

УДК 621.91

МЕТОДИКА КИНЕМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СМЕШАННОЙ СТРУКТУРЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА СТАНКА

М.И. МИХАЙЛОВ

*Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого, Республика Беларусь*

Проектированию приводов станков посвящено большое количество работ, которые в настоящее время систематизированы и представлены в виде монографий и учебников [1-5]. Эти работы основаны на графическом методе, что затрудняет автоматизацию проектирования привода.

Структуры приводов станков разделены, с точки зрения системного подхода, на множительную, сложенную и смешанную. Смешанная структура включает в себя элементы множительной и сложенной структур и является более общей. Как известно, кинематические параметры механических приводов станков формируются на основе геометрических рядов [1-5].

Исходными данными для проектирования привода являются: минимальное и максимальное значения частот выходного вала (полученные из расчетов режимов резания), частота вращения вала двигателя, значение знаменателя геометрической прогрессии ряда частот.

Рассмотрим более подробно предлагаемую методику расчета привода.

Для определения количества валов в приводе необходимо произвести ряд уточняющих проектных расчетов. В начале рассчитываем максимальное количество интервалов знаменателя прогрессии в приводе:

$$e_{\max} = \lg \left(\frac{n_{\text{дв}}}{n_{\min}} \right) / \lg \varphi, \quad (1)$$

где $n_{\text{дв}}$ – частота вращения двигателя, n_{\min} – минимальное значение частоты вращения выходного вала.

Затем для обеспечения этого диапазона регулирования рассчитываем минимальное количество валов в приводе:

$$k_p = \frac{e_{\max}}{[e']} + 1, \quad (2)$$

где $[e']$ – допускаемое количество интервалов понижающей передачи по табл.

Принимаем ближайшее большее целое число $k \geq k_p$.

Для описания кинематических связей в приводе необходимо записать его структурную формулу, которая отражает количество групп передач между валами и расположение их в приводе.

Для этого определяем количество скоростей на каждом валу привода Z_j , предварительно приняв количество передач в группе [2,4],

$$Z_{j-1} = \frac{Z_j}{P_{j-1,j}}, \quad (3)$$

где $P_{j-1,j}$ – принятое количество передач в группе между валами $j-1, j$;
 j – номер вала привода, $j = k, \dots, 1$.

Если Z_j невозможно разделить на $P_{j-1,j}$ без остатка, то необходимо ввести прямую группу передач $P_{1,k}$ с первого вала на рассматриваемый (k -ый вал).

$$\text{Тогда } Z_j^C = Z_j - P_{1,k} \text{ и } Z_{j-1} = \frac{Z_j^C}{P_{j-1,j}}. \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) записываем структурную формулу привода начиная с последней группы передач:

$$Z = \left(\left(\prod_{j=1}^n (P_{j,j+1})_{X_{j+1}} + P_{1,n} \right) \prod_{j_1=n}^m (P_{j_1,j_1+1})_{X_{j_1+1}} + P_{1,m} \right) \prod_{j=m}^k (P_{j_2,j_2+1})_{X_{j_2+1}} + P_{1,k}, \quad (5)$$

Таблица

Допускаемое количество интервалов в передачах [e]

Передачи	Вид привода	Знаменатель прогрессии, φ						
		1,06	1,12	1,26	1,41	1,58	1,78	2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Прямозубые - повышающие [e''] - понижающие [e']	Главного движения	12	6	3	2	1,5	1,2	1
		24	12	6	4	3	2,4	2
Косозубые - повышающие [e''] - понижающие [e']		15	8	4	2,5	2	1,5	1,3
		24	12	6	4	3	2,4	2
- повышающие [e''] - понижающие [e']	Подач	17,5	9	4,5	3	2	1,8	1,5
		27,5	14	7	4,5	3,5	2,8	2,3

где $P_{j,j+1}$ – последовательно расположенные группы передач между валами $j, j+1$;
 $P_{1,n}; P_{1,m}; P_{1,k}$ – группы передач между первым и соответствующими валами n, m, k ;

X_{j+1} – характеристика группы передач $X_{j+1} \equiv Z_j$.

Определяем минимальное расчётное количество валов k_ϕ для полученной структурной формулы

$$k_\phi = \sum P_k + 1, \quad (6)$$

где $\sum P_k$ – суммарное количество последовательно расположенных групп передач в приводе.

По результатам расчетов (2) и (6) необходимо уточнить принятое количество валов в приводе

$$k = k_{\max} \cdot (k_p; k_\phi),$$

где $k_{\max} (k_p; k_\phi)$ – максимальное целое значение из двух расчётных k_p и k_ϕ .

Определение кинематических параметров каждой принятой группы передач необходимо выполнять по отдельным циклам.

В начале рассчитываем количество интервалов регулирования в принятых группах передач:

- последовательно расположенных в приводе

$$e_{j-1,j} = (P_{j-1,j} - 1) Z_{j-1}; \quad (7)$$

- параллельно расположенных в приводе

$$e_{1,j} = \lg \left(\frac{n_{\max j}}{n_{\text{дв}}} \right) / \lg \varphi. \quad (8)$$

Если $e_{1,j} > 0$, то эти передачи являются повышающими, а если $e_{1,j} \leq 0$, то - понижающими.

Определяем допускаемое количество интервалов регулирования каждой принятой группы передач:

- последовательно расположенной в приводе

$$[e_{j-1,j}] = [e'_{j-1,j}] + [e''_{j-1,j}]; \quad (9)$$

- параллельно расположенной в приводе

$$[e_{1,j}] \equiv [e'_{1,j}], \text{ если } e_{1,j} \leq 0 \text{ и } e_{1,j} - P_{1,j} < 0; \quad (10)$$

$$[e_{1,j}] \equiv [e''_{1,j}], \text{ если } e_{1,j} > 0 \text{ и } e_{1,j} - P_{1,j} > 0; \quad (11)$$

$$[e_{1,j}] \equiv [e''_{1,j}] + [e'_{1,j}], \text{ если } e_{1,j} > 0, \text{ а } e_{1,j} - P_{1,j} < 0, \quad (12)$$

где $[e'_{1,j}]$ и $[e''_{1,j}]$ - соответственно допускаемое количество интервалов регулирования понижающей и повышающей передач в группе (принимается по табл.).

Рассчитываем запас интервалов регулирования в группе

$$\Delta e_{j-1,j} = [e_{j-1,j}] - |e_{j-1,j}|. \quad (13)$$

Если $\Delta e_{j-1,j} \geq 0$, то определяем запас интервалов понижающих передач:

$$\Delta e'_{j-1,j} = [e'_{j-1,j}] - e_{j-1,j}.$$

Если $\Delta e'_{j-1,j} = 0$, то приняв $e'_{j-1,j} \equiv [e'_{j-1,j}]$, получим все передачи этой группы привода только понижающие с передаточными отношениями:

$$i_{p'_{j-1,j}} = \frac{1}{\varphi^{e'_{j-1,j} - z_{j-1}(p'_{j-1,j} - 1)}}, \quad (14)$$

где $p'_{j-1,j}$ - номер понижающей передачи между валами $j-1$ и j , $p'=1, \dots, P_{j-1,j}$.

Если $\Delta e'_{j-1,j} > 0$, то приняв $e'_{j-1,j} \equiv [e'_{j-1,j}]$, определяем количество *понижающих*

$$\ell^1_{j-1,j} = e'_{j-1,j} / z_{j-1}$$

и повышающих передач

$$\ell''_{j-1,j} = \frac{e_{j-1,j} - e'_{j-1,j}}{z_{j-1}} = \frac{e''_{j-1,j}}{z_{j-1}}. \quad (15)$$

Определяем передаточные отношения передач:

- *понижающих*

$$i_{p'_{j-1,j}} = \frac{1}{\varphi^{e'_{j-1,j} - z_{j-1}(p'_{j-1,j} - 1)}}; \quad (16)$$

- *повышающих*

$$i_{p''_{j-1,j}} = \varphi^{e''_{j-1,j} - z_{j-1}(p''_{j-1,j} - 1)}, \quad (17)$$

где $p''_{j-1,j}$ – номер повышающей передачи, $p''_{j-1,j} = 1, \dots, \ell''_{j-1,j}$;

$p'_{j-1,j}$ – номер понижающей передачи $P'_{j-1,j} = 1, \dots, \ell'_{j-1,j}$.

Если $\Delta e_{j-1,j} < 0$, то необходимо применить параллельное соединение в группах повышающих или понижающих передач.

В начале определим количество дополнительных валов для последовательного соединения повышающих передач и параллельного соединения понижающих передач:

$$k''_{j-1,j} = \frac{e_{j-1,j} - [e'_{j-1,j}]}{[e''_{j-1,j}]} - 1. \quad (18)$$

Затем рассчитаем количество валов последовательного соединения понижающих передач при параллельном соединении повышающих передач

$$k'_{j-1,j} = \frac{e_{j-1,j} - [e''_{j-1,j}]}{[e'_{j-1,j}]} - 1. \quad (19)$$

Сравнив два варианта по уровню частот и количеству дополнительных валов, а также по объёму передач, выбираем лучший.

Если второй вариант оказался лучшим, то выбираем предельное значение k' , а в качестве переменного параметра используем j .

Приняв предельно допустимое количество интервалов регулирования для всех дополнительных промежуточных передач, определяем количество интервалов повышающей передачи между последним дополнительным валом и шпинделем:

$$e''_{j-(k'+1),j} = e_{j-1,j} - [e'_{j-1,j}] - k'' [e''_{j-1,j}]. \quad (20)$$

Рассчитываем количество повышающих передач в группе:

$$p''_{j-(k'+1),j} = \frac{e''_{j-(k'+1),j}}{[e''_{j-(k'+1),j}]} . \quad (21)$$

Определяем передаточные отношения повышающих передач в группе:

$$i_{p''_{j-(k'+1),j}} = \varphi^{e''_{j-(k'+1),j} - z_{j-1}} (p''_{j-(k'+1),j} - 1). \quad (22)$$

Определяем последовательно группы передач между валами k' и j . Выбираем максимальное значение j и текущий номер вала $k' - 1 \equiv j'$.

Определяем остаточное количество интервалов в группах передач

$$e_{j',j} = e_j - p''_{j-(k'+1),j} Z_{j-1}.$$

Рассчитываем количество интервалов повышающих передач:

$$e''_{j',j} = e_{j',j} - [e'_{j',j}].$$

Определяем количество повышающих передач между валами j' , j :

$$p''_{j',j} = \frac{e''_{j',j}}{[e''_{j',j}]}.$$

Рассчитываем передаточные отношения повышающих передач в группе:

$$i_{j',j} = \varphi^{e''_{j',j} - z_{j-1}} (p''_{j',j} - 1).$$

Графически изображаем структуру привода в виде направленного графа.

При построении графа (рис.1) вначале обозначается первый вал привода и от него стрелки соединяются в точке, обозначающей второй вал и т.д. На графе обозначаются количество колёс на валах, передаточные отношения передач.

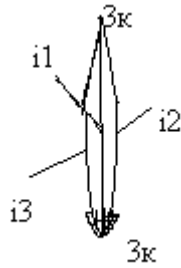


Рис. 1. Граф группы передач

Пример: $Z = 23$, $\varphi = 1,41$, $n_{об} = 1400$, $n_{min} = 10$.

1. Определяем максимальное количество интервалов в приводе по (1)

$$e_{\max P} = \frac{\lg^{140}}{\lg^{1,41}} = 14,05.$$

2. Рассчитываем минимальное количество валов по (2)

$$k_P = \frac{14,0}{4} + 1 = 4,5.$$

Принимаем $k = 5$.

3. Количество скоростей на каждом валу по (3) $Z_4 = \frac{Z_5}{P_{4,5}}$,

т.к. $Z_5 = 23$ не делится на $P_{4,5}$, то вводим прямые передачи между 1 и 5 валами и $Z_5^C = 23 - 1 = 22$, тогда $Z_4 = \frac{22}{2} = 11$.

Принимаем $P_{3,4} = 2$; $Z_3 = \frac{Z_4}{P_{3,4}}$, т.к. $Z_4 = 11$ не делится на $P_{3,4}$ без остатка, то

$$Z_4^C = Z_4 - 1 = 11 - 1 = 10, \quad Z_3 = \frac{Z_4^C}{P_{3,4}} = \frac{10}{2} = 5.$$

Принимаем $P_{2,3} = 2$, тогда $Z_2 = \frac{Z_3}{P_{2,3}}$, т.к. $Z_3 = 5$ не делится на 2 без остатка, то

вводим ещё одну сложную группу передач $Z_3^C = Z_3 - 1 = 5 - 1 = 4$; $Z_2 = 2$.

Принимаем $P_{1,2} = 2$, тогда $Z_1 = 1$.

Записываем структурную формулу привода по (5):

$$Z = [(P_{1,2})_{x_2} (P_{2,3})_{x_3} + 1] (P_{3,4})_{x_4} + 1] (P_{4,5})_{x_5} + 1 = ((2 \cdot 2 + 1) 2_5 + 1) 2_{11} + 1.$$

Количество валов в приводе по структуре $k_\phi = P + 1 = 5$.

Принимаем минимальное количество валов $k=5$.

4. Количество интервалов регулирования для каждой группы передач по (7) и (8):

$$e_{4,5} = (P_{4,5} - 1) Z_4 = 11; \quad e_{3,4} = (P_{3,4} - 1) Z_3 = 5; \quad e_{2,3} = (P_{2,3} - 1) Z_2 = 2;$$

$$e_{1,2} = (P_{1,2} - 1) Z_1 = 1;$$

$$e_{1,5} = \lg \left(\frac{22400}{1400} \right) / \lg 1,41 = 8; \quad e_{1,4} = 0; \quad e_{1,3} = \lg \left(\frac{710}{1400} \right) / \lg 1,41 = -2.$$

5. Допускаемое количество интервалов по (9) – (12):

$$[e_{4,5}] = [e'_{4,5}] + [e''_{4,5}] = 6;$$

$$[e_{3,4}] = [e_{2,3}] = [e_{1,2}] = [e_{4,5}].$$

Так как $P_{1,3} = P_{1,4} = P_{1,5} = 1$, то $[e_{1,5}] = [e''_{1,5}] = 2$; $[e_{1,4}] = [e''_{1,4}] = 2$; $[e_{1,3}] = [e'_{1,3}] = 4$.

6. Запас повышающих передач регулирования в группе по (13):

$$\Delta e_{4,5} = [e_{4,5}] - e_{4,5} = 6 - 11 = -5;$$

$$\Delta e_{3,4} = [e_{3,4}] - e_{3,4} = 6 - 5 = 1; \Delta e_{2,3} = [e_{2,3}] - e_{2,3} = 6 - 2 = 4;$$

$$\Delta e_{1,2} = e_{\max} - [e'_{4,5}] + [e'_{3,4}] + [e'_{2,3}] + [e''_{1,2}] = 16 - 12 = 4;$$

$$\Delta e_{1,3} = [e_{1,3}] - e_{1,3} = 4 - 2 = 2; \Delta e_{1,4} = 2 - 0 = 2; \Delta e_{1,5} = 2 - 8 = -6.$$

7. Анализируем каждую группу передач с последней до первой.

7.1. Т.к. $\Delta e'_{4,5} < 0$, то принимаем параллельное соединение в этой группе передач.

7.2. Количество дополнительных валов параллельного соединения повышающих передач по (18):

$$k''_{4,5} = \frac{e_{4,5} - [e'_{4,5}]}{[e''_{4,5}]} - 1 = 2,5.$$

7.3. Количество дополнительных валов последовательного соединения понижающих передач по (19):

$$k'_{4,5} = \frac{e_{4,5} - [e''_{4,5}]}{[e'_{4,5}]} - 1 = 1,25.$$

7.4. Принимаем $k'' = 3$ и $j' = 5''', 5'', 5'$.

7.5. Количество интервалов повышающей передачи между последним дополнительным валом и шпинделем по (20).

$$e''_{5,5''} = e_{4,5} - [e'_{4,5}] - 3[e''_{4,5}] = 1.$$

7.6. Определяем передаточные отношения передач между валами IV и V:

- понижающих по (14) $e'_{4,5} \equiv [e'_{4,5}]$,

$$i'_{1,4,5} = \frac{1}{\varphi e'_{4,5} - z_4 (P'_{4,5} - 1)} = \frac{1}{1,41^4};$$

- повышающих по (22)

$$i''_{1,4,5'} = \varphi e''_{4,5'} - z_4 (P''_{4,5'} - 1) = 1,41^2;$$

$$i''_{2,5',5''} = \varphi e^{5',5''} - z_{5'} (P''_{5',5''} - 1) = 1,41^2;$$

$$i''_{3,5'',5'''} = \varphi e^{5'',5''' } - z_{5''} (P''_{5'',5'''} - 1) = 1,41^2;$$

$$i''_{4,5''',5} = \varphi e^{5''',5} - z_{5'''} (P''_{5''',5} - 1) = 1,41.$$

8. Анализ группы передач между валами III, IV

8.1. Так как $\Delta_{3,4} > 0$, то приняв $e_{3,4}' \equiv [e_{3,4}']$, определим $e_{3,4}'' = e_{3,4} - e_{3,4}' = 1$ и передаточные отношения передач:

- понижающих по (14)

$$i_{1,3,4}' = \frac{1}{\varphi e_{3,4}^1 - z_3 (P_{3,4}^1 - 1)} = \frac{1}{1,41^4};$$

- повышающих

$$i_1' = \varphi e_{3,4}'' - z_3 (P_{3,4}'' - 1) = 1,41.$$

Анализ группы передач между валами II, III.

Так как $\Delta e_{2,3} > 0$, а $P_{2,3} = 2$, то приняв $e_{2,3}^1 \equiv [e_{2,3}^1]$,

определим $e'' = e_{2,3} - e_{2,3}' = -2$; $e_{2,3}'' < 0$ - значит все передачи понижающие.

Определим передаточные отношения передач этой группы по (14):

$$i_{1,2,3}' = \frac{1}{\varphi e_{2,3}^1 - z_2 (P_{2,3}^1 - 1)} = \frac{1}{1,41^4};$$

$$i_{2,3}^1 = \frac{1}{\varphi^{4-2(2-1)}} = \frac{1}{1,41^2}.$$

Анализ группы передач между валами I, II.

$\Delta e_{1,2} > 0$; $P_{1,2} = 2$. Определим $e_{1,2}'' = e_{1,2} - e_{1,2}' = -1 < 0$.

$e_{1,2}' = e_{\max} - ([e_{4,5}] + [e_{3,4}] + [e_{2,3}]) = 2$ - значит все передачи понижающие.

Определим передаточные отношения передач этой группы по (14):

$$i_{1,1,2}^1 = \frac{1}{\varphi e_{1,2}' - z_1 (P_{1,2}' - 1)} = \frac{1}{1,41^2};$$

$$i_{2,1,2}' = \frac{1}{\varphi^1} = \frac{1}{1,41}.$$

Анализ группы передач между валами I, III.

$\Delta e_{1,3} > 0$; $P_{1,3} = 1$ - передача понижающая и

$$i_{1,3}' = \frac{1}{\varphi e_{1,3}' - z_1 (P_{1,3}' - 1)} = \frac{1}{1,41^2}.$$

9. Анализ группы передач между валами I, IV. Так как $\Delta e_{1,4} > 0$; $P_{1,4} = 1$, то эта передача понижающая и $i_{1,4} = \frac{1}{\varphi e_{1,4}' - z_1 (P_{1,4}' - 1)} = 1$.

Анализ группы передач между валами I, V: $\Delta e_{1,5} = -6 < 0$; $P_{1,5} = 1$.

Выводы: приведенная методика позволяет сформировать структуру привода, определить передаточные отношения всех передач и облегчает автоматизацию проектирования.

Литература

1. Беляев В.Г. Расчеты механической части привода подач станков с ЧПУ // Станки и инструменты.- 1982.-№3.- С.11-14.
2. В помощь конструктору-станкостроителю / В.И. Калинин и др.- М.: Машиностроение, 1983.- 288 с.
3. Металлорежущие станки /Под ред. В.Э. Пуша.- М.: Машиностроение, 1985.- 575 с.
4. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник – учебник. В 3 т. / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Апполонов и др.- М.: Машиностроение, 1994.
5. Кочергин А.И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов. – Мн.: Выш. шк., 1991.- 382 с.