

## Анализ вибрационных параметров концевых фрез при их износе

Д.П. Алейников<sup>1 а</sup>, А.В. Лукьянов<sup>2 б</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

<sup>а</sup>aleynikov@istu.edu, <sup>б</sup>loukian@inbox.ru

Статья поступила 16.10.2017, принята 21.10.2017

*В работе рассматриваются задачи определения вибрационных параметров, сопутствующих износу фрез. Для исследования использовалась разработанная система виброударозащиты обрабатывающих центров с трехкомпонентным датчиком вибрации. Исследования при ресурсных испытаниях фрез различных типов показали отсутствие однозначной зависимости между уровнем и направлением максимальной вибрации и степенью износа фрез. Спектральный анализ выявил, что у данных типов фрез на конечной стадии износа наблюдаются определенные изменения среднеквадратического значения виброускорения на некоторых гармониках спектра ускорения, что является индикатором критической степени износа инструмента.*

**Ключевые слова:** износ режущих кромок фрез; вибрация инструмента; диагностика состояния фрез по вибрации.

## Analysis of vibration parameters of end mills wearing

D.P. Aleynikov<sup>1 а</sup>, A.V. Lukyanov<sup>2 б</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevskiy St., Irkutsk, Russia

<sup>а</sup>aleynikov@istu.edu, <sup>б</sup>loukian@inbox.ru

Received 16.10.2017, accepted 21.10.2017

*The paper deals with the problems of determining vibration parameters associated with the wear of mills. The developed system for protection against high vibration with a three-component vibration sensor is used in the research Resource tests of mills of various types showed the absence of a unique relationship between the level and direction of maximum vibration and the degree of wear of mills. Spectral analysis revealed that, for these types of mills at the final stage of wear, certain changes in the vibration acceleration parameter are observed on certain harmonics of the acceleration spectrum, which is an indicator of the critical wear of the tool.*

**Keywords:** wear of cutting edges of milling cutters; tool vibration; vibration diagnostics of mills.

### Введение

Для защиты обрабатывающих центров от высоких динамических нагрузок разработана система виброударозащиты (СВУЗ), оснащенная трехкоординатным датчиком виброускорения и датчиком силы [1–3]. Информация о вибрационных и силовых воздействиях, возникающих при фрезеровании, регистрируется и сохраняется в памяти компьютера СВУЗ. Данный прибор в перспективе можно использовать и при проведении ресурсных испытаний фрез, а также при контроле износа фрез во время их эксплуатации [18, 19]. В последнем случае необходимо выявить зависимость параметров вибрации от степени износа фрез. Определение при ресурсных испытаниях фрез некоторых параметров вибраций и их предельных значений, связанных со значительным износом инструментов, и является целью настоящей работы.

Изучение различных видов износа позволяет выбрать наиболее рациональные области использования инструмента при конкретных условиях обработки. В производственных условиях не всегда возможно проследить за величиной износа зубьев фрезы, поэтому часто фрезу отправляют на переточку или замену ре-

жущих пластин, ориентируясь на ее стойкость — период работы инструмента до достижения критического износа. Учитывая, что стоимость современного высокопроизводительного инструмента весьма значительна и он, как правило, приобретает за рубежом, актуальной задачей современного машиностроения является переход на эксплуатацию инструмента по фактическому состоянию по параметрам износа, измеряемым одним из методов НК.

**Критерии износа.** В зависимости от назначения инструмента могут применяться различные критерии износа фрез:

- достижение предельного износа, при котором повышается вероятность хрупкого разрушения инструмента и становится невозможна его переточка;
- достижение износа, при котором недопустимо повышается шероховатость обработанной поверхности или нарушается точность обработки.

Первый критерий определяет рациональную эксплуатацию инструмента и применяется при предварительной обработке. Второй, технологический критерий применяется при чистовой обработке, обеспечивая заданное качество детали.

К параметрам износа относятся:

- линейный размер изношенной площадки на лезвии инструмента;
- сила и температура резания;
- шероховатость обработанной поверхности;
- уровень вибраций и шума.

Наиболее простым и доступным для измерения является параметр линейного размера изношенной площадки на лезвии инструмента. Контроль этого параметра производится со снятием инструмента. Силовой и температурный критерии используются в основном в лабораторных условиях. При увеличении износа инструмента увеличиваются сила и температура резания. Перспективными являются вибрационный и шумовой критерии, так как их возможно измерить при работе станка, не снимая инструмента [8, 11, 12].

Эксперимент. Ресурсные испытания девяти фрез для определения износостойкости инструмента при обработке нержавеющей стали проводились на обрабатывающем центре DMU80P. Испытания проводились с фрезами трех разных производителей, отличающимися геометрией (табл. 1) и особенностью специального износостойкого покрытия.

Диаметры фрез  $d = 20$  мм, число режущих кромок  $Z = 4$ .

Типы и геометрия фрез:

- ТИЗ/СКИФ/СПЕЦТЕХ — 0207;
- ТИЗ/СКИФ/СПЕЦТЕХ — 0209;
- ТИЗ/СКИФ/СПЕЦТЕХ — 0219.

Таблица 1

Особенности геометрии фрез

		207	209	219
Задний угол	$\alpha$	12,62°	10,76°	8,78°
Передний угол	$\gamma$	2°	1,52°	8,51°
Угол наклона винтовой канавки	$\omega$	50°	50°	39,94°
Торцевой задний угол	$\alpha_T$	5,76°	6,34°	5,01°
Торцевой передний угол	$\gamma_T$	9,92°	5,68°	3,01°

Режимы обработки: скорость вращения шпинделя — 1 910 об./мин; скорость резания — 120 мм/мин; глубина резания — 4 мм; ширина резания — 20 мм; подача на зуб — 0,1 мм/зуб; подача — 764 мм/мин. Время обработки заготовки при одном проходе по координате X составляло приблизительно 18 сек.

В процессе фрезерования при ресурсных испытаниях проводилось измерение виброускорения шпинделя по трем координатам: X (по направлению обработки), Y (поперек направления обработки), Z (в вертикальном направлении) с помощью трехкомпонентного пьезоакселерометра AP2038-100 (производитель — «ГлобалТест», Россия). Регистрация и обработка параметров вибрации проводилась с помощью модуля сбора данных NI 9234 и программы LabView фирмы National Instruments.

Результаты эксперимента. Проведенные испытания показали, что значение стойкости фрез изменялось от 20 с до 42 мин в зависимости от типа фрез и покрытия. На рис. 1 приведена диаграмма значений

стойкости фрез при появлении признаков недопустимого износа или разрушения инструмента. Например, фреза СКИФ 209 разрушилась после работы в течение 11 мин (рис. 2).

При каждом проходе обработки заготовки регистрировались сигнал и среднееквадратическое значение (СКЗ) виброускорения шпинделя по трем координатам станка. Максимальное значение вибрации наблюдалось по вертикальной координате. На первом проходе каждой новой фрезы наблюдалась высокая вибрация, что объясняется периодом приработки инструмента. Максимальный уровень вибрации каждой фрезы, зарегистрированный на шпинделе обрабатываемого центра во время испытаний, приведен на рис. 3. Сопоставление графиков стойкости фрез (рис. 1) и уровня вибрации (рис. 3) показывает, что высокая вибрация приводит к уменьшению стойкости фрез.

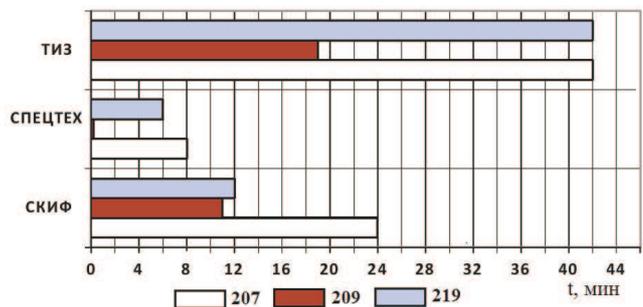


Рис. 1. Диаграмма стойкости фрез в зависимости от времени обработки



Рис. 2. Разрушение фрезы СКИФ 209

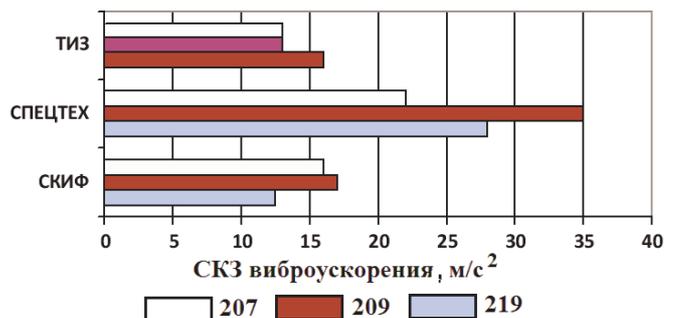


Рис. 3. Диаграмма уровней максимальной вибрации на шпинделе при фрезеровании

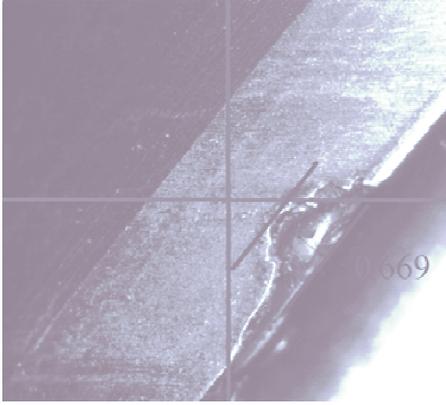


Рис. 4. Контроль износа задней кромки фрезы SKIF 219

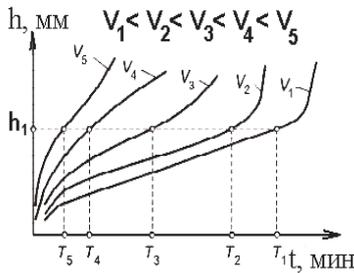


Рис. 5. Графики типичного износа режущих кромок фрез от наработки и скорости резания

Экспериментальное определение износа фрез выполнялось на специализированном стенде фирмы Zoller (Германия), который позволяет измерять все основные виды дефектов режущих инструментов с точностью до

1 мкм. На рис. 4 показан пример контроля износа задней кромки фрезы SKIF 219 с использованием установки Zoller.

Характеристики износа инструмента. В процессе фрезерования режущие кромки инструмента поочередно врезаются в заготовку, создавая при этом импульсы силы. В зависимости от материалов заготовки и инструмента, геометрических параметров инструмента и режимов обработки износ инструмента происходит с разной скоростью [4–6, 8, 9, 13]. Величину износа в зоне вершины лезвия  $h$  принято называть радиальным износом, который зависит от скорости резания [4, 5, 14, 15]. Для фрез с режущими пластинами к видам износа относятся выкрашивание, износ по задней поверхности, лункообразование, наросты на режущей кромке, пластическая деформация, термические трещины. При износе режущих кромок происходит изменение параметров воздействующих силовых импульсов [4, 16, 17, 19].

На рис. 5 приведены типичные графики износа режущих кромок фрез в зависимости от наработки и скорости резания [4]. На рис. 6 показаны аппроксимирующие кривые износа фрезы SKIF 219, восстановленные по значениям разрушения кромок в конце испытания. Кривые износа инструмента можно представить в виде экспоненциальных или полиномиальных зависимостей. В начале работы фрезы (на первых проходах обработки экспериментов) происходит приработка режущих кромок. Затем скорость износа режущих кромок стабилизируется и с некоторого значения становится нелинейной, так как износ и сколы режущих кромок начинают, в свою очередь, увеличивать статическую и динамическую составляющие силы резания.

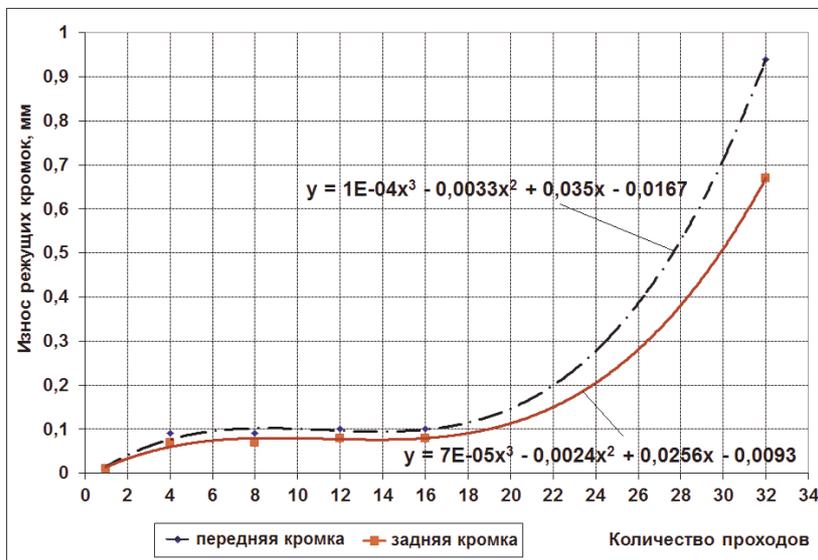


Рис. 6. Графики износа режущих кромок фрезы SKIF 219, восстановленные по значениям разрушения кромок в конце испытания

Основной спектральной составляющей при оптимальном режиме фрезерования, когда работают все режущие кромки фрезы, является составляющая на зубовой частоте  $f_3 = z f_1 = z \frac{n}{60}$ , где  $f_1$  — оборотная частота;  $z$  — число режущих кромок фрезы ( $z = 4$ ). В проведенных экспериментах спектральная составляющая зубовой частоты превышала другие гармониче-

ские составляющие оборотной частоты в 10 и более раз, т. е. СКЗ виброускорения определялось вибрацией зубовой частоты (рис. 7 а).

На рис. 7 б показаны тренды СКЗ виброускорения по трем координатам для фрезы SKIF 209, которые практически постоянны до 23-го прохода обработки заготовки (415 сек). На последней стадии износа наблюдались флуктуации СКЗ виброускорения, и на 33-м проходе фреза SKIF 209 сломалась (рис. 2).

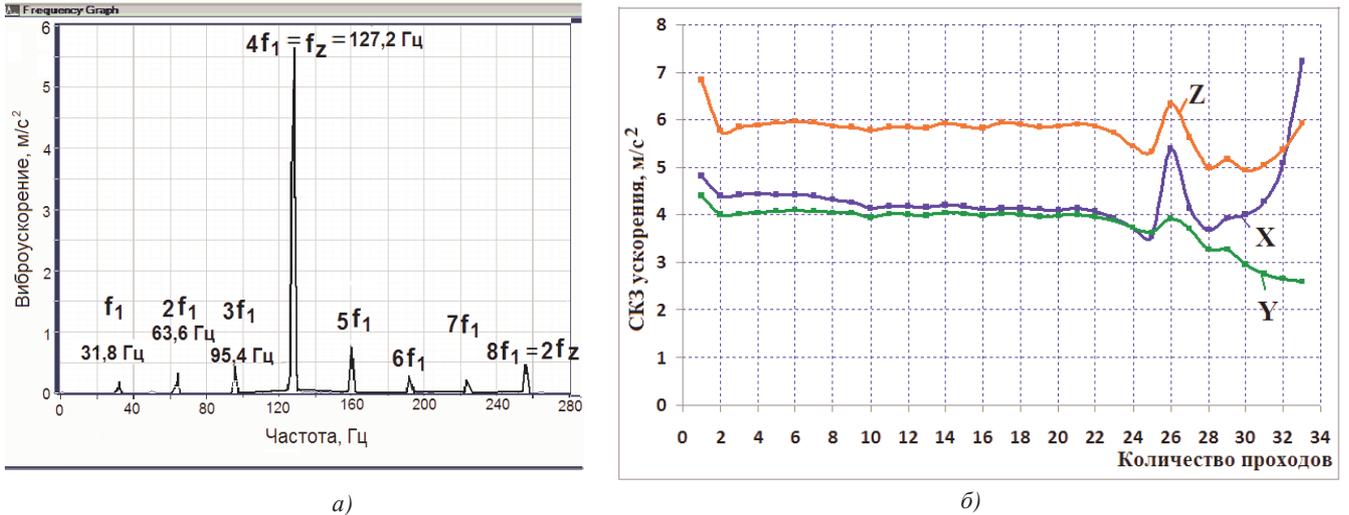


Рис. 7. Спектр виброускорения (а) и графики изменения СКЗ ускорения фрезы СКИФ 209 по трем координатам от числа проходов при проведенном испытании (б)



Рис. 8. График производной СКЗ виброускорения фрезы СКИФ 209

Общей тенденции увеличения СКЗ виброускорения по всем трем координатам от времени работы девяти испытанных фрез не наблюдалось, однако во всех случаях с увеличением износа фрез возрастала флуктуация этого параметра (рис. 7 б). Следовательно, возможным диагностическим параметром приближающегося критического износа и излома фрез может являться скорость

изменения СКЗ виброускорения на интервалах, соответствующих времени одного прохода обработки заготовки (18 сек). На рис. 8 приведен график производной СКЗ виброускорения фрезы СКИФ 209, который иллюстрирует резкое увеличение флуктуации данного параметра по мере износа фрезы перед ее поломкой.

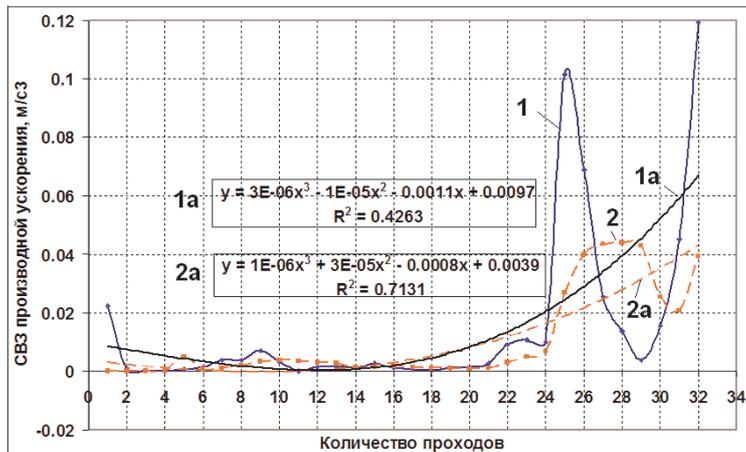


Рис. 9. Фреза СКИФ 209. Средневыпрямленное значение (СВЗ) производной СКЗ виброускорения по координате X на проходах (1); то же при сглаживании функции в окне (5 значений) (2); аппроксимация графиков 1, 2 полиномами 3-й степени (1а, 2а)

Для того чтобы привести флуктуацию данного параметра к монотонно возрастающей зависимости, найдем средневыпрямленное значение (СВЗ) данного параметра. На рис. 9 показана функция СВЗ производной СКЗ виброускорения по координате X (кривая 1). Методами сглаживания полученной знакопостоянной функции являются: а) ее аппроксимация полиномом 3-й степени (кривая 1а на рис. 9); б) сглаживание в окне (кривая 2 с шириной окна 5 проходов на рис. 9); в) аппроксимация сглаженной функции полиномом 3-й степени (кривая 2а на рис. 9). Каждый из вибрационных параметров, приведенных на рис. 9, является функцией времени (количества проходов инструмента при обработке заготовки) и может быть выбран в качестве кандидата в диагностические параметры степени износа фрез. Окончательный вывод о выборе адекватного диагностического параметра можно сделать только на основе проведения корреляционного анализа этих параметров на соответствие функциям износа фрез.

Математической мерой корреляции двух случайных величин служит коэффициент корреляции — показатель взаимного вероятностного влияния двух случайных величин [7, 10, 20]. Примем X, Y — две случайные величины, причем Y характеризует случайную величину износа фрез в функции наработки, X — случайную величину изменения от наработки принятых вибрационных параметров.

Тогда их коэффициент корреляции задается формулой (1):

$$R_{X,Y} = \frac{\text{cov}_{XY}}{\sqrt{D_X \cdot D_Y}}, \quad (1)$$

где  $\text{cov}_{XY}$  — ковариация — мера линейной зависимости двух случайных величин; D — дисперсия.

$$\text{cov}_{XY} = \overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}, \quad (2)$$

где  $\bar{y}$  и  $\bar{x}$  — среднее случайных величин;  $\overline{xy}$  — среднее произведение.

Дисперсия, мера разброса значений случайной величины относительно ее математического ожидания, рассчитывается для переменных X и Y по формулам (3) и (4):

$$D_X = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - (\bar{x})^2 = \overline{x^2} - (\bar{x})^2, \quad (3)$$

$$D_Y = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} - (\bar{y})^2 = \overline{y^2} - (\bar{y})^2 \quad (4)$$

где  $\overline{x^2}$ ,  $\overline{y^2}$  — средние квадраты x и y;  $(\bar{x})^2$  и  $(\bar{y})^2$  — квадраты среднего случайных величин.

Результаты вычисления коэффициентов корреляции  $R_{X,Y}$  зависимостей от наработки параметров износа нескольких фрез и сопутствующих вибрационных параметров приведены в табл. 2, 3. Результаты вычислений показывают, что с параметрами износа фрез имеют значимую статистическую взаимосвязь ( $R_{X,Y} > 0,7$ ) только СВЗ производной СКЗ виброускорения при оконном сглаживании (п. 4 табл. 2, 3) и аппроксимирующие полиномы СВЗ производной СКЗ виброускорения.

Таблица 2

Коэффициенты корреляция  $R_{X,Y}$  зависимостей от наработки параметров износа фрезы СКИФ 209 и сопутствующих вибрационных параметров

	X	Y	Z	Среднее значение
СКЗ виброускорения	0,047	0,967	0,733	0,582
Производная СКЗ виброускорения	0,641	0,325	0,349	0,438
СВЗ производной СКЗ виброускорения	0,641	0,254	0,302	0,399
СВЗ производной СКЗ виброускорения при оконном сглаживании	0,823	0,844	0,763	0,810
Аппроксимация полиномом 3-й степени СВЗ производной СКЗ виброускорения	0,981	0,854	0,780	0,872

Таблица 3

Коэффициенты корреляция  $R_{X,Y}$  зависимостей от наработки параметров износа фрез СКИФ 219, ТИЗ 219 и сопутствующих вибрационных параметров

	X	Y	Z	Среднее значение
СКИФ 219				
СВЗ производной СКЗ виброускорения при оконном сглаживании	0,682	0,856	0,633	0,724
Аппроксимация полиномом 3-й степени СВЗ производной СКЗ виброускорения	0,991	0,996	0,988	0,992
ТИЗ 219				
СВЗ производной СКЗ виброускорения при оконном сглаживании	0,595	0,600	0,633	0,609
Аппроксимация полиномом 3-й степени СВЗ производной СКЗ виброускорения	0,326	0,954	0,914	0,731

**Заключение**

Проведенные ресурсные испытания девяти фрез в заданном режиме обработки позволили измерить, зарегистрировать, обработать и проанализировать данные пространственной вибрации на шпинделе в зоне крепления фрез. Выбранные вибрационные параметры в сочетании с проведенными измерениями степени износа фрез позволили с использованием корреляционного анализа оценить степень влияния случайных процессов износа фрез на сопутствующие износу параметры вибрации. При обработке экспериментальных данных вибрации при износе фрез общей тенденции к увеличению виброускорения по всем координатам в широкой полосе частот и на гармониках оборотной и зубцовых частот не наблюдалось. Спектральный состав вибрации практически полностью определялся первой гармоникой зубцовой частоты, т. е. все режущие кромки фрез работали с одинаковой нагрузкой, резонансные колебания фрезы отсутствовали. Вибрация генерировалась периодическими взаимодействиями режущих кромок фрезы с материалом заготовки. Значительная вибрация возникала при первом проходе после смены фрез, что объясняется периодом приработки нового инструмента. После приработки, на втором и последующих проходах вибрация уменьшалась. По мере износа фрез возникают, как правило, нарастающие флуктуации СКЗ виброускорения. Это обусловило выбор в качестве диагностических параметров сигналы, пропорциональные производной СКЗ виброускорения и их аппроксимации и сглаживающие функции. Выявлено, что износ фрез в наибольшей степени коррелируется с полиномиальной аппроксимацией средневывявленных значений производных СКЗ виброускорений по вертикальной Z и поперечной Y координатам. В большинстве случаев этот параметр сигнализирует об износе фрез и по координате обработки заготовки X.

Таким образом, проведенные измерения и анализ вибрационных параметров при ресурсных испытаниях фрез позволили определить особенности изменения общего уровня вибрации, направления максимальных колебаний и спектральных составляющих вибрации шпинделя и инструмента при увеличении степени износа фрез. Выявлены некоторые параметры вибраций, изменяющиеся на конечной стадии износа фрез. Аппроксимация графиков этих параметров дает аналитические зависимости, по которым проведен корреляционный анализ их взаимосвязи с уравнениями износа инструмента.

Данные исследования проводились при постоянных режимах обработки. Представляет значительный интерес возможность использования полученных диагностических параметров и при варьировании режимов и направлений обработки.

#### *Литература*

1. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Мониторинг динамического состояния обрабатывающих центров // Материалы VII Всероссийской науч.-практической конф. «Авиационно-

строение и транспорт Сибири»: сб. ст. Иркутск, 2016. С. 197-200.

2. Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Портной А.Ю. Система защиты обрабатывающих центров от опасных динамических нагрузок на основе анализа параметров вибрации и силы // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2017. Т. 21, № 4 (123). С. 30-38.

3. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Моделирование сил резания и определение вибродиагностических признаков дефектов концевых фрез // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 1 (33). С. 39-47.

4. Нагорный В.В. Контроль динамического состояния металлообрабатывающей технологической системы и прогнозирование ее ресурса: моногр. М., 2016. 242 с.

5. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов. М.: Машиностроение, 2007. 304 с.

6. Барков А.В. Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по их виброакустическим характеристикам // Судостроение. 1985. № 3. С. 21-23.

7. Шиндовский Э., Щюрц О. Статистические методы управления качеством: пер. с нем. М.: Мир, 1976. 597 с.

8. Чащин Н.С., Иванов Ю.Н., Сидорова А.В., Семенов Е.Н., Стуров А.А. Исследование технологии обработки отверстий малых диаметров в полимерном композиционном материале на робототехническом комплексе // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2017. Т. 21, № 6 (125). С. 39-48.

9. Чащин Н.С., Иванов Ю.Н. Обработка отверстий в смешанных пакетах методом орбитального сверления // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та 2015. № 11 (106). С. 44-49.

10. Кокрен У. Методы выборочного исследования / под ред А.Г. Волкова; пер с англ. И.М. Сониной. М.: Статистика, 1976. 440 с.

11. Неразрушающий контроль / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. Т. 8. 789 с.

12. Григорьев С.Н., Гурин В.Д., Козочкин М.П. Диагностика автоматизированного производства. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.

13. Семенов Е.Н., Беломестных А.С., Сидорова А.В. Исследование частотных характеристик робота Kuka kg 210 r2700 extra // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. всерос. молод. науч.-практической конф. М., 2016. С. 252-257.

14. Сидорова А.В. Модель управления точностью обработки на операции фрезерования кромок на РТК // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: материалы IX Всерос. науч.-практической конф. / Иркут. нац. исслед. техн. ун-т. Иркутск, 2017. С. 246-250.

15. Сидорова А.В. Исследование обработки отверстий ПКМ на РТК, дефект отклонения от круглости // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: материалы Всерос. молод. науч.-практической конф. М., 2016. С. 258-262.

16. Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении // Вестн. ИрГТУ. 2013. № 12. С. 23-25.

17. Савилов А.В., Пятых А.С. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. 2015. Т. 17, № 2. С. 211-216.

18. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование пространственной вибрации обрабатывающего центра в режиме фрезерования // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 96-101.

19. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей об-

рабатывающих центров // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2015. № 2 (97). С. 28-35.

20. Campatelli G., Scippa A. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4. Conference on High Performance Cutting. 2012. P. 563-568.

#### References

1. Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. Monitoring the state of dynamic machining center// Air-transport engineering of Siberia // Materialy VII Vserossiiskoi nauch.-prakticheskoi konf. «Aviamashinostroenie i transport Sibiri»: sb. st. Irkutsk, 2016. P. 197-200.

2. Luk'yanov A.V., Aleinikov D.P., Portnoi A.Yu. System of control of emergency situations of machining center by vibration and stress // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2017. T. 21, № 4 (123). P. 30-38.

3. Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. Modeling of the cutting forces and determination vibrodiagnostics symptoms of defects of end mills // Systems. Methods. Technologies. 2017. № 1 (33). P. 39-47.

4. Nagornyi V.B. Monitoring the dynamic state of the metal-working technological system and forecasting its resource: monogr. M., 2016. 242 p.

5. Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. Cutting materials. M.: Mashinostroenie, 2007. 304 p.

6. Barkov A.V. Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration // Sudostroenie. 1985. № 3. P. 21-23.

7. Shindovskii E., Shchyurts O. Statistical methods of quality management: per. s nem. M.: Mir, 1976. 597 p.

8. Chashchin N.S., Ivanov Yu.N., Sidorova A.V., Semenov E.N., Sturov A.A. Investigation of the technology of processing holes of small diameters in a poly-dimensional composite material on a robotic complex // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2017. T. 21, № 6 (125). P. 39-48.

9. Chashchin N.S., Ivanov Yu.N. Processing of openings in mixed packages by the method of orbital drilling // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2015. № 11 (106). P. 44-49.

10. Kokren U. Methods of selective research / pod red A.G. Volkova; per s angl. I.M. Sonina. M.: Statistika, 1976. 440 p.

11. Non-destructive testing / pod obshch. red. V.V. Klyueva. M.: Mashinostroenie, 2005. T. 8. 789 p.

12. Grigor'ev S.N., Gurin V.D., Kozochkin M.P. Diagnosis of computer-aided manufacturing. M.: Mashinostroenie, 2011. 600 p.

13. Semenov E.N., Belomestnykh A.S., Sidorova A.V. A study of the frequency characteristics of the robot Kuka kr210 r2700 extra // Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sb. st. vseros. molod. nauch.-prakticheskoi konf. M., 2016. P. 252-257.

14. Sidorova A.V. Model of accuracy control processing in the operation of milling edges on the RTK // Aviamashinostroenie i transport sibiri: materialy IX Vseros. nauch.-prakticheskoi konf. / Irkut. nats. issled. tekhn. un-t. Irkutsk, 2017. P. 246-250.

15. Sidorova A.V. Investigation of hole machining PKM on RTK, defect deviation from roundness // Aviamashinostroenie i transport Sibiri: materialy Vseros. molod. nauch.- prakticheskoi konf. M., 2016. P. 258-262.

16. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Vibration effect on accuracy and quality of hole surface under drilling // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2013. № 12. P. 23-25.

17. Savilov A.V., Pyatykh A.S. The identification cutting force coefficients for simulation of the machining // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. T. 17, № 2. P. 211-216.

18. Luk'yanov A.V., Aleinikov D.P. Research of vibration machining center in milling mode // Systems. Methods. Technologies. 2014. № 1 (21). P. 96-101.

19. Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. Studying fixation dynamics of machining center spindle vibration sensors // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2015. № 2 (97). P. 28-35.

20. Campatelli G., Scippa A. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4. Conference on High Performance Cutting. 2012. P. 563-568.