

УДК 621.914.1

**В.А. ЛОГОМИНОВ**, канд. техн. наук, Запорожье, Украина

## **МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПО CUT-ГРАММАМ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Описана методика дослідження регенеративних коливань по cut-граммам коливань тонкостінної деталі при її фрезеруванні. Запропонована методика розділення cut-грамми коливань на складові, що викликаються змушеними коливаннями та регенеративними автоколиваннями. Розділення здійснюється за допомогою згладжу вального фільтру Савицького-Голя.

Описана методика изучения регенеративных автоколебаний по cut-граммам колебаний тонкостенной детали при её фрезеровании. Предложена методика разделения cut-граммы колебаний на составляющие, вызванные вынужденными колебаниями и регенеративными автоколебаниями. Разделение осуществляется с помощью сглаживающего фильтра Савицкого-Голя.

The article describes a technique for the analysis of regenerative chatter using cut-grams vibrations of thin-walled workpiece during it milling. The technique divides cut-gram into two components: forced oscillations and regenerative chatter. Dividing is carried out using a smoothing filter Savitzky-Golay.

При механической обработке могут возникать вибрации элементов технологической системы СПИЗ. Появление колебаний связывают с различными физическими причинами [1, 2, 3, 4]. Вибрации приводят к ряду негативных последствий, таким как: ухудшение качества обработанной поверхности, повышенный износ и поломка инструмента и оборудования, увеличение шума и др. Колебания принято разделять на собственные, вынужденные и автоколебания [4]. Такое разделение позволяет облегчить исследование причин появления вибраций при лезвийной обработке и упростить поиск методов снижения их интенсивности.

Изучение колебаний удобно вести по cut-граммам. Cut-граммама –

это осциллограмма колебательного перемещения режущего инструмента и (или) обрабатываемой детали по направлению, перпендикулярному к поверхности резания, под действием всех видов сил, возникающих в процессе обработки. Cut-грамма может иметь размерность силы, т.е. величина перемещения умноженная на жесткость соответствующего элемента системы СПИЗ, колебания которого изучаются.

Сложность изучения колебаний при фрезеровании тонкостенной детали заключается в том, что отклонения тонкостенной детали, вызванные регенеративными автоколебаниями [1, 4], накладываются на отклонения, вызванные вынужденными колебаниями. При этом вынужденные колебания при фрезеровании есть всегда, в силу особенностей процесса фрезерования, а регенеративные автоколебания могут возникать или не возникать в зависимости от виброустойчивости обработки. На рис. 1 показаны cut-граммы колебаний тонкостенной детали, полученные при разных скоростях её фрезерования [5].

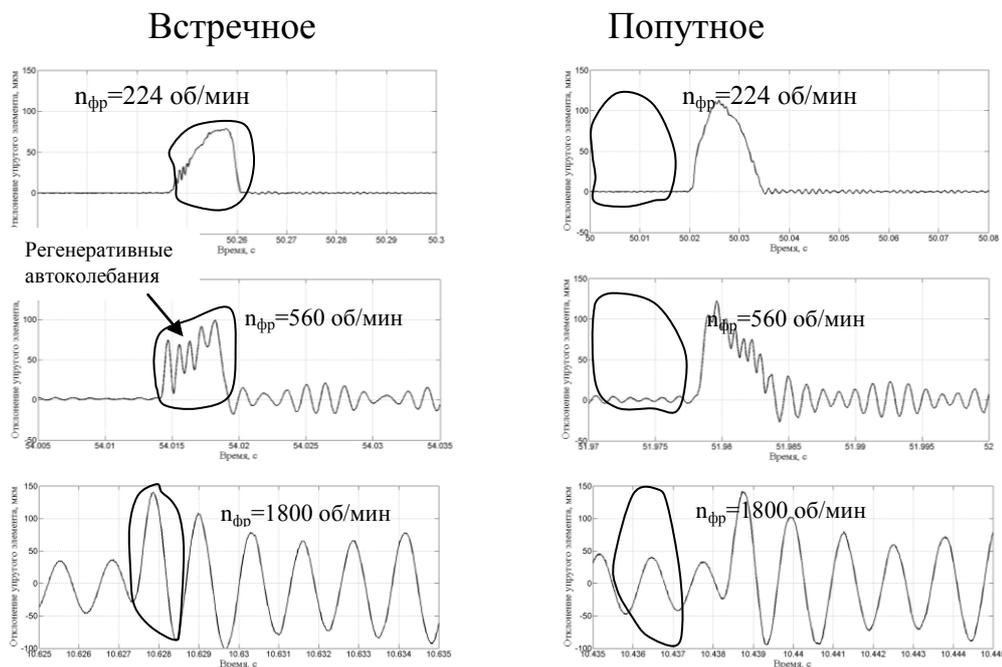


Рисунок 1 – Cut-граммы колебаний тонкостенной детали для различных скоростей вращения фрезы. Обведены колебания, возникающие в период резания зубом фрезы ( $S_z=0,05$  мм/зуб;  $B=3,4$  мм;  $t=0,5$  мм)

Из рисунка видно, что при низких скоростях вращения фрезы ( $n_{фр}=224$  об/мин) наблюдаются практически только вынужденные колебания. При более высоких скоростях ( $n_{фр}=560$  об/мин) появляются регенеративные колебания, а при частоте вращения шпинделя  $n_{фр}=1800$  об/мин автоколебания вырождаются и наблюдаются только вынужденные колебания.

Для более детального исследования регенеративных колебаний по cut-граммам предлагается разделять cut-грамму на составляющую, вызванную вынужденными колебаниями и автоколебаниями. Делается это в следующем порядке. Сначала из общей cut-граммы выделяем участок, на котором происходит резание одним зубом (рис. 2). Затем cut-грамма обрабатывается сглаживающим фильтром Савицкого-Голея [6]. Сглаженная cut-грамма представляет собой перемещение тонкостенной детали, вызванное силой отжима, без перемещений, вызванных автоколебаниями (рис. 3). Если из исходной cut-граммы вычесть сглаженную cut-грамму получим перемещения тонкостенной детали вызванное автоколебаниями (рис. 3).

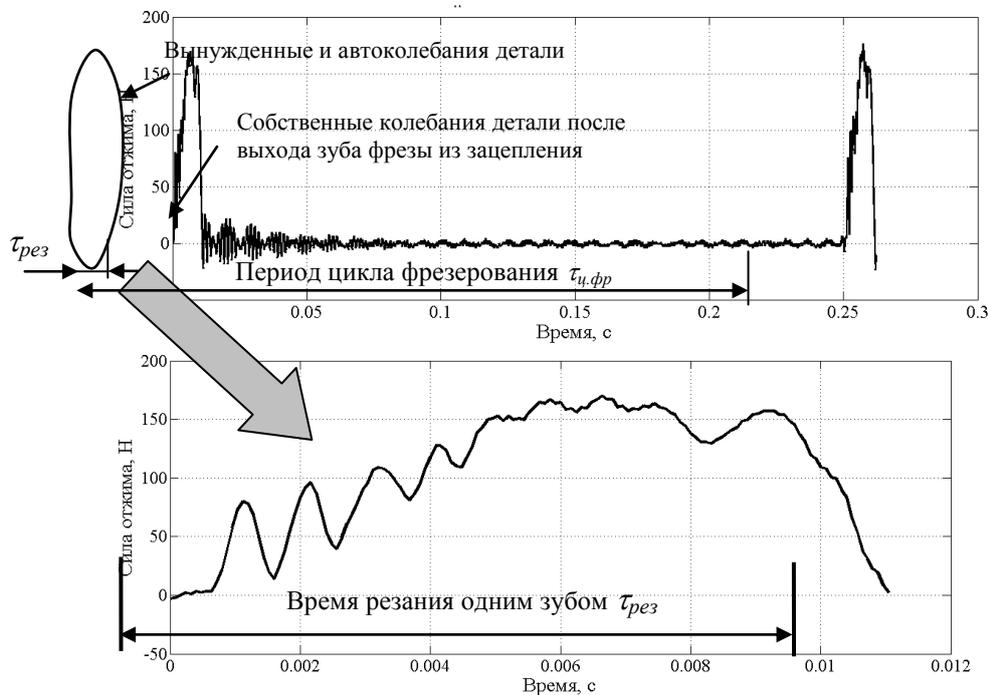


Рисунок 2 – Выделение участка резания одним зубом из общей cut-граммы

Использование при сглаживании cut-граммы фильтра Савицкого-Голея показывает лучшие результаты по сравнению с аппроксимацией полиномами, рядами Фурье и фильтром Гаусса. Это связано с меньшим краевым эффектом. Кроме того фильтр Гаусса искажает форму сигнала.

Описанная методика обработки cut-грамм позволяет оценивать амплитуды вынужденных и автоколебаний, частоту автоколебаний, а также фазовый сдвиг автоколебаний. Сдвиг фаз автоколебаний определяется по следующей методике, названной методом смещенных cut-грамм.

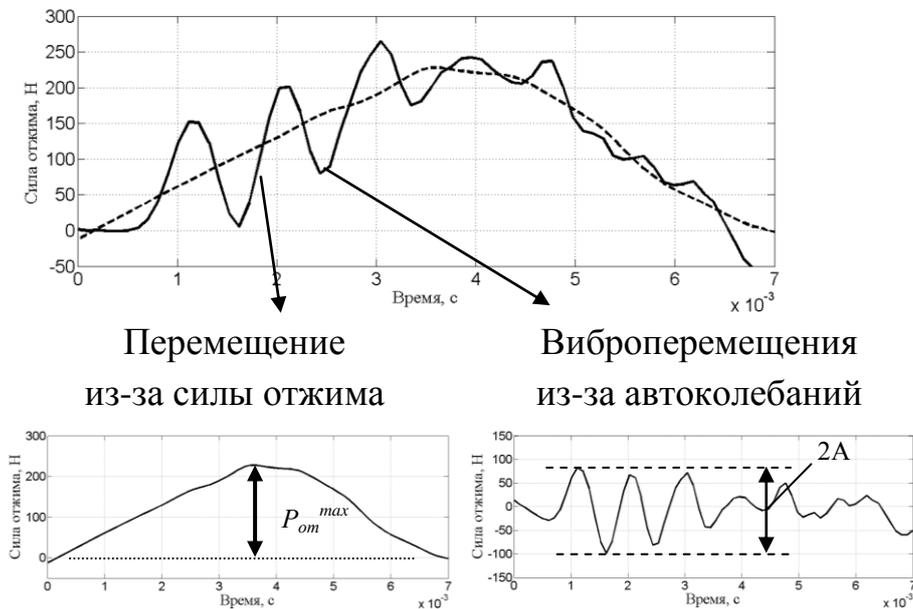


Рисунок 3 – Разделение cut-граммы на составляющие, вызванные силой отжима и автоколебаниями

Суть методики заключается в том, что cut-грамма каждого последующего среза зубом фрезы смещается относительно первого на величину периода цикла фрезерования ( $\tau_{ц.фр}$ ). Периодом цикла фрезерования считаем время между началом фрезерования соседних зубьев. Для однозубой фрезы (принятой для исследования) это время одного оборота. Важным в данной методике является точное определение величины  $\tau_{ц.фр}$ . Далее по смещенным cut-граммам автоколебаний определяется, за какое число резов зубом фрезы происходит смещение автоколебаний на один период. Сдвиг фаз определяется по формуле –

$\varphi = \frac{2\pi}{N}$  [рад], где  $N$  – число резов за которые автоколебания смещаются на один период.

На рис. 4 показан пример определения угла  $\varphi$  для встречного фрезерования. Приведены cut-граммы 11-го, 21-го, 31-го, 41-го и 51-го последовательных срезов. Выбор 11-го среза был сделан для удобства, т.к. максимум первой волны автоколебаний совпадает с линией сетки графика, соответствующей 1 мс. Из рис. 4 видно, что смещение автоколебаний на один период происходит за 40 резов. Таким образом, фазовый сдвиг составляет 0,157 рад или 9 град.

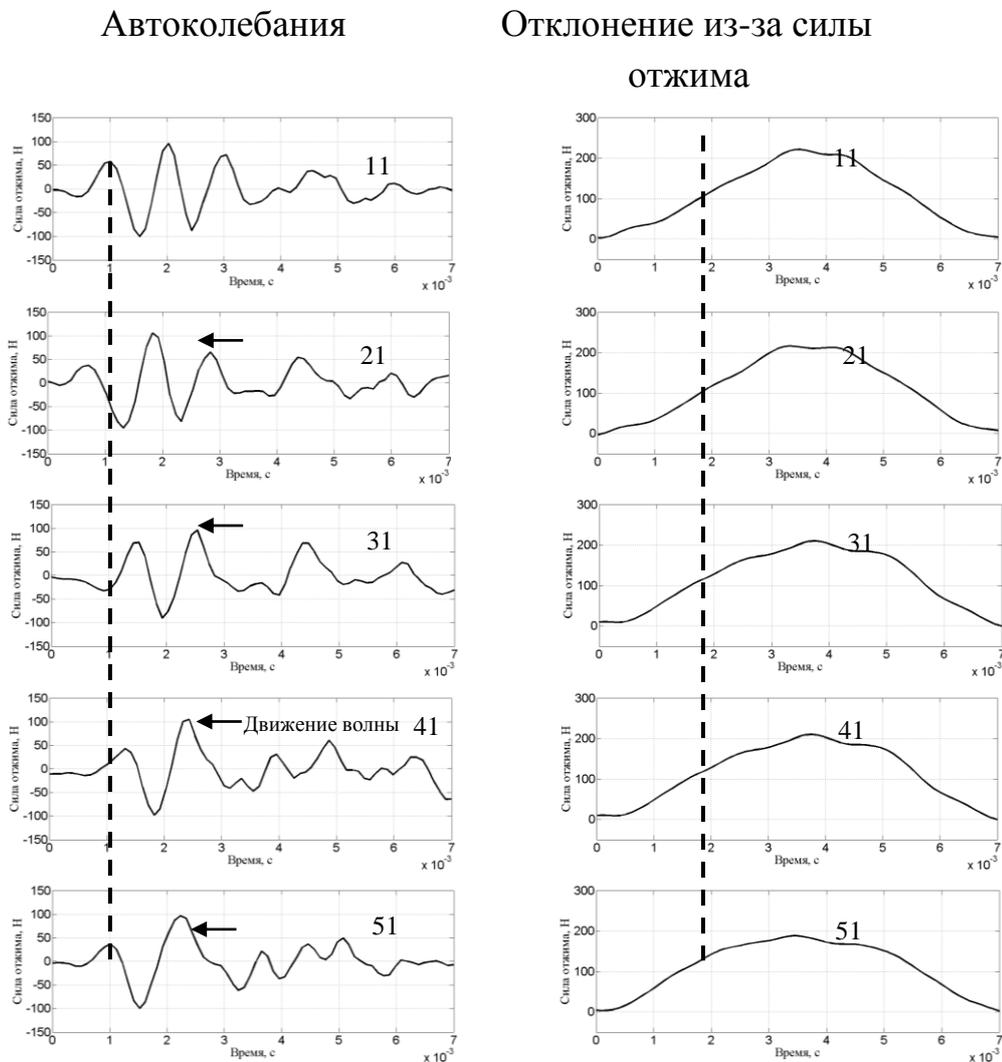


Рисунок 4 – Определение угла сдвига фаз автоколебаний по cut-грамме (встречное фрезерование;  $n_{fp}=560$  об/мин;  $S_z=0,05$  мм/зуб;  $B=3,4$  мм;  $t=0,5$  мм)

Аналогичная обработка cut-граммы была проведена и для попутного фрезерования (рис. 5). Угол сдвига фаз  $\varphi$  в этом случае равен  $\approx 52$  град. Причем, если при встречном фрезеровании движение волны автоколебаний противоположно направлению резания, то при попутном – совпадает с направлением резания.

Применение описанной в статье методики обработки cut-грамм позволяет более детально исследовать характеристики автоколебаний, возникающих при фрезеровании тонкостенных деталей, и количественно оценить технологические мероприятия по их подавлению.

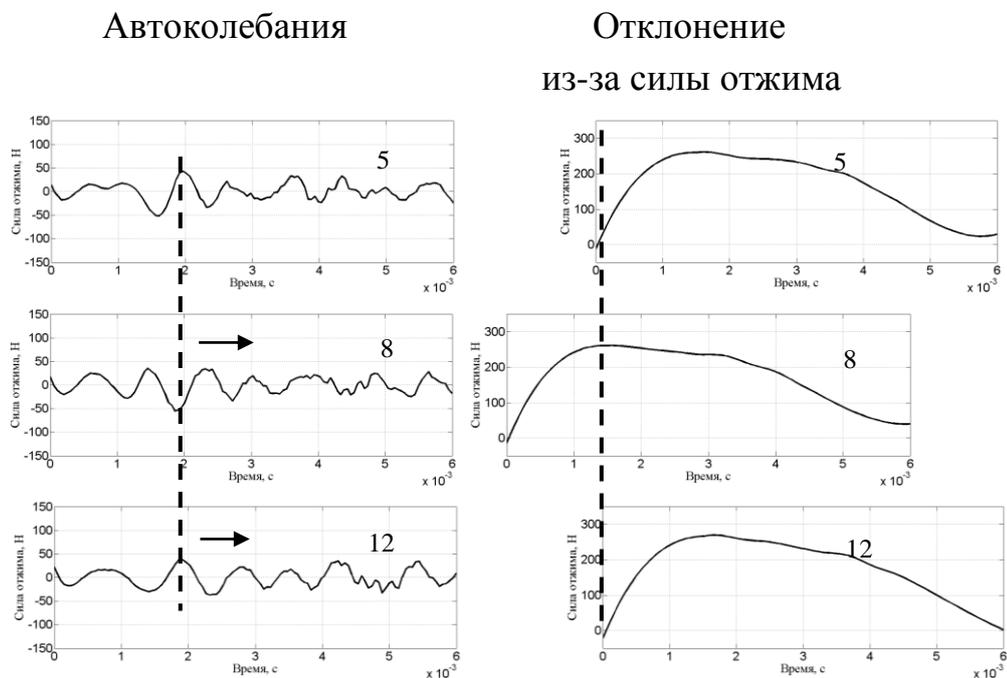


Рисунок 5 – Определение угла сдвига фаз автоколебаний по cut-грамме (попутное фрезерование;  $n_{фр}=560$  об/мин;  $S_z=0,05$  мм/зуб;  $B=3,4$  мм;  $t=0,5$  мм)

**Список использованных источников:** 1. Altintas Y. Chatter Stability in Metal Cutting and Grinding / Y. Altintas, M.Weck //Annals of the CIRP. – №53/2. – 2004. – P.619–642. 2. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1986. – 184 с. 3. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с. 4. Cheng K. Machining Dynamics: Theory, Applications and Practices / K. Cheng. – London: Springer, 2008. – 341 p. 5. Логоминов В.А. Формирование шероховатости обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании тонкостенных элементов деталей: дис. ... канд. техн. наук.: 05.03.01: защищена 21.02.2013: утв. 25.04.2013 / Логоминов Виктор

Алексеевич. – Запорожье, 2013. – 226 с. **6.** Introduction to Signal Processing [Электронный ресурс] / Sophocles J. Orfanidis. – Rutgers University, 2010. – 795 p. –Режим доступа к книге: [www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/i2sp](http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/i2sp).

**Bibliography (transliterated):** **1.** Altintas Y. Chatter Stability in Metal Cutting and Grinding / Y. Altintas, M. Weck // Annals of the CIRP. – №53/2. – 2004. – P.619–642. **2.** Zharkov I.G. Vibracii pri obrabotke lezviynym instrumentom / I.G. Zharkov. – L.: Mashinostroenie. Leningr. Otd-nie, 1986. – 184 s. **3.** Kudinov V.A. Dinamika stankov / V.A. Kudinov. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 360 s. **4.** Cheng K. Machining Dynamics: Theory, Applications and Practices / K. Cheng. – London: Springer, 2008. – 341 p. **5.** Logominov V.A. Formirovanie sherohovatosti obrabotanoj poverhnosti pri koncevom cilindricheskom frezerovanii tonkostennyh jelementov detalej: dis. ... kand. tehn. nauk.: 05.03.01: zashhishhena 21.02.2013: utv. 25.04.2013 / Logominov Viktor Alekseevich. – Zaporozh'e, 2013. – 226 s. **6.** Introduction to Signal Processing [Jelektronnyj resurs] / Sophocles J. Orfanidis. – Rutgers University, 2010. – 795 p. –Rezhim dostupa k knige: [www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/i2sp](http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/i2sp).