

УДК: 629.4.02+06

OECD: 1.03.AA

Расчет скоростей колебаний узла резания шлицефрезерных станков

Набоков А.Е.¹, Яицков И.А.^{2*}, Шамшура С.А.³,¹ Заместитель декана по учебной работе факультета «Электромеханический»,
старший преподаватель кафедры «Строительная механика»² Д.т.н., профессор, декан Электромеханического факультета^{1,2} Ростовский государственный университет путей сообщения³ Д.т.н., первый заместитель управляющего директора по реализации стратегии
развития, реформированию и инвестициям ПАО «Роствертол»^{1,2,3} г. Ростов-на-Дону, РФ

Аннотация

На шлицефрезерных станках обрабатываются изделия значительно отличающиеся по диаметрам и длинам, соответственно, по величинам изгибной жесткости и их соотношению с жесткостью опор. Поэтому в статье рассмотрены акустические характеристики шлицефрезерных станков, у которых узел резания представлен как система с распределенной массой с тремя условиями закрепления: шарнирно-опертого, жёстко заземленного стержня и на упруго-податливых опорах. Рассмотрены силовые воздействия процесса фрезерования и представлены дифференциальные уравнения колебаний заготовки, а также их решение при различных способах закрепления с учетом специфики задания силового воздействия. Результаты теоретических исследований дают возможность прогнозирования ожидаемых уровней шума на этапе проектирования как станочного оборудования, так и технологических процессов, так как учитывают все геометрические, физико-механические параметры обрабатываемых изделий и режущего инструмента, а также технологические режимы обработки и способы закрепления.

Ключевые слова: фреза, резбовой резец, шарнирное закрепление, жесткое закрепление, упруго-диссипативное закрепление, уравнение колебаний.

Calculation of the oscillation speeds of the cutting node of slot-milling machines

Nabokov A.E.¹, Yaitsov I.A.^{2}, Shamshura S.A.³,*¹ *Deputy Dean for Academic Education Processing of the Department «Electromechanical»,
Senior Lecturer of the Chair «Structural Mechanics»*² *Doctor of Engineering Sciences, Professor, Dean of the Electromechanical Faculty*^{1,2} *Rostov State Transport University*³ *Doctor of Engineering Sciences, First Deputy Managing Director for the implementation
of the development strategy, reform and investment of PJSC Rostvertol*^{1,2,3} *Rostov-on-Don, Russia*

Abstract

Products significantly differing in diameters and lengths, respectively, in the values of bending cruelty and their ratio to the stiffness of the supports are processed on slotted milling machines. Therefore, the article considers the acoustic characteristics of slotted milling machines, in which the cutting unit is presented as a

system with a distributed mass with three conditions of fastening: a hinged, rigidly pinched rod and on elastic-yielding supports. The force effects of the milling process are considered and the differential equations of the workpiece vibrations are presented, as well as their solution with various methods of fixing, taking into account the specifics of the task of force action. The results of theoretical studies make it possible to predict the expected noise levels on the design floor of both machine equipment and technological processes, since they take into account all geometric, physico-mechanical parameters of the processed products and cutting tools, as well as technological processing modes.

Keywords: milling cutter, threaded cutter, hinge fastening, rigid fastening, elastic-dissipative fastening, oscillation equation.

Введение

В машиностроительном производстве достаточно широко применяется процесс фрезерования наружных и внутренних резьб. Этот процесс зачастую сопровождается негативными явлениями, превышающими санитарные нормы по предельно-допустимому уровню шума на рабочих местах станочника шлицефрезерных станков. Воздействие повышенного шума приводит как к профессиональным заболеваниям, так и к снижению производительности труда. В настоящее время изучению вопросов повышения виброакустического комфорта посвящен большой объем научных исследований [1–10], но для рабочих мест станочников шлицефрезерных станков остается недостаточно изученным.

1. Объект исследования

Скорости колебаний оправки червячной фрезы как система с распределенной массой определены для трех условий закрепления: – шарнирно-опертого, жёстко заземленного стержня и на упруго-податливых опорах исходя из уравнения:

$$\frac{EJ\partial^4 z(y)}{\partial x^4} + \rho F \frac{\partial^2 z(y)}{\partial t^2} = 1,3 \cdot 10^{-4} P_{z,y} \delta(x - x_0),$$

где E и J – модуль упругости (Па) и момент инерции (м^4) оправки; ρ и F – плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$) материала и площадь поперечного сечения (м^2); $\delta(x - x_0)$ – дельта функция в координате x_0 .

Силовые воздействия процесса фрезерования имеет гармонический характер, поэтому решение уравнения колебаний целесообразно представлять в виде гармонической функции. Тогда, уравнение, определяющее функцию $f(t)$, представлены в следующем виде:

$$\begin{cases} f''''_{kz}(t) + \left(\frac{k}{R_\phi}\right)^2 \frac{6,3 \cdot 10^6}{l_\phi} f_{kz} = \frac{4P_z \cdot 10^{-5}}{R_\phi^2 l_\phi} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*} \right] \\ f''''_{ky}(t) + \left(\frac{k}{R_\phi}\right)^2 \frac{6,3 \cdot 10^6}{l_\phi} f_{ky} = \frac{1,6P_z \cdot 10^5}{R_\phi^2 l_\phi} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*} \right] \end{cases}$$

2. Методы исследования

Для круглого стального стержня в зависимости от краевых условий закрепления и учитывая, что координата силового воздействия не изменяется в течение времени обработки получены следующие уравнения и их решения относительно модуля скоростей колебаний и с учетом эффективного коэффициента потерь колебательной энергии (η).

Для условий шарнирного закрепления

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 10^7 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right) z = \frac{3 \cdot 10^{-4} P_z}{d_0^2 l} \cos \left[0,1 n z^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 10^7 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right) y = \frac{1,2 \cdot 10^{-4} P_z}{d_0^2 l} \cos \left[0,1 n z^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]$$

$$V_k = \sqrt{\left(\frac{dz}{dt}\right)_{max}^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)_{max}^2} = \frac{3,2 \cdot 10^{-5} P_z n z^*}{d_0^2 l} \cdot \sum_{k=1}^{k^*} \frac{\left[10^6 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 - 0,01 (n z^*)^2 \right]}{\left[10^7 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 - 0,01 (n z^*)^2 \right]^2 + 10^{14} d_0^4 \left(\frac{k}{l}\right)^8},$$

где d_0 – диаметр оправки, м; l – длина оправки, м.

Для условий жесткого закрепления

Вывод зависимостей скоростей колебаний заготовок при нарезании внутренних резьб.

При фрезеровании внутренней резьбы уравнение колебаний заготовки для условий консольного закрепления определяется следующим образом

$$\begin{cases} \frac{d^2 z_1}{dt^2} + 8 \cdot 10^8 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 z_1 = \frac{7,5 \cdot 10^{-5} P_z}{d_0^2 l} \cos \left[0,1 n z^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right] \\ \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 8 \cdot 10^8 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 y_1 = \frac{3 \cdot 10^{-5} P_z}{d_0^2 l} \cos \left[0,1 n z^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d^2 z_2}{dt^2} + 1 \cdot 10^7 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 z_2 = -\frac{2,3 \cdot 10^{-4} P_z}{d_0^2 l} \cos \left[0,1 n z^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right] \\ \frac{d^2 y_2}{dt^2} + 1 \cdot 10^7 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 y_2 = -\frac{1 \cdot 10^{-5} P_z}{d_0^2 l} \cos \left[0,1 n z^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right] \end{cases}$$

$$|V_{kz}|_{max} = \frac{10^{-5} P_z n z^*}{d_0^2 l} \left(\frac{\sum_{k=1}^{k^*} \frac{7,5 \left[8 \cdot 10^8 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 - 0,01 (n z^*)^2 \right]}{\left[8 \cdot 10^8 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 - 0,01 (n z^*)^2 \right]^2 + 6,4 \cdot 10^{17} d_0 \eta^2 \left(\frac{k}{l}\right)^8}}{\frac{23 \left[10^7 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 - 0,01 (n z^*)^2 \right]}{\left[10^7 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 - 0,01 (n z^*)^2 \right]^2 + 10^4 d_0^4 \eta^2 \left(\frac{k}{l}\right)^8}} \right)$$

$$|V_{ky}|_{max} = \frac{10^{-5} P_z n z^*}{d_0^2 l} \left(\frac{\sum_{k=1}^{k^*} \frac{3 \left[8 \cdot 10^8 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 - 0,01 (n z^*)^2 \right]}{\left[8 \cdot 10^8 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 - 0,01 (n z^*)^2 \right]^2 + 6,4 \cdot 10^{17} d_0 \eta^2 \left(\frac{k}{l}\right)^8}}{\frac{10^7 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 - 0,01 (n z^*)^2}{\left[10^7 d_0^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 - 0,01 (n z^*)^2 \right]^2 + 10^4 d_0^4 \eta^2 \left(\frac{k}{l}\right)^8}} \right)$$

$$V_{k_{max}} = \sqrt{(V_{ky_{max}})^2 + (V_{kz_{max}})^2}.$$

Для условий упруго-диссипативного закрепления

Вывод зависимостей скоростей колебаний заготовок при нарезании внутренних резб.

При фрезеровании внутренней резьбы уравнение колебаний заготовки для условий консольного закрепления определяется следующим образом

$$\frac{d^2 z_1}{dt^2} + 6 \frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{10k-1}{l} \right)^4 z_1 = \frac{1,6 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right],$$

$$\frac{d^2 z_2}{dt^2} + 6 \frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{6k+1}{l} \right)^4 z_2 = \frac{1,6 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right],$$

$$\frac{d^2 z_3}{dt^2} + 6 \frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{6k-1}{l} \right)^4 z_3 = \frac{6,4 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right],$$

$$\frac{d^2 z_4}{dt^2} + 6 \frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{2k+1}{l} \right)^4 z_4 = \frac{6,4 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right],$$

$$\frac{d^2 z_5}{dt^2} + 6 \frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 z_5 = \frac{2,6 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right],$$

$$\frac{d^2 y_1}{dt^2} + 6 \frac{EJ_y}{\rho F} \left(\frac{10k-1}{l} \right)^4 y_1 = \frac{6,4 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right],$$

$$\frac{d^2 y_2}{dt^2} + 6 \frac{EJ_y}{\rho F} \left(\frac{6k+1}{l} \right)^4 y_2 = \frac{6,4 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right],$$

$$\frac{d^2 y_3}{dt^2} + 6 \frac{EJ_y}{\rho F} \left(\frac{6k-1}{l} \right)^4 y_3 = \frac{2,6 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right],$$

$$\frac{d^2 y_4}{dt^2} + 6 \frac{EJ_y}{\rho F} \left(\frac{2k+1}{l} \right)^4 y_4 = \frac{2,6 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right],$$

$$\frac{d^2 y_5}{dt^2} + 6 \frac{EJ_y}{\rho F} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 y_5 = \frac{10^{-5} P_z}{\rho F} \cos \left[0,1nz^*t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right].$$

Аналогичным образом задаются уравнения колебаний при нарезании внутренней резьбы резьбовым резцом (с учетом аналитического выражения сил резания).

$$\frac{d^2 z_1}{dt^2} + 6 \frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{10k-1}{l} \right)^4 z_1 = \frac{1,6 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} (1 + 0,3 \sin \omega t),$$

$$\frac{d^2 z_2}{dt^2} + 6 \frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{6k+1}{l} \right)^4 z_2 = \frac{1,6 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} (1 + 0,3 \sin \omega t),$$

$$\frac{d^2 z_3}{dt^2} + 6 \frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{6k-1}{l} \right)^4 z_3 = \frac{6,4 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} (1 + 0,3 \sin \omega t),$$

$$\frac{d^2 z_4}{dt^2} + 6 \frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{2k+1}{l} \right)^4 z_4 = \frac{6,4 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} (1 + 0,3 \sin \omega t),$$

$$\frac{d^2 z_5}{dt^2} + 6 \frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 z_5 = \frac{2,6 \cdot 10^{-5} P_z}{\rho F} (1 + 0,3 \sin \omega t),$$

$$\frac{d^2 y_1}{dt^2} + 6 \frac{EJ_y}{\rho F} \left(\frac{10k-1}{l} \right)^4 y_1 = \frac{1,6 \cdot 10^{-5} P_y}{\rho F} (1 + 0,3 \sin \omega t),$$

$$\begin{aligned}\frac{d^2y_2}{dt^2} + 6\frac{EJ_y}{\rho F}\left(\frac{6k+1}{l}\right)^4 y_2 &= \frac{1,6 \cdot 10^{-5} P_y}{\rho F}(1 + 0,3 \sin \omega t), \\ \frac{d^2y_3}{dt^2} + 6\frac{EJ_y}{\rho F}\left(\frac{6k-1}{l}\right)^4 y_3 &= \frac{6,4 \cdot 10^{-5} P_y}{\rho F}(1 + 0,3 \sin \omega t), \\ \frac{d^2y_4}{dt^2} + 6\frac{EJ_y}{\rho F}\left(\frac{2k+1}{l}\right)^4 y_4 &= \frac{6,4 \cdot 10^{-5} P_y}{\rho F}(1 + 0,3 \sin \omega t), \\ \frac{d^2y_5}{dt^2} + 6\frac{EJ_y}{\rho F}\left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 y_5 &= \frac{2,6 \cdot 10^{-5} P_y}{\rho F}(1 + 0,3 \sin \omega t).\end{aligned}$$

Решение уравнений в виде модулей действительных частей скоростей колебаний определяются по формулам:

Для технологического процесса нарезания резьбы резьбовым резцом

$$\begin{aligned}|Re\{V_{kz1}\}| &= \left| \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_z} \cdot \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{10k-1}{l}\right)^2 \sin 6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{10k-1}{l}\right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{4,8 \cdot 10^{-6} P_z \omega}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{10k-1}{l}\right)^4 - \omega^2] \cos \omega t}{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{10k-1}{l}\right)^4 - \omega^2]^2 + 36\left(\frac{EJ_z}{\rho F} \eta\right)^2 \left(\frac{10k-1}{l}\right)^8} \right| \\ |Re\{V_{kz2}\}| &= \left| \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_z} \cdot \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{6k+1}{l}\right)^2 \sin 6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{6k+1}{l}\right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{4,8 \cdot 10^{-6} P_z \omega}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{6k+1}{l}\right)^4 - \omega^2] \cos \omega t}{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{6k+1}{l}\right)^4 - \omega^2]^2 + 36\left(\frac{EJ_z}{\rho F} \eta\right)^2 \left(\frac{6k+1}{l}\right)^8} \right| \\ |Re\{V_{kz3}\}| &= \left| \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_z} \cdot \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{6k-1}{l}\right)^2 \sin 6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{6k-1}{l}\right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{10^{-5} P_z \omega}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{6k-1}{l}\right)^4 - \omega^2] \cos \omega t}{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{6k-1}{l}\right)^4 - \omega^2]^2 + 36\left(\frac{EJ_z}{\rho F} \eta\right)^2 \left(\frac{6k-1}{l}\right)^8} \right| \\ |Re\{V_{kz4}\}| &= \left| \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_z} \cdot \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{2k+1}{l}\right)^2 \sin 6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{2k+1}{l}\right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{10^{-5} P_z \omega}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{2k+1}{l}\right)^4 - \omega^2] \cos \omega t}{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{2k+1}{l}\right)^4 - \omega^2]^2 + 36\left(\frac{EJ_z}{\rho F} \eta\right)^2 \left(\frac{2k+1}{l}\right)^8} \right| \\ |Re\{V_{kz5}\}| &= \left| \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_z} \cdot \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 \sin 6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{7,8 \cdot 10^{-6} P_z \omega}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - \omega^2] \cos \omega t}{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - \omega^2]^2 + 36\left(\frac{EJ_z}{\rho F} \eta\right)^2 \left(\frac{2k-1}{l}\right)^8} \right|\end{aligned}$$

Аналогичными зависимостями определяются скорости колебаний в направлении оси OY (с учетом замены P_z на P_y и J_z на J_y)

$$ReV_k = \sqrt{\sum_1^5 (ReV_{kz})^2 + (ReV_{ky})^2}$$

для условий фрезерования

$$\begin{aligned}|Re\{V_{kz1}\}| &= \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_z} \cdot \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{10k-1}{l}\right)^2 \sin 2,45 \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{10k-1}{l}\right)^2 t + \\ &\quad + \frac{1,6 \cdot 10^{-6} P_z n z^*}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{10k-1}{l}\right)^4 - (0,1n z^*)^2] \sin [0,1n z^* t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}]}{[6\frac{EJ_z}{\rho F} \left(\frac{10k-1}{l}\right)^4 - (0,1n z^*)^2]^2 + 36\left(\frac{EJ_z}{\rho F} \eta\right)^2 \left(\frac{10k-1}{l}\right)^8}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 |Re\{V_{kz_2}\}| &= \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_z} \cdot \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{6k+1}{l}\right)^2 \sin 2,45 \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{6k+1}{l}\right)^2 t + \\
 &+ \frac{1,6 \cdot 10^{-6} P_z n z^*}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_z}{\rho F} (\frac{6k+1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2] \sin [0,1n z^* t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}]}{[6\frac{EJ_z}{\rho F} (\frac{6k+1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2]^2 + 36(\frac{EJ_z}{\rho F} \eta)^2 (\frac{6k+1}{l})^8} \\
 |Re\{V_{kz_3}\}| &= \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_z} \cdot \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{6k-1}{l}\right)^2 \sin 2,45 \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{6k-1}{l}\right)^2 t + \\
 &+ \frac{6,4 \cdot 10^{-6} P_z n z^*}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_z}{\rho F} (\frac{6k-1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2] \sin [0,1n z^* t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}]}{[6\frac{EJ_z}{\rho F} (\frac{6k-1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2]^2 + 36(\frac{EJ_z}{\rho F} \eta)^2 (\frac{6k-1}{l})^8} \\
 |Re\{V_{kz_4}\}| &= \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_z} \cdot \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{2k+1}{l}\right)^2 \sin 2,45 \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{2k+1}{l}\right)^2 t + \\
 &+ \frac{6,4 \cdot 10^{-6} P_z n z^*}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_z}{\rho F} (\frac{2k+1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2] \sin [0,1n z^* t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}]}{[6\frac{EJ_z}{\rho F} (\frac{2k+1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2]^2 + 36(\frac{EJ_z}{\rho F} \eta)^2 (\frac{2k+1}{l})^8} \\
 |Re\{V_{kz_5}\}| &= \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_z} \cdot \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{2k+1}{l}\right)^2 \sin 2,45 \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho F}} \left(\frac{2k+1}{l}\right)^2 t + \\
 &+ \frac{2,6 \cdot 10^{-6} P_z n z^*}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_z}{\rho F} (\frac{2k+1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2] \sin [0,1n z^* t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}]}{[6\frac{EJ_z}{\rho F} (\frac{2k+1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2]^2 + 36(\frac{EJ_z}{\rho F} \eta)^2 (\frac{2k+1}{l})^8} \\
 |Re\{V_{ky_1}\}| &= \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_y} \cdot \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}} \left(\frac{10k-1}{l}\right)^2 \sin 2,45 \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}} \left(\frac{10k-1}{l}\right)^2 t + \\
 &+ \frac{6,4 \cdot 10^{-6} P_z n z^*}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_y}{\rho F} (\frac{10k-1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2] \sin [0,1n z^* t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}]}{[6\frac{EJ_y}{\rho F} (\frac{10k-1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2]^2 + 36(\frac{EJ_y}{\rho F} \eta)^2 (\frac{10k-1}{l})^8} \\
 |Re\{V_{ky_2}\}| &= \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_y} \cdot \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}} \left(\frac{6k+1}{l}\right)^2 \sin 2,45 \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}} \left(\frac{6k+1}{l}\right)^2 t + \\
 &+ \frac{1,6 \cdot 10^{-6} P_z n z^*}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_y}{\rho F} (\frac{6k+1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2] \sin [0,1n z^* t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}]}{[6\frac{EJ_y}{\rho F} (\frac{6k+1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2]^2 + 36(\frac{EJ_y}{\rho F} \eta)^2 (\frac{6k+1}{l})^8} \\
 |Re\{V_{ky_3}\}| &= \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_y} \cdot \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}} \left(\frac{6k-1}{l}\right)^2 \sin 2,45 \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}} \left(\frac{6k-1}{l}\right)^2 t + \\
 &+ \frac{2,6 \cdot 10^{-5} P_z n z^*}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_y}{\rho F} (\frac{6k-1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2] \sin [0,1n z^* t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}]}{[6\frac{EJ_y}{\rho F} (\frac{6k-1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2]^2 + 36(\frac{EJ_y}{\rho F} \eta)^2 (\frac{6k-1}{l})^8} \\
 |Re\{V_{ky_4}\}| &= \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_y} \cdot \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}} \left(\frac{2k+1}{l}\right)^2 \sin 2,45 \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}} \left(\frac{2k+1}{l}\right)^2 t + \\
 &+ \frac{6,4 \cdot 10^{-6} P_z n z^*}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_y}{\rho F} (\frac{2k+1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2] \sin [0,1n z^* t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}]}{[6\frac{EJ_y}{\rho F} (\frac{2k+1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2]^2 + 36(\frac{EJ_y}{\rho F} \eta)^2 (\frac{2k+1}{l})^8}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
|Re\{V_{ky_5}\}| &= \sum_{k=1}^{k^*} -\frac{0,8P_z l_\partial^3}{EJ_y} \cdot \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 \sin 2,45 \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 t + \\
&+ \frac{10^{-5}P_z n z^*}{\rho F} \cdot \frac{[6\frac{EJ_y}{\rho F}(\frac{2k-1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2] \sin [0,1n z^* t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}]}{[6\frac{EJ_y}{\rho F}(\frac{2k-1}{l})^4 - (0,1n z^*)^2]^2 + 36(\frac{EJ_y}{\rho F}\eta)^2(\frac{2k-1}{l})^8} \\
|Re\{V_{kz}\}| &= \sum_1^5 |Re\{V_{kz_i}\}|; |Re\{V_{ky}\}| = \sum_1^5 |Re\{V_{ky_i}\}|; \\
Re\{V_k\} &= \sqrt{\sum_1^5 (ReV_{kz})^2 + (ReV_{ky})^2},
\end{aligned}$$

где l_∂ – длина консольной части детали, м.

3. Результаты исследования

При нарезании резьбы на токарном резьбонарезном станке с учетом специфики задания силового воздействия получены следующие дифференциальные уравнения и их решения относительно действительной части скоростей колебаний. Применительно к варианту шарнирного закрепления заготовки

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 6\frac{E}{\rho} d^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 z = \frac{0,64P_z}{\rho d^2 l} \sum_{k=1}^{k^*} \sin \frac{\pi k S_n}{l} t + 0,15 \left[\sin \left(\frac{\pi k S_n}{l} + \omega\right) t + \sin \left(\frac{\pi k S_n}{l} - \omega\right) t \right]$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 6d^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 y = \frac{0,64P_z}{\rho d^2 l} \sum_{k=1}^{k^*} \sin \frac{\pi k S_n}{l} t + 0,15 \left[\sin \left(\frac{\pi k S_n}{l} + \omega\right) t + \sin \left(\frac{\pi k S_n}{l} - \omega\right) t \right]$$

$$\begin{aligned}
|V_{kz}| &= \frac{0,64P_z}{\rho d^2 l} \left(\sum_{k=1}^{k^*} \frac{[6\frac{E}{\rho} d^2 (\frac{k}{l})^4 - (\frac{\pi k S_n}{l})^2] \frac{\pi k S_n}{l} \cos \frac{\pi k S_n}{l} t}{[6d^2 (\frac{k}{l})^4 - (\frac{\pi k S_n}{l})^2]^2 + 36d^4 \eta^2 (\frac{k}{l})^8} + \right. \\
&\left. + 0,15 \left\{ \frac{[6d^2 (\frac{k}{l})^4 - (\frac{\pi k S_n}{l} + \omega)^2] (\frac{\pi k S_n}{l} + \omega) \cos(\frac{\pi k S_n}{l} t + \omega) t}{[6\frac{E}{\rho} d^2 (\frac{k}{l})^4 - (\frac{\pi k S_n}{l} + \omega)^2]^2 + 36d^4 (\frac{E}{\rho})^2 \eta^2 (\frac{k}{l})^4} \right\} \right) \\
|V_{ky}| &= \frac{0,64P_y}{\rho d^2 l} \left(\sum_{k=1}^{k^*} \frac{[6\frac{E}{\rho} d^2 (\frac{k}{l})^4 - (\frac{\pi k S_n}{l})^2] \frac{\pi k S_n}{l} \cos \frac{\pi k S_n}{l} t}{[6d^2 (\frac{k}{l})^4 - (\frac{\pi k S_n}{l})^2]^2 + 36d^4 \eta^2 (\frac{k}{l})^8} + \right. \\
&\left. + 0,15 \left\{ \frac{[6d^2 (\frac{k}{l})^4 - (\frac{\pi k S_n}{l} + \omega)^2] (\frac{\pi k S_n}{l} + \omega) \cos(\frac{\pi k S_n}{l} t + \omega) t}{[6\frac{E}{\rho} d^2 (\frac{k}{l})^4 - (\frac{\pi k S_n}{l} + \omega)^2]^2 + 36d^4 (\frac{E}{\rho})^2 \eta^2 (\frac{k}{l})^4} \right\} \right)
\end{aligned}$$

Для условий жесткого закрепления заготовки

$$\begin{aligned}
\frac{d^2 z_1}{dt^2} + 5 \cdot 10^2 \frac{E}{\rho} d^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 z_1 &= \frac{0,04P_z}{\rho d^2 l} \sum_{k=1}^{k^*} \sin \frac{3\pi k V}{l} t - 3 \sin \frac{\pi k V}{l} t + \\
&+ 0,15 \left[\sin \left(\frac{3\pi k V}{l} + \omega\right) t + \sin \left(\frac{3\pi k S_n}{l} - \omega\right) t \right] - 0,45 \left[\sin \left(\frac{\pi k V}{l} + \omega\right) t + \sin \left(\frac{\pi k V}{l} - \omega\right) t \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d^2 z_2}{dt^2} + 6\frac{E}{\rho} d^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 z_2 &= -\frac{0,12P_z}{\rho d^2 l} \sum_{k=1}^{k^*} \sin \frac{3\pi k V}{l} t - 3 \sin \frac{\pi k V}{l} t + \\
&+ 0,15 \left[\sin \left(\frac{3\pi k V}{l} + \omega\right) t + \sin \left(\frac{3\pi k S_n}{l} - \omega\right) t \right] - 0,45 \left[\sin \left(\frac{\pi k V}{l} + \omega\right) t + \sin \left(\frac{\pi k V}{l} - \omega\right) t \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 5 \cdot 10^2 \frac{E}{\rho} d^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 y_1 &= \frac{0,04 P_z}{\rho d^2 l} \sum_{k=1}^{k^*} \sin \frac{3\pi k V}{l} t - 3 \sin \frac{\pi k V}{l} t + \\ &+ 0,15 \left[\sin \left(\frac{3\pi k V}{l} + \omega\right) t + \sin \left(\frac{3\pi k S_n}{l} - \omega\right) t \right] - 0,45 \left[\sin \left(\frac{\pi k V}{l} + \omega\right) t + \sin \left(\frac{\pi k V}{l} - \omega\right) t \right] \\ \frac{d^2 y_2}{dt^2} + 6 \frac{E}{\rho} d^2 \left(\frac{k}{l}\right)^4 y_2 &= -\frac{0,12 P_z}{\rho d^2 l} \sum_{k=1}^{k^*} \sin \frac{3\pi k V}{l} t - 3 \sin \frac{\pi k V}{l} t + \\ &+ 0,15 \left[\sin \left(\frac{3\pi k V}{l} + \omega\right) t + \sin \left(\frac{3\pi k S_n}{l} - \omega\right) t \right] - 0,45 \left[\sin \left(\frac{\pi k V}{l} + \omega\right) t + \sin \left(\frac{\pi k V}{l} - \omega\right) t \right] \end{aligned}$$

Заключение

Выведены зависимости скоростей колебаний режущего инструмента и заготовки, используя разработанные подходы к расчету вибраций и шума шлицефрезерного станка с различными условиями закрепления и получены системы дифференциальных уравнений второго порядка для каждого из вариантов.

Результаты теоретических исследований дают возможность прогнозирования ожидаемых уровней шума на этапе проектирования как станочного оборудования, так и технологических процессов, так как учитывают все геометрические, физико-механические параметры обрабатываемых изделий и режущего инструмента, а также технологические режимы обработки и способы закрепления.

Список литературы

1. Чукарин А.Н. Теория и метода акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки. Ростов н/Д, Издательский центр ДГТУ, 2004. 152 с.
2. Yaitskov I.A., Chukarin A.N., Finochenko T.A. Theoretical research of noise and vibration spectra in cabins of locomotive and diesel shunting locomotive // International journal of applied engineering research. 2017. V.12. № 21. P. 10724 – 10730.
3. Яицков И.А. Теоретическое исследование воздушной составляющей шума силовых установок транспортных машин // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 6. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/35 TVN617>.
4. Finochenko, T., Yizkov, I, Dergacheva, L.: Risk Management in Transportation Safety System. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Volume 2, с. 144-145 (2021). doi:10.1088/1755-1315/666/2/022050
5. Borisova, A.V., Finochenko, T.A., Finochenko, V.A.: The Use of the Expert Method in Solving the Issues of Choosing the Instrumentation of the Procedure for Controlling Production Factors. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing ([Bristol, UK], England), Volume 666 № 2, 2021, doi:10.1088/1755-1315/666/2/022022. doi:10.1088/1755-1315/666/2/022022
6. Theoretical research studies of regularities formation of acoustic characteristics for threading and spline shaft milling machine / А.Н. Чукарин, И.А. Яицков, // АКУСТИКА, ISSN 1801-9064, Studio D – Akustika s.r.o., České Budějovice, 2021, VOLUME 41, p. 189-194 doi: 10.36336/akustika20214189
7. Разаков Ж.П. Теоретическое исследование процессов возбуждения вибраций и шумообразования шлифовальных кругов резьбо- и шлицешлифовальных станков / Разаков Ж.П., Шашурин А.Е., Курченко П.С., Иванов Н.И. // АКУСТИКА, Vol. 38, 2021, ISSN 1801-9064

8. Разаков Ж.П. Расчет акустических характеристик заготовок резьбошлифовальных и шлицшлифовальных станков для расчета уровней шума на рабочем месте. *Noise Theory and Practice*, 2021, №7 (1) ISSN 2412-8627

9. Методика и техническое обеспечение проведения экспериментальных исследований по определению шума на рабочих местах / Т.А. Финоченко, М.В. Баланова, И.А. Яицков // Научно-технический журнал «Труды РГУПС». 2019. №1 (46). С.5-8.

10. Методика проведения экспериментальных исследований шума прутковых токарных автоматов / Т.А. Финоченко, А.Н. Чукарин // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. / Мин-во промышленности и энергетики. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2012. С. 263–268.

References

1. Chukarin A.N. Theory and method of acoustic calculations and design of technological machines for mechanical processing. Rostov n / D, Publishing Center DSTU, 2004.152 p.

2. Yaitskov I.A., Chukarin A.N., Finochenko T.A. Theoretical research of noise and vibration spectra in cabins of locomotive and diesel shunting locomotive // *International journal of applied engineering research*. 2017. V.12. № 21. P. 10724 – 10730.

3. Yaitskov I.A. Theoretical study of the air component of the noise of the power plants of transport vehicles // *Internet journal "Naukovedenie"*. 2017. V. 9. No. 6. - URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/35 TVN617>.

4. Finochenko, T., Yizkov, I, Dergacheva, L.: Risk Management in Transportation Safety System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Volume 2*, с. 144-145 (2021). doi:10.1088/1755-1315/666/2/022050

5. Borisova, A.V., Finochenko, T.A., Finochenko, V.A.: The Use of the Expert Method in Solving the Issues of Choosing the Instrumentation of the Procedure for Controlling Production Factors. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*; IOP Publishing ([Bristol, UK], England), Volume 666 № 2, 2021, doi:10.1088/1755-1315/666/2/022022. doi:10.1088/1755-1315/666/2/022022

6. Theoretical research studies of regularities formation of acoustic characteristics for threading and spline shaft milling machine / А.Н. Чукарин, И.А. Яицков, // *АКУСТИКА*, ISSN 1801-9064, Studio D – Akustika s.r.o., České Budějovice, 2021, VOLUME 41, p. 189-194 doi: 10.36336/akustika20214189

7. Theoretical study of the processes of excitation of vibrations and noise generation of grinding wheels of thread and spline grinders / Razakov Zh.P., Shashurin A.E., Kurchenko P.S., Ivanov N.I. // *АКУСТИКА*, Vol. 38, 2021, ISSN 1801-9064

8. Razakov Zh.P. Calculation of the acoustic characteristics of blanks for thread grinding and spline grinding machines for calculating noise levels at the workplace. *Noise Theory and Practice*, 2021, No. 7 (1) ISSN 2412-8627

9. Balanova M.V., Finochenko T.A., Yaitskov I.A.: Methodology and technical support for experimental studies of determining noise at workplaces. *Scientific and technical journal: "Proceedings of the RGUPS"* № 1 (46), pp. 5-7, 2019

10. Methods for conducting experimental studies of the noise of bar lathe machines / Т.А. Финоченко, А.Н. Чукарин // *Innovative technologies in mechanical engineering and metallurgy: матер. IV Intern. scientific-practical. conf. / Ministry of Industry and Energy. Rostov-on-Don: Ed. center of DSTU, 2012, pp. 263–268.*