

Рис. 4. Варианты практического исполнения инструмента с другими различными формами режущих зубьев (в т.ч. и с цилиндрической передней поверхностью)

УДК 621.833.24

Антонюк В.Е., Русецкий В.Н.

ОСОБЕННОСТИ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ КОНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С КРУГОВЫМИ ЗУБЬЯМИ

Введение

Снижение шума зубчатых передач автотракторной техники в последнее время стало одной из актуальных задач в связи с нормированием уровня шума автомобилей и тракторов. Конические передачи с круговыми зубьями являются в большинстве случаев основным источником шума задних мостов и для снижения их уровня шума предполагается повышение точности их изготовления. В последнее время наметилась тенденция считать в качестве основной пути повышения точности для снижения уровня шума конических передач с круговыми зубьями применение процесса зубошлифования. Решение этой проблемы только за счет применения зубошлифования требуют серьезного и тщательного рассмотрения всех аспектов применения этого процесса.

Если вернуться к истории изготовления зубчатых колес автомобилей и тракторов в СССР, то практически все зубчатые колеса грузовых и легковых автомобилей, тракторов и сельхозмашин изготавливались без зубошлифования. Требуемая точность зубчатых колес грузовых и легковых автомобилей, тракторов и сельхозмашин регламентировалась отраслевыми стандартами, которые, с одной стороны, обеспечивали требуемый ресурс долговечности, с другой стороны, позволяли изготавливать зубчатые колеса на отечественном оборудовании и с использованием отечественных инструментов.

Требования к шуму зубчатых передач специальными стандартами не регламентировались, но в случае возникновения требований к обеспечению лучших показателей по уровню шума применялись такие специфические операции, как зубопритирка, подбор пар по уровню шума, отбор пар с пониженным уровнем шума и т.д., однако операция зубошлифования не применялась.

Отсутствие зубошлифования в традиционной технологии изготовления зубчатых колес автомобилей и тракторов можно объяснить следующими причинами: зубошлифование является относительно дорогостоящей операцией и в массовом производстве увеличивает стоимость изготовления зубчатого колеса:

- возможности зубошлифования в обеспечении точности зубчатых колес (5-7 степени точности) значительно превышают требования к точности зубчатых колес автомобилей и тракторов (7-8 степени точности),

6. В условиях данного процесса резания обеспечивается надёжное кинематическое разделение стружки и возможность её автоматического удаления со станка.
7. Данный способ может быть применён и при строгании, что можно понять, если ещё раз внимательно рассмотреть в схему на рис. 1, а.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Резников А.Н., Новосёлов Ю.А. Аналитическое исследование тепловых потоков и контактных температур при фрезеровании. В сб.: «Фрезы». Материалы Всесоюзного совещания по фрезам, ВНИИ, М. – Л., 1968.
2. Новосёлов Ю.А. Исследование тепловых явлений при цилиндрическом фрезеровании. Канд. диссертация. Куйбышевский политехнический институт, 1967.
3. Новосёлов Ю.А. Исследование усилий резания при цилиндрическом фрезеровании. Изд-во Куйбышевского политехнического института, 1968.
4. Новосёлов Ю.А. Способ прерывистого точения. Авт. свид. № 228463 от 08.10.68.

- зубошлифование удаляет самый прочный цементационный слой на поверхности зубьев и приводит к прижогам, что существенно снижает долговечность зубчатой передачи.

Не отрицая необходимости повышения точности изготовления зубчатых передач, необходимо отметить, что только повышение точности изготовления является недостаточным для снижения шума, а в некоторых случаях может привести даже к обратному результату. Повышение точности изготовления конических зубчатых колес с круговыми зубьями приводит к повышению их чувствительности к жесткости и погрешностям изготовления корпусных деталей и монтажа в собранном узле. Поэтому повышение точности изготовления зубчатых колес должно сопровождаться соответствующим повышением жесткости и точности корпусных деталей, подшипников, базирования зубчатых колес, монтажа и т.д.

Методика оценки качества зубчатых передач по спектру шума

Поведение пятна касания при различных положениях осей и монтажных размерах является важнейшей характеристикой качества изготовления конических передач с круговыми зубьями. Поэтому ведущие зарубежные фирмы по изготовлению оборудования для нарезания и контроля конических колес с круговыми зубьями включают в программу оценки качества нарезаемых колес тест на проверку поведения пятна касания при относительных смещениях шестерни и колеса по трем координатным осям **V-H-J** (рис. 2) [1].

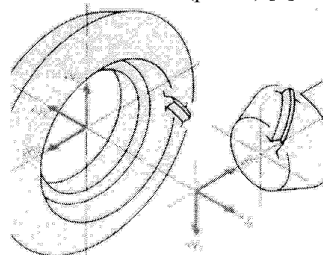


Рис. 1. Координатные оси относительного смещения шестерни и колеса при тесте поведения пятна касания конической передачи с круговыми зубьями

Антонюк Владимир Евгеньевич, к.т.н., в.н.с. ИМИНМАШ НАН Беларуси, г. Минск.

Для исследования поведения пятна была выбрана главная коническая передача с числами зубьев ведущей шестерни 25 и ведомого колеса 29, применяемая в автомобилях семейств Минского автомобильного завода. Исследовались серийные зубчатые пары после окончательного изготовления без зубошлифования и опытные зубчатые пары после зубошлифования.

С учетом специфики изготовления редуктора главной передачи для оценки поведения пятна касания тестирование проводилось при смещения по оси H (осевое смещение) и оси V (гипоидное смещение). Программа исследования включала измерение спектра шума и пятна касания на номинальных монтажных положениях ведущей шестерни и ведомого колеса, а затем при измененных положениях при гипоидном смещении $V +0,10; +0,05; -0,05; -0,10$ мм и при осевом смещении $H +0,30; +0,20; +0,10; -0,10; -0,20; -0,30$ мм. Измерения проводились на контрольно-обкатном станке модели ZPLK500/1 при частоте вращения ведущей шестерни 1250 мин^{-1} и тормозном моменте на ведомом колесе, равном примерно 8 Нм. Для измерения и записи спектра шума использовался комплект шумоизмерительной аппаратуры «Брюль и Кьер», включающий конденсаторный микрофон 4132 с линейной характеристикой, катодный повторитель, спектрометр 2112 с третьоктавными фильтрами и самописец 2305 (рис. 2). Все измерения проводились в шумоизолированном помещении с звуковым фоном в пределах 60 ДБА [2].

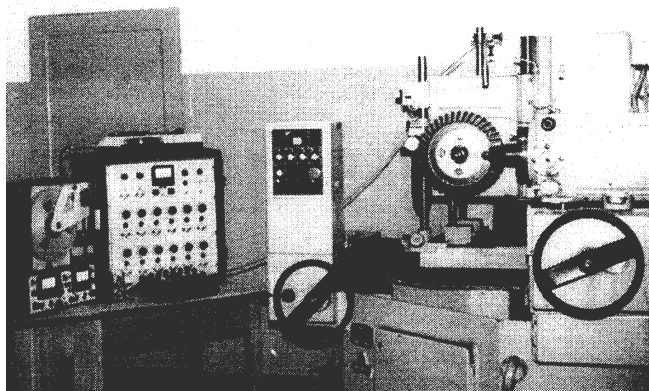


Рис. 2. Общий вид контрольно-обкатного станка с аппаратурой для измерения шума.

Результаты испытаний

Для обработки результатов исследования были рассчитаны характерные частоты в спектре шума исследуемой зубчатой пары, которые приведены в табл. 1 [3].

На рис.4 представлена запись спектра шума конической пары при номинальных монтажных расстояниях после термической обработки и окончательного изготовления без зубошлифования.

Как видно из этой записи, в спектре шума присутствует частота пересопряжения зубьев f_z , а также ее вторая гармоника $2f_z$. Следует отметить также присутствие в спектре шума частоты f_f , связанной с погрешностью нарезания профиля ведущей шестерни.

В соответствии с намеченной программой исследования для этой конической пары был проведен тест по проверке поведения пятна касания и спектра шума при различных гипоидных V и осевых смещениях H .

Гипоидное смещение $V = -0,05$ мм не оказало заметного изменения в спектре шума, однако $V = +0,05$ мм привело к увеличению уровня шума на резонансной частоте $f_{рез}$ и в спектре шума преобладающими частотами оказались частота пересопряжения зубьев и резонансная частота (рис. 5).

Осевое смещение $H = -0,10$ мм не оказало заметного изменения в спектре шума, однако $H = +0,10$ мм привело к резкому увеличению уровня шума на резонансной частоте $f_{рез}$ (рис. 6).

Результаты исследования теста изменения уровня шума на характерных частотах для исследуемой окончательно изготовленной конической пары без зубошлифования представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, для тестируемой конической пары по уровню шума наиболее неблагоприятным является гипоидные смещения ведущей шестерни в «плюс» и осевое смещение ведомого колеса в «плюс». Вместе с тем осевое смещение ведущей шестерни в «минус» на 0,1 мм приводит к уменьшению как общего уровня шума на 2 дБА, так и к снижению уровня шума на характерных частотах. Таким образом, за счет подбора более благоприятного осевого положения ведущей шестерни можно достичь снижения уровня шума конической пары. Такой прием подбора пар с изменением осевого положения ведущей шестерни широко применяется в технологиях изготовления конических передач с круговыми зубьями легковых автомобилей, но требует наличия отлаженной технологической системы переноса поправки измененного положения ведущей шестерни в редуктор главной конической передачи.

Таблица 1. Характерные частоты в спектре шума

Причины возникновения характерной частоты	Расчетная формула	Частота, Гц
Дисбаланс ведущей шестерни	$f_1 = n_1/60$	21
Дисбаланс ведомого колеса	$f_2 = n_2/60$	20
Частота пересопряжения зубьев	$f_z = n_1 z_1/60$	521
Вторая гармоника по частоте пересопряжения зубьев	$2f_z$	1042
Третья гармоника по частоте пересопряжения зубьев	$3f_z$	1563
Циклическая погрешность ведущей шестерни	$f_{g1} = a_1 f_1$	2995
Циклическая погрешность ведомого колеса	$f_{g2} = a_2 f_2$	2457
Погрешность профиля ведущей шестерни	$f_{f1} = f_z k_{f1}$	3040 ... 5200
Собственная частота ведущей шестерни	$f_{рез}$	300

где n_1, n_2 – частоты вращения ведущей шестерни и ведомого колеса, z_1, z_2 – числа зубьев ведущей шестерни и ведомого колеса, a_1, a_2 – числа зубьев делительной пары станка для чистового нарезания ведущей шестерни и ведомого колеса, k_{f1} – коэффициент, учитывающий прерывность образования профиля на поверхности зуба, приближенно принимается равным z_1 модулю резцов на поверхности фрезерованного зуба

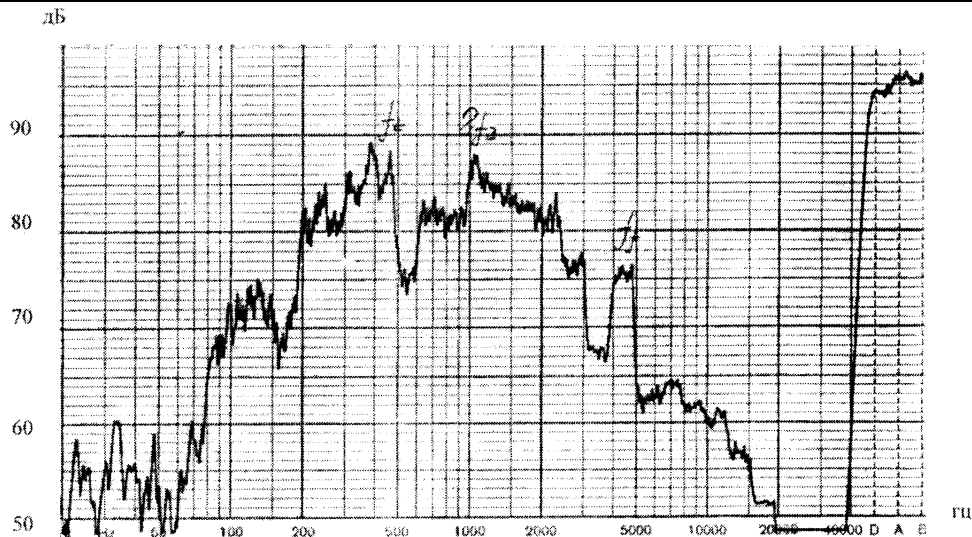


Рис. 4. Спектр шума конической зубчатой пары после окончательного изготовления без зубошлифования при номинальных монтажных расстояниях.

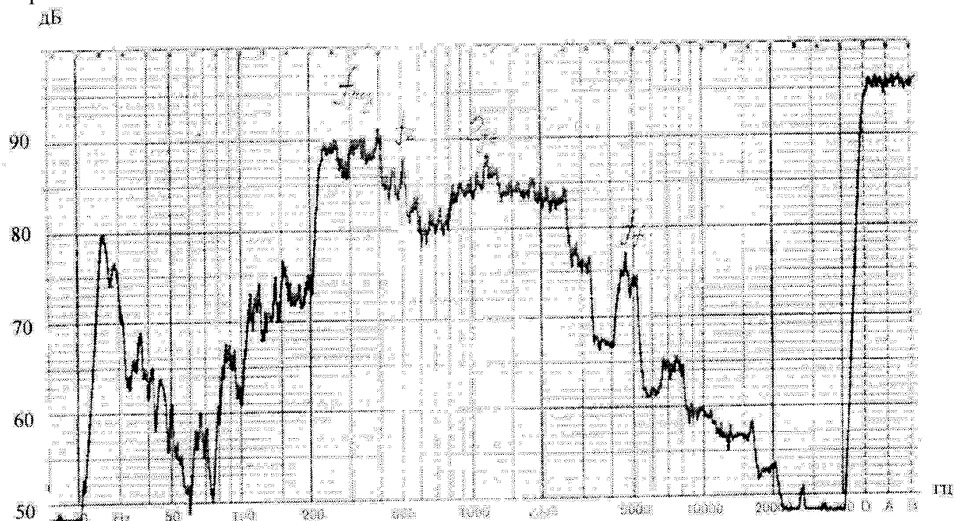


Рис. 5. Спектр шума конической зубчатой пары после окончательного изготовления без зубошлифования при гипоидном смещении $V = +0,05$ мм.

Одновременно с измерением уровня шума на характерных частотах для исследуемой окончательно изготовленной конической пары проводилось измерение отпечатков пятна касания на рабочей поверхности зубьев, которые представлены в табл. 3.

Как видно из табл.3, для тестируемой конической пары осевое смещение ведущей шестерни в «плюс» на 0,1 мм привело к улучшению формы и размеров пятна касания.

В целом по результатам тестирования поведения пятна касания и уровня шума в зависимости от монтажных смещений можно сделать вывод о довольно низкой чувствительности конической пары без зубошлифования к монтажным смещениям.

Можно сказать, что гипоидные смещения в пределах 0,05 мм и осевые смещения в пределах 0,10 мм не оказали существенного влияния на изменение пятна касания и уровня шума.

Аналогичный тест по исследованию поведения пятна касания и уровня шума при относительных смещениях шестерни и колеса был проведен для этой же конической пары после зубошлифования.

На рис. 7 представлена запись спектра шума конической пары при номинальных монтажных расстояниях после зубошлифования.

Как видно из этой записи, в спектре шума преобладающей частотой оказалась собственная частота ведомой шестерни, которая находится близко к частоте пересопряжения зубьев и создает резонансную частоту $f_{рез}$. Присутствует частота третьей гармоника $3f_z$ частоты пересопряжения зубьев.

Гипоидное смещение $V = +0,05$ мм не оказало заметного изменения в спектре шума, однако $V = -0,05$ мм привело к увеличению уровня шума на резонансной частоте $f_{рез}$ и на частотах $2f_z$ и $3f_z$, в спектре шума преобладающей частотой оказалась резонансная частота (рис. 8).

Осевое смещение $H = +0,10$ мм не оказало заметного изменения в спектре шума, однако $H = -0,10$ мм привело к уменьшению уровня шума на резонансной частоте $f_{рез}$ и на частотах $2f_z$ и $3f_z$ при общем снижении уровня шума примерно (рис. 9).

Результаты исследования теста изменения уровня шума на характерных частотах для исследуемой окончательно изготовленной конической пары после зубошлифования представлены в табл. 3.

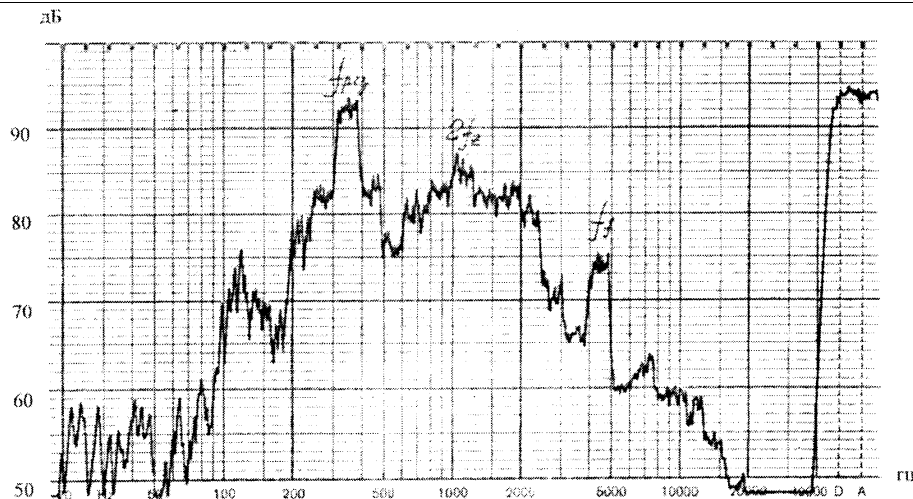


Рис. 6. Спектр шума конической зубчатой пары после окончательного изготовления без зубошлифования при осевом смещении $H = +0,10$ мм.

Таблица 2. Значения уровня шума конической пары в зависимости от монтажных смещений

В зависимости от гипоидного смещения					В зависимости от осевого смещения				
Значения гипоидного смещения V в мм	Уровень шума, дБ				Значения гипоидного смещения V в мм	Уровень шума, дБ			
	в дБа	на частоте				в дБа	на частоте		
		f_z	$2f_z$	$f_{рез}$			f_z	$2f_z$	$f_{рез}$
					+0,30	97	90	89	88
+0,10	96	90	89	88	+0,20	97	90	90	96
+0,05	96	90	88	90	+0,10	94	85	87	93
0	96	89	88	85	0	96	89	88	85
-0,05	96	88	88	87	-0,10	94	87	85	84
-0,10	96	88	87	87	-0,20	95	85	85	92
					-0,30	96	85	86	95

Таблица 3. Пятно касания конической пары, изготовленной без зубошлифования, в зависимости от монтажных смещений

В зависимости от гипоидного смещения ведущей шестерни		В зависимости от осевого смещения ведущей шестерни	
Значения гипоидного смещения V в мм	Пятно касания	Значения осевого смещения H в мм	Пятно касания
		+0,30	
+0,10		+0,20	
+0,05		+0,10	
0		0	
-0,05		-0,10	
-0,10		-0,20	
		-0,30	

Как видно из табл. 3, для тестируемой конической пары по уровню шума наиболее неблагоприятным является гипоидные смещения ведущей шестерни в «минус» и осевое смещение ведомого колеса в «плюс». Вместе с тем осевое смещение ведущей шестерни в «минус» на 0,1 мм приводит к уменьшению как общего уровня шума на 4 дБа, так и к снижению уровня шума на характерных частотах.

Одновременно с измерением уровня шума на характерных частотах для исследуемой окончательно изготовленной конической пары проводилось измерение отпечатков пятна касания на рабочей поверхности зубьев, которые представлены в табл. 4.

Как видно из табл.4, для тестируемой конической пары пятно касания после зубошлифования на номинальных положениях было относительно длинным и располагалось по всей

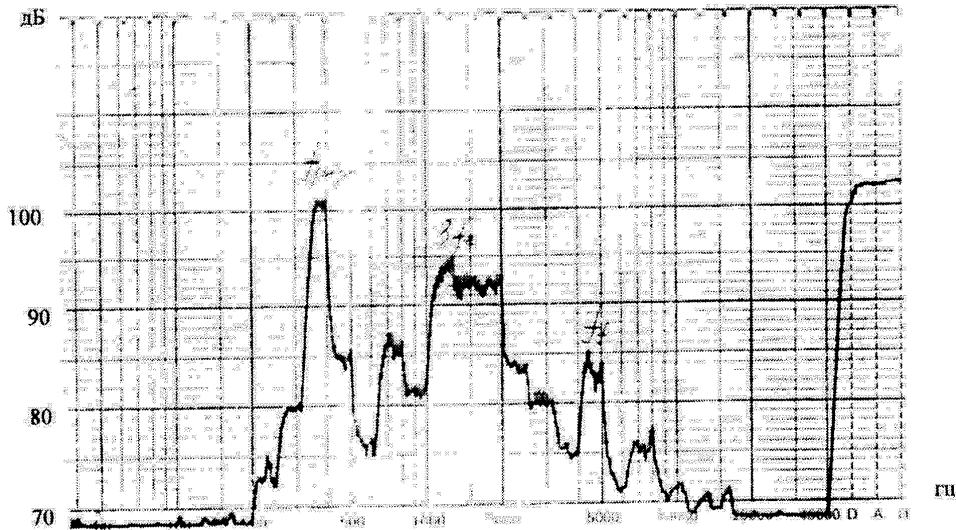


Рис. 7. Спектр шума конической зубчатой пары после зубошлифования при номинальных монтажных расстояниях

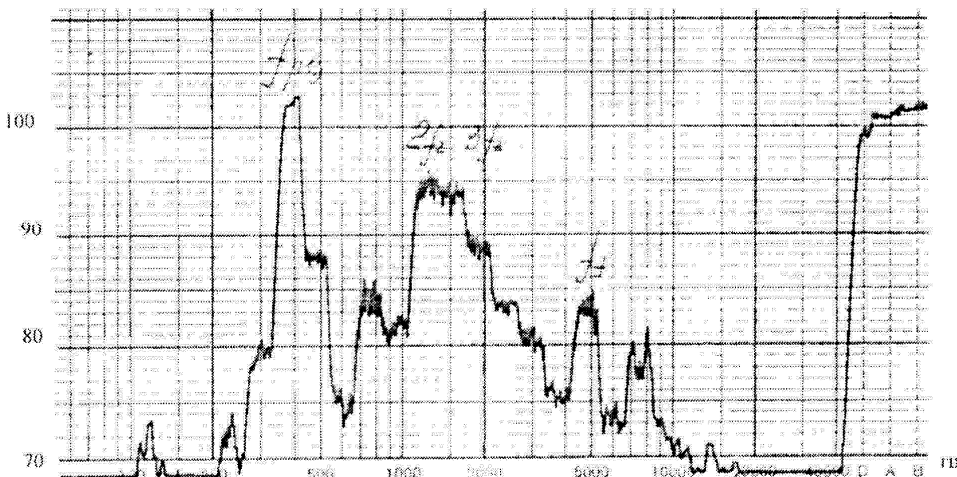


Рис. 8. Спектр шума конической зубчатой пары после зубошлифования при гипоидном смещении $V = -0,05$ мм

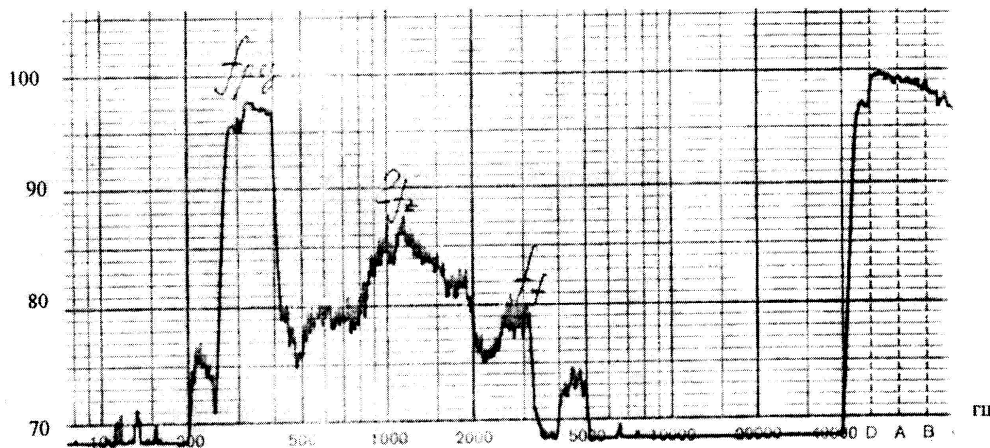


Рис. 9. Спектр шума конической зубчатой пары после зубошлифования при осевом смещении $H = -0,10$ мм

длине зуба, причем имело небольшую диагональность. Осевое и гипоидное смещение ведущей шестерни в пределах 0,05 мм приводило к выходу пятна касания на верхнюю кромку зуба, а осевое смещение в «минус» свыше 0,20 мм приводило в образованию разрыва пятна касания.

В целом по результатам тестирования поведения пятна касания и уровня шума в зависимости от монтажных смеще-

ний можно сделать вывод о высокой чувствительности конической пары с зубошлифованием к монтажным смещениям, причем эти смещения приводят к резким изменениям самой формы пятна касания. По результатам тестирования можно судить о неудовлетворительной отработке поведения пятна касания для конических пар после зубошлифования.

Таблица 4. Значения уровня шума конической пары, изготовленной с зубошлифованием, в зависимости от монтажных смещений

В зависимости от гипоидного смещения				В зависимости от осевого смещения			
Значения гипоидного смещения V в мм	Уровень шума, дБ			Значения осевого смещения H в мм	Уровень шума, дБ		
	в дБа	на частоте			в дБа	на частоте	
		$f_{рез}$	$2f_z$			$f_{рез}$	$2f_z$
				+0,30	102	101	90
+0,10	98	103	91	+0,20	103	95	89
+0,05	100	99	87	+0,10	103	100	94
0	103	101	94	0	103	101	94
-0,05	102	103	95	-0,10	99	97	87
-0,10	99	101	93	-0,20	97	96	85
				-0,30	96	97	88

Таблица 5. Пятно касания конической пары, изготовленной с зубошлифованием, в зависимости от монтажных смещений

В зависимости от гипоидного смещения ведущей шестерни		В зависимости от осевого смещения ведущей шестерни	
Значения гипоидного смещения V в мм	Пятно касания	Значения осевого смещения H в мм	Пятно касания
		+0,30	
+0,10		+0,20	
+0,05		+0,10	
0		0	
-0,05		-0,10	
-0,10		-0,20	
		-0,30	

Заключение

1. Для оценки качества изготовления конической зубчатой пары с круговыми зубьями следует использовать тестирование поведения пятна касания и уровня шума при относительных монтажных смещениях $V-H$.
2. Для оценки уровня шума следует использовать спектральный анализ шума с выделением характерных частот.
3. Результирующий уровень шума конических зубчатых пар с круговыми зубьями зависит не только от точности изготовления, но и от ряда конструктивных факторов. В исследуемой конической паре преобладающее влияние оказала резонансная частота (конструктивный фактор).
4. Влияние резонансной частоты повышается с повышением точности изготовления, так в случае изготовления конической зубчатой пары без зубошлифования уровень шума на резонансной частоте составлял 85 дБ, то при изготовлении со зубошлифованием он составил 101 дБ и стал преобладающим в общем шуме конической пары.
5. В итоге зубошлифование привело к значительному повышению общего уровня шума с 96 дБа до 103 дБа и резкому повышению чувствительности конической пары к погрешностям монтажа.
6. Использование процесса зубошлифования для изготовления конических передач с круговыми зубьями требует

проведения обязательных тестовых исследований поведения пятна касания и спектра шума при относительных смещениях ведущей шестерни и ведомого колеса, имитирующих погрешности монтажа.

7. Для правильного назначения пятна касания должны задаваться допустимые относительные смещения ведущей шестерни и ведомого колеса, при которых должны обеспечиваться требуемая форма и размеры пятна касания без выхода за кромку зуба.
8. Назначение допустимого уровня шума должно назначаться не только по общему уровню шума в дБа, а по допустимому уровню шума на характерных частотах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Dutschk R. Сетевое производство конических зубчатых колес / Симпозиум VDW. 10/11 ноября 2004. Москва. – 2004. – 26 с.
2. Оценка качества изготовления зубчатых колес трансмиссий тракторов по уровню шума. РД 23.1.3-88. Методические указания. Министерство автомобильного и сельскохозяйственного машиностроения СССР. – М., 1989. – 20 с.
3. Антонюк В.Е. Справочное пособие зуборезчика. – Мн.: Беларусь, 1989. – 303 с.