

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛЕВИТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ: ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Бохонский А.И., Пашков Е.В. (СевНТУ, Севастополь, Украина)

Oscillatory processes and stability of movement of system "tool - detail" are analyzed at free processing thin-walled cylindrical preparations. Stability of static position of balance and movement of system "cutter - detail" is investigated. Mathematical models of free processing of thin-walled cylindrical details and disks are developed; management technical decisions of processing are given.

Анализируются колебательные процессы и устойчивость движения системы «инструмент - деталь» при левитационном точении тонкостенных цилиндрических заготовок и дисков. Исследована устойчивость квазистатического положения равновесия системы «резец - деталь». Разработаны математические модели левитационного точения тонкостенных цилиндрических деталей и дисков, даны технические решения управления процессом обработки.

Задачам моделирования динамики тонкостенных цилиндрических деталей при левитационном точении посвящены работы [1-4] и другие.

Оценка статической устойчивости процесса. Исследована одна из возможных наиболее простых форм потери устойчивости системы «резец - деталь», реализующейся в произвольный момент времени около исходного квазистатического положения равновесия в процессе обработки. Для системы «резец - деталь» в упругой среде оценка устойчивости положения равновесия основана на теореме Лагранжа-Дирихле. Найдено условие, при выполнении которого система статически устойчива относительно исходного положения равновесия.

Оценка устойчивости движения. Для составления дифференциальных уравнений движения системы (около положения статического равновесия) использовались уравнения Лагранжа второго ряда. В качестве обобщенных координат приняты: x - горизонтальное смещение резца, φ - угол поворота обрабатываемой заготовки. Система линейных дифференциальных уравнений движения составлена с учетом упругой воздушной среды и линейно-вязкого сопротивления:

$$\begin{aligned} & \left[(m_p + m_3)R - m_3R(\beta - \varphi)^2 \right] \ddot{x} + c_1Rx + k_1R\dot{x} - m_3R^2\dot{\varphi}^2 - c_2\varphi(\beta - \varphi) - k_2\dot{\varphi}(\beta - \varphi) = 0, \\ & \left[m_3^2R^2(\beta - \varphi^2) - m_3(m_3 + m_p)R \right] \ddot{\varphi} + \beta Rm_3c_1x - c_1m_3R\varphi + k_1m_3R\beta\dot{x} - k_1m_3R\varphi_1\dot{x} - \\ & m_3^2R^2\beta\dot{\varphi}^2 + m_3^2R^2\varphi\dot{\varphi}^2 - c_2(m_3 + m_p)\varphi - k_2(m_3 + m_p)\dot{\varphi} = 0. \end{aligned}$$

Характеристическое уравнение линеаризованной системы:

$$(p^2 + a_2p + a_1)(p^2 - a_6p + a^5) - (a_3 + a_4p)(a_7 + a_8p) = 0.$$

Корни уравнения найдены в MathCad (функция polyroots). Возможны случаи, когда вещественные части корней равны нулю; поэтому теорема Ляпунова об устойчивости по первому приближению не применима. Хотя среди корней линеаризованной системы появляются корни с положительной вещественной частью, но при этом, как показывает численный эксперимент в MathCad, исходная нелинейная система устойчива.

Согласно теореме Ляпунова об устойчивости по первому приближению следует, что невозмущенное движение асимптотически устойчиво независимо от членов выше первого порядка малости, так как вещественные части всех корней характеристического уравнения отрицательны.

В математической модели динамической подсистемы «инструмент – деталь» при автоматическом левитационном точении, представляющей собой систему существенно нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, учтена динамическая характеристика трения, деформации заготовки, изменение массы и жесткости обрабатываемой заготовки в связи со снятием припуска. Главной целью исследований является учет влияния нелинейной характеристики трения на динамику левитационного точения тонкостенных цилиндрических заготовок.

Обобщенная характеристика трения задана в виде момента сил трения как функции относительной угловой скорости. Характеристика взаимодействия резца с деталью представлена в виде разложения в степенной ряд в окрестности установившегося вращательного движения.

Наибольшие трудности возникают при необходимости учета деформаций цилиндрической заготовки в процессе квазибесконтактного левитационного точения. Предполагается, что упругие перемещения стенки заготовки, вызванные ее деформацией, весьма малы по сравнению с общими перемещениями заготовки как твердого тела. Выполнено численное интегрирование системы нелинейных уравнений при варьировании в широких пределах начальных условий. При малом изменении массы заготовки, что характерно, например, для чистового точения тонкостенных деталей, параметрические колебания не существенны, и их можно не учитывать.

При левитационном точении, в случае учета в математических моделях характеристик трения, наблюдаются устойчивые и неустойчивые автоколебания, причем состояние системы непосредственно зависит от параметров характеристик трения и угловой скорости вращения обрабатываемой заготовки. В результате численного эксперимента находится такое значение угловой скорости, при котором в данной модели наблюдается по существу мгновенная и внезапная потеря динамической устойчивости.

Построены фазовые портреты устойчивых движений соответственно резца и детали: имеет место устойчивый центр и предельный цикл. Найдены критические угловые частоты вращения заготовки и определены условия, при которых наблюдается устойчивый режим точения. Запас динамической устойчивости может быть создан за счет выбора угловой скорости вращения детали и давления воздуха, от которого зависит внешнее трение.

В левитационном точении важно прежде всего обеспечить статическую устойчивость положения равновесия, которая предполагает наличие постоянного контакта резца с деталью и малые угловые перемещения детали и резца, обусловленные поворотом детали как твердого тела относительно точки контакта с резцом.

Динамика диска при левитационном точении. Схема точения диска в условиях левитации изображена на рис. 1. Система нелинейных дифференциальных уравнений динамики жесткого диска, составленная на основании теорем об изменении моментов количества движения диска при его вращении вокруг оси y и вокруг оси z , имеет вид:

$$J_y \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -M_y(\omega - \dot{\varphi}) - C_1\varphi - k_1 \frac{d\varphi}{dt} + M_b, \quad J_z \frac{d^2\alpha}{dt^2} = P_y a \cos \alpha - C_2\alpha - k_2 \frac{d\alpha}{dt},$$

где $J_y = \frac{1}{2}mr^2 \cos^2 \alpha + \frac{1}{4}mr^2 \sin^2 \alpha$ – физический момент инерции диска, образующего в произвольный момент времени угол α с осью y , m – масса диска; r – радиус диска; φ , $\dot{\varphi}$ – угол поворота и угловая скорость диска по отношению к установившемуся вращательному движению относительно оси y ; $M_y(\omega - \dot{\varphi})$ – обобщенная характери-

стика взаимодействия резца с деталью, которая используется в виде разложения в степенной ряд в окрестности установившегося вращательного движения:

$$M_y(\omega - \dot{\varphi}) = P_z a \cos \alpha - R'_{oz}(\omega - \dot{\varphi})a^2 \cos^2 \alpha + \frac{1}{2}R''_{oz}(\omega - \dot{\varphi})^2 a^3 \cos^3 \alpha - \frac{1}{6}R'''_{oz}(\omega - \dot{\varphi})^3 a^4 \cos^4 \alpha + \dots,$$

где $R'_{oz}, R''_{oz}, R'''_{oz}$ – константы; ω – задаваемая угловая скорость вращения диска при тчении; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, которая вычисляется как $P_z = \tau_p k_z a_1 b_1$, τ_p – касательное напряжение в условной плоскости сдвига материала обрабатываемой заготовки; k_z – безразмерный коэффициент стружкообразования; a_1, b_1 – толщина и ширина среза; C_1, C_2 – коэффициенты жесткости при вращении диска в упругом воздушном пространстве; k_1, k_2 – коэффициенты линейно-вязкого сопротивления среды; M_b – внешний вращающий момент; $J_z = \frac{mr^2}{4}$ – физический момент инерции диска относительно оси z , лежащей в плоскости диска. Обобщенная силовая характеристика взаимодействия режущего инструмента и диска в направлении оси y записывается так:

$$P_y = P_y^* - R'_{oy}(\omega - \dot{\varphi})a \cos \alpha + \frac{1}{2}R''_{oy}(\omega - \dot{\varphi})^2 a^2 \cos^2 \alpha - \frac{1}{6}R'''_{oy}(\omega - \dot{\varphi})^3 a^3 \cos^3 \alpha + \dots$$

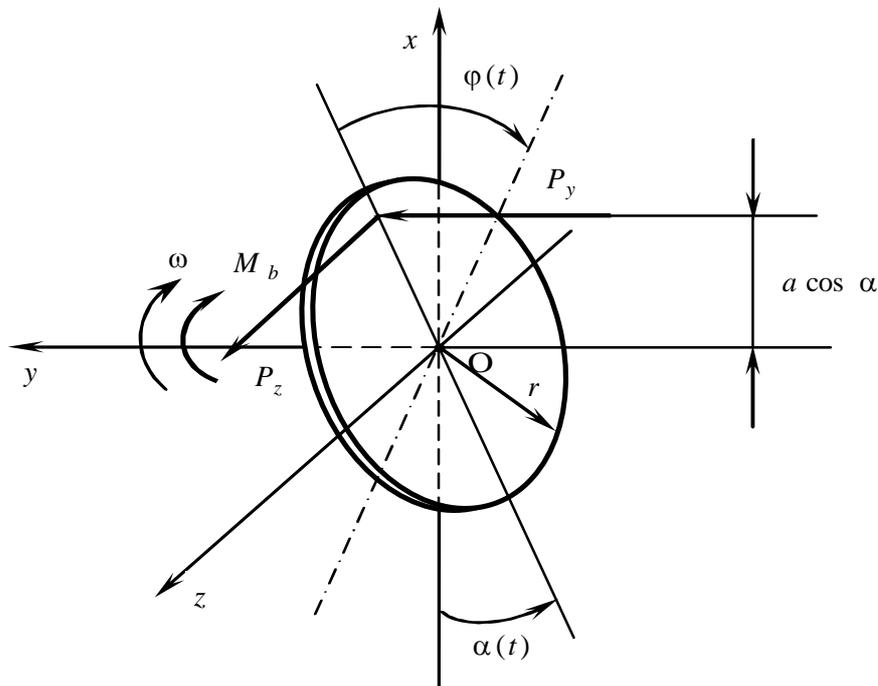


Рис. 1. Схема левитационной обработки диска

Численный анализ динамического поведения диска около установившегося положения равновесия при левитационном тчении выполнен с использованием метода Рунге-Кутта (решение нелинейной системы уравнений в Mathcad).

Для бесконтактного базирования нежестких деталей типа « диск » предназначено устройство, изображенное на рис. 2.

Устройство выполнено на базе корпуса, содержащего фланец 7 для закрепления на технологическом оборудовании и планшайбу 10 с кольцевыми концентрическими канавками 4, в которых размещены кольцевые шихтованные зубчатые магнитопроводы 6 с полюсными наконечниками 9, Г-образные сердечники 11 с полюсными наконечниками 14 с фазными (например, трехфазными) катушками 8 и 13, соответственно.

Закрепление кольцевых магнитопроводов и сердечников в кольцевых канавках осуществляется с помощью держателей 5 в виде секторов, снабженных карманами 2 на поверхностях, обращенных к торцевой поверхности обрабатываемого диска 1 и соединенных каналами 3 с вакуум-насосом (на рис. 2 не показан). Защита катушек от несанкционированного воздействия осуществляется с помощью крышки 12.

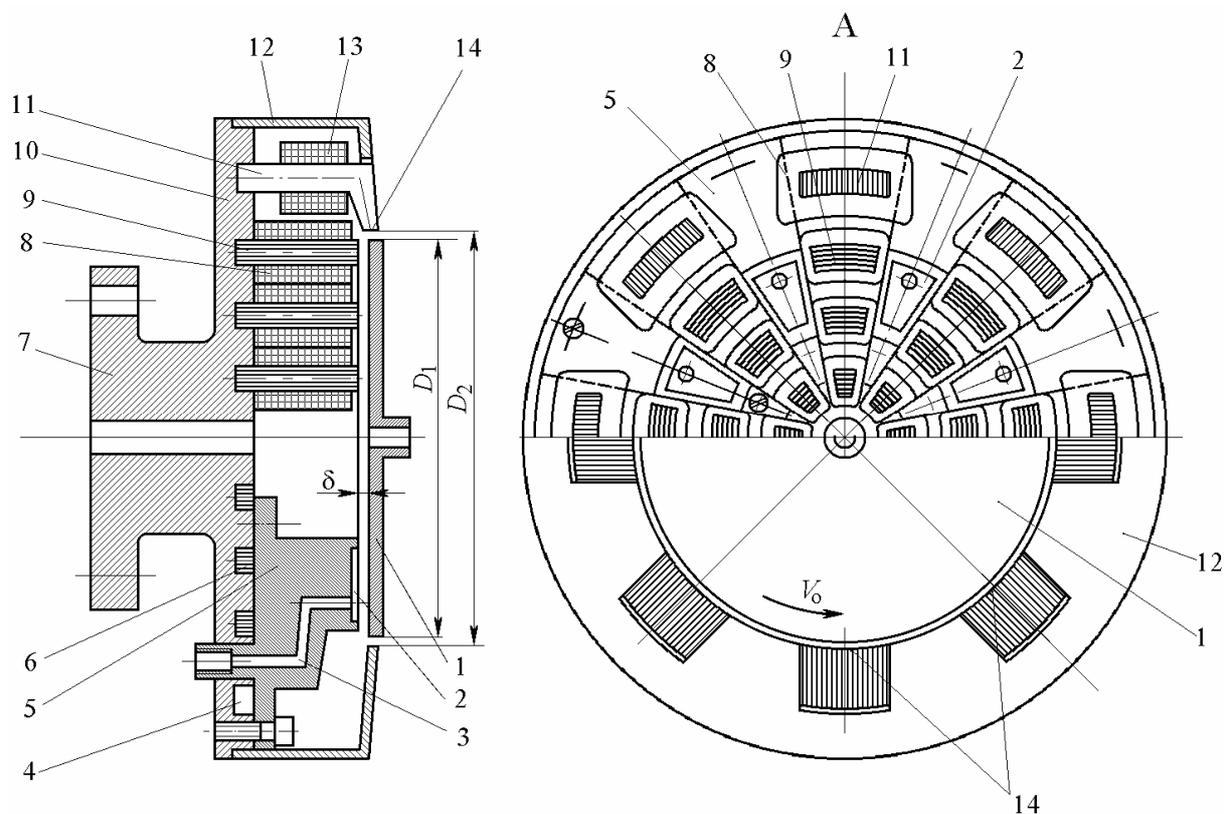


Рис. 2. Устройство для бесконтактного базирования нежестких деталей типа «диск»

Работает устройство следующим образом. Обрабатываемый диск 1 диаметром D_1 устанавливается в ложемент D_2 , образованный полюсными наконечниками 14 сердечников 11 и поджимается к полюсным наконечникам 9 атмосферным давлением при создании вакуума в полостях 2 держателей 5, по сути своей являющихся вакуумными захватами. Запитыванием фазных катушек 8 трехфазным переменным напряжением возбуждаются магнитные поля, которые перемещаются по кругу (вращаются) и по радиусу в противоположные стороны. Под их действием в диске наводятся ЕДС и протекают трехфазные вихревые токи, взаимодействующие с магнитными потоками, проходящими через полюсные наконечники.

В результате создаются осевые силы отталкивания диска от полюсных наконечников 9 с образованием зазора δ , радиально направленные центрирующие силы, стремящиеся компенсировать действие силы тяжести диска, и силы, вызывающие вращение диска в направлении окружной скорости резания V_0 .

Действие радиальной составляющей силы резания, стремящейся сместить диск, компенсируется соответствующей по величине направленной силой F , создаваемой при взаимодействии магнитных потоков, создаваемых катушками 13, с вихревыми токами в диске, возбуждаемыми магнитными потоками катушек 8, расположенных около сердечников 9.

Магнитные поля, создаваемые катушками 13, перемещаются (вращаются) по кругу синфазно с магнитными полями катушек 8. Изменением напряжения питания катушек 13 регулируется величина радиального силового воздействия на обрабатываемый диск. Кроме того, трехфазные обмотки катушек 13, сдвинутые в окружном направлении относительно друг друга на 120° , создают дополнительный вращающий момент, аналогично асинхронным двигателям, а угловое расположение полюсных наконечников 14 по отношению к обрабатываемому диску 1 обеспечивает создание дополнительной подъемной силы, действующей в осевом направлении и компенсирующей действие осевой составляющей силы резания.

В результате исследований доказана возможность использования периодического импульсного воздействия, которое, при условии исключения ударного резонанса, обеспечивает устранение радиальных перемещений цилиндрических деталей и тем самым снижение погрешностей обработки деталей, обусловленные их деформированием от силы резания. Предложена методика выбора формы ударного импульса и его периодов, при которых достигается непрерывное устойчивое положение равновесия левитационно обрабатываемой детали.

Достоверность результатов моделирования подтверждается сочетанием аналитических методов, основанных на компьютерной алгебре, и численных, в частности, при численном интегрировании дифференциальных уравнений.

Созданы модели динамики процесса обработки деталей малой жесткости, позволяющие учесть новые, ранее не нашедшие должного отражения при моделировании, факторы, которые существенно приблизили динамические модели к реальному процессу.

Впервые с позиций классической теории устойчивости движения А. М. Ляпунова дана оценка устойчивости движения систем «резец-деталь» при левитационном точении.

Список литературы: 1. Бохонский А. И. Моделирование динамики нежестких деталей при токарной обработке / А. И. Бохонский, Е. В. Пашков, А. А. Вожжов // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1999. – Вып.2. – С.22 – 27. 2. Бохонский А. И. Устойчивость движения системы «резец-деталь» при левитационном точении./ А. И. Бохонский, Е. В. Пашков, А. А. Вожжов // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр./ Севастоп. гос. тех. ун-т. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2001. – Вып.4. – С.3 – 8. 3. Бохонский А. И. Импульсная стабилизация радиальных перемещений цилиндрических оболочек при токарной обработке / А. И. Бохонский, Е. В. Пашков, А. В. Голубев // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000. – Вып.3. – С.41 – 46. 4. Пашков Е.В. Выбор параметров управления вибрационным точением при бигармонических и пилообразных колебаниях инструмента // Вестник СевГТУ: Автоматизация процессов и управление. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1997. – Вып.7. –С. 39 – 44.

Сдано в редакцию 18.04.06

Рекомендовано д.т.н., проф. Михайлов А.Н.