

## ЛИТЕРАТУРА

Касьян М.В., Багдасарян Г.Б., Арутюнян Г.А. Оптимизация технологических факторов при резании методом многофакторного планирования экспериментов. — Ереван, Айастан, 1990. — 161 с.

УДК 681.865

В.Ф. Горошко, А.В. Леневиц

## БЫСТРОДЕЙСТВИЕ И ЖЕСТКОСТЬ СЛЕДЯЩИХ ПРИВОДОВ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Использование в металлорежущих станках с числовым программным управлением следящих электроприводов подач, уровень напряжений и сигналов в которых зависит от величины рассогласования между заданными и фактическими координатами выходных звеньев, обуславливают необходимость количественной оценки этих рассогласований, а также анализа факторов, влияющих на погрешность позиционирования и точность обработки.

В качестве электродвигателя в указанных приводах во многих случаях используется двигатель постоянного тока, ротор которого непосредственно или через редукционную передачу соединен с винтом шарико-винтовой передачи (ШВП), а гайка последней жестко соединена с выходным звеном рабочего органа (ползуном, кареткой). Для выработки управляющих сигналов принято использовать ПИ-регулятор, имеющий пропорциональное (П) и интегрирующее (И) звенья.

Рассмотрим работающий в режиме позиционирования следящий электропривод, в котором ротор двигателя жестко соединен с винтом ШВП 50\*10, а гайка ШВП — с ползуном массой  $M=1000$  кг. Пренебрегая упругой податливостью элементов привода, запишем с учетом известных зависимостей [1] математическую модель рассматриваемого электропривода:

$$\frac{dW}{dt} = [K * I - T] / J, \quad \frac{dX}{dT} = W, \quad \frac{dU}{dt} = Q * (Y - X), \quad (1)$$
$$\frac{dI}{dt} = [U + N * (Y - X) - R * I - K * W] / L,$$

где  $W, X$  — приведенные (к ротору электродвигателя) скорость и координата позиционирования ползуна (выходной сигнал),  $U, I$  — составляющая напряжения управления, обеспечиваемая И-звеном регулятора, и ток в якорной цепи,  $R, L$  — сопротивление и индуктивность якорной цепи,  $J, K$  — приведенный момент инерции ротора и коэффициент момента электродвигателя,  $Q, N$  — коэффициент передачи И-звена и коэффициент усиления П-звена регулятора,  $Y$  — приведенная координата заданного позиционирования (входной сигнал),  $T$  — приведенный момент сопротивления.

Приведенный момент инерции определим с учетом момента инерции  $J_1$  ротора, момента инерции  $J_2$  винта ШВП и массы  $M$  ползуна по формуле:

$$J = J_1 + J_2 + M \cdot \frac{(10/1000)^2}{(2 \cdot \pi)^2}$$

Передаточная функция привода в режиме позиционирования, определяющая отношение выходного сигнала к входному сигналу, может быть записана в виде:

$$\frac{X}{Y} = \frac{\frac{Q \cdot K}{J \cdot L} + \frac{N \cdot K}{J \cdot L} \cdot S}{\frac{Q \cdot K}{J \cdot L} + \frac{N \cdot K}{J \cdot L} \cdot S + \frac{K \cdot K}{J \cdot L} \cdot S^2 + \frac{R}{L} \cdot S^3 + S^4}, \quad (2)$$

где  $S$  — оператор Лапласа.

Анализ передаточной функции (2) относительно использования 2-х звеньев регулирования в следящем электроприводе в режиме позиционирования показывает, что интегральное звено регулирования избыточно и что в этом режиме достаточно пропорционального звена. Отметим, что согласно критерию Лъенара-Шипара [2] при нулевом коэффициенте усиления П-звена и ненулевом коэффициенте передачи И-звена рассматриваемый следящий электропривод является неустойчивым.

В случае использования П-звена регулирования соответствующая передаточная функция следящего электропривода может быть приведена к виду:

$$\frac{X}{Y} = \frac{\frac{N \cdot K}{J \cdot L}}{\frac{N \cdot K}{J \cdot L} + \frac{K \cdot K}{J \cdot L} \cdot S + \frac{R}{L} \cdot S^2 + S^3}, \quad (3)$$

при этом собственные колебания и устойчивость следящего электропривода определяются характеристическим уравнением:

$$\frac{N \cdot K}{J \cdot L} + \frac{K \cdot K}{J \cdot L} \cdot S + \frac{R}{L} \cdot S^2 + S^3 = 0. \quad (4)$$

Анализ передаточной функции (3) при нулевом значении оператора Лапласа показывает, что в статическом режиме величина выходного сигнала соответствует величине входного сигнала и погрешность позиционирования равна нулю.

Анализ характеристического уравнения (4) согласно критерию Льенара-Шипара относительно устойчивости привода показывает, что при выборе величины коэффициента усиления  $N$  пропорционального звена необходимо придерживаться условия:

$$N < \frac{K * R}{L}$$

Влияние приращения  $dT$  момента сопротивления на погрешность  $dX$  позиционирования определяется передаточной функцией:

$$\frac{dX}{dT} = \frac{\frac{1 * R}{J * L} + \frac{1}{J} * S}{\frac{N * K}{J * L} + \frac{K * K}{J * L} * S + \frac{R}{L} * S^2 + S^3} \quad (5)$$

В статическом режиме погрешность позиционирования  $dX$  ротора при приращении момента сопротивления на величину  $dT$  определяется по формуле:

$$dX = \frac{dT * R}{N * K} \quad (6)$$

Согласно (6) погрешность позиционирования пропорциональна электрическому сопротивлению  $R$  якорной цепи и обратно пропорциональна коэффициенту  $K$  момента электродвигателя и коэффициенту усиления  $N$  пропорционального звена регулятора.

Учитывая, что, с одной стороны, увеличение коэффициента  $N$  усиления звена регулятора связано с уменьшением погрешности позиционирования, отметить, что, с другой стороны, увеличение коэффициента  $N$  способствует повышению колебательности и уменьшению быстродействия следящего электропривода, увеличивая время переходного процесса.

Принимая во внимание, что быстродействие и устойчивость следящего электропривода зависят от характеристик электродвигателя, рассмотрим далее результаты моделирования переходных процессов в следящем электроприводе с 2-мя различными двигателями постоянного тока, имеющими одинаковый номинальный момент  $T_n = 42.5 \text{ Н*м}$  на выходном валу при различных других характеристиках (табл. 1).

**Таблица 1**  
**Характеристики двигателей постоянного тока**

Характеристики	Электродвигатель	
	1-й	2-й
момент инерции $J$ , кг*м <sup>2</sup>	0.174	0.0291
коэффициент $K$ , Н*м/А=В*с/рад.	0.685	1.7
сопротивление $R$ , Ом	0.0535	0.13
индуктивность $L$ , Гн	0.000422	0.0025

Быстродействие сервопривода оцениваем по времени переходного процесса, по истечении которого выходное звено из состояния покоя повернется на угол 180 градусов при условии, что перерегулирование в переходном процессе не превышает 2 угловые секунды. Принятое ограничение по перерегулированию обуславливает определение приемлемой максимальной (с учетом принятой величины перерегулирования) величины коэффициента усиления  $N$  пропорционального звена регулирования.

Результаты моделирования на основе численного интегрирования уравнений (1) с учетом приведенного момента инерции  $J = 0.0089 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  шарико-винтовой передачи  $50 \cdot 10$  и ползуна показали, что 1-й двигатель обеспечивает переходной процесс в течение  $t = 0.34$  сек при коэффициенте усиления  $N = 11.98 \text{ В/рад.}$ , а 2-й -  $t = 0.67$  сек при  $N = 33.55 \text{ В/рад.}$

При определении погрешностей позиционирования ползуна при воздействии на ползун сил сопротивления принимаем во внимание известную зависимость [3] между моментом на винту и осевой силой на гайке ШВП. В нашем случае, моменту  $1.77 \text{ Н} \cdot \text{м}$  соответствует осевая сила  $1 \text{ кН}$ . С учетом данного соответствия и формулы (6), находим, что в 1-м случае погрешность позиционирования ползуна под воздействием силы сопротивления  $1 \text{ кН}$  определяет величина  $Z1$  –

$$Z1 = \frac{0.0535 * 1.77 * 10 * 10^3}{11.98 * 0.685 * \pi * 2} = 18.4 (\text{мкм}),$$

во 2-м случае – величина  $Z2$  –

$$Z2 = \frac{0.13 * 1.77 * 10 * 10^3}{33.55 * 1.7 * \pi * 2} = 6.4 (\text{мкм}).$$

Выводы:

— предложена математическая модель следящего электропривода подачи, используемого в станках с ЧПУ;

— приведены аналитические зависимости для определения погрешности позиционирования выходного звена следящего электропривода при наличии сил сопротивления.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов. — М.: Высшая школа, 1989. Под редакцией док.тех.наук, профессора Б.И.Черпакова.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1973.
3. Кочергин А.И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов. — Минск: "Вышэйшая школа", 1991.