

Стабилизация коэффициента усиления замкнутого контура в системе управления процессом резания

Генералов Леонтий Константинович

доцент Владимирского государственного университета им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, канд. техн. наук.

Мочалова Марина Ивановна

директор ООО «Теплотехника-Центр», г. Владимир,

Генералов Александр Леонтьевич

гл. инженер ООО «Теплотехника-Центр», г. Владимир

При проектировании систем автоматического управления (САУ) с моделями состояния процесса резания одним из определяющих условий является поддержание стабильного коэффициента усиления контуров в условиях внешних возмущений. При формализованном описании внешних возмущений, обусловленных процессом резания, возникают сложности, связанные со специфической природой явлений и вероятностным характером их появления. Для учета возмущений внешней среды в условиях неустойчивости и неопределенности воспользуемся настраиваемыми моделями отдельных структурных блоков САУ.

Для одномерных приводов, работа которых характеризуется показателем качества, зависящим от одной выходной координаты, построим модель, состоящую из четырех блоков: объекта управления или процесса резания; привода подачи; моментного датчика и устройства автоматического управления. [4, с. 93]

Представим процесс резания моделью, включающей интегрирующее и инерционное звено, со структурной схемой, показанной на рис.1, где: S_M – заданное значение минутной подачи; $Y_1(t)$ – входная координата объекта управления; $Y_0(t)$ – выходная координата объекта управления; $E_0(t - \tau)$ – задержанное значение промежуточной переменной $E_0(t)$; D_0 – приведенная податливость технологической системы; τ – время задержки прохождения входного сигнала; $Y(t)$ – выходная координата с учетом нелинейности процесса резания; C_p – коэффициент пропорциональности численно равный произведению коэффициентов, учитывающих условия обработки; $P(t)$ – сила резания.

На схеме видно, что нелинейность присущая процессу резания, для упрощения модели, вынесена за контур образованный податливостью технологической системы.

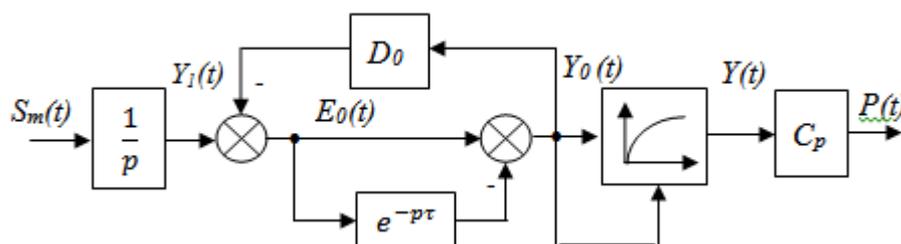


Рис. 1. Структурная схема модели процесса резания

Это позволяет исключить в процессе решения нелинейного алгебраического уравнения или эквивалентного ему итерационного процесса, неустойчивость процесса резания. В нашем случае считаем процесс резания устойчивым и не отождествляем устойчивость привода и процесса резания.

Согласно структурной схеме, динамику процесса резания опишем уравнением первого порядка:

$$\frac{dY_1(t)}{dt} = S_m(t), \quad (1)$$

Выходная координата объекта управления $Y_0(t)$ вычисляется по рекуррентному соотношению:

$$E_0(t) = Y_1(t) - \frac{D_0 Y_0(t)}{1 + D_0}, \quad (2)$$

$$Y_0(t) = E_0(t) - E_0(t - \tau); \quad (3)$$

Первоначально принимаем $E_0(t) = 0$ и для задержки сигнала используем соответствующий блок.

Датчик момента, является динамическим элементом, входящим в неизменяемую часть системы. Представим его в виде апериодического звена первого порядка:

$$\frac{dY}{dt} = \frac{K_d M(t) - Y_3(t)}{T_d}, \quad (4)$$

где $Y_3(t)$ – выходная координата датчика; K_d и T_d – коэффициент передачи и постоянная времени датчика; $M(t)$ - измеряемый момент.

Безинерционную нелинейность в объекте представим в виде изменения силы резания, определяемую выражением:

$$P = C_p S^Y, \quad (5)$$

где: Y – показатель степени при подаче.

Модель системы управления начинается с проверки скорости нарастания силы резания:

$$D_p = P(t) - P(t - \Delta t). \quad (6)$$

Если $D_p \geq D_{op}$, то $S_M = 0$, где: D_p и D_{op} – скорость нарастания силы резания и допустимая скорость нарастания силы резания соответственно; Δt – шаг квантования по времени.

Расчет рассогласования, обусловленного изменением силы резания E_p , выполним по регулируемому параметру $P(t)$:

$$E_p = P_0 - P(t). \quad (7)$$

Если регулирование происходит одновременно по трем параметрам: силе; моменту; мощности, тогда выделяется минимальное из рассогласований E_R , поступающего на вход регулятора:

$$E_R = \min\{E_p, E_M, E_N\}. \quad (8)$$

Для обеспечения инвариантности коэффициента передачи разомкнутого контура при

регулировании момента или мощности резания выполняется учет влияния диаметра обработки и частоты вращения заготовки.

При регулировании момента одно и то же значение может быть получено при разных значениях силы резания P и диаметра обработки D :

$$M = P_1 D_1 = P_2 D_2, \quad (9)$$

то же для мощности:

$$N = P_1 D_1 n_1 \frac{\pi}{30} = P_2 D_2 n_2 \frac{\pi}{30}. \quad (10)$$

Используя (9) запишем отношение двух значений коэффициента передачи объекта при различных значениях силы резания и подачи:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{P_1 \cdot S_2}{P_2 \cdot S_1}. \quad (11)$$

Используя выражение (10) соотношение коэффициентов передачи при различных значениях мощности и частоты вращения имеет вид:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{D_2 \cdot n_2 \cdot S_2}{D_1 \cdot n_1 \cdot S_1}. \quad (12)$$

Подставляя выражение для силы резания (5) в (9), получим значение подач при переходе от диаметра обработки D_1 к диаметру D_2 :

$$S_1 = \left(\frac{M}{D_1 C_p} \right)^{\frac{1}{Y}}, \quad (13)$$

$$S_2 = \left(\frac{M}{D_2 C_p} \right)^{\frac{1}{Y}} \quad (14)$$

и подставляя их в (11) получим выражение для коэффициента регулирования момента:

$$K_1 = K_2 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{\frac{1}{Y}-1}. \quad (15)$$

Точно также для регулирования мощности:

$$K_1 = K_2 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{\frac{1}{Y}-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{\frac{1}{Y}-1}. \quad (16)$$

Из двух последних выражений видно, что при изменении диаметра и частоты вращения заготовки коэффициент передачи объекта управления равен:

$$K_o = \frac{\partial P}{\partial S_o} = Y \frac{P}{S_o}. \quad (17)$$

Для обеспечения инвариантности передаточный коэффициент K_o должен изменяться в соответствии с (15) и (16). Таким образом, для сохранения коэффициента передачи на уровне K_1 необходимо помножить K_2 на коэффициенты, нелинейно зависящие от отклонения диаметров обработки и частоты вращения шпинделя.

Показатель степени Y , входящий в (15) и (16), выбирается по справочнику технолога [1]. Так для наружного точения стали $Y = 0,4$.

При вычислении нелинейно зависящих от отношения диаметров и частот вращения коэффициентов, применено разложение нелинейностей в ряд Тейлора с использованием полинома четвертой степени. Такой подход определяется точностью регулятора, когда допускаемая ошибка аппроксимации, должна составлять единицы процентов.

Определение значений выходных переменных регулятора и их суммы $Y_1(t)$ проведем методом трапеций, используя линейную аппроксимацию процесса, согласно методике приведенной В.А. Кудиновым [3]. В качестве регулятора применим ПИД – регулятор для получения интегральной составляющей:

$$Y_1(t) = Y_1(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} E_R(t) + \frac{\Delta t}{2} E_R(t - \Delta t), \quad (18)$$

где $E_R(t), Y_1(t)$ - входная и выходная координаты регулятора в момент времени t , Δt – шаг квантования по времени.

Производная от сигнала $E_R(t)$, действующего на входе регулятора в момент времени t , определяется выражением:

$$Y_D = \frac{E_R(t) - E_R(t - \Delta t)}{\Delta t}, \quad (19)$$

где коэффициенты передачи соответствующих составляющих регулятора отделяется из синтеза [2, 3].

Определение выходных координат местной обратной связи в модели процесса резания, выполнено в виде последовательности аperiodических звеньев и проведено с использованием дифференциально - разностного представления аperiodического звена. Передаточная функция аperiodического звена имеет вид:

$$W_a(p) = K_a(1 + T_a p) = \frac{K_a}{T_a} \cdot \frac{1}{p + 1/T_a}, \quad (20)$$

которой соответствует отображение [57]

$$(p + \alpha) \Rightarrow (1 - Z^{-1}e^{-\alpha t}), \quad (21)$$

где $\alpha = \frac{1}{T_a}$, Z – оператор преобразования.

Отсюда дифференциально-разностное представление выходной координаты $Y_a(t)$ аperiodического звена равно:

$$Y_a(t) = \frac{K_a}{T_a} X_a(t) + e^{-\frac{T}{T_a}} Y_a(t - \Delta t). \quad (22)$$

Аппроксимация запаздывания в объекте с четырьмя аperiodическими звеньями позволяет при достаточной точности аппроксимации обеспечить устойчивость системы [5].

В этом случае на выходе сумматора, формирующего сигнал местной обратной связи, действует алгебраическая сумма пяти переменных с соответствующими коэффициентами передачи по каждому входу сумматора, определяемыми из соотношения:

$$Y_{\Sigma 1}(t) = S_M(t) + K_{dS}(S_M(t) - S_M(t - \Delta t)) + K_{\tau S1} S_M(t - \tau) + S_M\left(t - \frac{3\tau}{4}\right) + K_{\tau S3} S_M\left(t - \frac{\tau}{2}\right) + K_{\tau S4} S_M\left(t - \frac{\tau}{4}\right), \quad (23)$$

где $S_M(t)$ – выходной сигнал обратной связи или текущее значение минутной подачи, определяемое датчиком скорости подачи; $K_S, K_{dS}, K_{\tau S1}, K_{\tau S2}, K_{\tau S3}, K_{\tau S4}$ – коэффициенты передачи в канале обратной связи, соответствующие производным от $S_M(t)$ и задержанным на $3\tau/4, \tau/2, \tau/4$, причем $\tau = \frac{60}{n(t)}$ запаздывание в объекте.

При использовании корректирующего блока или фильтра в модели процесса резания, расчет выходной координаты выполняется с помощью апериодического звена первого порядка. Дифференциально-разностное представление этого фильтра аналогично (22) и определяется выражением:

$$Y_{F1}(t) = \frac{K_{F1}}{T_{F1}} X_{F1}(t) + e^{-\frac{T}{T_{F1}}} Y_{F1}(t - \Delta t), \quad (24)$$

где $Y_{F1}(t)$ – выходная координата фильтра; X_{F1} – входная координата, ($Y_{F1}(t) = S_M(t)$).

Ограничения нижнего значения величины подачи на оборот $S_{OM}(t)$, используемого для учета величины, обратной коэффициенту передачи объекта выполняется из условия:

$$S_{OMi}(t) = \begin{cases} S_{OM}(t), & \text{если } S_{OM} > S_{OMi} \\ S_{OMi}(t), & \text{если } S_{OM} \leq S_{OMi} \end{cases} \quad (25)$$

где $S_{OMi}(t)$ – минимальное заранее заданное значение, определяющее верхнее значение коэффициента передачи контура самонастройки.

Предварительно значение $S_{OM}(t)$ вычисляется делением текущего значения выходной координаты первого фильтра $Y_{F1}(t)$ на текущее значение частоты вращения шпинделя $n(t)$.

Расчет величины, обратной коэффициенту передачи объекта и выходного сигнала сумматора $Y_{\Sigma 3}(t)$ определим используя выражения:

$$K_{0i}(t) = \frac{S_{OM}(t)}{P_y(t)}, \quad (26)$$

$$Y_{\Sigma 3}(t) = Y_Y(t) - Y_{\Sigma 1}(t); \quad (27)$$

$$Y_Y(t) = K_{0i}(t) \cdot Y_{\Sigma 1}(t). \quad (28)$$

Определение выходной переменной фильтра, являющегося цифровым аналогом интегродифференцирующего фильтра, выполняется по передаточной функции:

$$W_{K2}(S) = \frac{(T_{21}p+1) \cdot (T_{22}p+1)}{(T_{23}p+1) \cdot (T_{24}p+1)} \quad (29)$$

Используя прямое преобразование Лапласа получим дискретную передаточную функцию фильтра:

$$H_{F2}(Z) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} a_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^{M-1} b_k z^{-k}} K_{F2}, \quad (30)$$

где:

$$K_{F2} = \frac{T_{21} \cdot T_{22}}{T_{23} \cdot T_{24}}, \quad (31)$$

$$a_0 = 1; a_1 = -\left(e^{-\frac{T}{T_{21}}} + e^{-\frac{T}{T_{22}}}\right); a_2 = e^{-T\left(\frac{1}{T_{21}} + \frac{1}{T_{22}}\right)}; \quad (32)$$

$$b_0 = 1; b_1 = -\left(e^{-\frac{T}{T_{23}}} + e^{-\frac{T}{T_{24}}}\right); b_2 = e^{-T\left(\frac{1}{T_{23}} + \frac{1}{T_{24}}\right)}, \quad (33)$$

где $T = \Delta t$ – шаг квантования по времени.

Первоначально для упрощения задачи при отладке использовался фильтр порядка $k=1$ со значениями $T_{22} = T_{24} = 0$.

Рассмотренный алгоритм управления процессом резания позволяет моделировать функционирование предельного адаптивного устройства и исследовать его поведение при различных входных воздействиях в условиях возмущений и ограничений.

Данное математическое обеспечение позволяет синтезировать и уточнять оптимальные значения настроечных параметров одномерных приводов, как составных частей нелинейной оптимальной системы управления.

Список литературы:

1. Справочник технолога машиностроителя: в 2-х ч. / под ред. А.М. Дальского [и др.] – 5-е изд. испр. – М.: Машиностроение, 2003. - 944 с.: ил. – ISBN 5-94275-015-7.
2. Гжиров, Р.И. Программная обработка на станках с ЧПУ: справочник / Р.И. Гжиров, П.П. Серебрицкий. - Л.: Машиностроение, 1990. – 588 с.
3. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1977. – 192 с
4. Легаев, В.П. Модельное управление точностью обработки на металлорежущих станках: монография / В.П. Легаев, А.А. Кобзев, Л.К. Генералов. – Владимир: ВлГУ, 2010. - 166 с. - ISBN 978-5-9984-0058-2.
5. Пат. 875335 А1 Российская Федерация. МПК⁵ G05B11/01. Устройство для регулирования силовых параметров процесса резания / Беляков В.И. Горнев В.Ф., Софрышев А.В.; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана. - № 28790730; заявл. 29.02.80; опубл. 23.10.81.