

УДК 621.914.1

Внуков¹ Ю.Н. д.т.н., проф., Натальчишин² В.В. асс., Гермасhev¹ А.И. асп., Кучугуров¹ М.В асп., Дядя¹ С.И. к.т.н., доц.
1-Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина;
2-Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МОДУЛЯЦИИ СКОРОСТИ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА ДЛЯ ГАШЕНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Vnukov¹ Y., Natal'chishin² V., Germashev¹ A., Kuchugurov¹ M., Djadja¹ S.
1-Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine;
2-Odessa national polytechnic university, Odessa, Ukraine

SUPPRESSION OF SELF-EXCITED VIBRATION AT MILLING OF THIN-WALLED DETAILS BY MODULATION OF SPEED OF THE MAIN MOTION OF THE MILLING MACHINE

Рассмотрены возможности подавления автоколебаний тонкостенной детали в процессе концевой фрезеровки путем использования модуляции скорости главного движения станка. Представлены экспериментальные данные возможностей привода станка, на котором проводились исследования, осуществлять модуляцию частоты вращения шпинделя. Показано экспериментальное сравнение автоколебаний детали в процессе обработки с постоянной и переменной частотой вращения шпинделя. На основании полученных данных сделаны выводы и намечены перспективные пути развития в данном направлении.

Ключевые слова: модуляция частоты вращения шпинделя, автоколебания, фрезерование, базовый фрагмент осциллограммы

Проблема устранения вибраций металлорежущих станков возникла одновременно с началом их широкого промышленного применения в XIX веке. Однако наиболее остро эта проблема встала в конце первой половины XX века в связи резким ростом используемых скоростей резания и потребностью обработки заготовок из труднообрабатываемых конструкционных сталей и сплавов, а также обработки тонкостенных деталей, которые обладают малой жесткостью и, соответственно, низкой виброустойчивостью.

Впервые Дроздов А.А. [1] показал автоколебательный характер вибраций возникающих при обработке на металлорежущих станках и важную роль волнистости на поверхности резания в их развитии и поддержании.

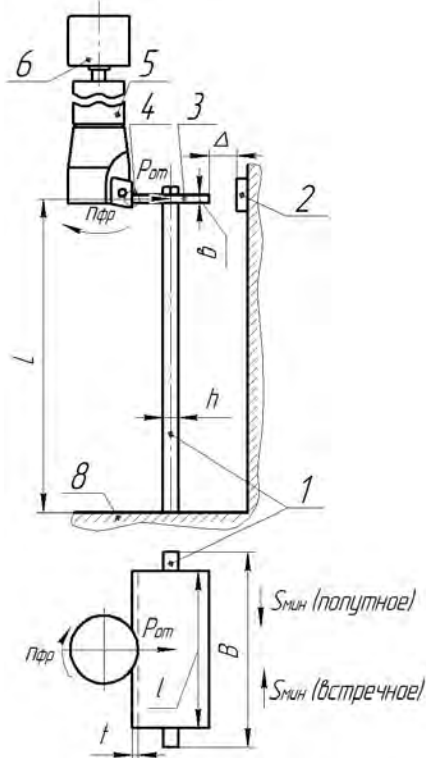
Позже исследования Каширина А.И. [2], Соколовского А.П. [3], Ильниченко И.И. [4], Кучмы Л.К. [5] и др. так же подтвердили важнейшее значение вторичного возбуждения для существования автоколебаний. Вторичное возбуждение связано со срезанием стружки по волнистому следу, который оставлен на поверхности резания во время предыдущего прохода зуба фрезы. В отечественной и зарубежной литературе это явление получило название: резание по "следу" или резание в условиях регенерации.

Целью данной статьи является установление возможности подавления регенеративных автоколебаний путем модуляции скорости главного движения фрезерного станка.

В работе [6] показано, что при концевом фрезеровании тонкостенных деталей, помимо вынужденных колебаний, связанных с входом и выходом зуба фрезы в припуск, в определенном скоростном диапазоне возникают автоколебания. Природа этих колебаний связана с появлением волнистости на поверхности резания. Поэтому к переменной толщине среза, характерной для цилиндрического фрезерования, добавляется дополнительное изменение толщины среза, связанное с регенерацией, т.е. резанием по вибрационному следу от предыдущего прохода зуба. Измерительная аппаратура стенда для исследования механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами [7], показанного на рис.1, позволяет получать осциллограммы регенеративных колебаний при срезании припуска каждым зубом фрезы и определять скоростные зоны и интенсивность их появления.

Частоту вращения шпинделя выбрали исходя из того, что в работе [8] был определен скоростной диапазон появления регенеративных колебаний для рассматриваемой упругой системы (УС) тонкостенной

детали. Встречное направление фрезерования выбрано исходя из того, что величина амплитуд регенеративных колебаний при встречном фрезеровании выше, чем при попутном.



1 – УС тонкостенной детали (пластина размером $L \times V \times h$); 2 – Датчик перемещения обрабатываемого образца; 3 – Обрабатываемый образец; 4 – Зона обработки фрезерованием; 5 – Концевая фреза; 6 – Счетчик оборотов; 8 – Приспособление для крепления пластины

Рис. 1. Стенд для исследования механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами

Начиная с 70-х годов, в вибрационном резании появилось направление, связанное с гашением регенеративных автоколебаний ТС путем периодического изменения скорости резания. Основу этому направлению практически одновременно и независимо друг от друга заложили работы по изучению точения с переменной скоростью Шнепса В.А. и Stoferle T., Grab H. Позднее исследования в этом направлении вели: Takemura T., Kitamura, Hoshi T., Inamura T., Sata T., Sexton J.S., Milne R.D., Stone V.J., Петрашина Л.Н., Jemielniak K., Widota A., Zhang H., Ni J., Shi H., Эльясберг М.Е., Биндер М.Г., Шадский Г.В., Золотых С.Ф., Афонина Н.А.

С начала 90-х годов появились публикации по использованию переменной скорости резания для гашения регенеративных автоколебаний при торцовом и концевом фрезеровании: Lin S.C., De Vor R.E., Karoog S.G. [9], Radulescu R.A., Karoog S.G., De Vor R.E. [10, 11], Ismail F., Kubica E.G. [12] и другие. К числу первых принадлежит и работа Свинина В.М. [13].

Изменение скорости главного движения станка OMM64SC с ЧПУ Siemens 802D осуществлялось программным способом.

Возможности привода станка, рис. 2, позволяют осуществлять изменение скорости главного движения от 70% до 120% от номинальной. Следовательно, возможная глубина модуляции равна 35%. Однако, ввиду того что вращательное движение шпинделю станка передается путем зубчатых зацеплений, двигатель станка имеет определенное ускорение при наборе скорости, соответственно как и инерционность при торможении, величина частоты модуляции существенно ограничивает достижение возможных 35% глубины модуляции.

При допустимом режиме работы привода, рис. 3, полностью реализуется заданная глубина модуляции. Ускорение при увеличении и уменьшении скорости главного движения имеет определенное значение, которое зависит от характеристик привода, то есть увеличение, и уменьшение частоты вращения шпинделя осуществляется за минимально возможное время, которое обуславливается максимальными возможностями привода. Заданный период модуляции при допустимом режиме работы привода больше периода изменения

Экспериментальные исследования проводили при следующих условиях:

а) **Оборудование** - Станок фрезерный горизонтально-вертикальный мод. OMM64SC с ЧПУ Siemens 802D;

б) **Инструмент** - концевая фреза CANELA D20 Z3 со сменными многогранными неперетачиваемыми пластинками из твердого сплава APKT100305PDER JC8050 фирмы Dijet. В эксперименте устанавливался 1 режущий зуб. Вместо двух других зубьев устанавливали равные по весу свинцовые грузики, обеспечивающие балансировку фрезы. Геометрия режущего зуба: $\gamma=6^\circ$, $\alpha=11^\circ$, $\lambda^\circ=-10^\circ$.

в) **Образец из обрабатываемого материала** (Ст. 3кп ГОСТ 380-2005) размером $l=50\text{мм}$, $v=2\text{мм}$ (см. рис.1).

Упругая система тонкостенной детали. Пластина с размерами вылета $L=80\text{мм}$, $V=60\text{мм}$, $h=4\text{мм}$. Материал Сталь 65Г (HRC 60). Вместе с закрепленным образцом УС тонкостенной детали имеет следующие характеристики: жесткость $j=228,1\text{ Н/мм}$, частота собственных колебаний $f=264\text{ Гц}$, логарифмический декремент затухания колебаний – 0,091.

г) **Режимы фрезерования:**

- номинальная частота вращения шпинделя $n=650$ об/мин;
- частота модуляции скорости главного движения $f_{\text{мод}}=1,5 - 5\text{ Гц}$;
- продольная подача стола от $S_{\text{мин}}=32,5\text{ мм/мин}$;
- подача на зуб $S_z=0,05\text{ мм/зуб}$;
- ширина среза $b=2\text{мм}$;
- радиальная глубина фрезерования (припуск t) $a_c=0,5\text{мм}$;
- направление подачи – встречное;
- условие резания – свободное, косоугольное.

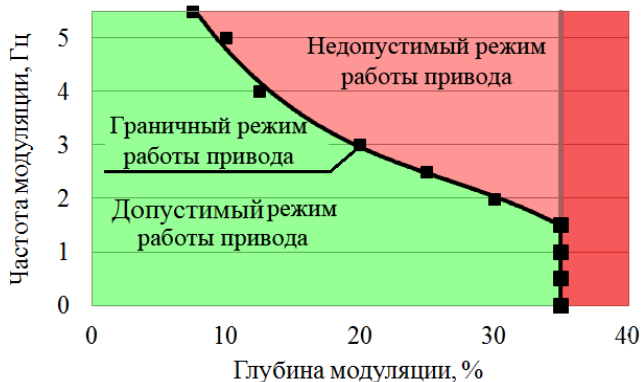


Рис. 2. Возможности привода станка OMM64SC с ЧПУ Siemens 802D осуществлять модуляцию скорости главного движения при $n = 650$ об/мин

При граничном режиме работы привода, рис. 4, также полностью реализуется заданная глубина модуляции. Однако при таком режиме заданный период модуляции равен периоду изменения частоты вращения шпинделя. Модуляция скорости главного движения происходит таким образом: после набора максимальной скорости, равной верхней границе модуляции, система ЧПУ сразу же получает команду на уменьшение скорости и т.д. Таким образом, всегда происходит изменение скорости главного движения, в отличие от допустимой работы привода, когда на некоторых участках обороты шпинделя не изменяются. Форма сигнала изменения частоты вращения шпинделя имеет форму «треугольных импульсов».

При недопустимом режиме работы привода, рис. 5, заданная глубина модуляции полностью не реализуется, так как период модуляции меньше периода изменения частоты вращения шпинделя. Модуляция скорости главного движения происходит таким образом: уже при увеличении частоты вращения шпинделя система ЧПУ получает сигнал на ее снижение. При этом частота не достигает как верхней, так и нижней границы модуляции. Форма сигнала изменения частоты вращения шпинделя существенно не отличается от формы сигнала, характерной для граничного режима работы привода, однако данный реальный сигнал не соответствует заданному программным путем, так как не реализуется установленная глубина модуляции.

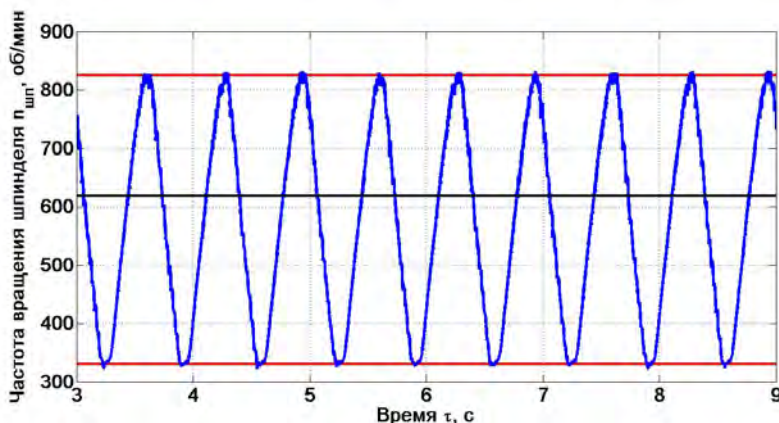


Рис. 4. Форма сигнала изменения частоты вращения шпинделя при граничной работе привода

скорости, который равен времени увеличения скорости от минимального значения до максимального и уменьшение скорости опять до минимальной. Период изменения скорости главного движения является величиной постоянной, т.к. изменение скорости осуществляется всегда на максимально возможном режиме.

Модуляция скорости главного движения происходит таким образом: привод выполняет команду на увеличение скорости и, достигнув максимальной скорости, скорость не изменяет до того момента, пока не будет получено команды на уменьшение скорости, при таком режиме работы форма сигнала изменения скорости имеет форму «равнобокой трапеции».

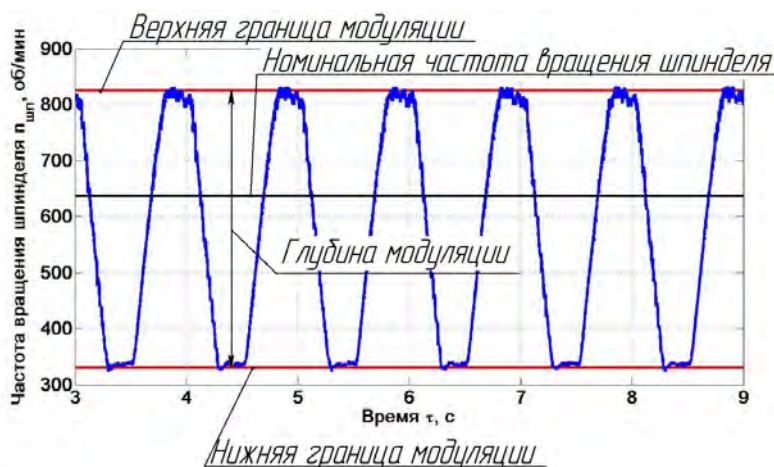


Рис. 3. Форма сигнала изменения частоты вращения шпинделя при допустимой работе привода

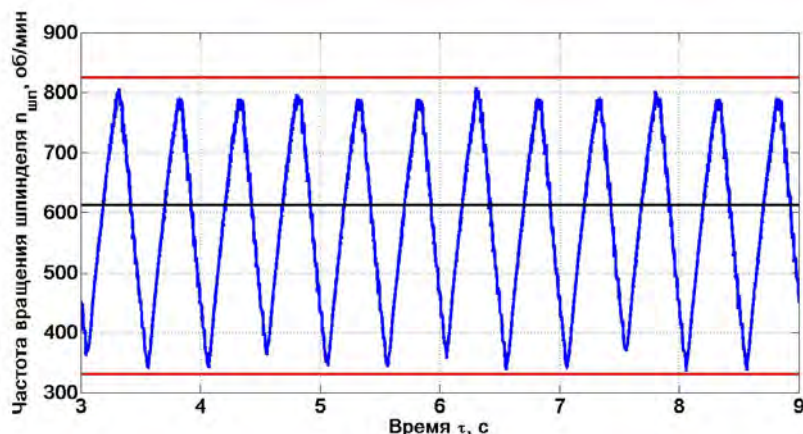


Рис. 5. Форма сигнала изменения частоты вращения шпинделя при недопустимой работе привода

из исследований, проведенных ранее.

Проведение исследований с использованием модуляции скорости главного движения проводилось с изменением частоты модуляции от $f_{mod} = 1.5$ Гц до 5 Гц с шагом 0,5 Гц и с использованием максимально возможной глубины модуляции. Результаты экспериментов показали возможность полного подавления регенеративных колебаний на значительных участках (до 75% всей обработки) и наличие незначительных колебаний на остальных участках. Однако, добиться такого эффекта



Рис. 6. Базовый фрагмент осциллограммы отклонения тонкостенной детали при фрезеровании с постоянной частотой вращения шпинделя

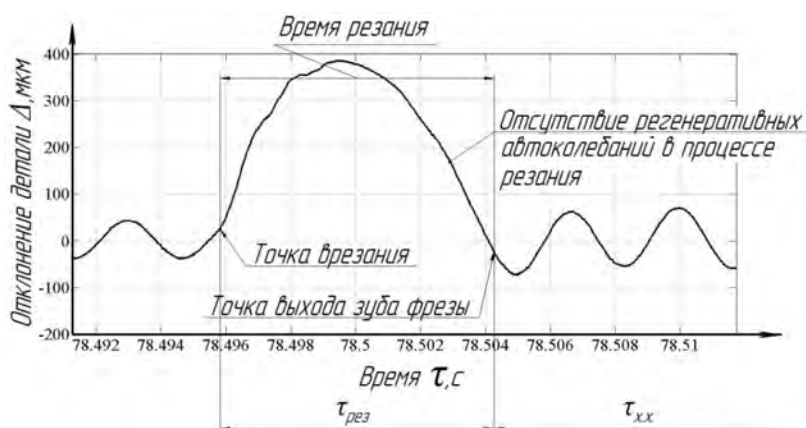


Рис. 7. Базовый фрагмент осциллограммы отклонения тонкостенной детали при фрезеровании с модуляцией частоты вращения шпинделя $f_{mod} = 3$ Гц и глубиной модуляции 20%

отклонения тонкостенной детали, на которых показано время резания, можно сказать, что осуществление

Эксперименты проводили при граничных условиях работы привода, так как именно при таком режиме максимально эффективно используются его возможности модуляции скорости главного движения. В качестве сравнения было выполнено фрезерование с постоянной номинальной частотой вращения шпинделя.

Обработка без применения модуляции частоты вращения шпинделя сопровождалась наличием сильных автоколебаний в процессе всего фрезерования (рис.6), как и ожидалось исходя

получилось только при частоте модуляции $f_{mod} = 3$ Гц с глубиной модуляции 20%, рис. 7, при этом верхняя граница модуляции составила $n = 810$ об/мин, нижняя - $n = 530$ об/мин. Все проведенные эксперименты имеют общую тенденцию: влияние модуляции частоты вращения шпинделя на подавление регенеративных колебаний увеличивается, начиная от частоты модуляции $f_{mod} = 1.5$ Гц, и достигает своего максимального эффекта при $f_{mod} = 3$ Гц, далее, при увеличении частоты модуляции, происходит уменьшение эффекта подавления регенеративных колебаний.

Исходя из возможностей данного привода и анализа рассмотренных базовых фрагментов осциллограммы

одного и более периодов изменения частоты вращения шпинделя невозможно в процессе срезания одного припуска, так как время резания очень мало по сравнению с периодом модуляции. Однако возможно осуществлять каждый последующий рез со скоростью резания, отличной от скорости, с которой совершалось резание предыдущим зубом, рис. 8

В работе [6] показано, что количество волн на поверхности резания зависит от частоты вращения шпинделя. Это объясняется тем, что регенеративные колебания имеют определенный период. И количество волн на поверхности резания зависит от того сколько периодов колебаний УС тонкостенной детали успеет совершить за время резания. С изменением частоты вращения шпинделя изменяется и время срезания припуска, но независимо от времени резания длина контакта фрезы с деталью остается неизменной. Поэтому в зависимости от скорости резания на одной и той же поверхности резания может образовываться различное количество волн.

При резании с постоянной частотой вращения шпинделя каждый рез зуба фрезы формирует одинаковое, установившееся число волн на поверхности резания, что и есть резанием по волнистому следу – регенерацией.

При резании с модулированной скоростью резания каждый новый рез зуба фрезы производится с частотой вращения шпинделя, отличной от предыдущего резания, при этом автоколебательная система каждый раз пытается уложить новое число волн на поверхности резания. Следовательно, не происходит поддержания автоколебательного процесса при каждом последующем резе, так как процесс все время изменяет свои характеристики. Однако, реализация такого механизма требует подбора соответствующих значений частоты и глубины модуляции, а также начальной фазы закона изменения скорости главного движения, что требует дальнейшего исследования.

Выводы:

1. Разработана возможность управления программным способом частотой вращения шпинделя станка ОММ64SC с ЧПУ Siemens 802D, выявлен диапазон частот и глубин модуляции.
2. Результаты экспериментов показали возможность полного подавления регенеративных колебаний на значительных участках (до 75% всей обработки) и наличие незначительных колебаний на остальных участках.
3. Реализация механизма подавления колебаний модуляцией скорости главного движения требует подбора значений частоты и глубины модуляции, а также соответствующей фазы закона изменения скорости главного движения. Установление этих зависимостей требует дальнейшего исследования.

Анотація. Розглянуто можливості пригнічення автоколивань тонкостінної деталі в процесі кінцевого фрезерування шляхом використання модуляції швидкості головного руху верстата. Представлені експериментальні дані можливостей приводу верстата, на якому проводилися дослідження, здійснювати модуляцію частоти обертання шпинделя. Показано експериментальне порівняння автоколивань деталі в процесі обробки з постійною і змінною частотою обертання шпинделя. На підставі отриманих даних зроблено висновки та намічені перспективні шляхи розвитку в даному напрямку.
Ключові слова: модуляція частоти обертання шпинделя, автоколивання, фрезерування, базовий фрагмент осцилограми.

Abstract. Purpose. Milling operations of thin walls are often limited by self-excited vibration. The main reason of this vibration is so-called regenerative effect. Self-excited vibrations causes to poor surface finish, manufacturing tools wear, spindle block wear etc.

Design/methodology/approach. This paper deals with test facility for thin walled parts end milling research. Firstly articles show experimental result of variable spindle speed ability tests. The parameters of spindle speed modulation are limited by kinematics of milling machine. When range and frequency of variable spindle speed was known authors made several milling test with maximum parameters of spindle speed modulation. For comparing paper presents milling test with the constant spindle speed.

Findings. As a results is shown that variable spindle speed of end milling contributes to the suppression of self-excited vibration. It should be note that this effect totally dependent from parameters of spindle speed modulation.

Originality/value. It's information useful for adaptive control system development and machining of difficult-to-cut material. It related with the fact, that natural frequency of the detail changes during machining and the range of self-excited vibration is also changes. It can cause to appearance of self-excited vibration in machining process, which can suppression by using variable spindle

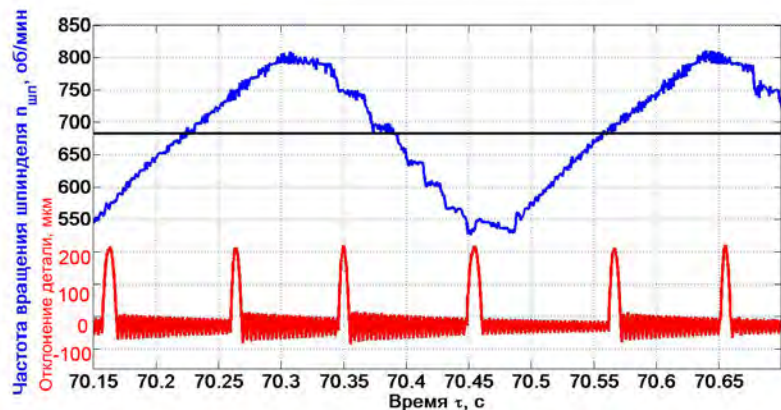


Рис. 8. Совмещенные сигналы отклонения детали и частоты вращения шпинделя при $f_{mod} = 3$ Гц и глубине модуляции 20%

speed. Finding parameters of spindle speed modulation, which can suppression of self-excited with big efficiency is one of the perspective development ways.

Keywords: modulation of frequency of rotation of шпинделя, auto-oscillation, milling, base fragment of oscillogram

Библиографический список использованной литературы

1. Дроздов Н.А. К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке / Н.А. Дроздов // Станки и инструмент. – 1937. - №22 –с.21-25.
2. Каширин А.И. Исследование вибраций при резании / А.И. Каширин. –М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1944.-262с.
3. Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения, М., Машгиз, 1955.-514с.
4. Ильницкий И.И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения. Машгиз, Москва – Свердловск, 1958, 142с.
5. Кучма Л.К. Экспериментальное исследование вибраций при резании на токарном станке. – В кн.: Новые исследования в области резания металлов. М.; Л.: Машгиз, 1948, с. 100-128.
6. Логоминов В.А. Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. канд. техн. наук / В.А. Логоминов. – Запорожье, 2013., 226с.
7. Внуков Ю.Н. Стенд для исследования механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами. / Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов, П.А. Каморкин // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011 – вып. 79 – с.32-37.
8. Внуков Ю.Н. Оценка эффективности и качества обработки тонкостенных деталей при концевом фрезеровании. / Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, П.А. Каморкин, Е.Б. Козлова// Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. - Одеса, 2014, вип. 2(7). – с. 97 - 108
9. Lin S.C., DeVor R.E., Kapoor S.G. The Effects of Variable Speed Cutting on Vibration Control in Face Milling. / ASME J. Eng. Indus., 1990, т. 112, с. 1.
10. Radulescu R. A. General Cutting Process Model for High Speed Machining Dynamic and Thermal Considerations. - PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1993.
11. Radulescu R. A., Kapoor S. G., DeVor R. E. An Investigation of Variable Spindle Speed Face Milling for Tool-Work Structures With Complex Dynamics, Part 1: simulation results; Part2: Physical Explanation; Part 3: // Journal of manufacturing science and engineering., 1997, 119, pp. 266–283.
12. Ismail F., Kubica E. G. Active Suppression of Chatter in Peripheral Milling. Part. 1. A Statistical Indicator to Evaluate the spindle Speed Modulation Method. // Int. J. Adv. Manuf, Technol. – 1995. – №10. – P. 299-310.
13. Свинин, В. М. Гашение автоколебаний при фрезеровании путем периодического изменения скорости резания / В.М. Свинин // Перспективные направления развития машиностроения Забайкалья: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. /ЧитПИ. - Чита, 1991. – С. 15-16.

References

1. Drozdov N.A. K voprosu o vibracijah stanka pri tokarnoj obrabotke. Stanki i instrument., 1937, Vol 22, pp.21-25.
2. Kashirin A.I. Issledovanie vibracij pri rezanii. Moscow, St. Petesburg., Izd-vo AN SSSR (Scientific academy of USSR), 1944.p.262.
3. Sokolovskij A.P. Nauchnye osnovy tehnologii mashinostroenija (Scientific basement of machine building tehnology). Moscow, Mashgiz, 1955, p. 514.
4. Il'nickij I.I. Kolebanija v metallorezhushhijh stankah i puti ih ustraneniija. (Vibration in machine tools and the ways of avoiding them). Moscow – Sverdlovsk, Mashgiz, 1958, p. 142.
5. Kuchma L.K. Jeksperimental'noe issledovanie vibracij pri rezanii na tokarnom stanke. V kn.: Novye issledovanija v oblasti rezanija metallov (new research in metal cutting field). Moscow, St. Petesburg., Mashgiz, 1948, pp. 100-128.
6. Logominov V.A. Formirovanie sheroховatosti obrabotannoj poverhnosti pri koncevom cilindricheskom frezerovanii tonkostennyh jelementov detalej (Surface finish formation of thin walled parts end milling): dis. kand. tehn. Nauk. Zaporozhye, 2013, p. 226.
7. Vnukov Y.N., Logominov V.A., Kamorkin P.A., Stend dlja issledovanija mehanicheskijh kolebanij pri frezerovanii malozhestkijh detalej koncevymi frezami. Rezanie i instrument v tehnologicheskijh sistemah. (CUTTING & TOOL IN TECHNOLOGICAL SYSTEM, International Scientific-Technical Collection) Kharkov, NTU «HPI», 2011, Vol.79, pp.32-37.
8. Vnukov Y.N. Germashev A.I., Kamorkin P.A., Kozlova E.B. Ocenka jeffektivnosti i kachestva obrabotki tonkostennyh detalej pri koncevom frezerovanii. Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobniictvi (Technologies of informations are in education, science and production). Odesa, 2014, vol. 2(7). p. 97 – 108.
9. Lin S.C., DeVor R.E., Kapoor S.G. The Effects of Variable Speed Cutting on Vibration Control in Face Milling. ASME J. Eng. Indus., 1990, т. 112, с. 1.
10. Radulescu R. A. General Cutting Process Model for High Speed Machining Dynamic and Thermal Considerations. PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1993.
11. Radulescu R. A., Kapoor S. G., DeVor R. E. An Investigation of Variable Spindle Speed Face Milling for Tool-Work Structures With Complex Dynamics, Part 1: simulation results; Part2: Physical Explanation; Part 3. Journal of manufacturing science and engineering, 1997, 119, pp. 266–283.
12. Ismail F., Kubica E. G. Active Suppression of Chatter in Peripheral Milling. Part. 1. A Statistical Indicator to Evaluate the spindle Speed Modulation Method. Int. J. Adv. Manuf, Technol. 1995, Vol. 10, pp. 299-310.
13. Svinin V. M. Gashenie avtokolebanij pri frezerovanii putem periodicheskogo izmenenija skorosti rezanija. Perspektivnye napravlenija razvitija mashinostroenija Zabajkal'ja (regional scientific and technical conference perspective development ways of machine building Transbaikalia). tez. dokl. regional'noj nauch.-tehn. konf. ChitPI. Chita, 1991. pp. 15-16.

Подана до редакції 12.09.2014