

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОСТОЙКОСТИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА И ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

Кроль О.С., Соколов В.И. (СНУ им. В. Даля, г. Луганск, Украина)

Совершенствование конструкций металлорежущего оборудования, увеличение диапазона режимов функционирования, усложнение форм заготовок и повышение точностных характеристик, делает актуальным исследование в направлении выбора оптимальных условий формообразования.

Главным направлением поиска является нахождение таких условий работы оборудования, при которых максимизируется производительность и уменьшается машинное время обработки [1]. Существует и подходы к оптимизации режимов резания, когда их величины находятся как компромисс между наибольшей производительностью и надежностью процесса обработки [2]. На базе такого подхода фирмой Sandvic Coromant сформированы массивы табличных данных по выбору оптимальных режимов.

Вместе с тем на высокоскоростных режимах функционирования оборудования на первый план выступает стабильность работы станочной системы, снижение уровня колебаний и отстройка от резонансных частот. Это требует изменение моделей и алгоритмов оптимизации, учет фактора устойчивости процесса формообразования, что особенно актуально для современных многооперационных станков сверлильно – фрезерно - расточного типа.

Постановка задачи. Разработать модель и алгоритм поиска оптимальных режимов резания по критерию виброустойчивости, используя в качестве инструментария метода Д-разбиений [3].

В качестве объекта исследования принят формообразующий узел – шпиндельный блок сверлильно-фрезерно-расточного обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4 (рис.1).

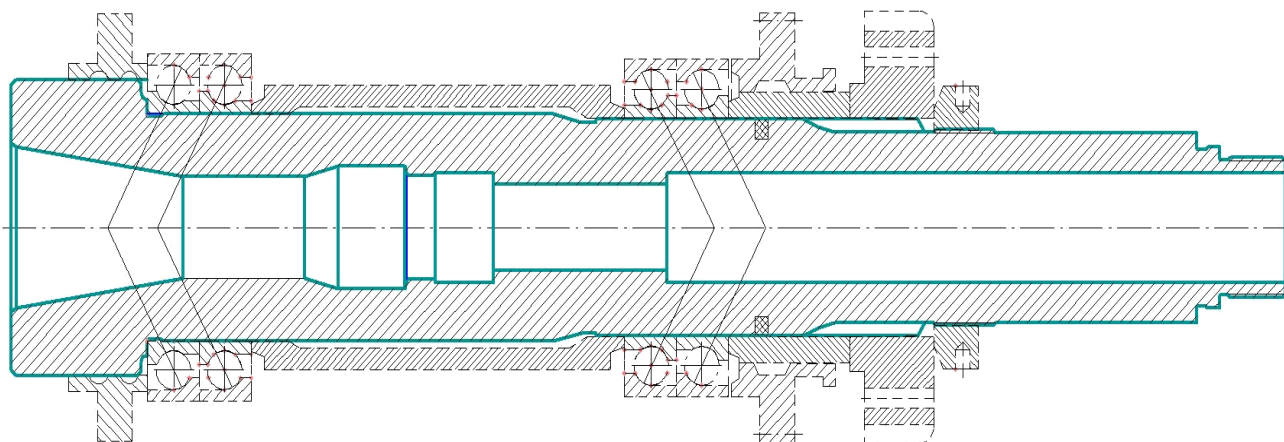


Рис.1. Конструктивная схема шпиндельного узла станка СФ68ВФ4

В общем случае данную конструктивную схему следует рассматривать как статически неопределимую балку на четырех опорах (подшипник-опора), которые в общем случае обладают линейными  $A$  и угловыми  $a$  податливостями. Расчетная схема узла представлена на рис. 2). Для уменьшения трудоемкости достаточно корректно заменить сдвоенные подшипники одной опорой, переходя к двухопорной расчетной схеме.

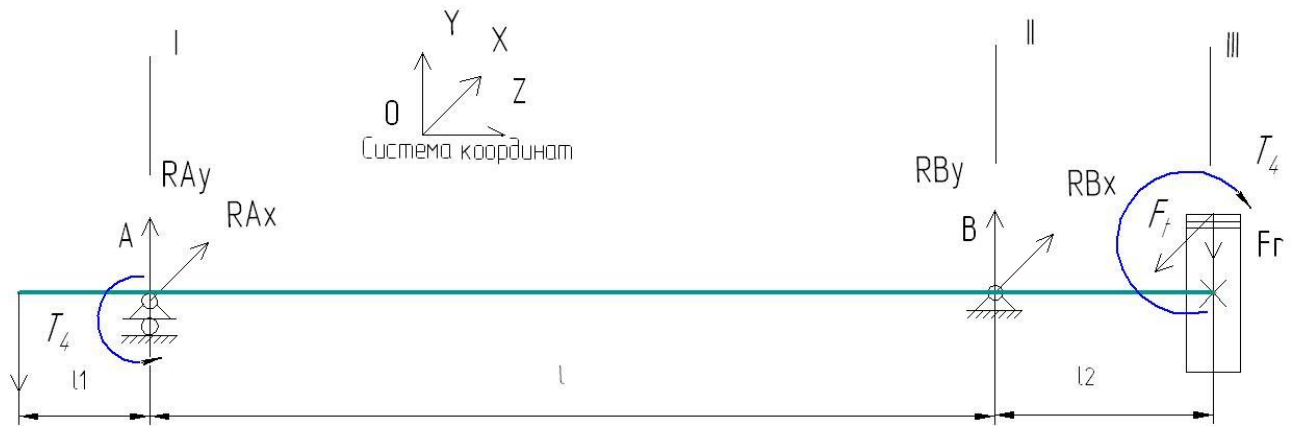


Рис.2. Расчетная схема двухопорного шпинделя

Согласно предложенной расчетной схеме, ШУ представляется как упругая система "шпиндель-консоль" (ШК), податливость которой  $\Delta$  определяется аналитически, как функция от длины консоли  $l_k$ , с помощью статического формуляра шпинделя станка модели СФ68ВФ4:

$$\Delta = (30,37 + 0,61 l_k + 0,042 l_k^2) \cdot 10^{-8}. \quad (1)$$

Конструктору часто требуется быстро произвести статический расчет той или иной наладки. Это можно сделать с помощью номограммы, состоящей из двух частей: статического формуляра  $\Delta$ , построенного по формуле (1) и графика податливости консоли  $\Delta_1$  (инструментального блока), построенного для консолей постоянного сечения и различных значений диаметров. Консоль рассматривается как балка, защемленная в опорном сечении и нагруженная в месте резания единичной силой.

Для упругой системы ШК достаточно определить несколько первых, а чаще всего одну первую собственную частоту, чтобы знать резонансную частоту и частоту, на которой происходят автоколебания шпинделя. Для составления частотного уравнения воспользуемся методом переходных матриц [1]. Для двухопорного шпинделя (рис.1) построена матричная модель, связывающая геометрические и силовые параметры. Раскрывая определитель из удержанных в матрице  $\Pi^*$  элементов и приравнивая его нулю находим частоту собственных колебаний:

$$g_{31}g_{42} - g_{41}g_{32} = 1,86 \cdot 10^{-43} w^{12} - 1,7 \cdot 10^{-31} w^{10} - 2,72 \cdot 10^{-22} w^8 - 0,6 \cdot 10^{-13} w^6 + 1,7 \cdot 10^{-5} w^4 - 3250 w^2 + 0,245 \cdot 10^{11} + j \cdot (2,3 \cdot 10^{-36} w^{11} - 2,4 \cdot 10^{-26} w^9 - 1,4 \cdot 10^{-17} w^7 - 6 \cdot 10^{-9} w^5 - 0,21 w^3 - 5,9 \cdot 10^6 w) = 0. \quad (2)$$

Из частотного уравнения (2) определим действительные значения круговой частоты:  $w_1=2173$ , 1/с;  $w_2=104930$ , 1/с;  $w_3=956860$ , 1/с, что соответствует собственным частотам  $f_1=346$  Гц;  $f_2=16709$  Гц;  $f_3=152366$  Гц.

Из уравнения метода начальных параметров получим выражение для частотной передаточной функции  $W_0$  по воздействию со стороны процесса резания:

$$W_0 = \frac{L^3}{EI} \left( \frac{k_{1R}k_{2R} + k_{1I}k_{2I}}{k_{2R}^2 + k_{2I}^2} - j \frac{k_{1R}k_{2I} - k_{1I}k_{2R}}{k_{2R}^2 + k_{2I}^2} \right),$$

где  $k_{1R}, k_{2R}, k_{1I}, k_{2I}$  - действительные и мнимые слагаемые передаточной функции, являющиеся функциями частоты. Например, вещественное слагаемое  $k_{2R}$  принимает вид:

$$k_{2R} = g_{31R}g_{42R} - g_{31I}g_{42I} - g_{41R}g_{32R} + g_{41I}g_{32I},$$

где  $g_{ijR(I)}$  - вещественная и мнимая части слагаемого  $k_{2R}$ , полученные в результате применения аппарата переходных матриц.

В математической среде Signal Processing построены АФЧХ и частотные характеристики шпиндельного узла (рис.3)

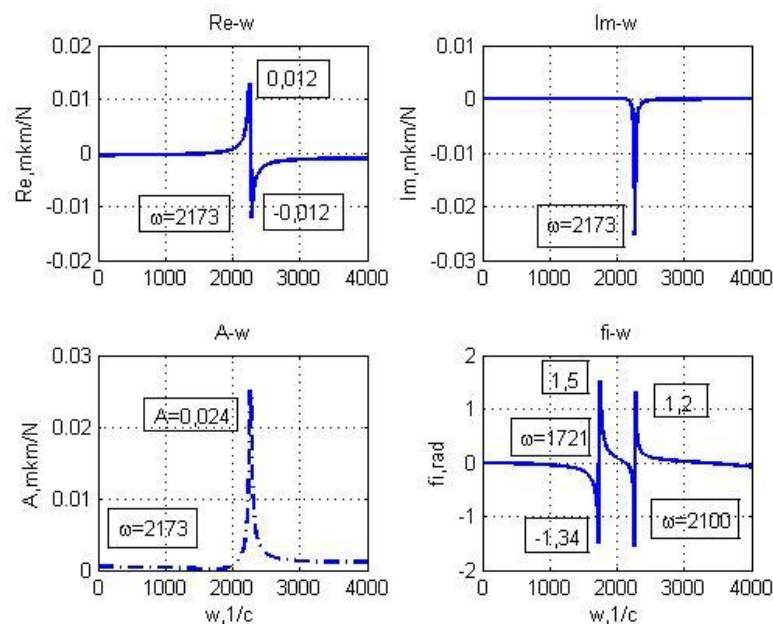


Рис.3. Частотные характеристики шпиндельного узла

Задачи оценка устойчивости узла ШК входят в состав задачи анализа технологической системы (ТС) фрезерного станка, основной силовой контур которой составляют упругая система ШК с замыканием со стороны процесса резания (ПР) силой  $P_0$ . Передаточная функция  $W_{zc}(p)$  для такой замкнутой системы ШК – ПР представляет собой:

$$W_{zc}(p) = \frac{A(p) \cdot (T_p p + 1)}{K_p (A(p) + B(p)) + (T_p p + 1) \cdot A(p) \cdot B(p)}, \quad (3)$$

где  $A(p) = m_1 p^2 + h_1 p + c_1$ ;  $B(p) = m_2 p^2 + h_2 p + c_2$ ;  $K_p \approx 1,4 \cdot \zeta \sigma_B b$ ,

$K_p$  - удельная сила резания, Н/мм;  $\sigma_B$  - временное сопротивление обрабатываемого материала, МПа;  $b$  - ширина срезаемого слоя, мм.

Для оценки устойчивости системы ШК используем метод Д - разбиений [3], заключающийся в анализе числа корней характеристического уравнения (3), лежащих в правой полуплоскости пространства исследуемых параметров. Характеристический полином знаменателя передаточной функции (3), определяющий устойчивость, позволяет найти значения параметров Д - разбиения на плоскости  $K_p$ :

$$K_p = - \frac{A(p) \cdot B(p) \cdot (T_p p + 1)}{A(p) + B(p)}. \quad (4)$$

После перехода к преобразованию Фурье  $p = j \cdot w$  и осуществления разделения на вещественную и мнимую части, разработана программа оценки устойчивости в среде MATLAB. В результате проведения численного анализа исследованы области устойчивости и построены кривые Д - разбиения в плоскости параметра  $K_p$  (рис. 4), где штриховкой обозначена область претендента на устойчивость  $s$ .

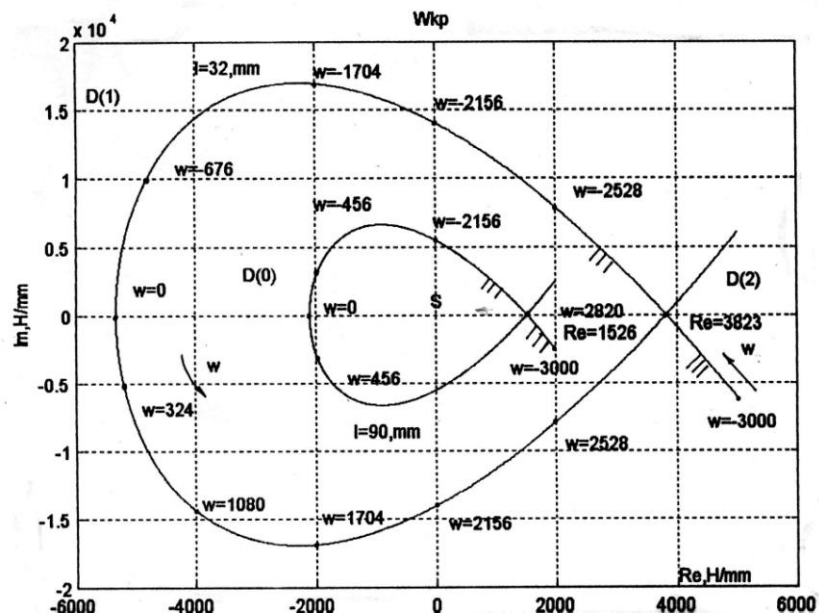


Рис.4. Однопараметрическое Д-разбиение

Так как точка  $(0,0)$ , т.е.  $K_p = 0$  принадлежит области устойчивости  $D(0)$ , то эта область является самой областью устойчивости; при этом интерес будет представлять лишь разбиение действительной оси - действительные значения

$K_p$ . Из выражения (4) следует, что граница Д - разбиения соответствует уравнению:

$$1,36 \cdot 10^{-6} p^5 + 6,5 \cdot 10^{-4} p^4 + 1,79 p^3 + (0,057 K_p + 715,8) p^2 + (3,86 K_p + 591205) p + (35540 K_p + 1,9 \cdot 10^8) = 0.$$

Для  $K_p = 0$ ; т. (0,0) полином 5-ой степени превращается в уравнение:

$$1,36 \cdot 10^{-6} p^5 + 6,5 \cdot 10^{-4} p^4 + 1,79 p^3 + 715,8 p^2 + 591205 p + 1,9 \cdot 10^8 = 0,$$

все пять корней которого ( $p_{1,2} = -0,9 \pm 8,1 \cdot j$ ;  $p_{3,4} = -0,59 \pm 7,9 \cdot j$ ;  $p_5 = -3,45$ ) лежат в левой полуплоскости корней. Полученные кривые в комплексной плоскости разбивают пространство на три области Д(0), Д(1) и Д(2) и переход через границу Д - разбиения соответствует переходу корней уравнения через мнимую ось.

Анализ области устойчивости в плоскости параметра  $K_p$  при фрезеровании концевой фрезой ( $d_\phi = 16$  мм;  $L_k = 32$  мм) показывает, что область ограничена максимальным значением  $K_p = 3823$  Н/мм при  $f = 346$  Гц. Соответствующее предельное значение ширины стружки  $b_{np} = 1,8$  мм (случай обработки углеродистой конструкционной стали с коэффициентом усадки  $\zeta = 2,2$ ;  $\sigma_B = 750$  МПа). С увеличением длины консоли величина  $K_p$  резко уменьшается - при  $L_k = 90$  мм область устойчивости ограничена  $K_p = 1526$  Н/мм, значением частоты  $\omega = 2820$  с<sup>-1</sup> и предельной шириной  $b_{np} = 0,7$  мм.

Анализ устойчивости динамической системы ШК – ПР позволяет проектантам при анализе процесса резания определять оптимальные оптимальную глубину резания:  $t_0$ . Предельному значению жесткости  $K_p^{np} = 3823$  Н/мм будет соответствовать оптимальное значения:

$$t_0 = \frac{K_p^{np}}{1,4 \cdot \zeta \cdot \sigma_B \cdot \sin 60^\circ} = \frac{3823}{1,4 \cdot 2,2 \cdot 750 \cdot 0,866} = 1,91 \text{ мм.}$$

Влияние двух параметров  $K_p(t)$  и  $T_p(s)$  на устойчивость системы ШК-ПР эффективно решается в случае, если эти параметры линейно входят в характеристическое уравнение

$$K_p \cdot M(p) + T_p \cdot Q(p) + R(p) = 0,$$

где  $M(p) = A(p) + B(p)$ ;  $Q(p) = p \cdot A(p) \cdot B(p)$ ;  $R(p) = \dots \cdot A(p) \cdot B(p)$ .

Граница Д – разбиения в плоскости  $K_p$  и  $T_p$  определяется системой (5)

$$\begin{aligned} K_p \cdot M_1(\omega) + T_p \cdot Q_1(\omega) + R_1(\omega) &= 0 \\ K_p \cdot M_2(\omega) + T_p \cdot Q_2(\omega) + R_2(\omega) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Решая систему уравнений (5) относительно  $K_p$  и  $T_p$  можно для каждого значения  $\omega$  определить их значения и в плоскости « $K_p - T_p$ » построить границу Д – разбиения. Пример построения двухпараметрического Д - разбиения в задаче анализа устойчивости станка СФ68ВФ4 и поиска оптимальных режимов резания при растачивании  $\{t_0; s_0\}$  представлен на рисунке 5.

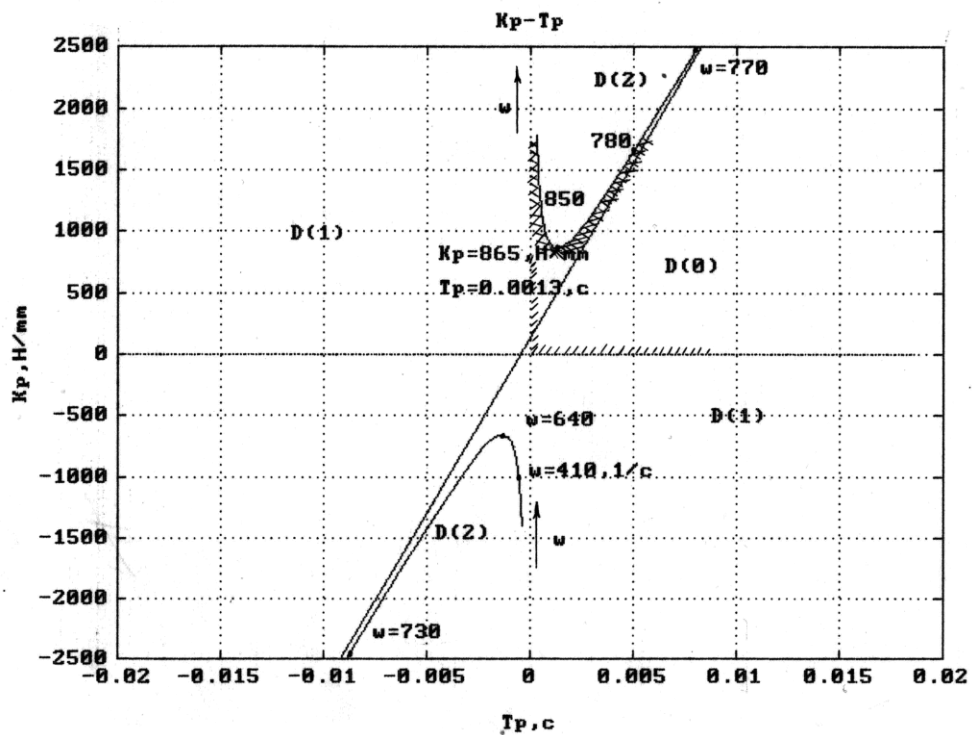


Рис. 5. Двухпараметрическое Д – разбиение в плоскости « $K_p - T_p$ »

Так как граница Д – разбиения для положительных и отрицательных значений  $\omega$  совпадает (величины  $K_p - T_p$  четные функции  $\omega$ ), то они штрихуются дважды с одной и той же стороны. Область устойчивости образуется положительной частью особой прямой и кривой Д – распределения. Точка экстремума границы Д – разбиения:  $K_p = 865 \text{ Н/мм}$ ;  $T_p = 0,0013, \text{ с}$  может ассоциироваться с парой оптимальных режимов резания  $\{ t_0 ; s_0 \}$  по критерию устойчивости в соответствии с зависимостями динамики процесса резания:

$$t_0 = \frac{K_p^{np}}{1,4 \cdot \zeta \cdot \sigma_B \cdot \sin 60^\circ} = 0,43 \text{ мм}; \quad s_0 = \frac{T_p^{np} \cdot V}{4 \cdot 60 \cdot \zeta \cdot \sigma_B \cdot \sin 60^\circ} = 0,21 \text{ мм/об.}$$

Выводы. Разработаны модели и процедуры исследования динамики замкнутой упругой системы «ШК-ПР». В среде MatLab построены частотные характеристики и АФЧХ исследуемой системы. Предложен новый подход к поиску оптимальных режимов резания по критерию виброустойчивости, основанный на одно- и двухпараметрических Д - разбиениях.

#### Литература

1. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем. Справ очник-учебник в 3-х т. Т.2. Ч.1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков/А.С. Проников и др.- М: Изд-во МГТУ, 1995.- 371с.
2. Высокопроизводительная обработка металлов резанием.- М.: Изд-во Полиграфия, 2003. – 301с.
3. Теория автоматического регулирования . Ч. 1. Под ред. А. В. Нетушила.- М.: Высшая школа, 1967. - 424 с.