

УДК 621.833.1

**В. В. Беспалов**, кандидат технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева

**В. И. Хазова**, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева

## **ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЗАЦЕПЛЕНИЯ, ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ПО СИНУСОИДАЛЬНОМУ ЗАКОНУ ПО УГЛУ $\phi$ , НА СПЕКТР ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЗУБЦОВОЙ ЧАСТОТЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ**

*Повышение точности изготовления зубчатых колес является жизненной необходимостью их производства. Однако в научной литературе недостаточно исследований, решающих этот вопрос. В данном исследовании была проведена экспериментальная проверка влияния радиального биения шевера при обработке зубчатых колес на спектр гармонических составляющих циклической погрешности зубцовой частоты. Исследование показало, что изменение погрешности зацепления, вызванное радиальным биением шевера, приводит к изменению амплитуды преимущественно первой гармонической составляющей циклической погрешности зубцовой частоты, а приращение амплитуд последующих гармонических составляющих незначительно. Результаты исследования расширяют возможности управления точностью изготовления зубчатых колес на операции шевингования.*

**Ключевые слова:** погрешность зацепления, циклическая погрешность зубцовой частоты, однопрофильный контроль, радиальное биение, дисковый шевер, цилиндрические зубчатые колеса.

**В** конце 30-х годов XX столетия возникла наука «теория реальных механизмов», основоположником которой является Н. А. Калашников [1]. Методология теории реальных механизмов заключается в том, что действительная ошибка любого элемента механизма рассматривается лишь как промежуточное звено между технологией его изготовления и действием в работе данного механизма. Иными словами, основной задачей теории реальных механизмов применительно к зубчатым передачам является установление связи между неточностями производства и погрешностями зубчатых колес и их проявлением в работающей передаче.

В пределах непрерывного цикла действия звена его отдельные, последовательно вступившие в работу ошибки могут быть приведены к одной обобщенной.

В разработанном Н. А. Калашниковым [1] подходе неточности зубчатого колеса приводились к одному параметру – к изменению мгновенного радиуса основной окружности по углу поворота колеса. Интегрирование этого избыточного приращения плеча по углу поворота колеса характеризовало дефектное приращение линии действия и, следовательно, неправильность работы передачи.

Б. А. Тайц [2], развивая далее теорию реальных механизмов, показал, что значительно удобнее взамен рассмотрения приращения плеча по углу поворота выявлять непосредственно избыточное приращение линии действия, то есть линии, проходящей через точку взаимодействия зубьев, по которой происходит передача рабочего усилия (применительно к зубчатым колесам таким элементом является линия зацепления). Эта погрешность без дополнительных переходов отражает неточность положения производящей поверхности инструмента относительно обра-

батываемых боковых поверхностей зубьев колеса. Приращение по линии действия характеризует избыточные приращения сопряженной поверхности при работе зубчатого колеса, то есть позволяет выявить нарушение процесса зацепления при эксплуатации.

Боковые поверхности зубьев колеса генерируются при обкатывании производящей поверхности шевера, которая образуется режущими кромками шевера. Режущие кромки шевера представляют собой пересечение боковых поверхностей зубьев шевера с передними поверхностями стружечных канавок. Различные погрешности изготовления, заточки и установки на станке дискового шевера приводят к искажению производящей поверхности. Все эти неточности могут быть приведены к одной суммарной погрешности, действующей вдоль потенциальной линии зацепления дискового шевера с обрабатываемым зубчатым колесом – погрешности зацепления.

Для силовых быстроходных передач важным показателем является нарушение кинематического закона движения, возникающее при входе зубьев в зацепление и выходе из него, так как эти отклонения вызывают циклические погрешности зубцовой частоты, создающие динамические перегрузки при работе передачи, шум и вибрацию при ее эксплуатации [2].

Основным методом контроля кинематической точности зубчатого колеса в передаче является однопрофильная обкатка его с парным колесом. Метод однопрофильного контроля при осуществлении непрерывного обката с измерительным элементом является типичным случаем комплексного контроля, поскольку получаемый результат дает непосредственно комплексную оценку кинематической точности изделия и характеризует непрерывное изменение погрешностей углового положения контролируемого колеса по углу его поворота [2]. Поэтому в каче-

стве линии зацепления выступает кинематическая погрешность зубчатого колеса.

В работе [3] было показано, что линия зацепления винтовой пары имеет погрешность. На точность зубчатого колеса, обрабатываемого на зубошевинговальном станке, оказывает влияние большое количество факторов. Анализ этих факторов позволяет сделать вывод, что суммарная погрешность цилиндрического зубчатого колеса складывается из погрешностей (вносимых станком (включая погрешности приспособления), инструментом (шевером), заготовкой, собственно процессом шевингования и измерением).

Плавность зацепления зубчатых колес зависит в большей степени от точности как самого шевера, так и его установки на станке [4]. Величина погрешности линии зацепления от элементарных погрешностей изготовления, заточки и установки дискового шевера впервые рассчитана в работе [4], где показано, что суммарная приведенная погрешность зацепления определяется монотонными кусочно-линейными составляющими, синусоидальными по углу  $\varphi$  и синусоидальными по углу  $2\varphi$ . Суммарная приведенная погрешность может быть разложена на указанные составляющие.

Синусоидальные составляющие по углу  $\varphi$  суммарной приведенной погрешности зацепления определяются радиальным и осевым биением шевера, а также радиальной составляющей от перекоса шевера.

Проверка изложенных теоретических положений проводилась за счет преднамеренного создания радиального биения шевера при обработке зубчатых колес. Монотонные кусочно-линейные составляющие при этом оставались минимальными и постоянными. Отсутствие перекоса шевера контролировалось. Порядок проверки состоял в следующем.

1. Выбирался шевер, удовлетворяющий по точности условиям эксперимента.

2. Изменение радиального биения шевера осуществлялось за счет расшифровки посадочного отверстия.

3. При установке шевера на шпиндель создавались различные необходимые величины радиального биения.

4. На приборе для контроля кинематической погрешности БВ-5058 шевер обкатывался с парным зубчатым колесом.

5. Осуществлялась запись кинематической погрешности на бумажную ленту.

6. Проводилась обработка результатов измерений.

Обработке подвергались зубчатые колеса, имеющие следующие параметры: модуль нормальный – 3 мм; число зубьев – 25; угол зацепления –  $20^\circ$ ; угол наклона зубьев –  $29^\circ 8' 42''$ ; материал – сталь 30ХМ.

Шевингование осуществлялось параллельным методом на станке модели 5702. В качестве инструмента использовался дисковый шевер класса точности А по ГОСТ 8570-80 с параметрами: модуль нормальный – 3 мм; число зубьев – 59; угол зацепления –  $20^\circ$ ; угол наклона зубьев –  $17^\circ 8' 42''$ ; материал – Р-18.

Режимы обработки: скорость резания – 29,3 м/мин; подача радиальная – 0,04 мм/прод.ход; подача продольная – 0,4 мм/об.

Для гармонического анализа кинематической погрешности обработки зубчатых колес использовался прибор для контроля кинематической погрешности модели БВ-5058 с применением анализатора фирмы «DIYE», проводящего частотный анализ составляющих.

Прибор позволяет контролировать цилиндрические зубчатые колеса внешнего и внутреннего зацепления при непрерывном однопрофильном зацеплении с измерительным или парным колесом (обкат пары колес). Контролируемые зубчатые колеса устанавливаются на ведущий и ведомый шпиндели. На концах обоих шпинделей установлены фотоэлектрические круговые измерительные преобразователи (ФКИП). Корпуса преобразователей связаны с корпусами бабок посредством параллелограммов, позволяющих исключить из результатов измерений погрешности, возникающие от биений концов шпинделей прибора, на которых установлены ФКИП. Схема работы прибора представлена на рис. 1.

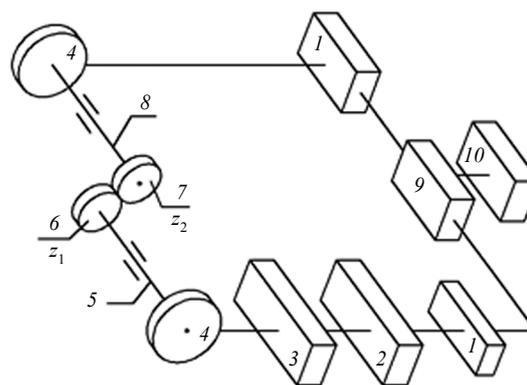


Рис. 1. Схема работы прибора

В приборе БВ-5058 использован принцип преобразования погрешности пары зубчатых колес, обкатываемых в однопрофильном зацеплении, в колебания фазы электрических сигналов, поступающих с двух фотоэлектрических круговых измерительных преобразователей 4, один из которых жестко связан с ведущим валом 5, а второй – с ведомым 8.

На ведущем валу закрепляется зубчатое колесо 6 с числом зубьев  $z_1$ , а на ведомом – зубчатое колесо 7 с числом зубьев  $z_2$ . С обоих ФКИП при их вращении поступают сигналы на два входа электронной схемы прибора. При обкатке измеряемых колес с одинаковым числом зубьев, то есть  $z_1 = z_2$ , сигналы с ФКИП с одинаковой частотой  $f_1 = f_2$  поступают на фазометр 9. Сдвиги фаз, возникающие между двумя частотами, обусловлены угловым рассогласованием ФКИП, связанным непосредственно с обкатываемыми колесами, то есть погрешностью обкатываемых колес  $z_1$  и  $z_2$ .

Разность фаз записывается электросамозаписью 10, и эта запись является графиком кинематической погрешности.

ской погрешности обкатываемых колес. При  $z_1 \neq z_2$  сигналы с ФКИП поступают с разной частотой, то есть  $f_1 \neq f_2$ . В этом случае частота, поступающая с ФКИП ведущего обкатываемого колеса, приводится к частоте, поступающей с ФКИП ведомого обкатываемого колеса через множитель 3 и делитель частоты 2, то есть  $f_1 \frac{z_1}{z_2} = if_2$ , так как  $\frac{z_1}{z_2} = i$ .

Теперь снова одинаковые частоты  $if_1 = f_2$  поступают на фазометр, который показывает разность фаз приведенных частот, а самописец регистрирует кинематическую погрешность обкатываемых зубчатых колес. Для установки различных диапазонов измерения используется регистр масштаба 1, установленный в электронной части прибора.

Для соблюдения статистической устойчивости наблюдаемых значений отклонений параметров принимались следующие меры по обеспечению однородности условий экспериментов:

- все замеры проводились на одном и том же приборе;
- в процессе всех измерений проводилась единая калибровка и настройка прибора;

- все измерения проводились на специально изготовленных оправках, исключающих внесение дополнительных погрешностей.

Зависимость амплитуд гармонических составляющих циклической погрешности зубцовой частоты от радиального биения шевера на основании результатов замеров приведены на рис. 2.

На основании проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы.

1. Изменение погрешности зацепления, изменяющейся по синусоидальному закону по углу  $\varphi$ , вызывает изменение амплитуды преимущественно первой гармонической составляющей циклической погрешности зубцовой частоты.

2. Приращение амплитуды первой гармонической составляющей циклической погрешности зубцовой частоты составляет 0,223 от величины радиального биения шевера.

3. Приращение амплитуд последующих гармонических составляющих незначительно.

4. Результаты исследования расширяют возможности управления точностью изготовления зубчатых колес на операции шевингования.

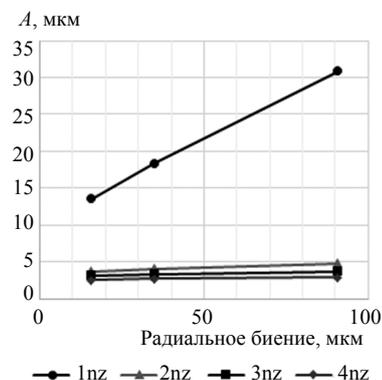


Рис. 2. Зависимость амплитуд гармонических составляющих циклической погрешности зубцовой частоты от радиального биения шевера

#### Библиографические ссылки

1. Калашиников Н. А. Точность в машиностроении и ее законы. – М. : Машгиз, 1950. – 248 с.
2. Тайц Б. А. Точность и контроль зубчатых колес. – М. : Машиностроение, 1972. – 368 с.
3. Полоцкий М. С. Повышение точности быстроходных зубчатых передач шевингованием // Труды ЦНИИТМАШ. – 1960. – № 10. – С. 5–63.
4. Беспалов В. В., Сорокин В. М. Влияние погрешностей дисковых шевров на циклическую погрешность зубцовой частоты цилиндрических зубчатых передач // Межвузовский сб. научн. тр. – Н. Новгород, 1995. – С. 92–100.

V. V. Bespalov, PhD in Engineering, Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev  
V. I. Khazova, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev

#### Effect of Transmission Error Varying According to Sinusoidal Law by $\varphi$ Angle on Spectrum of Harmonic Components of Cyclic Error of Gear-Meshing Frequency of Spur Gears

*Accuracy improvement is vital for spur wheels manufacturing. Yet there is still not enough scientific research that would solve this problem. The present research deals with experimental validation of disc shaving cutter radial runout at spur gears procession with its effect on the spectrum of harmonic components of the cyclic error of gear-meshing frequency. This research shows that transmission error variation caused by radial runout of disc shaving cutter, results in amplitude modulation predominantly of the first harmonic component of the cyclic error of gear-meshing frequency, leaving subsequent harmonic components amplitudes with no considerable increment. The results of the research widen the options of spur wheels manufacturing accuracy management at shaving operation.*

**Key words:** transmission error, cyclic error of gear-meshing frequency, single-flank control, radial runout, disc shaving cutter, spur gears.