

О. А. Ямникова, д-р техн. наук, проф., **А. С. Ямников**, д-р техн. наук, проф.
Тульский государственный университет, Россия
Тел./Факс: +7 (4872) 25-46-48; E-mail: YamnikovAS@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВИБРОУСТОЙЧИВОГО ТОЧЕНИЯ НЕЖЕСТКИХ ЗАГОТОВОК МНОГОРЕЗЦОВЫМИ ГОЛОВКАМИ

В статье описывается методика аналитического определения условий виброустойчивого точения нежестких заготовок многолезцовыми головками. Дано описание экспериментального определения жесткости и демпфирующей способности технологической системы. Приведен пример численного моделирования виброустойчивости для конкретной технологической системы с известными характеристиками. Показаны пути приведения системы в виброустойчивое состояние. Установлено, что применение люнетов – виброгасителей позволяет повысить жесткость и демпфирующие способности технологической системы, причем в нашем случае эти параметры могут регулироваться. Подробно описана конструкция и работа виброгасителя.

Ключевые слова: виброустойчивость, многолезцовые головки, нежесткие заготовки, моделирование, технологическая система.

O. A. Yamnikova, A. S. Yamnikov

DEFINITION OF CONDITIONS OF VIBRATION-PROOF TURNING NONRIGID PREPARATIONS BY MNOGOREZTSOVY HEADS

In article the technique of analytical definition of conditions of vibration-proof turning of nonrigid preparations is described by mnogoreztsovy heads. The description of experimental determination of rigidity and the damping ability of technological system is given. The example of numerical modeling of vibrostability for concrete technological system with known characteristics is given. Ways of reduction of system to a vibration-proof state are shown. It is established that application of lunettes – vibroquencher allows to increase rigidity and the damping abilities of technological system, and in our case these parameters can be regulated. The design and work of a vibroquencher is in detail described.

Key words: vibrostability, mnogoreztsovy heads, nonrigid preparations, modeling, technological system)

1. Введение

Одной из классических операций по обработке деталей типа нежестких заготовок является точение наружной цилиндрической поверхности. Чтобы повысить производительность обработки и снизить погрешность, вызванную прогибом заготовки при обработке, применяют точение многолезцовыми головками [1]. Этот процесс также не лишен проблем. Одна из них – вибрации, возникающие вследствие непостоянства силы резания. Чтобы оценить, насколько данный способ приемлем для обработки, то есть, будут ли возникающие динамические погрешности формы находиться в зоне допуска, целесообразно использовать имитационное моделирование [2]. В последней статье дается описание математического аппарата для определения условий виброустойчивого точения по принципу: да - нет. Однако до примера численного использования методика не была доведена.

2. Основное содержание и результаты работы

В данной статье поставлена цель, представить имитационную модель определения конструктивно - технологических параметров системы и обоснования режима безвибрационного точения нежестких заготовок многолезцовыми головками. В нашем случае имитационная модель будет состоять из трех компонентов:

- 1) динамической модели упругих колебаний технологической системы;
- 2) модели силы резания, учитывающей изменения режимов резания во времени;
- 3) критерия виброустойчивости технологической системы.

Само моделирование описывает итерационный дискретный по времени процесс обработки. На рис. 1 представлены концептуальная схема имитационной модели и взаимосвязи ее компонентов.



Рис. 1. Этапы моделирования виброустойчивости точения многорезцовыми головками

На каждом шаге рассчитываются текущие значения функций колебаний заготовки в зоне резания; погрешности режимов резания; и, наконец, динамические изменения силы резания, учитывающие вышеперечисленные параметры. При этом на каждой итерации необходимо проверять критерий устойчивости технологической системы: если система устойчива, то процесс продолжается, в противном случае – моделирование прекращается, запоминается и фиксируется момент времени и текущая координата зоны резания. В случае устойчивости процесса результатом моделирования являются текущие режимы резания и, как следствие, изменения формы детали относительно номинальной.

Ранее в работах [1 - 2] рассматривался структурный критерий устойчивости Рауса-Гурвица, который позволяет ответить на вопрос о наличии вибраций в технологической системе. Но в конкретных случаях учитывались только поперечные колебания заготовки, при этом заготовка рассматривалась как точка с приведенной массой и жесткостью в плоскости ZOY . Чтобы учесть все упругие колебания: продольно-крутильные и поперечные, удобно применить имитационное моделирование процесса точения, включающее такой момент упрощения как линеаризацию динамических составляющих силы резания от самих величин погрешностей или их производных по времени, что по-

зволит получить численную оценку колебаний технологической системы. При этом устойчивость будет определяться для произвольной координаты зоны резания по длине заготовки. После того, как будет известно, что процесс устойчив по всей длине обрабатываемого участка, можно подбирать режимы резания или менять конструктивные параметры технологической системы.

Для решения поставленной задачи следует описать процесс с помощью системы линейных дифференциальных уравнений (1) относительно упругих перемещений: продольных - w , крутильных - φ , поперечных вдоль оси Oy - u_y и вдоль оси Oz - u_z .

$$\begin{cases} m_x \cdot \ddot{w} + \eta_x \cdot \dot{w} + C_x \cdot w = \Delta P_x; \\ m_y \cdot \ddot{u}_y + \eta_y \cdot \dot{u}_y + C_y \cdot u_y = \Delta P_y; \\ m_z \cdot \ddot{u}_z + \eta_z \cdot \dot{u}_z + C_z \cdot u_z = \Delta P_z; \\ I_\varphi \cdot \ddot{\varphi} + \eta_\varphi \cdot \dot{\varphi} + C_\varphi \cdot \varphi = R \cdot \Delta P_z. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\eta_x, \eta_y, \eta_z, \eta_\varphi$ - коэффициенты затухания; C_x, C_y, C_z, C_φ - приведенные коэффициенты жесткости технологической системы в зоне резания; $\Delta P_x, \Delta P_y, \Delta P_z$ - составляющие динамических изменений сил резания по осям координат относительно технологической системы; m_x, m_y, m_z - приведенные массы технологической системы по осям координат:

$$m_x = \frac{C_x}{\omega^2}; \quad m_y = \frac{C_y}{\omega^2}; \quad m_z = \frac{C_z}{\omega^2},$$

где ω - собственная частота технологической системы; I_φ - момент инерции; R - радиус заготовки.

К полученной математической модели процесса нельзя применить критерий Раусса-Гурвица в явном виде, так как формулы расчета изменений силы резания имеют степенную зависимость от режимов резания, а также от текущих значений колебаний в зоне резания. Для устранения проблемы степенной зависимости можно применить разложение в ряд Тейлора. При этом следует помнить о временной зависимости погрешностей режимов резания от значения функций продольных, поперечных и крутильных колебаний. Тангенциальная составляющая силы резания \vec{P}_{τ_i} при многолезцовом точении будет направлена по касательной к поверхности резания (рис. 2).

Индекс i зависит от номера инструмента: $i = 1, \dots, n$. Здесь n - количество резцов. Две остальных составляющих силы - радиальная \vec{P}_{R_i} и осевая \vec{P}_{x_i} будут пересчитываться через линейный коэффициент:

$$P_{\tau_i} = C_p \cdot (t_0 - \Delta t_i)^m \cdot (s_0 - \Delta s_i)^p \cdot (v_0 - \Delta v_i)^n \cdot K, \quad (2)$$

$$P_{R_i} = k_R \cdot P_{\tau_i}, \quad (3)$$

$$P_{x_i} = k_x \cdot P_{\tau_i}. \quad (4)$$

где C_p - коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств обрабатываемого материала; t_0 - глубина резания; s_0 - подача; v_0 - скорость резания; m, p, n - табулированные показатели степени; K - общий поправочный коэффициент, учитывающий из-

менение условий резания по отношению к табличным; k_x, k_y – линейные табулированные коэффициенты; $\Delta t_i, \Delta s_i, \Delta v_i$ – динамические изменения соответствующих режимов резания (глубины, подачи и скорости).

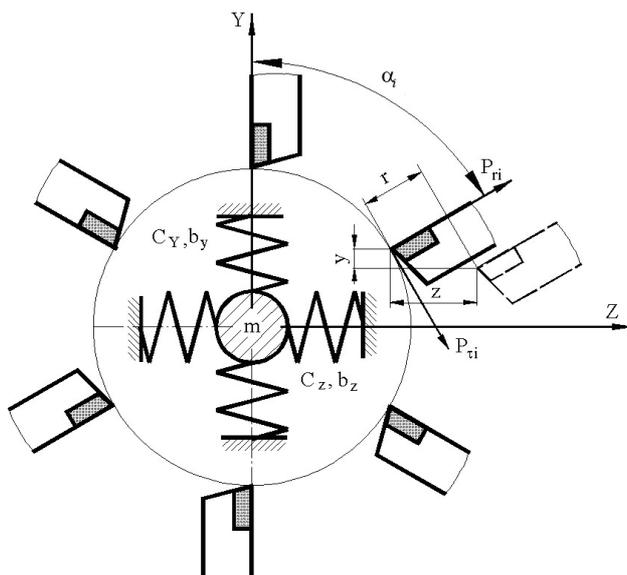


Рис. 2. Схема технологических факторов, действующих при точении многолезцовыми головками

Для упрощения зависимости воспользуемся разложением в степенной ряд. Начнем с разложения в ряд всех степенных множителей зависимостей (2)-(4). При этом за переменную величину примем динамическое изменение соответствующего параметра резания – $\Delta t_i, \Delta s_i, \Delta v_i$. Тогда используя разложение Тейлора первого порядка, получим следующий вид для степенных множителей [3]:

$$\begin{cases} (t_0 - \Delta t_i)^m \approx t_0^m - t_0^{m-1} \cdot m \cdot \Delta t_i; \\ (s_0 - \Delta s_i)^p \approx s_0^p - s_0^{p-1} \cdot p \cdot \Delta s_i; \\ (v_0 - \Delta v_i)^n \approx v_0^n - v_0^{n-1} \cdot n \cdot \Delta v_i. \end{cases} \quad (5)$$

С учетом зависимостей (5) формула расчета тангенциальной составляющей силы резания примет вид:

$$\begin{aligned} P_{\tau_i} \approx & C_p \cdot t_0^m \cdot s_0^p \cdot v_0^n - \\ & - C_p \cdot (t_0^{m-1} \cdot s_0^p \cdot v_0^n \cdot m \cdot \Delta t_i + t_0^m \cdot s_0^{p-1} \cdot v_0^n \cdot p \cdot \Delta s_i + \\ & + t_0^m \cdot s_0^p \cdot v_0^{n-1} \cdot n \cdot \Delta v_i) = P_{\tau_i 0} + \Delta P_{\tau_i}. \end{aligned} \quad (6)$$

При имитационном моделировании процесса точения используются динамические составляющие сил резания, определяемые по следующим формулам [3]:

$$\Delta P_{\tau_i} = -C_p \cdot (t_0^{m-1} \cdot s_0^p \cdot v_0^n \cdot m \cdot \Delta t_i + t_0^m \cdot s_0^{p-1} \cdot v_0^n \cdot p \cdot \Delta s_i + t_0^m \cdot s_0^p \cdot v_0^{n-1} \cdot n \cdot \Delta v_i); \quad (7)$$

$$\Delta P_{x_i} = k_x \cdot \Delta P_{\tau_i}; \quad (8)$$

$$\Delta P_{R_i} = k_R \cdot \Delta P_{\tau_i}. \quad (9)$$

Для имитационного моделирования необходимо разложение динамических составляющих силы резания по осям координат. Если осевую составляющую можно рассчитать по формуле (8), то составляющие в плоскости резания будут пересчитываться в зависимости от угла поворота резца и от их суммы. В систему (1) будем подставлять суммарные динамические составляющие сил резания:

$$\Delta P_z = \sum_{i=1}^n \Delta P_{\tau_i} \cdot (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i);$$

$$\Delta P_y = \sum_{i=1}^n \Delta P_{\tau_i} \cdot (k_R \cdot \sin \alpha_i - \cos \alpha_i).$$

При этом надо учесть, что для структурного критерия требуется разложение силы резания через упругие колебания, в результате получим следующие формулы расчета погрешностей:

$$\Delta t_i = u_z \cdot \cos(\alpha_i) - u_y \cdot \sin(\alpha_i) + e_i, \quad (10)$$

$$\Delta s_i = w - \varphi \cdot R, \quad (11)$$

$$\Delta v_i = \dot{u}_z \cdot \sin(\alpha_i) + R \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\alpha_i). \quad (12)$$

Здесь e_i - суммарная погрешность формы заготовки, зависящая от угла поворота и координаты зоны резания. С учетом расчетных формул (10) – (12) получим:

$$\Delta P_{\tau_i} = -C_p \cdot \left(t_0^{m-1} \cdot s_0^p \cdot v_0^n \cdot m \cdot (u_z \cdot \cos \alpha_i - u_y \cdot \sin(\alpha_i) + e_i) + \right. \\ \left. + t_0^m \cdot s_0^{p-1} \cdot v_0^n \cdot p \cdot (w - \varphi \cdot R) + \right. \\ \left. + t_0^m \cdot s_0^p \cdot v_0^{n-1} \cdot n \cdot (\dot{u}_z \cdot \sin(\alpha_i) + R \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\alpha_i)) \right).$$

В общем случае динамические составляющие силы резания можно представить в виде:

$$\begin{cases} \Delta P_z = a_{xz} \cdot w + a_{yz} \cdot u_y + a_{zz} \cdot u_z + a_{\varphi z} \cdot \varphi + a'_{zz} \cdot \dot{u}_z + a'_{\varphi z} \cdot \dot{\varphi}; \\ \Delta P_y = a_{xy} \cdot w + a_{yy} \cdot u_y + a_{zy} \cdot u_z + a_{\varphi y} \cdot \varphi + a'_{zz} \cdot \dot{u}_z + a'_{\varphi z} \cdot \dot{\varphi}; \\ \Delta P_x = a_{xx} \cdot w + a_{yx} \cdot u_y + a_{zx} \cdot u_z + a_{\varphi x} \cdot \varphi + a'_{zz} \cdot \dot{u}_z + a'_{\varphi z} \cdot \dot{\varphi}. \end{cases} \quad (13)$$

Коэффициенты линейного разложения в формулах (13) будут рассчитываться для каждого частного случая. Для тангенциальной составляющей ΔP_z

$$a_{yz} = C_p \cdot v_0^n \cdot s_0^p \cdot t_0^{m-1} \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n \sin(\alpha_i) \cdot (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i);$$

$$a_{xz} = -C_p \cdot v_0^n \cdot s_0^{p-1} \cdot t_0^m \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i);$$

$$a_{zz} = -C_p \cdot v_0^n \cdot s_0^p \cdot t_0^{m-1} \cdot m \cdot \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i) \cdot (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i);$$

$$a_{\varphi z} = C_p \cdot v_0^n \cdot s_0^{p-1} \cdot t_0^m \cdot m \cdot R \cdot \sum_{i=1}^n (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i);$$

$$a'_{zz} = -C_p \cdot v_0^{n-1} \cdot s_0^p \cdot t_0^m \cdot n \cdot \sum_{i=1}^n \sin(\alpha_i) \cdot (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i);$$

$$a'_{\varphi z} = -C_p \cdot R \cdot v_0^{n-1} \cdot s_0^p \cdot t_0^m \cdot n \cdot R \cdot \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i) \cdot (\cos \alpha_i + k_R \cdot \sin \alpha_i).$$

Аналогично определяются коэффициенты для этого процесса при расчете радиальной ΔP_y и осевой ΔP_x динамических составляющих. Решение системы (1) будем искать в виде:

$$\left. \begin{aligned} w &= A_x \cdot e^{s\tau}; \\ u_y &= A_y \cdot e^{s\tau}; \\ u_z &= A_z \cdot e^{s\tau}; \\ \varphi &= A_\varphi \cdot e^{s\tau}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Подставляя выражения (13) и (14) в систему (1), получим

$$\left\{ \begin{aligned} &A_x (m_x \cdot s^2 + \eta_x \cdot s + C_x - a_{xx}) - A_y \cdot a_{yx} - A_z \cdot (a_{zx} + a'_{zx} \cdot s) - \\ &- A_\varphi \cdot (a_{\varphi x} + a'_{\varphi x} \cdot s) = 0; \\ &- A_x \cdot a_{xy} + A_y (m_y \cdot s^2 + \eta_y \cdot s + C_y - a_{yy}) - \\ &- A_z \cdot (a_{zy} + a'_{zy} \cdot s) - A_\varphi \cdot (a_{\varphi y} + a'_{\varphi y} \cdot s) = 0; \\ &- A_x \cdot a_{xz} - A_y \cdot a_{yz} + A_z (m_z \cdot s^2 + \eta_z \cdot s + C_z - a_{zz} - a'_{zz} \cdot s) - \\ &+ A_\varphi \cdot (a_{\varphi z} + a'_{\varphi z} \cdot s) = 0; \\ &- A_x \cdot a_{xz} \cdot R - A_y \cdot a_{yz} \cdot R - A_z \cdot (a_{zz} + a'_{zz} \cdot s) \cdot R + \\ &+ A_\varphi (I_\varphi \cdot s^2 + \eta_\varphi \cdot s + C_\varphi - R \cdot (a_{\varphi z} + a'_{\varphi z} \cdot s)) = 0. \end{aligned} \right.$$

Общее решение характеристического уравнения системы, как уравнения восьмой степени, является сложным и неудобным для практического использования, поскольку результат невозможно получить в явной форме. Для того чтобы ответить на основной вопрос о том, при каких условиях (то есть при каких значениях исходных параметров) возникают автоколебания, не обязательно знать полное решение характеристического уравнения [3]. Достаточно составить из их коэффициентов условия устойчивости (критерий Раусса - Гурвица), которые указывают, в каком случае характеристическое уравнение имеет корень с положительной вещественной частью или не имеет его. Если написать характеристическое уравнение в общем виде

$$A_0 \cdot s^8 + A_1 \cdot s^7 + A_2 \cdot s^6 + A_3 \cdot s^5 + A_4 \cdot s^4 + A_5 \cdot s^3 + A_6 \cdot s^2 + A_7 \cdot s + A_8 = 0, \quad (15)$$

то критерий устойчивости, то есть условия, при соблюдении которых ни один из корней уравнения не имеет вещественной положительной части, определяется системой неравенств:

$$I_j > 0, \quad j = 0, \dots, 8,$$

где I_j - инвариант j -го порядка уравнения (15):

$$I_0 = A_0; \quad I_1 = A_1;$$

и т.д. до инварианта 8-го порядка.

Имея математический аппарат для качественной оценки виброустойчивости технологической системы и количественной оценки влияния упругих колебаний на динамические характеристики процесса многорезцового точения, можно алгоритмизировать действия по выбору безвибрационных режимов. Для практической реализации вышеприведенной методики необходимо иметь конкретные данные о реальной технологической системе. Как отмечалось выше, силы резания для оценки виброустойчивости могут быть определены расчетным путем. Сложнее узнать жесткость и демпфирующие способности системы. В большинстве случаев прибегают к экспериментальному определению этих величин. Жесткость технологической системы определяют измерениями по методике Вотинова К.В. [4 - 6]. Суммарное значение жесткости по каждой координатной оси определялось по известной зависимости А.П. Соколовского:

$$C_{\Sigma} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k 1/C_i},$$

где C_i - жесткость звена, входящего в технологическую систему и влияющего на суммарное перемещение системы в заданном направлении, k - количество таких звеньев.

Естественно, жесткость существенно зависит от жесткости собственно станка и, особенно от жесткости заготовки, закрепляемой на двух центрах [2]. Поскольку для получения качественной обработки необходимо обеспечить безвибрационный режим точения даже в невыгодных условиях, то будем использовать минимальное значение жесткости технологической системы $C_{\Sigma \text{ мин}} \approx 1000 \text{ Н/м м}$. Сложнее обстоит дело с определением диссипативных свойств системы, характеризующихся такими показателями, как логарифмический декремент затухания и коэффициент демпфирования.

Можно оперативно определить эти характеристики технологической системы использованием графо - аналитического метода с применением стандартных программ математической обработки данных, например, MathCAD.

Сущность экспресс-метода заключается в визуализации переходного процесса по данным, записанным в файл с помощью АЦП исследовательского комплекса, и вычислении основных параметров по задаваемым границам данных, определенным по графику переходного процесса. Для уменьшения погрешности вычислений необходимо выделить только основной участок графика переходного процесса до начала установившегося режима.

Ниже приведен фрагмент математического моделирования, наглядно отражающий принцип экспресс-метода. Анализ переходного процесса производился для технологической системы, включающей в себя: станок 16К20; заготовка - вал $D=29$ мм, $L=800$ мм, сталь 45; схема базирования - в двух центрах; координата приложения силы - 400 мм; ударная масса - 0,52 кг; радиальная сила удара (ступенчатый сигнал) ~ 240 Н; переходный процесс записан в файл; количество анализируемых точек переходного процесса $i = 1, 2, \dots, 80$; количество данных в строке: $j = 0, 1$; время дискретизации 0,0001 с (индекс 0); радиальные упругие перемещения в системе (индекс 1).

Среднее значение упругих деформаций в установившемся режиме (по 80 дискретным значениям, соответствующим промежутку времени 0,008с)

$$y_0 = \frac{1}{50} \sum_{i=30}^{80} y_{i,1}, \text{ то есть } y_0 = 0,134 \text{ мм.}$$

На рис. 3 представлен график переходного процесса, соответствующий указанному выше интервалу времени 0,008 с (сплошная линия).

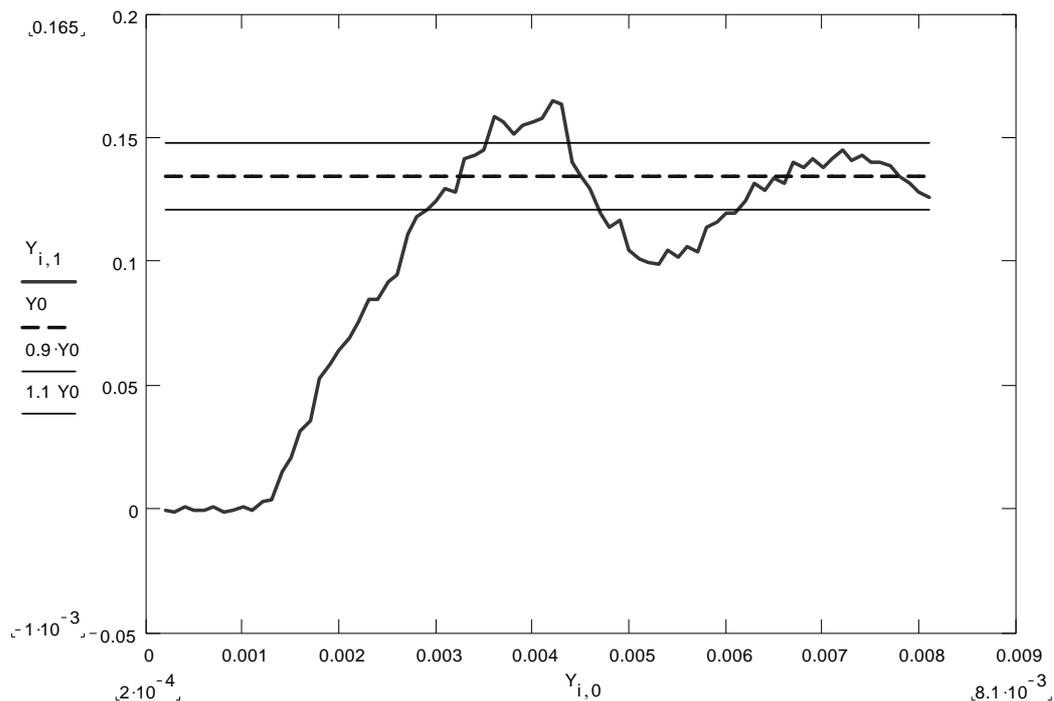


Рис. 3. График переходного процесса до начала установившегося режима в стыке заготовка-инструмент - технологической системы токарного станка

При выбранных режимах резания и определенном значении логарифмического декремента необходимо ответить на вопрос о минимально допустимой жесткости системы, которая может обеспечить устойчивость процесса обработки. На рис. 4 представлен график зависимости минимально допустимой жесткости от логарифмического декремента.



Рис. 4. График минимально допустимой жесткости

При возникновении вибраций в процессе обработки стакан 7 виброгасителя должен перемещаться внутри корпуса 8 со скоростью колеблющейся детали, преодолевая сопротивление трения о внутреннюю поверхность корпуса, резиновые кольца 9 и 10, а также усилие пружины 6 и сопротивление истечению жидкости через дроссельное отверстие. При быстрых микроперемещениях (вибрациях) их энергия поглощается за счет трения плунжера виброгасителя об упругие манжеты. Многолезцовая головка с виброгасителями позволила полностью устранить вибрации для рассматриваемого процесса.

Заключение

1. Разработанная методика позволяет оперативно определять динамические характеристики технологической системы на этапе подготовки производства.
2. Применение люнетов – виброгасителей повышает жесткость и демпфирующие способности технологической системы, причем в нашем случае эти параметры могут регулироваться.
3. Как показали испытания, предложенная конструкция виброгасителя обеспечивает достаточно надежное гашение низко- и высокочастотных колебаний, возникающих при многосуппортной обработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В. П., Ямникова О. А. Устойчивость технологической системы при нарезании резьбы многолезцовыми головками / СТИН, 2004, № 2. – С. 12 – 14.
2. Vykov G. T., Yamnikov A. S., Yamnikova O. A., Dorokhin N. B. VIBRATIONAL STABILITY IN TURNING THIN-WALLED PIPE BY MULTICUTTER HEADS / Russian Engineering Research. 2010. – Т. 30. – № 3. – С. 296–299.
3. Ямникова О. А., Ямников А. С., Определение условий виброустойчивого течения нежестких заготовок многолезцовыми головками / Научноёмкие технологии в машиностроении. 2012, – №11. – С. 15–21.
4. Ямников А. С., Матрохин М. В., Федин Е. И. Методика экспресс-оценки динамических характеристик металлорежущих станков / Известия ТулГУ. Технические науки. 2013, вып. 1. – С. 201–205.
5. Ямников А. С., Чуприков А. О., Иванов В. В. Уменьшение влияния технологической наследственности при токарной обработке тонкостенных сварных корпусов / Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П. А. Соловьева. – № 1 (28). 2014. – С. 142–148.
6. Ямников А. С., Чуприков А. О., Харьков А. И. Особенности нарезания внутренней резьбы на сварных корпусах / Materials of the I International scientific and practical conference, «Science and Education», – 2014. Volume 19. Technical sciences. Sheffield. Belgorod – Sheffield. Science and education LTD. 2014. 104 с. – С. 32–35.

Поступила в редколлегию 21.01.2016 г