

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

УДК 621.833

**ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
СРЕДНЕМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗУБОФРЕЗЕРНОГО СТАНКА  
С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ***д-р техн. наук В.Е. АНТОНЮК**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);**В.Н. РУСЕЦКИЙ**(Минский автомобильный завод);**Л.И. ТРУХНОВ**(Белорусский автомобильный завод, Жодино)*

*Рассматриваются возможности использования современного зубофрезерного станка с числовым программным управлением для достижения окончательной точности по 8-й степени ГОСТ 1643-81 без зубошлифования для среднемодульных зубчатых колес. Приводятся результаты изготовления зубчатых колес модулем 5 мм по предлагаемой технологии с использованием станка OFA75 CNC. Даются рекомендации по назначению норм точности и параметров шума зубчатых передач. Использование прибора двухпрофильного контроля с записью межосевого расстояния позволяет значительно повысить точность и эффективность контроля зубчатых колес, расширить информационную базу для оценки их качества и производить целенаправленный отбор зубчатых колес с требуемыми свойствами.*

**Введение.** Снижение шума зубчатых передач автотракторной техники в настоящее время является актуальной задачей в связи с ужесточением и нормированием требований к уровню шумов автомобилей и тракторов. По традиционной технологии до последнего десятилетия практически все зубчатые колеса грузовых автомобилей, тракторов и сельхозмашин в странах СНГ изготавливались без зубошлифования. Требуемая точность зубчатых колес регламентировалась отраслевыми стандартами, которые, с одной стороны, обеспечивали требуемую долговечность, с другой – позволяли изготавливать зубчатые колеса на отечественном оборудовании с использованием отечественных инструментов [1].

В последнее время отечественными изготовителями мобильных машин для снижения шума зубчатых передач используется зубошлифование. Следует отметить, что проблема шума зубчатых передач не решается автоматически с введением зубошлифования. Выполнение требований по уровню шума зубчатой передачи может быть только следствием конструкции и технологии изготовления каждой конкретной зубчатой передачи. Для проверки возможности изготовления среднемодульных зубчатых колес без зубошлифования, а также для оценки влияния зубошлифования на снижение шума зубчатых зацеплений были проведены исследования точности и шума среднемодульных зубчатых передач, используемых в коробках скоростей мобильных машин.

**Исследование производственных зубчатых колес, изготовленных с использованием зубошлифования.** Для оценки зубошлифования были проведены исследования шума зубчатых передач коробки передач 65151 Минского завода колесных тягачей (МЗКТ), изготовленных как с применением, так и без зубошлифования. Отдельные экземпляры коробки передач 65151 не соответствуют требованиям по уровню шума, хотя в серийном производстве для зубчатых колес со степенью точности 8-7-7 используется в качестве финишной обработки операция зубошлифования.

Анализ результатов субъективной оценки шума коробок передач 65151 при контроле на стенде в условиях МЗКТ показал, что определяющий вклад в уровень шума коробки вносят зубчатые колеса 5-й передачи, в связи с этим было принято решение по проведению исследований именно на этих зубчатых колесах. Основные параметры исследуемых зубчатых колес приведены в таблице 1.

Для оценки фактической точности изготовления зубчатых колес 5-й передачи были выбраны зубчатые колеса, изготовленные в производственных условиях МЗКТ и принятые службой контроля. Отобранные зубчатые колеса были измерены поэлементным контролем на измерительной машине «GearSpect do-3 PC». Результаты измерения приведены в таблице 2.

Отобранные зубчатые пары были испытаны на стенде с разомкнутым силовым контуром, программа испытаний включала измерение спектра шума в  $1/3$ -октавных полосах и измерение пятна касания. Испытания проводились при частоте вращения ведущей шестерни 1000, 1500 и 2000 мин<sup>-1</sup> и нагрузке на

ведомом колесе 40, 50, 65 и 90 Н·м. На рисунке 1 представлен спектр шума испытываемой пары 1-МЗКТ при частоте вращения ведущей шестерни  $1500 \text{ мин}^{-1}$  и нагрузке на ведомом колесе  $M_T = 90 \text{ Н·м}$ .

Таблица 1

Основные параметры зубчатых колес 5-й передачи коробки передач 65151

Параметры	Номер зубчатого колеса	
	202-1701053-40	202-1701132-40
Модуль нормальный	5	5
Число зубьев	35	26
Угол наклона, град	20	20
Направление линии зуба	правое	левое
Угол профиля, град	24	24
Степень точности	8-7-7-Сд	8-7-7-Сд

Таблица 2

Результаты измерения производственных зубчатых колес 5-й передачи

Номер пары	Степень точности по ГОСТ 1643-81	
	202-1701053-40	202-1701132-40
1-МЗКТ	6-10-10	10-9-11
2-МЗКТ	7-7-9	9-8-11
3-МЗКТ	7-9-11	10-9-11

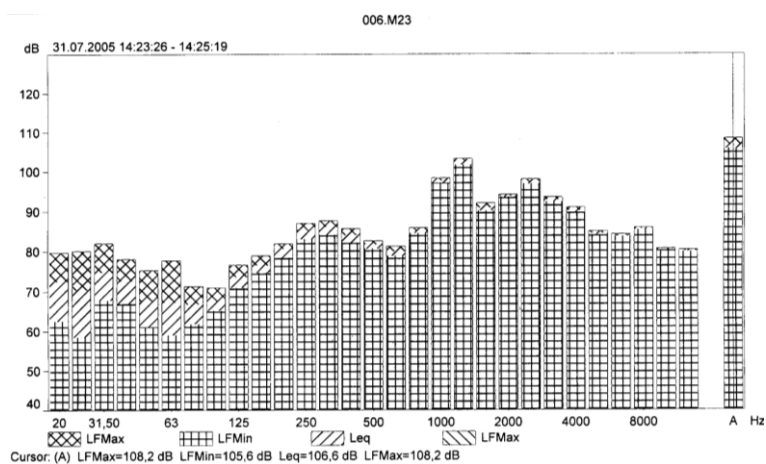


Рис. 1. Спектр шума испытываемой пары 1-МЗКТ

В таблице 3 приведены результаты измерения шума производственных зубчатых пар.

Таблица 3

Уровень шума производственных зубчатых колес МЗКТ

Номер пары	Уровень звукового давления и шума		
	$f_z$ , дБ	$2f_z$ , дБ	$L_{общ}$ , дБА
1-МЗКТ	86	92	108,2
2-МЗКТ	90	90	102,5
3-МЗКТ	103	102	112,8

При этом режиме нагружения спектр шума имеет четко выраженную зубцовую частоту  $f_z$  и менее выраженную  $2f_z$ . Испытание производственных пар на испытательном стенде под нагрузкой выявило существенные дефекты пятна касания (рис. 2). Такие дефекты пятна касания являются результатом целого комплекса погрешностей, к которым можно отнести: погрешность наладки станка; погрешность профилирования инструмента; неправильный контроль направления зуба; погрешность базирования шестерни.

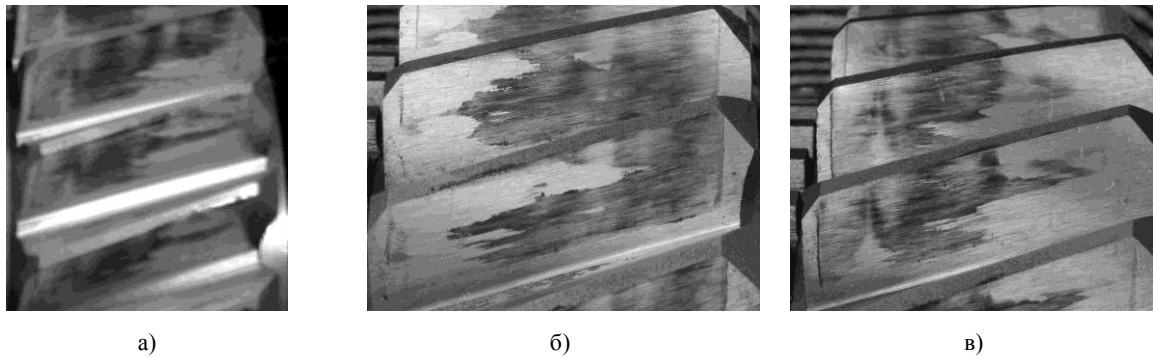


Рис. 2. Дефекты пятна касания производственных зубчатых колес после зубошлифования: а – кромочный контакт; б – разрыв пятна касания по высоте; в – разрыв пятна касания по длине

По результатам проведенных исследований были сделаны выводы о том, что производственные зубчатые колеса не соответствуют требуемой точности и имеют большой разброс по точности и уровню шума. Основной причиной невыполнения технических требований следует считать недостаточную оснащенность средствами контроля, так как достижение 8-й степени точности для изготовления зубчатых колес с применением зубошлифования никогда не было технически сложной проблемой.

**Исследование экспериментальных зубчатых колес, изготовленных без зубошлифования.** С целью проверки возможности изготовления зубчатых колес 5-й передачи без зубошлифования по схеме «зубофрезерование на станке с ЧПУ – термообработка» была изготовлена опытная партия зубчатых колес с зубофрезерованием на промышленном станке OFA75CNC и с использованием опытных червячных фрез отечественного изготовления [2].

При зубофрезеровании экспериментальных зубчатых колес была достигнута 6-я степень точности по ГОСТ 1643-81 по всем показателям, за исключением погрешности профиля, по которой была достигнута 9-я степень точности из-за недостаточной точности опытных червячных фрез отечественного изготовления (табл. 4).

Таблица 4

Достигнутая точность экспериментальных зубчатых колес после зубофрезерования на станке OFA 75 CNC6

202-1701053-40		202-1701132-40	
номер	степень точности	номер	степень точности
2	6-9-7	2	6-9-7
3	6-9-6	3	6-9-7*
4	6-9-7	4	6-9-7*

\* – с бочкообразным зубом.

При нарезании зубчатого колеса 202-1701132-40 выполнялась бочкообразная форма зуба по длине с «бочкообразностью» 0,03 мм (рис. 3).

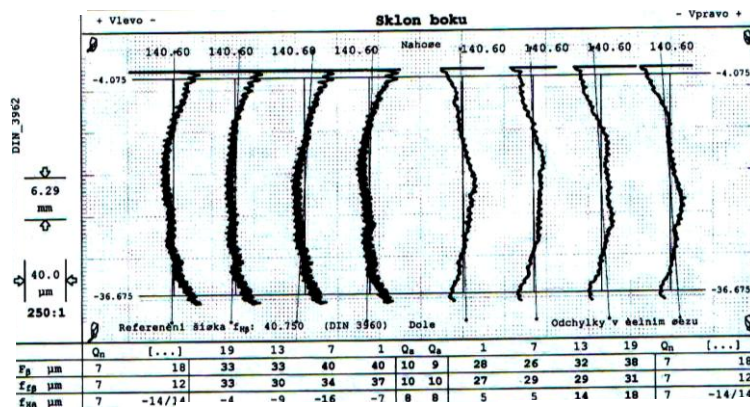


Рис. 3. Результаты измерения бочкообразности после зубофрезерования зубчатого колеса 202-1701132-40

Термическая обработка опытных зубчатых колес проводилась на агрегате IPSEN. Было отмечено, что в процессе термической обработки произошло изменение угла наклона зубьев в сторону уменьшения угла наклона в среднем на 0,04...0,06 мм. Достигнутая окончательная точность экспериментальных зубчатых колес приведена в таблице 5.

Таблица 5

Окончательная точность экспериментальных зубчатых колес

202-1701053-40*		202-1701132-40*	
номер образца	степень точности	номер образца	степень точности
–	–	1	6-9-9
2	7-9-9	2	7-9-8
3	7-9-9	3	8-9-8**
4	6-9-9	4	6-9-8**

\* – шифр колеса; \*\* – с бочкообразным зубом.

Экспериментальные зубчатые колеса, изготовленные без зубошлифования, были испытаны на аналогичных режимах, принятых для стендовых испытаний производственных зубчатых колес МЗКТ. Для стендовых испытаний были подобраны пары (табл. 6).

Таблица 6

Экспериментальные зубчатые пары для стендовых испытаний

Название пары	Степень точности по ГОСТ 1643-81			
	номер	202-1701053-40	номер	202-1701132-40
4-3 CNC	4	6-9-9	3	8-9-8*
4-4 CNC	4	6-9-9	4	6-9-8*
3-4 CNC	3	7-9-9	4	6-9-8*
3-3 CNC	3	7-9-9	3	8-9-8*
2-1 CNC	2	7-9-9	1	6-9-9

\* – с бочкообразным зубом.

Спектр шума по результатам измерения экспериментальной зубчатой пары 4-4CNC при частоте вращения ведущей шестерни 1500 мин<sup>-1</sup> и нагрузке на ведомом колесе  $M_T = 100$  Н·м приведен на рисунке 4.

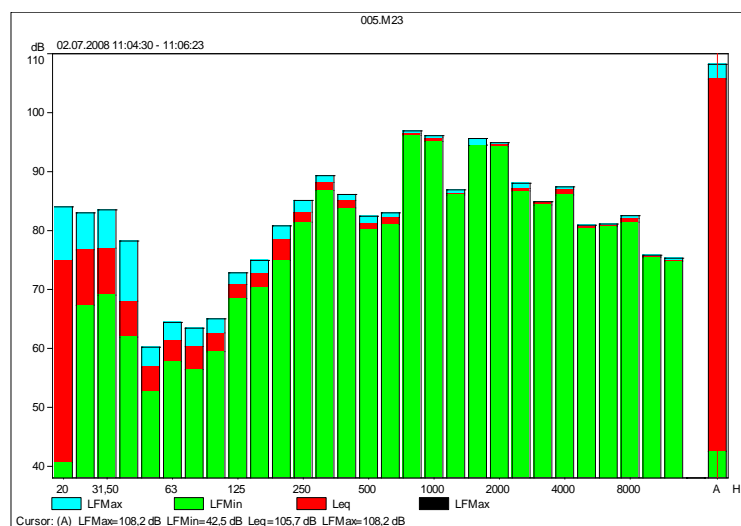


Рис. 4. Спектр шума зубчатой пары 4-4 CNC

В таблице 7 приведены результаты измерения шума при испытании экспериментальных зубчатых пар при режиме нагружения  $n_1 = 1500$  мин<sup>-1</sup> и  $M_T = 90...110$  Н·м.

Таблица 7









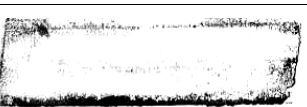

Уровень шума экспериментальных зубчатых колес

Номер пары	Уровень звукового давления и шума		
	$f_z$ , дБ	$2f_z$ , дБ	$L_{обш}$ , дБА
4-3 CNC	105,0	104,0	107,5
4-4 CNC	97,0	96,0	105,7
3-4 CNC	98,0	96,0	105,5
3-3 CNC	99,0	94,0	104,1
2-1 CNC	98,0	97,0	103,4

Пятна касания экспериментальных зубчатых колес после стендовых испытаний показаны в таблице 8.

Таблица 8

Пятна касания экспериментальных зубчатых пар

Название пары	Пятно касания	
	202-1701053-40	202-1701132-40
4-3 CNC		
4-4 CNC		
3-4 CNC		
3-3 CNC		
2-1 CNC		

Экспериментальные зубчатые пары с шестерней 202-1701132-40 с бочкообразным зубом имели длинные пятна касания, расположенные в центре зуба и с отрывом от кромки зуба. При проведении термической обработки угол наклона зубьев уменьшился в среднем на 0,04...0,06 мм, в то время как при зубофрезеровании бочкообразность задавалась 0,03 мм. В связи с этим на парах 4-3, 3-4, 3-3 наблюдалось небольшое смещение пятна касания с центра зуба.

Для достижения правильного положения пятна касания после термической обработки следует зафиксировать направление и величину деформации и внести соответствующие поправки в величину и положение бочкообразности на зубе на операции зубофрезерования.

Одно из существенных достоинств зубофрезерных станков с ЧПУ – возможность выполнять любую форму бочкообразного зуба: симметричную, асимметричную, с двойной бочкообразностью, с прямым и бочкообразными участками и т.д. В связи с такими возможностями зубофрезерного станка с ЧПУ обеспечение требуемого размера и положения пятна касания по длине зуба для достижения 7-й степени точности – технически выполнимая задача.

Обеспечение требуемого пятна касания по высоте зуба связано с погрешностью профиля зуба и зависит от точности изготовления червячной фрезы. Червячные фрезы отечественного изготовления с точностью класса В и А используются для чернового нарезания под последующее шевингование или зубошлифование. Поэтому для достижения 7-й степени точности по погрешности профиля зуба и пятна касания по высоте зуба рекомендуется применение червячных фрез класса точности АА.

**Организация контроля зубчатых колес для обеспечения точности.** Немаловажный фактор в обеспечении окончательной точности 8-7-7 – наличие достаточных средств контроля как для окончательно изготовленных зубчатых колес, так и после операции зубофрезерования.

Для производственного контроля зубчатых колес массового производства традиционно применяется двухпрофильный контроль в зацеплении с измерительным колесом. Используемые для этих целей межцентромеры устанавливаются непосредственно на производственном участке, а на получение результатов контроля достаточно нескольких минут. Затраты на осуществление такого контроля минимальные. Вместе с тем этот метод имеет существенный недостаток, который заключается в необходимости контролеру визуально фиксировать на индикаторе одновременно четыре измеряемых параметра. В результате достоверность контроля зависит от квалификации операторов, не позволяет накапливать статистику результатов контроля и анализировать причины погрешностей. В связи с этим межцентромеры практически мало пригодны для контроля зубчатых колес, изготавливаемых на современном зубообрабатывающем оборудовании с ЧПУ.

В последние годы за рубежом появились приборы для контроля с полной записью параметров двухпрофильного контроля и программным обеспечением для анализа причин возможных погрешностей.

К настоящему времени на ОАО «ВИЗАС» (Витебск) создан отечественный прибор для двухпрофильного контроля с записью результатов измерения (рис. 5) [3].



Рис. 5. Прибор для двухпрофильного контроля ВЗ-581

Результаты двухпрофильного контроля зубчатого колеса представляются в виде протокола измерений (рис. 6).

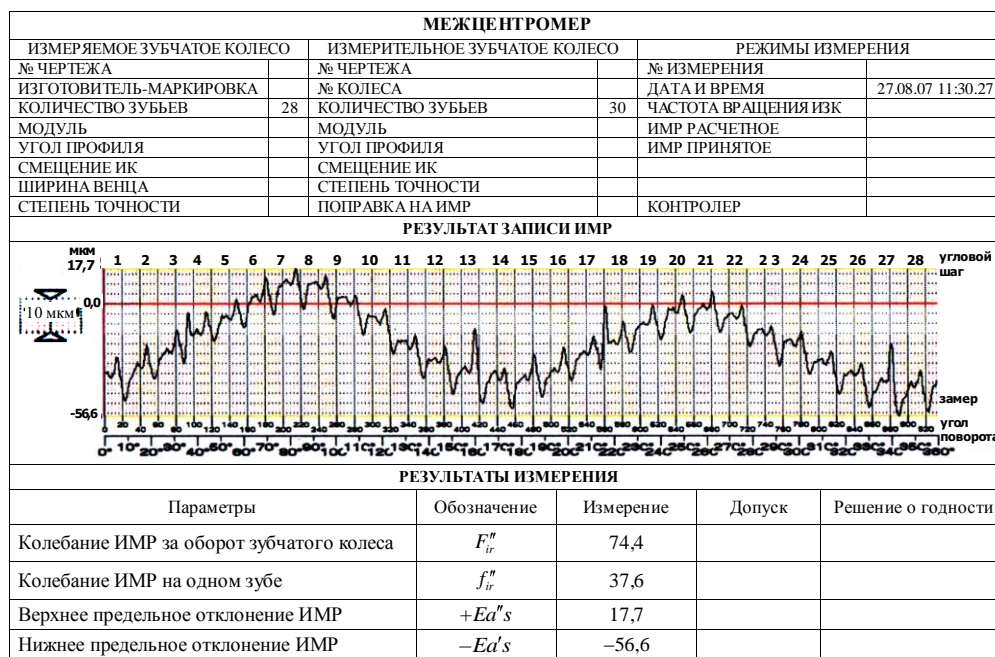


Рис. 6. Протокол измерения зубчатого колеса

Существенное преимущество двухпрофильного контроля – выявление погрешностей на всех зубьях. На рисунке 7 приведен протокол измерения сателлита редуктора мотор-колеса карьерного самосвала БелАЗ на приборе ВЗ-581.

Сателлит с числом зубьев 18 и модулем 10 мм был подвергнут принятому на БелАЗе контролю на измерительной машине и признан годным.

При контроле этого же сателлита на приборе двухпрофильного контроля ВЗ-581 четко виден один зуб с повышенным колебанием ИМР на одном зубе  $f_r''$ , что вызвано повышенной погрешностью профиля этого зуба.

Погрешность профиля зубьев при контроле на измерительной машине обычно производится на 3 – 4 зубьях, и попасть на зуб с повышенной погрешностью профиля можно только случайно.

ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЯ				
ИЗМЕРЯЕМОЕ ЗУБЧАТОЕ КОЛЕСО		ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ЗУБЧАТОЕ КОЛЕСО		РЕЖИМЫ ИЗМЕРЕНИЯ
№ ЧЕРТЕЖА	7519-2406-434	№ ЧЕРТЕЖА	8473-600-39	№ ИЗМЕРЕНИЯ
ИЗГОТОВИТЕЛЬ-МАРКИРОВКА	1	№ КОЛЕСА	1	ДАТА И ВРЕМЯ 01.09.08 12:39:45
КОЛИЧЕСТВО ЗУБЬЕВ	29	КОЛИЧЕСТВО ЗУБЬЕВ	18	ИМР РАСЧЕТНОЕ 0
МОДУЛЬ	10	МОДУЛЬ	10	ИМР ПРИНЯТОЕ 0
УГОЛ ПРОФИЛЯ	20	УГОЛ ПРОФИЛЯ	20	
СМЕЩЕНИЕ ИК	0,67	СМЕЩЕНИЕ ИК	0,626	№ МЕЖОСЕМЕРА 45
ШИРИНА ВЕНЦА	146	СТЕПЕНЬ ТОЧНОСТИ	5	
СТЕПЕНЬ ТОЧНОСТИ	8	ПОПРАВКА НА ИМР		КОНТРОЛЕР Меницкий
РЕЗУЛЬТАТ ЗАПИСИ ИМР				
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ				
Параметры	Обозначение	Измерение, мм	Допуск, мм	Решение о годности
Колебание ИМР за оборот зубчатого колеса	$F_r''$	0,1283	0,112	не годен
Колебание ИМР на одном зубе	$f_r''$	0,1283	0,045	не годен
Верхнее предельное отклонение ИМР	$+Ea's$	-0,0047	0,038	годен
Нижнее предельное отклонение ИМР	$-Ea's$	-0,1330	0,2	годен

Рис. 7. Протокол измерения сателлита редуктора мотор-колеса

Таким образом, использование прибора двухпрофильного контроля с записью измерительного межосевого расстояния позволяет значительно повысить точность и объективность контроля зубчатых колес, расширить информационную базу для оценки качества зубчатых колес и производить целенаправленный отбор зубчатых колес с требуемыми свойствами. Кроме того, имеется возможность при оснащении дополнительными программами производить статистическую обработку результатов измерения зубчатых колес и находить корреляционные зависимости между параметрами двухпрофильного контроля и возможными причинами погрешности зубчатого колеса.

### Выводы

1. Проведенные исследования подтвердили возможность использования для изготовления средне-модульных зубчатых колес коробок передач технологии без зубошлифования, с использованием зубофрезерного станка с ЧПУ и модификаций профиля зуба, в пределах 8-й степени точности ГОСТ1643-81 и с уровнем шума не выше уровня, достигаемого при использовании зубошлифования.

2. Экспериментальные зубчатые передачи, изготовленные с использованием зубофрезерного станка с ЧПУ и без зубошлифования, с бочкообразным зубом, с точностью в пределах 7...9 степени по ГОСТ 1643-81, показали уровень шума в пределах 103,4...107,5 dBA. Производственные зубчатые передачи, изготовленные с использованием зубошлифования, без бочкообразного зуба, с точностью в пределах 7-11 степени

по ГОСТ 1643-81, имели уровень шума в пределах 102,5...112,8 дБА при аналогичных режимах испытаний с экспериментальными передачами.

3. Для обеспечения 8-7-7 степени точности по ГОСТ 1643-81 без зубошлифования для средне-модульных зубчатых колес (модуль от 4 до 6 мм) рекомендуется использование зубофрезерных станков с ЧПУ, чистовых червячных фрез класса точности АА и приборов двухпрофильного контроля с записывающими устройствами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / В.Е. Антониук [и др.]. – СПб.: Профессия, 2007. – 832 с.
2. Антониук, В.Е. Тенденции современного производства зубчатых колес / В.Е. Антониук // Инженерный журнал. Справочник. Приложение № 12. – 2004. – С. 2 – 15.
3. Антониук, В.Е. Возможности современных средств двухпрофильного контроля зубчатых колес / В.Е. Антониук, В.Н. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 101 – 105.

Поступила 10.12.2010

#### **POSSIBILITIES OF IMPROVEMENT OF PERFORMANCE DATA OF TOOTH GEARINGS USE HOBGINGMACHINE TOOL WITH CNC**

**V. ANTONIUK, W. RUSETSKII, L. TRUHN OV**

*Possibilities of use modern hobbingmachine tool CNC for achievement of 8 degrees of accuracy of GOST 1643-81 without gear grinding are considered. Results of manufacturing of cogwheels by the module of 5 mm on offered technology with machine tool OFA 75 CNC use are resulted. Recommendations to destination norms of accuracy and parametres of noise of tooth gearings are given. Employment of the twin-flank control device with record of center-to-center distance enables to considerably improve accuracy and objectivity gear wheels control, expand data bank for their quality estimation and perform directional selection of gear wheels with required properties.*