

ВИБРАЦИОННОЕ ТОЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ И УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЯМИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ

Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Рязанцев В.Г.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород

Ключевые слова: вибрация, режущий инструмент, частота, амплитуда, вынуждающая сила, асимметричные колебания.

Аннотация. В работе рассматриваются вынужденные колебания, создаваемые специальными, как правило, вибрационными, устройствами, которые позволяют регулировать параметры вынужденных колебаний, а именно, частоту и амплитуду колебаний при переходе на новые режимы резания. В работе не затрагиваются вопросы обеспечения технологических параметров, таких как скорость, глубина резания, подача, сила резания, качество обработки. В работе, прежде всего, рассматриваются вопросы организации характера и параметров вибрации, если в таковой всё-таки появляется необходимость прибегать и использовать в технологических операциях точения деталей. Использование вибрационных методов обработки деталей при точении опирается на использование асимметричных колебаниях режущего инструмента или детали. Некоторые положения в статье носят характер «в порядке обсуждения».

VIBRATORY TURNING OF STRUCTURAL STEELS AND CONTROL OF VIBRATIONS OF THE CUTTING TOOL IN TURNING PARTS

Gerasimov M.D., Lyubimiy N.S., Ryazantsev V.G.

Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod

Keywords: vibration, cutting tool, frequency, amplitude, driving force, asymmetric vibrations.

Abstract. The paper considers forced vibrations created by special, usually vibrational, devices that allow you to adjust the parameters of forced vibrations, namely, the frequency and amplitude of vibrations during the transition to new cutting modes. The work does not touch upon the issues of ensuring technological parameters, such as speed, depth of cut, feed, cutting force, processing quality. In the work, first of all, questions of the organization of the nature and parameters of vibration are considered, if it nevertheless becomes necessary to resort and use turning parts in technological operations. The use of vibration methods for machining parts when turning is based on the use of asymmetric vibrations of the cutting tool or part. Some of the provisions in the article are in the nature of "in the order of discussion".

Введение. Использование вибрационных технологий и вибрационных устройств в технологических процессах механической обработки металлов на металлорежущих станках является достаточно редким явлением, в силу того, что даже «полезная» вибрация в данном случае входит в противоречие с требованиями к жёсткости системы СПИД. Однако, в ряде исследований, проводимых в последнее время, всё чаще авторы исследований обращаются к гибриду традиционных технологий металлообработки, совмещаемых с вибрационными [1-5]. Основным условием применения вибрационных технологий и вибрационных устройств являются, очевидно, такие параметры как габариты обрабатываемых деталей, отверстий и поверхностей, а также, сила, скорость, глубина резания, подача. Вполне оправданным может являться использование колебаний режущего инструмента при токарной обработке крупногабаритных деталей, к которым относятся бандажки и опорные ролики цементных вращающихся печей и сушильных барабанов. В то же время, направление использования вибрационных методов обработки деталей в токарных операциях, продолжает развиваться и систематически пополняется новыми результатами исследований.

Методы исследований. В работе использованы классические методы анализа научных публикаций, анализа патентной документации и классические методы аналитической оценки

опубликованных результатов, относящихся к асимметричным колебаниям с использованием анализа многочленов ряда Фурье.

Содержание исследований. В работе [1] описан метод управления колебаниями режущего инструмента с использованием адаптивной системы управления и дополнительного источника колебаний.

Показано, что обработка крупногабаритных деталей связана со значительными вибрациями режущего инструмента. Для повышения точности обработки и снижения скорости износа инструмента предлагается [1] использовать некоторый источник колебаний, способный «подавить» первоначальную вибрацию детали (A_D), возникающую при точении крупногабаритных деталей. Этот источник колебаний, устройство, является источником вынужденных колебаний с амплитудой (A_{II}). Частота и амплитуда колебаний режущего инструмента подбираются экспериментально или на основании результатов моделирования. Источник вынужденных колебаний инструмента создает дополнительные колебания в зоне обработки. Физически, дополнительные колебания должны представлять собой зеркальное отражение, по амплитуде и частоте, колебаний инструмента при резании детали. Это положение предполагает, что, при сложении таких двух колебаний, суммарные колебания стремятся к вырождению.

$$A_D + (-A_{II}) = A_{\text{сумм}} \rightarrow 0, \quad (1)$$

где A_D – амплитуда колебаний режущего инструмента при обработке детали без источника колебаний инструмента; A_{II} – амплитуда режущего инструмента при обработке детали с источником вынужденных колебаний; $A_{\text{сумм}}$ – амплитуда суммарного колебания.

В тексте [1], в силу поставленных задач, не приводятся какие-то численные значения геометрии и кинематики процесса резания. Также не приводятся параметры вибрационной колебательной системы.

Анализ приведенных в [1] рисунков, характеризующих процесс, позволяет определить некоторые параметры вибрации источника вынужденных колебаний. На отрезке времени 0,01с [1, рис. 1, стр. 32] изображены 8 периодов колебаний. Таким образом, период колебаний составляет 0,00125с, а частота колебаний 800 Гц. Характерны ли такие параметры для процесса точения крупногабаритных деталей, следует рассматривать отдельно. И второй вопрос. Является ли период колебаний величиной постоянной, в связи с не постоянными величинами выработки обрабатываемых поверхностей?

Очевидно, в технических задачах с использованием вибрации, вопрос, в первую очередь, должен стоять о силах, так как сложение колебаний, прежде всего относится к сложению сил, со своими точками приложения, с направлением действия, с частотами, амплитудами и начальными фазами. В данном случае, колебания величины силы резания связаны с колебаниями площади срезаемой стружки, с величиной удельного сопротивления резанию, с одной стороны. С другой стороны, колебания величины вынуждающей силы дополнительного источника связаны с параметрами массы, частоты колебаний и начальной фазы самого вибрационного узла, согласуясь с величиной и характером изменения силы резания.

В работе [2] представлены теоретические аспекты процесса создания и поддержания вибрационного движения режущей кромки инструмента при токарной обработке заготовок с целью обеспечения устойчивого дробления сливной стружки, рассмотрены конструкции устройств для реализации вибрационного точения, приведены результаты экспериментальных исследований.

В данной работе рассматриваются вынужденные колебания, создаваемые специальными устройствами, которые позволяют регулировать частоту и амплитуду колебаний при переходе на новые режимы резания [3, 4].

Одним из основных теоретических и практических аспектов, или точнее, инструментов работы [2] является применение разработанного авторами метода точения с наложением на подачу асимметричных колебаний. Оценивать асимметрию цикла колебаний предложено коэффициентом асимметрии:

$$\xi = \frac{T_{ep}}{T_{ome}} = \frac{a}{b}, \quad (2)$$

где T_{ep} и T_{ome} – время, используемое на врезание инструмента в заготовку в направлении подачи и отвод, соответственно, в пределах каждого периода колебаний;

a и b – соответственно, части оборота заготовки, соответствующие прямому (врезание) и обратному (отвод) ходу инструмента.

Авторами работы [2] данный метод рассматривается как метод асимметричного вибрационного точения. Величина коэффициента асимметрии по времени периода колебаний может составлять, при необходимости или при задаваемых условиях, следующие варианты значений: $\xi < 1,0$; $\xi > 1,0$ и $\xi = 1,0$.

Установлено [2], что при увеличении асимметрии цикла колебаний высота гребешков микронеровности, следовательно, и шероховатость обработанных поверхностей будет снижаться.

Рассматривая цикл движения инструмента как периодическую функцию $f(x)$, авторы используют разложение с помощью ряда Фурье.

$$f(x) = \frac{8A}{x_1 x_2} \cdot \sin \frac{x_1}{2} \cdot \sin x + \frac{8A}{2^2 \cdot x_1 x_2} \cdot \sin \frac{2x_1}{2} \cdot \sin 2x + \frac{8A}{3^2 \cdot x_1 x_2} \cdot \sin \frac{3x_1}{2} \cdot \sin 3x + \dots + \frac{8A}{k^2 x_1 x_2} \cdot \sin \frac{kx_1}{2} \cdot \sin kx = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8A}{k^2 x_1 x_2} \cdot \sin \frac{kx_1}{2} \cdot \sin kx. \quad (3)$$

На рисунке 1 представлен, к примеру [2], график функции $f(x)$, построенный по выражению (3) с помощью пакета программ Mathcad для следующих исходных данных:

$$A=0,1 \text{ мм}, X_1 = \frac{8}{5}\pi; X_2 = \frac{2}{5}\pi.$$

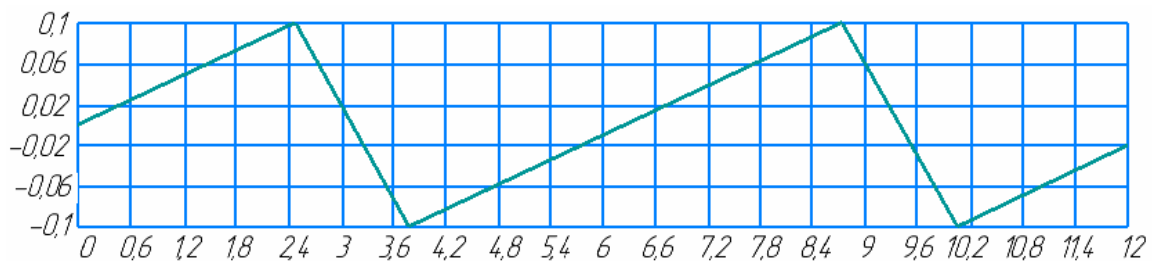


Рис. 1. График [2] функции $f(x)$ по выражению (3)

В связи с тем, что X_1 и X_2 – части периода, приходящиеся на врезание инструмента в заготовку и отвод, соответственно, то отношение X_1 к X_2 есть коэффициент асимметрии ξ . Для принятых в примере значений X_1 и X_2 коэффициент асимметрии $\xi=4$. Из рисунка 1 видно, что отношение протяжённости восходящей линии, соответствующей части периода, приходящейся на отвод инструмента, измеренных вдоль оси x , также равно четырём, что подтверждает правильность формулы (3).

В силу правила о воспроизводимости результатов расчёта, проводим самостоятельно аналогичные расчёты по уравнению (3) с обозначенными параметрами.

Задаёмся первыми 6-ю слагаемыми уравнения (3). Тогда, первые множители первых шести слагаемых будут иметь значения, приведенные в таблице 1, в которой приведены и значения вторых множителей. Текущую величину x в пределах $0 \dots 6,28$ рад разбиваем на двадцать интервалов по $0,314$ рад.

Вычисляем изменение первых шести слагаемых (I, II, ..., VI) ряда (3) и вносим в таблицу 2.

Графики изменения величин, соответствующих составляющих сумму (3), из данных таблицы 2 приведены на рисунке 2.

Табл. 1. Величина первых и вторых сомножителей первых шести слагаемых уравнения (3)

Для слагаемого №	I	II	III	IV	V	VI
$\frac{8 \cdot A}{k_i^2 \cdot x_1 \cdot x_2}$	0,12678	0,031695	0,014087	0,007924	0,005071	0,003522
$\sin \frac{k_i \cdot x_1}{2}$	0,588816	-0,95184	0,0949868	-0,58365	-0,00637	0,593953

Табл. 2. Текущие значения составляющих слагаемых по (3)

	x	I	II	III	IV	V	VI
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,314	0,023057	-0,01772	0,010822	-0,0044	3,23E-05	0,00199
2	0,628	0,043859	-0,02869	0,01273	-0,00272	5,14E-08	-0,00123
3	0,942	0,060372	-0,0287	0,004153	0,002712	-3,2E-05	-0,00123
4	1,256	0,070982	-0,01776	-0,00784	0,004404	-1E-07	0,001987
5	1,57	0,07465	-4,8E-05	-0,01338	1,47E-05	3,23E-05	9,99E-06
6	1,884	0,071018	0,017686	-0,0079	-0,00439	1,54E-07	-0,00199
7	2,198	0,060442	0,028671	0,004092	-0,00274	-3,2E-05	0,001218
8	2,512	0,043955	0,028716	0,01271	0,0027	-2,1E-07	0,001242
9	2,826	0,02317	0,017803	0,010859	0,004408	3,23E-05	-0,00198
10	3,14	0,000119	9,61E-05	6,39E-05	2,95E-05	2,57E-07	-2E-05
11	3,454	-0,02294	-0,01765	-0,01078	-0,00439	-3,2E-05	0,001996
12	3,768	-0,04376	-0,02866	-0,01275	-0,00275	-3,1E-07	-0,00121
13	4,082	-0,0603	-0,02873	-0,00421	0,002688	3,23E-05	-0,00125
14	4,396	-0,07094	-0,01784	0,007792	0,004413	3,6E-07	0,001981
15	4,71	-0,07465	-0,00014	0,01338	4,42E-05	-3,2E-05	3E-05
16	5,024	-0,07106	0,017608	0,007948	-0,00439	-4,1E-07	-0,002
17	5,338	-0,06051	0,028641	-0,00403	-0,00276	3,23E-05	0,001202
18	5,652	-0,04405	0,028745	-0,01269	0,002676	4,63E-07	0,001259
19	5,966	-0,02328	0,01788	-0,0109	0,004417	-3,2E-05	-0,00198
20	6,28	-0,00024	0,000192	-0,00013	5,89E-05	-5,1E-07	-4E-05

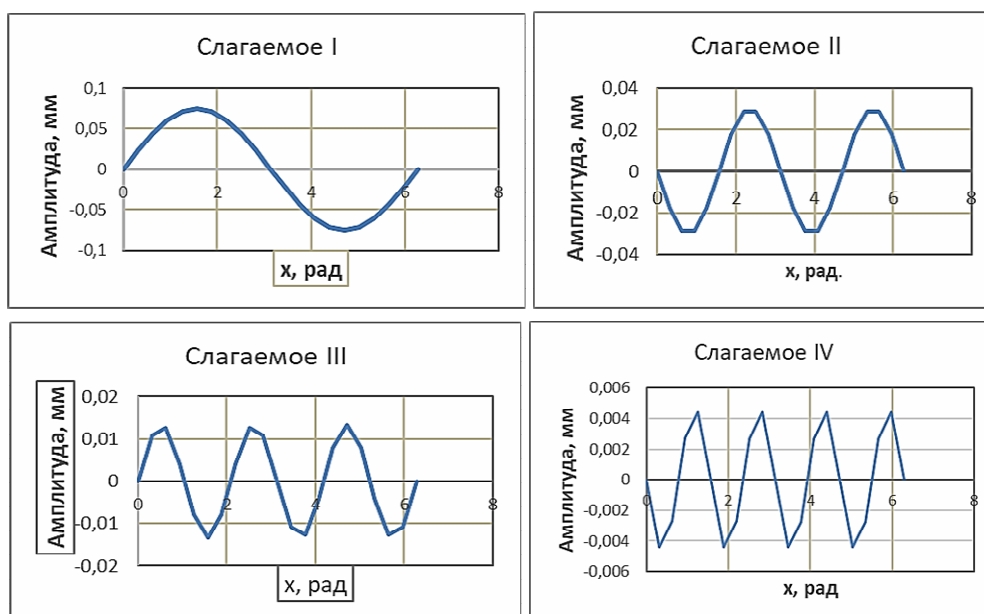


Рис. 2. Графики изменения величин, соответствующих составляющих сумму (3), для каждого из первых четырёх слагаемых

Практический интерес представляют суммы слагаемых уравнения (3). Приведём графики этих сумм от 2 до 6 слагаемых (рис. 3). При этом, под каждым графиком отмечаем полученный коэффициент асимметрии $\xi_2 \dots \xi_6$.

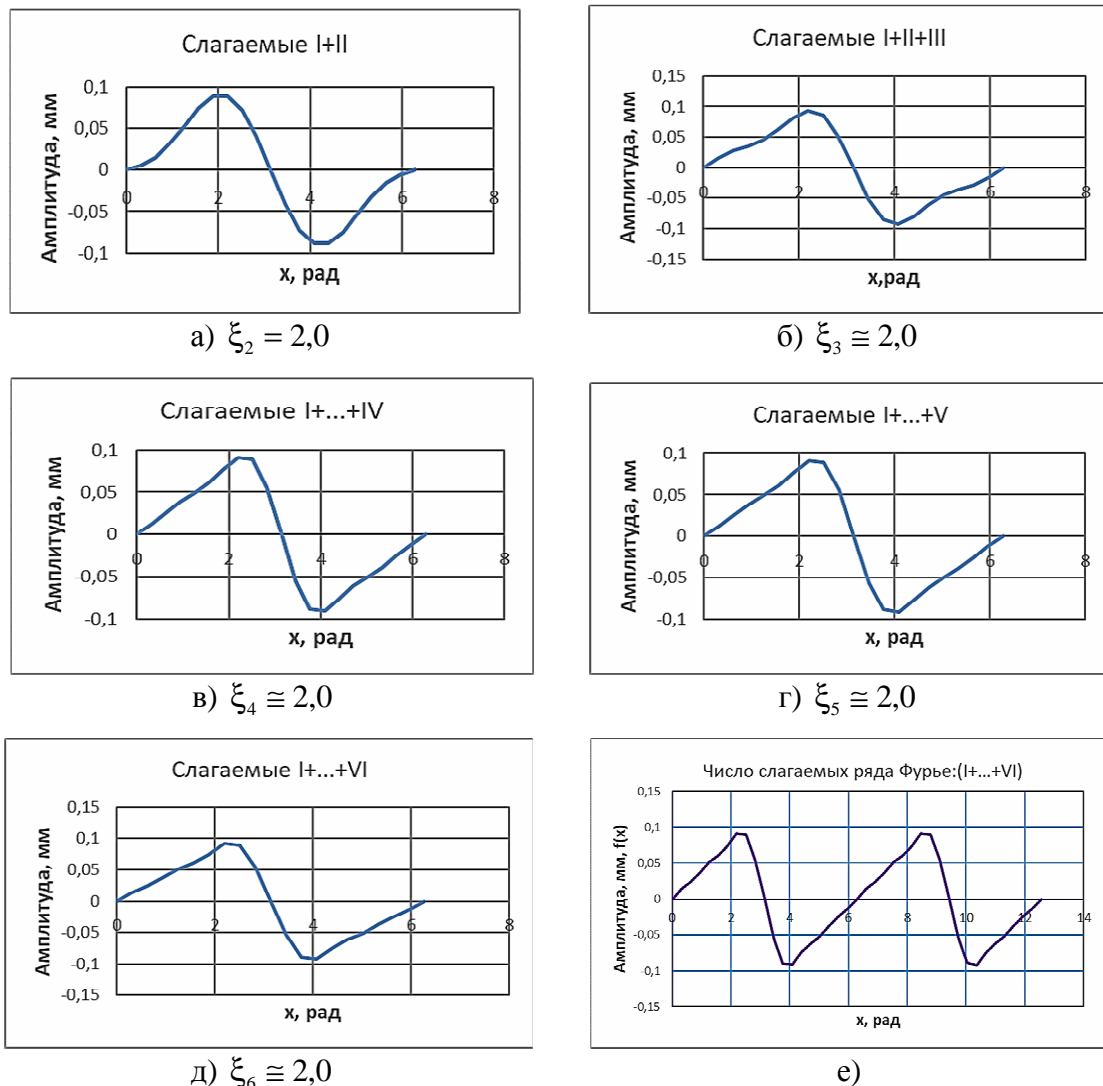


Рис. 3. Графики изменения функции $f(x)$ по уравнению (3) при сложении, соответственно, 2-х, 3-х, ..., 6-ти слагаемых (а, б, в, г, д, е) ряда Фурье, е – для двух периодов колебания

Как видно, из расчётов и графиков, величина коэффициента асимметрии $\xi = \frac{T_{ep}}{T_{отв}} = \frac{a}{b}$

составляет для первого слагаемого, т.е. для одиночного импульса, $\xi_1 = 1,0$. Сумма слагаемых остальных вариантов, от 2 до 6, позволяет получить коэффициент асимметрии практически величиной постоянной, который остаётся равным, примерно, $\xi = 2,0$, в отличие от приведенного в [2, стр. 42]: $\xi = 4,0$.

Обсуждение. Важным моментом вибрационных процессов с асимметричными колебаниями является механизм их генерирования. В работе [2] рассматривается генерирование поверхностью кулачка, профиль которого выполняется сопряжением прямой и обратной ветви спирали Архимеда. В результате создаются направленные колебания за счёт усилия кулачка, которое по гидромеханической цепи приборов и механизмов передаётся на токарный инструмент. Усилие имеет две составляющих, из которых одна создаётся вибрационным устройством и действует в направлении врезания инструмента, а вторая, создаётся усилием пружины, в направлении отвода инструмента. Причём, продолжительность времени действия этих усилий на врезание – $F_{врез}$ и на отвод – $F_{отв}$,

соответственно: T_{ep} и $T_{отв}$ определяется соотношением, которое определено, как коэффициент асимметрии (2). Таким образом, данные колебания можно считать асимметричными, в пределах каждого колебания, лишь по отношению к времени врезания и отвода инструмента. Повышение, так называемого коэффициента асимметрии можно изменять регулированием, изменением, длины прямой и обратной ветви спирали Архимеда на поверхности кулачка. В этом случае необходимо каждый раз вычерчивать новый график изменения амплитуды в пределах одного периода и выполнять разложение функции в ряд Фурье, с новым соотношением T_{ep} и $T_{отв}$, так как по уравнению (3) получить колебания с коэффициентом асимметрии по времени в пределах одного цикла можно в районе 2,0. Следует обратить внимание на конструктивные решения исполнительных устройств для реализации принимаемого способа обработки. Принципиально, устройство для реализации способа вибрационного точения с наложением на подачу инструмента асимметричных колебаний, напоминает кинематическую схему щековой дробилки со сложным движением подвижной щеки, когда эксцентриковый вал перемещает подвижную щеку к неподвижной, для выполнения процесса дробления, а затем пружина выполняет роль возвратного механизма.

Вывод. В работе [2], как и в работе [1] не в полной мере задействован основной параметр вибрационного процесса, а именно, вынуждающая сила, а использованы её составляющие параметры, производные: частота колебаний, амплитуда, начальные фазы. Поэтому, в таких задачах, всегда стоит вопрос регулирования, настройки, поддержания, управления. При оперировании с вынуждающей силой имеем возможность получать фиксированные производные параметры вибрационного процесса. В вопросе использования вибрационных технологий в металлорежущих станках, очевидно, неприкосновенным атрибутом остаётся параметр – жёсткость системы СПИД [5-10].

Благодарности и финансирование. Исследование выполнено за счет научного проекта № МЛ-6/21 от 22.11.2021г. по теме «Повышение эффективности процесса получения деталей строительных машин из композитных материалов за счет применения топологической оптимизации формы».

Список литературы

1. Чепчуров М.С., Хуртасенко А.В., Маслова И.В. Управление колебаниями режущего инструмента при токарной обработке крупногабаритных деталей // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – №2. – С. 31-35.
2. Данильчик С.С., Иващенко С.А., Каштальян И.А., Куптель В.Г., Молочко В.И., Шелег В.К. Вибрационное точение конструкционных сталей. – Минск: БНТУ, 2018 – 244 с.
3. Герасимов М.Д., Степанищев В.А. Теоретические исследования получения асимметричной вынуждающей силы вибропогружателей // Фундаментальные исследования. – 2014. – №5. – Ч.3. – С. 473-476.
4. Gerasimov M.D., Lubimyi N.S., Yakovlev E.A. Comparative analysis of the parameters of generators with circular and asymmetric oscillations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 945(1), p. 012003. DOI:10.1088/1757-899X/945/1/012003.
5. Ахметшин Н.И., Гоц Э.М., Родиков Н.Ф. Вибрационное резание металлов / Под ред. К.М. Рагульскиса. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 80 с.
6. Сергиев А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В., Швачкин Е.Г. Физические основы процесса вибрационного резания при точении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – №3. – С. 94-102.
7. Сергеев С.В., Решетников Б.А., Закиров Р.Г. Вибрационные роторные приводы машин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 207 с.
8. Микрюков А.А. Экспериментальные исследования роторно-дебалансных инерционных систем // Научный поиск. Технические науки: материалы третьей науч. конф. аспирантов и докторантов. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 1. – С. 117-121.
9. А.с. № 773342 СССР. Вибропривод инструмента / Васин Г.Г., Коробченко Л.С., Моржицкий Е.И., Максимов С.И. – Заявл. 18.12.1978; опубл. 23.10.1980, Бюл. № 39.
10. Разумов М.С., Гатиев М.Ш., Гладышкин А.О., Дрынова О.И., Скрипкина Е.В., Панин А.А., Смирнова А.Н. Разработка способа вибрационного сверления на основе анализа кинематических схем с учетом эксплуатационных характеристик станочного оборудования // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 9. – С. 103-108.

References

1. Chepchurov M.S., Khurtasenko A.V., Maslova I.V. Control of oscillations of the cutting tool during turning of large-sized parts // Bulletin of the Bryansk state technical university. 2010, no. 2, pp. 31-35.
2. Danilchik S.S., Ivashchenko S.A., Kashtalyan I.A., Kuptel V.G., Molochko V.I., Sheleg V.K. Vibration turning of structural steels. – Minsk: BNTU, 2018. – 244 p.
3. Gerasimov M.D., Stepanishchev V.A. Theoretical studies of obtaining asymmetric driving force of vibrators // Fundamental research. 2014, no. 5, part 3, pp. 473-476.
4. Gerasimov M.D., Lubimiy N.S., Yakovlev E.A. Comparative analysis of the parameters of generators with circular and asymmetric oscillations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 945(1), p. 012003. DOI:10.1088/1757-899X/945/1/012003.
5. Akhmetshin N.I., Gotz E.M., Rodikov N.F. Vibration cutting of metals / Ed. K.M. Ragulskis. – L.: Mechanical Engineering, Leningrad department, 1987. – 80 p.
6. Sergiev A.P., Vladimirov A.A., Makarov A.V., Shvachkin E.G. Physical foundations of the process of vibration cutting during turning // Bulletin of BSTU n.a. V.G. Shukhov. 2017, no. 3, pp. 94-102.
7. Sergeev S.V., Reshetnikov B.A., Zakirov R.G. Vibratory rotary drives of machines. – Chelyabinsk: Publ. house of SUSU, 2007. – 207 p.
8. Mikryukov A.A. Experimental studies of rotor-unbalanced inertial systems // Scientific search. Technical sciences: materials of the third scientific conference of postgraduates and doctoral students. – Chelyabinsk: Publ. house of the SUSU, 2011. – Vol. 1. – P. 117-121.
9. A.s. No. 773342 USSR. Tool vibration drive / Vasin G.G., Korobchenko L.S., Morzhitsky E.I., Maksimov S.I. – Claimed 18.12.1978; publ. 23.10.1980, Bul. No. 39.
10. Razumov M.S., Gatiev M.Sh., Gladyshev A.O., Drynova O.I., Skripkina E.V., Panin A.A., Smirnova A.N. Development of a method of vibratory drilling based on the analysis of kinematic schemes, taking into account the operational characteristics of machine tools // Modern science-intensive technologies. 2018, no. 9, pp. 103-108.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Герасимов Михаил Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент	Gerasimov Mikhail Dmitrievich – candidate of technical sciences, associate professor
Любимый Николай Сергеевич – кандидат технических наук, доцент	Lyubimiy Nikolai Sergeevich – candidate of technical sciences, associate professor
Рязанцев Владислав Геннадьевич – аспирант	Ryazantsev Vladislav Gennadievich – post-graduate student
mail_mihail@mail.ru	

Получена 07.06.2022