

УДК 621.9.06

Федотова Е. П., Донченко Е. И., Лебедь В. Т.

ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ ВИБРАЦИИ ПРИ ТОЧЕНИИ ДЕТАЛЕЙ «ПО СЛЕДУ»

В последние годы много усилий направлено на изучение подавления вибраций при точении деталей [8]. Подходы к подавлению вибраций можно разделить на две основные стратегии, а именно, пассивная и активная [1]. При пассивной – динамика системы обработки изменяется структурными модификациями или введением вспомогательных систем, которые могут устранить регенеративные колебания [1].

Регенеративные колебания известны как вторичная вибрация, которая также является самовозбуждающейся вибрацией [2]. Колебания вызываются регенерацией волнистости поверхности заготовки в результате перемещения резца по волнистой поверхности, полученной вследствие колебаний предыдущего прохода. Возбуждение происходит всякий раз, когда отклонения накладываются одно на другое, усиливаясь с каждым последующим проходом инструмента [2].

Регенеративные колебания считаются доминирующим механизмом вибрации при точении [3]. Если вибрации регенеративного инструмента становятся настолько значительными, что исключается контакт инструмента с заготовкой, то возникает тип вибрации, известный как множественные регенеративные колебания, которые исследовали Ши и Тобиас [3].

Следует отметить, что возникновение и механизм вибрации при механической обработке были исследованы Тобиасом [4] и Тлаустли [5]. Впервые были установлены регенеративные колебания, вызванные нестабильностью системы. Исследователи показали, что регенеративные колебания явились основной причиной нестабильности, которая приводит к развитию вибрации. Позднее, Тлаустли и Полачек [6], Меррит [7] обнаружили, что появление колебаний определяется динамикой резания, и исследовали устойчивость резания в условиях регенеративных колебаний.

Применение специальной геометрии инструмента и увеличение сложности системы демпфирования позволяют повысить эффективность пассивного подавления вибрации [8, 9]. Однако при этом теряется главное преимущество пассивной стратегии – низкая стоимость и простота реализации и усугубляются такие недостатки, как сложная настройка параметров демпфера. При этом демпферы зачастую не справляются с изменением условий резания [8, 9]. Поэтому активная стратегия обычно показывает лучшие результаты, поскольку может автоматически адаптироваться к изменению параметров процесса обработки [10].

Среди активных стратегий подавления вибраций метод варьирования скорости шпинделя (в зарубежных изданиях обозначаемый как SSV) привлекает особое внимание исследователей благодаря своей гибкости и простоте реализации. Кроме того, технология варьирования скорости не вызывает аварийных нагрузок на режущий инструмент и подшипники шпинделя [10].

Основная идея – изменения скорости шпинделя, была предложена в 1970-х годах. Были изучены различные способы изменения скорости шпинделя, такие как синусоидальная, треугольная и случайная формы [11, 12]. Варьирование скорости в синусоидальном режиме демонстрирует лучшие результаты, в том числе, снижение ошибки слежения и увеличение пределов устойчивости [13]. Возможность и эффективность метода SSV при подавлении вибрации продемонстрированы как в ходе моделирования, так и в экспериментах по резанию [14].

Тем не менее, по-прежнему выбор требуемых значений параметров SSV является достаточно сложной задачей, поскольку на параметры SSV влияет не только вибрации, но также и на ограничения шпиндельной системы. Фактически, связь между пределами стабильности механической обработки и параметрами SSV в полном объеме не исследована. Существует общее мнение [15, 16], что на стабильность системы в основном влияют амплитуды, а не частоты SSV.

Исходя из этого выдвинуто предположение, что регенеративные колебания можно подавить при помощи воздействия на привод подачи. Разумеется, такое воздействие должно иметь кратковременный характер, чтобы не вносить погрешность в геометрию обработки.

Целью работы является нахождение точек воздействия и проверка предположения о возможности подавления регенеративных колебаний путем кратковременного импульсного воздействия. Исследование предполагается провести на модели динамической системы процесса точения детали на токарном станке 1П756Ф3.

Модель динамической системы процесса точения (рис. 1) разработана на основе наработок, полученных авторами при исследовании динамики фрезерных станков [17].

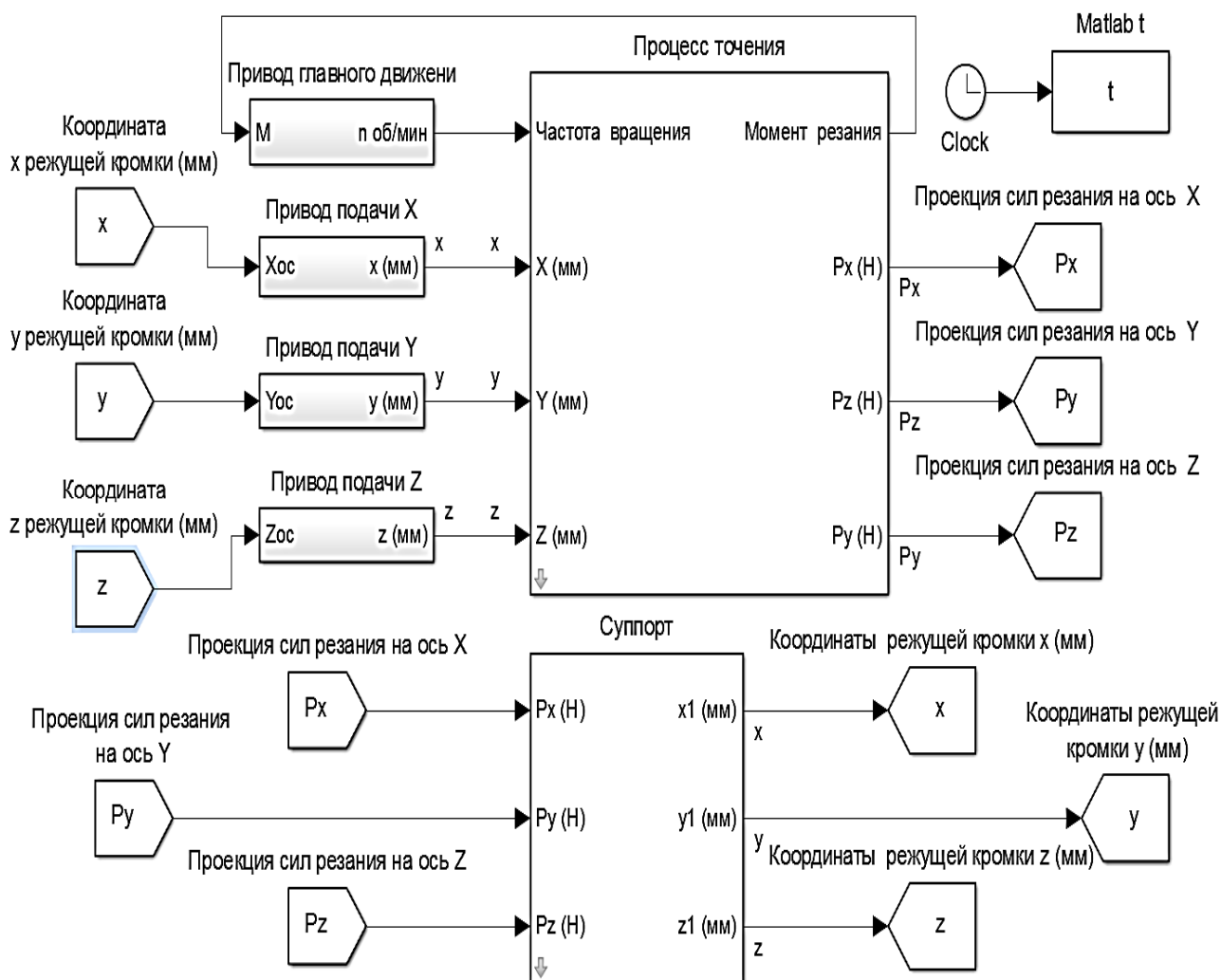


Рис. 1. Модель динамической системы процесса точения детали

Для анализа динамики процесса точения используется метод расчёта сил резания Розенберга [18]. Там же приведено математическое обоснование расчета сил резания и построение модели.

Между тем, модель силы резания, разработанная для процесса фрезерования в [17], не может быть напрямую использована для процесса точения. Вследствие того что из-за прерывистого характера резания не предусматривается наличие случайной составляющей силы резания при точении детали. При этом подразумевается, что переходные процессы при фрезеровании имеют существенно большее влияние.

Ввиду этого, в расчетную модель для силы резания [18] внесены изменения, учитывающие как постоянный характер резания, так и наличие флуктуаций силы резания (см. рис. 2).

Величина случайной составляющей процесса резания определяется по рассчитанной величине проекции силы резания на соответствующую ось.

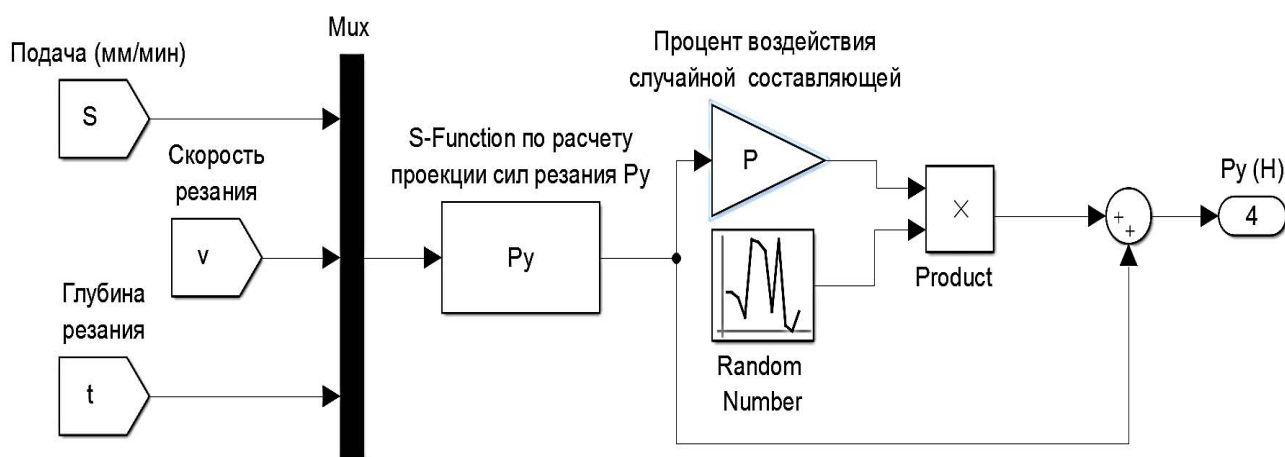


Рис. 2. Расчетная модель для определения проекции силы резания

Для проверки адекватности математической модели использовано сопоставление значений проекций сил резания, полученных при моделировании, со значениями, рассчитанными по эмпирическим формулам расчёта среднего значения сил резания при точении, рекомендованные для применения в промышленности [19]:

$$P_{x,y,z} = 10 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot s^{y_p} \cdot v^{z_p} \cdot K_p. \quad (1)$$

Диапазон параметров для вычислений взят из рекомендаций [19].

Для проверки адекватности математической модели используется критерий Фишера. Полученные по критерию Фишера значения $F_{\text{эмп}}$ находятся в зоне незначимости, следовательно, разработанная модель проявляет достаточную адекватность.

В ходе моделирования были получены диаграммы колебаний по осям координат, анализ которых подтверждает возникновение регенеративных колебаний в системе. Пример диаграммы для оси Y показан на рис. 3.

В ходе дальнейшего исследования модели проверена возможность прерывания регенерации с использованием введения импульсного сигнала управления на входы приводов подачи. Для этого импульсный сигнал суммировался с напряжением задания соответствующего привода.

Результаты исследований при различных режимах обработки показали, что при равной величине воздействия (амплитуде и длительности импульса) на привод подачи станка, наиболее чувствительным оказался привод по координате Y .

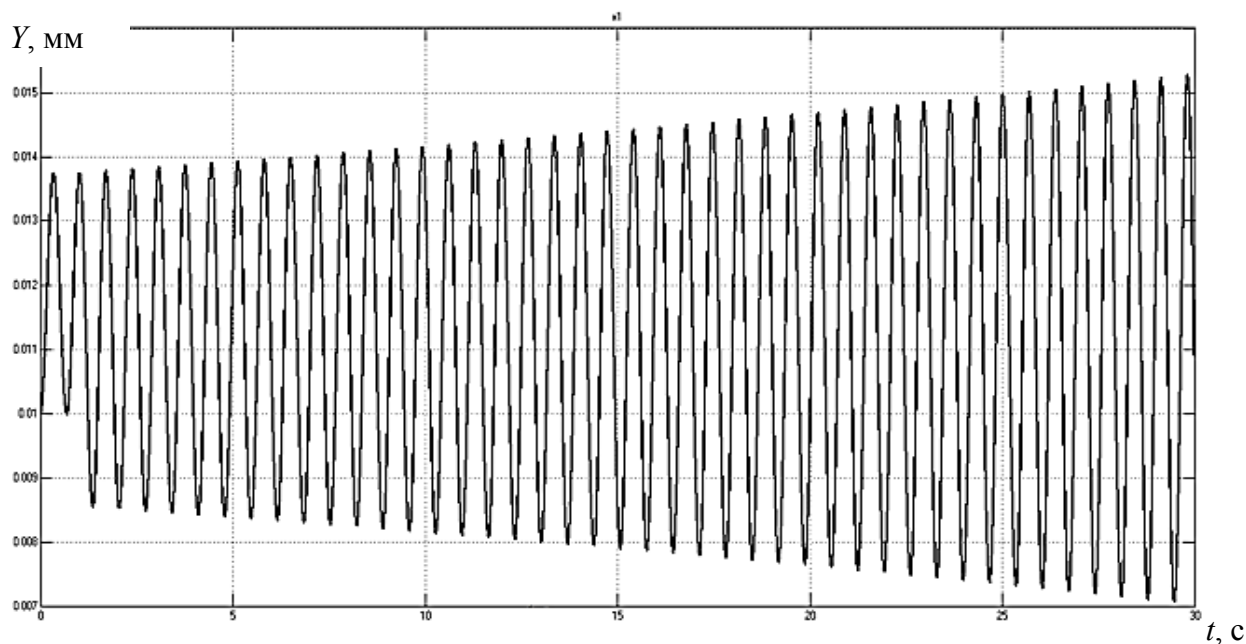


Рис. 3. Диаграмма колебаний по оси Y

Проверка импульсного воздействия на привод координаты Y при изменении параметров обработки показал удовлетворительную повторяемость эффекта. Выявлен и недостаток импульсного метода прерывания регенерации – при неправильно подобранной фазе импульсного воздействия отмечается усиление колебаний в системе. Поэтому использование импульсного метода возможно только при наличии прямого контроля вибраций по соответствующей координате.

Для практической реализации системы импульсного подавления регенерации предложена автоматическая система, концепция которой показана на рис. 4. С датчика вибрации, закрепленного на суппорте, для измерения колебаний по оси Y , поступает сигнал к системе коррекции. Микроконтроллер отслеживает уровень вибрации и определяет момент формирования импульса коррекции, который подается в разрыв цепи аналогового управления приводом подачи Y токарного станка.

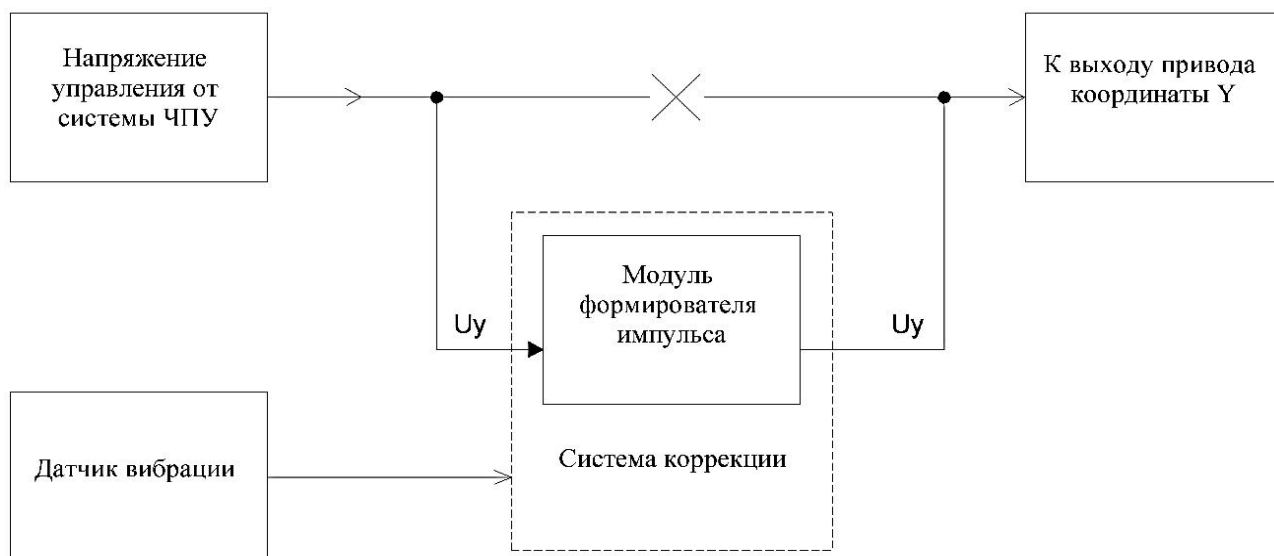


Рис. 4. Концепция автоматической системы импульсного подавления регенеративного эффекта при точении деталей

На рис. 5 показана діаграма коливань і реакція на імпульсне воздействие по осі X. Заметно, что срыв регенерации практически не происходит. В то же время, эффективность импульсного воздействия на координату Y достаточно высока (рис. 6).

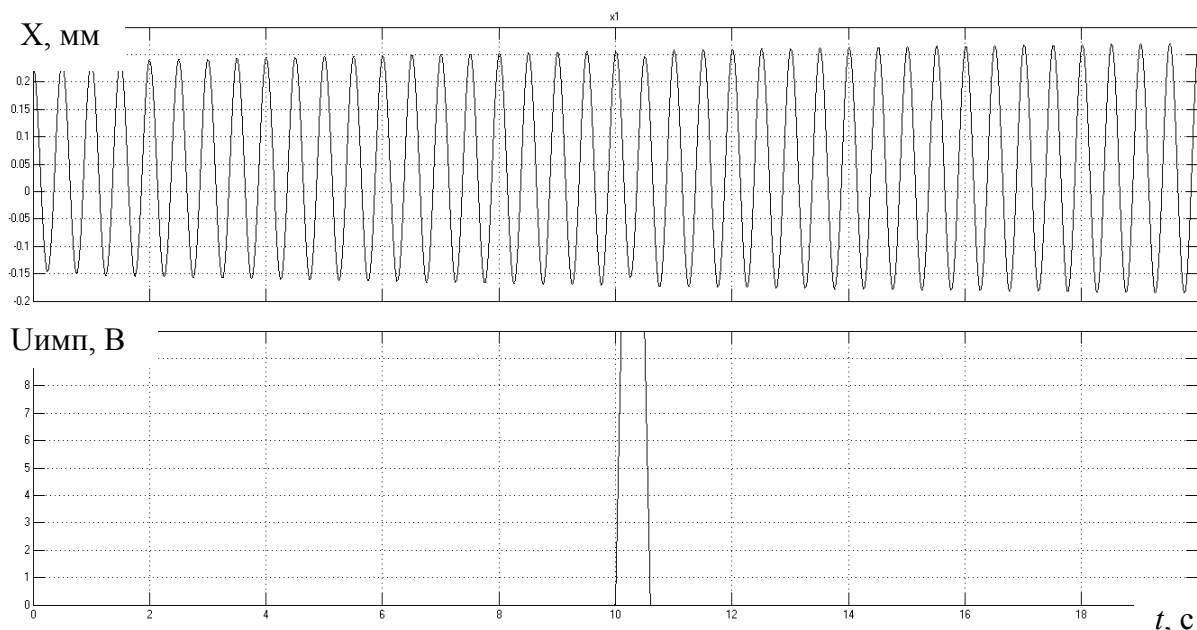


Рис. 5. Діаграма коливань і реакція на імпульсне воздействие по осі X

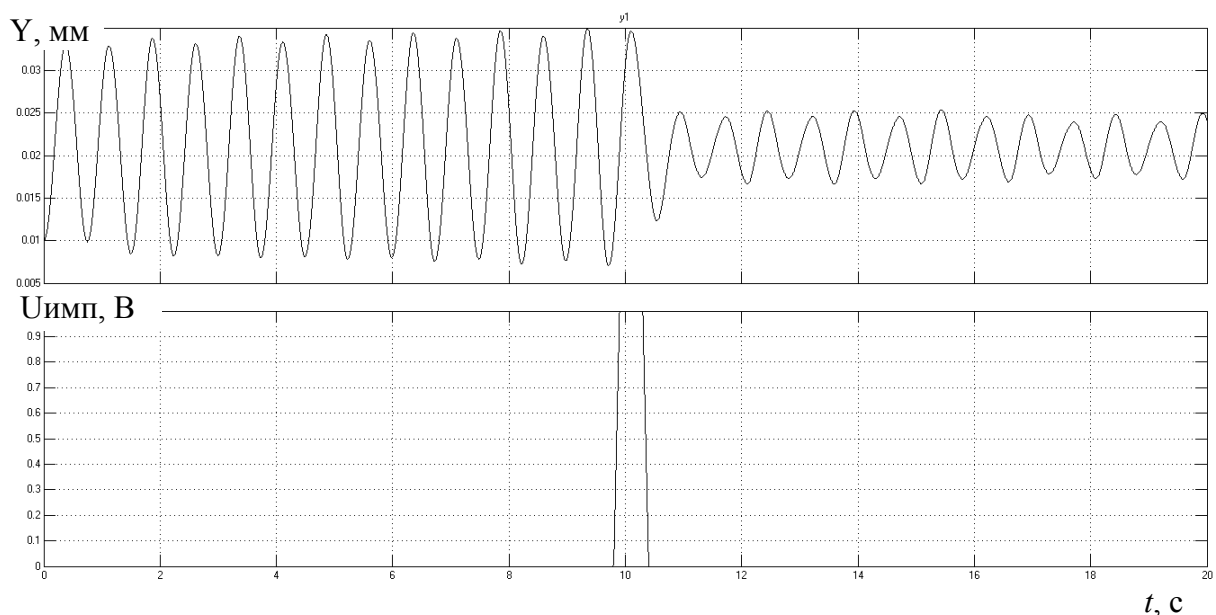


Рис. 6. Діаграма коливань і реакція на імпульсне воздействие по осі Y

Практическая реализация системы коррекции предусматривает введение на вход системы не только сигнала с датчика вибрации, но и параметров обработки, которые следует автоматически получать от системы ЧПУ. Таким образом, может быть решена задача определения параметров импульсного воздействия еще до начала работы автоматической системы. После начала ее работы, с датчика вибрации поступает информация о результатах каждого последующего импульсного воздействия, в результате чего параметры воздействия корректируются для достижения максимальной эффективности.

ВЫВОДЫ

Выполнен анализ динамики процесса точения деталей на основе метода расчёта сил резания и динамики этого процесса при различных значениях параметров обработки с помощью моделирования в программной среде MATLAB.

Улучшена существующая математическая модель процесса точения путем учета динамики процесса резания.

Адекватность математической модели проведена путём сопоставления результатов моделирования с данными, полученными на основании эмпирических зависимостей.

Выдвинута гипотеза о возможности снижения уровня вибраций при точении деталей путем формирования на входе привода подачи кратковременного импульса.

Получен положительный результат, оцениваемый трехкратным снижением уровня вибрации по координате Y при каждом последующем импульсном воздействии.

Предложена концепция и намечены пути практической реализации автоматической системы импульсного подавления регенеративного эффекта при точении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Soliman E. Chatter Suppression by Adaptive Speed Modulation / E. Soliman, F. Ismail // *Int. J. Mach. Tool. Manuf.* – 1997. – 37(3). – P. 355–369.
2. Taylor F. W. On the art of cutting metals / F. W. Taylor // *Transactions of ASME.* – 1907.
3. Kashyzadeh K. R. Study of Chatter Analysis in turning tool and control methods – A Review / K. R. Kashyzadeh, M. J. Ostad-Ahmad-Ghorabi // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering.* – 2012. – Volume 2, Issue 4.
4. Tobias S. A. Theory of Regenerative Machine Tool Chatter / S. A. Tobias, W. Fischwick // *Engineering.* – 1958. – 250.
5. Tlusty G. Manufacturing Processes and Equipment / G. Tlusty // Upper Saddle River. – 2000.
6. Tlusty J. The stability of machine tool against self-excited vibration in machining / J. Tlusty, M. Polacek // *Proceeding of International Production Engineering Research Conference.* – 1963. P. 465–471.
7. Merrit H. E. Theory of self-excited machine-tool chatter / H. E. Merrit // *ASME J EngInd.* – 1965. – 87 (4). – P. 447–454.
8. Wu D. Chatter Suppression in Fast Tool Servo-Assisted Turning by Spindle Speed Variation / D. Wu, K. Chen // *Int. J. Mach. Tool. Manuf.* – 2010. – 50(12). – P. 1038–1047.
9. Siddhpura M. A Review of Chatter Vibration Research in Turning / M. Siddhpura, R. Paurobally // *Int. J. Mach. Tool. Manuf.* – 2012. – 61(1). – P. 27–47.
10. Mechanics and Multi-Regenerative Stability of Variable Pitch and Variable Helix Milling Tools Considering Runout / Niu J., Ding Y., Zhu L. M., Ding H. // *Int. J. Mach. Tool. Manuf.* – 2017. – 123. – P. 129–145.
11. Milling Chatter Suppression in Viscous Fluid : A Feasibility Study / Zhang Z., Li H., Meng G., Ren S., // *Int. J. Mach. Tool. Manuf.* – 2017. – 120. – P. 20–26.
12. Spindle Speed Variation in Turning : Technological Effectiveness and Applicability to Real Industrial Cases / Albertelli P., Musletti S., Leonasio M., Bianchi G., Monno M. // *Int. J Adv. Manuf. Technol.* – 2012. – 62(1–4). – P. 59–67.
13. Continuous Workpiece Speed Variation (CWSV) : Model Based Practical Application to Avoid Chatter in Grinding / Barrenetxea D., Marquinez J. I., Bediaga I., Uriarte L. // *CIRP Ann. Manuf. Technol.* – 2009. – 58(1). – P. 319–322.
14. Yilmaz A. Machine Tool Chatter Suppression by Multilevel Random Spindle Speed Variation / A. Yilmaz, E. Al-Regib, J. Ni // *ASME J. Manuf. Sci. Eng.* – 2002. – 124(2). – P. 208–216.
15. Stability Analysis of Milling Processes With Periodic Spindle Speed Variation Via the Variable-Step Numerical Integration Method / Niu J., Ding Y., Zhu L., Ding H. // *ASME J. Manuf. Sci. Eng.* – 2016. – 138(11). – P. 114–501.
16. Spindle Speed Variation Technique in Turning Operations: Modeling and Real Implementation / Urbikain G., Olvera D., Lacalle L. N. L. D., Elias-Zuniga J. // *Sound Vib.* – 2016. – 383. – P. 384–396.
17. Донченко Е. И. Моделирование динамики процесса торцевыми фрезами / Е. И. Донченко, А. А. Сердюк, В. С. Гузенко. – 2006. – 8 с.
18. Сорокин Т. И. Моделирование процесса фрезерования с расчётом сил резания по методу Розенберга / Т. И. Сорокин, Е. И. Донченко. – 2016. – 8 с.
19. Справочник технолога машиностроителя. В 2-ч т. Т 2 / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4 изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.

Статья поступила в редакцию 26.12.2018 г.