

УДК 621.452.3

Ю. В. Грачев<sup>1</sup>, канд. техн. наук Г. В. Пухальская<sup>2</sup>,  
С. В. Критчин<sup>1</sup>, Т. А. Панченко<sup>2</sup>

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОЛЕС

<sup>1</sup> Государственное предприятие «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье  
<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет

*Оценено качество балансировки вспомогательного инструмента. Измерен дисбаланс оправок для высокоскоростной обработки центробежных колес. Экспериментально исследован шпиндель станка, на основе чего рекомендован рабочий диапазон частот вращения шпинделя.*

**Ключевые слова:** вспомогательный инструмент, балансировка, шпиндель, частота вращения.

### Введение

Центробежные колеса (ЦБК) – одни из наиболее сложных деталей современных ГТД. Постоянно возрастающие требования к точности профиля лопаток и шероховатостей несущих поверхностей моноколеса приводят к необходимости внедрения новейших технологий формообразования поверхностей. Прогрессивным методом изготовления ЦБК является фрезерование на 5-координатных станках с ЧПУ с высокими скоростями резания [1].

При высокой скорости вращения жесткая технологическая система переходит в разряд упругодеформируемой, упругие и диссипативные характеристики которой накладывают существенные ограничения на ее режимы работы. Поэтому для практической реализации высокоскоростной обработки необходимо выбрать допустимые режимы резания, установить значения вибродиагностических параметров технологической системы для управления качеством обрабатываемой детали и техническим состоянием самой системы.

Высокоскоростная обработка для конкретной технологической системы осуществима в очень узком диапазоне скоростей, подач и глубин резания, который характеризуется низкими уровнями вибраций. Обычно технологическую систему подразделяют на четыре подсистемы: заготовка, инструмент, приспособление, станок, – каждая из которых включает в себя ряд структурных единиц (шпиндель, оправка, фреза, зажимные приспособления и др.) [2].

Высокая скорость вращения шпинделя увеличивает влияние вибрации инструмента на процесс резания. Поскольку фрезерование ЦБК требует большого вылета фрезы, то инструмент под-

вержен значительным вибрациям. Поэтому используют балансируемые оправки, которые позволяют:

- снизить вибрации инструмента;
- в несколько раз увеличить срок службы инструмента и подшипников станка;
- повысить точность и качество обрабатываемой поверхности.

**Цель работы:** повышение производительности и качества концевое высокоскоростного фрезерования центробежных колес за счет эффективного использования вспомогательного инструмента и возможностей станка.

**Объект исследования:** вспомогательный инструмент нескольких конструктивных вариантов различных изготовителей и мотор-шпиндель универсального обрабатывающего центра Starrag ZS 500/130.

**Предмет исследования** – жесткость системы СПИД при высокоскоростном фрезеровании.

**Оценка реального качества балансировки вспомогательного инструмента**

Чем выше скорость, тем больше центробежная сила, вызванная дисбалансом и тем сильнее вибрация. Центробежная сила увеличивается с квадратом скорости вращения тела, имеющего неравномерное распределение массы, то есть дисбаланс будет возникать из-за избытка центробежной силы, вызванного вращением более тяжелой стороны ротора. Вот почему чем выше скорость вращения, тем большее значение имеет балансировка.

Постоянные источники дисбаланса создаются конструкцией или возникают в процессе производства. На вспомогательном инструменте дисбаланс возникает из-за асимметричных углублений в приводных шпоночных пазах, расточек в

оправках, а также из-за ориентирующего углового паза на фланцах конусов HSK-A. На режущих инструментах дисбаланс возникает из-за различия в глубине и длине стружечных канавок, из-за лысок на хвостовиках, при использовании однолезвийных инструментов и т. п. Такой дисбаланс можно устранить до некоторой степени за счет предварительной балансировки инструмента изготовителем.

Переменные источники дисбаланса изменяют его величину при сборке и смене инструмента. К ним относятся цанги и зажимные гайки, которые занимают различное положение при каждом повторном затягивании, зажимные винты, ввернутые на различную глубину и т. п. Такой дисбаланс может корректировать только пользователь.

Назначением балансировки оправок является улучшение распределения массы корпуса для компенсации центробежных сил в пределах, установленных для данной скорости вращения шпинделя. Производители высокоскоростных фрезерных станков обычно предписывают для оправок, используемых на их станках, уровень балансировки G1 или G2,5 в соответствии со стандартом ISO 1940/1. Класс точности балансировки G2,5 означает, что скорость вибрации не должна превышать 2,5 мм/с, т. е. точность балансировки жестких роторов характеризуется в стандарте с виброскоростью – произведением удельного дисбаланса на максимальную эксплуатационную частоту вращения ротора.

Для определения уровня балансировки оправок использовался балансировочный станок Acuro фирмы Schunk (рис. 1), а для проверки радиального биения – микроскоп Zoller (рис. 2).



Рис. 1. Балансировочный станок Acuro фирмы Schunk



Рис. 2. Микроскоп Zoller для настройки осевого инструмента

Были измерены девять различных оправок (табл. 1), семь из которых имели дисбаланс выше допустимого G2,5. Поэтому для повышения жесткости системы необходима динамическая балансировка инструмента и оправки. Центробежные силы несбалансированных оправок увеличивают нагрузку на подшипниковый узел шпинделя и снижают качество обработки деталей.

#### Исследование динамических характеристик шпиндельного узла

Шпиндельный узел – один из основных узлов металлорежущего станка, непосредственно влияющий на производительность обработки и точность обрабатываемых изделий. Одним из важных показателей качества шпиндельного узла являются его динамические характеристики, поскольку они наиболее полно характеризуют качество его конструкции, изготовления и сборки [3].

Для оценки влияния колебаний на качество обработки деталей проводилось измерение вибрационных характеристик мотор-шпинделя станка Starrag ZS 500/130 (рис. 3) с различными видами оправок. С помощью специального кронштейна на корпус шпинделя устанавливались датчики вибрации ABC 017-06. Датчики устанавливались в трех взаимно перпендикулярных направлениях, одно из которых совпадало с продольной осью шпинделя. Измерение вибрационных характеристик проводилось по всему диапазону частот вращения шпинделя при изменении частоты с 500 об/мин до 12000 об/мин с шагом 500 об/мин.

Таблица 1 – Результаты измерения дисбаланса оправок

№	Оправка	Фреза	Измерения на балансировочном станке Асуго			Измерения на микроскопе Zoller
			Макс. доп. частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>	Класс точности балансировки $G$	Дисбаланс, г·мм	Радиальное биение инструмента, мм
1	Гидравлическая Gewefa 93.05.036.016 HSK-A+C63 20*100	без фрезы 216 906.4 D12 6151-00-1151 отбалансированная	4299 5538 6006 12000	4,6 5,4 3,3 1,9	11,1 8,6 8,0 3,2	0,033
2	Гидравлическая Gewefa 93.05.036.016 HSK-A+C63 20*100	без фрезы	15390	2,9	3,1	0,010
3	Гидравлическая Schunk	204776 20 50070608	12000	0,8	1,6	0,019
4	Гидравлическая Schussler 1 HSK-A6320-100	SK-606323-081	358	125,3	132,9	–
5	Гидравлическая Schussler 2 HSK-A6320-100	SK-606323-081 без фрезы	502 378	89,6 132,1	95,0 94,5	0,031
6	Механическая Nikken HSK 63A-C20-95G	с эталоном без фрезы	6099 13244	7,3 9,5	7,8 9,1	0,026
7	Механическая Maxip HSK A63 20X95E	4524364	4343	10,3	11,0	0,003
8	Термооправка T48	без фрезы	19519	2,5	1,8	–
9	Термооправка T2	без фрезы	661	56,7	36,1	–



Рис. 3. Универсальный обрабатывающий центр Starrag ZS 500/130

При вибрографировании оправок Schunk, Nikken, Schussler 2 с различным уровнем балансировки (рис. 4–6) повышение уровня вибрации шпинделя наблюдается при частоте вращения 7000 об/мин и составляет 0,17g (2,3 мм/с), 0,14g (1,7 мм/с) и 0,49g (6,6 мм/с) соответственно, при 8000...9500 об/мин понижается, а максимальной величины он достигает при 12000 об/мин и

равен 0,64g (4,95 мм/с), 1,43g (11,3 мм/с), 1,26g (8,7 мм/с).

Однако при сравнении виброскорости трех оправок по всему диапазону частот вращения шпинделя (табл. 2) видно, что до  $n = 6000$  об/мин виброскорость практически не изменяется, а при повышении  $n$  — изменяется незначительно. Это свидетельствует о том, что наибольшее влияние

на жесткость технологической системы и, следовательно, на качество обработки детали оказывает шпиндельный узел. Поэтому необходимо найти нерезонансный диапазон частот вращения, который для данной технологической системы

составляет 0...6000 об/мин и 8000...9500 об/мин. Последний диапазон является предпочтительным, поскольку обеспечивает максимально возможную производительность обработки.

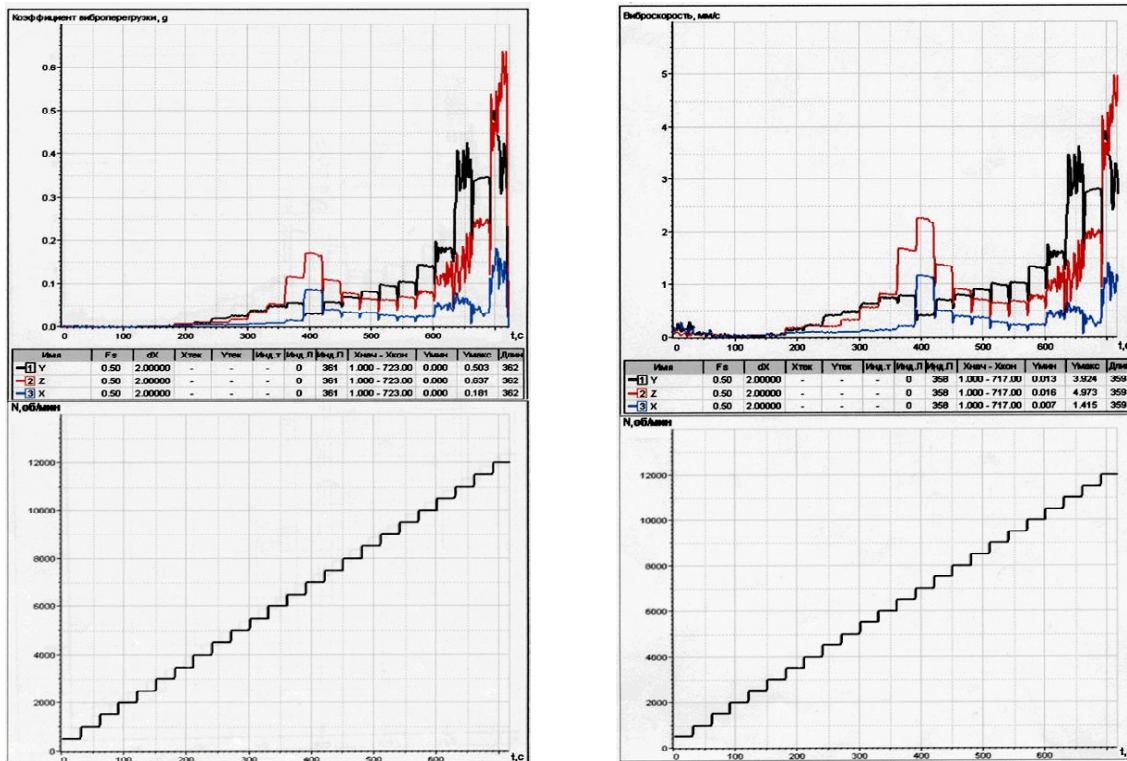


Рис. 4. Вибрографирование гидравлической оправки Schunk

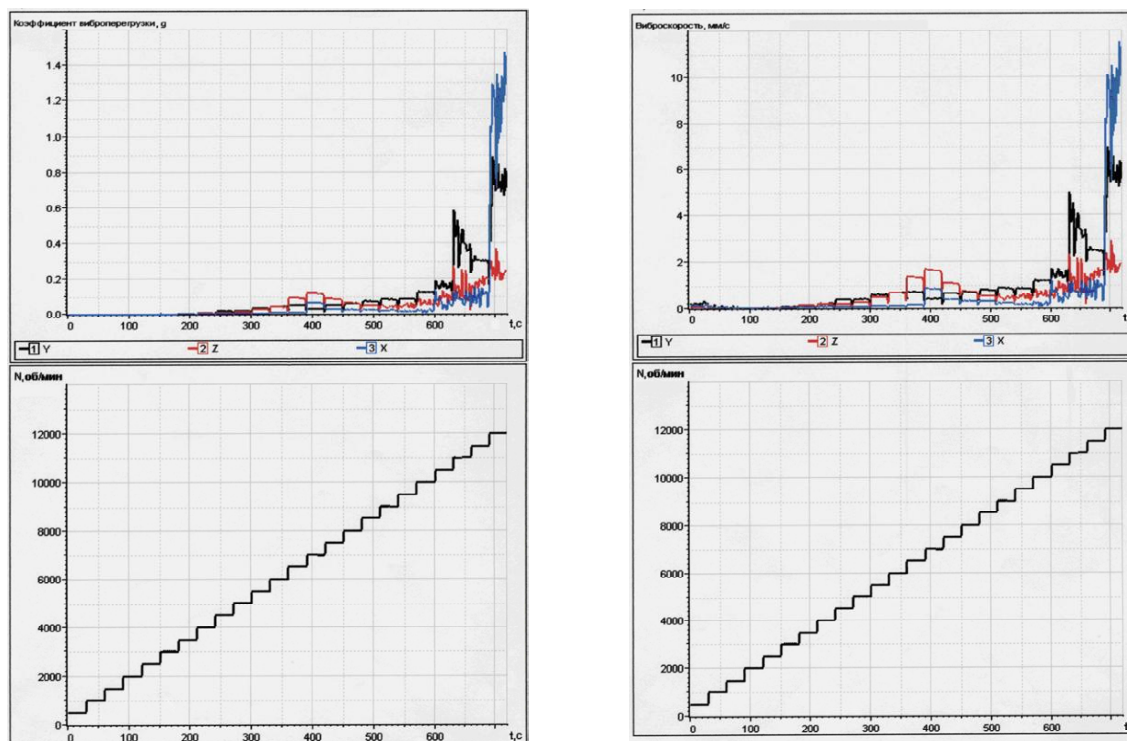


Рис. 5. Вибрографирование механической оправки Nikken



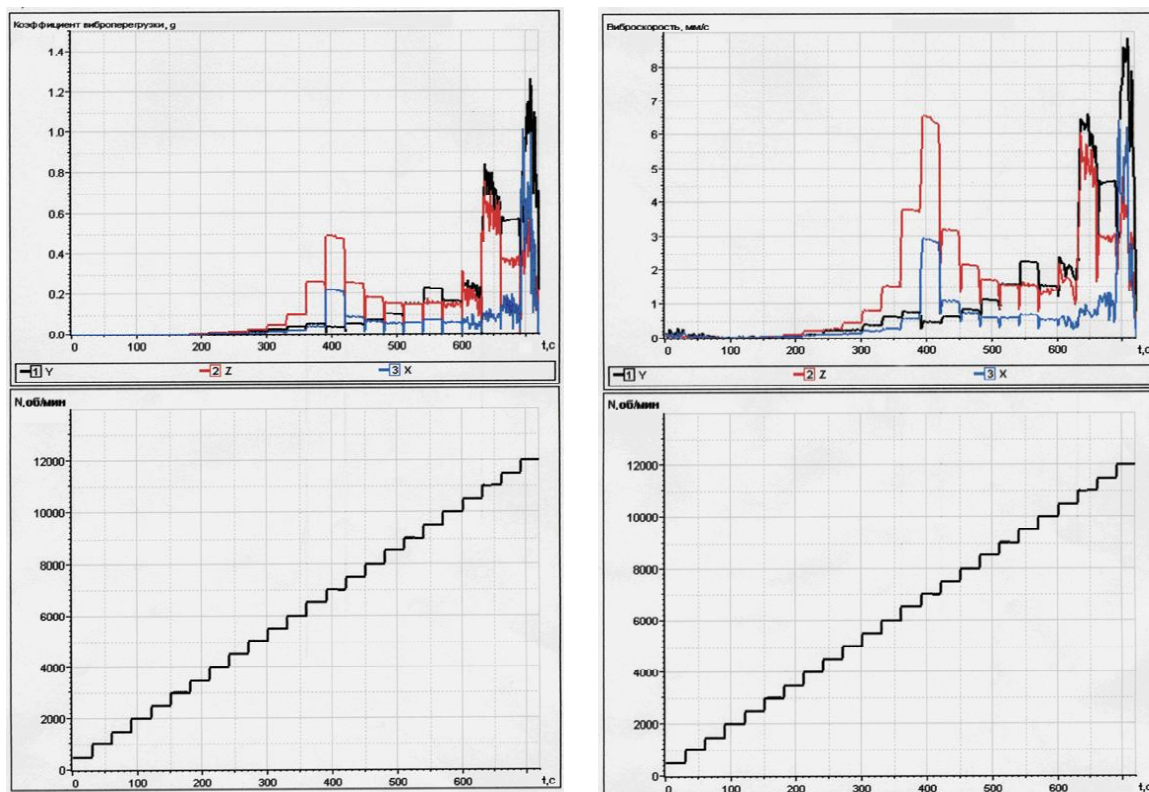


Рис. 6. Вибрографирование небалансированной гидравлической оправки Schussler 2

Таблица 2 – Виброскорость (мм/с) шпинделя станка Starrag ZS 500/130 с разными оправками по всему диапазону частот вращения

Частота вращения шпинделя, об/мин	Вид оправки			Частота вращения шпинделя, об/мин	Вид оправки		
	Гидравлическая Schunk (с фрезой)	Механическая Nikken (с эталоном)	Гидравлическая Schussler (с фрезой)		Гидравлическая Schunk (с фрезой)	Механическая Nikken (с эталоном)	Гидравлическая Schussler (с фрезой)
500	0,3	0,2	0,3	6500*	1,7	1,4	3,8
1000	0,1	0,1	0,2	7000*	2,3	1,7	6,6
1500	0,1	0,1	0,1	7500*	1,4	1,2	3,2
2000	0,1	0,1	0,1	8000	0,9	0,8	2,2
2500	0,1	0,1	0,1	8500	0,9	0,9	1,7
3000	0,1	0,1	0,1	9000	1,0	1,0	1,6
3500	0,2	0,2	0,2	9500	1,0	1,0	2,3
4000	0,3	0,3	0,3	10000*	1,3	1,2	1,5
4500	0,4	0,4	0,4	10500*	1,7	1,7	2,4
5000	0,5	0,5	0,5	11000*	3,2	5,0	6,6
5500	0,7	0,6	0,8	11500*	2,8	2,6	4,6
6000	0,8	0,7	1,6	12000*	4,95	11,3	8,7

\* – зоны повышенного уровня вибрации шпинделя

Вибрации высокооборотных шпинделей на холостом ходу определяются остаточными дисбалансами их роторов, а при эксплуатации – технологическими дисбалансами оправки с инструментом и переменными нагрузками от реакций

сил резания. Роторы шпинделей станков балансируют как отдельные детали в собственных подшипниках, что может соответствовать 2-му классу точности по ГОСТ 22061 (ИСО 1940). Допустимость такой балансировки оценивается уровнем

вибраций корпуса шпинделя в рабочем диапазоне оборотов. Согласно пределам оценки колебательных свойств амплитуда виброскорости электрошпинделя должна лежать в пределах 0,7–1,1 мм/с [2], что для данной системы выполняется до  $n = 6000$  об/мин. В противном случае шпиндель следует балансировать в собственном корпусе с соблюдением условий эксплуатации, т. е. по 1-му классу. Также не допускается эксплуатация шпинделя при вибрациях выше 4,5–7,0 мм/с, т. е. при  $n = 7000$  об/мин,  $n = 11000$  об/мин и выше.

#### Выводы

1. Результаты измерения дисбаланса оправок для высокоскоростной обработки подтверждают необходимость определения реального качества балансировки при входном контроле, а также их балансировки по необходимости.

2. Вибрографирование шпинделя станка подтвердило наличие резонанса в рабочем диапазоне оборотов шпинделя, который оказывает наибольшее влияние на жесткость технологической системы и, следовательно, на качество обработки детали.

3. В результате исследований были найдены рабочие диапазоны частот вращения шпинделя, которые составили 0...6000 об/мин и 8000...9500 об/мин.

#### Перечень ссылок

1. Определение траектории режущего инструмента для пятикоординатной высокоскоростной обработки несущих поверхностей лопаток и моноколес авиационных ГТД на стан-

- ках с ЧПУ / [Петров С. А., Карась Г. В., Мозговой С. В., Качан А. Я.] // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 1. – 115 с.
2. Шелег В. К. Технологическое обеспечение параметров точности и качества сложнопрофильных деталей при высокоскоростной многокоординатной обработке / Шелег В. К., Присевков А. Ф., Клавсуть П. Н. // Вестник БНТУ. – 2009. – № 5. – 120 с.
3. Хомяков В. С. Исследование динамических характеристик шпиндельных узлов / Хомяков В. С., Кочинев Н. А., Сабиров Ф. С. // Вестник МГТУ «Станкин». – 2008. – № 4. – 200 с.
4. Барабанов А. Б. Расчет конструкции патрона для фрезерования лопаток компрессоров / Барабанов А. Б., Завгородний В. И., Маслов А. Р. // Вестник МГТУ «Станкин». – 2008. – № 2. – 62 с.
5. Высокотехнологическое обеспечение обработки дисков ГТД из жаропрочных сплавов на обрабатывающих центрах / [Панасенко В. А., Качан А. Я., Мозговой С. В., Карась Г. В.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 8. – 245 с.
6. Богуслаев В. А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД / [Богуслаев В. А., Муравченко Ф. М., Жеманюк П. Д. и др.] – Запорожье : изд-во ОАО «Мотор Сич», 2003. – 395 с.
7. Богуслаев В. А. Высокоскоростное финишное фрезерование лопаток моноколес / Богуслаев В. А., Качан А. Я., Карась В. П. // Вестник двигателестроения. – 2002. – № 1. – 110 с.

Поступила в редакцию 06.09.2010

#### Грачев Ю.В., Пухальська Г.В., Критчин С.В., Панченко Т.О. Підвищення ефективності високошвидкісного фрезерування відцентрового колеса

*Оцінена якість балансування допоміжного інструменту. Виміряно дисбаланс оправок для високошвидкісної обробки відцентрових коліс. Експериментально досліджено шпиндель верстата, на основі чого рекомендовано робочий діапазон частот обертання шпинделя.*

**Ключові слова:** допоміжний інструмент, балансування, шпиндель, частота обертання.

#### Grachev Yu., Pukhal's'ka G., Kritchyn S., Panchenko T. Providing of parameters of exactness and quality at the high speed milling of centrifugal wheels

*The quality of balancing of auxiliary tool is appraised. The disbalanc of mounting is measured for HSM (High Speed Machining) treatment of centrifugal wheels. Shpindel' of machine-tool is experimentally investigational, what the working ranges of frequencies of rotation of shpindel are recommended on the basis of.*

**Key words:** the auxiliary tool, balancing, shpindel, frequency of rotation.