

УДК 621.9:531.3

DOI:10.30987/2223-4608-2020-4-22-31

**В.П. Лапшин, к.т.н., И.А. Туркин, к.т.н.,
А.И. Калинин, магистрант**

(ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»,
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону пл. Гагарина, 1)

E-mail: lapshin1917@yandex.ru; tur805@mail.ru; kalina-dom@rambler.ru

Оценка влияния падения при росте скорости резания, характеристики силы на регенеративный характер вибраций инструмента*

Выявленное в многочисленных исследованиях явление, связывающее падение силы резания при росте скорости обработки, существенным образом влияет на динамику процесса резания. В статье рассмотрена динамика процесса резания, учитывающая регенеративную природу вибраций инструмента, с оценкой влияния на вибрации изменений силы резания. Полученные результаты могут служить основой для подборов режимов резания в металлорежущих станках токарной группы.

Ключевые слова: токарная обработка; регенеративный эффект; динамика резания.

**V.P. Lapshin, Can. Sc. Tech., I.A. Turkin, Can. Sc. Tech,
A.I. Kalinin, Master student**

(FSBEI HE "Don State Technical University", 1, Gagarin Sq., Rostov-upon Don, Russia, 344000)

Drop impact estimate at cutting speed growth, force characteristics upon regenerative character of tool vibration

Revealed in numerous investigations a phenomenon connecting a cutting force drop at cutting speed growth effects considerably cutting dynamics. In the paper there is considered a dynamics of cutting taking into account the regenerative origin of tool vibrations with the estimate of cutting force changes impact upon vibrations. The results obtains may serve as a basis for a cutting mode choice in machine-tools of a lathe group.

Keywords: turning; regenerative effect; cutting dynamics.

Введение и постановка задачи исследования

Вибрации, возникающие при резании металлов в металлорежущих станках, являются следствием действия множества факторов, таких как биение шпиндельной группы, неточность шарико-винтовой подачи, неоднородность обрабатываемого металла, изменяющие-

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

ся свойства инструмента (износ) и т.д. Однако вибрации инструмента могут иметь природу, связанную с самим процессом обработки. Здесь важным фактором, генерирующим колебания инструмента (вибрации), является так называемый регенеративный эффект.

Впервые регенерацию колебаний при обработке металлов в рассмотрении ввели *Hahn R.S.* и *Tobias S.A.*, работы которых рассмотрены и получили продолжения в статьях более современных исследователей [1 – 2]. В дальнейшем этот эффект неоднократно исследо-

вался во многих работах зарубежных авторов, в нашей стране также занимаются вопросами описания и анализа нелинейной регенеративной динамики колебаний (вибраций) инструмента при обработке металлов резанием в рамках научного направления, руководимого В.Л. Заковоротным [3 – 4].

Как отмечается в приведенных выше исследованиях, вибрации в металлорежущих станках, вызванные регенерацией предыдущих колебаний, приводят к снижению качества обрабатываемых поверхностей, а в некоторых случаях и – браку. В этой связи задача расчета низко вибрационных режимов работы металлорежущих станков актуальна для современных систем металлообработки.

Вместе с тем, фактор регенеративной природы вибраций для случая токарной обработки неортогонального типа отдельно не изучался. В связи с этим, возникают вопросы, связанные с оценкой влияния на регенеративный эффект множества других факторов, влияющих на процессы протекающие в зоне резания. Одним из этих факторов является температурно-скоростной, который в самом общем случае, описывается как уменьшение силы реза при увеличении скорости обработки.

В отечественной периодике об этом факторе заговорили очень давно. Так, в работах М.Ф. Полетики [5] подробно рассматриваются причины и характер влияния скорости на силу резания. Здесь экспериментально определена зависимость усадки стружки от скорости резания, длина контакта стружки с резцом, а также сила резания. Авторами было выявлено, что с увеличением скорости резания усадка стружки уменьшается, как, например, в случае, приведенном на рис. 1.

Как показано на рис. 1, усадка стружки (коэффициент продольной усадки стружки K_c) почти экспоненциально уменьшается с ростом скорости резания и при скорости резания, достигающей 160 м/мин или 2667 мм/с, коэффициент усадки стружки приходит к некоторому постоянному значению. В данном случае, говоря о силе резания, имеется в виду главная тангенциальная составляющая силы. Однако в силу связанности процесса обработки, этот эффект прослеживается и в остальных составляющих силы, таких как, радиальная и осевая составляющие.

На рис. 1, а сознательно не рассмотрена область низких скоростей резания, при которых наблюдается явление наростообразования, приводящего к увеличению фактического пе-

реднего угла инструмента. Такое рассмотрение справедливо в связи с тем, что регенеративная природа самовозбуждения вибраций инструмента связана с высокими скоростями резания, где нарост уже не формируется.

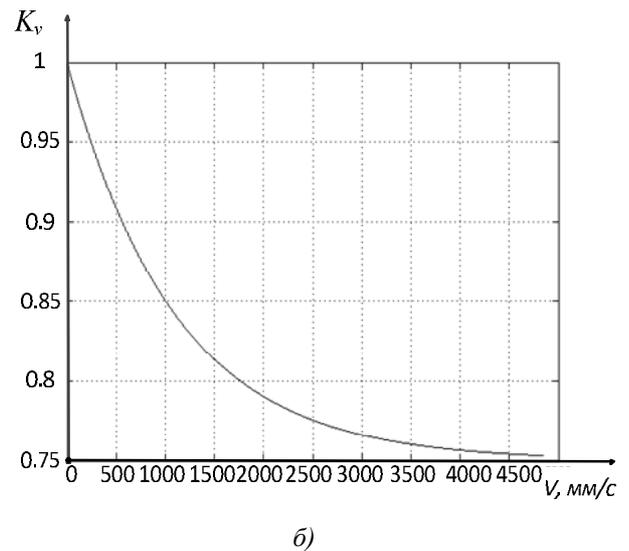
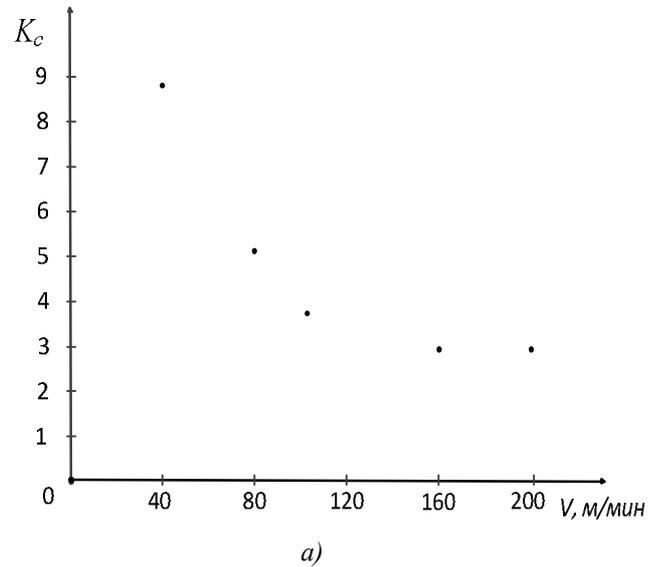


Рис. 1. Зависимости от скорости резания:

а – усадки стружки для случая обработки стали 10 от скорости резания; б – коэффициента, отражающего влияние скорости резания на силу

На рис. 1, б приведен пример моделирования нормированного относительно единицы скоростного коэффициента отражающего зависимость усадки стружки

$K_V = K_V^0 + K_V^\Delta e^{-\alpha(V-dz/dt)}$; где K_V^0 – наименьшее значение коэффициента; K_V^Δ – величина характеризующая приращение коэффициента при уменьшении скорости обработки;

α – коэффициент, характеризующий кривизну наклона характеристики.

В работе [5] Полетика М.Ф. указывает: «Длина контакта стружки с резцом в функции от скорости резания изменяется аналогично усадке стружки». Здесь же автор связывает градиенты напряжения в зоне пластической деформации и коэффициент трения по передней грани с величиной усадки стружки и длиной контакта стружки соответственно. Что касается роста градиентов напряжения в зоне резания, то данный процесс можно описать как процесс сужения зоны пластической деформации обрабатываемого материала (см. рис. 2).

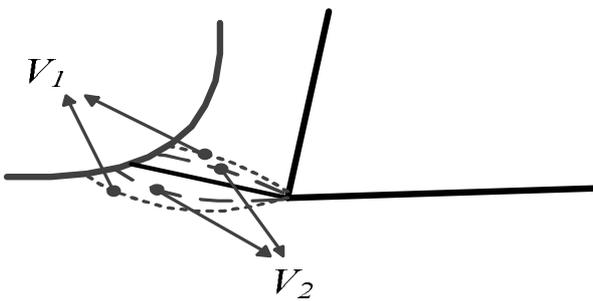


Рис. 2. Сужение зоны пластической деформации

Как видно из рис. 2, при выполнении условия увеличения скорости обработки металлов резания ($V_2 > V_1$), происходит стягивание зоны первичной деформации к линии сдвига, что приводит к росту градиентов напряжения внутри этой зоны. Благодаря этому, уменьшается реальный объем деформируемого материала, что приводит к падению силы резания (см. рис. 1). В пользу этого подхода к рассмотрению влияния скорости резания на напряженно-деформированное состояние в зоне резания, говорит тот факт, что исследования в области оценки распределения температуры при обработке металлов показывают, с одной стороны, увеличение температуры, а с другой стороны, увеличение вывода тепла через стружку [4].

Исходя из этого, аналогично экспоненциальной зависимости, представленной на рис. 1, сила резания также должна экспоненциально зависеть от скорости. Здесь допустимо упомянуть тот факт, что с ростом скорости резания растет средняя температура в зоне резания, которая существенным образом влияет на силу резания [4]. Именно поэтому принято рассматривать общий температурно-скоростной фактор. Однако для удобства рассмотрения мы примем, в качестве рабочей ги-

потезы, что данный фактор менее значителен, чем фактор влияния коэффициента усадки стружки. В этой связи, Полетика М.Ф. в своих работах указывает на кратковременность влияния температуры и ее незначительность [5].

Методика исследований

Исследования, представленные в этом пункте статьи, содержат математический анализ систем дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом. Для случая продольного точения реальные деформации инструмента относительно обрабатываемой детали можно разложить вдоль минимум трех осей [6]: 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 формообразующие движения инструмента (F_x, F_y, F_z), 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 связанной 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 $3 \otimes 3$; m – матрица инерционных коэффициентов; h – матрица коэффициентов демпфирования; c – матрица коэффициентов жесткости;

$\Psi = \{X, Y, Z\}^T \in \mathfrak{R}^{(3)}$ – вектор упругих деформаций инструмента;

$F(\Psi, t_p^{(0)}, S_p^{(0)}) = \{F_x, F_y, F_z\}^T \in \mathfrak{R}^{(3)}$ – вектор-функция сил, действующих на инструмент (реакция на формообразующие движения инструмента со стороны процесса резания); $t_p^{(0)}, S_p^{(0)}$ – глубина и оборотная подача, заданные программой обработки. При описании силы резания воспользуемся гипотезой о пропорциональности этой силы площади срезаемого слоя [6]:

$$F_i = \rho K_V t_p S \chi_i \quad (2)$$

где χ_i – некоторый коэффициент разложения общего вектора сил реакции на i -ю ось деформации инструмента; ρ – коэффициент, характеризующий предел прочности металла на разрыв и общую геометрию инструмента.

На введенные коэффициенты χ_i необходимо наложить нормировку, в виде:

$$\sqrt{\chi_1^2 + \chi_3^2 + \chi_3^2} = 1. \quad (3)$$

Реальная глубина обработки t_p будет зависеть от деформаций инструмента и обрабатываемой детали:

$$t_p = t_p^0 - y, \quad (4)$$

где t_p^0 – технологически заданная глубина обработки без учета деформаций инструмента и детали (определяется программой ЧПУ). Величину подачи на оборот S представим в виде следующего интеграла:

$$S = \int_{t-T}^t (v_x - \frac{dx}{dt}) dt, \quad (5)$$

где v_x – скорость подачи; T – период вращения детали, который в свою очередь может быть определен как:

$$T = \frac{r}{v_z - \frac{dz}{dt}}. \quad (6)$$

где r – радиус обрабатываемой детали.

Выражение (6), для дальнейшего анализа удобно представить в виде:

$$S = v_x T - \int_{t-T}^t \frac{dx}{dt} dt. \quad (7)$$

В выражении (7) наибольший интерес представляет второй член суммы, который равен площади под кривой $\frac{dx}{dt}$, посчитанной за период вращения шпинделя T (см. (6)). В англоязычных источниках принято рассматривать этот интеграл уже в виде суммы первообразных с подставленными пределами интегрирования, т.е. $\int_{t-T}^t \frac{dx}{dt} dt = x(t) - x(t-T)$.

Однако по нашему мнению более интересно рассмотреть именно геометрическую интерпретацию этого интеграла в приложении того, что функция $\frac{dx}{dt}$ представляет собой скорость колебаний инструмента в осевом направлении. При разложении этой скорости в гармонический ряд, мы должны получить сумму гармоник, одна из которых будет основной (наибольшей), что предоставляет новые возможности для анализа регенеративных колебаний в металлообработке.

Для понимания того, что дает гармонический анализ сигнала $\frac{dx}{dt}$ с точки зрения регенерации колебаний, рассмотрим простейший пример этого сигнала без учета возможного сдвига фазы, т.е., когда он представлен одной гармоникой ($\frac{dx}{dt} = A \sin(\omega_x t)$). Здесь A – амплитуда сигнала; ω_x – частота сигнала, период этого сигнала соответственно T_x . Интегральный оператор определяющий регенеративный эффект рассмотрим на примере ($A = 10$, $\omega_x = 2$), приведенном на рис. 3.

Для понимания того, что дает гармонический анализ сигнала $\frac{dx}{dt}$ с точки зрения регенерации колебаний, рассмотрим простейший пример этого сигнала без учета возможного сдвига фазы, т.е., когда он представлен одной гармоникой ($\frac{dx}{dt} = A \sin(\omega_x t)$). Здесь A – амплитуда сигнала; ω_x – частота сигнала, период этого сигнала соответственно T_x . Интегральный оператор определяющий регенеративный эффект рассмотрим на примере ($A = 10$, $\omega_x = 2$), приведенном на рис. 3.

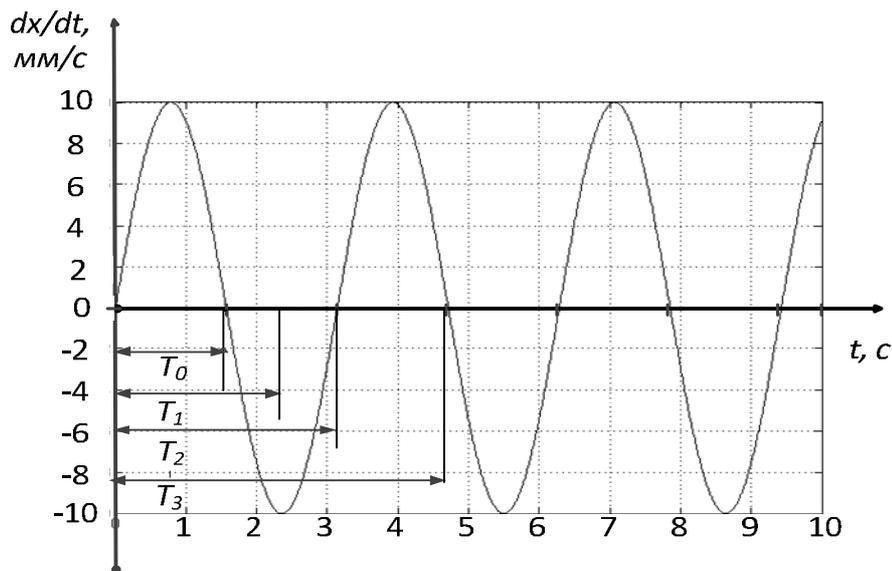


Рис. 3. Пример реализации интегрального оператора, определяющего регенеративный эффект

На рис. 3 значениями T_0, T_1, T_2, T_3 обозначены различные периоды вращения шпинделя с закрепленной в нем деталью, при этом соотношение частот вращения будет следующим $\omega_0 > \omega_1 > \omega_2 > \omega_3$. Интегральный оператор

$\int_{t-T}^t \frac{dx}{dt} dt$ для случаев скоростей вращения ω_0 и

ω_3 выдаст одинаковое максимальное значение равное площади под полупериодом функции

$\frac{dx}{dt}$, в случае скорости вращения шпинделя ω_1

этот же интегральный оператор выдаст только половину от своего максимально возможного значения, а в случае скорости ω_2 интегральный оператор выдаст значение равное нулю.

Исходя из этих рассуждений, ω_2 будет давать оптимальную скорость резания, т.е. скорость вращения шпинделя, при которой предыдущий след от резания не будет влиять на текущие характеристики процесса обработки. Отметим, что есть частоты ниже ω_2 , при которых также будет отсутствовать регенерация колебаний, например: $\omega_4 = \frac{\omega_2}{2}$ или $\omega_5 = \frac{\omega_2}{4}$. В

этих случаях периоды вращения шпинделя T_4, T_5 будут таковы, что интегральный оператор, определяющий регенеративный эффект, будет равен нулю. Частота вращения шпинделя выше оптимальной ω_2 , обеспечивающих отсутствие регенерации колебаний нет.

Прежде чем перейти к описанию экспериментов проведенных в среде Matlab, отметим, что форма реального сигнала $\frac{dx}{dt}$ всегда будет далека от случая, рассмотренного на рис. 3. Этот сигнал представляет собой сложную функцию, при разложении которой в гармонический ряд мы получим множество гармоник. Однако даже в этом случае этот гармонический ряд будет иметь некоторую основную составляющую, опираясь на которую мы можем проводить рассуждения, аналогичные нашему примеру.

Результаты моделирования

Перед приведением результатов моделирования оговорим параметры модели, представленной в выражении (1), а также условия эксперимента. Что касается условий эксперимента, то мы сконцентрируемся на оценке дина-

мики системы, описываемой выражением (1) в трех точках, отличающихся друг от друга частотой вращения шпинделя. При этом речь идет о точении на станке, где широко регулируется скорость обработки, но с одной и той же глубиной и оборотной подачей.

Первая точка эксперимента связана с оценкой динамики системы резания при условии совпадения периода вращения шпинделя с периодом, рассчитанным относительно основной частоты в спектре вибраций $\frac{dx}{dt}$, т.е. час-

тота вращения выбирается равной частоте ω_2 (см. рис.3). Вторым случаем будет определяться, исходя из подбора скорости вращения шпинделя, обеспечивающей максимальную регенерацию колебаний. Случай частоты ω_0 (см. рис.3) и последняя третья частота будет связана с попыткой найти варианты частот ω_4, ω_5 .

Во всех экспериментах 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 – $t_p = 2\text{мм}$; подача – $S = 0,1 \text{ мм}/\text{об}$; частота вращения шпинделя – $n = 1772 \text{ об}/\text{мин}$; $\rho = 550 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$; радиус обрабатываемой детали – $R = 50\text{мм}$; $K_v^0 = 0,75$; $K_v^\Delta = 0,25$; $\alpha = 0,00091$. Собственные частоты подсистемы инструмента: $\Omega_{0,x} = 460 \text{ с}^{-1}$; $\Omega_{0,y} = 350 \text{ с}^{-1}$; $\Omega_{0,z} = 398 \text{ с}^{-1}$.

Все представленные значения параметров близки к усредненным значениям, полученным авторами в результате серии натурных экспериментов, проведенных на станке мод.16K20 в 2017 г. В них подвергался обра-

ботке вал из стали 45, использовался инструмент с режущей пластиной 10113-110408 T15K6, скорость резания составляла 124 м/мин; подача – 0,11 мм/об и глубина резания – 1,0 мм. Более подробно эксперимент и

его результаты описаны в нашей предыдущей работе [7].

Результаты моделирования системы (1) с учетом коэффициента, представленного на рис. 4, в первой точке эксперимента, приведены на рис. 5.

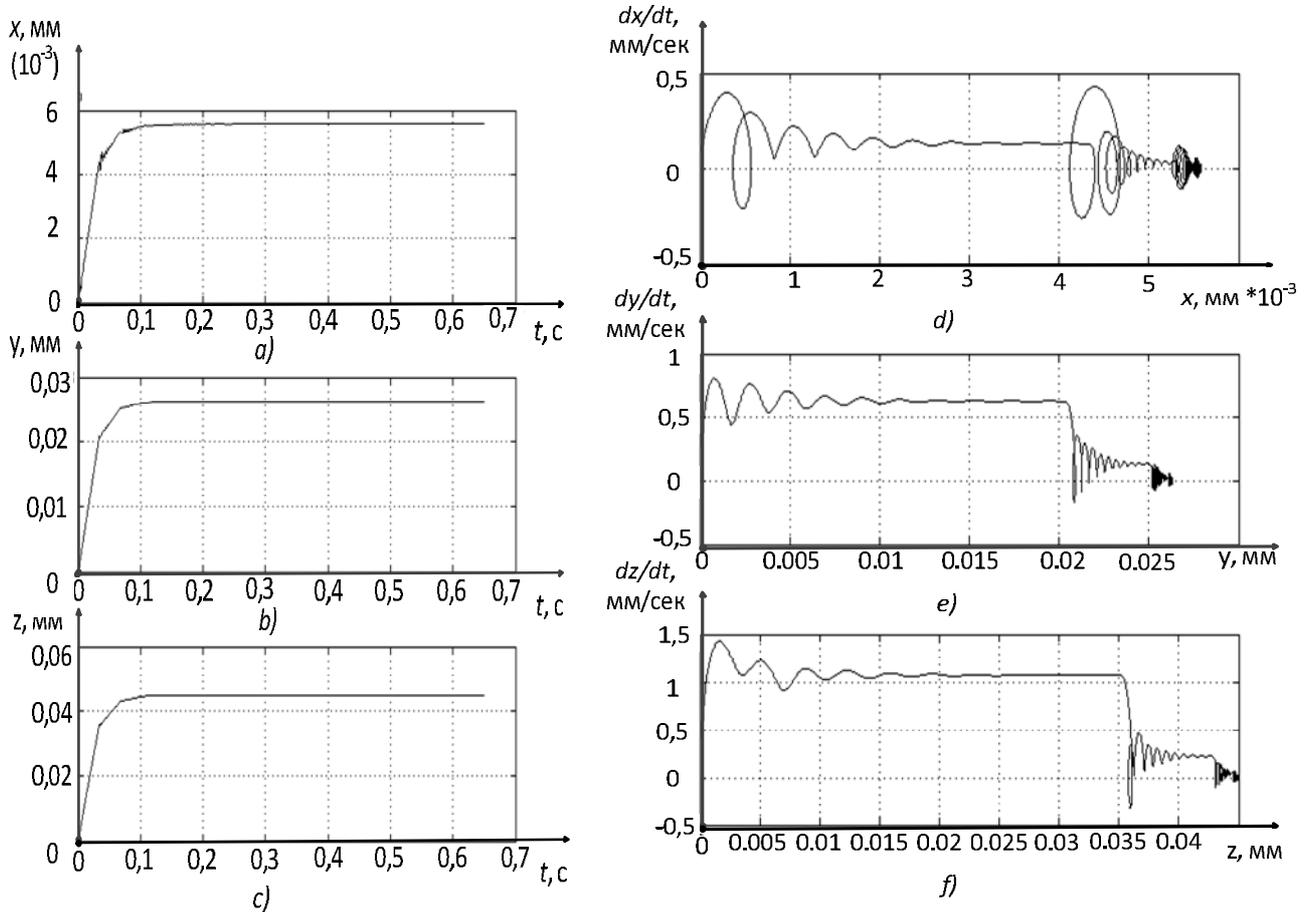


Рис. 4. Переходные характеристики координат деформационного движения инструмента и соответствующие им фазовые траектории ($n = 1772$ об/мин (29,54 Гц)):

a, d – по координате x ; *b, e* – по координате y ; *c, f* – по координате z

Как показано на рис. 5 динамика резания, не смотря на достаточно высокую добротность системы управления (смотри коэффициенты матрицы h), имеет высокое качество, т.е. вибрации инструмента затухают на переходных характеристиках (см. рис. 5 *a, b, c*), а соответствующие фазовые траектории, перестраиваясь после каждого оборота шпинделя, стягиваются к некоторому малому предельному циклу (см. рис. 5 *d, e, f*). Для численной оценки влияния регенеративного эффекта на динамику вибраций инструмента введем следующий интегральный показатель:

$$vA = \sqrt{\frac{1}{T_v} \left(\int_0^{T_v} \frac{dy}{dt}^2 dt + \int_0^{T_v} \frac{dy}{dt}^2 dt + \int_0^{T_v} \frac{dz}{dt}^2 dt \right)}, \quad (8)$$

где vA можно интерпретировать, как фоновый шум сигнала или энергию вибрационного сигнала за период наблюдения (эксперимента) T_v , которая для случая, представленного на рис. 4, составляет 78,75 мм/с. Для понимания того, что речь идет именно об оптимальном, с точки зрения регенерации колебаний, варианте скорости резания, оценим частотный спектр сигнала $\frac{dx}{dt}$, приведенный на рис. 5.

Как показано на рис. 5, на основной частоте колебаний (29,54 Гц) сигнал вибраций инструмента отсутствует, т.е. принцип, описанный в ходе анализа рис. 3, здесь выполняется. На рис. 5 видно, что ближайшие субчастоты, находящиеся в окрестности основной несущей

частоты, имеют достаточно большие и ярко выраженные максимумы. Это связано с тем, что энергия вибрационного сигнала должна

сохраняться, и поэтому при задавливании основной частоты колебаний вырастает сигнал на ближайших субчастотах.

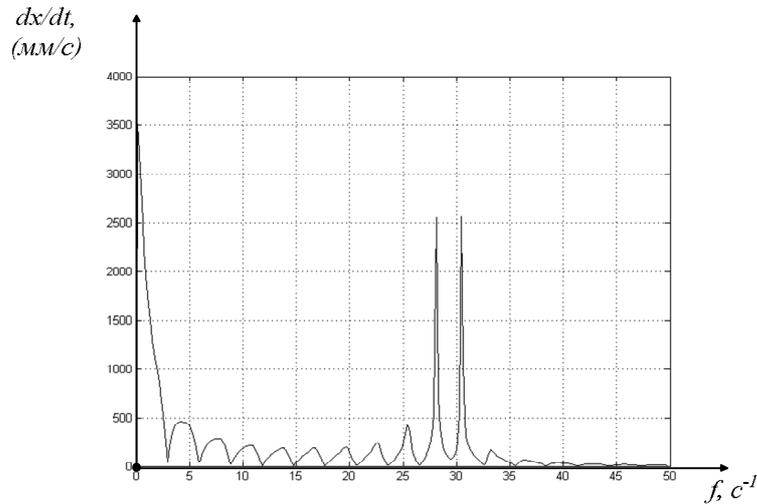


Рис. 5. Спектр мощности сигнала $\frac{dx}{dt}$ для $n = 1772$ об/мин (29,54 Гц)

На рис. 6 приведен второй рассматриваемый нами случай, т.е. вариант максимума влияния регенеративного эффекта на динамику системы резания.

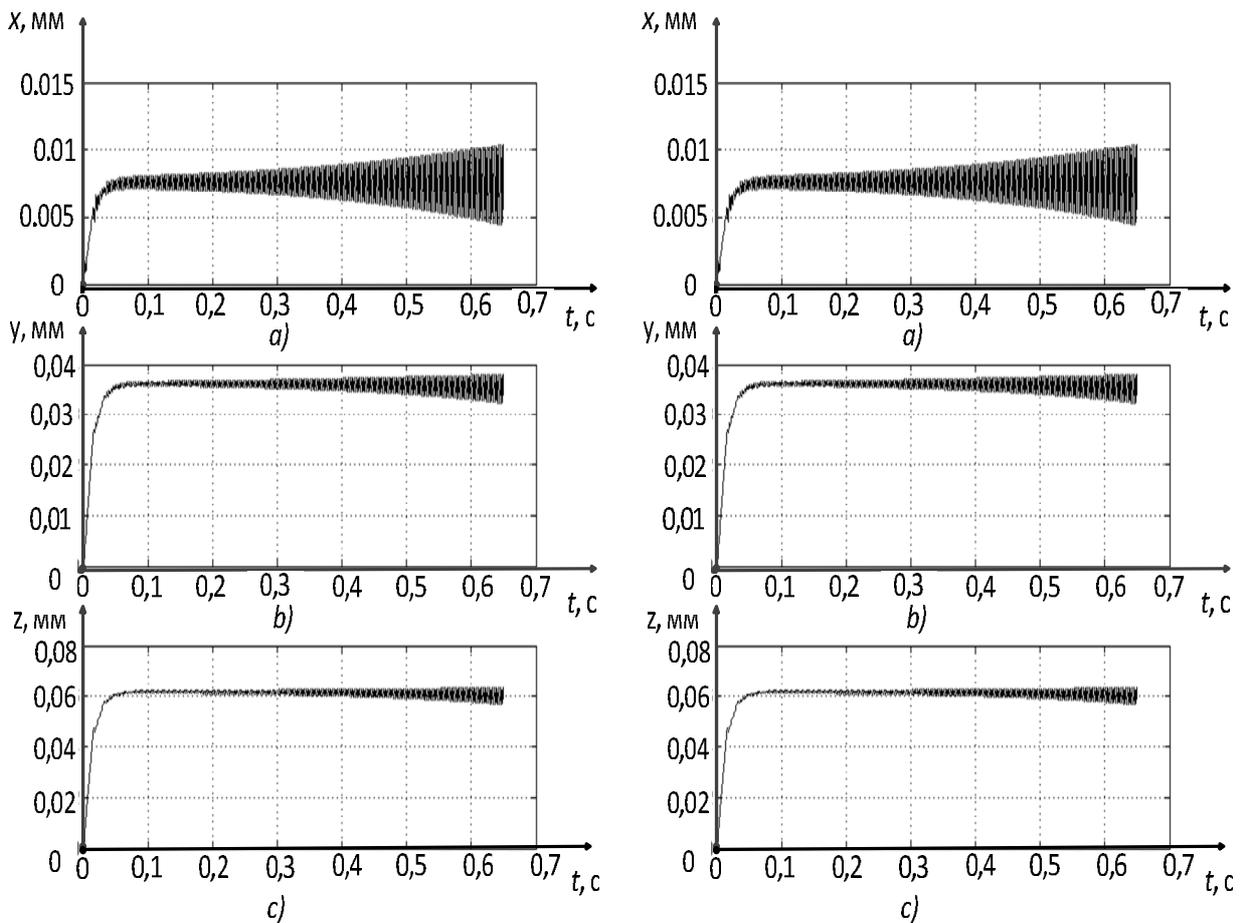


Рис.6. Переходные характеристики координат деформационного движения инструмента и соответствующие им фазовые траектории ($n = 3508$ об/мин (58,5 Гц)):

a, d – по координате x ; b, e – по координате y ; c, f – по координате z

На рис. 6, *a, б, с* показано, что вибрации инструмента теряют устойчивость, а соответствующие им фазовые траектории, перестраиваясь после каждого оборота шпинделя, движутся к некоторой неустойчивой тороидальной форме (см. рис. 6, *d, e, f*). Значение энергии вибрационного сигнала за период наблюдения для случая колебаний, представленных на рис. 6, составляет 801,1 мм/с, что в 8 раз больше предыдущего значения. Отметим, что

из всех приведенных вариантов выбора скорости обработки, этот – наихудший с точки зрения устойчивости вибрационной динамики инструмента. Исходя из этого, можно сделать вывод о необходимости исключения рассматриваемого варианта режима резания из перечня допустимых. Анализ спектра мощности сигнала $\frac{dx}{dt}$ приведен на рис. 7.

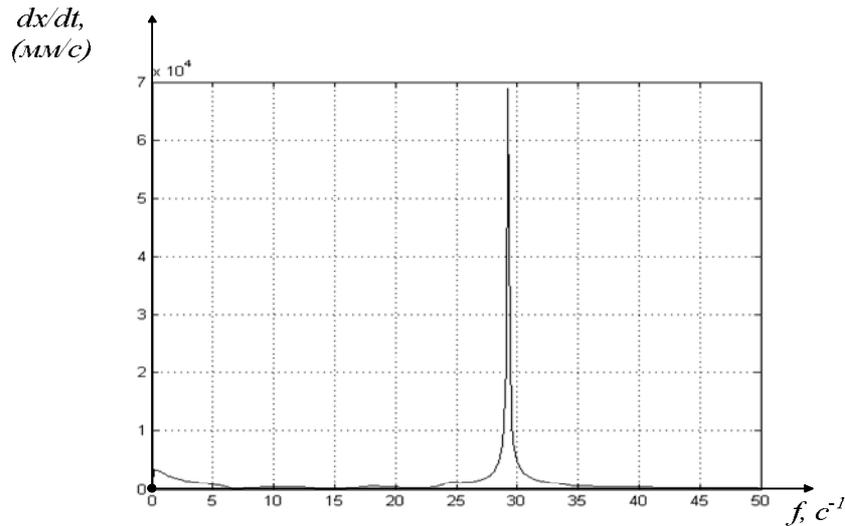


Рис. 7. Спектр мощности сигнала $\frac{dx}{dt}$ для $n = 3508$ об/мин (58,5 Гц)

Как показано на рис. 7, основная частота вибраций в результате подбора скорости резания, обеспечивающей максимум регенерации колебаний, существенно усилена, а боковые субчастоты полностью исчезли. Сопоставляя рис. 5 и 7 можно сделать вывод об упрощении формы сигнала при выполнении условий максимума влияния регенеративного эффекта. Сигнал, представленный на рис. 7, по своей форме очень близок к одночастотному случаю, представленному на рис. 3.

При рассмотрении динамики системы резания при малых скоростях резания, но подобранных в интересах реализации третьего варианта нашего исследования (случай ω_4, ω_5 рис. 3), необходимо учитывать тот факт, что сила резания в этой области частот вращения шпинделя будет выше, чем в предыдущих рассмотренных нами случаях. Это связано с действием скоростного фактора, моделируемого на рис. 4. Динамика системы резания для случая частоты вращения шпинделя в 882 об/мин (14,7 Гц) приведена на рис. 8.

Как показано на рис. 8, в системе устанавливается некоторое пограничное состояние,

характеризующееся сложной природой колебаний, которые имеют структуру близкую к тороидальной. При этом сам процесс несколько хуже по качеству, чем в случае, представленном на рис. 5. Значение энергии вибрационного сигнала за период наблюдения для случая колебаний, представленных на рис. 8, составляет 108,2 мм/с, что больше первого значения, но существенно ниже предыдущего случая (см. рис. 6). Анализ спектра мощности сигнала $\frac{dx}{dt}$, для рассматриваемого случая резания приведен на рис. 9.

На рис. 9 и 5 отсутствует сигнал на основной частоте регенерации колебаний инструмента. Однако две гармоники основного сигнала, а также фоновый сигнал, на котором они находятся, значительно усилены. Этот эффект обусловлен усилением сигнала за счет повышения силы резания, при уменьшении скорости обработки (см. рис. 1). Таким образом, именно скоростной фактор изменения силы резания приводит к снижению качества обработки металлов на низких скоростях резания.

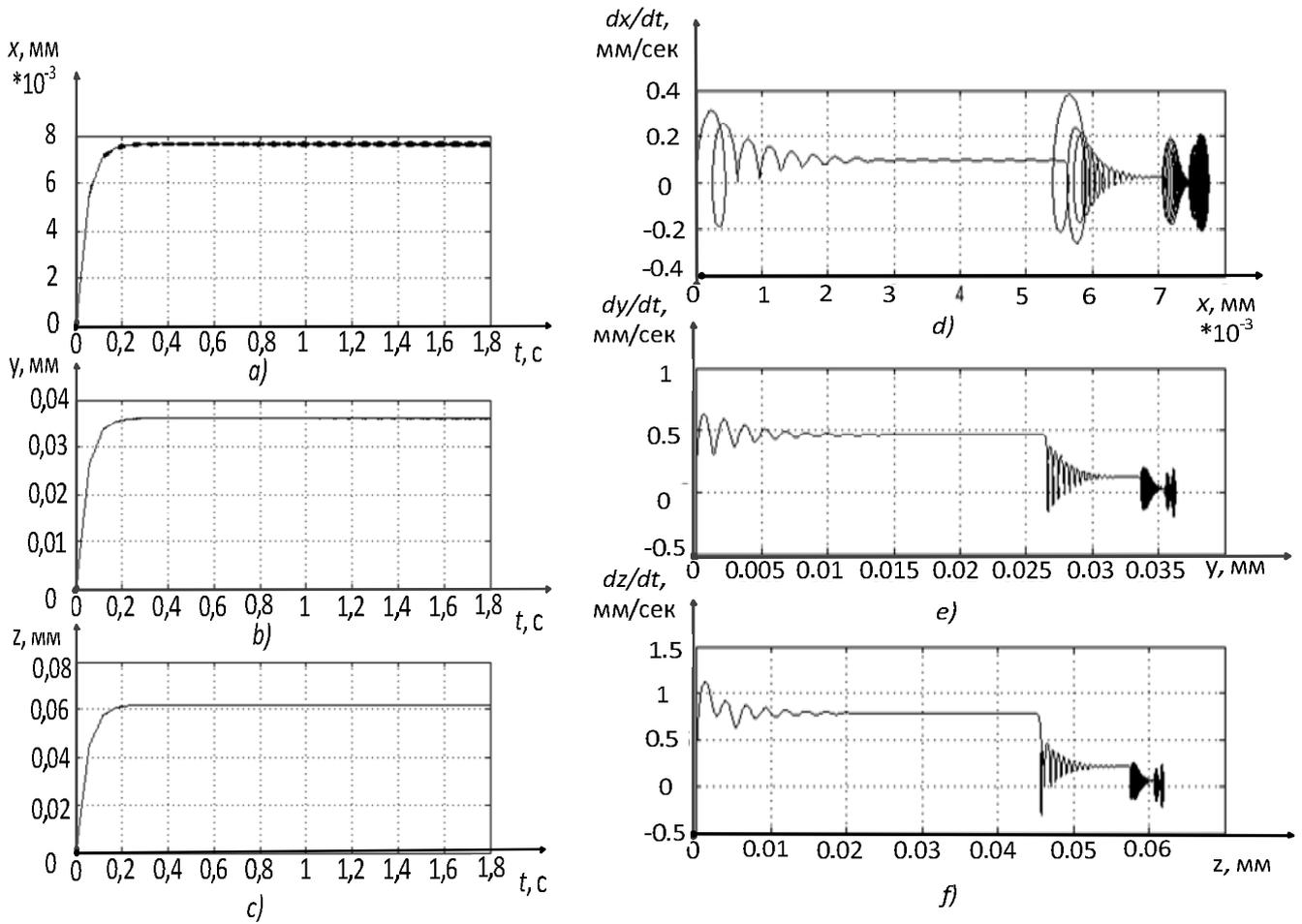


Рис.8. Переходные характеристики координат деформационного движения инструмента и соответствующие им фазовые траектории ($n = 882$ об/мин (14,7 Гц)):

a, d – по координате x ; b, e – по координате y ; c, f – по координате z

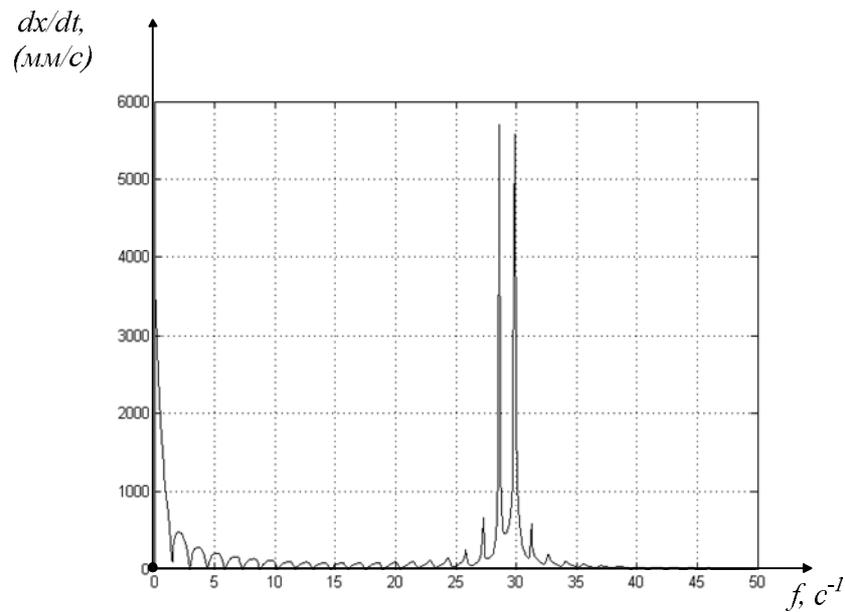


Рис. 9. Спектр мощности сигнала $\frac{dx}{dt}$ для $n = 882$ об/мин (14,7 Гц)

Заключение

Таким образом, нами исследована система вибрационных движений инструмента в условиях токарной обработки металлов на металлорежущих станках в трех точках, отличающихся друг от друга частотой вращения шпинделя. На основании предложенного в статье подхода была определена оптимальная, по нашему мнению, скорость резания, а также – наихудшая скорость обработки.

Выявлено, что при скорости вращения шпинделя, обеспечивающей период вращения близкий к периоду основных колебаний скорости деформационных движений инструмента в осевом направлении (направление подачи) наблюдается резкое уменьшение амплитуды вибраций. Однако это приводит к некоторому усложнению формы вибрационного сигнала. На частоте вращения шпинделя (большая скорость резания), обеспечивающей максимальную регенерацию колебаний в системе резания, амплитуда вибраций неограниченно нарастает, а форма вибрационного сигнала существенно (по сравнению с предыдущим случаем) упрощается.

В последнем случае, рассмотренном в работе, не удалось добиться повышения качества обработки за счет выключения колебаний на основной частоте скорости деформационных движений инструмента в осевом направлении. Это связано с влиянием зависимости характеристики силы резания от скорости обработки.

Проведенные исследования в целом представляют высокий научный интерес. Однако в математической модели не учтен фактор влияния на процесс термодинамической подсистемы системы резания. На взгляд авторов именно термодинамическая подсистема во многом будет определять регенеративную природу сложной динамики системы резания. Исходя из этого, в качестве дальнейшего развития проведенных исследований планируется введение в систему уравнений дополнительной подсистемы, описывающей термодинамику резания, и проведение подобных исследований уже с этой, новой системой уравнений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Тлусты J., Исмаил F.** Basic non-linearity in machining chatter // *CIRP Annals*. – 1981. – Т. 30. – №. 1. – С. 299-304.
2. **Stépán G., Insperger T., Szalai R.** Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2005. – Т. 15. – №. 09. – С. 2783-2798.
3. **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. – Т. 206. – С. 68-73.
4. **Лапшин, В.П., Туркин, И.А., Христофорова, В.В., Бабенко, Т.С.** Моделирование влияния температуры в зоне контакта инструмента и детали на динамику деформационных движений инструмента при токарной обработке // *СТИН*. – 2019. – №10. – С. 31-37.
5. **Поветика, М.Ф.** Анализ напряженного состояния в контактном слое стружки при резании // *Перспективы развития резания конструкционных материалов*. – М.: ЦНТО МАШПРОМ, 1980. – С. 18-22.
6. **Лапшин, В.П., Бабенко, Т.С., Христофорова, В.В.** Об одном частном случае синтеза системы управления процессом обработки металлов точением // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2017. – Т. 17. – № 1(88). – С.75-84.

REFERENCES

1. Tlusty J., Ismail F. *Basic non-linearity in machining chatter* // *CIRP Annals*. – 1981. – Т. 30. – №. 1. – Pp. 299-304.
2. Stépán G., Insperger T., Szalai R. *Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes* // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2005. – Т. 15. – №. 09. – Pp. 2783-2798.
3. 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. – Т. 206. – Pp. 68-73.
4. Lapshin, V.P., Turkin, I.A., Khristophorova, V.V., Babenko, T.S. *Modeling of temperature impact in contact area of tool and part upon tool deformation movement dynamics at turning* // *STIN*. – 2019. – No.10. – pp.31-37.
5. Poletika, M.F. *Analysis of stress in contact layer of chips at cutting* // *Development outlooks of structural material cutting*. – М.: *CNTO MASHPROM*, 1980. – pp. 18-22.
6. Lapshin, V.P., Babenko, T.S., Khristophova, V.V. *To one particular case of synthesis of metal turning control system* // *Bulletin of Don State Technical University*. – 2017. – Vol.17. – No.1(88). – pp. 75-84.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров