

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

Шпиндельный узел (ШУ) – важный узел станка, от которого зависит точность обработки, надежность и производительность оборудования. Поэтому к нему предъявляются особые требования.

К определяющим характеристикам шпиндельного узла, от которых непосредственно зависят его качество и технологические возможности, относятся точность, жесткость, нагрузочная способность, быстроходность и надежность. Кроме того, имеются дополнительные характеристики работоспособности шпиндельного узла: динамические и тепловые характеристики.

Для высокоскоростных шпинделей на первый план выходят динамические характеристики.

При динамическом расчете ШУ наибольшее распространение получили метод начальных параметров (МНП) и метод конечных элементов (МКЭ) [1,2]. Целесообразно применять МНП в матричной формулировке (метод переходных матриц). Данный метод позволяет связать параметры переднего конца шпинделя с параметрами заднего через матрицы его сечений и участков.

ШУ рассматривают как линейно деформируемую систему, при этом перемещения точек шпинделя выражают в виде линейной функции сил, приложенных к шпинделю.

Шпиндель рассматривают как ступенчатую балку, точечные опоры которой обладают постоянной угловой и осевой жесткостью.

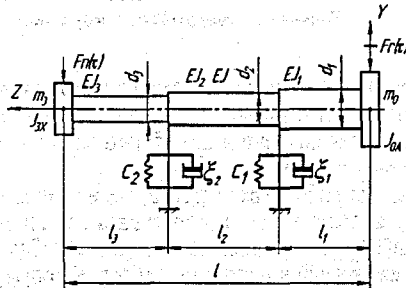


Рисунок 1 – Расчетная схема системы шпиндель-опоры

ШУ разбивают на участки, разграниченные скачкообразным изменением диаметров, сосредоточенной массой, опорами, внешней нагрузкой. Установленные на шпиндель детали (патроны, шкивы и т.д.) представляют в виде сосредоточенных масс.

Рассмотрим обобщенную схему расчета ШУ, изображённую на рис.1. Ступенчатая балка разбита на 3 участка. На концах расположены сосредоточенные массы: патрон – m_0 и шкив ременной передачи – m_3 . На передний конец шпинделя действуют силовые возмущения со стороны процесса резания – $F_n(t)$, на задний конец действуют силовые возмущения от привода – $F_R(t)$.

Обозначим параметры сечений: y_k – амплитуда перемещений; ϕ – угол поворота; M_k – изгибающий момент Q_k – поперечная сила.

Выразим дифференциальное уравнение напряженно-деформированного состояния шпинделя через параметры его сечений:

$$y(x) = y(0)A(x) + \varphi(0)lB(x) + \frac{M(0)l^2}{EJ}C(x) + \frac{Q(0)l^3}{EJ}D(x), \quad (1)$$

где $A(x)$, $B(x)$, $C(x)$, $D(x)$ – функции Крылова [3].

Матрицы параметров на концах шпинделя без учета внешней нагрузки (для случая чистовой обработки):

$$Y_0 = \begin{bmatrix} y_0 \\ \varphi_0 l \\ \frac{M_0 l^2}{EJ} \\ \frac{Q_0 l^3}{EJ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_0 \\ \varphi_0 l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad Y_3 = \begin{bmatrix} y_3 \\ \varphi_3 l \\ \frac{M_3 l^2}{EJ} \\ \frac{Q_3 l^3}{EJ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_3 \\ \varphi_3 l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Теперь, продвигаясь к левому концу шпинделя, запишем матрицы всех его участков. Для этого удобно использовать каталог переходных матриц.

В нулевом сечении действует сосредоточенная масса и момент инерции оснастки (патрона), амплитудные значения которых равны $m_0 \omega^2 y_0$ и $I_{0x} \varphi_0 \omega^2$. Матрица сосредоточенной массы:

$$G_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\delta_0 & 1 & 0 \\ v_0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \delta_0 = \frac{I_{0x} \omega^2 l^2}{EJ}; \quad v_0 = \frac{m_0 \omega^2 l^3}{EJ}.$$

На первом участке шпинделя действует распределенная масса \tilde{m}_1 и жесткость EJ_1 . Матрица распределенной массы:

$$U_1 = \begin{bmatrix} A_1 & \beta_1 B_1 & \frac{\beta_1^2 C_1}{\alpha_1} & \frac{\beta_1^3 D_1}{\alpha_1} \\ \frac{\lambda_1^4 D_1}{\beta_1} & A_1 & \frac{\beta_1^2 B_1}{\alpha_1} & \frac{\beta_1^3 C_1}{\alpha_1} \\ \frac{\alpha_1 \lambda_1^4 C_1}{\beta_1^2} & \frac{\alpha_1 \lambda_1^4 D_1}{\beta_1} & A_1 & \beta_1 B_1 \\ \frac{\alpha_1 \lambda_1^4 B_1}{\beta_1^3} & \frac{\alpha_1 \lambda_1^4 C_1}{\beta_1^2} & \frac{\lambda_1^4 D_1}{\beta_1} & A_1 \end{bmatrix}$$

$$\text{где } \alpha_1 = \frac{EJ_1}{EJ}, \quad \beta_1 = \frac{l_1}{l}, \quad \lambda_1^4 = \frac{\tilde{m}_1 l_1 \omega^2}{EJ_1}.$$

В опоре 1 сила изменяется скачком на величину реакции опоры, для которой учтены упругая и диссипативная составляющие, а также могут быть учтены и другие составляющие (гидродинамическая реакция, гироскопический момент и др.). Матрица опоры:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ (-\varepsilon_1 - f_1) & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \varepsilon_1 = c_1 l^2 / (EJ); \quad v_0 = i \xi_1 \omega l^3 / (EJ);$$

c_1 и ξ_1 – коэффициенты жесткости и демпфирования опоры.

Продвигаясь от участка к участку, доходим до заднего конца шпинделя, где параметры выражены матрицей Y_3 . В результате имеем матричное уравнение без учета внешней нагрузки:

$$Y = \Pi Y_0, \quad (2)$$

где Π – переходная матрица, для приведенного примера представляет собой произведение:

$$\Pi = G_3 U_3 R_2 U_2 R_1 U_1 G_0, \quad (3)$$

где G_0, G_3 – матрицы сосредоточенных масс,

U_1, U_2, U_3 – матрицы пролетов, R_1, R_2 – матрицы опор с вязким демпфированием.

При учете внешней нагрузки в сечениях 0 и 3 уравнение (2) примет вид:

$$Y_3 = \Pi(Y_0 - S_0) - S_3, \quad (4)$$

где S_0, S_3 – матрицы внешней нагрузки $S_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{F_0 l^3}{EJ} \end{bmatrix}; S_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{F_3 l^3}{EJ} \end{bmatrix}$.

Определение переходной матрицы Π сводится к перемножению матриц всех участков шпинделя. Обычно на концах шпинделя два из четырех параметров в матрицах Y_0 и Y_3 равны нулю, что позволяет сократить время расчетов путем сохранения в переходной матрице лишь части элементов.

Из уравнения (3) могут быть получены передаточные функции:

- W_0 – по воздействию со стороны процесса резания ($S_3 = 0$);
- W_3 – по воздействию со стороны привода ($S_0 = 0$).

При вычислении передаточной функции W_0 из уравнения (4) получаем $Y_3 = \Pi(Y_0 - S_0)$, при записи в развернутом виде:

$$\begin{bmatrix} y_3 \\ \varphi_3 l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ a_{31} & a_{32} & * & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & * & a_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_0 \\ \varphi_0 l \\ 0 \\ -\frac{F_0 l^3}{EJ} \end{bmatrix}$$

В матрице сохраняются только 6 элементов, стоящих на пересечении строк, совпадающих с нулевыми строками матрицы Y_3 , и столбцов, совпадающих с ненулевыми элементами матрицы $(Y_0 - S_0)$. Выделим 2 линейных уравнения:

$$\begin{aligned} a_{31} y_0 + a_{32} \varphi_0 l &= a_{34} \frac{F_0 l^3}{EJ}, \\ a_{41} y_0 + a_{42} \varphi_0 l &= a_{44} \frac{F_0 l^3}{EJ}, \end{aligned} \quad (5)$$

Непосредственно из (5) может быть выражено выражение передаточной функции:

$$W_0 = \frac{y_3}{F_0} = \frac{l^3}{EJ} \frac{a_{14} a_{42} - a_{12} a_{44}}{a_{11} a_{42} - a_{41} a_{11}}, \quad (6)$$

Аналогично определяют и вторую передаточную функцию W_3 , при $S_0 = 0$.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_3 \\ \varphi_3 l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ a_{31} & a_{32} & * & * \\ a_{41} & a_{42} & * & * \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_0 \\ \varphi_0 l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{F_3 l^3}{EJ} \end{bmatrix} \\ W_3 &= \frac{y_3}{F_3} = \frac{l^3}{EJ} \frac{a_{32}}{a_{31} a_{41} - a_{31} a_{42}}, \end{aligned} \quad (7)$$

Используя данный метод, удобно выполнять расчеты на ЭВМ в виде цикла, когда все значения передаточной функции, рассчитанные для определенного промежутка частот, систематизируются и могут быть получены различные графики.

В качестве примера рассмотрим результаты расчета динамических характеристик вертикального консольно-фрезерного станка мод. 6К12. Расчетная схема ШУ показана на рис. 2.

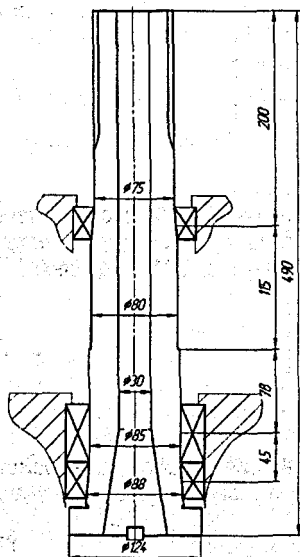


Рисунок 2 – Расчетная схема системы шпиндель-опоры

На переднем конце шпинделя находятся шариковый радиальный двухрядный подшипник и роликовый радиально-упорный с короткими цилиндрическими роликами. На заднем конце – роликовый радиально-упорный с короткими цилиндрическими роликами.

В результате динамического расчета получаем два графика: амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ).

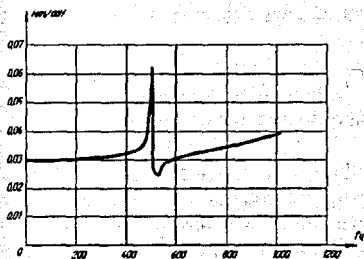


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика ШУ

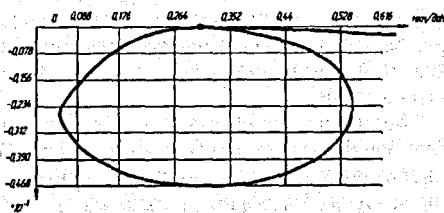


Рисунок 4 – Амплитудно-фазовая частотная характеристика ШУ

Как следует из графика АЧХ, резонансная частота составляет 500 Гц, что является хорошим показателем для низкоскоростного шпинделя с $(dn)_{\max} = 1.9 \cdot 10^5$ мм·мин⁻¹. Рабочие частоты станка не попадают в резонансную зону. При этом, в соответствии с критерием Найквиста – Михайлова [4], АФЧХ (рис. 4) показывает, что ШУ обладает высокой устойчивостью. Таким образом, рассматриваемая конструкция отвечает динамическим требованиям обработки.

Рассматриваемая методика динамического расчета позволяет путем подбора параметров получить наилучшие динамические параметры ШУ. Также могут быть получены различные конструктивные варианты шпинделей для дальнейшего анализа и выбора.

Список цитированных источников

1. Пономарев, К.К. Расчет элементов конструкций с применением ЭЦВМ. – М.: Машиностроение, 1972. – 424 с.
2. Ивович, В.А. Переходные матрицы в динамике упругих систем: справочник. – М.: Машиностроение, 1981. – 183с.
3. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
4. Михайлов, А.В. О новом подходе исследования замкнутых регулируемых систем // Автоматика и телемеханика. – 1973. – № 8.
5. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем / А.С. Проников, Е.И. Борисов, В.В. Бушуев [и др.]; под общ. ред. А.С.Проникова. – М.: Машиностроение, 1972. – Том 2. – Часть 1. – 374 с.
6. Орликов, М.Л. Динамика станков. – К.: Вища школа. 1989. – 272 с.

УДК 621.387.143

Ермолич М.В., Горбач Н.М.

Научные руководители: профессор Сазонов М.И., доцент Черноиван Н.В.

ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛЕЙ

Для повышения надежности, долговечности и эксплуатационных свойств деталей машин, экономии энергетических ресурсов используются различные способы упрочнения металлоизделий. Данная работа посвящена использованию плазмотрона для поверхностного упрочнения деталей из сталей.

Проведенные исследования [1-3] показали, что способность стали к закаливанию определяется составом и содержанием легирующих элементов. Испытания на износостой-