Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 http://naukovedenie.ru/

Том 8, №6 (2016) http://naukovedenie.ru/vol8-6.php

URL статьи: http://naukovedenie.ru/PDF/133TVN616.pdf

Статья опубликована 31.01.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:
Николаев С.М., Куць В.А., Иванов И.И. Метод детектирования автоколебаний узлов технологической системы при фрезерной обработке. Часть 2: Экспериментальная апробация // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №6 (2016) http://naukovedenie.ru/PDF/133TVN616.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта «мол_а» № 16-38-00330 «Разработка методов и алгоритмов идентификации динамических характеристик сложных конструкций по результатам модальных испытаний»

УДК 62

Николаев Сергей Михайлович
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Баумана», Россия, Москва
Инженер-исследователь
E-mail: nikolaev.sergei@outlook.com

Куць Владимир Андреевич
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Баумана», Россия, Москва[1]
Инженер-исследователь
E-mail: vlankuts@gmail.com

Иванов Илья Игоревич
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Баумана», Россия, Москва
Инженер-исследователь
E-mail: ivanovilig@yandex.ru

Метод детектирования автоколебаний узлов технологической системы при фрезерной обработке. Часть 2: Экспериментальная апробация

Аннотация. В данной работе проведено экспериментальное подтверждение эффективности разработанного алгоритма детектирования автоколебаний при фрезеровании. Возникновение автоколебаний, или так называемого чаттера, в процессе фрезерования приводят к значительным амплитудам вибраций инструмента/детали и сил резания. Чаттер происходят на частоте близкой к одной из собственных частот системы.

Авторами статьи разработан алгоритм детектирования автоколебаний на основе обработки временного отклика системы. В основе метода лежит анализ сингулярного спектра, который, в сочетании с демодуляцией и фильтрацией, позволяет интерпретировать компоненты временного отклика. Отношение амплитуды колебаний системы на частоте, не кратной частоте прохождения режущих кромок к максимальной амплитуде колебаний на частоте, кратной частоте прохождения режущих кромок является индикатором возникновения чаттера в системе.

[1] 105005, ул. 2-ая Бауманская 5

Во второй части статьи выполнено детектирование чаттера по временному отклику, записанному в процессе плоского фрезерования заготовки с одной степенью свободы. В результате работы алгоритма определены параметры режимов обработки, на которых в системе возникают автоколебания, проведена оценка скорости детектирования чаттера, определены «доминантные» частоты колебаний системы на разных режимах обработки.

Ключевые слова: автоколебания; детектирование чаттера; динамика фрезерования; устойчивость резания; сингулярный спектральный анализ; метод главных компонент; демодуляция; фильтрация

Описание проведения эксперимента по фрезерованию

Для верификации работы алгоритма проведен эксперимент по фрезерованию пластинки. Эксперимент состоит в следующем: необходимо провести обработку торцевой части алюминиевой пластинки, закрепленной на упругом столике (рис. 1); в процессе обработки снимаются показания акселерометра, который закреплен на столе. После проведения эксперимента проводится обработка показаний акселерометра.

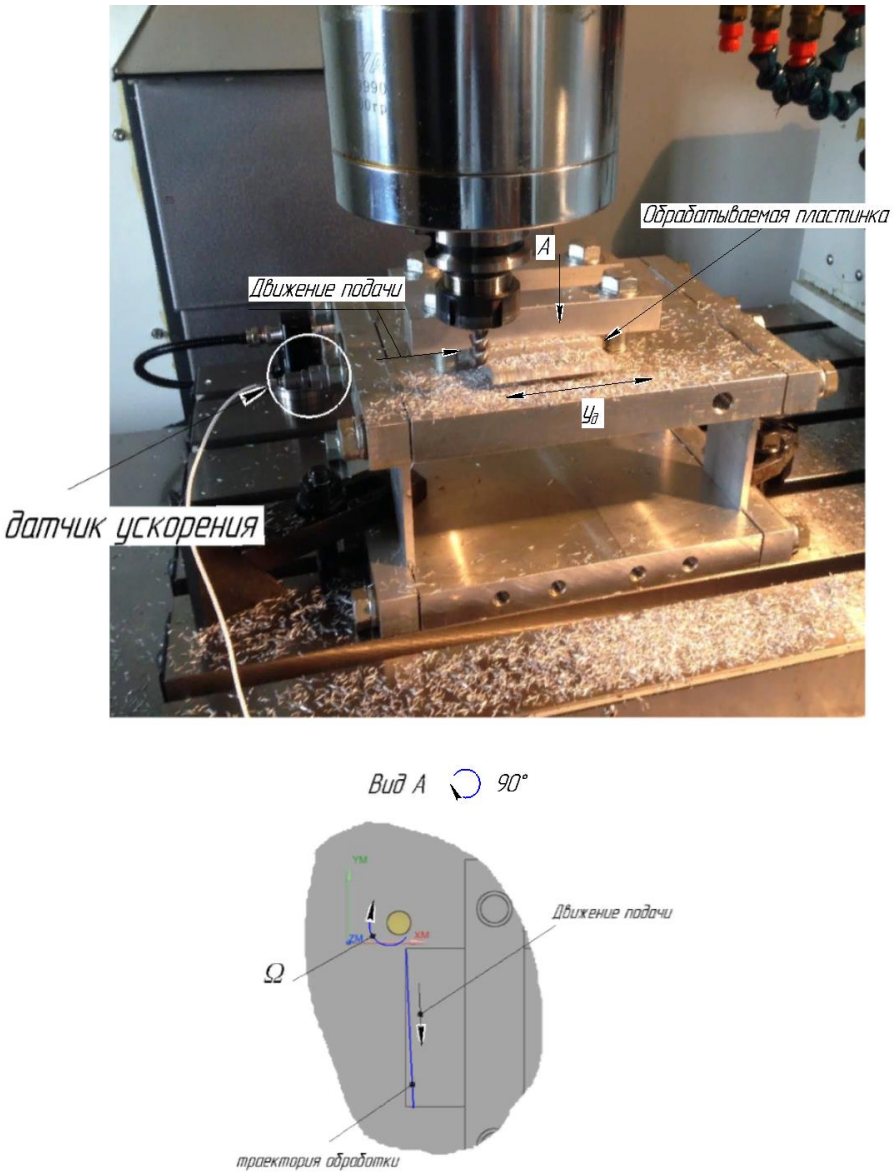


Рисунок 1. *Схема проведения эксперимента (разработано автором)*

Параметры инструмента приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры фрезы (составлено автором)

Количество режущих кромок, z	Радиус фрезы, R [мм]	Угол подъема винтовой линии, град
3	12	55

Параметры режимов обработки представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры режимов обработки (составлено автором)

№ Режима	Относительная частота прохождения режущих кромок, n_ω	Осевая глубина резания, a_p [мм]	Радиальная глубина резания, a_e [мм]	Подача на зуб, S_z [мкм/зуб]
1	1.2	8	0-2	40
2	1.3	8	0-2	40
3	1.5	8	0-2	40

Необходимо отметить, что пластинка жестко прикреплена к упругому столику, поэтому систему деталь-столик можно рассматривать как единое целое. Для определения собственных частот (СЧ) и форм системы был проведен экспериментальный модальный анализ [3, 4]. В результате модального анализа были получены следующие собственные частоты системы пластинка-столик: $p_1 = 82.4\ Гц$, $p_2 = 520.7\ Гц$

Обработка результатов эксперимента

После того, как были записаны ускорения системы в процессе фрезерования, проводилось детектирование автоколебаний. Обработка сигналов ускорений проводилась в несколько этапов:

1) С помощью разработанного алгоритма детектировались автоколебания и строилась «Диаграмма режимов»;

2) Подтверждение результатов работы алгоритма по виду сигналов и их спектров. Для более подробного изучения процесса фрезерования были построены графики изменения частот колебаний системы в процессе обработки.

Проанализируем результаты, полученные при обработке. На рисунке 3 представлена «Диаграмма режимов».

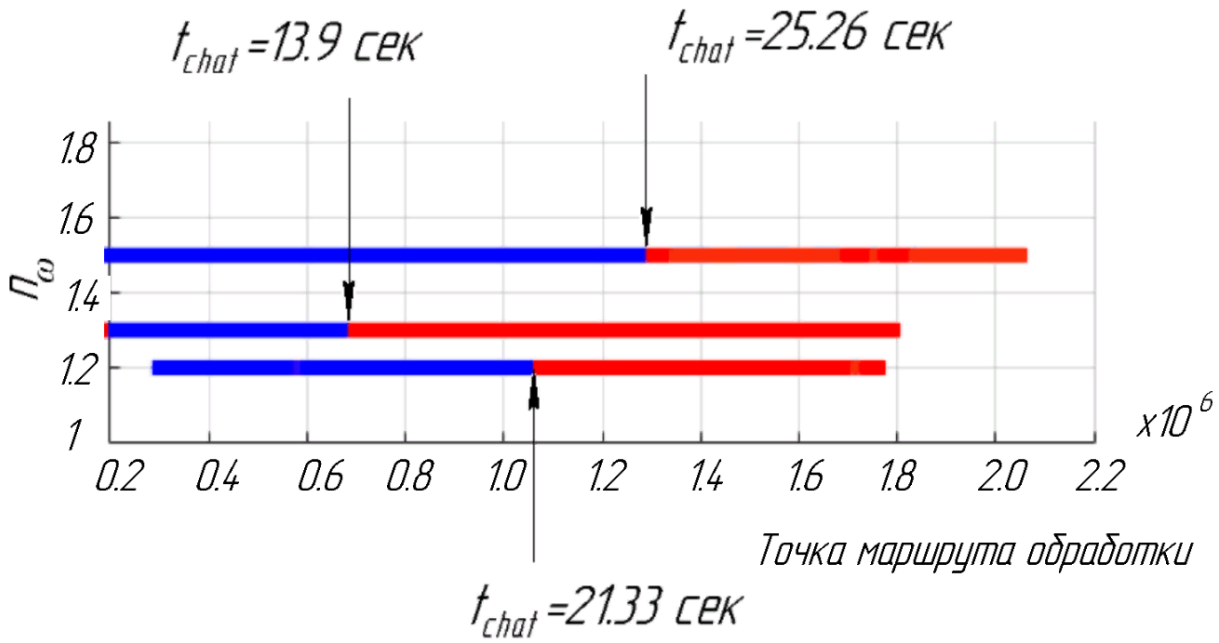
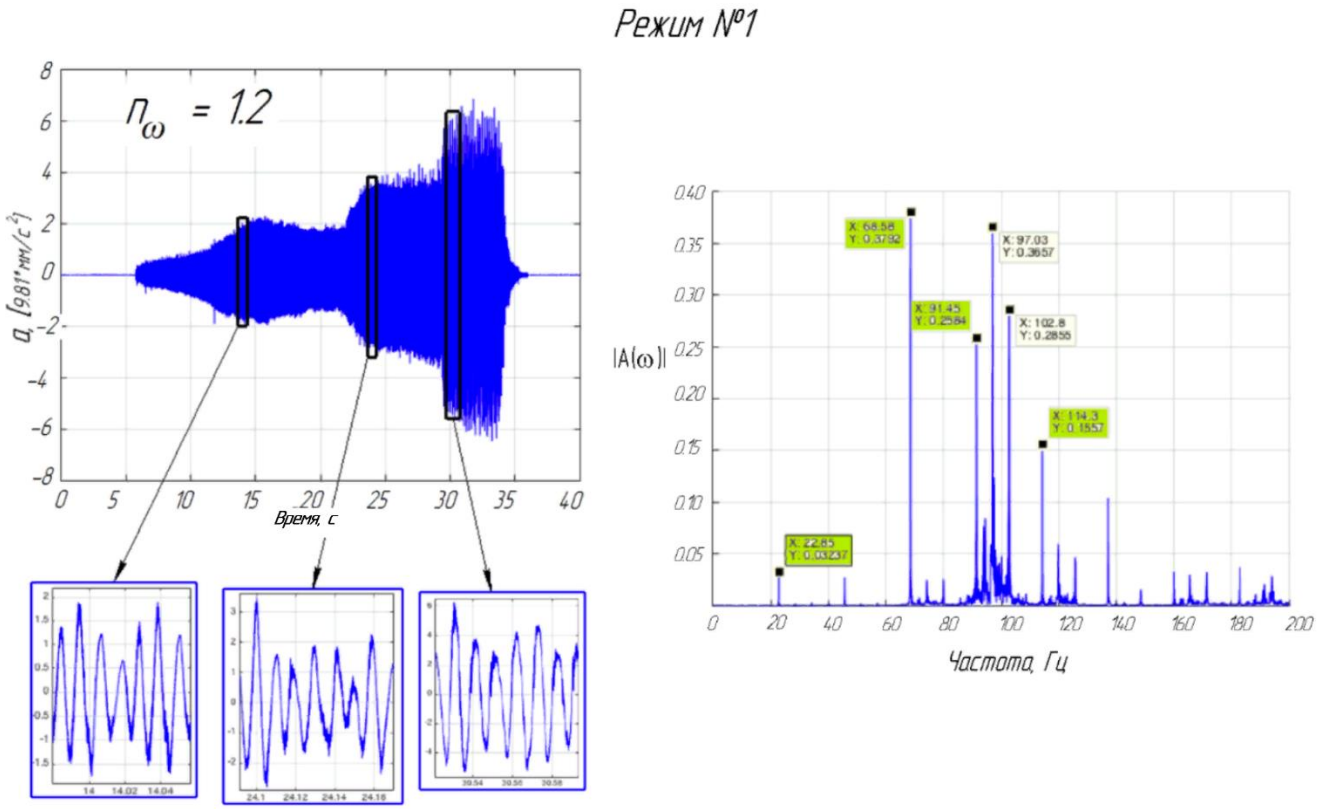


Рисунок 3. *Диаграмма режимов 1-3 (разработано автором)*

По «Диаграмме режимов» (рис. 3) видно, что в процессе обработки при достижении критической радиальной глубины резания в системе возникают автоколебания. Для подтверждения результатов работы алгоритма построим графики сигналов и их спектров (рис. 4).



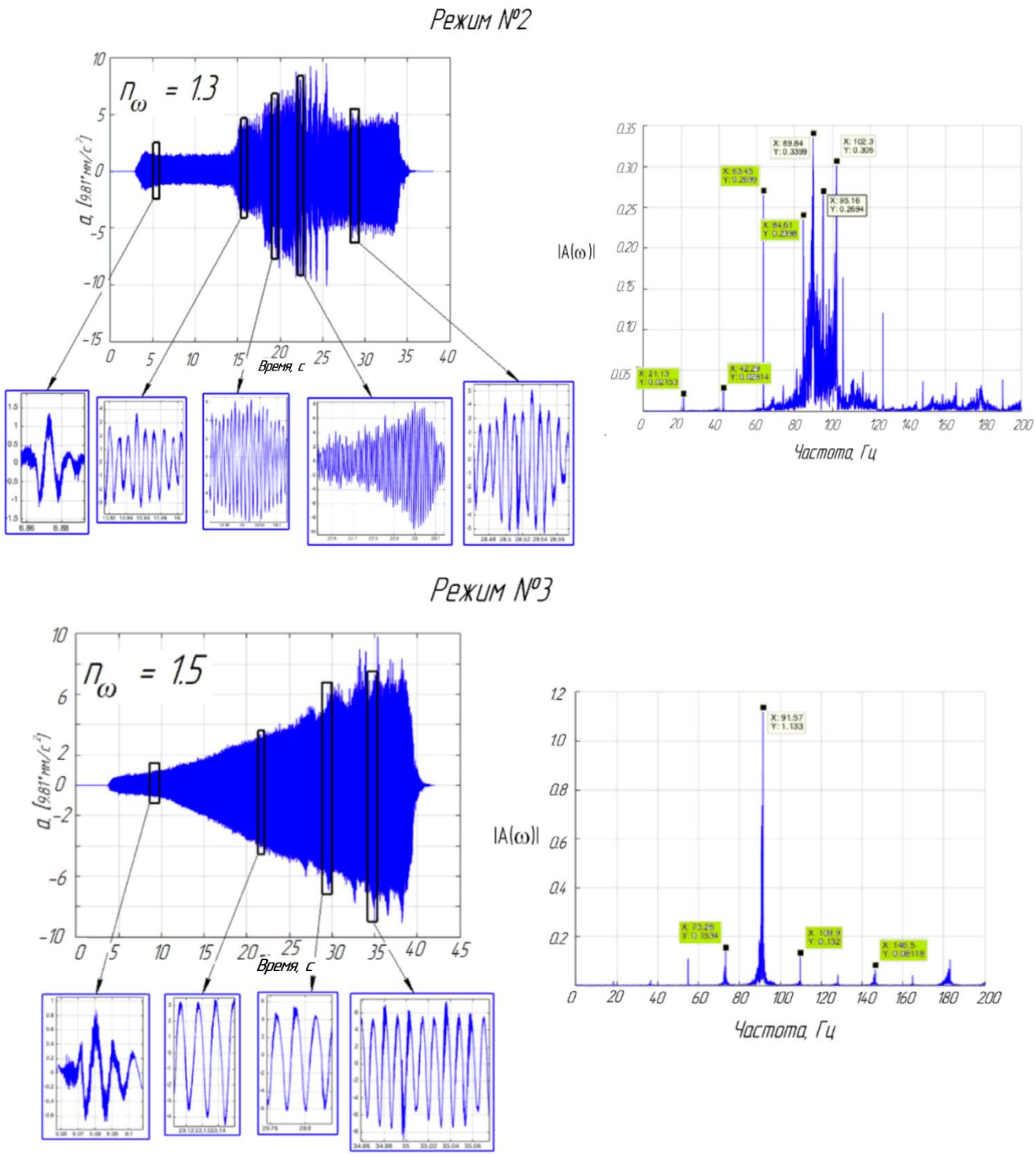
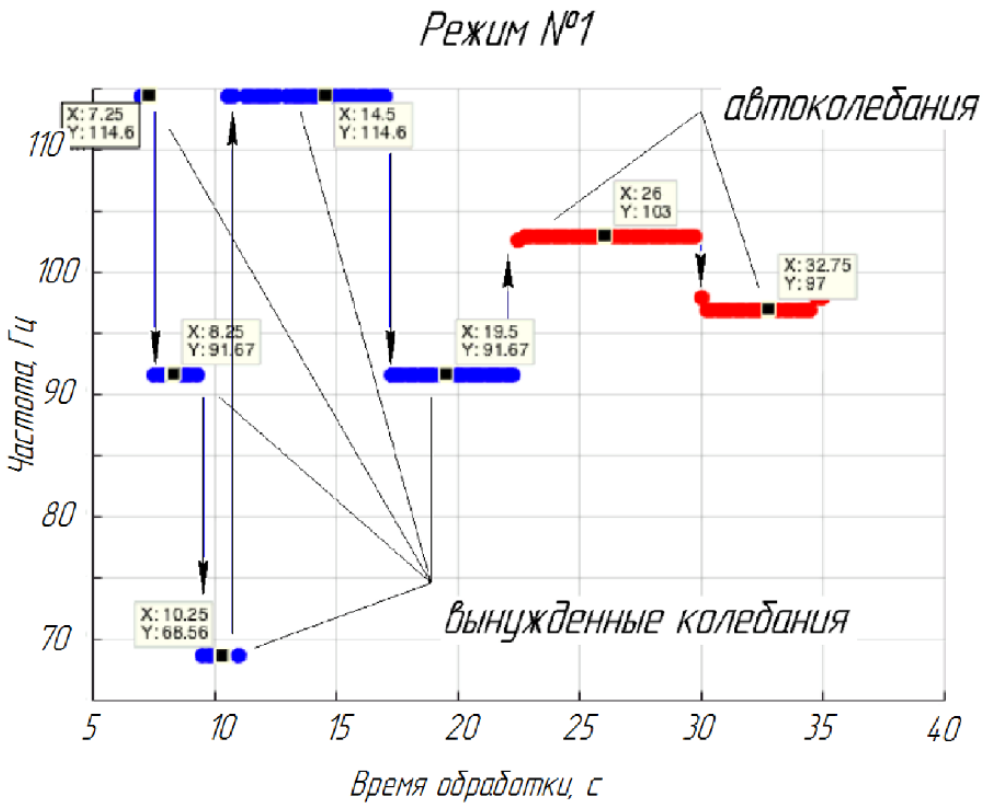
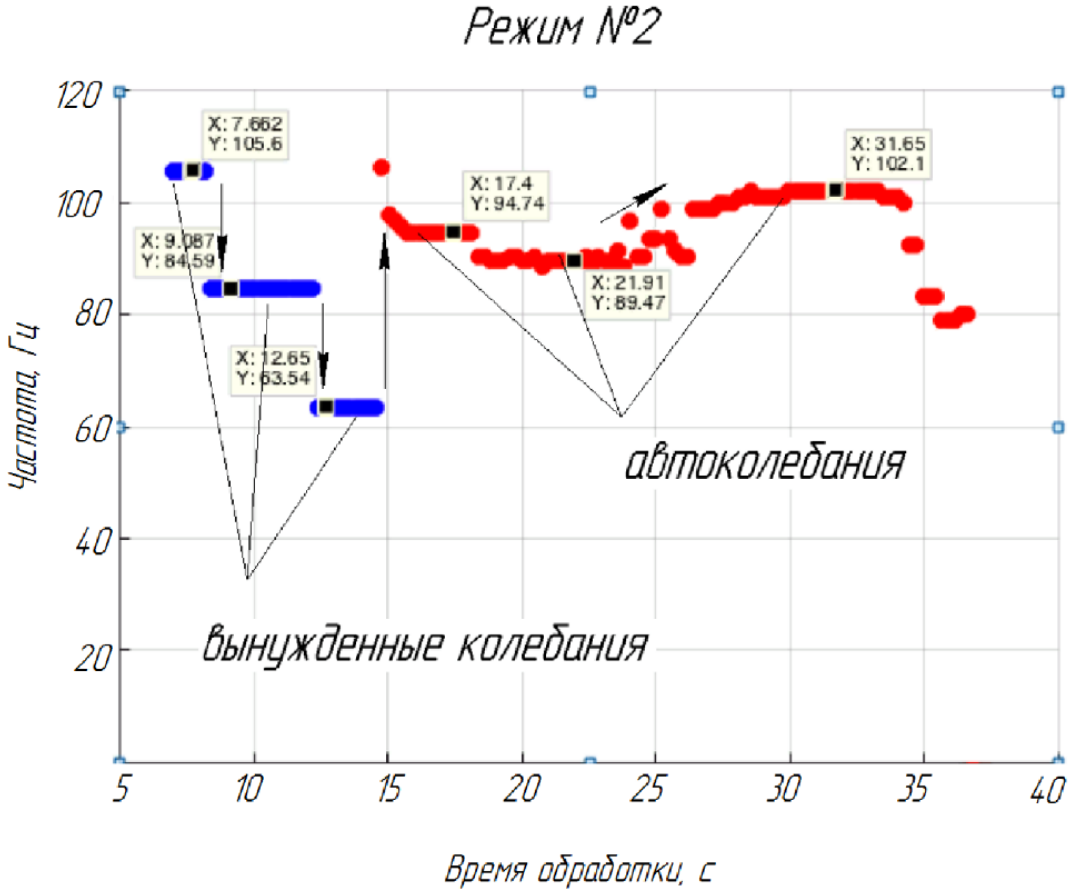


Рисунок 4. *Сигналы измерения датчика и их спектры для режимов 1-3 (разработано автором)*

Сигнал ускорений (рис. 4) показывает, что в процессе обработки для режимов 1-3 амплитуда сигнала сильно менялась: для режимов 1-2 амплитуда резко возрастает на отдельных участках, что является характерным признаком чаттера, а для режима 3 происходит постепенное увеличение амплитуды. В спектре сигналов ускорений содержаться частоты, кратные частоте прохождения режущих кромок (выделены зеленым цветом) и чаттерные частоты. Построим графики изменения доминантной частоты от времени обработки (рис. 5).


Режим №1
автоколебания
вынужденные колебания
X: 7.25
Y: 114.6
X: 14.5
Y: 114.6
X: 26
Y: 103
X: 32.75
Y: 97
X: 8.25
Y: 91.67
X: 19.5
Y: 91.67
X: 10.25
Y: 68.56
Частота, Гц
Время обработки, с


Режим №2
X: 7.662
Y: 105.6
X: 31.65
Y: 102.1
X: 17.4
Y: 94.74
X: 9.087
Y: 84.59
X: 21.91
Y: 89.47
X: 12.65
Y: 63.54
автоколебания
вынужденные колебания
Частота, Гц
Время обработки, с

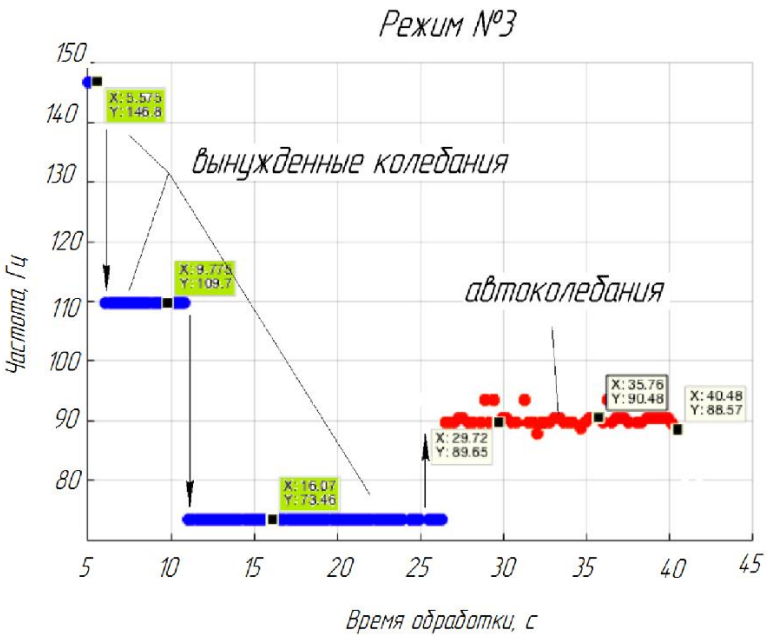


Рисунок 5. *Зависимость доминантной частоты процесса от времени обработки (разработано автором)*

Как видно из рисунка 5, в процессе обработки частота колебаний системы меняется: устойчивые колебания происходят на частотах, кратных частоте прохождения режущих кромок [2]; автоколебания происходят на разных частотах вблизи резонанса в зависимости от момента времени обработки. Стоит обратить внимание на режим №1. В процессе обработки, в диапазоне $t \approx 12 - 17$ с, увеличивается амплитуда ускорений (рис. 4), что может быть воспринято как начало «чаттера». Однако, изменение «доминантной» частоты колебаний системы (рис. 5), показывает, что этот временной диапазон соответствует переходу на частоту колебаний, с другой кратностью.

Проведем расчет значений критической радиальной глубины резания. На рисунке 6 представлена схема расчета.

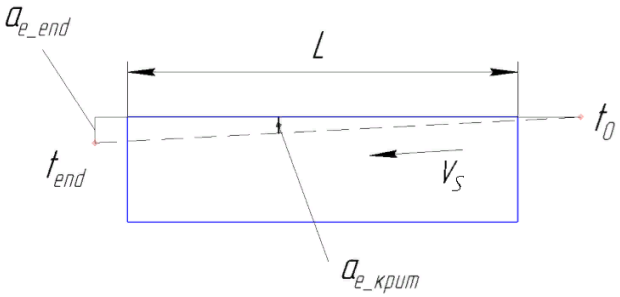


Рисунок 6. *Схема расчета критической радиальной глубины резания (разработано автором)*

Произведем расчет скорости подачи:

$$V_s = S_z \cdot z \cdot n \tag{1}$$

где: S_z - подача на зуб (мм/зуб), z - количество зубьев, n - скорость вращения шпинделя (об/мин.).

Скорость вращения шпинделя определяется по формуле:

$$n = \frac{60 f_{tpe}}{z} = \frac{60}{z} \frac{p_1}{n_\omega} \tag{2}$$

Тогда,

$$V_{S1} = \frac{60*82.4*40*10^{-3}}{1.2} = 164.8\ мм/мин$$

$$V_{S2} = \frac{60*82.4*40*10^{-3}}{1.3} = 152.1\ мм/мин$$

$$V_{S3} = \frac{60*82.4*40*10^{-3}}{1.5} = 131.8\ мм/мин$$

Изменение радиальной глубины резания происходит по линейному закону, поэтому

$$a_{e_крит} = t_{chat} * a_{e_end} \tag{3}$$

Критические значения радиальной глубины резания, при которых в системе возникают автоколебания на режимах 1-3, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры возникновения автоколебаний для режимов 1-3 (составлено автором)

№ Режима	Время детектирования, t_{chat} [с]	Критическая радиальная глубина резания, $a_{e_крит}$ [мм]
1	21.33	1.066
2	13.9	0.695
3	25.26	1.263

Заключение

В представленной статье авторами проведен анализ сигналов ускорений системы упругий столик-пластинка, записанных в процессе фрезерования на различных режимах. С помощью разработанного авторами алгоритма удалось определить критическую радиальную глубину резания, при которой на заданной частоте вращения шпинделя и подаче в системе возникают автоколебания (таблица 3). Построенная «диаграмма режимов» (рисунок 3) позволяет выбрать наиболее благоприятные условия обработки в представленной системе - $n_\omega = 1.5, a_{e_крит} = 1.263$ мм. Качественные показатели наличия автоколебаний в системе (амплитуды вибраций), подтверждают результаты работы алгоритма.

В некоторых случаях, при обработке сложнопрофильных деталей, допускается установка демпфирующих элементов в систему [5], что позволяет снизить уровень вибраций. Изменение «доминантной» частоты вибраций системы (рисунок 5) может упростить задачу поиска расположения демпфирующего устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Delio T., Tlusty J., Smith S. Use of audio signals for chatter detection and control // Journal of engineering for industry. - 1992. - Т. 114. - №2. - С. 146-157.
2. Faassen R. Chatter prediction and control for high speed milling // Eindhoven: Eindhoven University of Technology. - 2007.
3. Ewins D.J. Modal testing: theory and practice. - Letchworth: Research studies press, 1984. - Т. 15.
4. Peeters B., De Roeck G. Stochastic system identification for operational modal analysis: a review // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. - 2001. - Т. 123. - №4. - С. 659-667.
5. Faassen R. Chatter prediction and control for high speed milling // Eindhoven: Eindhoven University of Technology. - 2007.

Nikolaev Sergei Mikhaylovich
Bauman Moscow state technical university, Russia, Moscow
E-mail: nikolaev.sergei@outlook.com

Kuts Vladimir Andreevich
Bauman Moscow state technical university, Russia, Moscow
E-mail: vlankuts@gmail.com

Ivanov Ilia Igorevich
Bauman Moscow state technical university, Russia, Moscow
E-mail: ivanovilig@yandex.ru

A new method for chatter detection in milling. Part 2: Experimental approbation

Abstract. The experimental approbation of the developed chatter detection algorithm is presented in this paper. Chatter occurrence is one of the main problems in milling of pliable parts such as compressor blades. Self-excited vibrations or so-called chatter is a reason of the significant increase in vibrations and cutting forces in the tool-workpiece system during milling. Chatter occurs at the frequencies, which are close to the tool/workpiece eigenfrequencies.

The special algorithm for chatter detection based on the time-domain system response is developed. Singular spectral analysis with combination of demodulation and filtration is used to decompose time-domain response into a number of interpreted time series. Amplitude ratio of the time series components, which are aliquant to the tooth-passing frequency, and the main tooth-passing frequency component, is considered as chatter indicator.

Algorithm testing is implemented on the results of workpiece milling. Workpiece is fixed on the special rig, which has only one degree of freedom. The chatter frequencies have been estimated at different cutting conditions.

Obtained results demonstrated that the developed algorithm is able to detect self-excited vibrations fast enough to use it for on-line chatter detection during flexible parts milling.

Keywords: chatter detection; self-excited vibrations; milling dynamics; measurements; singular spectral analysis; principal component analysis; demodulation; filtration