

УДК 519.25

**В.П. Долгин, доцент, канд. техн. наук**

Севастопольский национальный технический университет,  
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053,  
autosev@ukr.net

**МЕТОДИКА КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

*Изложена методика коррекции динамической системы, включающей линейные звенья и звено задержки. Сформулирован критерий выбора параметра коррекции. Приведены результаты имитационного моделирования.*

**Ключевые слова:** критерий, передаточная функция, устойчивость, аппроксимация, полином.

**Постановка проблемы.** Целью анализа динамических систем является оценка качества, определение параметров и характеристик системы. Одной из основных является характеристика ее устойчивости. Технические системы, состоящие из устойчивых звеньев, не нуждаются в проверке устойчивости. Введение обратных связей, например с целью коррекции, может привести к потере устойчивости. В этом случае необходима проверка устойчивости и оценка предельного коэффициента передачи. В общем случае исследуемая система может иметь в своем составе нелинейные звенья. Эффективными методами решения задачи оценки устойчивости при анализе нелинейных систем являются частотные методы критериальной оценки [1–3], позволяющие определить критические режимы ее работы. Оценка частотного диапазона является особой задачей. Кроме того, задача оценки порядка нелинейной динамической системы вызывает принципиальные затруднения, устранение которых требует поиска путей ее решения. Оценка качества динамической системы, характера переходного процесса и ее быстродействия могут быть получены по переходной характеристике, построение которой для нелинейных систем требует затраты значительных вычислительных ресурсов и для сложных систем высокого порядка нереализуемы.

**Анализ последних публикаций и исследований.** Синтез системы автоматического управления (САУ) процессом шлифования представляет собой достаточно сложную задачу из-за необходимости описания и учета ряда факторов, среди которых наиболее существенным является учет динамики технологического процесса. В ряде случаев для уточнения параметров модели управления процессом прибегают к синтезу системы на основе обработки наблюдений, введению адаптации в контур управления по физическим, либо формальным параметрам. При описании системы управления процессом круглого шлифования может быть представлен звеном задержки [1], либо его упрощенной моделью – инерционным звеном, что является в ряде случаев допустимым приближением.

По известным параметрам звеньев технологической системы требуется найти параметры коррекции, обеспечивающие устойчивость системы автоматического управления глубиной резания операции круглого шлифования, отсутствие перерегулирования при изменении ее режимов и требуемую точность динамической модели.

Рассмотрим систему управления процессом шлифования, изображенную на рисунке 1, которая состоит из двигателя 1 постоянного тока, кинематически связанного через редуктор 2 с ходовым винтом 3 шлифовальной бабки 4.

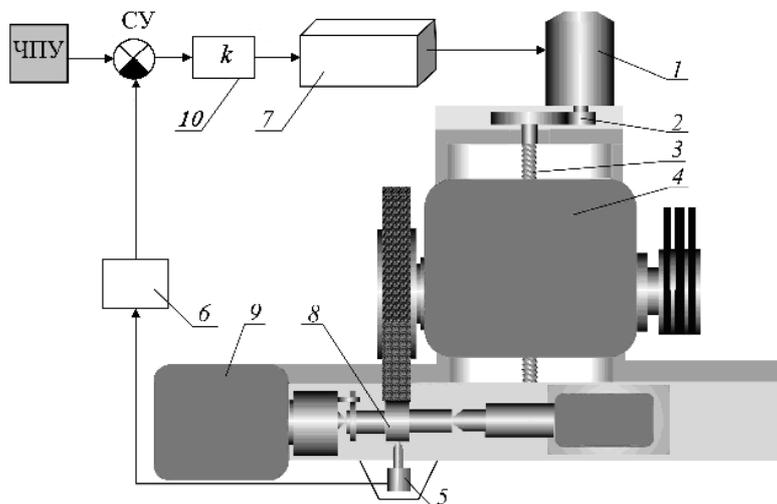


Рисунок 1 – Схема управления процессом

Для измерения величины удаленного припуска используется индуктивный измерительный датчик активного контроля непрерывного действия 5, подключенный к усилителю 6. Питание двигателя 1 осуществляется преобразователем 7. Деталь 8 устанавливается в центрах шлифовального станка и приводится во вращение приводом передней бабки 9. Для обеспечения заданного качества переходного процесса введен корректор 10.

**Целью данной статьи** является изложение методики выбора параметров звена коррекции, обеспечивающего заданную точность реализации технологического процесса обработки детали.

**Изложение основного материала.** Блок – схема управления процессом с введенным звеном коррекции  $W_{10}(p)$  изображена на рисунке 2. В результате анализа необходимо определить предельное значение  $k$ , при котором перерегулирование будет не более заданного значения  $Per \leq Y_u E$ , где  $E$  – относительная величина перерегулирования;  $Y_u$  – установившееся значение выходного сигнала  $Y_u = Y(t)_{t \rightarrow \infty}$ . Для вычисления  $Y_u$  по переходной характеристике необходима линеаризация передаточной функции системы.

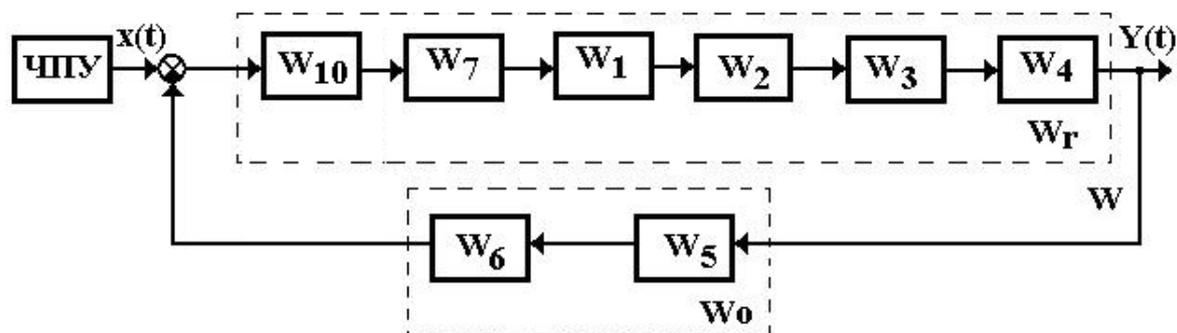


Рисунок 2 – Блок – схема управления процессом

Линеаризация передаточной функции.

Замкнутую систему (рисунок 2) можно представить передаточной функцией

$$W(p) = \frac{W_r(p)}{1 + W_r(p)W_o(p)}, \quad (1)$$

где  $W_r(p) = W_1(p)W_2(p)W_3(p)W_4(p)W_7(p)W_{10}(p)$  – передаточная функция разомкнутой системы;

$W_o(p) = W_5(p)W_6(p)$  – передаточная функция цепи обратной связи;  $W_1(p) = \frac{k_1}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}$ ;

$k_1 = 1 \dots 3,5$ ;  $T_e \leq 0,1$ ;  $T_m = 0,1 \dots 0,7$  – передаточная функция двигателя;  $W_2(p) = k_2$ ;  $k_2 = 0,05$  – передаточная функция редуктора;  $W_3(p) = k_3$ ;  $k_3 = (2 \dots 4)/\pi$  – передаточная функция механизма подачи;

$W_4(p) = k_4 e^{-p\tau}$ ;  $k_4 \leq 1$ ,  $\tau$  – время одного оборота детали – передаточная функция звена задержки;

$W_5(p) = k_5$ ;  $k_5 = 0,01 \dots 0,12$  – передаточная функция датчика размера детали;  $W_6(p) = \frac{k_6}{T_6 p + 1}$ ;  $k_6 \leq 0,15$ ;

$T_6 \leq 0,05$  – передаточная функция усилителя;  $W_7(p) = \frac{k_7}{T_7 p + 1}$ ;  $k_7 = 10 \dots 100$ ;  $T_7 \leq 0,1$  – передаточная

функция преобразователя;  $W_{10}(p) = k$  – передаточная функция звена коррекции.

Нелинейным звеном системы, входящим в её состав, является звено задержки  $W_4(p)$ . Среди возможных способов линеаризации [4] наиболее эффективным является метод аппроксимации степенной функцией вида [2]

$$W_e(p) = k_4 \left( \frac{n - p\tau\alpha}{n + p\tau(1-\alpha)} \right)^n; \quad \alpha < 1, \quad (2)$$

где  $n$  и  $\alpha$  являются параметрами степенной функции.

Заменив  $W_4(p)$  эквивалентной передаточной функцией  $W_e(p)$ , получим передаточную функцию линеаризованной системы с замкнутой обратной связью

$$W_a(p) = \frac{W_{ra}(p)}{1 + W_{ra}(p)W_o(p)}, \tag{3}$$

где  $W_{ra}(p) = W_1(p)W_2(p)W_3(p)W_e(p)W_7(p)W_{10}(p)$  – передаточная функция линеаризованной системы с отключенной обратной связью.

Выражения на границах интервала возможных изменений  $p = [0 \dots \infty]$  установившегося  $Y_u = x \cdot \lim_{p \rightarrow 0} (W(p))$  и начального  $Y_0 = x \cdot \lim_{p \rightarrow \infty} (W(p))$  моментов, полученные на основании предельной теоремы Лапласа, для передаточных функций (1) и (3) совпадают, принимая значения

$$Y_u = x \frac{k_1 k_2 k_3 k_4 k_7 k}{1 + k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 k_7 k} \text{ и } Y_0 = 0.$$

Внутри интервала возможных изменений  $p = [0 \dots \infty]$  значения передаточных функций (1) и (3) могут отличаться. Для примера на рисунке 3 изображены графики погрешности аппроксимации  $\varepsilon = W_a(p) - W(p)$  при значениях  $k = 1, n = 1; 2; 3$  и  $\alpha = 0; 0,3$ .

Выбором параметров аппроксимирующей степенной функции  $n$  и  $\alpha$  (2) можно обеспечить требуемую точность аппроксимации передаточной функции системы, что следует из представленных семейств кривых погрешности аппроксимации, изображенных на рисунках 3а и 3б.

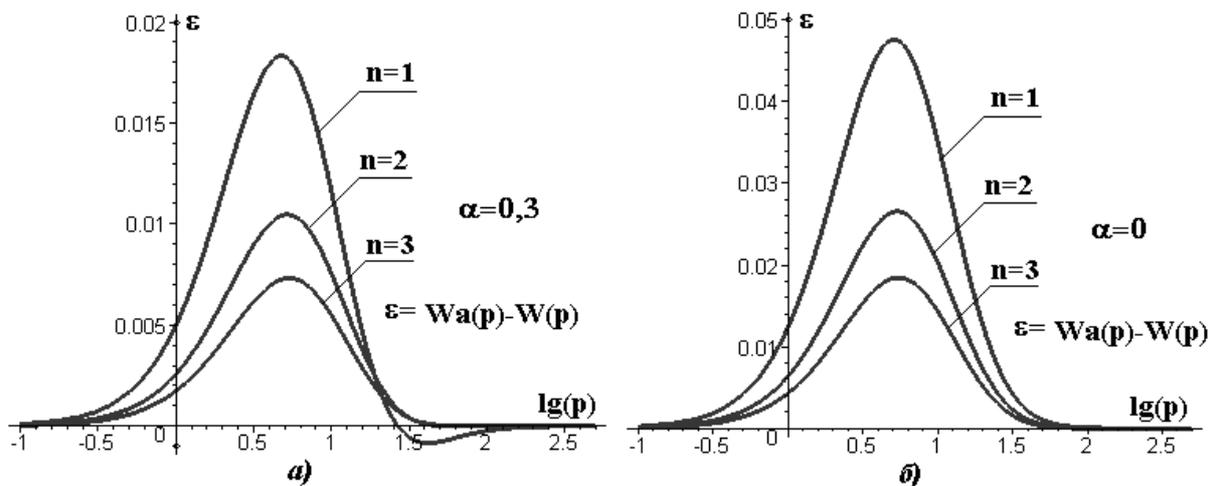


Рисунок 3 – Графики погрешности аппроксимации

Это позволяет надежно оценить величину перерегулирования при заданной максимальной погрешности  $\varepsilon$  путем выбора величины коэффициента коррекции  $k$ .

Оценка предельного значения коэффициента коррекции

Проведем анализ разомкнутой системы. Для этого перейдем к алгебраической форме передаточной функции  $W_n(p) = W(p)W_o(p)$  с учетом обратной связи

$$W_n(j\omega) = R_n(\omega) + jJ_n(\omega),$$

где  $R_n(\omega) = \text{Re}(W_n(j\omega)); J_n(\omega) = \text{Im}(W_n(j\omega))$ .

По определению критерия Найквиста-Михайлова [3] найдем предельный коэффициент передачи, решив численным методом нелинейную систему уравнений относительно  $k$  и  $\omega$

$$\begin{cases} R_n(\omega) = -1; \\ J_n(\omega) = 0. \end{cases} \tag{4}$$

В результате численного решения системы уравнений (4) при  $n = 3$  и  $\alpha = 0,5$  получены значения  $k_g = 109,44 \setminus 109,62$  и  $\omega_g = 6,370 \setminus 6,377$  для передаточных функций  $W(p) \setminus W_a(p)$  соответственно при заданном максимальном абсолютном значении погрешности аппроксимации  $\varepsilon < 0,001$ .

Процедура оценки значения коэффициента коррекции

Для определения требуемого коэффициента коррекции  $k$  нужно задать допустимую величину относительного перерегулирования  $E$ , вычислить переходную характеристику  $Y(t) = L^{-1}\{L\{x(t)\}W_a(p)\}$ , где  $L^{-1}\{\}$  – обратное преобразование Лапласа,  $L\{x(t)\}$  – изображение входного сигнала. Затем

необходимо определить установившееся значение  $Y_u$ , вычислить величину перерегулирования  $Per = Y_u E$  в диапазоне возможных изменений  $k < k_g$  и найти значение  $k$ , при котором  $Per \leq Y_u E$ .

В результате реализации приведенного алгоритма для выбранных средних значений параметров линеаризованной передаточной функции замкнутой системы получены  $k = 8,984$ ;  $Per = 1,134$   $Y_u = 34,1$ ; и величина относительного перерегулирования  $E_a = 0,0333$  для заданного значения  $E = 0,03$ . При значении  $E = 0,01$  имеем  $E_a = 0,012$ ;  $k = 5,615$ ;  $Y_u = 23,1$  и  $Per = 0,28$ . При значении  $E = 0,05$  получим  $E_a = 0,06$ ;  $k = 12,353$ ;  $Y_u = 43,56$  и  $Per = 2,61$ .

На рисунке 4 в качестве иллюстрации изображена переходная характеристика линеаризованной системы при значениях  $\alpha = 0,5$ ;  $n = 3$ ;  $k = 8,984$ .

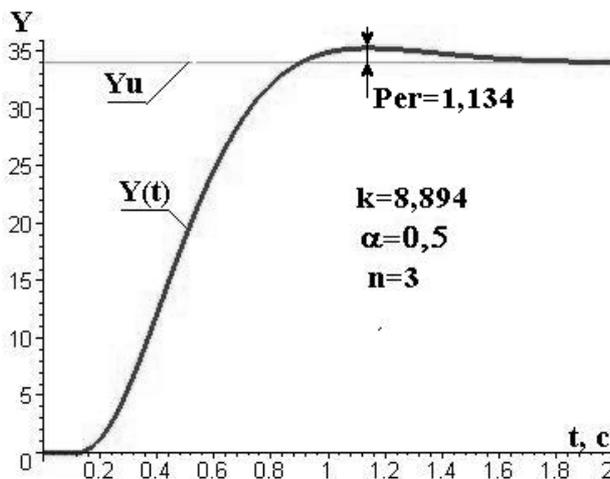


Рисунок 4 – Переходная характеристика линеаризованной системы

#### Оценка идентичности передаточных функций

Сравним передаточную функцию замкнутой системы управления  $W(p)$  с аппроксимирующей передаточной функцией  $W_a(p)$ . Для этого построим годографы, соответствующие этим передаточным функциям, представив их в алгебраической форме

$$W(j\omega) = R(\omega) + jJ(\omega)$$

где  $R(\omega) = \text{Re}(W(j\omega))$ ;  $J(\omega) = \text{Im}(W(j\omega))$ ;

$$W_a(j\omega) = R_a(\omega) + jJ_a(\omega),$$

где  $R_a(\omega) = \text{Re}(W_a(j\omega))$ ;  $J_a(\omega) = \text{Im}(W_a(j\omega))$ .

График совмещенных годографов передаточной функции системы управления изображен на рисунке 5.

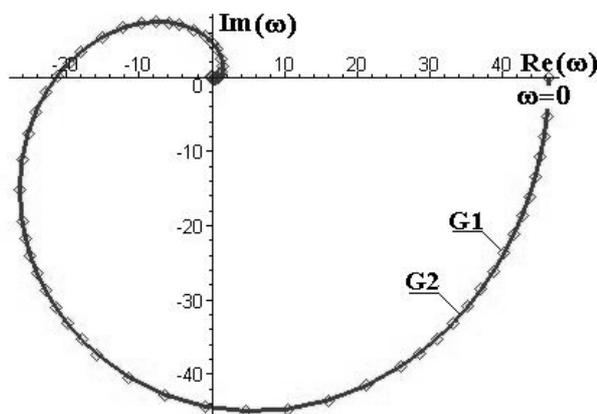


Рисунок 5 – Графики годографов

Годографы аппроксимируемой передаточной функции  $G_1$  и аппроксимирующей передаточной функции  $G_2$  совпадают. При реализации описанной процедуры приближения аппроксимирующая передаточная функция по своим частотным свойствам идентична аппроксимируемой, что позволяет обеспечить требуемое качество технологического процесса.

**Вывод.** Введение корректирующего звена 10 (рисунок 1) обеспечивает достижение требуемого качества технологического процесса. Применение аппроксимации передаточной функции технологического процесса степенными функциями позволяет определить параметр коррекции, необходимый при настройке процесса.

**Дальнейшие перспективы исследований** состоят в разработке метода оценки эффективного частотного диапазона, необходимого для тестирования технологической системы.

#### **Библиографический список использованной литературы**

1. Новоселов Ю.К. Обеспечение стабильности точности деталей при шлифовании / Ю.К. Новоселов, Е.Ю. Татаркин, А.В. Королева. — Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1988. — 128 с.
2. Долгин В.П. Автоматическое управление техническими и технологическими системами и объектами. Методы анализа систем и объектов / В.П. Долгин. — Севастополь: СевНТУ, 2003. — 404 с.
3. Топчеев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования / Ю.И. Топчеев. — М.: Машиностроение, 1989. — 752 с.
4. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. — М.: Наука, 1979. — 830 с.

*Поступила в редакцию 25.03.2013 г.*

#### **Долгін В.П. Методика корекції динамічної системи**

Висловлена методика корекції динамічної системи, що включає лінійні ланки і ланку затримки. Сформульований критерій вибору параметра корекції. Приведені результати імітаційного моделювання

**Ключові слова:** критерій, передавальна функція, стійкість, апроксимація, поліном.

#### **Dolgin V.P. Method of correction of dynamic system**

The method of correction of the dynamic system including linear links and delay link is expounded. The criterion of choice of parameter of correction is formulated. The results of imitation design are conducted.

**Keywords:** criterion, transfer function, stability, approximation, polynomial.