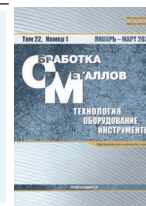




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Влияние скорости резания металлов на регенерацию вибрационных колебаний инструмента в станках токарной группы

Виктор Лапшин *

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

 <https://orcid.org/0000-0002-5114-0316>,  lapshin1917@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:

Поступила: 21 декабря 2019

Рецензирование: 13 января 2020

Принята к печати: 07 февраля 2020

Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:

Нелинейная динамика

Вибрации

Процесс резания

Регенерация колебаний

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-08-00022.

АННОТАЦИЯ

Введение. Вибрации инструмента, сопровождающие процесс резания, во многом связаны с давно выявленным регенеративным эффектом, который существенно влияет на динамические характеристики процесса обработки металлов резанием, что указывается в многочисленных зарубежных публикациях ведущих европейских специалистов в области металлообработки. В работах некоторых российских ученых, специализирующихся на анализе процессов обработки металлов резанием на металлорежущих станках, рассматривается положение о существовании оптимальной скорости резания, обеспечивающей наилучшее качество обрабатываемой поверхности и наибольшую стойкость инструмента. В связи с этим в статье рассмотрен вопрос вероятной связи этой оптимальной скорости с регенерацией колебаний инструмента при токарной обработке металлов. **Цель работы:** рассматривается возможность оценки влияния регенеративного эффекта на динамику процесса обработки без учета дополнительных влияний на процесс как со стороны станка, так и со стороны самого процесса резания с целью определения существования оптимальных режимов резания. **В работе исследована:** математическая модель, описывающая динамику вибраций инструмента в условиях обработки металлов на станках токарной группы, при этом рассматривается только процесс продольного точения изделия. **Методы исследования:** на основе математического моделирования динамической системы резания рассмотрено три варианта возможного поведения процесса обработки с учетом влияния на регенерацию колебаний инструмента, периода вращения шпинделя с закрепленной в нем деталью. В качестве первого рассматривался нейтральный вариант, при котором этот период не носит связанного с несущей частотой скорости осевых деформаций инструмента. Второй вариант определял оптимальную скорость вращения шпинделя, которая полностью совпадала с несущей частотой скорости осевых деформаций инструмента. Третий вариант показывает наихудший вариант скорости вращения шпинделя, которая делает период его колебаний таким, что при нем влияние регенеративного эффекта максимально. **Результаты и обсуждение.** Приведены результаты моделирования, раскрывающие динамику системы с учетом трех выбранных нами вариантов заданной частоты вращения шпинделя станка. Результаты исследований показали, что даже в условиях самого простого описания сил резания динамика системы носит достаточно сложный характер, на который существенным образом влияет выявленный в работе регенеративный эффект. Численный эксперимент подтверждает предложенную теорию о существовании оптимальной с точки зрения влияния на процесс резания регенерации колебаний инструмента скорости обработки. Полученные результаты лежат в русле известных отечественных работ, посвященных практическому анализу возможности построения оптимальных систем обработки резанием и связывают их с работами ведущих европейских специалистов в области динамики процессов обработки металлов.

Для цитирования: Лапшин В.П. Влияние скорости резания металлов на регенерацию вибрационных колебаний инструмента в станках токарной группы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 65–79. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-65-79.

Введение

Современные технологии обработки металлов на металлорежущих станках являются постоянно развивающейся отраслью науки и техники. Так, станки, выпускаемые ведущими мировыми лидерами в области металлообработки, такими, к примеру, как Siemens и Fanuc Co., Ltd., являются одними из самых сложных и

*Адрес для переписки

Лапшин Виктор Петрович, Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1
344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
Тел.: 8 (900) 122-75-14, e-mail: lapshin1917@yandex.ru

дорогостоящих машин, производимых в мире. В металлорежущих станках существенно увеличились производственные возможности, благодаря тому что последние тенденции развития металлообрабатывающего оборудования были направлены на область, связанную с дальнейшим внедрением цифровых систем контроля точности и надежности процесса обработки, что объясняется дальнейшим развитием систем цифрового контроля (датчики) и обработки получаемых от них данных. Сегодня на рынке оборудования диагностики и мониторинга таких аспектов, как состояние обрабатываемой детали (шероховатость поверхности, целостность и точность размеров), обнаружение износа и поломки инструмента, идентификация дребезжания, анализ состояния компонентов станка, представлено большое количество датчиков и методов обработки сигналов. Однако несмотря на это, вибрации инструмента при резании до сих пор являются ограничением для повышения производительности и качества деталей в машиностроении.

Одной из причин появления вибраций инструмента, сопровождающих процесс резания, является влияние на процесс обработки так называемого регенеративного эффекта. Впервые регенерацию колебаний при обработке металлов на металлорежущих станках исследовали *Hahn R.S.* и *Tobias S. A.* [1, 2]. Работы этих авторов являются фундаментальным базисом, лежащим в основе анализа динамики вибраций инструмента при резании в европейской и североамериканской научной публицистике, которая в дальнейшем оценивала влияние регенерации колебаний на нелинейные модели систем резания [3–8]. В работах многих авторов, публикуемых в европейской и североамериканской печати, отмечается возможность установления хаотического характера вибраций инструмента при регенерации колебаний [9–12]. В целом удалось установить, что главным фактором, влияющим на регенеративный эффект, является так называемая временная задержка “time delay” [13–17], именно она определяет динамику процесса. Во всех выше указанных работах авторами рассматривался вариант либо скалярной системы, либо (в очень редких случаях) вариант системы с двумя степенями свободы. Отметим, что вибрации реального инструмента проис-

ходят в реальном трехмерном пространстве, и, как следствие, модель силовой реакции зависит именно от трехмерного движения инструмента. В нашей стране также занимаются вопросами описания и анализа нелинейной регенеративной динамики колебаний (вибраций) инструмента при обработке металлов резанием [18–24], однако в этих работах вопросы оценки влияния резания по «следу» на динамику вибраций инструмента рассматриваются косвенно, за исключением работ [17, 22]. Все указанные работы за исключением работ, исследующих общие подходы к описанию регенерации колебаний при резании [1–5, 7, 9, 10, 12–14], в основном посвящены вопросам регенерации колебаний при фрезеровании [6, 8, 11, 15, 21, 22] или сверлении [18, 19]. Для придания таким моделям свойств, обеспечивающих сложную динамику процесса обработки, как правило, а также ограничений на рост амплитуды колебаний, в них дополнительно вводят некоторые нелинейности, например как в уравнении Дюффинга [11–15], что сложно объяснить с точки зрения описания реального процесса обработки. При моделировании таких уравнений величина запаздывания, в реальном процессе резания представленная, как правило, скоростью вращения шпинделя, не связана с параметрами уравнения в вариациях и представляется некоторой внешней переменной. В случае, например, связанного резания, когда от скорости вращения шпинделя зависит как скорость резания, так и величина подачи (подача на оборот), такая вариация величины запаздывания должна приводить к параметрической коррекции математической модели, что зачастую не делается.

В случаях описания регенеративных эффектов при точении металлов речь в основном идет об ортогональном резании, и здесь также рассматривается либо скалярная одностепенная модель, либо двухмассовая с двумя степенями свободы [16, 17]. Такое упрощение не позволяет учитывать влияние на динамику вибраций сложной нелинейной, связанной через силу резания природы деформационных движений инструмента. Однако в работах научной школы В.Л. Заковоротного [22–25], посвященных анализу нелинейной динамики деформаций инструмента в условиях связанности через силовую реакцию этого деформационного движения с элементами резания системы ЧПУ станка, рассматривается

именно вариант векторного представления такого движения. В этом случае динамические эффекты, возникающие при моделировании, более точно отражают природу взаимодействия подсистемы деформационных движений. Именно этот подход в самом упрощенном представлении был использован нами при синтезе математической модели.

Цель работы. В изданиях российских специалистов в области металлообработки помимо всего прочего отмечен факт существования некоторого наилучшего режима обработки, связанного со скоростью резания [25–28]. Так, в работе А.Д. Макарова [28, с. 67] приводится следующее положение: «Оптимальным скоростям резания при различных комбинациях подачи и глубины резания соответствует постоянная температура». Здесь, по нашему мнению, важно отметить, что автор экспериментально подтверждает наличие оптимальной скорости обработки. Опираясь на это утверждение, а также на то, что в работах европейских специалистов в динамике металлообработки указывается крайняя важность влияния на обработку регенеративного эффекта, поставим цель исследовать доказательство связи оптимальной скорости резания с эффектом регенерации колебаний. Интерес представляет оценка такой связи при условии моделирования именно связанного трехмерного колебательного движения инструмента в модели, основанной на реальном описании нелинейного характера формирования силы резания. Задачами исследования являются: синтез математической модели, отражающей российский взгляд на динамику обработки металлов резанием, проведение численного эксперимента с целью выявления возможных оптимальных с точки зрения влияния скорости на регенерацию вибраций инструмента режимов обработки и сопоставление полученных результатов с принятым в российской периодике подходом к установлению оптимальной скорости резания.

Методика исследований

Для случая продольного течения реальные деформации инструмента относительно обрабатываемой детали можно разложить минимум вдоль трех осей [20, 22–26].

Как видно из рис. 1, в схеме принято разложение деформаций на три основные оси:

ось x – осевое направление деформаций, мм; ось y – радиальное направление деформаций, мм и ось z – тангенциальное направление деформаций, мм. Вдоль этих же осей разложена силовая реакция со стороны процесса резания на формирующие движения инструмента (F_x , F_y , F_z , Н), V_x и V_z , мм/с, скорости подачи и резания соответственно, ω – угловая скорость вращения шпинделя, рад/с.

В дальнейшем в работе ограничимся случаем, связанным с токарной обработкой недеформируемой заготовки. Тогда уравнение динамики примет следующий вид:

$$m \frac{d^2 \Psi}{dt^2} + h \frac{d \Psi}{dt} + c \Psi = F(\Psi, t_P^{(0)}, S_P^{(0)}), \quad (1)$$

где m , h , c – симметричные, положительно определенные матрицы, размерностью $3 \otimes 3$; $\Psi = \{X, Y, Z\}^T \in \mathbb{R}^{(3)}$ – вектор упругих деформаций инструмента; $F(\Psi, t_P^{(0)}, S_P^{(0)}) = \{F_x, F_y, F_z\}^T \in \mathbb{R}^{(3)}$ – вектор-функция сил, действующих на инструмент (реакция на формирующие движения инструмента со стороны процесса резания); $t_P^{(0)}$, $S_P^{(0)}$ – глубина и оборотная подача, заданные программой обработки.

Соотношения между составляющими силы F_x , F_y , F_z зависят от многих факторов, таких, к

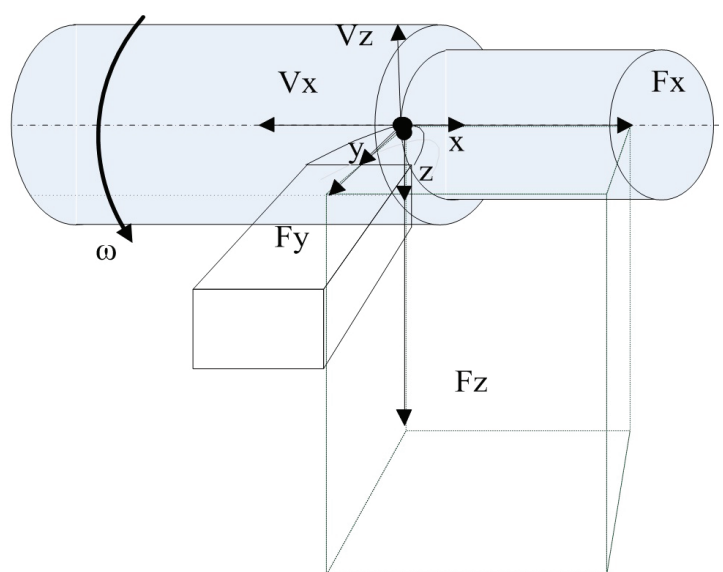


Рис. 1. Ориентация осей деформаций и сил

Fig. 1. Orientation of the axes of the deformations and forces

примеру, как геометрия резца, степень износа резца и т. д. [25]. Так, в работе [25] при обработке с острым резцом с основными углами заточки инструмента $\gamma = 15^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ и $\lambda = 0^\circ$ соотношение между составляющими в среднем равно:

$$F_x, F_y, F_z = (0.3...0.4), (0.4...0.5). \quad (2)$$

Таким образом, при разложении сил реакции вдоль осей деформации инструмента осевая составляющая силы реакции будет равна 30...40 % от тангенциальной составляющей, а радиальная составляющая 40...50 %. Для формирования непротиворечивой модели силы резания рассмотрим некоторые подходы к описанию усилия резания. Так, в работе [26] представлена формула К.А. Зворыкина, которая в нашей интерпретации может быть представлена так:

$$F_z = \rho t_p S \frac{\sin(2\Theta + (90 - \gamma)) \cos \Theta_1}{\cos \Theta \cos(90 - \varphi)}, \quad (3)$$

где Θ и Θ_1 – углы трения на контактных площадках инструмента и в плоскости сдвига соответственно; ρ – предел прочности материала на разрыв; t_p – глубина срезаемого слоя материала; S – величина подачи на оборот детали.

Усилие резания, по Н.Н. Зореву, рассчитывается по следующей теоретической зависимости [27]:

$$F_z = \rho t_p S \frac{\cos \omega}{\cos(\varphi + \omega) \sin \varphi}. \quad (4)$$

Анализ выражений (3), (4) позволяет сделать некоторое обобщение в виде следующей гипотезы:

$$F_i = \rho t_p S \chi_i, \quad (5)$$

где χ_i – некоторый коэффициент разложения общего вектора сил реакции на i -ю ось деформации инструмента. При расчете этих коэффициентов нужно учесть пример, приведенный в выражении (2). Надо отметить, что такой подход широко применяется в рамках научной школы В.Л. Заковоротного [22–25].

На введенные коэффициенты χ_i наложим нормировку в виде

$$\sqrt{\chi_1^2 + \chi_2^2 + \chi_3^2} = 1. \quad (6)$$

Глубина обработки t_p также будет зависеть от деформаций инструмента и обрабатываемой детали:

$$t_p = t_{p0} - y, \quad (7)$$

где t_{p0} – технологически заданная глубина обработки без учета деформаций инструмента и детали (определяется программой ЧПУ).

Величина подачи на оборот S может быть представлена в виде следующего интеграла [22–25]:

$$S = \int_{t-T}^t \left(V_x - \frac{dx}{dt} \right) dt, \quad (8)$$

где V_x – скорость подачи; T – период вращения детали, который, в свою очередь, может быть определен следующим образом:

$$T = \frac{r}{V_z - \frac{dz}{dt}}, \quad (9)$$

где r – радиус обрабатываемой детали.

Выражение (8) для дальнейшего анализа удобно представить в виде

$$\begin{aligned} S &= V_x T - \int_{t-T}^t \frac{dx}{dt} dt = \\ &= V_x T - x(t) + x(t-T). \end{aligned} \quad (10)$$

Именно в выражении (9) с математической точки зрения и есть источник регенерации колебаний. Однако прежде чем проанализировать это выражение, остановимся на некоторых наглядных пояснениях, уточняющих природу регенерации колебаний при тчении металлов.

В самом общем случае регенеративный эффект можно обосновать тем, что при резании в условиях повторного внедрения инструмента в обрабатываемую деталь на текущую обработку начинают влиять следы предыдущей обработки, т. е. волны, оставленные инструментом на предыдущем шаге резания, как бы регенерируются во время каждого последующего прохода инструмента. Это явление вызывает изменение толщины стружки и, следовательно, изменение силы резания и за счет этого увеличивается амплитуда вибраций режущего инструмента. Для наглядности рассмотрим два возможных вари-

анта связанного точения (глубина и подача постоянные), оба этих варианта представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, при обработке металлов точением возможны варианты, когда подача инструмента в обрабатываемую деталь близка к постоянному значению (рис. 2, а), а возможны варианты, когда реальная подача (с учетом деформации инструмента в осевом направлении) существенным образом изменяется, колеблется (рис. 2, б), и именно в этом случае сам процесс резания, вернее, силовая реакция (выражения (5), (10)), осуществляет генерацию колебаний

инструмента. Для этого случая (рис. 2, б) при условии того, что левая линейная часть уравнения (1) имеет хорошее устойчивое решение (коэффициенты матрицы h велики), будут характерны незатухающие колебания с частотами, обусловленными регенеративным эффектом. В случае добротности системы (1) (коэффициенты матрицы h малы) процесс деформационных движений инструмента должен приобрести неустойчивый вид.

Вернемся к анализу выражения (10). Здесь при объяснении регенеративного эффекта самовозбуждения системы резания важна

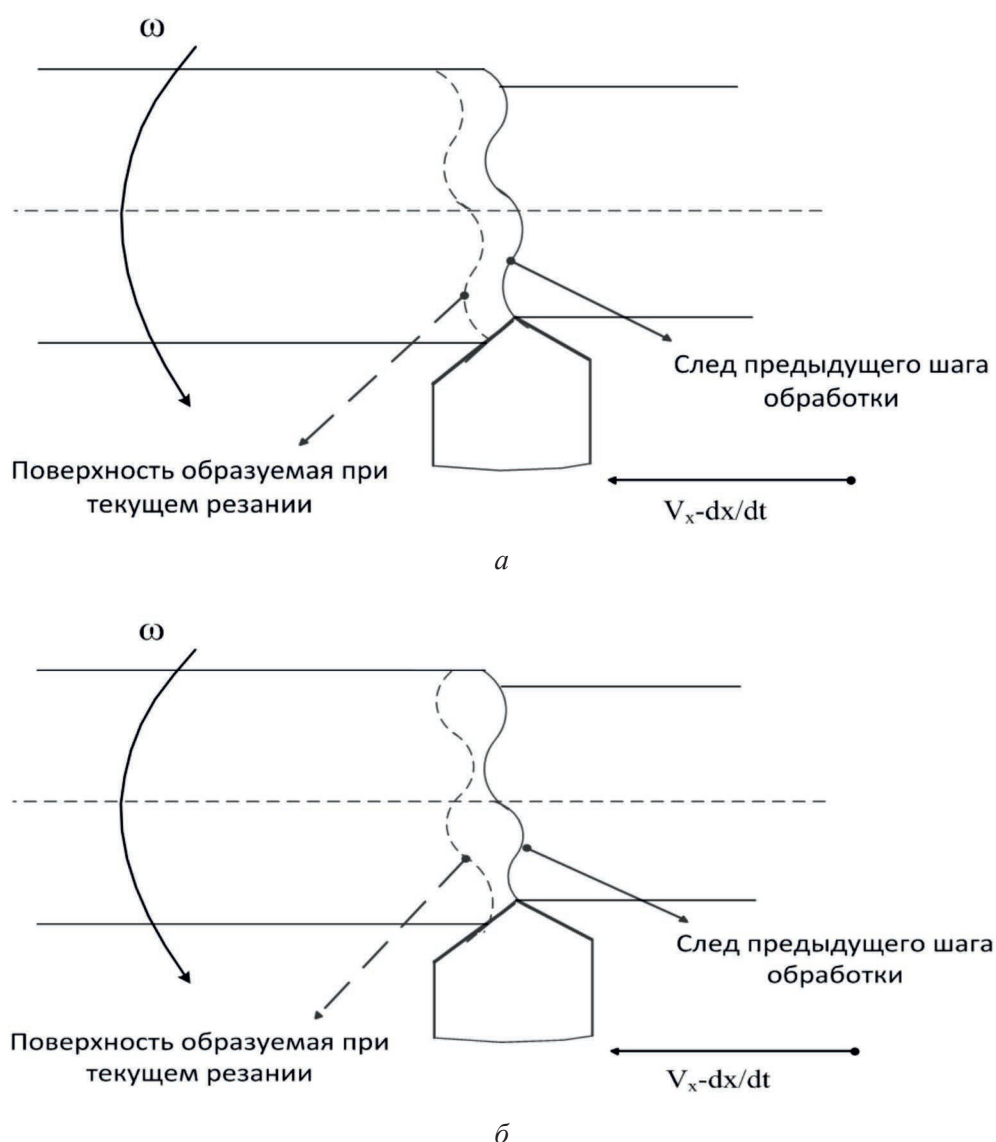


Рис. 2. Пример регенерации колебаний:

а – нет регенеративного эффекта; б – регенеративный эффект близок к максимальному

Fig. 2. Example of oscillation regeneration:

а – no regenerative effect; б – regenerative effect is close to maximum

вторая составляющая первой части этого выражения, т. е.

$$\Delta S = \int_{t-T}^t \frac{dx}{dt} dt. \quad (11)$$

Предположим, что скорость деформаций инструмента в осевом направлении имеет простую гармоническую форму, к примеру, $\frac{dx}{dt} = a \sin(\omega_x t)$, где a – амплитуда; ω_x – частота этих колебаний.

Тогда под $\frac{dx}{dt}$ площадь, определяемая интегралом (11), будет зависеть от соотношения частот (частота вращения шпинделя) и ω_x . В случае совпадения этих частот, т. е. совпадений периода колебаний $\frac{dx}{dt}$ и периода вращения шпинделя, площадь, определяемая интегралом (11), будет равна нулю, т. е. этот интеграл посчитает площадь под первой полуволной колебаний и вычитет из нее площадь под второй полуволной. Отметим, что эти рассуждения соответствуют тому, что изображено на рис. 2, а. Во всех остальных случаях ΔS будет отлична от нуля и оператор (11) будет генератором колебаний. Здесь самый большой интерес представляет случай, представленный на рис. 2, б, т. е. вариант максимально возможных колебаний подачи. Анализ выражения (11) с учетом предположения о простой гармонической форме сигнала $\frac{dx}{dt}$ показывает, что максимум ΔS будет при выполнении условия $\omega = 2\omega_x$, т. е. в случае, когда период вращения шпинделя равен половине периода колебаний $\frac{dx}{dt}$. Именно в этом случае регенерация колебаний в системе резания будет максимальной.

Отметим, что скорость вибраций инструмента в осевом направлении в реальности носит достаточно сложный характер, обусловленный нелинейной природой динамической связи, формируемой в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали (выражение (5)). Следовательно, напрямую применить приведенные выше рассуждения достаточно сложно, однако в целом эти рассуждения справедливы и на основании их можно разработать программу числен-

ного эксперимента с моделью, представленной выражениями (5)–(10).

Результаты исследований

Перед приведением результатов моделирования оговорим параметры модели, представленной в выражении (1), а также условия эксперимента. Что касается условий эксперимента, то сконцентрируем внимание на оценке динамики системы, описываемой выражением (1) в трех точках, отличающихся друг от друга частотой вращения шпинделя. При этом примем, что речь идет о точении на станке, имеющем возможность широкого регулирования скорости обработки, но с одной и той же глубиной и оборотной подачей.

Первая точка эксперимента связана с оценкой динамики системы резания при условии простого несовпадения периода вращения шпинделя с периодом колебаний скорости вибраций в осевом направлении $\left(\frac{dx}{dt}\right)$, т. е. частота вращения выбирается произвольным образом. Во всех экспериментах примем, что система, описывающая деформационные движения инструмента, характеризуется следующими параметрами:

$$m = \begin{bmatrix} 0,0065 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0065 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0065 \end{bmatrix} \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{мм};$$

$$h = \begin{bmatrix} 0,844 & 0,39 & 0,37 \\ 0,39 & 0,77 & 0,36 \\ 0,37 & 0,36 & 0,75 \end{bmatrix} \text{ кг} \cdot \text{с}/\text{мм};$$

$$c = \begin{bmatrix} 1390 & 190 & 165 \\ 190 & 795 & 150 \\ 165 & 150 & 970 \end{bmatrix} \text{ кг}/\text{мм}.$$

Коэффициенты ориентации: $\chi_x = 0,3369$, $\chi_2 = 0,48$, $\chi_3 = 0,81$. Технологические режимы: глубина $t_p = 2$ мм, подача $S = 0,1$ мм, частота вращения шпинделя $n = 1000$ об/мин, $\rho = 400$ кг/мм², радиус обрабатываемой детали $R = 50$ мм. Собственные частоты подсистемы инструмента: $\Omega_{0,x} = 460 \text{ с}^{-1}$, $\Omega_{0,y} = 350 \text{ с}^{-1}$, $\Omega_{0,z} = 398 \text{ с}^{-1}$.

Результаты моделирования системы деформационных колебаний инструмента в виде временных характеристик координат деформации и соответствующих им фазовым траекториям представлены на рис. 3.

Как следует из рис. 3, в системе деформационных движений инструмента наблюдаются сгенерированные при врезании инструмента в обрабатываемую деталь виброколебания, стягивающиеся после каждого оборота детали к некоторому малому предельному циклу (см. рис. 3, *з*, *д*, *е*). Из рисунка видно, что за время эксперимента деталь (шпиндель) совершает около пяти оборотов, на каждом из которых в связи с существова-

нием следа от предыдущего генерируются новые колебания, т. е. здесь напрямую наблюдается регенеративный эффект в возбуждении в системе колебаний. Для оценки правильности подхода, озвученного нами выше, построим спектр мощности сигнала $\left(\frac{dx}{dt}\right)$ (рис. 4).

Как показано на рис. 4, основной частотой для виброколебаний инструмента в осевом направлении выступает частота $\Omega_{x,0} = 28,1 \text{ с}^{-1}$ с двумя основными субчастотами: левой $\Omega_{x,1} = 27,6 \text{ с}^{-1}$ и правой $\Omega_{x,1} = 27,6 \text{ с}^{-1}$, при этом расстояние

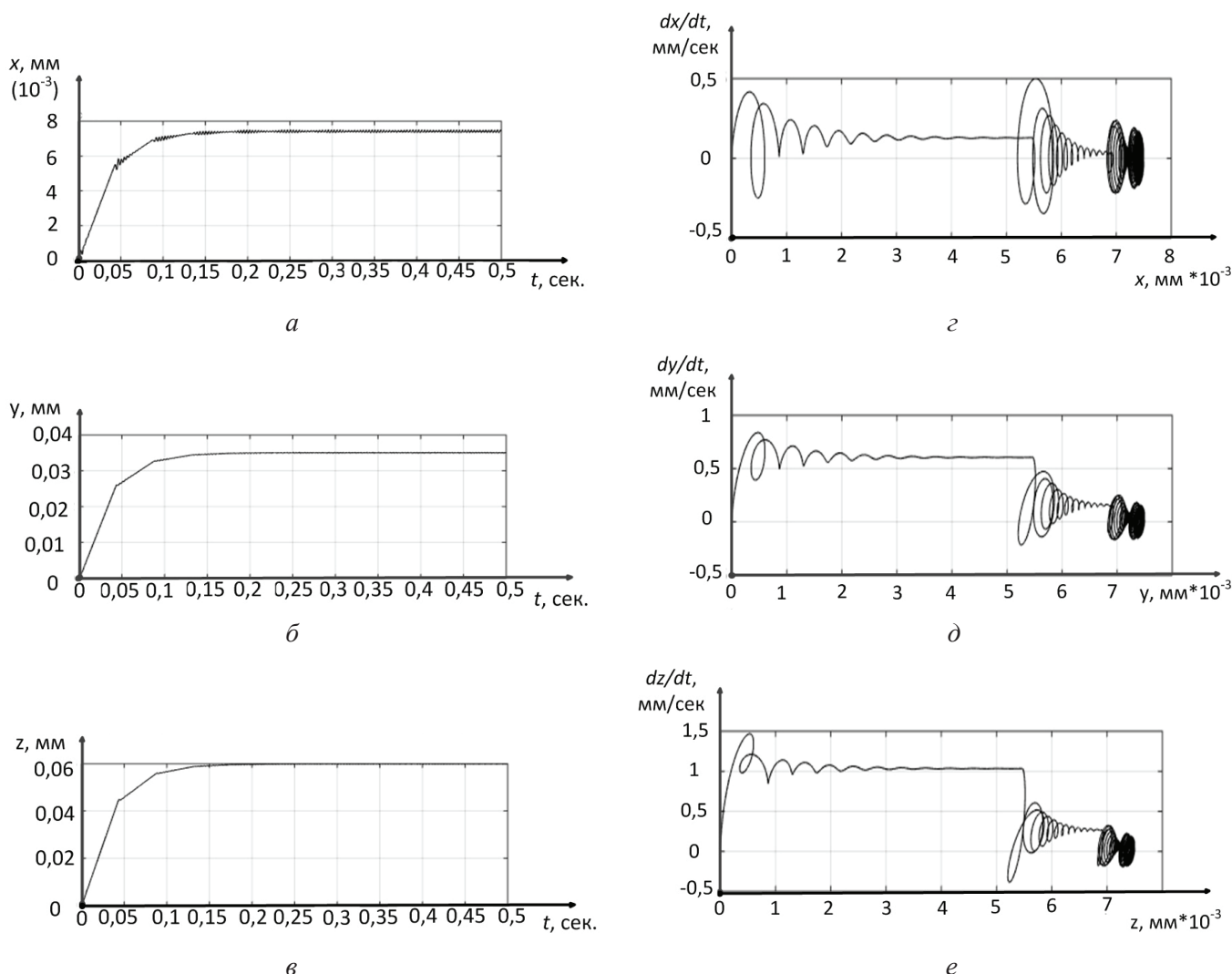


Рис. 3. Переходные характеристики координат деформационного движения инструмента и соответствующие им фазовые траектории:

a, г – по координате *x*; *б, д* – по координате *y*; *в, е* – по координате *z*

Fig. 3. Transient characteristics of the coordinates of the deformation movement of the tool and the corresponding phase trajectories:

a, г – at the *x* coordinate; *б, д* – at the *y* coordinate; *в, е* – at the *z* coordinate

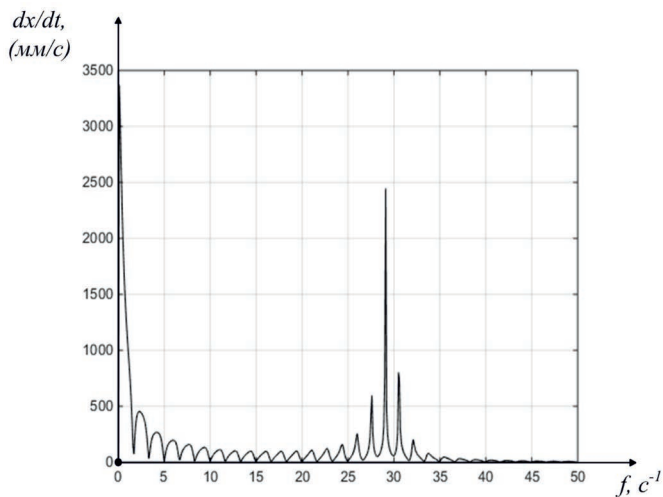


Рис. 4. Спектр мощности сигнала dx/dt для $n = 1000$ об/мин
Fig. 4. Signal power Spectrum dx/dt for $n = 1000$ rpm

между несущей частотой и этими двумя субчастотами составляет примерно $1,4 \text{ с}^{-1}$.

Согласно выдвинутой нами выше гипотезе, если подобрать частоту вращения шпинделя, равную основной частоте колебаний скорости деформаций в осевом направлении, то удастся минимизировать влияние регенеративного эффекта на вибрации инструмента. Здесь надо оговорить тот факт, что исследуемая система нелинейна. Изменение частоты вращения шпинделя в силу выражения (8) приведет к изменению силы резания (из-за изменения площади срезаемого слоя) и в результате к изменению амплитуды колебаний, что, в свою очередь, повлияет (в силу нелинейности системы уравнений (1) [29]) на основную частоту колебаний $\frac{dx}{dt}$. След-

довательно частота вращения шпинделя, компенсирующая эффект регенерации колебаний, будет отлична от определенного на рис. 4 значения. Результаты моделирования системы деформационных движений инструмента с подобранной частотой вращения шпинделя, компенсирующей регенеративный эффект, представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, вибрационный процесс в целом стал более устойчив, однако полностью исключить регенерацию колебаний здесь не удалось. Для того чтобы понять, почему это произошло, рассмотрим спектр мощности сигнала $\frac{dx}{dt}$, который приведен на рис. 6.

Как показывает рис. 6, в результате изменения частоты вращения шпинделя здесь удалось заглушить несущую частоту колебаний, однако существенно выросли субчастоты: левая $\Omega_{x,1} = 28,01 \text{ с}^{-1}$ и правая $\Omega_{x,2} = 30,05 \text{ с}^{-1}$, при этом расстояние между ними составляет примерно $2,4 \text{ с}^{-1}$, которые и стали фактором, обусловившим регенерацию колебаний.

Самый интересный случай в силу гипотезы, озвученной нами ранее, – это когда период вращения шпинделя составляет ровно половину от периода, соответствующего основной несущей частоте колебаний скорости деформаций инструмента в осевом направлении (рис. 7).

Как показано на рис. 7, колебания инструмента начинают носить незатухающий характер, что существенно отличает их от случаев, представленных нами ранее. Сама форма колебаний, исходя из анализа фазовых траекторий (см. рис. 7, z , d , e), стягивается к некоторому предельному циклу. Это значит, что если в предыдущих случаях эти колебания, затухая, стремились стянуться на фазовой части, изображенной на рисунках, к некоторой константе, то здесь наблюдается формирование повторяющейся структуры периодических движений. Для более подробного анализа удобно рассмотреть спектр мощности осевой скорости деформационных движений инструмента (рис. 8).

Как видно из рис. 8, мощность колебаний осевой скорости деформационных движений инструмента на основной частоте существенно выросла как по сравнению с мощностью представленной на рис. 4, так и с мощностью, приведенной на рис. 6. При этом субчастоты основной частоты оказались сильно ослаблены, т. е. почти вся энергия сигнала была перенаправлена в область несущей частоты. Этим и обусловлены формируемые фазовые траектории, которые показывают существенное упрощение формы периодического сигнала колебаний.

Обсуждение

Перед тем, как сделать анализ полученных результатов, мы хотели бы заострить внимание на том факте, что использованный нами подход к описанию сил резания (см. выражение (5)), несмотря на нелинейность описания, носит самый простейший характер. Это значит, что здесь нет

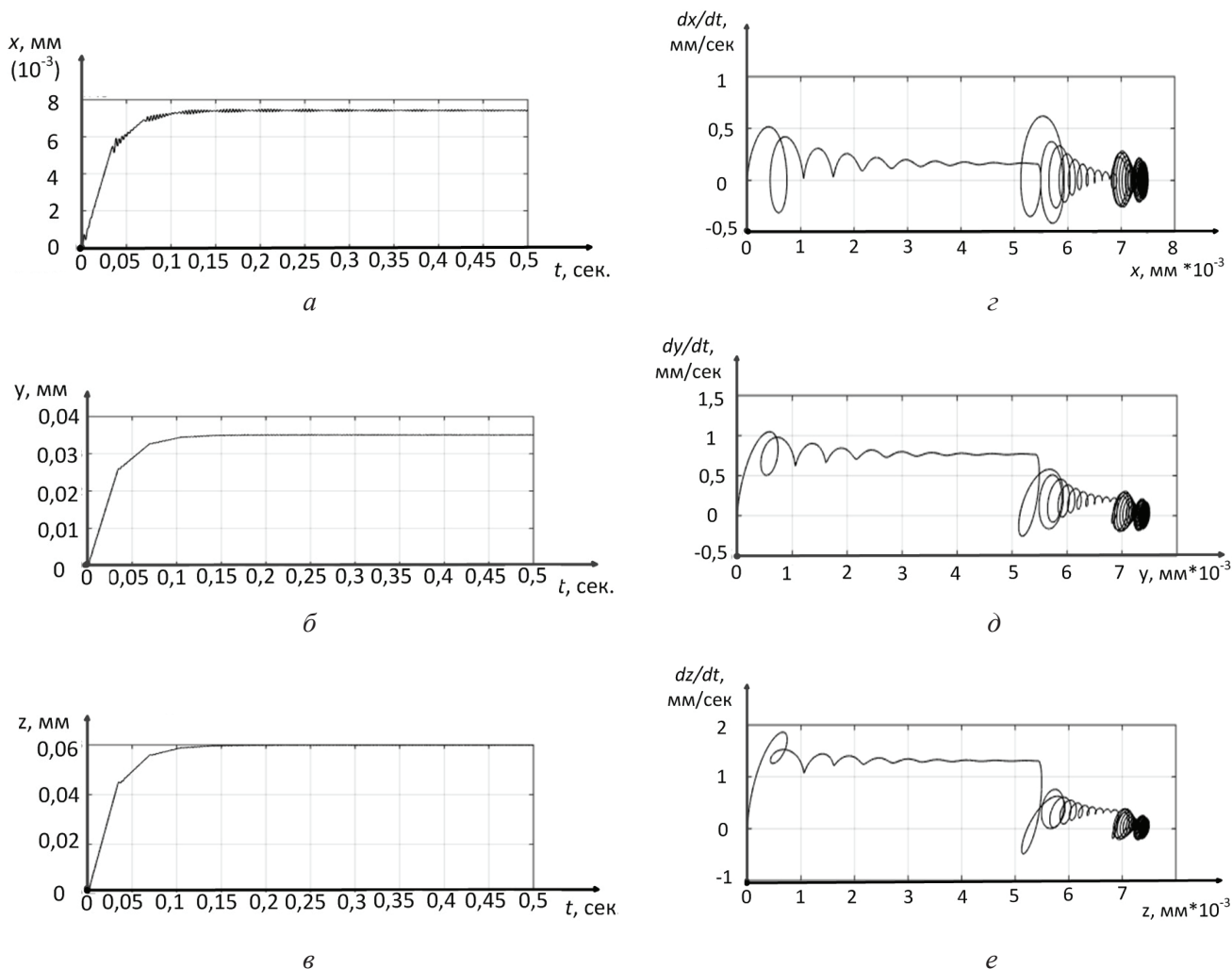


Рис. 5. Переходные характеристики координат деформационного движения инструмента и соответствующие им фазовые траектории ($n = 1775$ об/мин):

a, z – по координате x ; $б, д$ – по координате y ; $в, е$ – по координате z

Fig. 5. Transient characteristics of the coordinates of the deformation movement of the tool and the corresponding phase trajectories ($n = 1775$ rpm):

a, z – at the x coordinate; $б, д$ – at the y coordinate; $в, е$ – at the z coordinate

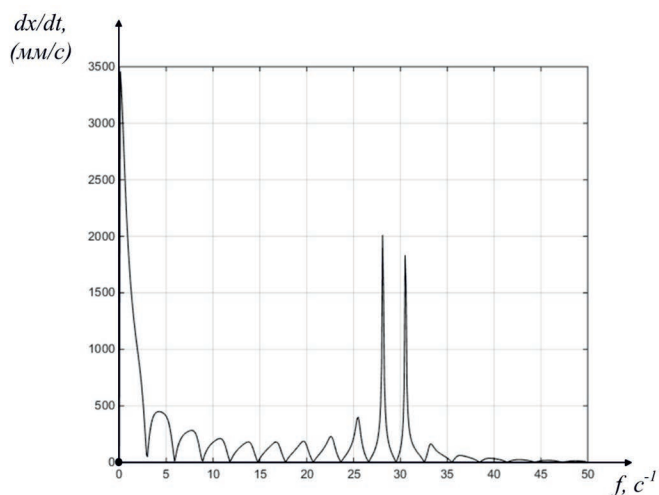


Рис. 6. Спектр мощности сигнала dx/dt для $n = 1775$

Fig. 6. Signal power Spectrum dx/dt for $n = 1775$

учета падающей характеристики силы резания от скорости резания, а также отсутствует влияние на динамику процесса резания температуры в зоне резания и влияние изменяемой по мере продольного точения жесткости детали и т. д. Все это должно усложнить как модель, так и форму колебаний, что может существенным образом повлиять на результаты исследований. В левой части модели (см. выражение (1)) отсутствуют дополнительно введенные нелинейности типа уравнения Дюффинга, что достаточно часто вводят в свои модели современные европейские исследователи [11–17] и обеспечивающих тем самым хаотическую динамику процесса резания. Однако, по нашему мнению, сам

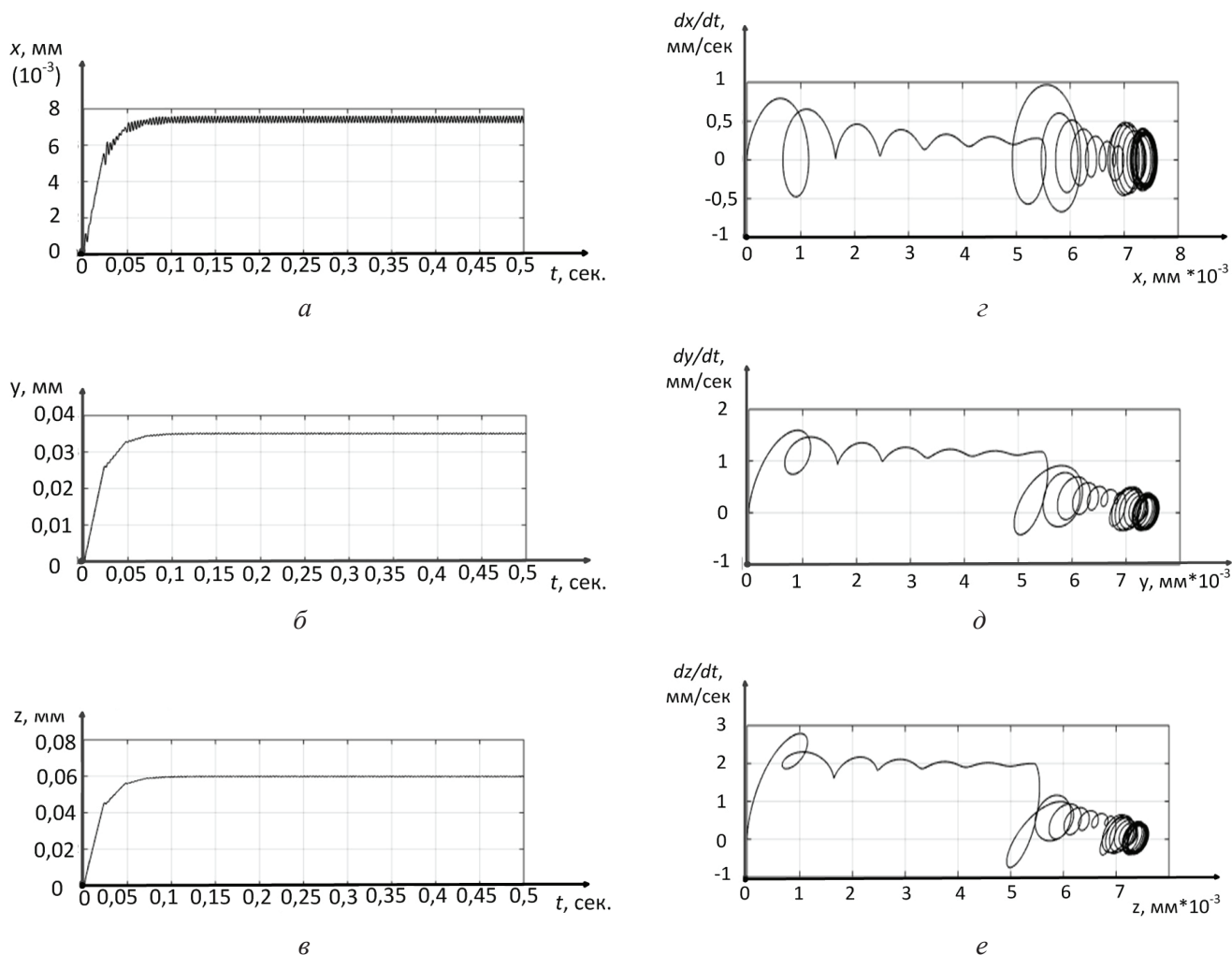


Рис. 7. Переходные характеристики координат деформационного движения инструмента и соответствующие им фазовые траектории ($n = 3222$ об/мин):

$a, г$ – по координате x ; $б, д$ – по координате y ; $в, е$ – по координате z

Fig. 7. Transient characteristics of the coordinates of the deformation movement of the tool and the corresponding phase trajectories ($n = 3222$ rpm):

$a, г$ – at the x coordinate; $б, д$ – at the y coordinate; $в, е$ – at the z coordinate

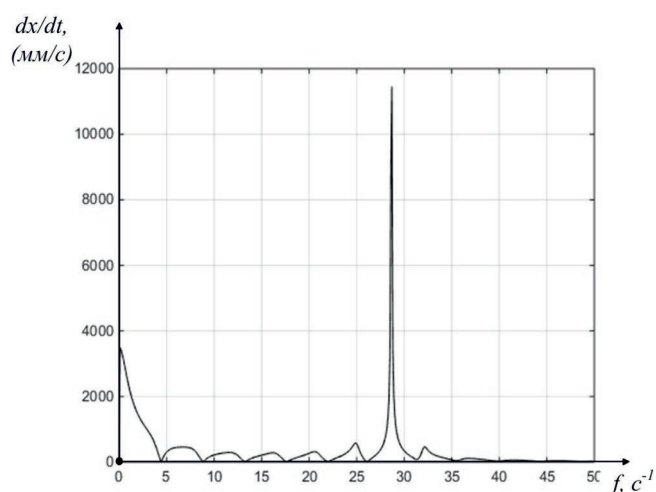


Рис. 8. Спектр мощности сигнала dx/dt для $n = 3222$

Fig. 8. Signal power Spectrum dx/dt for $n = 3222$

подход к оценке регенеративного влияния скорости резания, определяемой при токарной обработке частотой вращения шпинделя с закрепленной в нем обрабатываемой деталью, на вибрационную активность инструмента вполне оправдан. Оценка влияния регенеративного эффекта на динамику резания при условии реализации дополнительных условий формирования силовой реакции будет рассмотрена нами в следующих публикациях.

В настоящей работе нет полной реализации описанного нами во второй части статьи подхода к усилению или ослаблению регенеративного эффекта на основе подстройки периода вращения шпинделя к периоду колебаний интегрируемой в выражении (11) функции dx/dt ,



однако, возможен вариант подбора оптимальной или квазиоптимальной скорости резания. Здесь под квазиоптимальностью мы понимаем возможность существенного снижения амплитуды колебаний деформационных инструментов, которые во многом и определяют качество обработанной поверхности. Отметим, что это позволяет нам говорить о возможной связи известного из работ отечественных авторов положения о существовании оптимальной скорости резания с режимом обработки, обеспечивающим минимум влияния регенеративного эффекта на динамику резания.

Заключение

Таким образом, с помощью достаточно простой векторной модели, описывающей динамику процесса обработки в принятых у отечественных специалистов терминах силовой реакции со стороны процесса резания, нам удалось показать влияние регенеративного эффекта на динамику резания и сблизить позиции по выбору оптимальных режимов обработки между принятыми в Европе и России подходами.

Список литературы

1. *Hahn R.S.* On the theory of regenerative chatter in precision grinding operation // Transactions of American Society of Mechanical Engineers. – 1954. – Vol. 76. – P. 356–260.
2. *Tobias S.A., Fishwick W.* Theory of regenerative machine tool chatter // The Engineer. – 1958. – Vol. 205, N 7. – P. 199–203.
3. *Merritt H.E.* Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research–1 // Journal of Engineering for Industry. – 1965. – Vol. 87, N 4. – P. 447–454. – DOI: 10.1115/1.3670861.
4. *Hanna N.H., Tobias S.A.* A theory of nonlinear regenerative chatter // Journal of Engineering for Industry. – 1974. – Vol. 96, N 1. – P. 247–255.
5. *Thusty I., Ismail F.* Basic non-linearity in machining chatter // CIRP Annals. – 1981. – Vol. 30. – P. 299–304. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60946-9.
6. *Altıntaş Y., Budak E.* Analytical prediction of stability lobes in milling // CIRP Annals. – 1995. – Vol. 44, N 1. – P. 357–362. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.
7. *Insperger T., Stépán G.* Stability of the milling process // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. – 2000. – Vol. 44, N 1. – P. 47–57.
8. *Wiercigroch M., Budak E.* Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2001. – N 359. – P. 663–693. – DOI: 10.1098/rsta.2000.0750.
9. *Grabec I.* Chaos generated by the cutting process // Physics Letters A. – 1986. – Vol. 117, N 8. – P. 384–386. – DOI: 10.1016/0375-9601(86)90003-4.
10. *Balachandran B.* Nonlinear dynamics of milling process // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2001. – Vol. 359. – P. 793–819.
11. *Stepan G.* Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2001. – Vol. 359. – P. 739–757. – DOI: 10.1098/rsta.2000.07537.
12. *Litak G.* Chaotic vibrations in a regenerative cutting process // Chaos Solitons and Fractals. – 2002. – Vol. 13. – P. 1531–1535. – DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.
13. *Namachchivaya S., Beddini.* Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter // Journal of Nonlinear Science. – 2003. – Vol. 13, N 3. – P. 265–288. – DOI: 10.1007/s00332-003-0518-4.
14. *Wahi P., Chatterjee A.* Regenerative tool chatter near a codimension 2 Hopf point using multiple scales // Nonlinear Dynamics. – 2005. – Vol. 40, N 4. – P. 323–338.
15. *Stépán G., Insperger T., Szalai R.* Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2005. – Vol. 15, N 9. – P. 2783–2798. – DOI: 10.1142/S0218127405013642.
16. Nonlinear behaviour of the regenerative chatter in turning process with a worn tool: forced oscillation and stability analysis / H. Moradi, F. Bakhtiari-Nejad, M.R. Movahhedy, M.T. Ahmadian // Mechanism and Machine Theory. – 2010. – Vol. 45, N 8. – P. 1050–1066. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.
17. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A.M. Gouskov, S.A. Voronov, H. Paris, S.A. Batzer // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2002. – Vol. 7, N 4. – P. 207–221. – DOI: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X.
18. *Гуськов А.М., Воронов С.А., Квашин А.С.* Влияние крутильных колебаний на процесс вибро-сверления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2007. – № 1 (66). – С. 3–19.
19. *Васин С.А., Васин Л.А.* Синергетический подход к описанию природы возникновения и развития автоколебаний при точении // Научные исследования в машиностроении. – 2012. – № 1. – С. 11–16.

20. Воронин А.А. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс резания жаропрочных сплавов // Станки и инструменты. – 1960. – № 11. – С. 15–18.
21. Заковоротный В.Л., Лапшин В.П., Губанова А.А. Определение оптимальных траекторий при обработке с учетом эволюции процесса резания // Вестник Донского государственного технического университета. – 2014. – Т. 14, № 3 (78). – DOI: 10.12737/5715.
22. Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S. Assessing the regenerative effect impact on the dynamics of deformation movements of the tool during turning // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 68–73. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.439.
23. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting / V.L. Zakovorotny, A.D. Lukyanov, A.A. Gubanova, V.V. Khristoforova // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – Vol. 368. – P. 174–190. – DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.020.
24. Lapshin V.P., Turkin I.A. Dynamic influence of the spindle servo drive on the drilling of deep narrow holes // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, N 10. – P. 795–797. – DOI: 10.3103/S1068798X15100111.
25. Рыжский А.А., Шучев К.Г., Климов М.М. Обработка материалов резанием. – Ростов н/Д.: Феникс, 2008. – 418 с. – ISBN 978-5-7890-0413-X.
26. Вульф А.М. Резание металлов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
27. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с.
28. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
29. Попов Е.П., Пальтов И.П. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем. – М.: Физматгиз, 1960. – 792 с.

Конфликт интересов

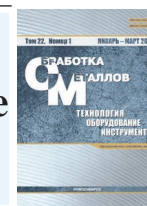
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Автор. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



The Influence of the Cutting Speed of Metals on the Regeneration of the Vibratory Oscillations of the Tool in Machines of the Turning Group

Victor Lapshin *

Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

 <https://orcid.org/0000-0002-5114-0316>,  lapshin1917@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 December 2019

Revised: 13 January 2020

Accepted: 07 February 2020

Available online: 15 March 2020

Keywords:

Nonlinear dynamics

Vibrations

Cutting process

Oscillation regeneration

Funding

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 19-08-00022.

ABSTRACT

Introduction. Tool vibrations accompanying the cutting process are largely related to the long-established regenerative effect, which significantly affects the dynamic characteristics of the metal cutting process, which is indicated in numerous foreign publications of leading European specialists in the field of Metalworking. In the works of some Russian scientists specializing in the analysis of metal cutting processes on metal-cutting machines, the position of the existence of an optimal cutting speed that provides the best quality of the processed surface and the greatest tool life is considered. Therefore, the paper considers the question of the probable connection of this optimal speed with the regeneration of tool vibrations during metal turning. **Objective:** the possibility of assessing the influence of the regenerative effect on the dynamics of the processing process is considered, without taking into account additional influences on the process, both from the machine side and from the cutting process itself, in order to determine the existence of optimal cutting modes. **The study investigated:** a mathematical model describing the dynamics of tool vibrations in the conditions of metal processing on machines of the turning group, while only the case of longitudinal turning of the product is considered. **Research methods:** on the basis of mathematical modeling of the dynamic cutting system, three variants of the possible behavior of the processing process are considered, taking into account the influence on the regeneration of tool vibrations, the period of rotation of the spindle with the part fixed in it. As the first case, a neutral variant in which this period is not associated with the carrier frequency of the speed of axial deformations of the tool is considered. The second option determined the optimal speed of rotation of the spindle, which completely coincided with the carrier frequency of the speed of axial deformations of the tool. The third option shows the worst-case version of the spindle rotation speed, which makes the spindle oscillation period such that the regenerative effect is maximized. **Results and discussion.** The results of modeling are presented, revealing the dynamics of the system, taking into account the three options selected for the specified spindle speed of the machine. The results of research show that even in the simplest description of cutting forces, the dynamics of the system is quite complex, which is significantly affected by the regenerative effect revealed in the work. The numerical experiment confirms the theory proposed in the paper about the existence of an optimal processing speed, in terms of the influence of tool vibration regeneration on the cutting process. The results obtained are in line with well-known domestic works devoted to the practical analysis of the possibility of building optimal cutting systems and link them with the work of leading European experts in the field of dynamics of metal processing processes.

For citation: Lapshin V.P. The Influence of the Cutting Speed of Metals on the Regeneration of the Vibratory Oscillations of the Tool in Machines of the Turning Group. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 65–79. DOI:10.17212/1994-6309-2020-22.1-65-79. (In Russian).

References

1. Hahn R.S. On the theory of regenerative chatter in precision grinding operation. *Transactions of American Society of Mechanical Engineers*, 1954, vol. 76, pp. 356–260.
2. Tobias S.A., Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter. *The Engineer*, 1958, vol. 205, no. 7, pp. 199–203.

* Corresponding author

Lapshin Viktor P., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Don State Technical University,
 1 Gagarin square,
 344000, Rostov-on-Don, Russian Federation
Tel.: 8 (900) 122-75-14, **e-mail:** lapshin1917@yandex.ru

3. Merritt H.E. Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research – 1. *Journal of Engineering for Industry*, 1965, vol. 87, no. 4, pp. 447–454. DOI: 10.1115/1.3670861.
4. Hanna N.H., Tobias S.A. A theory of nonlinear regenerative chatter. *Journal of Engineering for Industry*, 1974, vol. 96, no. 1, pp. 247–255.
5. Tlustý I., Ismail F. Basic non-linearity in Machining Chatter. *CIRP Annals*, 1981, vol. 30, pp. 299–304. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60946-9.
6. Altıntaş Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Annals*, 1995, vol. 44, no. 1, pp. 357–362. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.
7. Insperger T., Stépán G. Stability of the milling process. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2000, vol. 44, no. 1, pp. 47–57.
8. Wiercigroch M., Budak E. Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, no. 359, pp. 663–693. DOI: 10.1098/rsta.2000.0750.
9. Grabec I. Chaos generated by the cutting process. *Physics Letters A*, 1986, vol. 117, no. 8, pp. 384–386. DOI: 10.1016/0375-9601(86)90003-4.
10. Balachandran B. Nonlinear dynamics of milling process. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359, pp. 793–819.
11. Stepan G. Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359, pp. 739–757. DOI: 10.1098/rsta.2000.07537.
12. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. *Chaos Solitons and Fractals*, 2002, vol. 13, pp. 1531–1535. DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.
13. Namachchivaya S., Beddini. Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter. *Journal of Nonlinear Science*, 2003, vol. 13, no. 3, pp. 265–288. DOI: 10.1007/s00332-003-0518-4.
14. Wahi P., Chatterjee A. Regenerative tool chatter near a codimension 2 Hopf point using multiple scales. *Nonlinear Dynamics*, 2005, vol. 40, no. 4, pp. 323–338.
15. Stépán G., Insperger T., Szalai R. Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2005, vol. 15, no. 9, pp. 2783–2798. DOI: 10.1142/S0218127405013642.
16. Moradi H., Bakhtiari-Nejad F., Movahhedy M.R., Ahmadian M.T. Nonlinear behaviour of the regenerative chatter in turning process with a worn tool: forced oscillation and stability analysis. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, vol. 45, no. 8, pp. 1050–1066. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.
17. Gouskov A.M., Voronov S.A., Paris H., Batzer S.A. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2002, vol. 7, no. 4, pp. 207–221. DOI: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X.
18. Gouskov A.M., Voronov S.A., Kvashnin A.S. Vliyanie krutil'nykh kolebanii na protsess vibrosverleniya [Influence of torsion vibrations on process of vibration-drilling]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya: Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2007, no. 1 (66), pp. 3–19.
19. Vasin S.A., Vasin L.A. Sinergeticheskii podkhod k opisaniyu prirody vozniknoveniya i razvitiya avtokolebanii pri tochenii [Synergetic approach to describing the nature and development of self-oscillations in turning]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2012, no. 1, pp. 11–16.
20. Voronin A.A. Vliyanie ul'trazvukovykh kolebanii na protsess rezaniya zharoprochnykh splavov [Influence of the ultrasound oscillations on the cutting process of the high-temperature alloy]. *Stanki i instrument = Machines and Tooling*, 1960, no. 11, pp. 15–18.
21. Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Gubanova A.A. Opredelenie optimal'nykh traektorii pri obrabotke s uchetom evolyutsii protsessa rezaniya [Determination of optimal trajectories during processing taking into account the evolution of the cutting process]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2014, vol. 14, no. 3 (78). DOI: 10.12737/5715.
22. Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S. Assessing the regenerative effect impact on the dynamics of deformation movements of the tool during turning. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 68–73. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.439.
23. Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D., Gubanova A.A., Khristoforova V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, vol. 368, pp. 174–190. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.020.

24. Lapshin V.P., Turkin I.A. Dynamic influence of the spindle servo drive on the drilling of deep narrow holes. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, no. 10, pp. 795–797. DOI: 10.3103/S1068798X15100111.
25. Ryzhkin A.A., Shuchev K.G., Klimov M.M. *Obrabotka materialov rezaniem* [Processing of materials by cutting]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2008. 418 p. ISBN 978-5-7890-0413-X.
26. Vul'f A.M. *Rezanie metallov* [Cutting of metals]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1973. 496 p.
27. Zorev N.N. *Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov* [Questions of mechanics of metal cutting process]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956. 367 p.
28. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.
29. Popov E.P., Pal'tov I.P. *Priblizhennyye metody issledovaniya nelineynykh avtomaticheskikh sistem* [Approximate methods for studying nonlinear automatic systems]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960. 792 p.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2020 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).