

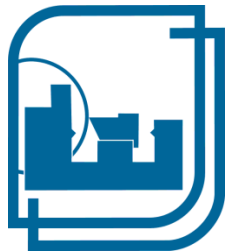
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ
ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ
УСТОЙЧИВОСТЬ**



**ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЧНОСТНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС
ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ
ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ
УСТОЙЧИВОСТЬ**

**Магистр: Годзула И. Г., гр. МС-09-1м.
Руководитель: д.т.н., профессор Ключко А. А.**

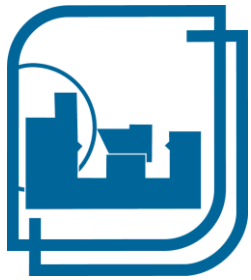


ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Целью исследования является анализ виброустойчивости вертикально-фрезерных обрабатывающих центров на основе диагностирования и оценки точностных характеристик зубчатых колес, входящих в приводы движения.

Объект исследования: цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи, которые преимущественно применяются в приводах вертикально-фрезерных обрабатывающих центров.

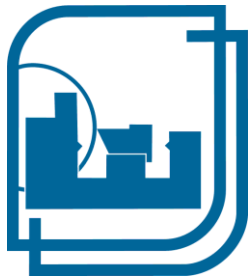
Предмет исследования: оценка влияния точностных параметров зубчатых колес на виброустойчивость.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО -ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Задачи исследования:

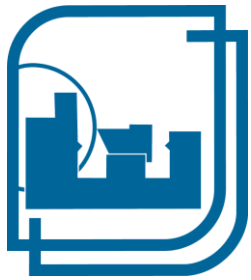
1. Изучить основные понятия динамики и динамического качества вертикально-фрезерных обрабатывающих центров с учетом влияния точности зубчатых колес.
2. Исследовать динамическую податливость вертикально-фрезерного обрабатывающего центра.
3. Обосновать влияние вибрации зубчатых передач на динамическое качество обрабатывающего центра.
4. Теоретически исследовать спектр вибраций зубчатых колес.
5. Теоретически подтвердить влияние трения на вибрации зубчатых передач.
6. Изучить виброактивность модифицированных зубчатых передач.
7. Экспериментально подтвердить основные положения теоретических разработок.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Научная новизна полученных результатов:

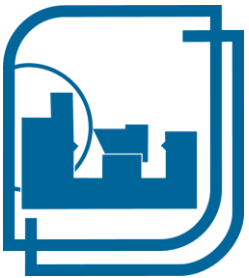
- установлена зависимость влияния модифицированных профилей зубьев на уровень вибрации;
- разработана математическая модель по снижению виброактивности за счет уменьшения коэффициента трения зубчатых передач;
- с целью снижения виброактивности установлены зависимости влияния коэффициента перекрытия с характером импульсного вибровозбуждения;
- доказано влияние исходного профиля на вибрацию цилиндрических зубчатых колес.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Практическое значение полученных результатов заключается:

- разработке научно обоснованных требований к точностным параметрам зубчатых передачах приводов вертикально-фрезерных обрабатывающих центров;
- формулировании основных направлений совершенствования конструкций зубчатых передач, обеспечивающих высокую виброустойчивость обрабатывающих центров.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО -ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

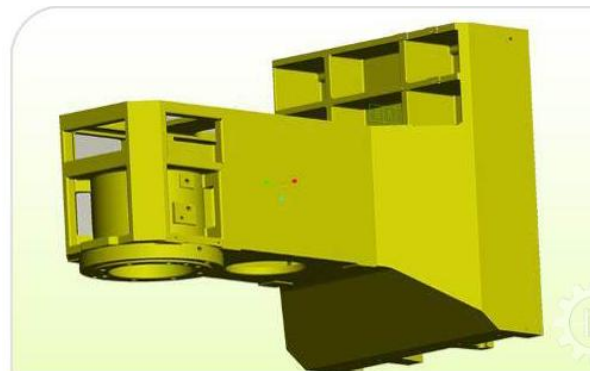
ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

Анализ объекта исследования

Вертикально-фрезерный
обрабатывающий центр VDF1500

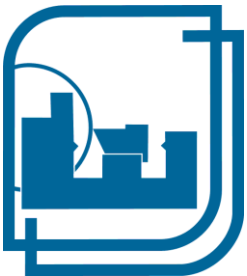


Шпиндельная бабка вертикально-фрезерного ОЦ



Шпиндель ОЦ VDF-1500





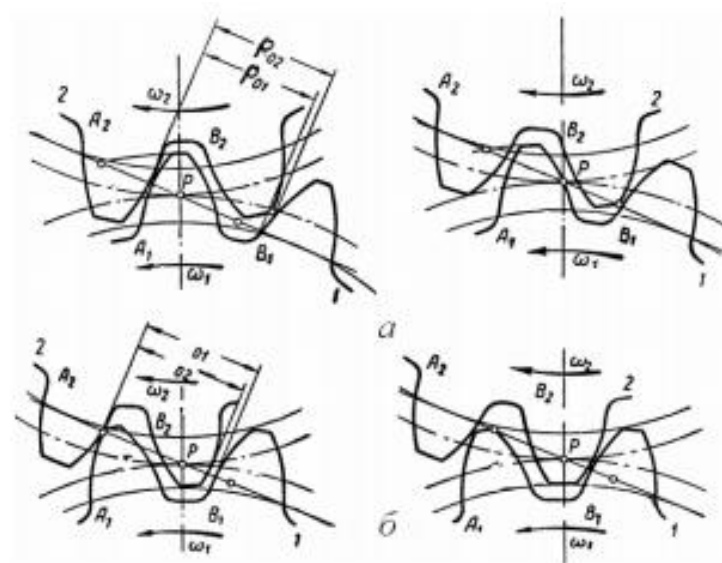
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО- ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Основные понятия динамики и динамического качества вертикально-фрезерных обрабатывающих центров с учетом влияния точности зубчатых колес

Составляющие погрешности профиля зуба



Работа зубчатого зацепления: *a* – кромочный удар; *б* – срединный удар

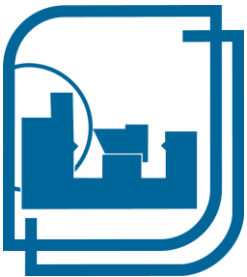


Начальное положение

Последующее положение

a

б

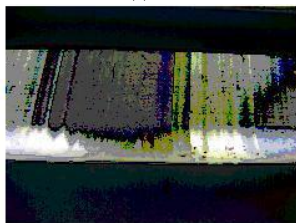


ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО- ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНО- ФРЕЗЕРНОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

Оценка динамической податливости обрабатывающего центра VDF-1500

«Вибрационный след» при обработке «ребра» на образце–
изделии



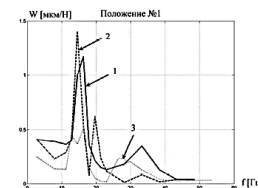
1) нагружающее устройство (винтовой домкрат), 2)
динамометр, 3) спусковой механизм, 4) корпус шпинделя, 5)
штифт для установки оптического отражателя лазерного
интерферометра при измерении динамической податливости,
6) вибродатчик

Рис. 2.10 – Общий вид рабочей зоны станка при измерении
динамической податливости методом ступенчатого воздействия
на НС

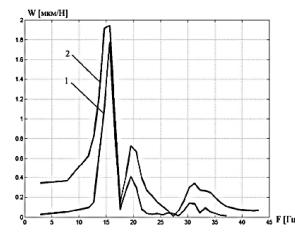
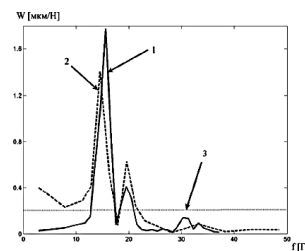


1 – динамическая податливость W_x в направлении X, 2 – W_y в
направлении Y, 3 – W_z в направлении Z.

Динамическая податливость

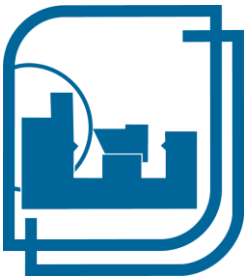


Кривые динамической податливости, полученные при силовом
воздействии «ступенька»



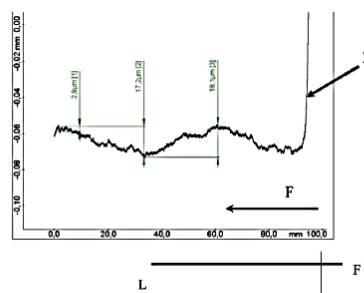
а)

б)

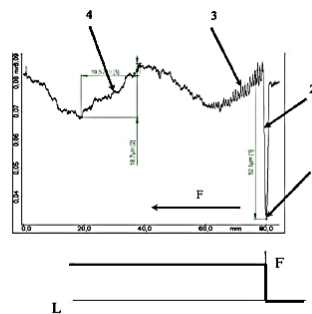


ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО- ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

$a - F = 540$ мм/мин и $S = 6000$ об./мин, при «плавном» врезании 1,
 F – направление подачи; $b - F = 720$ мм/мин и $S = 6000$ об./мин,
 при «ступенчатом» нарастании подачи 1- выстой, 2- участок
 разгона, 3- участок свободных затухающих колебаний, 4- участок
 с установившимся движением, F – направление подачи
 Профилограмма поверхности при отсутствии «импульсной»
 инерционной нагрузки

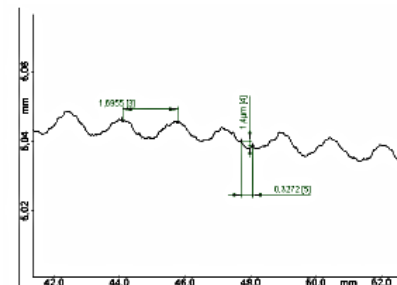
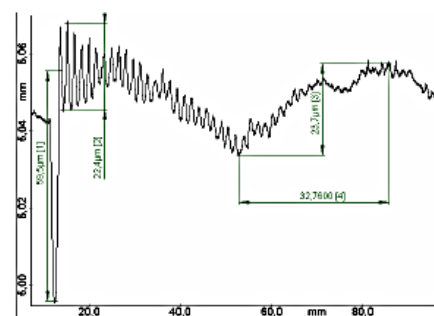


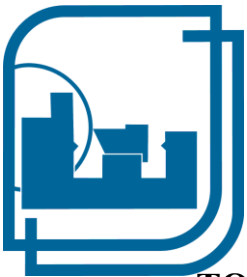
а)



б)

«Вибрационный след»





ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО -ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

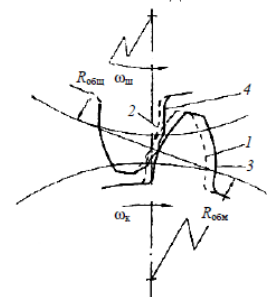
ТОЧНОСТЬ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

Точность зубчатых колес и ее показатели

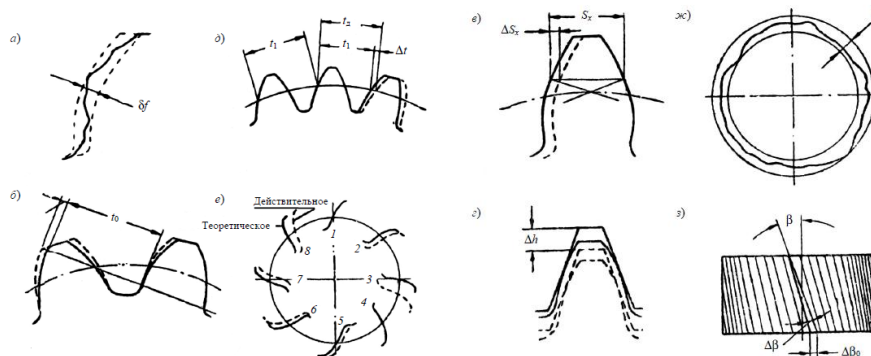
Эксплуатационное качество зубчатой передачи характеризуется следующими показателями:

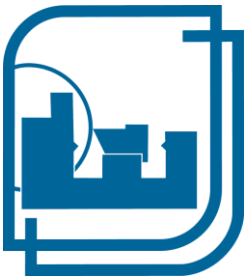
1. Кинематической точностью передачи, определяемой степенью постоянства мгновенного передаточного отношения и плавностью передачи движения.
2. Нагрузочной способностью, т.е. способностью передавать требуемую мощность и усилия.
3. Долговечностью (прочностью и износостойкостью).
4. Коэффициентом полезного действия, экономичностью.
5. Бесшумностью.

1 – идеальное положение ведомого колеса; 2 – теоретически точное ведущее колесо; 3 – действительное положение ведомого колеса вследствие ошибок профиля; 4 – профиль ведущего колеса
Ошибка положения ведомого колеса



Ошибки элементов зубчатых колё

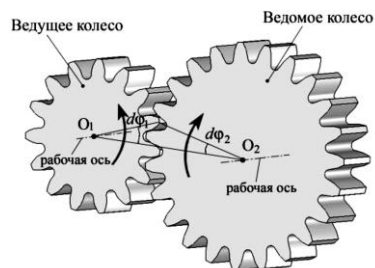




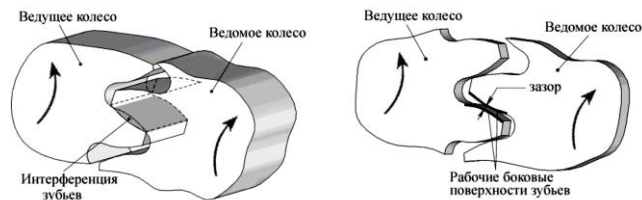
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО -ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Исследование влияния погрешностей зубчатых колес на плавность работы передачи

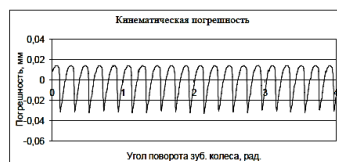
Моделирование кинематической погрешности



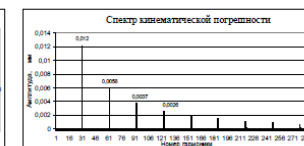
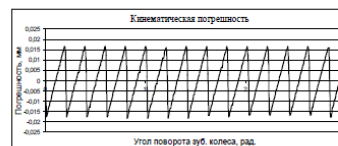
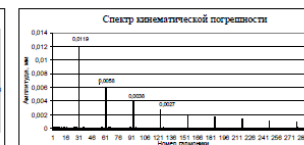
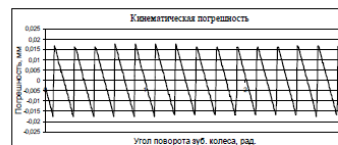
Возможные положения зубьев при повороте колес на
номинальные (расчетные) углы

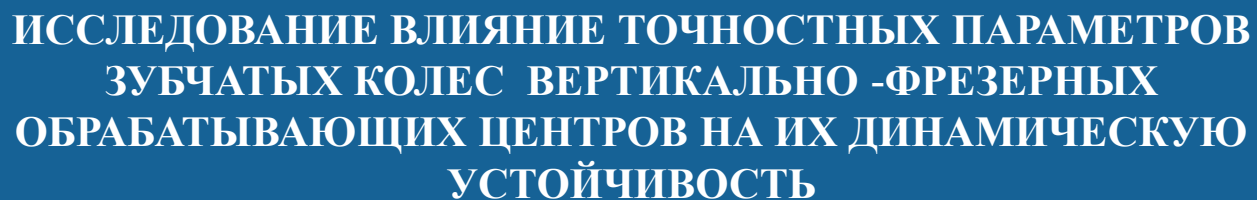


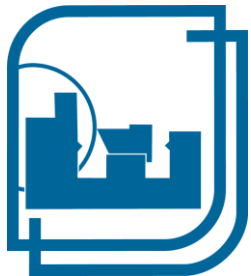
Кинематическая погрешность (а) и ее спектр (б)
при волнистости профиля ведомого колеса ($z_1 = 15$; $z_2 = 31$; $f_{fr} =$
 $\pm 0,030$ мм; $q = 1$)



Кинематическая погрешность передачи при погрешности шага
зацепления ведомого колеса



[illegible]



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО -ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

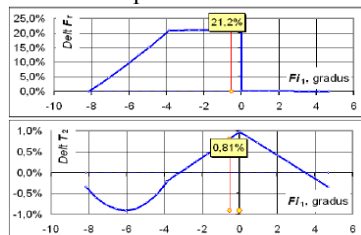
ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОАКТИВНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Виброактивность цилиндрических передач, обусловленная трением зубьев

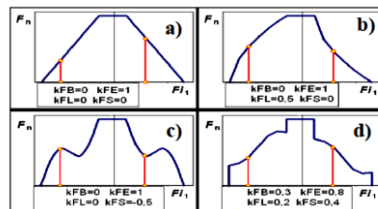
Исходные данные:

$P_1=600$ кВт, $n_1=5000$ об/мин,
коэффициент трения между зубьями
 $f=0,1$;
 $m=3$ мм, $z_1=28$, $z_2=41$, ширина $b_2=32$
мм;
коэффициенты, задающие нагрузку
при пересопрыжении зубьев: $k_{FB}=0$,
 $k_{FE}=1$, $k_{FL}=0$, $k_{FS}=0$;
 $k_{FE}=1$, $k_{FL}=k_{FS}=0$;
коэффициенты смещения $x_1=0,6596$ и
 $x_2=0,7689$;
 $\alpha_w=25^\circ$

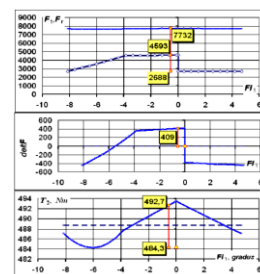
Коэффициенты силовой и крутильной
виброактивности



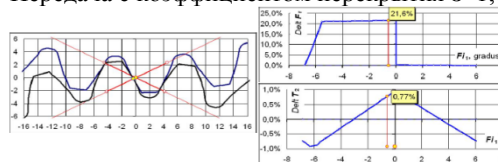
Коэффициенты k_{FB} , k_{FE} , k_{FL} , k_{FS} и нормальная
сила F_n при пересопрыжении



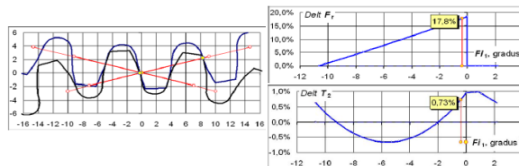
Силы в зацеплении: окружная F_t , радиальная
 F_r , результирующая F и крутящий момент T_2
на колесе



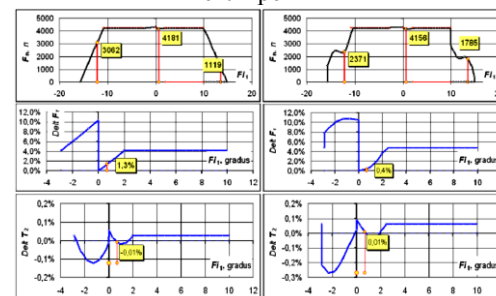
Передача с коэффициентом перекрытия $\varepsilon=1,1$

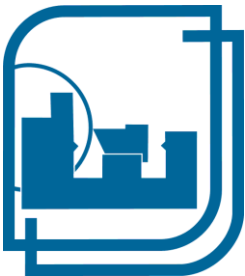


Передача с коэффициентом перекрытия $\varepsilon=1,9$



Влияние закона изменения сил при
пересопрыжении зубьев на виброактивность
сил трения



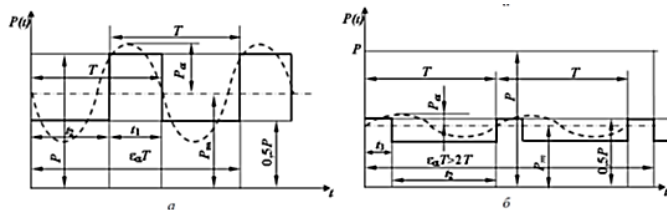


ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО -ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Вибрации модифицированных зубчатых передач

Характер изменения нагрузки при коэффициентах перекрытия $\varepsilon_a < 2$

(а) и $\varepsilon_a \geq 2$ (б)



Уровень вибрации определяется зависимостью

$$L = 10 \lg \frac{\delta_{\max}}{V_0},$$

где $\delta_{\max} = \delta_a z_1 \omega_1$ – максимальное значение скорости колебаний в контакте зубьев;

V_0 – нулевой порог колебательной скорости, $V_0 = P_0 / \rho c$;

P_0 – звуковой порог слышимости, $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па;

ρ – плотность среды;

c – скорость распространения звука в среде.

Или

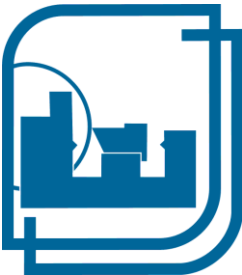
$$L = 20 [\lg(\delta_a z_1 \omega_1) - \lg V_0].$$

Уровень вибрации для рассматриваемого источника колебаний, зависит от:

- числа зубьев z ,
- скорости вращения ω ,
- амплитуды упругих колебаний δ_a .

Сравнение уровней вибрации нормального прямозубого зацепления и зацепления колес с зубьями глубокого профиля

Передаточное отношение при $z_1=28$														
z_2	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100	105	110	115
u	1,61	1,77	1,96	2,14	2,32	2,5	2,68	2,86	3,04	3,21	3,39	3,57	3,75	3,93
Нормальное прямозубое зацепление														
ε_a	1,69	1,70	1,70	1,71	1,72	1,72	1,73	1,73	1,74	1,74	1,74	1,745	1,749	1,750
p_{ε}	0,11	0,11	0,104	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09
"Глубокое" зацепление														
ε_d	2,2	2,2	2,22	2,24	2,25	2,26	2,27	2,28	2,28	2,29	2,30	2,30	2,31	2,31
$p_{\varepsilon d}$	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07
ΔL	6,5	5,84	5,3	4,8	4,4	4,1	3,8	3,5	3,3	3,1	3,0	2,8	2,6	2,5



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО -ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Снижение шума и вибрации зубчатых передач вертикально-фрезерных обрабатывающих центров

Значение виброускорения зубчатых передач

Замена зубчатой пары шпиндельной бабки обрабатывающего центра с уровнем шума 92 дБа другой зубчатой парой с уровнем шума 87 дБа. Общий уровень шума снизился на 4 дБа.

Варианты сопряжений	Общий уровень ускорения W		Октавные составляющие									
	м/с	дБ	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	30	90	0,02	0,14	0,4	0,04	0,06	0,24	0,9	4,0	26	20
2	40	91,5	0,02	0,14	0,36	0,02	0,08	0,3	1,2	6,6	23	30
3	28	89	0,02	0,14	0,4	0,02	0,1	0,24	1,4	8,0	20	24
4	30	90	0,02	0,14	0,36	0,02	0,1	0,22	0,8	6,0	30	15

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Практика проектирования эвольвентных зубчатых передач пониженной виброактивности

График зависимости максимальных коэффициентов удельного скольжения $V_{p \max 2} = f(V_{p \max 1})$ по изолинии $\varepsilon_\alpha = 2,05$

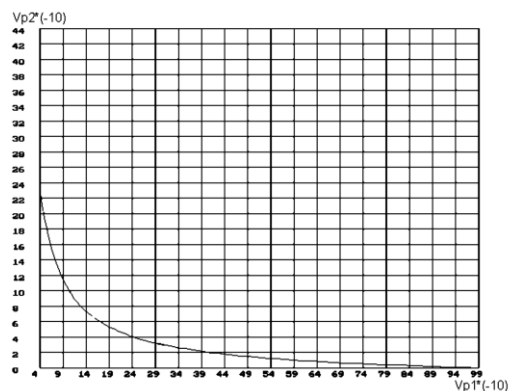


График зависимости угла зацепления $\alpha_w = f(\alpha_{a1})$ по изолинии $\varepsilon_\alpha = 2,05$. Точка А соответствует максимальным значениям α_w

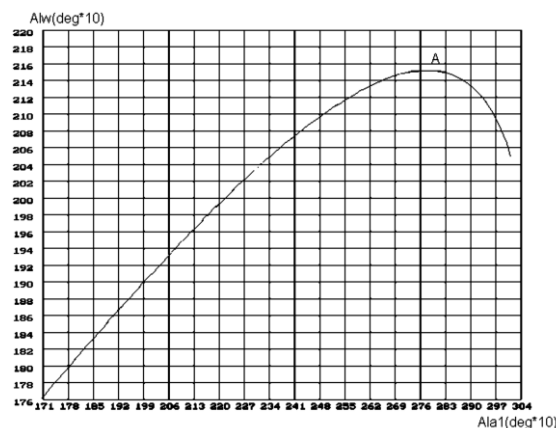
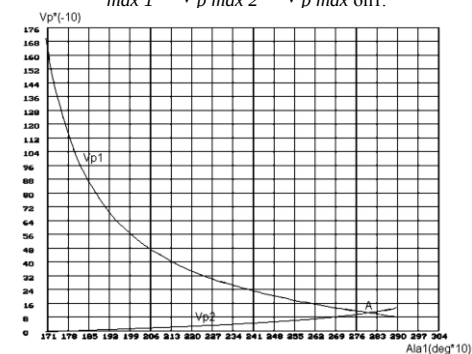
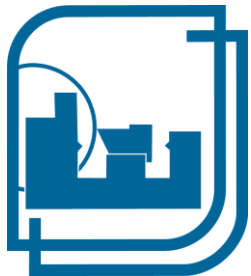


График зависимости максимальных коэффициентов удельного скольжения $V_{p \max 1} = f_1(\alpha_{a1})$ $V_{p \max 2} = f_2(\alpha_{a1})$ по изолинии $\varepsilon_\alpha = 2,05$. В точке А значение $V_{p \max 1} = V_{p \max 2} = V_{p \max \text{ опт.}}$

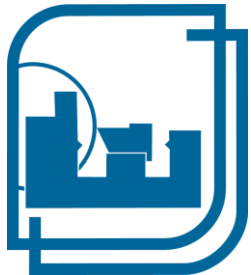




ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Зубчатые передачи в двигателях высокоскоростных обрабатывающих центров являются источником вибраций вследствие повышенного уровня динамических нагрузок, передаваемых на вращающиеся детали привода. Основными причинами возбуждения вибраций зубчатыми передачами являются погрешности профиля зубьев и изменение жесткости зацепления в процессе вращения колес. Необходимо выбирать рациональную геометрию зацепления, а также оптимальную модификацию зубьев, что уменьшит износ профиля зубьев в процессе эксплуатации приводов, улучшая их динамические характеристики.
2. При оценке кинематической точности фрезерных обрабатывающих центров необходимо учитывать точностные характеристики зубчатых колес, которые входят в приводы движения станка. Для повышения кинематической точности станков требуется использовать зубчатые колеса с высокими показателями плавности и износостойкости, чтобы уменьшить вибрации динамической системы станка.
3. Изучение динамической податливости несущей системы станка показало, что динамическая жесткость станка недостаточна. Это приводит к пониженной виброустойчивости станка. Поэтому на обрабатываемых деталях могут оставаться «вибрационные следы», предотвратить которые можно, увеличив точность контактирования зубчатых колес.
4. Определено, как влияют на виброактивность, обусловленную трением зубьев, коэффициент перекрытия и закон изменения нормальной силы при пересопряжении зубьев. Показано, что малой виброактивностью обладают также передачи с коэффициентом перекрытия $\varepsilon > 2$, особенно, при ε близком к 2.
5. Как показали исследования, снижение шума и вибрации зубчатых колес может быть достигнуто за счет повышения точности профиля зубьев и уменьшения погрешности основных шагов. Эти погрешности приводят к неравномерному вращению зубчатых колес и связанному с ним процессу динамического взаимодействия рабочих профилей зубьев. Снижение шума и вибрации зубчатых передач может быть достигнуто не только за счет повышения точности профиля зубьев, но и путем селективного подбора колес в парные комплекты зубчатых колес.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ
ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ
УСТОЙЧИВОСТЬ

Благодарю за внимание!