

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств»
(код и наименование направления подготовки)

Цифровые процессы и системы автоматизированного машиностроения
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Совершенствование технологического процесса на основе теоретических
исследований

Обучающийся

Р.Ф. Сысоев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, Д.А. Расторгуев

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

Введение.....	3
1 Моделирование динамики процесса механической обработки	5
1.1 Моделированию обработки.....	5
1.2 Моделирование процесса обработки многолезцовым инструментом.....	13
1.3 Моделирование автоколебательного процесса резания.....	24
2 Моделирование смещений при механической обработке	33
2.1 Базовые понятия нелинейной динамики	33
2.2 Исследование динамической характеристики процесса резания	34
2.3 Влияние контакта стружка-резец на точность	45
3 Частотный анализ инструментальной подсистемы	49
4 Изучение методов вибрационной обработки	53
4.1 Исследование процессов обработки	53
4.2 Алгоритм настройки зоны резания и технологической системы	71
4.3 Программный расчет устойчивости сверления	75
Заключение	89
Список используемой литературы и источников	90

Введение

В работе представлен обзор текущего состояния знаний о процессе обработки, включая методы измерения смещений, вибраций, методы их контроля, расчета устойчивости, обеспечения заданных вибраций. Данная информация полезна для инженеров-технологов, исследователей и всех, кто занимается оптимизацией процессов точения, фрезерования, сверления, повышением производительности и увеличением срока службы инструмента.

В промышленности все шире применяются современные материалы, такие как титановые, жаропрочные, коррозионно стойкие сплавы, полимеры, армированные углеродным волокном и другие композиты. Однако обработка этих материалов сопряжена с трудностями из-за их специфических свойств. Низкая технологичность может приводить к повышенным силам резания, высоким температурам, интенсивному износу инструмента и неудовлетворительному качеству поверхности. Эти проблемы серьезно осложняют процесс механической обработки. Износ инструмента и вибрации, возникающие при резании, также представляют значительные трудности. Все это требует пристального внимания для проектирования эффективных процессов.

Точение, фрезерование и сверление, одни из наиболее распространенных и важных методов обработки. Они широко используются в автомобильной, аэрокосмической и других отраслях для формирования различных поверхностей самой широкой номенклатуры деталей.

Они могут быть и черновыми и, зачастую, заключительными этапами в изготовлении деталей. Для обеспечения сборки деталей, узлов, они могут подвергаться совместной обработке после позиционирования. На обработку осевым инструментом может приходиться до 50% объемов этих операций.

Большое конструктивное разнообразие требует соответствующих инструментов, кинематики процесса резания, подбора технологических режимов. В процессе эксплуатации конструкций, под воздействием

циклических нагрузок, концентраторы напряжений подвержены усталостным повреждениям. До 20% отказов механизмов связаны с качеством этих поверхностей. Поэтому достижение высокого качества обработки имеет первостепенное значение для повышения надежности.

Резание много инструментальное или многолезвийное является методом обработки, считается одним из самых сложных производственных процессов по сравнению с традиционными методами одно инструментальной обработки (точение, фрезерование, растачивание). При снятии припуска большая часть механической энергии, необходимой для отделения металла, преобразуется в тепло, которое передается в стружку, заготовку и режущий инструмент. Как следствие, температура в зоне резания при обработке может быть высокой.

Исследования показывают, что температура резания играет важную роль в износе инструмента. Это связано с тем, что стесненные условия обработки затрудняют отвод стружки, что приводит к накоплению тепла, быстрому износу инструмента и сокращению его срока службы. Кроме того, повышение температуры может вызывать размягчение материала заготовки, влияя на срок службы инструмента и качество поверхностного слоя.

Динамические процессы при резании усугубляют эти последствия, приводя к повышенным циклическим нагрузкам, увеличивая температуру в зоне резания.

Поэтому изучение динамики резания и понимание взаимосвязей между методами обработки, схемой технологической наладки и различными параметрами процесса имеют решающее значение для снижения шероховатости поверхности, увеличения срока службы инструмента.

1 Моделирование динамики процесса механической обработки

1.1 Моделированию обработки

Существующие модели процесса резания недостаточно полно отражают динамику и колебания при обработке маложестких деталей, не учитывая распределенность параметров, неопределенность входных данных и влияние шума. Предлагается создание более совершенных моделей формообразующих подсистем, учитывающих особенности элементов инструмента, для разработки методов управления образованием геометрии и траекторий инструмента. «Необходимо исследовать повышение эффективности обработки за счет вибрационных эффектов, возникающих в замкнутой технологической системе, вместо использования энергоемких внешних приводов. Проведен анализ и классификация динамических процессов и возмущений при обработке маложестких деталей, а также разработаны ограничения на динамические параметры процесса, учитывающие изменения точностных параметров в послеоперационный период. Источником колебаний, управляемых по всем параметрам, является замкнутая технологическая система из упругой системы станка и процесса резания» [17].

Процесс фрезерования характеризуется постоянно изменяющейся толщиной срезаемого слоя, периодическими ударами, связанными с врезанием режущих зубьев в заготовку. Все это вызывает нежелательные вибрации в технологической системе станка. По литературным данным [22], [23], в частотном спектре силы резания наибольшая составляющая силы резания связана с частотой вращения фрезы, меньшая доля приходится на составляющую, частота которой связана с частотой врезания зубьев, и наименьшая часть приходится на изгибные колебания фрезы. Доминирующее влияние в динамической компоненте имеют низкочастотные составляющие,

которые приводят к снижению точности обработки, повышению шероховатости, увеличивают вероятность поломки инструмента [1].

«На расчетной схеме (рисунок 1) показан инструмент – фреза и упруго-диссипативные связи устройства крепления. Схема справедлива для торцового и концевго фрезерования фрезой с произвольным количеством зубьев. С учетом одно массовой модели, учитывается влияние вибраций» [12].

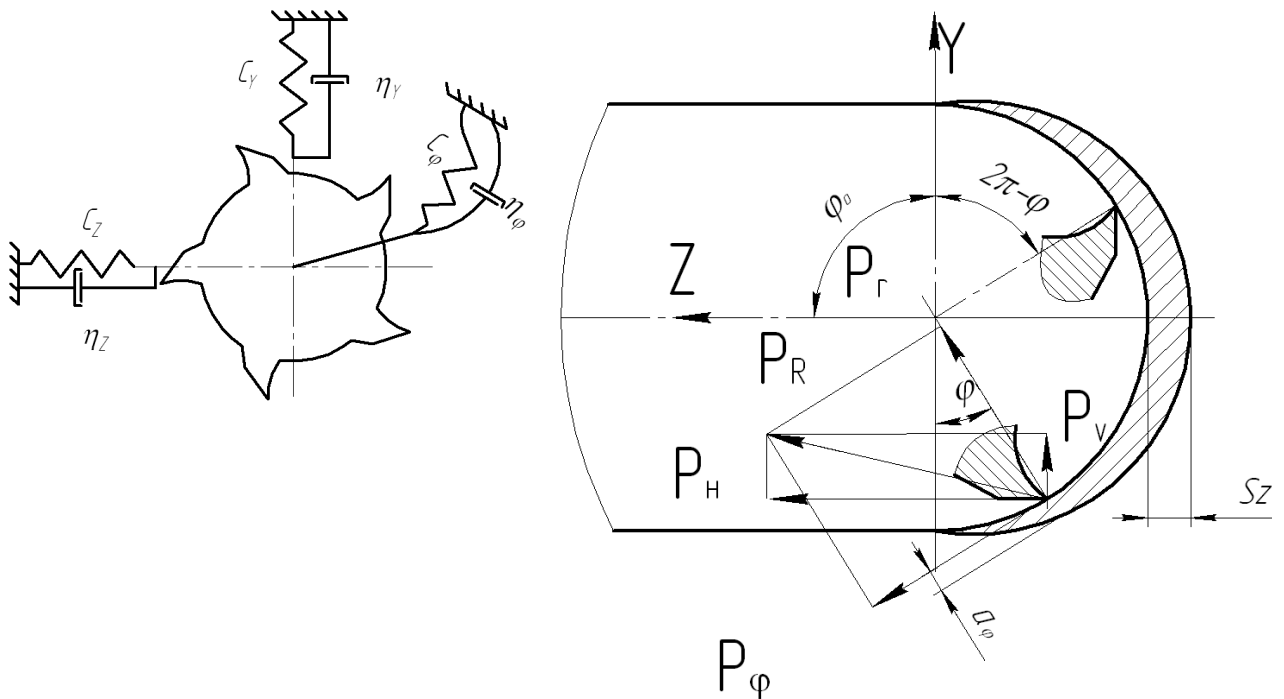


Рисунок 1 – Одно массовая схема процесса обработки в виде упругой системы и схема формирования толщины среза и сил резания

Система уравнения для поперечных смещений по двум осям и крутильных колебаний

$$\begin{cases} \frac{m \cdot d^2 y}{dt^2} + \eta_y \frac{dy}{dt} + C_y y = R_1^*; \\ \frac{m \cdot d^2 z}{dt^2} + \eta_z \frac{dz}{dt} + C_z z = R_2^*; \\ \frac{J \cdot d^2 \varphi}{dt^2} + \eta_\varphi \frac{d\varphi}{dt} + C_\varphi \varphi = R_2^* \cdot D_\varphi / 2, \end{cases} \quad (1)$$

«где m – приведенная масса, кг;

J – приведенный момент инерции, м^4 ;

z, y, φ – смещения, м, рад;

$\eta_z, \eta_y, \eta_\varphi$ – коэффициенты демпфирования, Н·с/м, Н·с/рад;

C_z, C_y, C_φ – коэффициенты жесткости, Н/м, Н/рад;

D_φ – диаметр фрезы, м;

R_1^*, R_2^* – составляющие силы резания, Н» [12].

Последние находятся

$$\begin{aligned} R_1^*(\varphi) &= R_1(\varphi^*) \cos \varphi^* - R_2(\varphi^*) \sin \varphi^*; \\ R_2^*(\varphi) &= R_1(\varphi^*) \sin \varphi^* - R_2(\varphi^*) \cos \varphi^*; \end{aligned} \quad (2)$$

где угол

$$\varphi^* = \varphi - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} = \omega \cdot t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*}; \quad (3)$$

«где $R_1(\varphi^*), R_2(\varphi^*)$ – радиальная P_r и касательная P_φ составляющие силы резания, Н;

ω – сумма постоянной угловой скорости фрезы и вибрационной скорости;

z^* – число зубьев фрезы;

q – номер зуба, принимает значения $q=1,2,\dots,z^*$ » [13].

$$R_1(\varphi^*) = \begin{cases} Kb\{A_0 a_\Sigma^{y_p} + B_0\} & \text{при } a_\Sigma > 0; \\ 0 & \text{при } a_\Sigma \leq 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$R_2(\varphi^*) = \begin{cases} Kba_\Sigma^{y_p} & \text{при } a_\Sigma > 0; \\ 0 & \text{при } a_\Sigma \leq 0; \end{cases} \quad (5)$$

где суммарная толщина срезаемого слоя

$$a_{\Sigma} = a_{\varphi} + y(t - T - \tau) - y(t - \tau), \quad (6)$$

«где a_{φ} - заданная мгновенная толщина среза, м;

$\tau = \tau(t)$ - усадка стружки;

T – время поворота фрезы зуба, с;

φ_0 - угол контакта фрезы с изделием» [14].

При фрезеровании по подаче

$$a_{\varphi} = \begin{cases} 0 & \text{при } 2\pi k + (q-1)\frac{2\pi}{z^*} < \omega t < 2\pi(k+1) - (q-1)\frac{2\pi}{z^*} - \varphi_0; \\ -S_z \sin[\omega t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}] & \\ \text{при } 2\pi k + (q-1)\frac{2\pi}{z^*} - \varphi_0 \leq \omega t \leq 2\pi(k+1) + (q-1)\frac{2\pi}{z^*}; & \end{cases} \quad (7)$$

Против подачи

$$a_{\varphi} = \begin{cases} -S_z \sin[\omega t - (q-1)\frac{2\pi}{z^*}] & \\ \text{при } 2\pi k + (q-1)\frac{2\pi}{z^*} \leq \omega t \leq 2\pi(k+1) + (q-1)\frac{2\pi}{z^*} + \varphi_0; & (8) \\ 0 & \text{при } 2\pi k + (q-1)\frac{2\pi}{z^*} - \varphi_0 < \omega t < 2\pi(k+1) + (q-1)\frac{2\pi}{z^*}. \end{cases}$$

Структурная схема фрезерования в виде передаточных функций по данным системам уравнений показана на рисунке 2.

Отдельно показаны подблоки для вычисления толщины срезаемого слоя для двух видов фрезерования (рисунки 2 и 3).

Реализация моделирования была выполнена в MATLAB с использованием численных методов решения Simulink (рисунки 4 и 5).

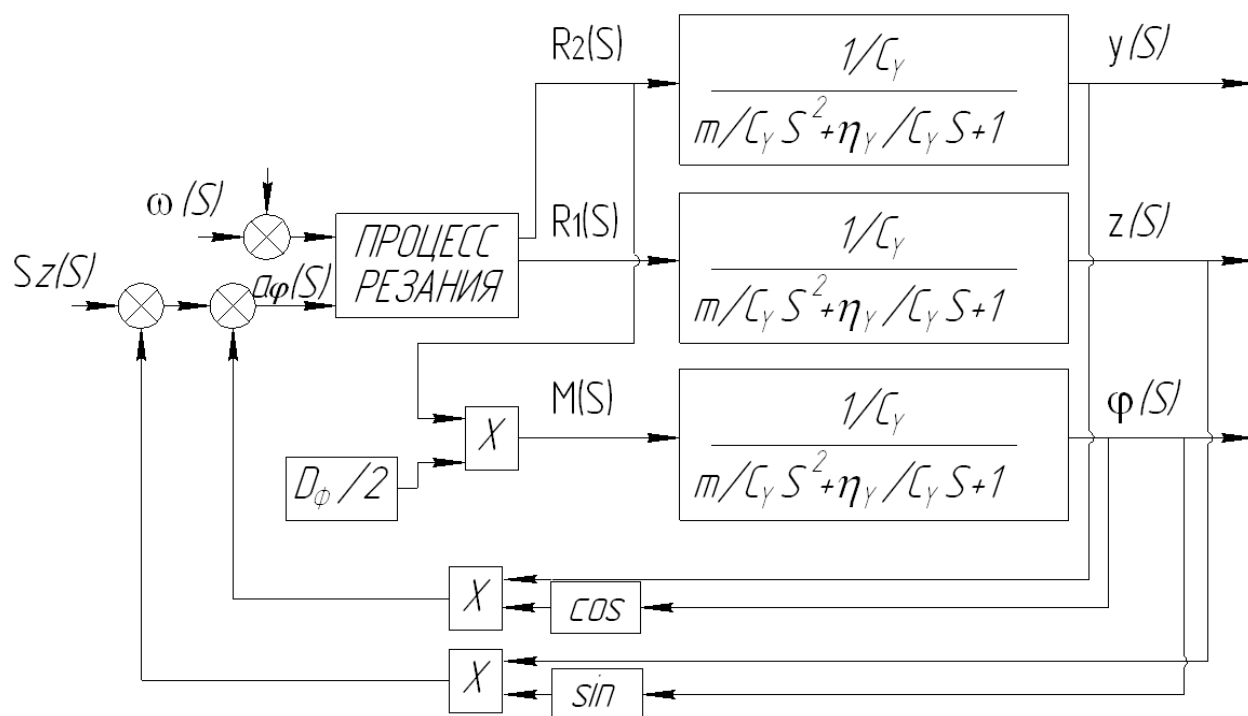


Рисунок 2 – Замкнутая система фрезерования

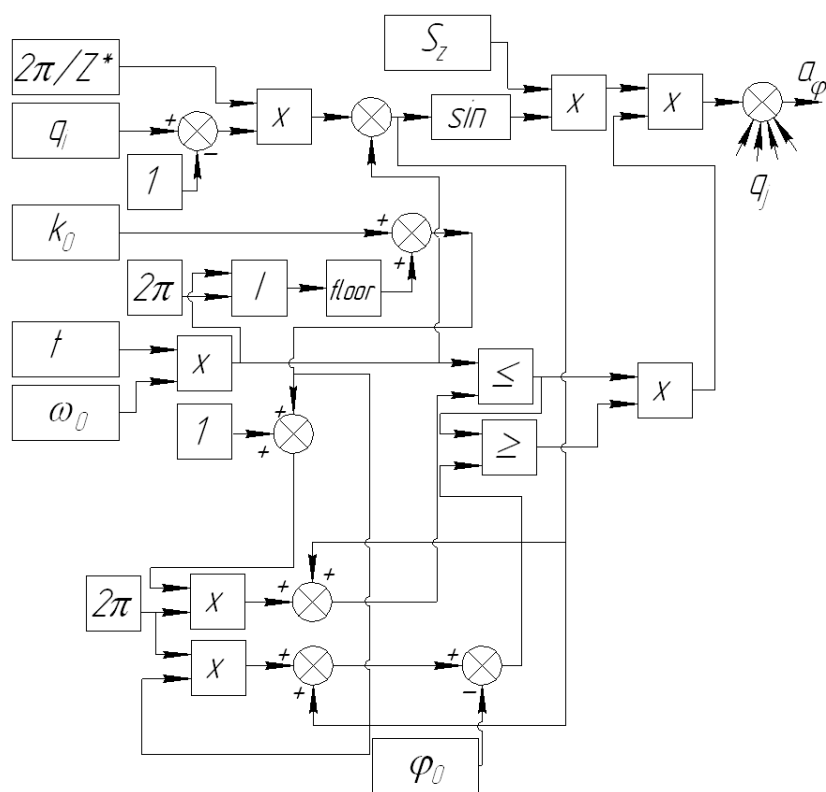


Рисунок 3 – Схема для вычисления толщины стружки

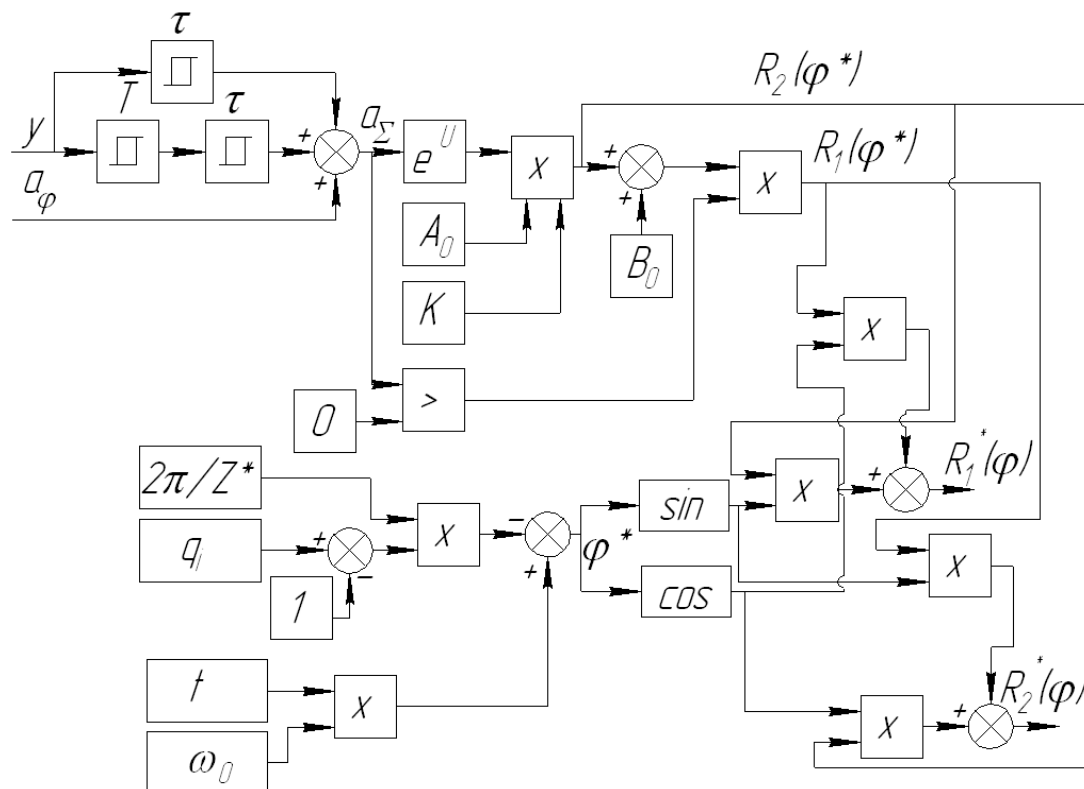


Рисунок 4 – Вычисление сил фрезерования

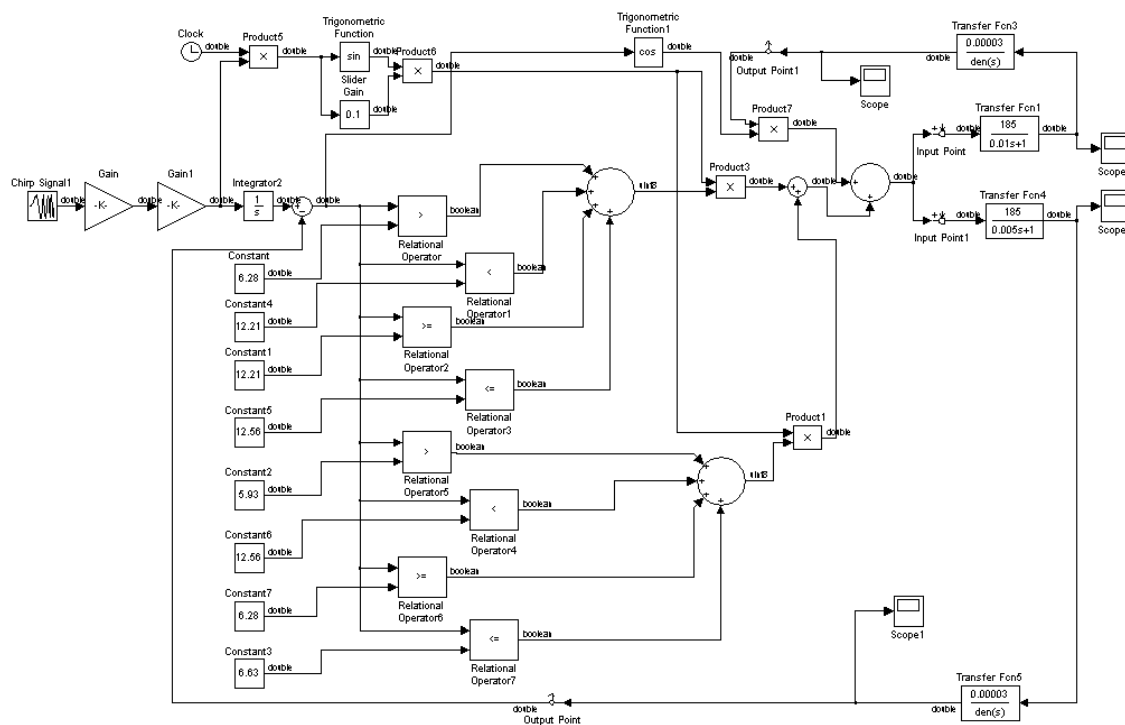


Рисунок 5 – Интеграция подсистем резания, заготовки и инструмента

Для моделирования использовались значения коэффициентов для обработки на фрезерном станке PROMA.

Входные данные по инструменту были следующие. Диаметр - 10 мм с количеством зубьев фрезы z^* равным 5. Обороты n от 180 до 600 об/мин. Это соответствует периоду для зуба T от 0,0011 до 0,013 с. τ принималась 0,005 с.

Для крепления в цанговом патроне масса m 1,5 Н·с²/м, коэффициент демпфирования η_I $0,2 \cdot 10^4$ Н·с/м, коэффициент жесткости C_I $0,5 \cdot 10^7$ Н/м.

Для заготовки из стали 45 удельный коэффициент K 145 Н/м².

Остальные коэффициенты приняты по [15].

Использовались два типа державок. Первая – жесткая, вторая – упругая.

Использование упругой державки снижает амплитуду колебаний. Идет перераспределение энергии вибраций и возмущений от низкочастотных поперечных в высокочастотные крутильные колебания (рисунок 6).

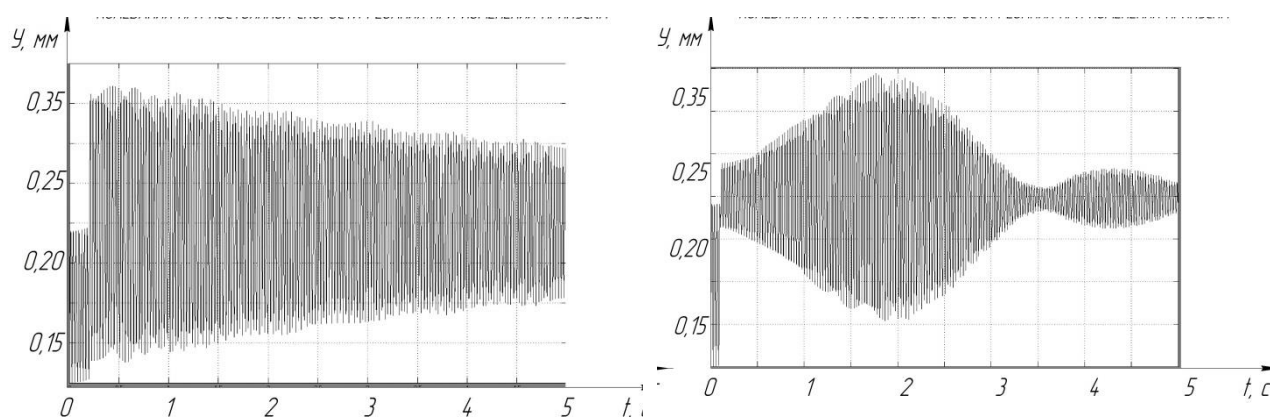


Рисунок 6 - Поперечные смещения фрезы для двух типов державок

С точки зрения влияния на точность высокочастотное скручивание снижает шероховатость за счет брющего эффекта при движении зубьев фрезы. Поперечные смещения снижаются, а это повышение точности размеров и формы.

Введение на всех этапах в упругую систему станка волноводного преобразователя комплексных колебаний в формообразующие подсистемы заготовки - опоры и инструмента, позволяет проводить адаптивную настройку технологических параметров при изменяющихся условиях обработки с реализацией механизма вибрационного резания, перераспределить энергию возмущений различного характера, действующих при обработке, по направлениям минимально влияющим на точность обработки, а также снизить энергоемкость процесса резания за счет создания вибрационных условий обработки без внешних приводов колебаний.

За счет энергии процесса резания в технологической системе возникают управляемые по форме, амплитуде и частоте колебания соответствующего элемента технологической системы. Это приводит к вибрационному механизму резания, при котором энергия возмущений перераспределяется по колебательным контурам упругой системы станка, в наименьшей степени влияющих на точность обработки.

Дальнейшее повышение эффективности обработки с данной адаптивной упругой системой станка связано с исследованием волновых процессов в зоне резания, синхронизацией сдвиговых процессов в зоне стружкообразования с колебаниями фрезы.

За счет изменения конструктивных параметров можно управлять точностью. Здесь два направления.

Первое это снижение общего уровня сил.

Второй – за счет изменения параметров высокочастотных вибраций управление положением точки равновесия вершины инструмента путем изменения характеристик вибрационных смещений, что приводит к изменению параметров величины силы – трения в зоне контакта инструмент – заготовка.

Оба направления способствуют повышению точности обработки и повышению качества обработанной поверхности.

1.2 Моделирование процесса обработки многолезцовым инструментом

Разработаны методы обработки деталей по наружной или внутренней цилиндрическим поверхностям. При этом используются многолезцовые наладки, а инструменты расположены напротив друг друга. Это снижает влияние поперечных сил резания за счет их взаимной компенсации.

В процессе резания происходит сложное взаимодействие, вследствие наличия замкнутых контуров, упругой системы станка и процесса резания. Процессами трения и процессами в приводе подачи, при анализе технологической системы, пренебрегаем [35, 36].

При резании взаимодействие элементов упругой системы (подсистем деталь-опоры ПДО и резец – суппорт ПРС) осуществляется через процесс резания (ПР). Полученная структурная схема показана на рисунке 7.

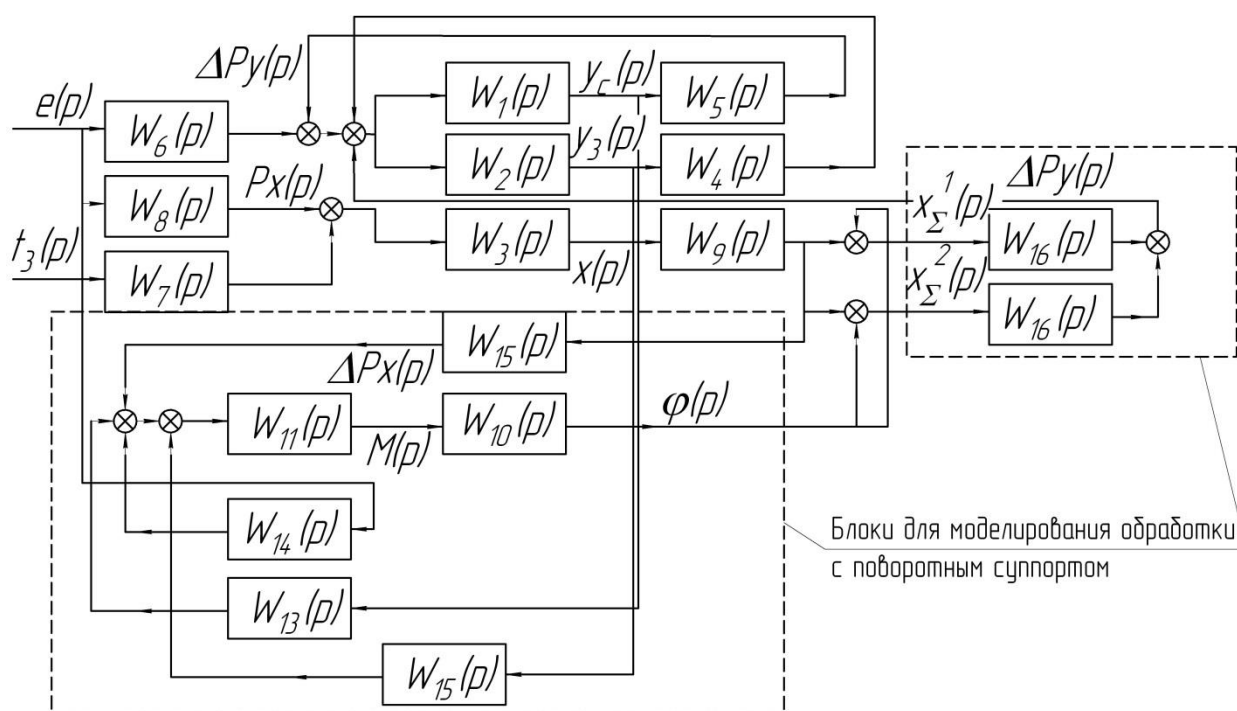


Рисунок 7 - Структурная схема двух резцовой обработки

Поэтому необходимо определить параметры технологической системы, которые влияют на составляющие силы резания, которые зависят от удельной силы резания и площади срезаемого слоя. При большой величине износа и малой толщине среза необходимо включать в баланс сил резания и силы на задней поверхности инструмента.

Результат моделирования для точения двух резцового с жестким креплением резцов и установкой их в поворотном суппорте показано на рисунке 8.

Видно стабилизирующее влияние плавающего суппорта.

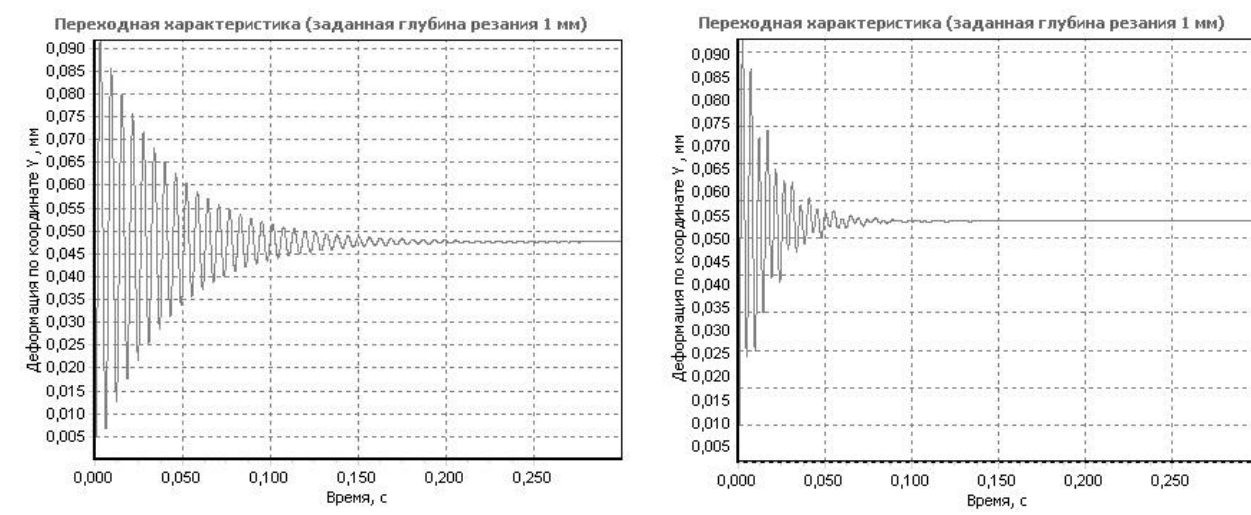


Рисунок 8 - Переходные процессы при обработке жестким и поворотным суппортами

При вибрационном резании большое значение имеет колебательная скорость инструмента. Она определяет характер контакта передней поверхности инструмента и стружки, скорость деформации срезаемого слоя и в конечном итоге величину динамической составляющей силы резания. Динамика резания определяет характер образования фрагментов стружки, стационарность процесса резания и, в конечном итоге, величину статической силы резания.

Если взять схему обработки отверстия (рисунок 9), схема очень похожа на фрезерование. Есть взаимосвязанные поперечный контур и крутильный. Изменяя параметры крутильного контура, влияем на поперечные смещения и непосредственно на размерную точность обработки, а в динамике и на точность формы.

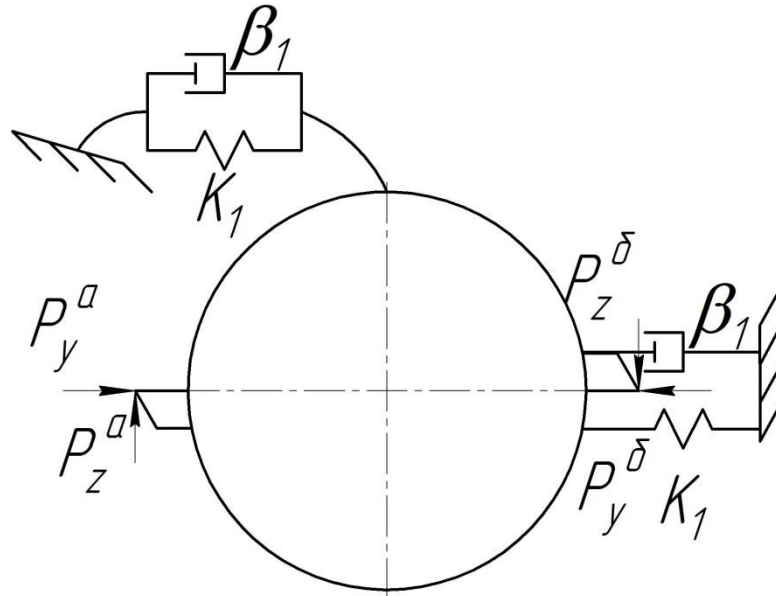


Рисунок 9- Расчетная схема растачивания двух резцовой борштангой

Сила резания определяется тремя составляющими: P_x , P_y и P_z . Каждая составляющая находится по формуле [36]:

$$P_i = Q_i \cdot a \cdot b \cdot V \cdot K_i, \quad (9)$$

где Q_i - удельная сила стружкообразования, Н/мм²;

K_i – коэффициент, учитывающий условия обработки;

a, b – толщина и ширина срезаемого слоя, мм;

V - скорость резания, м/с.

При линеаризации:

$$P_i = m_i \cdot a + n_i \cdot b + g_i \cdot V, \quad (10)$$

где m_i , n_i , g_i - коэффициент передачи процесса резания по приращению, соответственно, толщины среза a , ширины среза b и скорости резания V .

Скорость резания при вибрационном резании испытывает большие изменения (иногда переходя в отрицательную область, когда происходит отрыв резца от стружки). Скорость колебаний, вызванных динамическими возмущениями зоны резания, определяется частотой импульсных релаксационных процессов в зоне стружкообразования (частотой стружкообразования). Частота стружкообразования зависит от стационарной скорости резания [29]. Поэтому составляющие сил резания P_i определяются колебательной скоростью, которая является функцией стационарной скорости резания. Стационарная скорость при обработке одной детали не испытывает больших изменений, что позволяет линеаризовать зависимость P_i от $V_{\text{стац}}$. В случае степенной зависимости

$$P_i = c_i \cdot b^x \cdot a^y \cdot V^n \cdot K_i, \quad (11)$$

где c_i - эмпирический коэффициент;

x, y, n - показатели степени для конкретных условий обработки;

K_i - коэффициент, учитывающий несовпадение данных условий обработки с табличными условиями.

Коэффициент передачи процесса резания находится как частная производная для каждой составляющей по формуле

$$m_i = \left(\frac{\partial P_i}{\partial a} \right)_0. \quad (12)$$

Аналогично для коэффициентов n_i , g_i .

Для отыскания значения коэффициентов необходимо две переменных принять постоянными. Затем отыскивается частная производная

$$mz = \frac{\partial P_z}{\partial a}, gi = \frac{\partial P_z}{\partial v}, nz = \frac{\partial P_z}{\partial b}. \quad (13)$$

Проанализируем, как деформация технологической системы в различных направлениях и ее параметры взаимосвязаны с параметрами режима обработки a, b, V .

Исследуем поведение системы в квазистатическом режиме и определим поведение элементов станка при снятии припуска в течении одного оборота. Одной из главных причин колебаний ПДО и ПРС является изменение толщины снимаемого слоя. Время, в течение которого происходит изменение силы резания, в этом случае намного меньше постоянной времени стружкообразования $T_p = 4 \cdot 10^{-3}$ сек. [36] (время оборота заготовки около 0,1 сек.). Запаздывание силы резания от переменных параметров сечения срезаемого слоя можно не учитывать. Изменение толщины срезаемого слоя определяется мгновенной скоростью подачи и зависит не только от положения точки режущей кромки в момент времени резания, но и в момент времени $t - \tau$, где τ - время оборота детали (время запаздывания). Это явление определяется как обработка по “следу”. Если скорость подачи регулируется, и на отклонение толщины среза влияют деформации в осевом ΔY_x и радиальном ΔY_y направлении упругой системы станка, приведенная толщина среза определяется в операторной форме [24] с учетом двух резцово́й обработки

$$\Delta a(p) = 1/p(1-e^{-\tau p})\Delta S(p) - \Delta a_\phi(p) \pm \Delta Y_y(p)K_\phi(1-e^{-\tau p}) - (1-e^{-\tau p})\Delta Y_x(p), \quad (14)$$

где $1/S(1-e^{-\tau p})$ - оператор запаздывания, учитывающий обработку по “следу”;

$\Delta S(p)$ - величина подачи на оборот. \

Для стандартного инструмента $\Delta Y_X(p)$ и $\Delta Y_Y(p)$ при черновой обработки можно пренебречь. Для инструмента с волноводным преобразователем крутильных колебаний в крутильно-продольные $\Delta Y_X(p)$ для низкочастотной части спектра существенно (до 0,03 мм). Ширина среза определяется двумя составляющими: изменяющимися по длине детали (из-за износа резцов) и в течение оборота (из-за эксцентриситета припуска). В операторной форме

$$\Delta b(p) = 1/(p\tau)(1-e^{-\tau})\Delta b_{np}(p) + Sb(p)/(\omega^2 + p^2) - \Delta b_{износ}(p) \pm \Delta Y_Y(p), \quad (15)$$

где $p/(\omega^2 + p^2)$ - оператор, учитывающий периодическое изменение припуска b на обработку в течение оборота;

$1/(p\tau)(1-e^{-\tau})$ - оператор, учитывающий переменность припуска по длине детали;

$\Delta b_{np}(p)$ - средняя глубина резания за оборот;

$$\Delta b_{износ}(p) = k_5 p \Delta v(p), \quad (16)$$

где k_5 - коэффициент интенсивности износа;

$\Delta b_{износ}(p)$ - величина износа резцов;

$\Delta Y_Y(p)$ - деформация в радиальном направлении (знак $\pm$, т.к. смещение в направлении одного из резцов при двух резцовой расточке вызывает увеличение глубины резания на одном резце, на другом - ее уменьшение).

Рассмотрим деформацию ПРС под действием сил P_y , P_z и P_x . Как видно из расчетов [27], [31], составляющей P_x при обработке стандартным инструментом можно пренебречь.

Нормальные составляющие P_y^A и P_y^B на двух резцах действуют противоположно друг другу и результирующая сила $\Delta P_y = P_y^A - P_y^B$ будет

определять поперечный изгиб борштанги. Тангенциальная составляющая P_z равна сумме $P_z^A + P_z^D = \Delta$.

При использовании направляющих качения с натягом в обработанном отверстии для проведения одновременного с резанием поверхностного-пластического деформирования (ППД), амплитуда закручивания будет зависеть от дополнительной составляющей P_z , которая находится по формуле

$$P_z = P_z^{nn\partial}(p) = k_9 b^{nn\partial}(p) + k_{10} \Delta V(p), \quad (17)$$

$$\Delta b^{nn\partial}(S) = b^{nn\partial}(p) + \Delta b_{износ}(p), \quad (18)$$

где $\Delta b^{nn\partial}(p)$, $b^{nn\partial}(p)$ - колебания и постоянная составляющая глубины под раскатку;

k_9, k_{10} – удельные коэффициенты силы $P_z^{nn\partial}$ по припуску и скорости;
 $\Delta v(p)$ - колебательная скорость.

Последняя зависит от частоты f стружкообразования

$$V_{КОЛ} = 2\pi \cdot f \cdot A, \quad (19)$$

где A - амплитуда смещений вершины резца.

Частота стружкообразования f :

$$f = \frac{V \sigma_B \sin \psi \cos \omega}{\Delta E \cdot \sin(\pi / 2 + \gamma - \psi)}, \quad (20)$$

«где σ_B - предел прочности обрабатываемого материала, МПа;

ω - угол действия силы резания; ψ -угол наклона плоскости сдвига ;

Δ - величина отклонения вершины резца в процессе сдвига, м;

E - модуль упругости, МПа;

γ - передний угол» [16].

Все сомножители в процессе резания испытывают изменения, что ведет к колебаниям частоты стружкообразования и, следовательно, к изменению колебательной скорости.

Динамика ПРС с волноводным преобразователем описывается системой дифференциальных уравнений 2-ого порядка с постоянными коэффициентами [35]

$$\begin{cases} my'' + \beta_1 y' + k_1 y - 2k_{12} y = \Delta P_Y; \\ J\varphi'' + \beta_2 \varphi' + k_2 \varphi = P_Z d / 2; \\ \Delta a_\varphi = k_4 \varphi, \end{cases} \quad (20)$$

где m -приведенная масса ПРС; J - приведенный момент инерции;

β_1, β_2 – коэффициент демпфирования;

k_1, k_2 – коэффициенты изгибной и крутильной жесткости;

ΔP_Y – равнодействующая нормальных составляющих сил резания;

$P_Z d$ – крутящий момент в результате действия тангенциальной составляющей на двух режущих пластинах;

φ -угол закручивания оправки; Δa_φ - величина продольного смещения в результате усадки упругой части инструмента при закручивании;

k_4 - коэффициент координатной связи.

Для изучения влияния изменения кинематики резания на смещение ПРС по оси y была составлена, по расчетной схеме, математическая модель процесса резания с учетом влияния параметров срезаемого слоя на силу резания.

Математическая модель процесса резания в операторной форме:

$$\begin{aligned}
(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)y(p) &= k_1 \cdot P_y^{pez}(p); \\
(T_3^2 p^2 + T_4 p + 1)\varphi(p) &= k_2 P_z^{pez}(p) + k_3 P_z^{nnd}(p) \\
\Delta a_\varphi(p) &= k_4 \varphi(p)
\end{aligned} \tag{21}$$

где составляющие сил резания

$$P_i^{pez}(p) = n_i \cdot \Delta a(p)a + m_i \cdot \Delta b(p)b + g_i \cdot \Delta V(p)V; i = \{y, z\}, \tag{22}$$

где n_i, m_i, g_i - коэффициенты передачи по приращениям параметров режимов резания;

$T_1^2 = m_1/k_1$; $T_2 = \beta_1/k_1$; $T_3^2 = J/m_2$; $T_4 = \beta_2/k_2$ - постоянные времени;

$k_3 = 1/k_1$; $K_4 = K_5 = 2R/k_2$ - коэффициенты передачи.

Износ определяется по формуле

$$b_{износ} = C t, \tag{23}$$

где C - интенсивность износа в единицу времени мм/мин.

Время оборота при управлении скоростью резания является функцией оборотов шпинделя и определяется как:

$$\int_{t-\tau}^t N_{шп}(t) dt = 1. \tag{24}$$

Тогда полностью математическая модель процесса расточки борштангой с волноводным преобразователем и направляющими и одновременной обработкой ППД:

$$\begin{aligned}
(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)y(p) &= k_1 \cdot P_y^{pe3}(p); \\
(T_3^2 p^2 + T_4 p + 1)\varphi(p) &= k_2 P_z^{pe3}(p) + k_3 P_z^{nn\partial}(p); \\
\Delta a_\varphi(p) &= k_4 \varphi(p); \\
P_i^{pe3}(p) &= n_i \cdot \Delta a(p) + m_i \cdot \Delta b(p) + g_i \cdot \Delta V(p) (i = \{y, z\}); \\
\Delta a(p) &= 1/(pp1 - e^{-\tau}) \Delta S(p) - \Delta a_\varphi(p) \pm \Delta Y_Y(p) K_\varphi (1 - e^{-\tau}) - (1 - e^{-\tau}) \Delta Y_X(p); \quad (25) \\
\Delta b^{nn\partial}(p) &= b^{nn\partial}(p) + \Delta b_{износ}(p); \\
\Delta b_{износ}(p) &= k_5 S \Delta V(S); \\
P_z = P_z^{nn\partial}(p) &= k_9 b^{nn\partial}(p) + k_{10} \Delta V(p); \\
\Delta b(p) &= 1/(p\tau)(1 - e^{-\tau}) \Delta b_{пп}(p) + pb(p)/(\omega^2 + p^2) - \Delta b_{износ}(p) \pm \Delta Y_Y(p); \\
\Delta V(p) &= k_6 f(p) + k_7 \varphi(p); \quad f(p) = k_8 V(p).
\end{aligned}$$

Согласно системе уравнений (25) были определены передаточные функции $W_i(p)$ и разработана структурная схема ТС по передаточным функциям (рисунок 10),

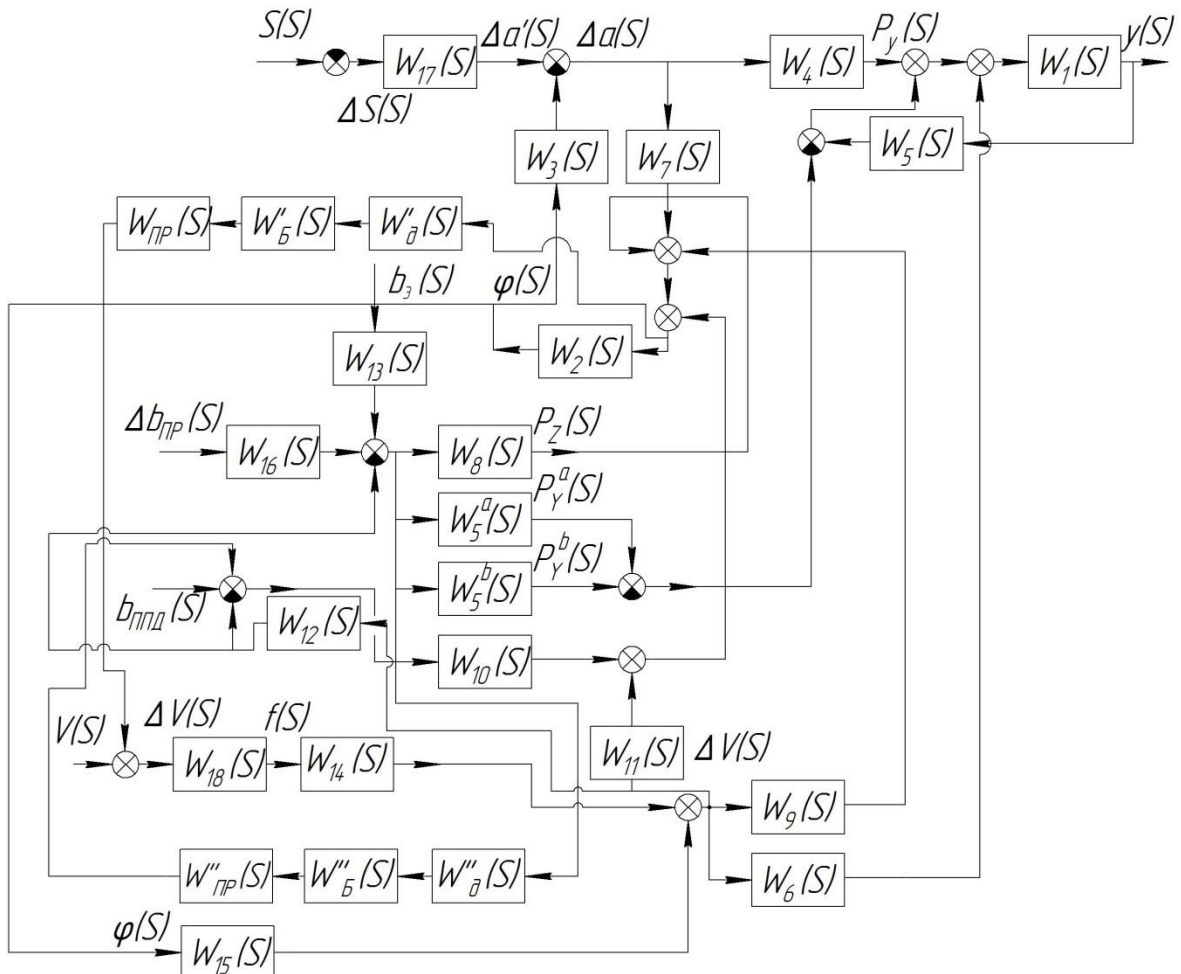


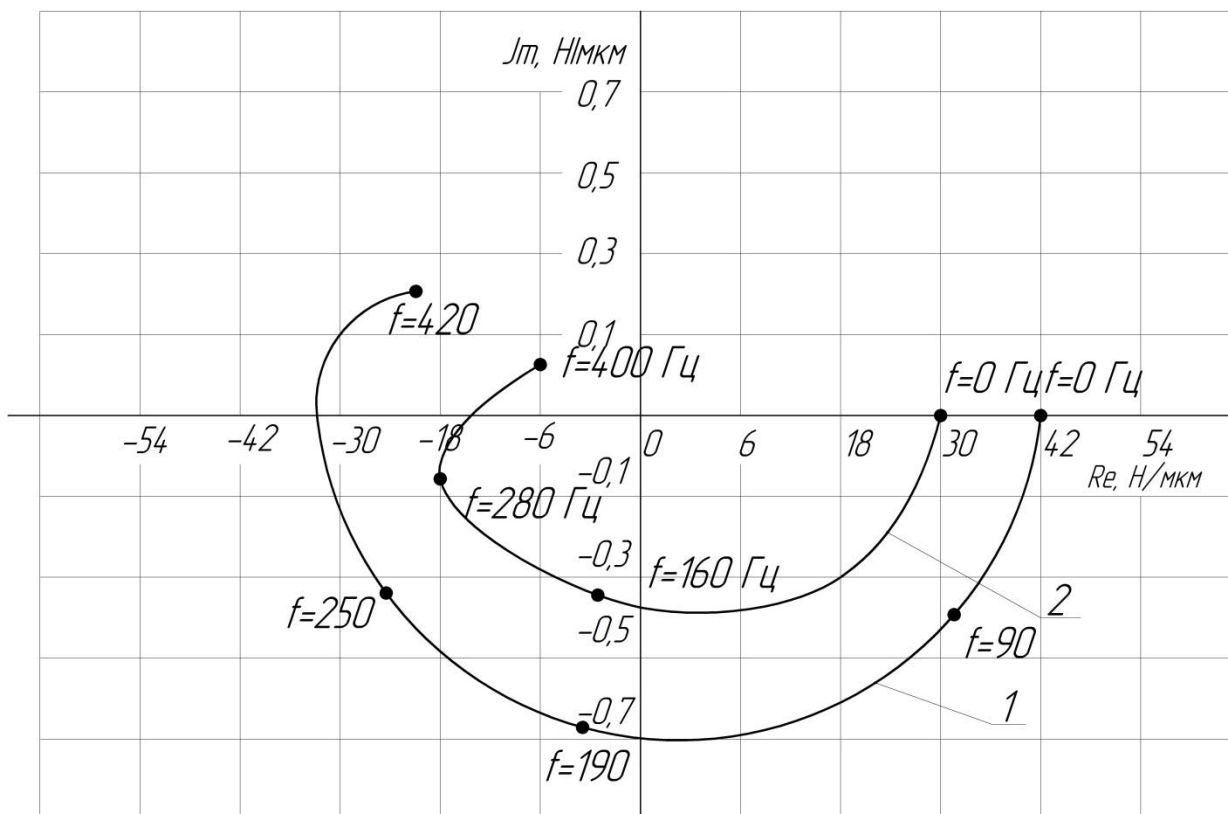
Рисунок 10 - Структурная схема процесса вибрационного растачивания комбинированной борштангой

$$\begin{aligned}
 W_1(p) &= y(p)/P_y(p) = k_1/(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1); \\
 W_2(p) &= \varphi(p)/P_z^{pez}(p) = k_2/(T_3^2 p^2 + T_4 p + 1); \\
 W_3(p) &= \Delta a_\varphi(p)/\varphi(p) = k_4; W_4(p) = P_y(p)/\Delta p)/\Delta = n_y; \\
 W_5(p) &= P_y(p)/\Delta p)/\Delta = m_y; W_6(p) = P_y(p)/\Delta p)/\Delta = g_y; \\
 W_7(p) &= P_z^{pez}(p)/\Delta a(p) = n_z; W_8(p) = P_z^{pez}(p)/\Delta b(p) = m_z; \\
 W_9(p) &= P_z^{pez}(p)/\Delta p)/\Delta V; W_{10}(p) = P_z^{nnd}(p)/b^{nnd}(p) = m_{z1}; \\
 W_{11}(p) &= P_z^{nnd}(p)/\Delta p)/\Delta = g_{z1}; W_{12}(p) = b_{узнос}(p)/\Delta \Delta(p); \\
 W_{13}(p) &= \Delta b(p)/b(p) = p/(\omega^2 + p^2); W_{14}(p) = \Delta V(p)/f(p) = k_5; \\
 W_{15}(p) &= \Delta V(p)/\varphi(p) = k_6; W_{16}(p) = \Delta b(p)/\Delta b_{пп}(p) = 1/(Sp)(1 - e^{-p}); \\
 W_{17}(p) &= \Delta a(p)/\Delta S(p) = 1/(p)(1 - e^{-p}); W_{18}(p) = f(p)/V(p) = k_8.
 \end{aligned} \tag{26}$$

«При расточке борштангой с упругим корпусом динамические силы резания распределяются по контурам закручивания и изгиба, обеспечивая адаптивное изменение толщины сечения и сохранение постоянной площади срезаемого слоя. Низкочастотные колебания уменьшают величину u , повышая точность формы и размеров. Нагрузка преимущественно идет по контуру закручивания из-за меньшей постоянной времени для тангенциальной силы резания» [19].

Результаты исследований позволили определить область устойчивости на расточной операции с предельными режимами резания (рисунок 11).

В результате использования комбинированной расточной головки с волноводной борштангой подача увеличилась с 0,2 до 0,5 мм/об, при увеличении точности с 12 квалитета до 9 за один переход при обработке отверстия диаметром 40 мм длиной 450 мм (таблица 1).



1 – стандартный инструмент; 2 – растачивание с волноводом

Рисунок 11 – Амплитудно-фазочастотная характеристика процесса растачивания

Таблица 1 - Точность обработки без и с использованием комбинированной борштанги, мм

Параметр	Без использования люнетов	С использованием люнетов
Некруглость, мм	0.18-0.2	0.09
Нецилиндричность, мм	0.07	0.03

Как видно по результатам моделирования, происходит повышение поперечной устойчивости процесса обработки.

1.3 Моделирование автоколебательного процесса резания

Частота стружкообразования (ламелизации) рассчитывается по формулам, в функции скорости резания, прочности материала и величины

усадки стружки, которая влияет также на величину запаздывания силы резания [20].

В условиях динамического нагружения ПРС, процесс стружкообразования и устойчивость динамической системы непостоянны [30], [31], [32], [33], [34]. С точки зрения повышения работоспособности инструмента необходимо стремиться к стабилизации динамических параметров упругой системы и снижения не стационарности стружкообразования. «Каждый элементарный акт стружкообразования реализуется сдвигом элементарного объема срезаемого металла в плоскости сдвига. Сдвиг изменяет силу упругости, мгновенное значение силы резания и состояние упругой системы» [27]. Разброс частот актов сдвига определяет не стационарность процесса резания. Стойкость инструмента

$$T = K_f \left(\frac{C_v}{V_t^x S^y} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (27)$$

где $K_f = f(f_{cmp})$ - коэффициент является функцией частоты, которая рассчитывается по формуле (20).

Коэффициент равен

$$K_f = \frac{f_{cmm}}{f_{собст.инстр.}}. \quad (28)$$

Уменьшение не стационарности стружкообразования возможно при условии минимальной мощности и работы сдвига. Применение демпфированных прослоек или упругой конструкции державки гасит импульс энергии, подводимой в процессе сдвига. Низкочастотные вибрации могут возникать от запаздывания силы резания при смещении инструмента, координатных связей приводящих к эллипсообразному движению вершины

резца. Одной из основных причин запаздывания является нелинейность процесса пластической деформации, которая зависит от ε' - скорости деформирования, μ - коэффициента трения, ξ - усадки стружки, пластичности (хрупкости) обрабатываемого материала. Отставание равно постоянной стружкообразования

$$T_p = (1 \div 1.5) \frac{a_o \xi_o}{V_p} . \quad (29)$$

Важным вопросом при анализе вибраций является переход от неустановившихся к устойчивым колебаниям, и причины не монотонной зависимости амплитуды вибраций от скорости. Если рассматривать систему резания как термодинамическую неустойчивую диссипативную систему, в которой при пороговых значениях параметров системы формируются диссипативные структуры, определяющие соотношение между скоростью возрастания энтропии и ее обменом со средой, работа сил резания A_p идет на запасание энергии ΔU_p упругой деформации и Q теплоту.

$$A_p = \Delta U_\partial + Q. \quad (30)$$

Образующиеся диссипативные структуры определяют механизм формирования и тип стружки, устойчивость резания. Такие структуры осуществляют пластическое течение [56]. Рост скорости резания V изменяет механизм деформации по толщине стружки и диссипацию ΔU_∂ . При низких скоростях резания V (и, следовательно, температурах) высокая сдвиговая устойчивость макроструктуры (цементита и феррита) обуславливает ограниченное число систем скольжения, а деформацию – как поворот зерен в пределах зоны стружкообразования. Ротация зерен обеспечивает рост трещины и образование стружки.

С ростом скорости (и температур) повышается подвижность дислокаций. Происходит «залечивание» микротрещин. Образуется сливная стружка с увеличением касательных напряжений. С дальнейшим ростом скорости, плотность дислокаций достигает критических значений. Фазовый сдвиг предельно искаженной решетки с критической плотностью дислокаций обуславливает образование аморфной квазжидкой прослойки с минимальным сопротивлением сдвигу $\tau_{сдв}$, с динамическим возвратом в кристаллическое состояние после сдвига. Условия резания - адиабатические. Циклический характер образования сливной стружки обуславливает меньшее время образования фрагмента стружки, меньше чем у стружки скалывания. Время запаздывания τ_3 пластических деформаций по времени преодоления дислокационных силовых барьеров

$$\tau_3 = \frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}} = \frac{\rho b \tau}{\dot{\varepsilon}}, \quad (31)$$

где ρ - плотность дислокаций;

b - вектор Бюргерса;

τ - длина свободного пробега (размер фрагмента).

Для стали $\rho=10^{12}\text{см}^{-2}$; $b=2.48\cdot 10^{-6}\text{см}$; $L=10^{-4}\text{см}$; $\dot{\varepsilon}=10^{-3}\text{с}^{-1}$ время $\tau_3=2.48\cdot 10^{-3}\text{с}$ повышение динамичности уменьшает τ_3 . В процессе резания саморегулирование между зонами стружкообразования и вторичной информации (длины контакта, угла трения, удельной силы трения) снижает тангенциальную составляющую силы резания P_z и деформацию срезаемого слоя ε . Уменьшение (при $\varepsilon \rightarrow \min$) времени запаздывания ведет к минимальной энтропии, $\Delta U_d \rightarrow \min$.

$$S = \frac{P_z L}{J M}, \quad (32)$$

где L – путь резания;

M – механический эквивалент теплоты.

Интенсификация высокочастотных колебаний в зоне резания вызывает увеличение энергии дефектов решетки и приводит к местному повышению температуры на 14-30%. Периодическое силовое воздействие вследствие вибрационных движений уменьшает сопротивление движению дислокаций. Периодическое уменьшение длины контакта изменяет характер трения при резании, делая его независимым от S , γ , V . Концентрация энергии в плоскостях сдвига при аморфизации прослойки уменьшает угол β , ε и силу P_z . Частота перехода элемента сдвига в стружку [56]

$$f_{cmp} = \frac{1000V}{60K_L l_k}, \quad (33)$$

где L_k - размер ступеньки на внешней стороне стружки ($\approx 0.2-0.5$ мм).

В первичной зоне деформации обрабатываемого материала, перед режущим клином, физико-механические свойства обрабатываемого материала зависят от скорости нагружения. В зоне стружкообразования температура, определяемая мощностью диссипативных сил, влияет на физико-механические свойства материала. Высокочастотные колебания элементов упругой системы влияют на мощность сил резания и создают циклическое напряженное состояние, изменяя усредненные значения сил резания. При установившихся колебаниях инструмента относительно заготовки возникают стационарные изменения сил резания в зоне стружкообразования, контакта по передней и задней поверхностям. Это приводит к возникновению в зоне резания циклического напряженного состояния с постоянной и переменной величиной напряжений. Они влияют на характеристики предельного состояния материала по постоянным

составляющим напряжений. Это отражается на средних силах резания и на положение точки равновесия упругой системы.

«При вибрационном резании отмечаются следующие особенности.

Высокочастотные колебания, даже с небольшой амплитудой, из-за высоких колебательных скоростей, значительно влияют на силы контакта задней поверхности инструмента с заготовкой, создавая нелинейный эффект взаимодействия.

Неоднозначность сил резания при движении инструмента вызывает позиционную реакцию деформации в упругой зоне, так как необходимо время для формирования линий скольжения и достижения пластической деформации. При обратном движении формируются плоскости скольжения, и реакция становится вязкой» [28].

«Ранее объект описывался при условии линейности процесса резания. Это вполне допустило при квазистатическом режиме, т.е. когда указанный процесс собственно устойчив. Между тем, при определенных режимах (с учетом свойств обрабатываемого материала и технологического состояния замкнутой обрабатывающей системы) он является нелинейным. При этом автоколебания объясняются тем, что процесс резания и упругая система образуют замкнутый контур, в котором определяющую роль играет упомянутая нелинейность» [17].

Необходимо рассмотреть процесс резания, как самостоятельную подсистему автоколебательного характера. На основе данной модели можно управлять уровнем возмущений при обработке со стороны процесса стружкообразования, а также использовать его как источник управляемых по параметрам и форме колебательных движений элементов упругой системы станка.

Математические модели процесса обработки в настоящее время не позволяют описывать процессы соответствующие разным механизмам стружкообразования при изменении, например, скорости резания. Также не достаточно полно отражаются в математических моделях процессы

автоколебательного характера разного вида (T - периодический режим предельного цикла, релаксационный тип автоколебаний).

Предлагается за счет использования механических резонирующих систем создавать условия локализованной утилизации энергии колебательных процессов, свойственных самому процессу резания. Поскольку колебания в технологической системе имеют характер автоколебаний, необходимы адекватные математические модели.

В зоне стружкообразования обрабатываемый материал испытывает циклические напряжения, в результате которых происходит периодический сдвиг по плоскостям скольжения. «Особенностью модели является учет влияния вибрационных эффектов при колебаниях инструмента относительно заготовки на предельные состояния материала, заключающийся в снижении предела прочности обрабатываемого материала, следовательно, в уменьшении интегральных (средних) сил резания» [18].

Это приводит к повышению точности обработки: уменьшению упругих деформаций элементов технологической системы в радиальном направлении к обработанной поверхности, формирующих точность обработки, как статических, так и динамических.

Выводы по разделу

Проведено моделирование процесса вибрационного точения резцами с упругой державкой, растачивания комбинированным инструментом, сверления спиральными сверлами, фрезерования концевым фрезами с учетом введения в упругую систему станка волноводного преобразователя.

Для уменьшения силы резания и перемещений в станке предлагается внедрение касательного контура с нелинейным упругим элементом, создающего автоколебания. Этот элемент определяет параметры колебаний, а для изучения его влияния разработана математическая модель процесса обработки, учитывающая комплексные вибрации. Для сверления и

растачивания учитывались реакции контакта боковых ленточек сверл и раскатывающих направляющих для расточной борштанги.

Исходя из выше сказанного, формулируются цель и задачи работы.

Цель работы - разработать рекомендации по совершенствованию технологического процесса механической обработки деталей на основе теоретического анализа динамики процесса резания, моделирования смещений и частотного анализа инструментальной подсистемы, а также изучения методов вибрационной обработки.

Задачи работы:

1. Разработать математическую модель процесса обработки, учитывающую основные параметры резания, свойства материала и геометрию инструмента, включая модель процесса обработки многолезцовым инструментом, учитывающую взаимодействие между режущими элементами и модель автоколебательного процесса резания, позволяющую прогнозировать возникновение и развитие вибраций.

2. Изучить базовые понятия нелинейной динамики и их применение к анализу процесса резания. Исследовать динамическую характеристику процесса резания на основе экспериментальных данных и теоретических моделей. Оценить влияние контакта стружка-резец на точность обработки и разработать рекомендации по его минимизации.

3. Определить собственные частоты и формы колебаний инструмента и станка. Выявить резонансные частоты, которые могут приводить к возникновению вибраций и снижению точности обработки. Разработать рекомендации по настройке и демпфированию инструментальной подсистемы для повышения устойчивости процесса резания.

4. Исследовать влияние параметров вибрации на качество обработки и производительность процесса. Разработать алгоритм настройки зоны резания и технологической системы для оптимальной вибрационной обработки. Разработать программный расчет устойчивости сверления с учетом параметров вибрации.

5. Сформулировать рекомендации по выбору оптимальных режимов резания. Предложить конструктивные решения по улучшению инструмента и станка. Разработать рекомендации по применению методов вибрационной обработки для повышения качества и производительности.

Для достижения поставленных задач диссертационного исследования необходимо реализовать несколько этапов. Первый этап заключается в разработке математической модели процесса обработки, где важно учитывать параметры резания, такие как скорость, толщина и ширина резания, а также свойства обрабатываемого материала и геометрию инструмента. Особое внимание стоит уделить модели многолезцового инструмента, которая должна учитывать взаимодействие между режущими элементами, а также автоколебательный процесс, что позволит прогнозировать возникновение и развитие вибраций.

На втором этапе задача включает в себя сбор и анализ экспериментальных данных. Здесь важно определить влияние контакта стружки с резцом на точность процесса обработки. Для этого могут быть применены методы численного моделирования и анализа.

Третий этап включает определение собственных частот и форм колебаний инструмента и станка, что поможет выявить резонансные частоты, способствующие возникающим вибрациям.

Четвертый этап предполагает исследование влияния вибраций на качество обработки и производительность. Здесь необходимо разработать алгоритм настройки зоны резания и технологической системы для оптимизации процессов, а также программный расчет устойчивости сверления на основе учёта параметров вибраций.

2 Моделирование смещений при механической обработке

2.1 Базовые понятия нелинейной динамики

Задача исследования – уточнение полученных моделей замкнутой технологической системы.

Традиционное моделирование динамических процессов при резании заключается в описании только приращений сил резания и смещений элементов технологической системы [57-60]. Существующие модели не учитывают влияние колебаний на постоянную составляющую силы резания и, следовательно, на точность обработки. Для учета влияния вибраций на динамические и статические смещения подсистем предлагается метод разделения движений на "быстрые" (колебания) и "медленные" (кинематика обработки), учитывая их взаимосвязь и влияние на статическую составляющую.

Вибрационная обработка учитывает влияние вибрационных смещений инструмента на коэффициент трения ("вибрационная линеаризация"), снижая его в зависимости от колебательной скорости резания. Оценка влияния сил резания на смещения основана на наблюдении за реакцией на силовые возмущения.

Управляя частотой и амплитудой касательных смещений, можно задавать относительные поперечные смещения подсистем на уровне микрон, снижая среднюю силу резания. Динамическая характеристика процесса резания связывает силы резания с положением инструмента.

Цель - сформировать аттрактор, обеспечивающий требуемое геометрическое качество детали, используя синергетический подход к описанию динамических процессов. В данном случае рассматривается аттрактор в пространстве состояния - асимптотически устойчивое многообразие, обладающее областью притяжения.

2.2 Исследование динамической характеристики процесса резания

Пропорциональное изменение глубины резания t или подачи S вызывает неоднозначное изменение силы резания $\Delta P_{\text{рез}}$ из-за дополнительных сил по задней поверхности. Колебания любого вида влияют на усредненные значения сил резания в низкочастотном (НЧ) диапазоне в полосе пропускания приводов «медленных» движений. Высокочастотные колебания (ВЧ) за счет вибрационной стабилизации уменьшают интенсивность колебаний в НЧ диапазоне.

Пути влияния ВЧ колебаний на силы резания следующие:

1) Физико-механические свойства материала заготовки в области резания определяются температурой в зоне резания $t^0\text{C}$, которая является функцией мощности/работы сил резания. ВЧ колебания влияют на среднее значение сил резания и соответствующие физико-механические свойства материала заготовки.

2) ВЧ колебания даже с малыми амплитудами имеют большие колебательные скорости и влияют на дополнительные силы по задней поверхности, которые являются причиной неоднозначности силы резания или движений инструмента на заготовку и от нее.

В зоне стружкообразования и в контакте стружки с инструментом:

1) Предельное напряженное состояние является циклическим, усредненным по периоду колебаний, зависит от параметров колебаний и, соответственно, влияет на силу резания.

2) При движении инструмента по направлению к заготовке, деформация упругая, а связь ПДО и ПРС позиционная; от заготовки – инструмент связан с ней областью стружкообразования, а связь вязкая /скоростная.

Нелинейность динамической характеристики процесса резания проявляется следующими признаками:

1) «При повышении амплитуды периодических воздействий происходят смещения резонансной частоты (частота автоколебаний)» [10];

2) Изменение диаметра обработанной поверхности d при изменении параметров колебаний из-за их влияния на положение точки равновесия.

Система уравнений в вариациях относительно точки равновесия X^* .
Технологическая система без резания

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + h \frac{du}{dt} + cu = P; \quad (34)$$

где $P = \{P_y, P_z\}^T$ - вектор-функция измеренных воздействий;

u – смещения.

Матрицы масс, демпфирования и жесткости с коэффициентами по осям y, z

$$m = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}; h = \begin{bmatrix} h_{y,y} & 0 \\ 0 & h_{z,z} \end{bmatrix}; c = \begin{bmatrix} c_{y,y} & 0 \\ 0 & c_{z,z} \end{bmatrix}; u = \{y, z\}^T; \quad (35)$$

Для идентификации параметров системы вместо синусоидального может быть использован импульсный сигнал [67-69]. В качестве исходных импульсных воздействий используется удар динамометрическими молотками в ортогональных направлениях y и z . По реакции на него осуществляется идентификация параметров системы без резания. Определяются матрицы масс m , демпфирования h , жесткости c . Экспериментально определяется статическая жесткость c , по переходному процессу, с учетом жесткости - m и h .

Технологическая система с процессом резания [67]

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + h \frac{du}{dt} + cu = P + F \quad (36)$$

где сила резания представлена в виде системы уравнений для двух координат

$$\begin{cases} F_y(y, z, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}) = F_{y1}(y, \frac{dy}{dt}) + F_{y2}(z, \frac{dz}{dt}) \\ F_z(y, z, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}) = F_{z1}(y, \frac{dy}{dt}) + F_{z2}(z, \frac{dz}{dt}) \end{cases} \quad (37)$$

Для идентификации параметров системы с процессом резания необходимо изменять направление траекторий колебаний инструмента

$$\begin{aligned} y(t) &= -y_{CT} + y_{ДИН} \sin(\omega t + \theta_y); \\ z(t) &= -z_{CT} + z_{ДИН} \sin(\omega t + \theta_z). \end{aligned} \quad (38)$$

где y_{CT}, z_{CT} - динамическое смещение точки статического равновесия.

Оно зависит от частоты и амплитуды колебаний в сторону уменьшения упругих деформаций. Ему соответствует изменение сил резания $\Delta F_y^{ПОСТ}$, $\Delta F_z^{ПОСТ}$, определенные тензометрированием. Колебания в процессе резания с внешними возмущениями задаются в двух ортогональных направлениях от когерентных источников.

$$\omega_1(t) = f_1 \sin(\Omega_1 t + \theta_{f1}) + f_2 \sin(\Omega t). \quad (39)$$

Это условие обеспечивается конструкцией волноводного преобразователя с пазом, выполненным по радиусу, или резца с клиновым пазом. Задаются или регистрируются частота колебаний в нормальном и касательном направлении f_1, f_2 , а также фазовый сдвиг между ними θ_f , измеряются постоянные составляющие смещений в двух направлениях и фазовые сдвиги $y_{CT}, \theta_y; z_{CT}, \theta_z$. Требуется обеспечить радиальное смещение y_{CT} или z_{CT} , которое стремится или к нулю или постоянной величине.

$$F(t) = \{F_y \sin(\omega t + \theta), F_z \sin(\omega t)\}^T. \quad (40)$$

Причины переменных условий резания: непостоянный припуск; переменная жесткость подсистем; изменение частоты процессов стружкообразования, схватывания-отрыва в зоне резания; автоколебания; переменная скорость резания из-за тангенциальных колебаний.

Условие гармонического баланса [67]

$$\begin{aligned} (-m \cdot \omega^2 + j \cdot h_{y,y} \cdot \omega + c_y) y_{\text{дин}} (\cos \theta_y + j \cdot \sin \theta_y) &= a_{y,y}(y_{\text{ст}}, y_{\text{дин}}, \theta_y, \omega) + \\ &+ j \cdot b_{y,y}(y_{\text{ст}}, y_{\text{дин}}, \theta_y, \omega) + a_{z,y}(z_{\text{ст}}, z_{\text{дин}}, \theta_z, \omega) + j \cdot b_{z,y}(z_{\text{ст}}, z_{\text{дин}}, \theta_z, \omega) + \\ &+ P_y (\cos \theta_y + j \cdot \sin \theta_y); \\ (-m \cdot \omega^2 + j \cdot h_{z,z} \cdot \omega + c_z) z_{\text{дин}} (\cos \theta_z + j \cdot \sin \theta_z) &= a_{y,z}(y_{\text{ст}}, y_{\text{дин}}, \theta_y, \omega) + \\ &+ j \cdot b_{y,z}(y_{\text{ст}}, y_{\text{дин}}, \theta_y, \omega) + a_{z,z}(z_{\text{ст}}, z_{\text{дин}}, \theta_z, \omega) + j \cdot b_{z,z}(z_{\text{ст}}, z_{\text{дин}}, \theta_z, \omega) + \\ &+ P_z (\cos \theta_z + j \cdot \sin \theta_z). \end{aligned} \quad (41)$$

где гармонически линеаризованные оценки определяются по типу [75]

$$\begin{aligned} a_{y,y}(y_{\text{ст}}, y_{\text{дин}}, \theta_y, \omega) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F_{y,y} \{ [y_{\text{ст}} + y_{\text{дин}} \cdot \sin(\omega t + \theta_y)], [y_{\text{дин}} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \theta_y)] \} \cdot \\ &\cdot \sin(\omega t) d(\omega t); \\ b_{y,y}(y_{\text{ст}}, y_{\text{дин}}, \theta_y, \omega) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F_{y,y} \{ [y_{\text{ст}} + y_{\text{дин}} \cdot \sin(\omega t + \theta_y)], [y_{\text{дин}} \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \theta_y)] \} \cdot \\ &\cdot \cos(\omega t) d(\omega t); \end{aligned} \quad (42)$$

- годографы, зависящие от амплитуды и фазы динамического смещения. Из них видно, что годографы вещественной и мнимой составляющей зависят от частоты, амплитуды и фазы колебаний. Метод расчета – баланс по переменным составляющим [70].

Баланс по постоянным составляющим сил резания и смещениям

$$\begin{aligned} c_{yy} \cdot y_{CT} &= F_{yy}^{CT}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega) + F_{yz}^{CT}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega), \\ c_{zz} \cdot z_{CT} &= F_{zy}^{CT}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega) + F_{zz}^{CT}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega), \end{aligned} \quad (43)$$

где

$$\begin{aligned} F_{y,y}^{CT}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_{y,y} \{ [y_{ДИН} \cdot \sin(\omega t + \theta_y)], [y_{ДИН} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \theta_y)] \} d(\omega t); \\ F_{y,z}^{CT}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_{y,z} \{ [z_{ДИН} \cdot \sin(\omega t + \theta_z)], [z_{ДИН} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \theta_z)] \} d(\omega t); \\ F_{z,y}^{CT}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_{z,y} \{ [y_{ДИН} \cdot \sin(\omega t + \theta_y)], [y_{ДИН} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \theta_y)] \} d(\omega t); \\ F_{z,z}^{CT}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_{z,z} \{ [z_{ДИН} \cdot \sin(\omega t + \theta_z)], [z_{ДИН} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \theta_z)] \} d(\omega t); \end{aligned} \quad (44)$$

Методика определения функций $F_{y,y}^{CT}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega)$, $F_{y,z}^{CT}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega)$, $F_{z,y}^{CT}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega)$, $F_{z,z}^{CT}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega)$ следующая.

Измеряются приращения сил резания: ΔF_y^{CT} , ΔF_z^{CT} . Из системы (43) определяются y_{CT} , z_{CT} . Для каждой частоты группируются параметры y_{CT} , z_{CT} , θ_y , θ_z кроме одного, в функции которого определяется соответствующая пара функций $F_{y,y}^{CT}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega)$, $F_{y,z}^{CT}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega)$, $F_{z,y}^{CT}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega)$, $F_{z,z}^{CT}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega)$.

Данные передаточные функции представимы в виде матриц динамической жесткости:

$$W^{ДИН} = \begin{pmatrix} W_{y,y}^{ДИН}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega) & W_{y,z}^{ДИН}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega) \\ W_{z,y}^{ДИН}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega) & W_{z,z}^{ДИН}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega) \end{pmatrix}, \quad (45)$$

$$W^{СТ} = \begin{pmatrix} W_{y,y}^{СТ}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega) & W_{y,z}^{СТ}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega) \\ W_{z,y}^{СТ}(y_{ДИН}, \theta_y, \omega) & W_{z,z}^{СТ}(z_{ДИН}, \theta_z, \omega) \end{pmatrix}, \quad (46)$$

В соответствие этим функциям, а также коэффициентам ставятся передаточные функции по постоянным составляющим с индексом СТ, и по переменным составляющим с индексом ДИН.

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{y,y}^{CT}(y_{дин}, \theta_y, \omega) = \frac{F_{y,y}^{CT}(y_{дин}, \theta_y, \omega)}{y_{дин}}; \\ W_{y,z}^{CT}(z_{дин}, \theta_z, \omega) = \frac{F_{y,z}^{CT}(z_{дин}, \theta_z, \omega)}{z_{дин}}; \\ W_{z,y}^{CT}(y_{дин}, \theta_y, \omega) = \frac{F_{z,y}^{CT}(y_{дин}, \theta_y, \omega)}{y_{дин}}; \\ W_{z,z}^{CT}(z_{дин}, \theta_z, \omega) = \frac{F_{z,z}^{CT}(z_{дин}, \theta_z, \omega)}{z_{дин}}. \end{array} \right. \quad (47)$$

Соотношение фазовых углов θ_y, θ_z задает форму колебаний. ПФ по переменным составляющим:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{y,y}^{дин}(y_{дин}, \theta_y, \omega) = \frac{a_{y,y}(y_{дин}, \theta_y, \omega) + jb_{y,y}(y_{дин}, \theta_y, \omega)}{y_{дин}}; \\ W_{y,z}^{дин}(z_{дин}, \theta_z, \omega) = \frac{a_{y,z}(z_{дин}, \theta_z, \omega) + jb_{y,z}(z_{дин}, \theta_z, \omega)}{z_{дин}}; \\ W_{z,y}^{дин}(y_{дин}, \theta_y, \omega) = \frac{a_{z,y}(y_{дин}, \theta_y, \omega) + jb_{z,y}(y_{дин}, \theta_y, \omega)}{y_{дин}}; \\ W_{z,z}^{дин}(z_{дин}, \theta_z, \omega) = \frac{a_{z,z}(z_{дин}, \theta_z, \omega) + jb_{z,z}(z_{дин}, \theta_z, \omega)}{z_{дин}}. \end{array} \right. \quad (48)$$

Для стационарного состояния:

$$C_{1.1}x_1^{(0)} + q_{1.1}^{(0)}x_{1.0} + q_{1.2}^{(0)}x_{2.0} = 0 \quad (49)$$

$$C_{2.2}x_2^{(0)} + q_{2.1}^{(0)}x_{1.0} + q_{2.2}^{(0)}x_{2.0} = 0 \quad (50)$$

Например: для обработки заготовки из стали X18НТ продольным точением при следующих параметрах $\gamma=2^\circ$; $\alpha=8^\circ$; $V=80$ м/мин; $S_{об}=0,1$ об/мин были получены функции амплитудно-фазочастотные характеристики

(АФЧХ) влияния для переменных составляющих $W_{y,y}^{(1)}(j\Omega, y_{y,0}), W_{y,z}^{(1)}(j\Omega, y_{y,0}), W_{z,y}^{(1)}(j\Omega, y_{y,0}), W_{z,z}^{(1)}(j\Omega, y_{y,0})$ (рисунки 12-15), а также для постоянных составляющих $W_{y,y}^{(0)}(\Omega, y_{y,0}), W_{y,z}^{(0)}(\Omega, y_{y,0}), W_{z,y}^{(0)}(\Omega, y_{y,0}), W_{z,z}^{(0)}(\Omega, y_{y,0})$ от амплитуды колебаний $x_{1,0}$.

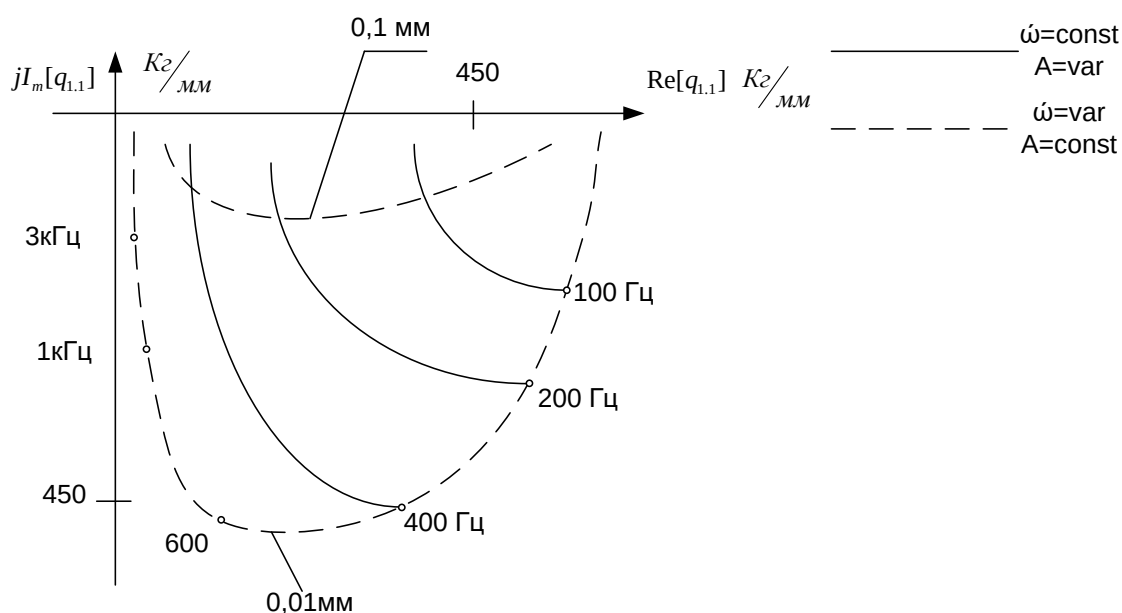


Рисунок 12 - АФЧХ $W_{y,y}^{(1)}(j\Omega, y_{y,0})$ при следующих амплитудах смещений: 1 – 0,01 мм; 2- 0,02; 3-0,05; 4-0,08; 5-0,1 мм

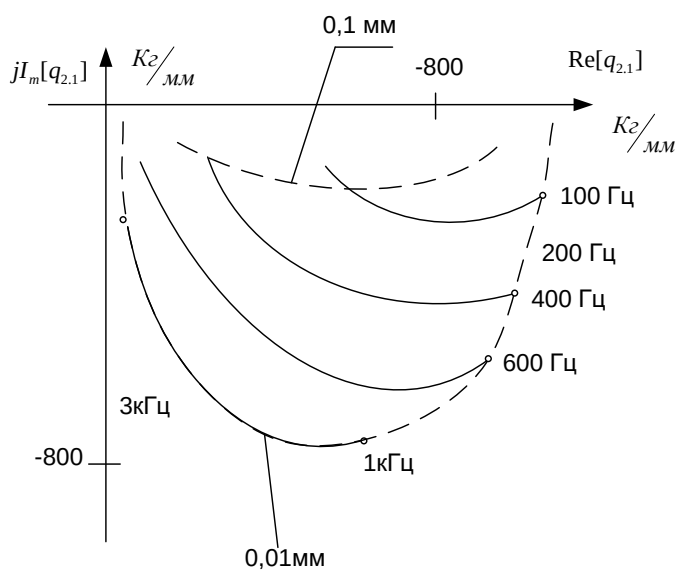


Рисунок 13 - АФЧХ $W_{y,z}^{(1)}(j\Omega, y_{y,0})$ при следующих амплитудах смещений: 1 – 0,01 мм; 2- 0,02; 3-0,05; 4-0,08; 5-0,1 мм

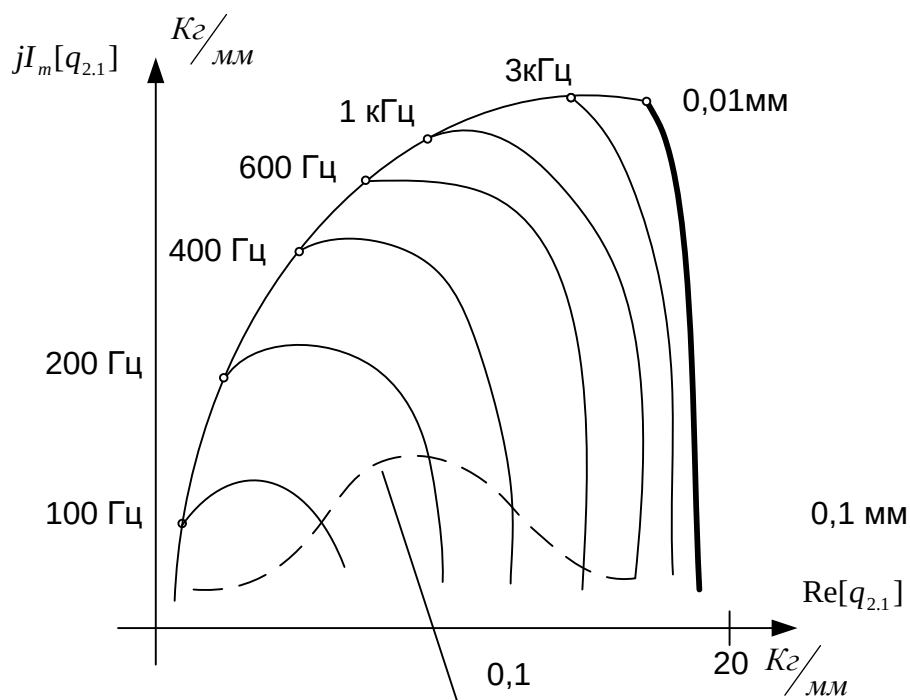


Рисунок 14 - АФЧХ $W_{z,y}^{(1)}(j\Omega, y_{y,0})$ при следующих амплитудах смещений: 1 – 0,01 м; 2- 0,02; 3-0,05; 4-0,08; 5-0,1 мм

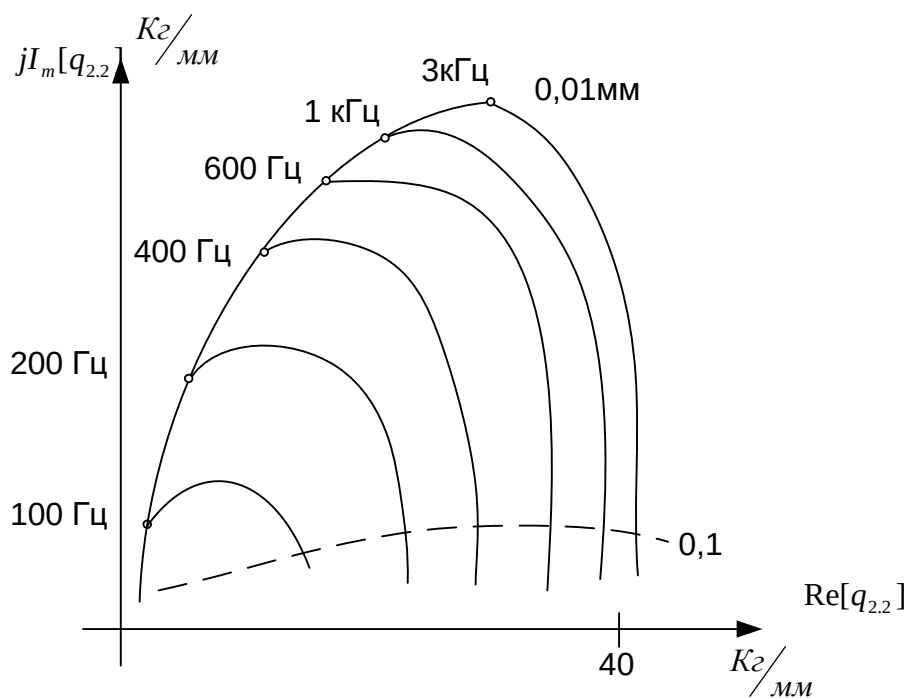


Рисунок 15 - АФЧХ $W_{z,z}^{(1)}(j\Omega, u_{y,0})$ при следующих амплитудах смещений: 1 – 0,01 мм; 2- 0,02; 3-0,05; 4-0,08; 5-0,1 мм

При этом $W_{y,y}^{(1)}(j\Omega, u_{y,0})$ и $W_{z,y}^{(1)}(j\Omega, u_{y,0})$ больше на порядок $W_{y,z}^{(1)}(j\Omega, u_{y,0})$ и $W_{z,z}^{(1)}(j\Omega, u_{y,0})$. При увеличении амплитуды A при частоте колебаний $\Omega = \text{const}$ происходит увеличение фазового сдвига θ_f , то есть наблюдается зависимость запаздывающего аргумента от смещения. Режимы резания влияют на точку равновесия «быстрых» движений. Повышение S_0 способствует диссипативному влиянию ПР на колебания. Годографы $W_{y,y}^{(1)}(j\Omega, u_{y,0})$ и $W_{z,y}^{(1)}(j\Omega, u_{y,0})$ растут при увеличении глубины резания t . Увеличение v приводит к уменьшению фазового сдвига θ_f (запаздывающий аргумент). Сила резания $F_{рез}$ пропорциональна площади срезаемого слоя только для «медленных» движений. Модуль силы стремится к минимуму при условии - $45^\circ < \theta_{x2} < -35^\circ$. При увеличении износа инструмента фазовый сдвиг растет $\theta_{x2}^{\min}$. Нет частот, где влияние колебаний на силы резания не обнаруживается (рисунки 16 и 17).

Существует траектория движения инструмента, при которой сила резания $\Delta F_{рез}$ стремится к минимуму и работа сил резания также стремится к минимуму для совершения колебаний. Колебания в ортогональном направлении не изменяют среднюю силу резания F_{cp} за период колебания.

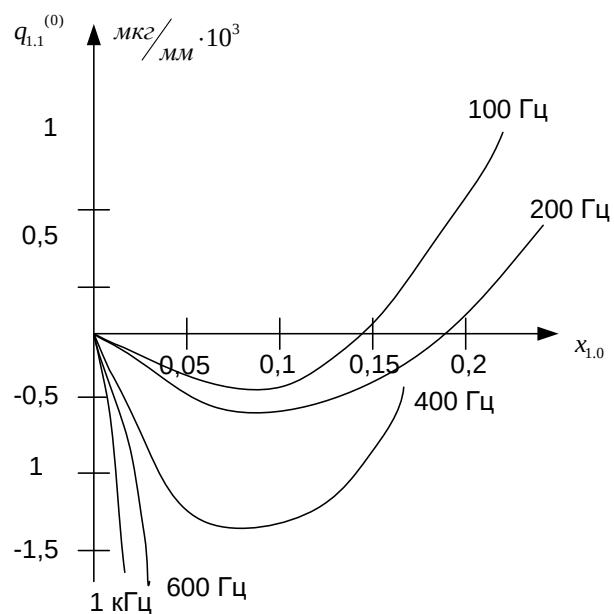


Рисунок 16 - Зависимость годографа $W_{y,y}^{(0)}(j\Omega, y_{y,0})$ от амплитуды колебаний y

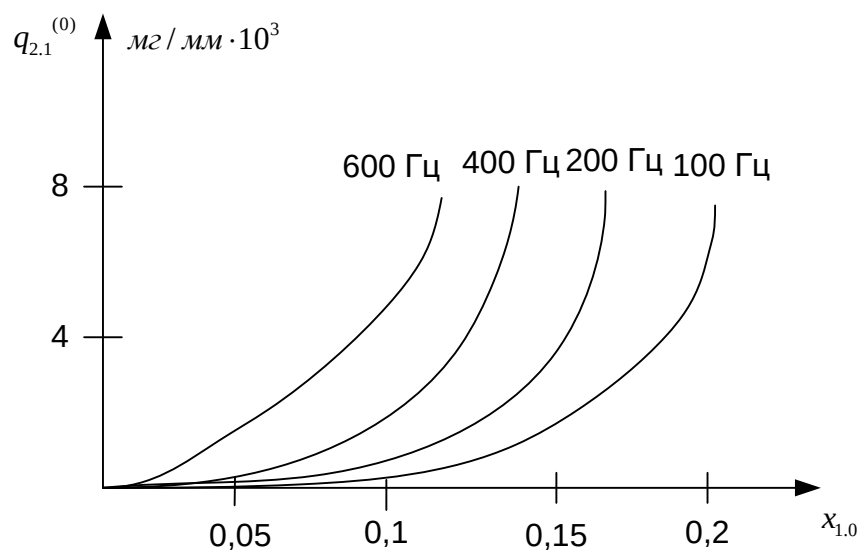


Рисунок 17 - Зависимость годографа $W_{y,z}^{(0)}(j\Omega, y_{y,0})$ от амплитуды колебаний y

При увеличении амплитуды колебаний A (рисунок 18 и 19) циклическое напряженное состояние в зоне резания изменяет характеристики предельных напряжений обрабатываемого материала, усредненные по периоду колебаний (рисунок 20) [31].

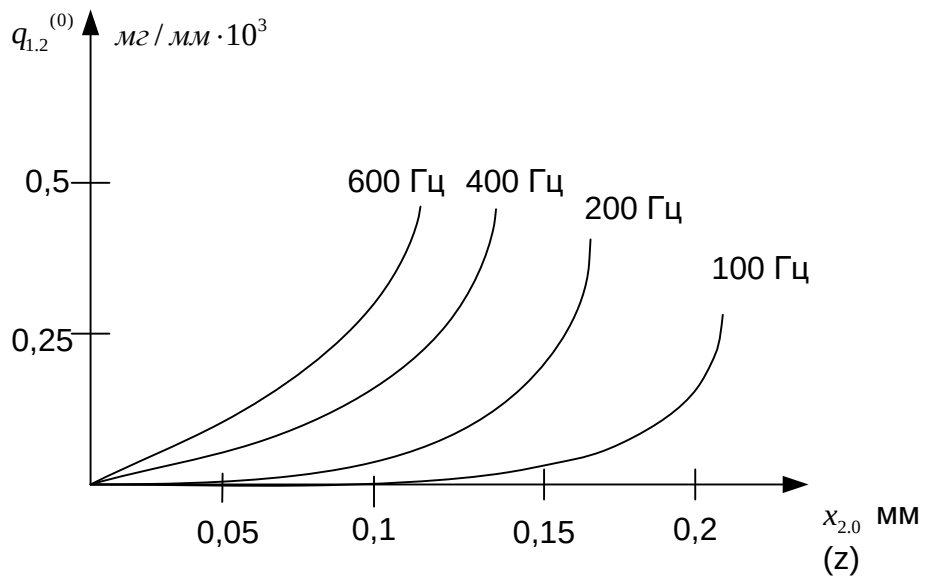


Рисунок 18 - Зависимость годографа $W_{z,y}^{(0)}(j\Omega, y_{y,0})$ от амплитуды колебаний z

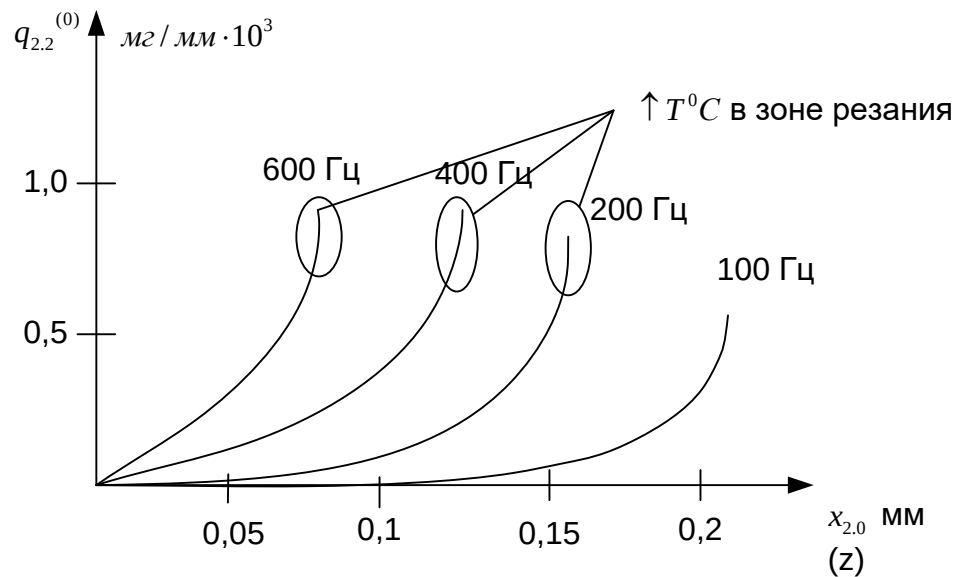


Рисунок 19 - Зависимость годографа $W_{z,z}^{(0)}(j\Omega, y_{y,0})$ от амплитуды колебаний z

Циклические напряжения σ уменьшают интегральные напряжения и силы резания, изменяют условия движения стружки по передней поверхности инструмента:

$$F_{\max} = F_{\text{инт}} \left(X_i, \frac{dX}{dt} i \right) + F_{\text{цикл}} \left(X_i, \frac{dX}{dt} i \right), i=1,2 \quad (51)$$

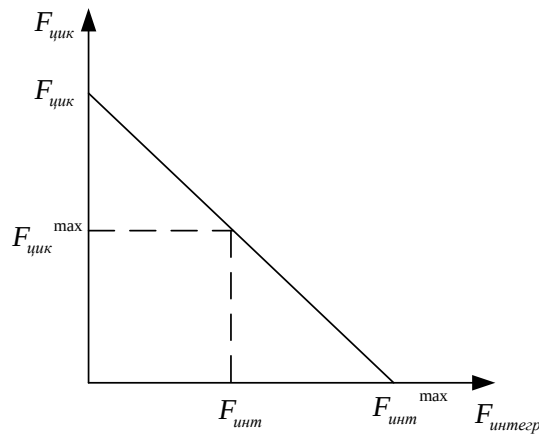


Рисунок 20 - График соотношений интегральных и циклических составляющих сил резания

Особенно важно влияние при колебании по оси z скоростного фактора: $v_z \cdot \Omega = K_{ck}$. Эффективность влияния колебаний на смещение максимально при $K_{ck} \Rightarrow 1$. Разрыв инструмента со стружкой будет происходить при условии $K_{ck} > 1,5 - 2$.

2.3 Влияние контакта стружка-резец на точность

Свойства диссипативной среды определяются скоростью относительного скольжения стружки по передней поверхности инструмента $v_c + dy/dt$.

Преобразование нормальных сил в тангенциальные осуществляется с использованием коэффициента трения (рисунок 21):

$$k_T(v_c, y') = k_T^0 + \alpha_1(v_c + y') + \alpha_2(v_c + y')^2 + \alpha_3(v_c + y')^3, \quad (v_c + y') > 0 \quad (52)$$

где k_T^0 - коэффициент трения в точке равновесия ($v_c = 0, dy/dt = 0, y = 0$);

v_c - скорость стружки;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - коэффициенты влияния скоростей скольжения на коэффициент трения (с/м, с²/м², с³/м³).

Если $k_T^0 = \alpha_2 = 0, \alpha_3 < 0$ - получается модель Рэлея.

Сила резания для установившихся колебаний:

$$F_Y^C = F_Z^C(Y^*, V_c^*, y_1) k_T(V_c, y') \quad (52)$$

$$Y(t) = Y^*(t) + y(t); \quad (53)$$

где $Y^*(t)$ - координата точки равновесия;

$y(t)$ - отклонение от точки равновесия;

$y_1(t)$ - координата с учетом запаздывания:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= y\{t - T_c(y)\}; \\ y_1(t) + T_c(y)y'_1 &= y(t). \end{aligned} \quad (54)$$

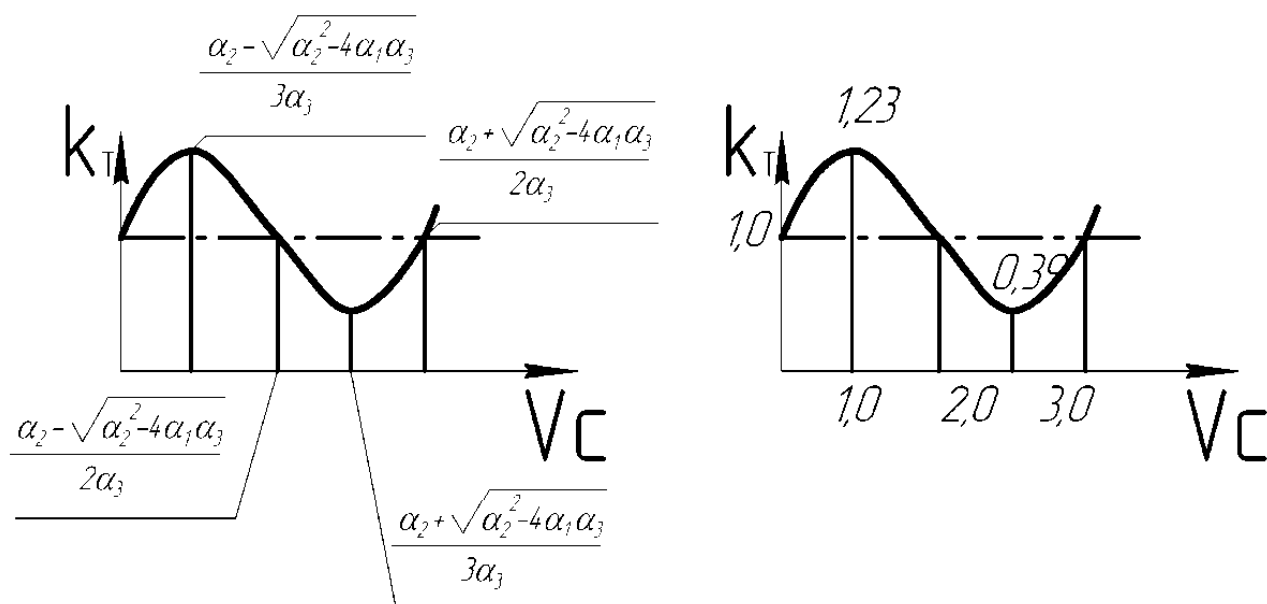


Рисунок 21 - Результат моделирования коэффициента трения в виде полинома

В уравнениях движения для квазистатики («медленных» движений) используется постоянный коэффициент трения:

$$\begin{cases} F_Y^\Sigma = F_Z^{(C)}(Y^*, V_C^*, y_1) k_T^C(V_C, y') + F_Y^3(S + y') \\ F_Z^\Sigma = F_Y^{(C)}(V_C^* + y') k_T^3(V_{PE3}, z') + F_Z^C(Y^*, V_C^*, y_1) \end{cases}; \quad (55)$$

где S – скорость подачи.

Коэффициент трения по задней поверхности

$$k_T^3(V_{PE3}, z') = k_{T,0}^3 + \alpha_{1z}(V_{PE3} + z') + \alpha_{2z}(V_{PE3} + z')^2 + \alpha_{3z}(V_{PE3} + z')^3, \quad (56)$$

$$(v_C + y') > 0$$

«Силы F_Z^C и F_Y^3 - нелинейные, однозначные для своих аргументов, что при установившихся (периодических) колебаниях приводит к формированию постоянной динамической составляющей, зависящей от параметров колебаний» [24].

$$F_y^3 = F\{\infty\} + \frac{\alpha^{(\max)} F\{0\}}{\alpha^{(\max)} + \alpha_0 - \arctg\left[\frac{V_2 \cos \varphi + V_3 \cos \varphi}{\omega_1 r}\right]}, \quad (57)$$

где $F\{\infty\}$, $F\{0\}$ - значение силы контакта по задней поверхности при максимальном и нулевом значениях заднего угла α ;

V_2 , V_3 - скорость смещения в осевом и радиальном направлениях;

φ - главный угол в плане;

ω - угловая скорость резания.

Главное значение имеет $F_Z^C(y_1)$. При увеличении амплитуды колебаний наблюдается ограничение переменных составляющих сил,

сопровождающихся увеличением фазовых сдвигов между силами и смещениями. F_z^3 - также смещает точку равновесия

$$F_z^3 = \alpha_1 y_1 - \alpha_2 (y_2)^2. \quad (58)$$

«Управлять «быстрыми» движениями можно за счет «медленных». Параметры динамической характеристики ПР являются управляемыми.

Если $y = z = y' = z' = 0$ - переменные силы отсутствуют. Если они вместе с V_C , V_{PE3} изменяются, то равновесие сил нарушается. Если стружка переменной толщины, то $V_C = \text{var}$ и траектория «медленных» движений меняется» [21].

Выводы по разделу

Увеличение амплитуды при постоянной частоте ведет к росту запаздывания изменения сил по отношению к смещениям. Неуравновешенность сил резания во времени приводит к изменению фазовых соотношений и формированию «аттракторов».

При амплитуде колебаний $A = \text{const}$ связь y и y_1 не зависит от частоты. При увеличении частоты уменьшается амплитуда y_1 , а фазовый сдвиг растет. Изменение силы резания F_z^C от смещений y происходит с запаздыванием, затем запаздывает F_y^C от F_z^C .

По мере роста амплитуды и частоты колебаний элементов технологической системы, уменьшаются приращения переменных составляющих сил резания, что приводит к повышению точности и качества обработки.

3 Частотный анализ инструментальной подсистемы

Борштанга со сквозными пазами для создания упругих высокочастотных смещений при резании представляет собой полый стержень со сквозным винтовым пазом. Он имеет переменный по длине шаг. Аналитически рассчитать такой элемент трудно. Модальный анализ методом конечных элементов (МКЭ) в ANSYS был использован для исследования влияния конструктивных параметров упругого преобразователя (радиус развертки паза, диаметр преобразователя, ширина паза, диаметр отверстия) на его собственные частоты. Результаты МКЭ были обработаны методом наименьших квадратов для получения уравнений регрессии, определяющих собственные частоты изгибных и крутильных колебаний в зависимости от конструктивных параметров.

Далее проводилась проверка по критерию Фишера для определения степени влияния выбранных факторов на величину выходного параметра, и по коэффициенту множественной корреляции, характеризующему тесноту связи рассчитанных по модели значений и факторов.

С повышением номера гармоники увеличивается среднее квадратичное отклонение σ , а коэффициент множественной корреляции показывает высокую степень влияния выбранных факторов и их сочетаний на выходную величину в виде частоты. Используя данные расчета можно для конкретных производственных условий подбирать параметры упругого преобразователя, которые бы обеспечивали заданную частотную настройку относительно зоны резания и назначенных режимов резания.

Современные требования к механизмам, направленные на снижение материалоемкости и повышение эксплуатационных характеристик, обуславливают необходимость совершенствования методов обработки, особенно применительно к маложестким деталям с высокоточными отверстиями. Для повышения точности обработки глубоких отверстий в таких деталях, как втулки и цилиндры, необходимо обеспечить соосность

отверстия и прямолинейность его оси путем стабилизации положения инструмента и заготовки, снижения сил резания и демпфирования колебаний. Предлагается технология обработки глубоких отверстий с использованием борштанги волноводного типа с пазами, расположенными по определенному профилю.

Для установления связей между конструктивными параметрами волноводного преобразователя и его собственными частотами был выполнен параметрический расчет методом конечных элементов (МКЭ) в ANSYS. В ходе расчета варьировались радиус развертки паза, диаметр преобразователя, ширина паза, диаметр центрального отверстия и количество пазов.

$$f_1(x_1, x_2) = -810.939 + 92.776 \cdot x_1 - 1.14 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.84 \cdot x_1^2 + 1.609 \cdot x_2^2, \quad (59)$$

«где f_1 – первая собственная частота колебаний волноводного преобразователя;

x_1 – радиус развертки, который определяет вылет волноводного преобразователя;

x_2 – диаметр волноводного преобразователя» [22].

Для волноводного преобразователя (рисунок 22), как элемента оснастки, были определены значимые конструктивные параметры, влияющие на собственные частоты. Степень влияния этих факторов подтверждена критерием Фишера, а высокая величина коэффициента множественной корреляции ($R=0,801$) и значимости коэффициентов (t-критерий Стьюдента $> 1,721$) подтверждают статистическую значимость полученных результатов.

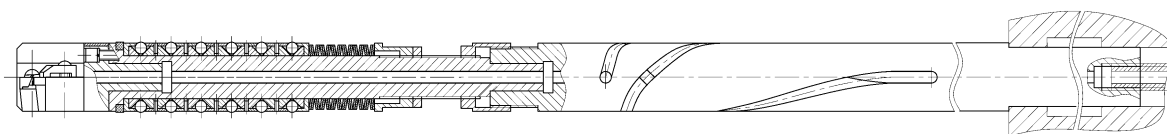


Рисунок 22 - Расточная борштанга для вибрационного растачивания

Полученные регрессионные модели, связывающие собственные частоты волноводного преобразователя с его конструктивными параметрами, например

$$f_i = a^1 R + a^2 D + a^3 W + a^4 H + a^5 N, \quad (60)$$

где f_i – i -я собственная частота,

R – радиус развертки паза,

D – диаметр преобразователя,

W – ширина паза,

H – диаметр центрального отверстия,

N – количество пазов,

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – коэффициенты регрессии.

Они позволяют оптимизировать конструкцию преобразователя для достижения резонансных или антирезонансных условий работы системы "инструмент-заготовка-станок". Зная параметры обработки (скорость резания V , подачу S , глубину резания t), можно рассчитать частоту стружкообразования

$$f_c = kV/t, \quad (61)$$

где k – коэффициент, зависящий от геометрии инструмента и обрабатываемого материала).

Для обеспечения эффективной вибрационной обработки необходимо выполнить условие частотного согласования. Резонансное согласование для повышения производительности:

$$f_i \approx n f_c, \quad (62)$$

где n - целое число (обычно 1 или 2),

f_i - собственная частота волноводного преобразователя, соответствующая преимущественно продольным колебаниям.

Это условие обеспечивает усиление продольных колебаний, способствуя эффективному дроблению и отводу стружки. Антирезонансное согласование для повышения точности:

$$f_i \neq n f_c, \quad (63)$$

где m - целое число;

f_c - собственная частота системы "заготовка-опоры", а также собственные частоты волноводного преобразователя, соответствующие преимущественно изгибным колебаниям.

Это условие подавляет паразитные колебания заготовки, повышая точность обработки. Так же для повышения точности обработки желательно обеспечить совпадение собственной частоты волноводного преобразователя (преимущественно крутильные колебания) с частотой стружкообразования.

Выводы по разделу

Таким образом, зная требуемые частоты стружкообразования и собственные частоты системы "заготовка-опоры", можно, используя полученные регрессионные модели, рассчитать оптимальные конструктивные параметры волноводного преобразователя для достижения максимальной эффективности процесса обработки – максимальной производительности при заданном качестве обработки. Для учета влияния упругих связей в системе необходимо применять корректирующие коэффициенты, полученные из экспериментальных данных и расчетов, для более точного определения реальных собственных частот системы.

4 Изучение методов вибрационной обработки

4.1 Исследование процессов обработки

Применение резания с вибрациями на оптимальных режимах позволяет успешно решать многие актуальные проблемы, связанные с повышением эффективности обработки.

Максимальная точность достигается при определенных соотношениях частот автоколебаний инструментальной подсистемы и вынужденных колебаний, кратных частоте вращения заготовки, причем эти отношения не являются целыми числами. Частота автоколебаний определяется собственной частотой колебаний инструмента с упругим преобразователем и требует корректировки в зависимости от режима резания и материалов заготовки и инструмента.

«Для черновой обработки необходимы низкочастотные колебания (до 400 Гц) с амплитудой до 150 мкм, что обеспечивает надежное стружкодробление или вибротранспортирование стружки. Для чистовой обработки необходимы высокочастотные колебания (от 1500 Гц) с амплитудой не более 10-15 мкм, что благоприятной сказывается на точности размеров, формы (отклонения от цилиндричности) и расположения (отклонения от соосности), снижается волнистость и шероховатость» [64]. Микропрофиль поверхности носит регулярный характер.

В начале экспериментальных исследований идентифицировались параметры подсистемы инструмента и заготовки без резания (инерционные m , демпфирующие h , жесткостные c). Определялись по осциллограммам затухающих колебаний собственные частоты, декременты затухания.

Определялась статическая жесткость с использованием динамометра в тех же сечениях, что и затухающие колебания. С учетом полученных результатов рассчитываются приведенные массы: $m = C / \omega_0^2$.

Статический эксперимент включал определение изменения собственной частоты приведенной технологической системы:

- от положения суппорта по длине детали;
- от положения осевого инструмента по длине детали;
- от изменения параметров сечения детали.

Построены спектры колебаний волноводов с различными характеристиками, где выделяются области резонансных и антирезонансных частот. Данные теоретического и натурного эксперимента по определению собственных частот приведены в соответствие через поправочный коэффициент контактной жесткости стыков с учетом демпфирования в них. Экспериментально подтверждено изменение собственной частота от величины натяга, закрутки тяги волноводного преобразователя.

Идентификация с процессом резания. Изменение направления траекторий движения инструмента осуществлялось за счет изменения конструкции волноводного преобразователя и величины затяжки.

Регистрировалось динамическое смещение точки равновесия, которое зависит от частоты и амплитуды колебаний в сторону уменьшения упругих деформаций при увеличении и частоты и амплитуды.

Им соответствуют изменения сил резания, определенные по величине упругой деформации элементов технологической системы.

Подача S - постоянная; V – задавалась как постоянная, так и переменной (изменялась линейно, гармонически и по релейному типу – скачком). Регулирование скорости резания проводилось частотным преобразователем.

Жесткость инструментальной подсистемы изменялась линейно при плавном изменении затяжки, и скачком – при резком ослаблении затяжки.

Дополнительно к регистрации частотного спектра процесса резания и колебаний элементов технологической системы проводилась диагностика частотного спектра собственных колебаний – импульсно при помощи удара.

Для анализа динамических характеристик процесса резания регистрировалась реакция электрических двигателей. Измерения силы (мощности резания) контролировались по данным с частотного преобразователя, колебания элементов технологической системы с токовихревых датчиков BENTLY NEVADA и акселерометра. При этом фиксировалась траектория упругих деформаций вершины инструмента относительно точки закрепления, амплитуда относительных колебаний инструмента и заготовки, а переменные составляющие сил резания оценивались по величине упругих деформаций. Измерения температуры проводились пирометром.

Обработка заготовок проводилась стандартным инструментом и инструментом с волноводным преобразователем в нескольких сериях.

При квазистатическом изменении подачи, за счет осевых смещений волноводного преобразователя наблюдается несимметричность касательной составляющей, не однозначность как средних, так и переменных составляющих. Данная деформация определяется самоадаптацией режущей части к нагрузке. Дополнительно возникают высокочастотные колебания, обусловленные автоколебательным режимом. Возникающая неоднозначность обусловлена при увеличении подачи сближением задней поверхности с заготовкой, что увеличивает силу трения. При уменьшении подачи ситуация противоположна.

В результате эксперимента было определено, что точка равновесия при резании является предельным циклом из-за периодически меняющегося состояния при образовании стружки. Площадь сечения стружки переменная величина и, соответственно, скорость схода стружки меняется из-за переменной усадки, колебаний инструмента и заготовки.

Нелинейность динамической характеристики процесса резания необходима для определения путей управления траекториями формообразующих подсистем. Зная, как многообразия влияют на процесс

обработки, с учетом диагностики можно прогнозировать эволюционные преобразования системы резания.

При вибрационном резании, если подача (S) превышает 0,15 мм/об при малых скоростях резания (V_p) и подачах (S), элементы матрицы динамической жесткости процесса резания становятся незначительными. Эта матрица несимметрична, указывая на то, что динамическая характеристика процесса резания не обладает потенциальными свойствами, и силы, связанные с кососимметричной частью матрицы, совершают работу.

Выявлены признаки нелинейности динамики резания: смещение резонансной частоты с ростом амплитуды внешнего возмущения и изменение диаметра изделия в зависимости от параметров колебаний, что свидетельствует о влиянии высокочастотных колебаний на положение точки равновесия.

Потенциальная энергия в зоне стружкообразования способствует "отслеживанию" контакта инструмента, однако условия контакта меняются, приводя к неоднозначности сил резания при тангенциальном движении. Величина этой неоднозначности зависит от частоты и амплитуды колебаний.

Для объяснения вибрационного смещения точки равновесия использовались механизмы, такие как снижение среднего трения, кажущееся преобразование трения в вязкое, вибрационная линеаризация, виброползучесть и виброрелаксация.

Упругая система с волноводным преобразователем под действием вибрации демонстрирует исчезновение/возникновение положений равновесия и смену их характера (устойчивость/неустойчивость).

Эксперименты показали, что тангенциальные колебания инструмента сильнее влияют на поперечные смещения менее жесткой заготовки. После двух проходов точность размеров увеличивается вдвое, а процесс резания становится более стабильным. Вибрационное резание оказывает наибольшее влияние на точность расположения (коэффициент уточнения значительно выше, чем при стандартной обработке), при этом стабильность обработки

существенно выше: разброс значений биения в 12 раз меньше, даже при большем начальном разбросе биения заготовок.

Для более жесткой заготовки даны эффекты выражены менее ярко, но преимущество виброрезания все равно сказывается на точности и стабильности обработки.

Параметры динамической характеристики процесса резания являются управляемыми и характеризуют параметры порядка в динамической системе резания.

Если $y = z = y' = z' = 0$ переменные силы отсутствуют. Если они вместе с V_c , V_{PEZ} изменяются, то равновесие сил нарушается. Если стружка переменной толщины, то $V_c = \text{var}$ и траектория «медленных» движений меняется. Траектория выбирается по принципу минимальной работы.

Увеличение амплитуды колебаний при постоянной частоте приводит к росту запаздывания изменения сил резания относительно смещений. Эта временная неуравновешенность сил влияет на фазовые соотношения и приводит к формированию устойчивых многообразий ("аттракторов"). Изменение частоты также влияет на фазовые соотношения. Величина запаздывания пропорциональна квадрату отклонения от точки равновесия и может быть представлена в виде гармонической линеаризованной функции, зависящей от амплитуды колебаний и константы.

Для определения причин относительных колебаний инструмента и заготовки необходимо знание собственных частот колебаний подсистемы инструмента. Свободные колебания вызывались единичным ударным силовым воздействием на подсистему инструмента.

Статические эксперименты проводились для определения коэффициентов жесткости элементов технологической системы. Жесткость измерялась с помощью динамометрической скобы (тарировочный коэффициент $K = 71,4 \text{ Н/мм}$). К исследуемому элементу прикладывалась

статическая сила, а перемещения измерялись токовихревым датчиком. Определялись усилия и смещения элементов при нагрузке и разгрузке.

Схемы замеров жесткости (рисунок 23).

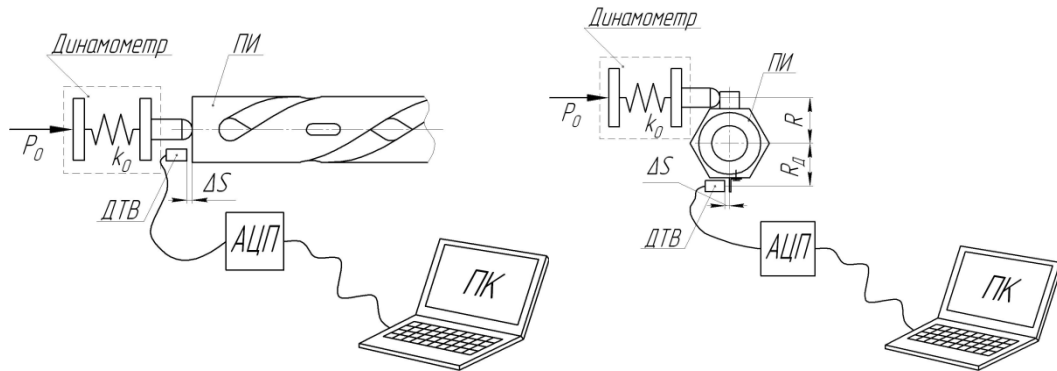


Рисунок 23 - Схема замеров

«Для одновременного определения жесткости и коэффициентов связи ($k_{\phi\phi}$, $k_{\phi x}$), перемещения измерялись в двух направлениях при каждом приложении нагрузки» [48]. Токовихревой датчик регистрировал изменение зазора, которое затем обрабатывалось компьютером с учетом настроек датчика. Коэффициент осевой жесткости:

$$k_u = \frac{P_{0x}}{\Delta S_x - \Delta S_{0x}}, \quad (60)$$

«где P_{0x} - приложенная осевая сила;

ΔS_{0x} - начальный зазор;

ΔS_x - конечный зазор» [26].

$$k_u = \frac{1000}{0,196 \cdot 10^{-4}} = 5,1 \cdot 10^7 \text{ Н/м.}$$

Коэффициент крутильной жесткости:

$$c_u = \frac{P_{0y} \cdot R}{\arcsin\left(\frac{\Delta S_{0y} - \Delta S_y}{R_d}\right)}, \quad (61)$$

«где P_{0y} - приложенная сила;

R - плечо приложения силы;

R_d - радиус расположения датчика;

ΔS_{0y} - начальный зазор;

ΔS_x - конечный зазор» [23].

$$c_u = \frac{500 \cdot 0,02}{\arcsin\left(\frac{0,000039}{0,02}\right)} = 5,1 \cdot 10^3 \text{ Н·м/рад.}$$

Инерционные и диссипативные характеристики определялись по затухающим колебаниям подсистем, вызванным одиночным импульсным воздействием. Затухающие колебания регистрировались токовихревым датчиком. Инерционные характеристики рассчитывались как отношение жесткости к первой собственной частоте. Собственные частоты определялись по амплитудно-частотным характеристикам (спектры), полученным с помощью преобразования Фурье.

Для сверла спектры собственных колебаний показаны на рисунках 24 и 25, для заготовки - на рисунках 26 и 27.

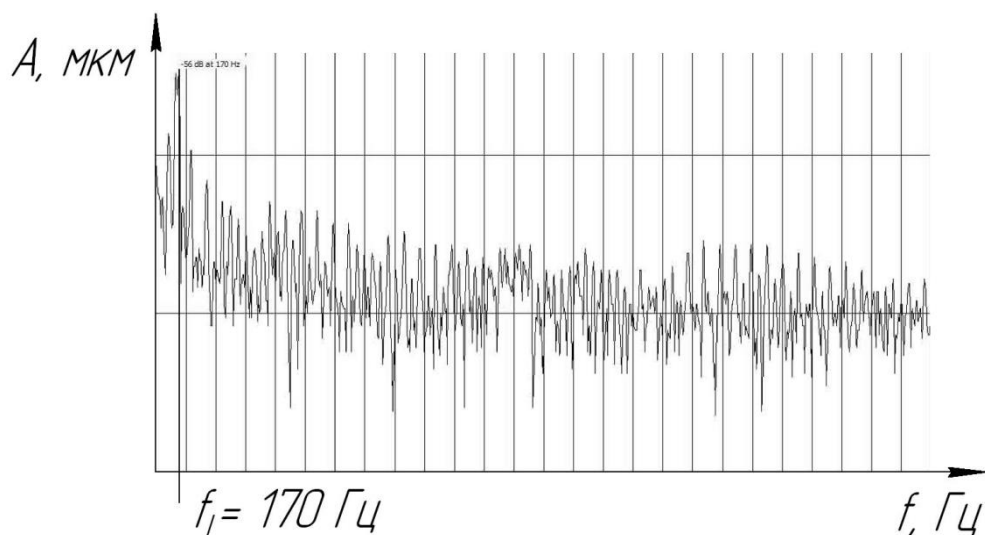


Рисунок 24 – Спектр свободных осевых колебаний сверла

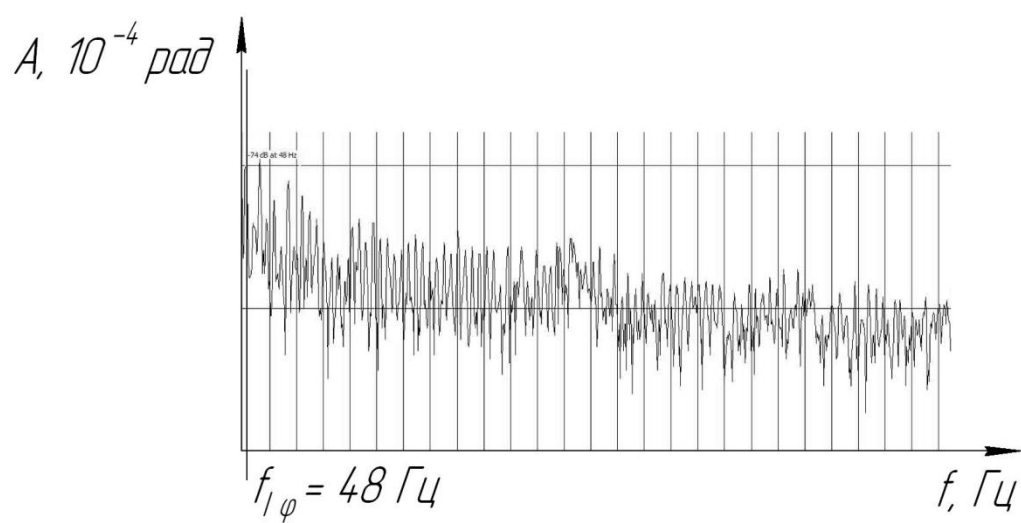


Рисунок 25 – Спектр свободных тангенциальных колебаний сверла

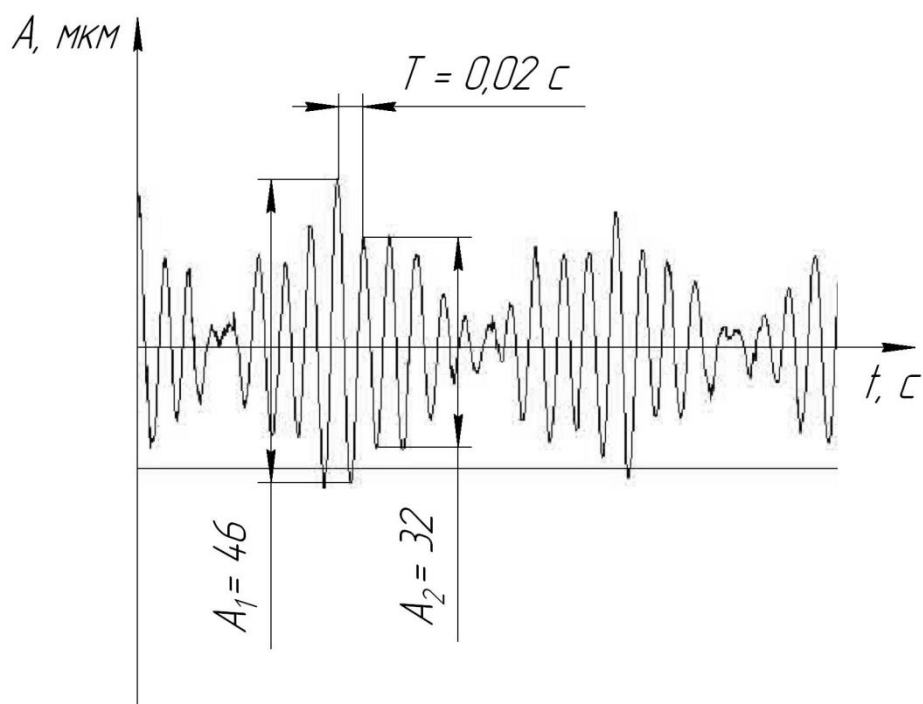


Рисунок 26 - Развертка затухающих осевых колебаний

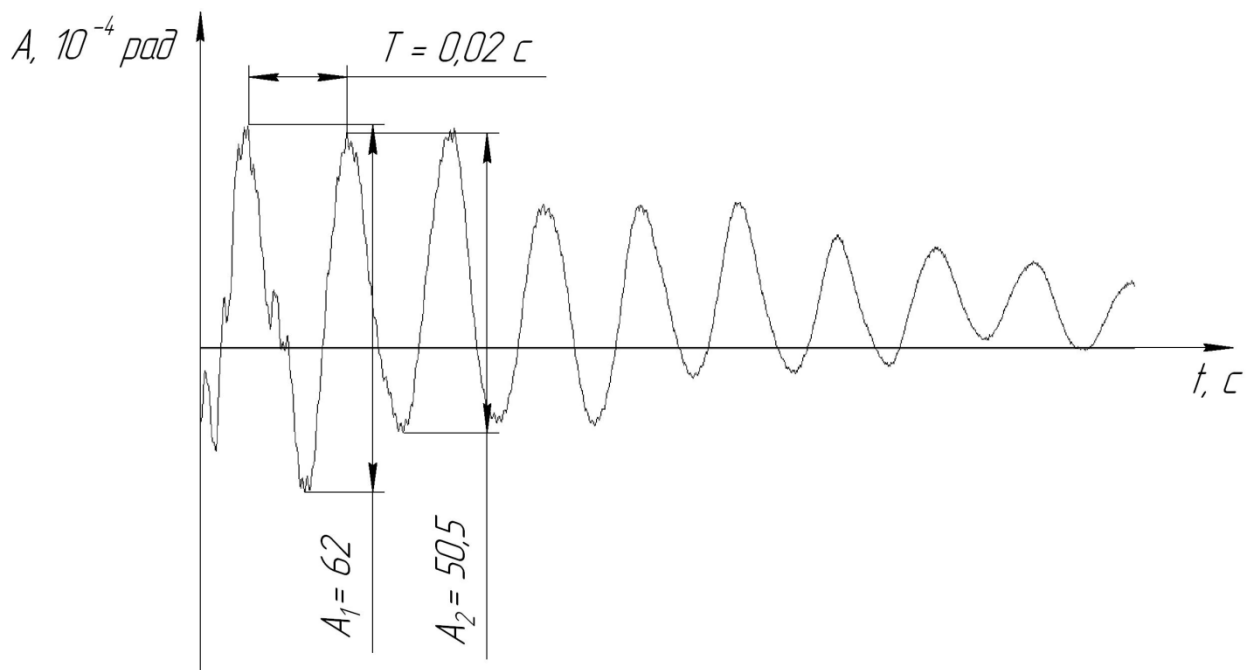


Рисунок 27 – Развертка тангенциальных крутильных колебаний

Приведенная масса сверла:

$$m = \frac{k_u}{f_I^2}, \quad (62)$$

где k_u - жесткость сверла;

f_I - первая собственная осевая частота.

$$m = \frac{5,1 \cdot 10^7}{170^2} = 1764 \text{ кг.}$$

Для заготовки

$$M = \frac{k_z}{F_{Ix}^2}, \quad (63)$$

$$M = \frac{2,67 \cdot 10^9}{147^2} = 123600 \text{ кг.}$$

Для кручения момент инерции сверла и детали:

$$J_{\text{и}} = \frac{C_{\text{и}}}{f_{\text{и}\varphi}^2}, \quad (64)$$

$$J_{\text{з}} = \frac{C_{\text{з}}}{F_{\text{и}\varphi}^2}, \quad (65)$$

$$J_{\text{и}} = \frac{5100}{48^2} = 2,21 \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \text{ (см. рис. П1.3)}$$

$$J_{\text{з}} = \frac{4,5 \cdot 10^7}{100^2} = 4500 \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \text{ (см. рис. П1.7)}$$

Демпфирование подсистем надится на основе инерционных характеристик и логарифмических декрементов затухания, полученных из графиков затухающих колебаний.

Для осевых вибраций:

$$h_{\text{и}} = 2 \cdot m\delta_{\text{пр}}, \quad (66)$$

где $2\delta_{\text{пр}}$ - логарифмический декремент затухания сверла.

Он равен:

$$\delta_{\text{пр}} = \ln \frac{A_1}{A_2}, \quad (67)$$

где A_1, A_2 – амплитуды с графика, м.

$$h_{\text{и}} = 2 \cdot 1764 \cdot \ln \frac{46}{32} = 1280 \text{ Н}\cdot\text{с/м}.$$

Для сверла с учетом данных с графиков

$$\beta_u = 2 \cdot J_u \delta_\kappa, \quad (68)$$

$$h_3 = 2 \cdot M \delta_{np}, \quad (69)$$

$$\beta_3 = 2 \cdot J_3 \delta_\kappa, \quad (70)$$

$$h_3 = 2 \cdot 1,236 \cdot 10^5 \cdot \ln \frac{32}{18} = 1,422 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{с/м}.$$

$$\beta_u = 2 \cdot 2,21 \cdot \ln \frac{62}{50,5} = 0,453 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}.$$

$$\beta_3 = 2 \cdot 4500 \cdot \ln \frac{108}{67} = 4275 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}.$$

Сверло с волноводным преобразователем устанавливалось с вылетом от 90 мм с шагом 10 до 200 мм (рисунок 28).

Измерялось изменение смещения при помощи токовихревого датчика.

Продольные и крутильные смещения показаны в таблицах 2 и 3.

Графики смещений показаны на рисунках 29 и 30.

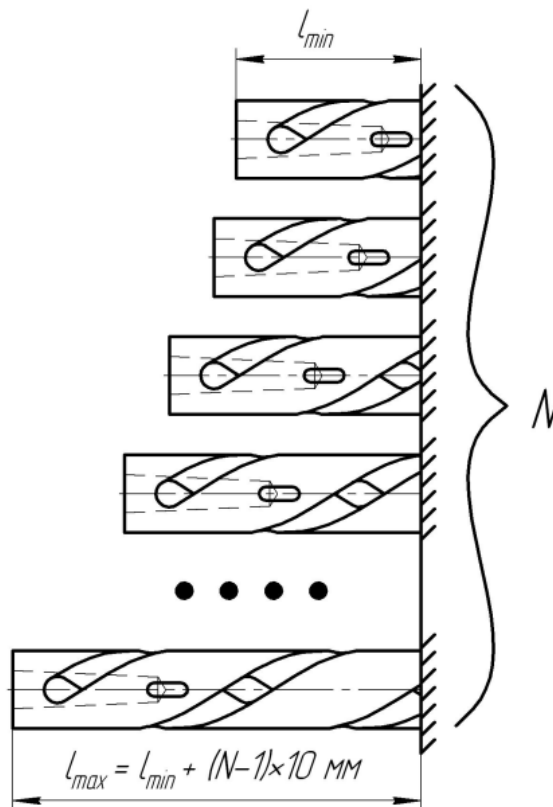


Рисунок 28 - Последовательные положения инструмента

Таблица 2 – Продольное и крутильное смещение для осевой силы

№	Вылет $l, \text{ мм}$	Смещение $x, 10^{-6} \text{ м}$	Закручивание $\varphi, 10^{-4} \text{ рад}$	$k_u,$ 10^7 Н/м	$k_{\varphi x},$ 10^6 Н/рад
1	90	2,73	2,13	36,6	4,70
2	100	3,20	2,46	31,3	4,05
3	110	3,70	2,69	27,0	3,71
4	120	4,30	2,88	23,3	3,47
5	130	5,10	2,97	19,6	3,37
6	140	6,00	2,84	16,7	3,52
7	150	7,10	2,88	14,1	3,48
8	160	8,52	3,10	11,7	3,23
9	170	10,40	2,58	9,62	3,87
10	180	12,70	2,41	7,87	4,15
11	190	15,60	2,43	6,41	4,11
12	200	19,20	2,06	5,21	4,84

Таблица 3 - Продольное и крутильное смещение для момента

№	Вылет $l, \text{ мм}$	Смещение $x, 10^{-6} \text{ м}$	Закручивание $\varphi, 10^{-3} \text{ рад}$	$c_u,$ 10^3 Н·м/рад	$k_{\varphi\varphi},$ 10^6 Н·м/м
1	90	2,12	1,04	9,61	4,72
2	100	2,50	1,18	8,48	4,00
3	110	2,81	1,33	7,52	3,56
4	120	3,03	1,46	6,86	3,30
5	130	3,19	1,60	6,26	3,13
6	140	3,26	1,73	5,79	3,07
7	150	3,18	1,82	5,49	3,14
8	160	3,11	1,96	5,10	3,22
9	170	3,00	2,12	4,71	3,33
10	180	2,71	2,08	4,81	3,69
11	190	2,78	2,14	4,68	3,60
12	200	2,29	1,96	5,11	4,37

В производственных условиях эти задачи решаются штатными средствами соответствующих служб, тогда как в лабораторных условиях приходится самостоятельно компоновать диагностические системы для различных задач.

Датчики закреплены на жестких стойках неподвижно относительно суппорта станка и расположены с зазором 0,7 мм от поверхности исследуемого объекта.

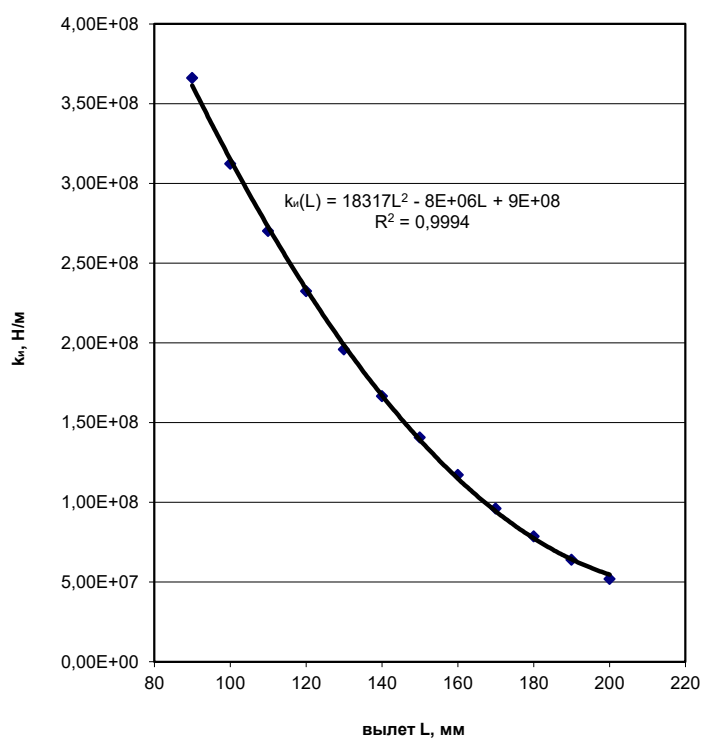


Рисунок 29 – График коэффициента осевой жесткости

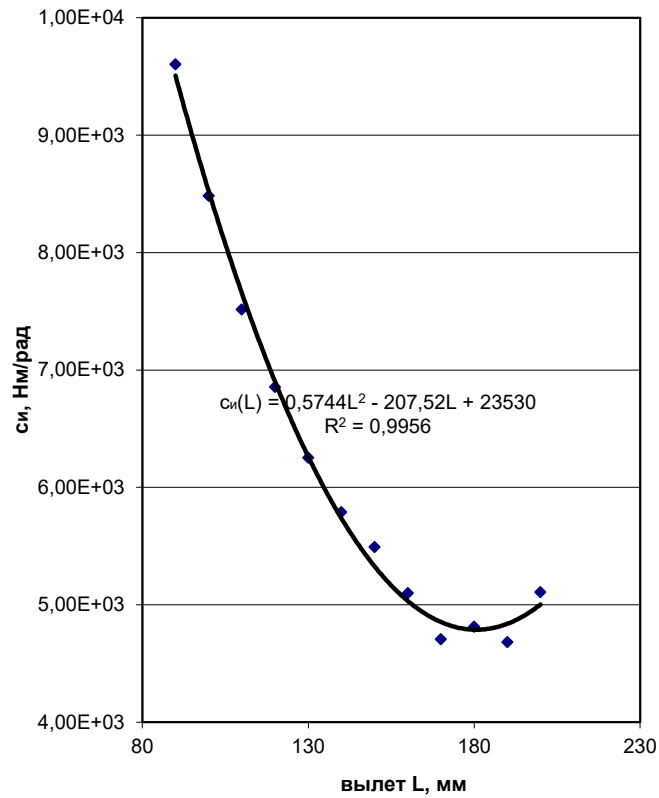


Рисунок 30 – График коэффициента тангенциальной жесткости

Бесконтактные датчики контролируют соответствующие смещения изгибные и крутильные (рисунки 31 и 32).

Соответствующие деформации по начальному положению зазора δ_0 :

$$\delta_Y = \delta_2 - \delta_0. \quad (71)$$

Тангенциальные смещения:

$$\delta\varphi \approx \frac{\delta_1 - \delta_2}{R} \text{ [рад]}, \quad (72)$$

где R – радиус скручивания, м.

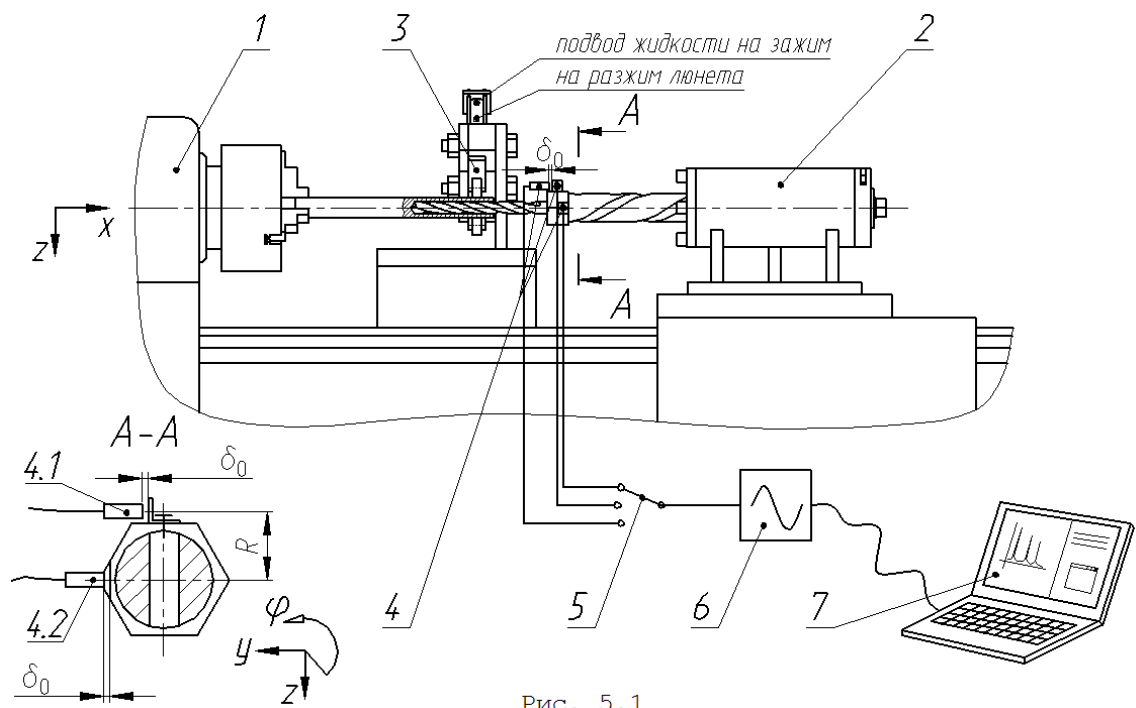


Рис. 5.1

Рисунок 31 - Схема сверления

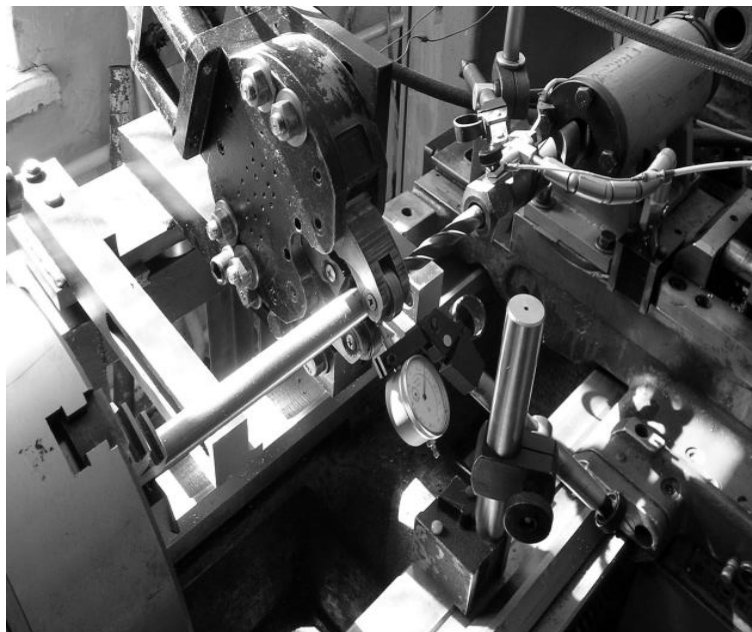


Рисунок 32 – Установка для сверления

На рисунках 33-36 показаны спектры для стандартной и вибрационной державки. Параметры вибраций определяются по сигналам датчиков с учетом их тарировочного графика (рисунок 37).

Точностные параметры обработанного отверстия измеряются относительно наружной поверхности детали с помощью приспособления на основе индикаторного нутромера и токовихревого датчика BENTLY-NEVADA, установленного с зазором 0,7 мм (рисунок 37). Такое устройство позволяет оценивать радиальное биение поверхности и записывать данные в постоянное запоминающее устройство ПК. В результате формируется текстовый файл, в котором каждому моменту времени соответствует значение разности потенциалов датчика.

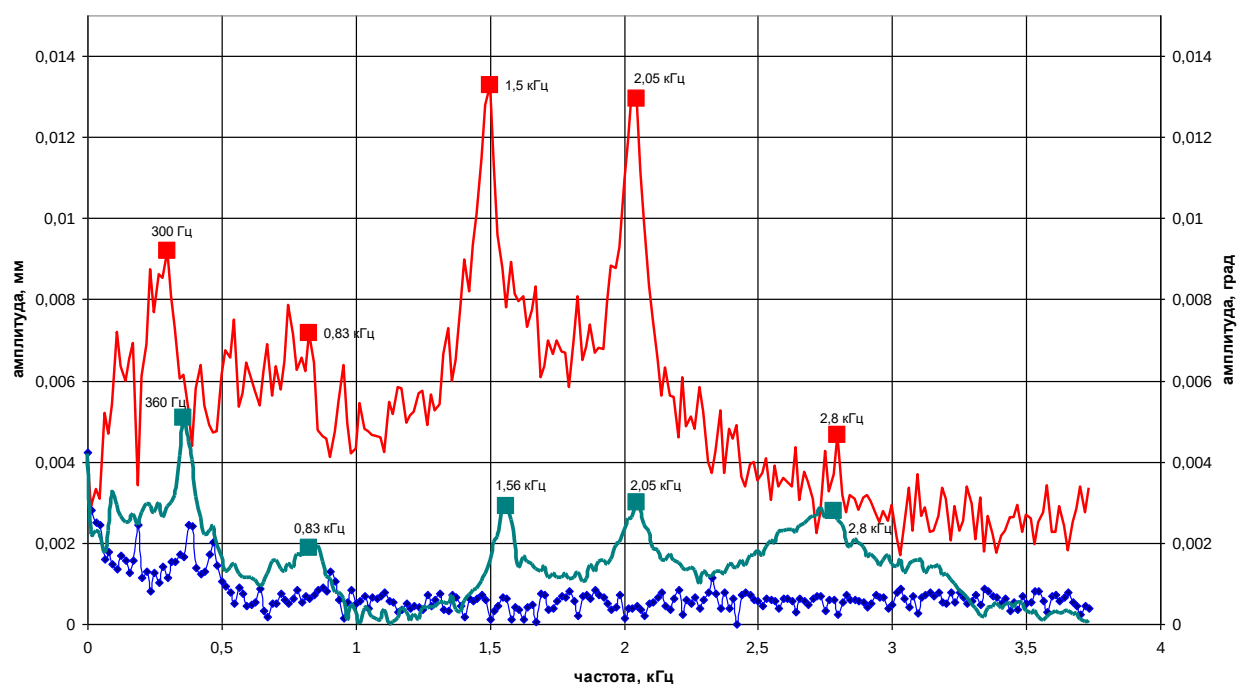


Рисунок 33 -Спектр сверла при обработке

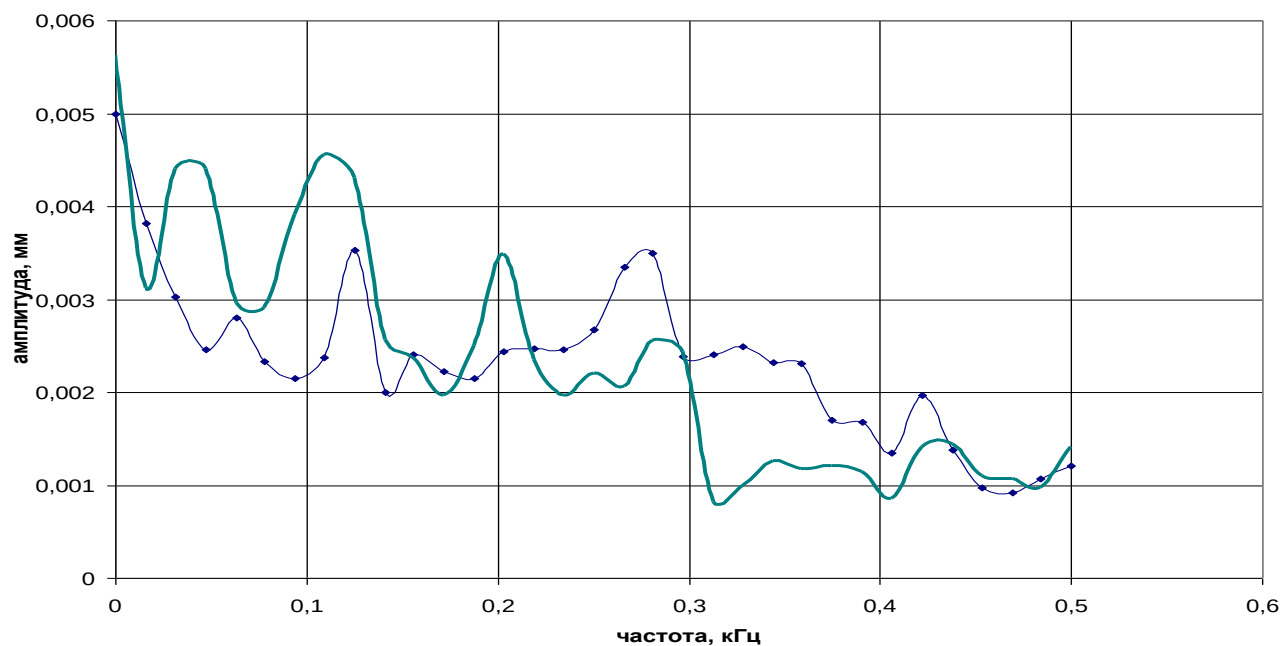


Рисунок 34 – Спектр изгибных смещений сверла (зеленая линия – обычное сверло; синяя линия - сверление в вибрациях)

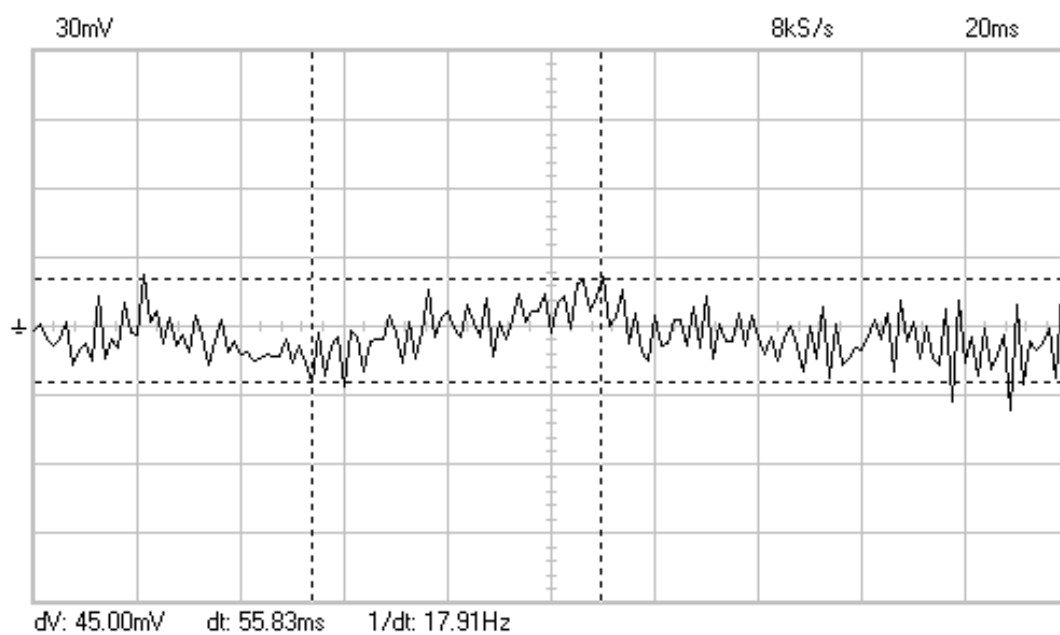


Рисунок 35 – Развертка колебаний сверла

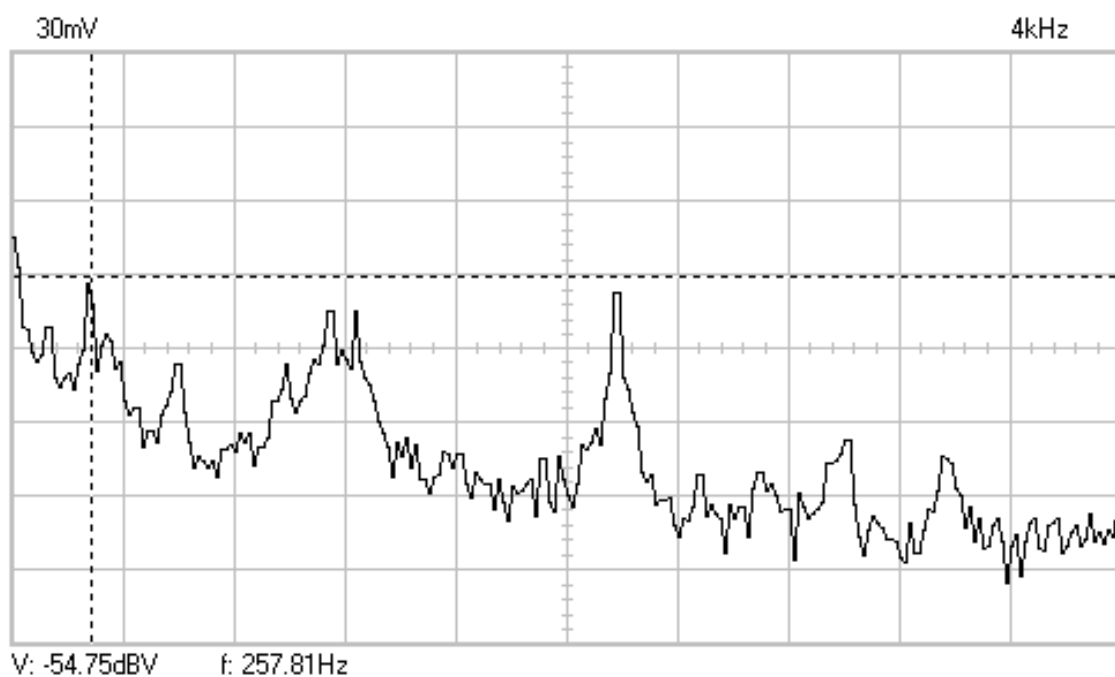


Рисунок 36 – Спектр вибраций сверла

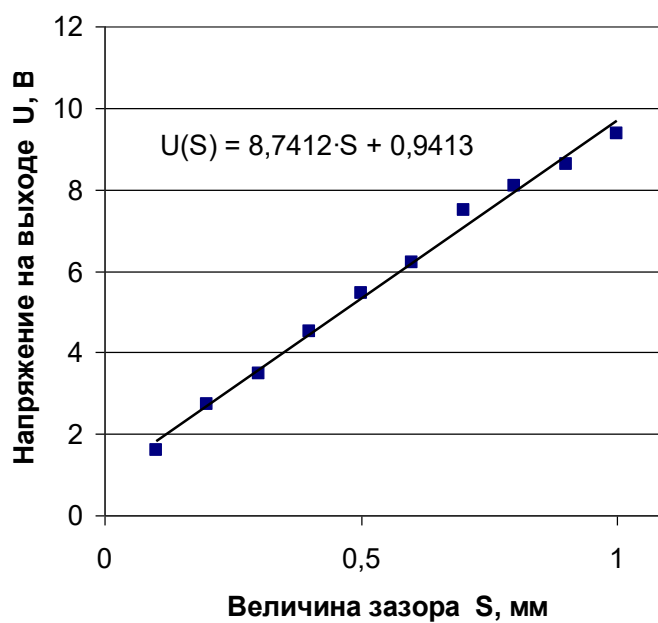


Рисунок 37 – Перевод напряжений в смещения

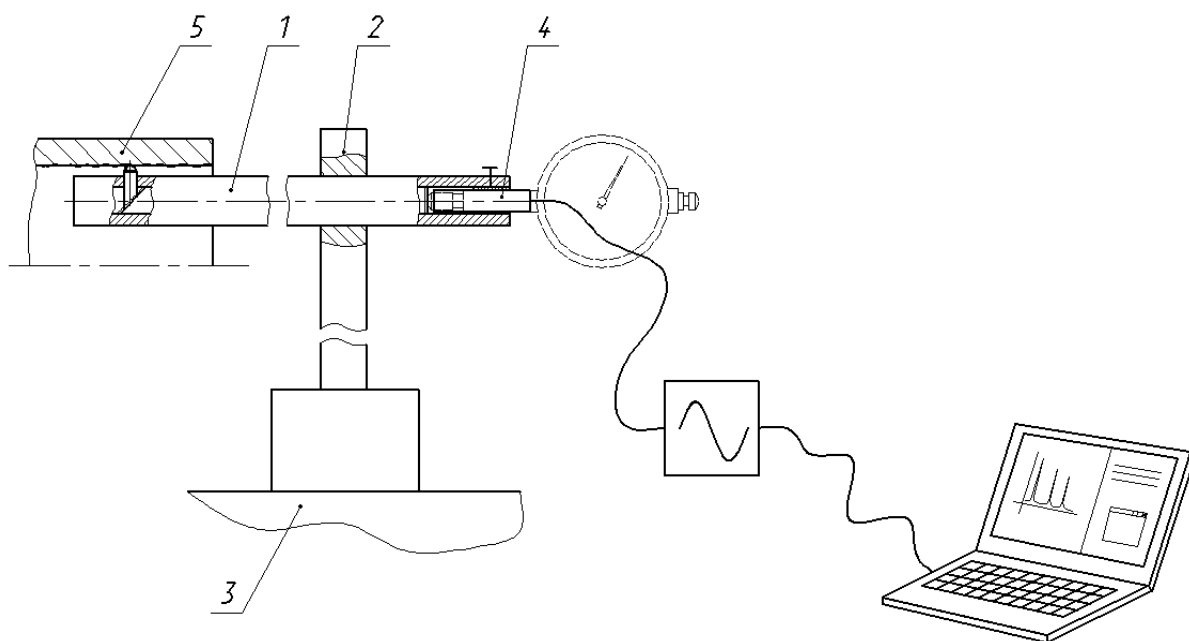


Рисунок 38 – Кругломер из бесконтактного датчика

На основе этих данных, зная частоту вращения и период обращения заготовки, можно получить 240 значений напряжения за один оборот, которые затем в программе MathCAD строятся в полярных координатах для анализа формы поперечных сечений отверстия.

4.2 Алгоритм настройки зоны резания и технологической системы

При проектировании технологической операции необходимо обеспечить частотную настройку зоны резания. Главное доминирующее возмущение стружкообразование – ламелизация. Подача S , скорость резания V , глубина резания t формируют матрицы динамической жесткости и диссипации процесса резания [25]. Ламелизация описывается как замкнутая автоколебательная система релаксационного типа, которая определяет частоты накопления f_1 и сброса f_2 напряжений, а упругая система сглаживает возмущения, как фильтр. Задача технологической настройки – обеспечить настройку инструментальной подсистемы на главную частоту или субгармоники при черновой обработке, при чистовой обработке на высшие

гармоники . Пути управления частотной настройкой зоны резания режим резания: t, S, v , геометрия инструмента. Управление собственной упругой системы осуществляется за счет изменения массы, демпфирования, и в основном жесткости волноводного преобразователя с учетом схемы установки заготовки. Частотная настройка волноводного преобразователя обеспечивает определенную форму колебаний, при которой амплитуда относительных колебаний инструмента и заготовки в нормальном к обрабатываемой поверхности направлении, стремится к минимуму. Стабильность частотного спектра при перемещении инструмента относительно заготовки отслеживается при резании с помощью метода вейвлет-анализа вибрационного сигнала [29].

Деформация радиальная

$$y = \frac{F_{CT}}{k} + \frac{F}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 / \omega_n^2)^2 + 4\nu^2 (\omega^2 / \omega_n^2)}} \sin(\omega t - \varphi), \quad (73)$$

«где F_{CT} - статическая сила резания, Н;

F - амплитуда динамической силы резания, Н;

ω - круговая частота радиальных колебаний сверла, рад/с;

β, k –коэффициенты радиального демпфирования и жесткости;

ω_n – круговая частота собственных колебаний сверла, рад/с;

$\nu = \beta/\beta_K$, где β_K - предельный коэффициент вязкого демпфирования;

φ - фазовый угол между силой резания и смещением y » [11].

Расчетная схема для сверления показана на рисунке 39. Структурная схема для системы уравнений на рисунке 40.

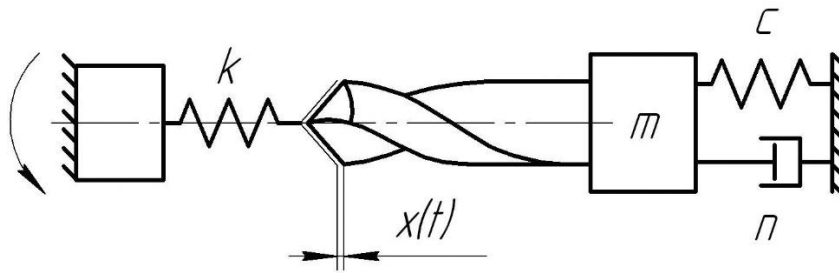


Рисунок 39 - Схема сверления

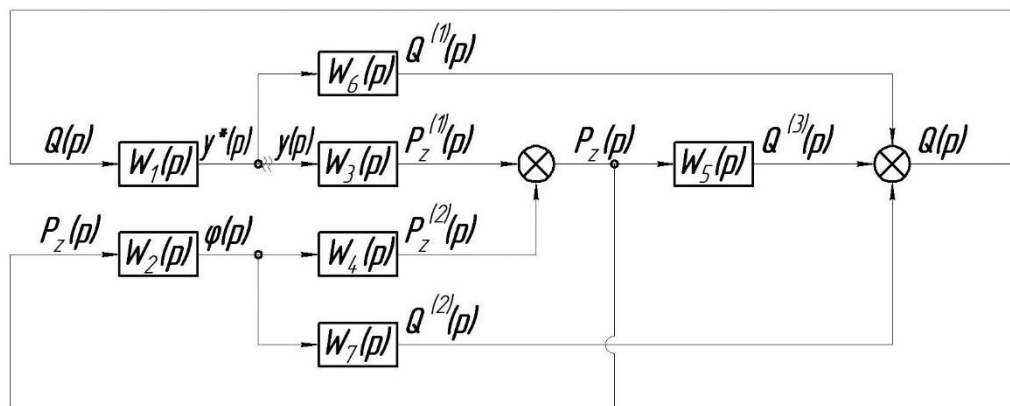


Рисунок 40 – Передаточные функции для схемы сверления

Для анализа устойчивости построена АФЧХ технологической системы обработки резанием, где двух типов инструмента. Один жесткий с небольшим вылетом. Другой не жесткий с возможностью закручивания и продольного смещения при резании (рисунок 41).

Как видно для обоих случаев обеспечивается условие устойчивости – кривые не охватывают точку -1 на оси $\text{Re}(\omega)$. При этом для способа 2 наблюдается повышение точности формы отверстия за счет снижения уровня изгибных колебаний. Данный фактор проявляется по разному при разных настройках системы и режимах резания, в первую очередь – оборотов.

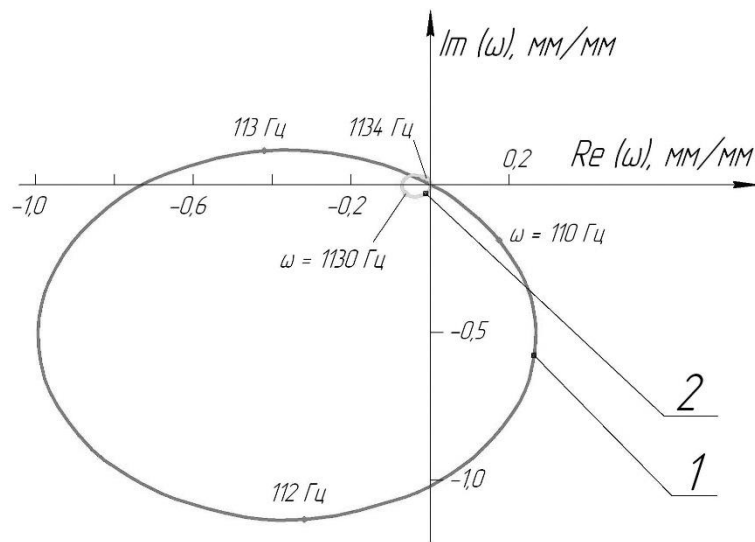


Рисунок 41 - АФЧХ для нежесткого (1) и жесткого (2) сверла

При сверлении основным настроечным параметром является диаметр сверла. При его увеличении повышается сила резания, момент резания и деформации. На диаграммах устойчивости это видно в виде областей, где наблюдается уровень вибраций выше критического порога (рисунки 42 и 43).

В основном уровень колебаний определяется соотношением возмущений при сверлении от оборотов заготовки или инструмента и собственными частотами разных форм (рисунки 44 – 47).

Если интегрировать предложенный алгоритм в виде разработанной программы с системой управления станком, можно автоматически корректировать режимы резания в реальном времени и предотвращать возникновение вибраций.

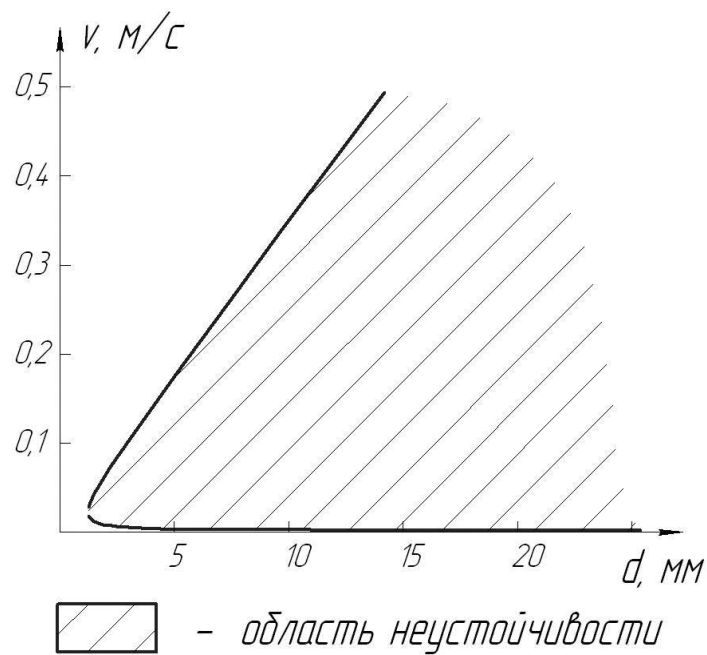


Рисунок 42 – Зона виброустойчивости по диаметру и скорости резания

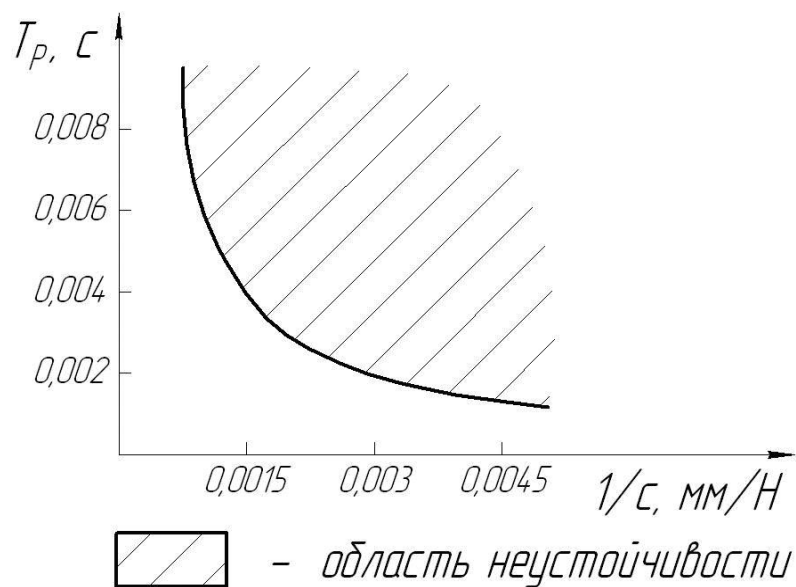


Рисунок 43 – Зона устойчивости по податливости и постоянной времени

4.3 Программный расчет устойчивости сверления

Проведем расчет виброустойчивости на основе предельных смещений для сверления на основе алгоритмизации.

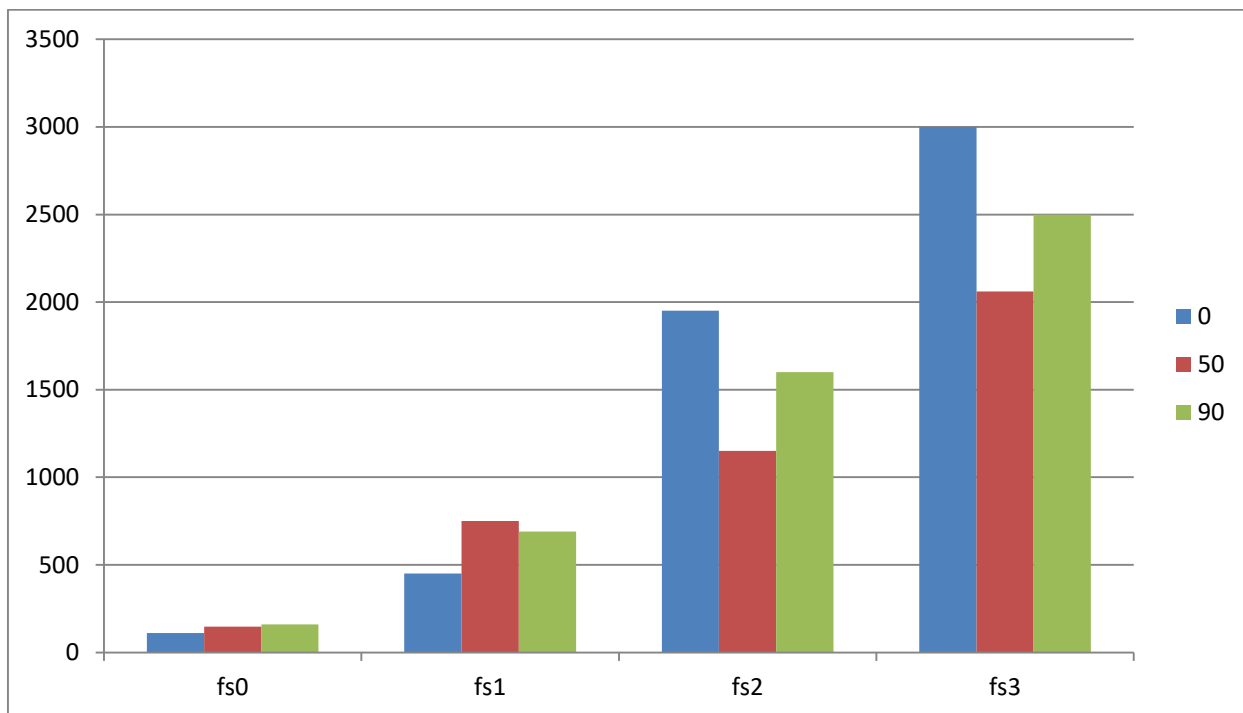


Рисунок 44 - Продольные собственные частоты сверла

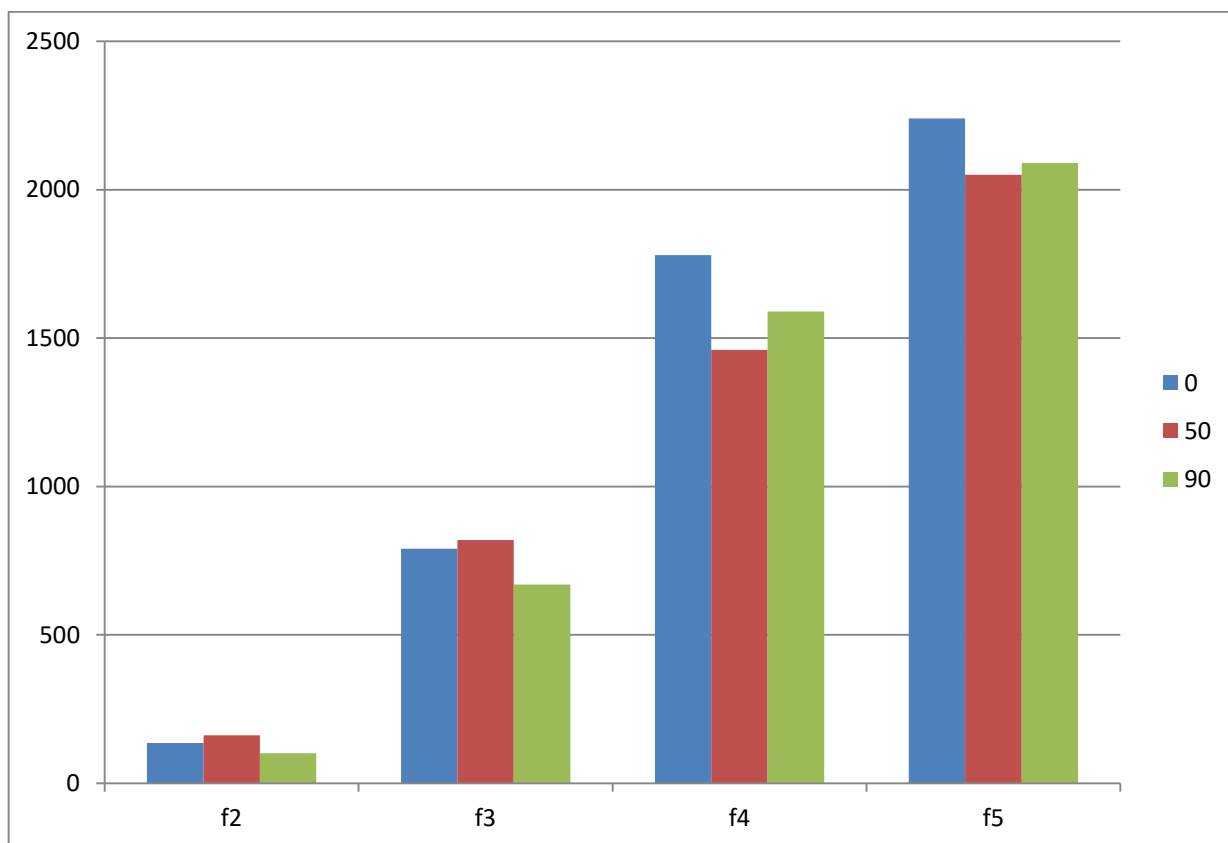


Рисунок 45 - Продольные частоты сверла

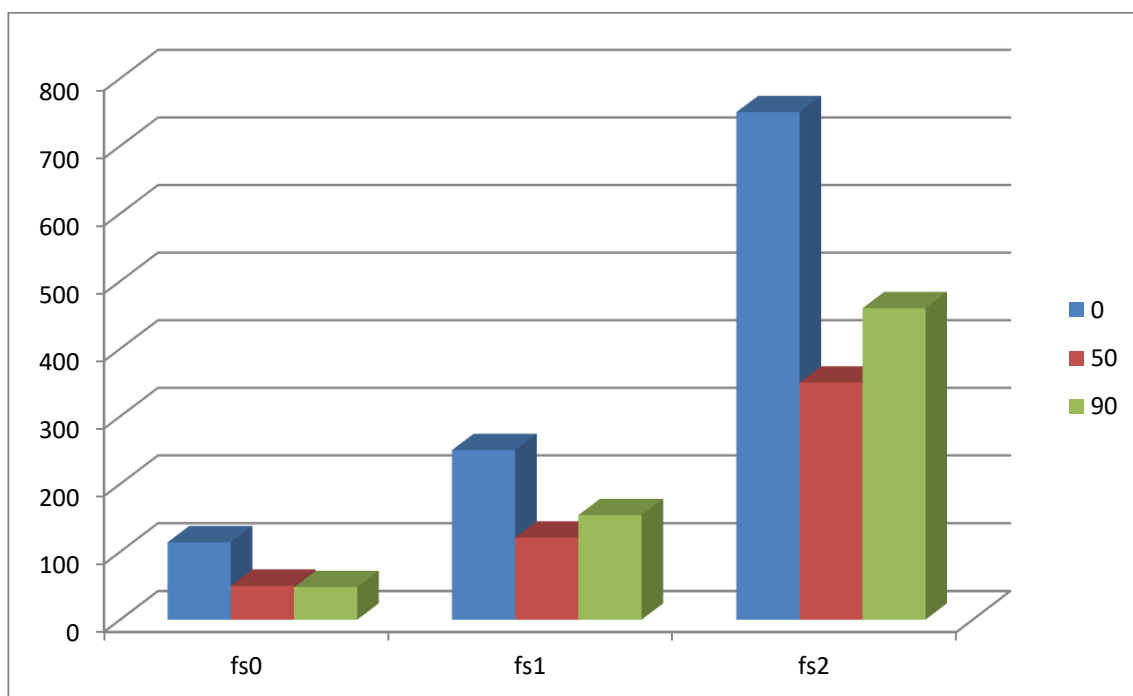


Рисунок 46 - Изгибные собственные частоты сверла

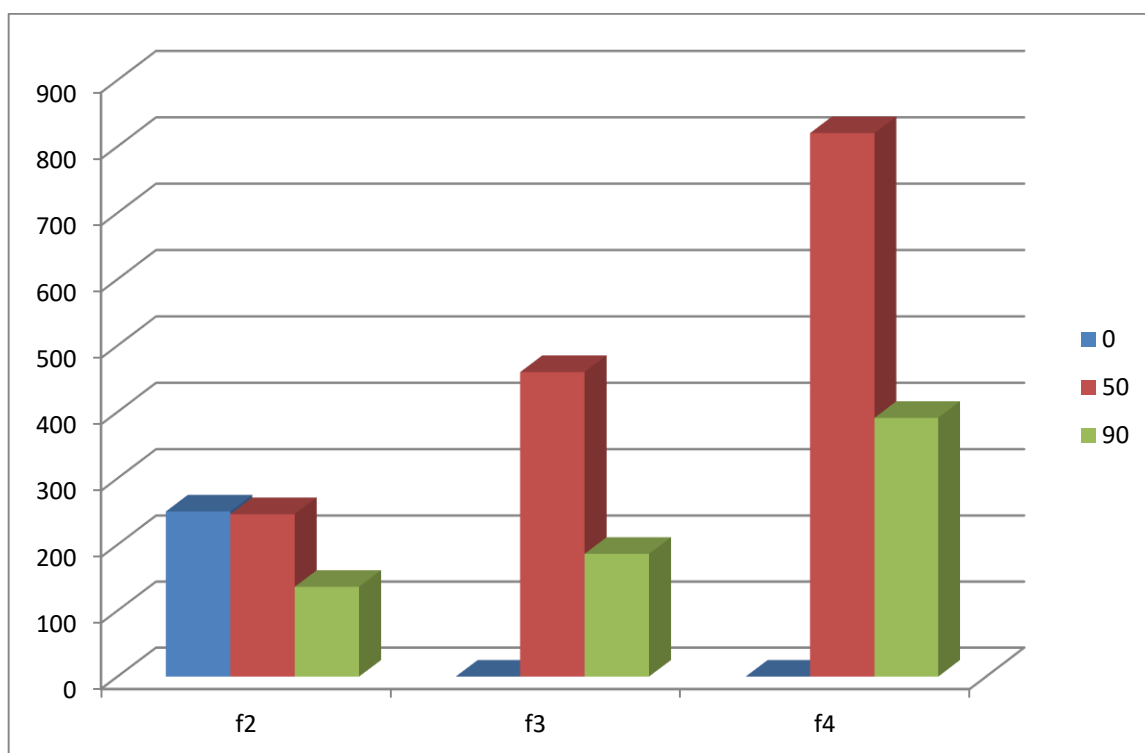


Рисунок 47 - Изгибные частоты сверла

Функция для оценки устойчивости процесса сверления и расчета амплитуды колебаний имеет набор входных аргументы по режимам обработки и конструкторским параметрам технологической системы (рисунки 48 и 49).

```
# --- Функция для расчета устойчивости сверления ---
def calculate_drilling_stability(
    n, f, J_z, c_z, k_z, J_x, c_x, k_x, m_0, m_1, K_dyn_z, K_dyn_x
):
    """
    Оценивает устойчивость сверления и рассчитывает амплитуду колебаний.

    Аргументы:
    n: Частота вращения шпинделя, об/мин.
    f: Подача на оборот, мм/об.
    J_z: Инерционность заготовки/инструмента в направлении оси Z, кг*м^2.
    c_z: Демпфирование в направлении оси Z, Н*с/м.
    k_z: Жесткость в направлении оси Z, Н/м.
    J_x: Инерционность заготовки/инструмента в направлении оси X, кг*м^2.
    c_x: Демпфирование в направлении оси X, Н*с/м.
    k_x: Жесткость в направлении оси X, Н/м.
    m_0: Параметр модели силы резания (статическая составляющая). Влияет на силу, пропорционально подаче.
    m_1: Параметр модели силы резания (динамическая составляющая). Влияет на силу, пропорционально скорости изменения подачи.
    K_dyn_z: Коэффициент динамического усиления силы резания в направлении Z. Влияет на усиление силы при колебаниях.
    K_dyn_x: Коэффициент динамического усиления силы резания в направлении X. Влияет на усиление силы при колебаниях.

    Возвращает:
    amplitude_z: Амплитуда колебаний в направлении оси Z, мм. Возвращает NaN, если система неустойчива.
    amplitude_x: Амплитуда колебаний в направлении оси X, мм. Возвращает NaN, если система неустойчива.
    stability: True - устойчиво, False - неустойчиво
    """

    omega = 2 * np.pi * n / 60 # Угловая скорость, рад/с

    # --- Расчет коэффициентов демпфирования ---
    damping_ratio_z = c_z / (2 * np.sqrt(k_z * J_z))
    damping_ratio_x = c_x / (2 * np.sqrt(k_x * J_x))

    # --- Расчет собственных частот ---
    omega_n_z = np.sqrt(k_z / J_z)
    omega_n_x = np.sqrt(k_x / J_x)
```

Рисунок 48 – Функция расчета устойчивости (начало)

```
stability = stability_z and stability_x

# --- Расчет амплитуды колебаний (упрощенная модель) ---
# Точная модель требует решения дифференциальных уравнений.
# В данном случае, используется приближенная формула.
if stability:
    # Статическая сила резания
    F_z = m_0 * f
    F_x = 0.1 * F_z #Примерная связь между силами по осям

    #Амплитуда колебаний (приблизленно, как статическое отклонение под действием силы)
    amplitude_z = F_z / k_z
    amplitude_x = F_x / k_x

    # Перевод в мм
    amplitude_z *= 1000
    amplitude_x *= 1000
else:
    amplitude_z = np.nan # Неустойчивость - амплитуда не определена
    amplitude_x = np.nan
    print("Система не устойчива")

return amplitude_z, amplitude_x, stability
```

Рисунок 49 - Функция расчета устойчивости (окончание)

По режимам обработки это n - частота вращения шпинделя (об/мин); f – подача на оборот (мм/об).

«По конструкторским параметрам это J_z , c_z , k_z - инерционность, демпфирование и жесткость системы в направлении оси Z (осевое направление); J_x , c_x , k_x - инерционность, демпфирование и жесткость системы в направлении оси X (радиальное направление)» [59].

«Для описания силы используются следующие параметры. m_0 , m_1 - статическая и динамическая составляющие силы резания; K_{dyn_z} , K_{dyn_x} - коэффициенты динамического усиления силы резания по соответствующим осям» [43].

Результатом функция возвращает набор параметров в виде амплитуды колебаний (переменная в программе `amplitude_z`) в направлении оси Z (мм). Если система неустойчива, то она возвращает NaN. Амплитуда колебаний (`amplitude_x`) в направлении оси X (мм).

Оценка устойчивости (*stability*) проводится в булевых переменных. Если система устойчива, то True, если неустойчива - False.

При расчете выполняется ряд преобразований. Функция или блок «Расчет угловой скорости» преобразует частоту вращения из об/мин в рад/с. Блок «Расчет коэффициентов демпфирования» вычисляет коэффициенты демпфирования для осей Z и X . Блок «Расчет собственных частот» определяет собственные частоты колебаний для осей Z и X .

Функция «Критерий устойчивости» использует упрощенный критерий устойчивости, основанный на сравнении коэффициента демпфирования и динамического усиления силы резания.

Функция «Расчет амплитуды колебаний» дает вывод, если система устойчива. Она рассчитывает амплитуду колебаний как статическое отклонение под действием силы резания. Для неустойчивых систем амплитуда выводится как NaN.

Функция «Plot_stability_map» имеет набор аргументов: param_x_values, param_y_values, amplitudes_z, amplitudes_x, xlabel, ylabel, title. Она строит карту устойчивости в координатах параметров режимов резания и параметров сверла.

Устанавливаем значения инерционности, демпфирования, жесткости и параметров силы резания. Задаем диапазоны значений частоты вращения и подачи, для которых будет анализироваться устойчивость.

В цикле перебираем все комбинации частоты вращения и подачи, рассчитываем амплитуду колебаний с помощью функции calculate_drilling_stability и сохраняем результаты в массивах. Далее вызываем функцию plot_stability_map для построения карты устойчивости.

В первом варианте использовалось сравнение возникающей деформации с предельным значением. Если использовать критерий устойчивости, основанный на анализе корней характеристического уравнения системы, это позволит более точно определить границы зон устойчивости.

Для еще более точной оценки необходимо учесть запаздывание смещения от силы резания, как обратную связь. Это называется регенеративный эффект, который является одной из основных причин возникновения автоколебаний при резании.

Данный алгоритм помогает определять оптимальные режимы резания (частоту вращения, подачу), обеспечивающие устойчивость и максимальную производительность (рисунки 50 – 54).

Разработанный алгоритм реализует методику оценки устойчивости процесса сверления с учетом динамических характеристик системы и построения карты устойчивости в пространстве технологических параметров. В начале работы импортируются необходимые библиотеки numpy для численных расчетов и matplotlib для построения графиков. Основная функция предназначена для вычисления устойчивости процесса сверления и амплитуды колебаний инструмента в двух ортогональных направлениях —

вдоль оси сверления (ось Z) и в поперечном направлении (ось X). На вход функции подаются параметры, характеризующие режим обработки (частота вращения и подача), а также параметры динамической модели: инерционность, коэффициенты демпфирования и жесткости по обоим осям, параметры модели силы резания, а также коэффициенты динамического усиления силы резания.

Сначала вычисляется угловая скорость вращения шпинделя. Затем определяются коэффициенты демпфирования и собственные частоты системы для обоих направлений.

Можно использовать величину смещений в координатах варьируемых параметров (рисунок 54).

Для оценки устойчивости применяется упрощенный критерий, основанный на сравнении коэффициентов демпфирования с влиянием динамического усиления силы резания.

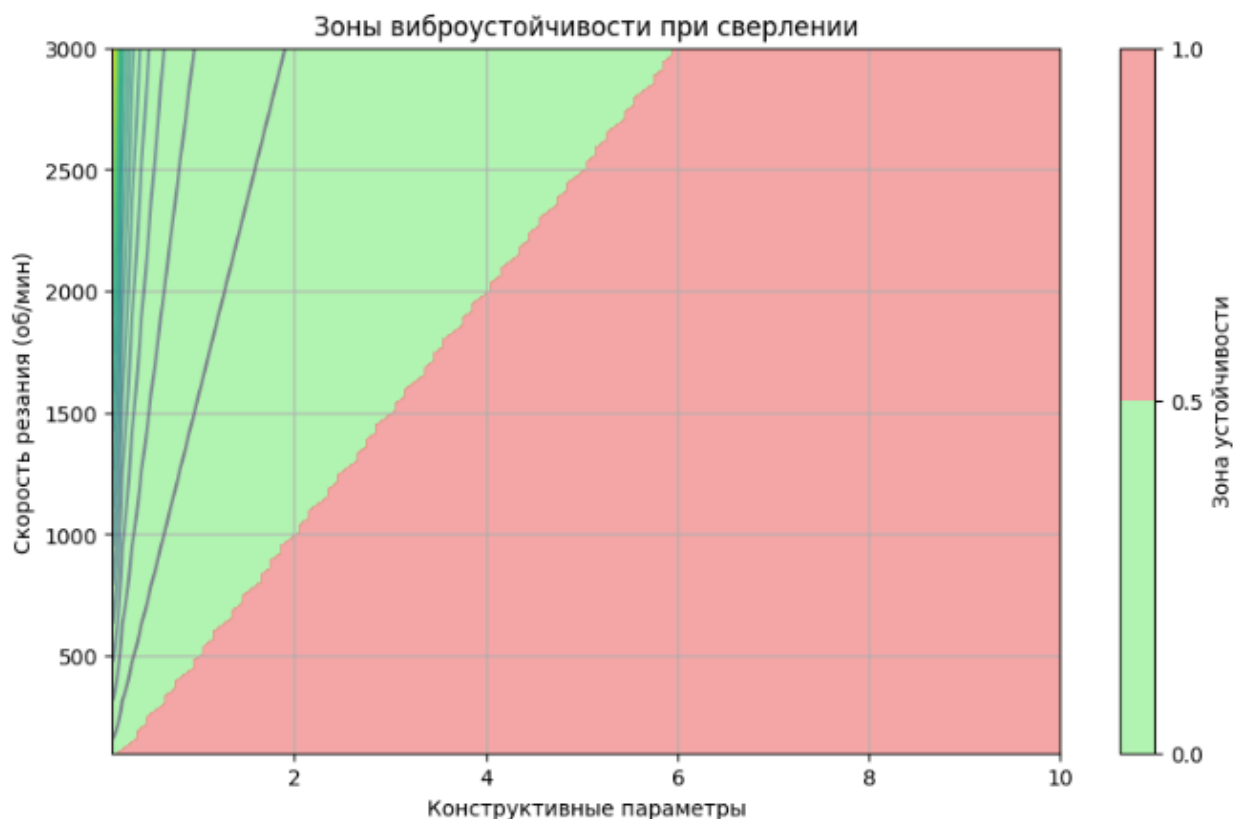


Рисунок 50 - Зоны устойчивости в координатах: режим обработки – конструктивный показатель

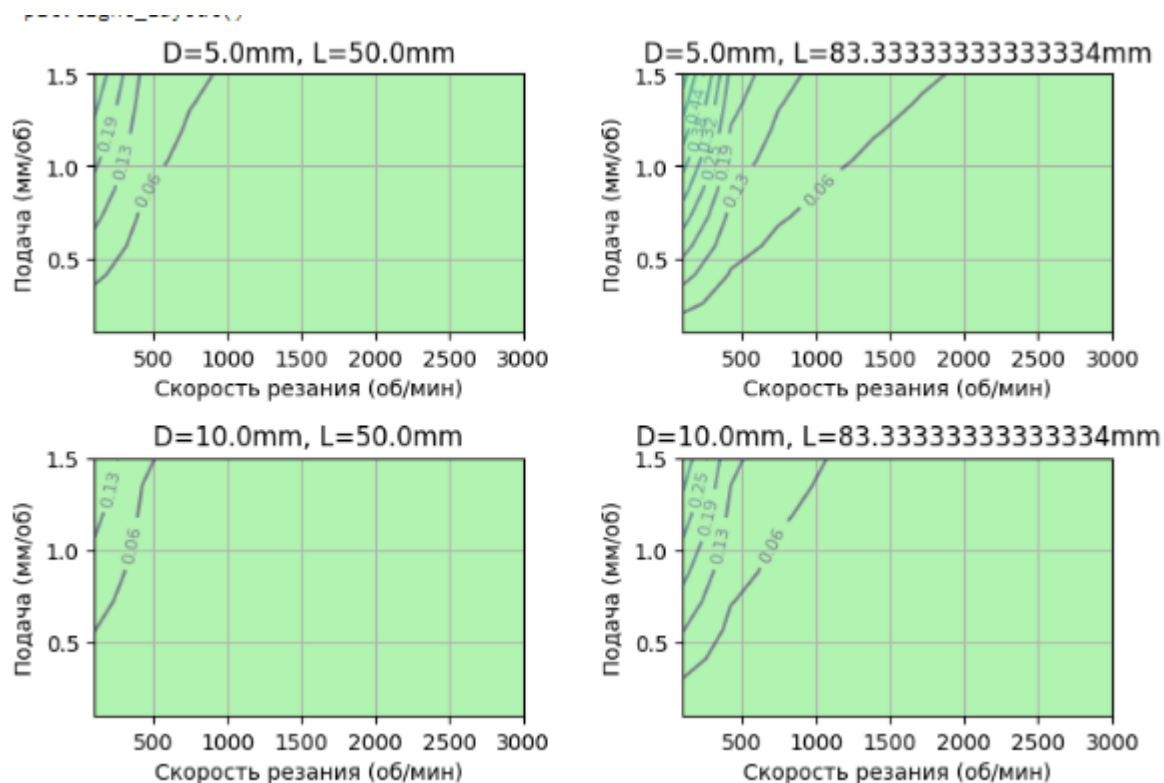


Рисунок 51 - Зоны устойчивости для вылетов 50 и 83 мм, диаметр – 5 и 10 мм

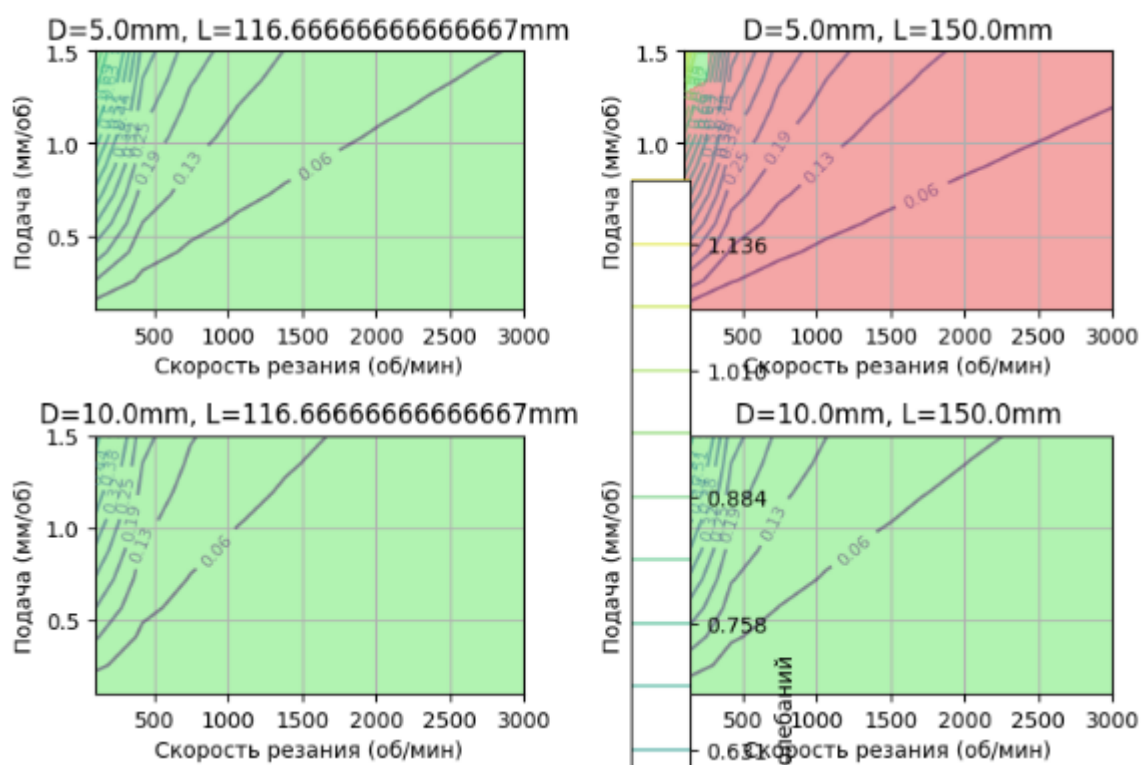


Рисунок 52 - Зоны устойчивости для вылетов 16, 150 мм, диаметр – 5, 10 мм

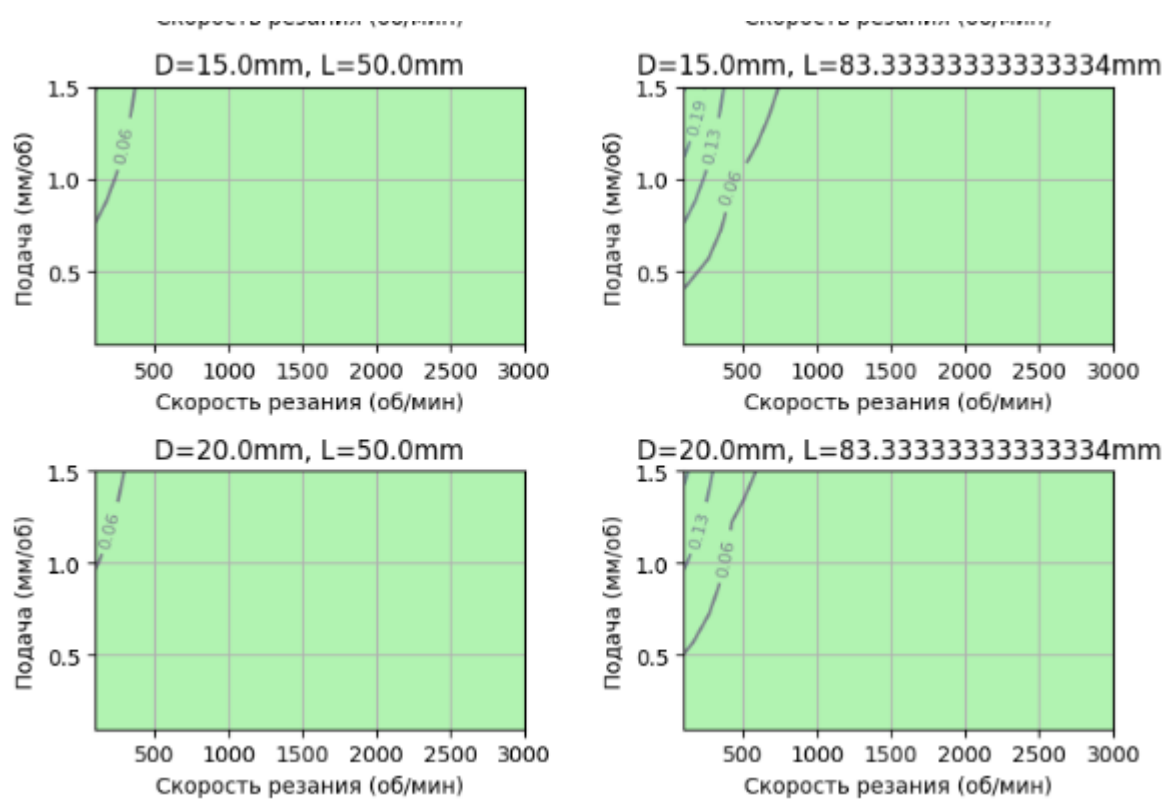


Рисунок 53 - Зоны устойчивости для вылетов 50 и 83 мм, диаметр 15 и 20 мм

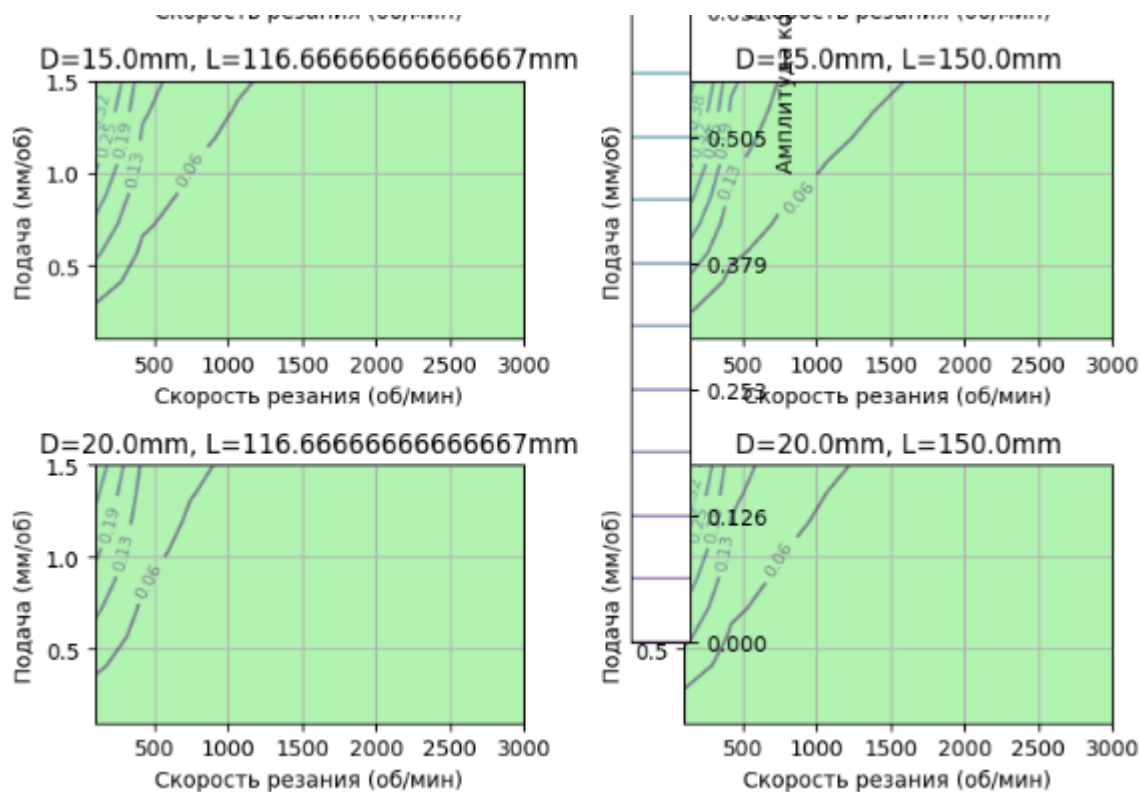


Рисунок 53 - Зоны устойчивости для вылетов 116, 150 мм, диаметр 15, 20 мм

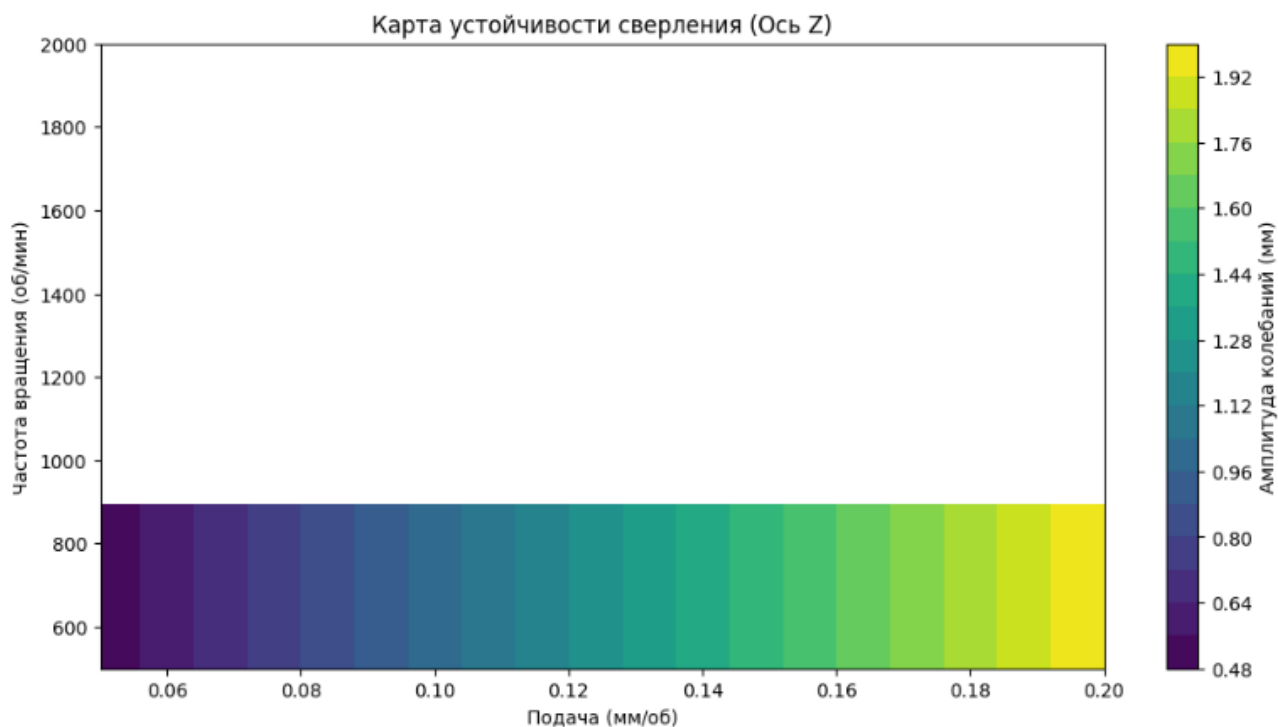


Рисунок 54 - Зоны устойчивости по амплитуде

Система считается устойчивой, если демпфирование достаточно велико по сравнению с возбуждающим воздействием от резания. Если устойчивость обеспечивается по обоим направлениям, рассчитываются амплитуды колебаний, исходя из статического отклонения под действием рассчитанных сил резания. Амплитуда колебаний определяется как отношение силы резания к жесткости системы, а затем переводится в миллиметры для удобства интерпретации. В случае, если система оказывается неустойчивой, амплитуды принимают неопределенное значение, и выводится предупреждающее сообщение.

Также представлена функция, предназначенная для визуализации полученных расчетов в виде карты устойчивости. Она принимает на вход массивы значений исследуемых параметров (например, подача и частота вращения), а также рассчитанные амплитуды колебаний для каждого сочетания параметров. На их основе строится двумерная сетка, которая затем используется для построения графических представлений карты устойчивости, позволяя визуально оценить области устойчивой и неустойчивой работы технологической системы в зависимости от выбранных параметров обработки. Такой подход позволяет комплексно анализировать поведение системы при изменении технологических и конструктивных параметров и принимать решения по оптимизации процесса сверления для повышения его устойчивости и точности.

Также реализуется расчет и визуализация устойчивости процесса сверления с акцентом на влияние конструктивных параметров инструмента (диаметра и длины сверла), а также режимов обработки (скорости резания и подачи).

Уровень неустойчивости является пороговым показателем, который определяется уровнем точности, предельными нагрузками на инструмент (рисунки 55 и 56).

На начальном этапе задаются значения динамических характеристик системы — инерционность, демпфирование и жесткость, которые в данной

модели являются постоянными для всех расчетов. Далее определяются диапазоны изменяемых параметров. Диаметр и вылет сверла варьируются в заданных пределах с четырьмя дискретными значениями для каждого, а скорость резания и подача задаются в виде линейных массивов с десятью точками в каждом. Для организации перебора всех возможных сочетаний параметров строится четырехмерная сетка с помощью функции `np.meshgrid`, благодаря чему каждый элемент массива соответствует уникальному набору значений диаметра, длины, скорости резания и подачи.

Ключевой частью алгоритма является функция для расчета амплитуды колебаний, которая реализует простую модель зависимости вибраций от всех рассматриваемых параметров. В использованной формуле амплитуда пропорциональна произведению инерционности, скорости резания и отношения диаметра к длине сверла, а в знаменателе учитывается суммарное влияние жесткости (умноженной на подачу) и демпфирования. Такой подход позволяет качественно оценить влияние увеличения диаметра или уменьшения вылета сверла на устойчивость, а также проследить, как изменение режимных параметров влияет на возникновение вибраций.

После расчета массива амплитуд для всей сетки параметров определяется зона устойчивости.

Устойчивой считается область, где амплитуда колебаний не превышает заданного порога. Визуализация результатов организована в виде массива подграфиков. Для каждой фиксированной пары диаметр–длина строится отдельный график, на котором по осям отложены скорость резания и подача, а цветом выделяются устойчивые и неустойчивые области. Поверх этого фона дополнительно наносится контурная карта с линиями равных амплитуд, что позволяет более детально анализировать распределение колебаний по параметрическому пространству.

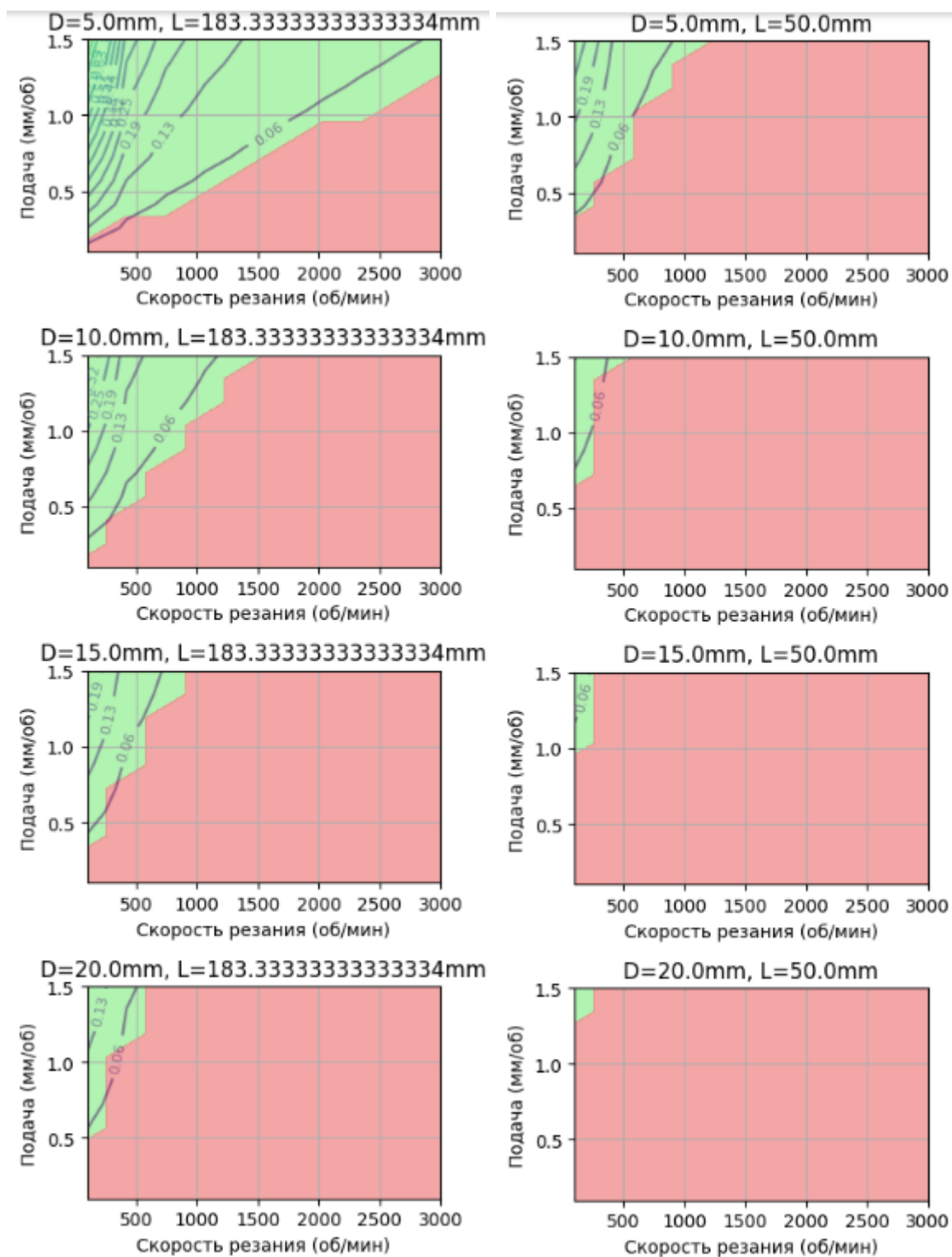


Рисунок 55 - Зоны устойчивости для вылета 183 мм и 50 мм

Для удобства восприятия на каждом подграфике указывается соответствующая комбинация диаметра и длины сверла, а также добавляются

подписи осей, сетка и цветовая шкала, отражающая значения амплитуды. Такой подход обеспечивает наглядное сравнение влияния конструктивных параметров на устойчивость процесса сверления при различных режимах обработки.

Выводы по разделу

Разработана модификация исходного алгоритма. В нем расчет производится сразу для всего набора возможных сочетаний параметров сверла и режимов обработки, а не только для одного фиксированного случая, как в предыдущем случае.

Расчет устойчивости теперь основан на простом пороговом значении амплитуды, а не на более сложных динамических критериях, и реализован в виде булевого массива для последующей визуализации. Визуализация данных организована в виде сетки подграфиков, что позволяет одновременно сравнивать различные комбинации диаметра и длины сверла, а не строить отдельные карты для каждой оси, как раньше. В целом, данный подход обеспечивает более широкий охват исследуемых параметров и наглядную иллюстрацию комплексного влияния как режимных, так и конструктивных факторов на устойчивость процесса сверления.

Заключение

Актуальность данной магистерской диссертации обоснована возрастающими требованиями к качеству и эффективности процессов механической обработки, в частности сверления. В условиях современного производства особое внимание уделяется оптимизации параметров обработки, что подразумевает необходимость анализа динамики процесса резания. Способы управления динамикой сверления существенно влияют на уровень производительности и точность отверстий.

Основной целью данной работы было совершенствование сверлильной операции путем анализа динамики процесса резания с применением различных методов моделирования и исследования влияния различных конструкторско-технологических факторов на уровень колебаний при резании, а через них на точность и качество обработанной поверхности. Для достижения данной цели были поставлены и успешно решены следующие задачи: моделирование динамики механической обработки, исследование влияния автоколебаний на процесс резания, анализ смещений при механической обработке, а также частотный анализ инструментальной подсистемы.

Научная новизна работы заключается в разработке нового подхода к моделированию динамических характеристик процессов сверления с учетом различных факторов, влияющих на процесс резания, таких как коэффициент диаметр и вылет сверла и пороговые значения для определения границы вибрационной обработки. Практическое применение полученных результатов позволит на этапе проектирования технологических процессов более точно предсказывать поведение системы, а значит, оптимизировать параметры сверлильной операции.

Результаты, полученные в ходе выполнения данной диссертации, дают возможность повышения точности и производительности машиностроительных производств.

Список используемой литературы и источников

1. Абакумов А.М. Идентификация технологических процессов механической обработки на металлорежущих станках/ А.М. Абакумов, В.П. Курган, В.Н. Михелькевич. – Самарский политехнический ин-т., 1991. – 118 с.
2. Васин С.А. Прогнозирование виброустойчивости при точении и фрезеровании/ С.А. Васин. – Серия «Библиотека инструментальщика». – М.:Машиностроение, 2006.– 384 с.
3. Вейц В.Л. Моделирование процесса стружкообразования при лезвийной обработке/ В.Л. Вейц, В.В. Максаров // СТИН. – 2002. - №4. - С.3-7.
4. Драчев О.И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей/ О.И. Драчев.- М.: Политехника, 2005. – 289 с.
5. Драчев О.И. Диагностика и управление процессом термосиловой обработки/ О.И. Драчев // Межд.научно–практическая конференция «Инновация–2008».Ташкент.–2008. – С.107–108.
6. Заковоротный В.Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход/ В.Л. Заковоротный, М.Б. Флек– Ростов-на-Дону: «Терра»-2006.- 876 с.
7. Заковоротный В.Л. Построение информационной модели динамической системы металлорежущего станка для диагностики процесса резания/ В.Л. Заковоротный, И.В. Ладник // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. - №4.- С.14-25.
8. Исследование динамики токарной обработки осесимметричных деталей/ Д.А. Расторгуев [и др.] // Конструкторско–технологические аспекты информатики в промышленности, т. II, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin, 2009, С.17–29.

9. Исследование динамической системы токарной обработки нежестких валов/ Д.А. Расторгуев [и др.] // Прогресивні технології системи машинобудування Міжнародний зб. наукових праць.–Донецьк: ДонНТУ, 2009. Вип. 38.– С. 83-86.
10. Кабалдин Ю.Г. Механизмы деформации срезаемого слоя и стружкообразования при резании / Ю.Г. Кабалдин // Вестник машиностроения. - 1993. - № 7. - С.25–30.
11. Кабалдин Ю.Г. Солитонный механизм возмущения вибраций в технологических самоорганизующихся системах обработки резанием/ Ю.Г. Кабалдин// Вестник машиностроения. – 2000. - №3.- С.31-37.
12. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB/ Ю. Лазарев.- СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.
13. Малинецкий Г.Г. Нелинейная динамика: подходы, результаты, надежды/ Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов, А.В. Подлазов. – М.: КомКнига, 2006. – 280 с.
14. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов/ Г.Я. Пановко– М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006.– 176 с.
15. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов/ Г.Я. Пановко– М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006.– 176 с.
16. Патент РФ №2169058, кл. В 23 В 29/00. Устройство для обработки глубоких отверстий, 2001.
17. Патент РФ №2292990, кл. В23В27/00. Резец для вибрационного резания, 2007
18. Патент РФ №2355546, кл. В23Р25/00, Устройство для вибрационной обработки 2008.
19. Патент РФ №2381281, кл. С21D8/00, С21D9/28, Устройство для термосиловой обработки 2010.

20. Патент РФ №2381282, кл. C21D8/00, C21D9/28, Устройство для термосиловой обработки 2010.
21. Подураев В.Н. Динамическая модель элементов технологической системы с учетом кинематической неустойчивости процесса резания/ В.Н. Подураев, В.И. Малыгин, Л.В. Кремлева // Вест. машиностроения. - 1996. – № 6. – С.18–23.
22. Расторгуев Д. А. Обоснование выбора параметров технологической системы для сверления отверстий// Д.А. Расторгуев, О.И. Драчев / Металлообработка. – 2008, №1;
23. Расторгуев Д.А. Моделирование процесса фрезерования концевыми фрезами/Д.А. Расторгуев, А.А. Царев // Самара. Изв. Самарского науч. центра РАН, выпуск 7.–2008. - С.178–183
24. Расторгуев Д.А. Обоснование выбора параметров технологической системы для сверления отверстий/ Д.А. Расторгуев, А.О. Драчев// Металлообработка. – 2008- №1.- С.2-6.
25. Расторгуев Д.А. Повышение эффективности вибрационной обработки глубоких отверстий/ О.И. Драчев, Д.А. Расторгуев, Д.Е. Салабаев // Металлообработка.– 2006. – №2. – С. 2 – 5.
26. Расторгуев Д.А. Построение и анализ математической модели технологической системы процесса сверления/ Д.А. Расторгуев, О.И. Драчев, Д.Е. Салабаев. // Металлообработка. – 2007. – №4. – С. 2-6.
27. Расторгуев Д.А. Частотный анализ подсистемы деталь-опоры при обработке маложестких деталей./ Д.А. Расторгуев, А.О. Драчев // Справочник. Инженерный журнал. - 2008- №10. – С.8-13
28. Синергетический синтез управления динамикой металлорежущих станков с учетом эволюции связей / Заковоротный В.Л. [и др.].- Ростов н/д: издательский центр ДГТУ, 2008. - 324 с.
29. Способ вибрационной обработки длинномерных валов/ Д.А. Расторгуев [и др.] // Конструкторско–технологические аспекты информатики

в промышленности, т. I, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin, 2009. - С.61–69.

30. Эльясберг М.Е. Повышение устойчивости автоколебательной системы станка при воздействии периодического низкочастотного изменения скорости резания / М.Е. Эльясберг // СТИН. –1989. - №10. - С. 19-21; №11 . - С. 6-8

31. Эльясберг М.Е. Способ структурного повышения виброустойчивости станка при резании / М.Е. Эльясберг // СТИН. – 1983. - №4. – С.3-7.

32. Draczow O. Sterowanie ukladem dynamicznym obrobki czesci osiowosymetrycznych o malej sztywnosci. Pol. Automatyka. Robotyka. Miesicznik naukowo–techniczny, № 2/2009, Warszawa 2009, s. 224 –227.

33. Vibratory processing of rotators / D. Rastorguev [et al.] //Acta Mechanica Slovaca, Journal published by Faculty of Mechanical Engineering, The Technical University in Kosice, Kosice/ - 2007. – vol. 4. - Rocnik 11.

34. Kamat Pooja Data-driven bearing fault detection using hybrid autoencoder-LSTM deep learning approach / Pooja Kamat [et al.] // International Journal of Modelling, Identification and Control. №38. – 2021, doi: 88. 10.1504/IJMIC.2021.122471.

35. Kamat Pooja Tool Wear Prediction in Milling-A Comparative Analysis Based on Machine Learning and Deep Learning Approaches / Pooja Kamat [et al.] // International Journal of Computing and Digital Systems. 2022. doi:151-165. 10.12785/ijcds/110112.

36. Yang Qian Hybrid data-driven and model-informed online tool wear detection in milling machines / Yang Qian [et al.] // Journal of Manufacturing Systems. №63. – 2022, doi:329-343. 10.1016/j.jmsy.2022.04.001.