14 | 36 | 80 | 0,2 | 0,18 | 10 |
| 2 | 250 | 0,24 | 90 | 0,065 | 0,5 | 0,2 | 21 | 40 | 0,14 | 0,12 | 14 |
| 3 | 250 | 0,24 | 90 | 0,065 | 0,7 | 0,2 | 23 | 49 | 0,16 | 0,15 | 6 |
| 4 | 630 | 0,095 | 45 | 0,165 | 0,4 | 0,1 | 24 | 52 | 0,095 | 0,09 | 5 |
| 5 | 630 | 0,095 | 90 | 0,165 | 0,5 | 0,14 | 19 | 32 | 0,07 | 0,075 | -7 |
| 6 | 920 | 0,065 | 90 | 0,24 | 0,2 | 0,25 | 22 | 48 | 0,052 | 0,057 | -9 |
| 7 | 920 | 0,065 | 90 | 0,24 | 0,5 | 0,25 | 27 | 65 | 0,063 | 0,06 | 5 |
| 8 | 920 | 0,065 | 90 | 0,24 | 0,4 | 0,25 | 30 | 56 | 0,063 | 0,07 | -11 |
| 9 | 1260 | 0,047 | 45 | 0,33 | 0,4 | 0,2 | 45 | 88 | 0,039 | 0,037 | 5 |
| 10 | 1260 | 0,047 | 90 | 0,33 | 0,5 | 0,2 | 22 | 45 | 0,052 | 0,046 | 11 |
| 11 | 1260 | 0,047 | 90 | 0,33 | 0,3 | 0,2 | 20 | 38 | 0,043 | 0,038 | 11 |
| 12 | 1680 | 0,036 | 45 | 0,44 | 0,2 | 0,148 | 18 | 24 | 0,032 | 0,03 | 6 |
| 13 | 1680 | 0,036 | 90 | 0,44 | 0,5 | 0,148 | 21 | 30 | 0,035 | 0,029 | 17 |
| 14 | 1680 | 0,036 | 90 | 0,44 | 0,7 | 0,148 | 25 | 35 | 0,044 | 0,04 | 9 |

Режимы резания, расчетные и экспериментальные значения постоянных времени переходных процессов при управляющем воздействии

Таблица 2.

| № пп | $n_{шп}$ | τ | φ | V_p | β | $S_{пр}$ | $У_0$ | $P_{У_0}$ | $T_{1э}$ | $T_{1р}$ | ΔT |
|---------|----------|--------|-----------|-------|---------|----------|-------|-----------|----------|----------|------------|
| | об/мин | с | град. | м/с | мм | мм/об. | мкм | Н | с | с | % |
| I | 900 | 0,066 | 90 | 1,18 | 2,5 | 0,2 | 16 | 110 | 0,06 | 0,052 | 13 |
| 2 | 1800 | 0,033 | 90 | 1,88 | 0,75 | 0,2 | 11 | 50 | 0,02 | 0,021 | -5 |
| 3 | 2000 | 0,03 | 90 | 0,84 | 0,5 | 0,14 | 14 | 30 | 0,028 | 0,025 | 10 |
| 4 | 2000 | 0,03 | 90 | 1,47 | 2,5 | 0,14 | 12 | 80 | 0,032 | 0,029 | 9 |
| 5 | 1800 | 0,033 | 90 | 2,07 | 1,0 | 0,2 | 13 | 58 | 0,03 | 0,027 | 10 |
| 6 | 1800 | 0,033 | 90 | 1,5 | 2,0 | 0,1 | 12 | 52 | 0,04 | 0,032 | 20 |
| 7 | 1800 | 0,033 | 90 | 1,13 | 1,0 | 0,14 | 10 | 39 | 0,029 | 0,028 | 3 |
| 8 | 1800 | 0,033 | 90 | 1,18 | 2,5 | 0,2 | 18 | 110 | 0,044 | 0,041 | 7 |
| 9 | 1800 | 0,033 | 90 | 1,88 | 2,0 | 0,25 | 21 | 147 | 0,043 | 0,05 | -16 |
| 10 | 1800 | 0,033 | 90 | 1,5 | 2,0 | 0,14 | 17 | 70 | 0,035 | 0,033 | 6 |

этом знаменатель передаточной функции (10), приводится к форме апериодического звена второго или первого порядка, а числители после преобразований приводятся также к виду типовых звеньев. Из проведенных исследований выявлено, что динамические структуры моделей технологических систем при управлении упругодеформированным состоянием деталей включают, наряду с инерционными звеньями, характерными для моделей управления по каналу подачи, также форсирующие звенья. Наличие форсирующих звеньев в передаточных функциях моделей снижает инерционность объекта при управлении по каналам дополнительных силовых воздействий.

4.0 ЗАВЕР

Рассмотренное математическое описание объекта управления выполнено при пренебрежении "малыми" постоянными времени, характеризующими динамические свойства процесса резания и эквивалентной упругой системы. Такой подход представляется оправданным, так как в контур систем адаптивного управления, наряду с объектом, входят также автоматическое управляющее устройство и другие звенья с "большими" постоянными времени, динамические свойства которых являются определяющими для решений анализа устойчивости системы и синтеза корректирующих звеньев.

Результаты экспериментальных исследований динамических характеристик технологических систем во временной и частотной плоскостях свидетельствуют о том, что представленные математические модели с удовлетворительной для практики точностью описывают свойства объекта - оригинала. Величина ошибки в расчетном определении постоянных времени Табл. 1, 2 в основном не превышала 20%.

5.0 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тараненко В.А., Абакумов А.М. Динамические модели для оценки точности технологических систем. - М.: ВНИИТЭМР.-1989, вып. 2. - 54С.
- [2] Тараненко В.А. Технологические методы автоматизации и управления точностью формобразования нежестких упругодеформированных деталей. Автореферат диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук. - Москва, 1991-29 с.