

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ДЛИНЫ ОБЩЕЙ НОРМАЛИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В ОПЕРАЦИЯХ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ПЯТИКООРДИНАТНОМ СТАНКЕ С ЧПУ

В статье рассматривается способ автоматизированного измерения длины общей нормали косозубого цилиндрического колеса, позволяющий получать его точное значение без снятия детали после зубообработки дисковыми или концевыми фрезами. Измерения осуществляются при помощи автоматизированного подвода трехкоординатного индикатора линейных измерений в расчетные точки измерений. Приведены формулы расчета длины общей нормали, позволяющие для двух- и одноточечной схемы измерений индикатором рассчитать значение длины общей нормали и величины коррекции программы ЧПУ обработки зубчатого венца. Использование двухточечного метода измерений длины общей нормали трехкоординатным индикатором позволило измерить длину общей нормали без снятия обрабатываемого зубчатого колеса с оправки, одноточечного — полностью исключить вероятность возникновения наладочного брака и уменьшить трудоемкость проведения переналадок станка в режиме единичной и мелкосерийной обработки зубчатых колес. Сравнение данных измерений шестерен трехкоординатным индикатором фирмы Маг и специализированной зубоизмерительной машиной с ЧПУ дают близкие значения и подтверждают возможность использования разработанной схемы для измерения длины общей нормали.

Ключевые слова: длина общей нормали, измерение, трехкоординатный щуп, трехкоординатный индикатор, станок с ЧПУ, наладка.

Введение. Самым универсальным способом изготовления косозубых зубчатых колес является их изготовление на пятикоординатном станке с ЧПУ универсальным инструментом — дисковой фрезой со сменными многогранными пластинами. В отличие от специализированной обработки — зубофрезерования червячными фрезами универсальным инструментом нет необходимости в изготовлении дорогостоящего специализированного инструмента — червячных фрез. Этот метод обработки предпочтителен для обработки прямозубых, косозубых зубчатых колес (рис. 1б), а также вал-шестерен с несколькими венцами (рис. 1а) в единичном и мелкосерийном производстве. Зарубежные производители выпускают инструмент для этого вида обработки [1], состоящий из корпуса, виброустойчивой оправки и твердосплавных неперетачиваемых пластин.

Авторами статьи разработан программный продукт, позволяющий по исходным конструктивным данным зубчатых венцов сформировать текст управляющей программы обработки зубчатого венца напрямую, без построения трехмерной модели

зубчатого колеса. Преимуществом такого подхода является исключение ошибок разработки программ для станка с ЧПУ по 3D моделям зубчатого колеса в различных САМ системах, а также оперативность разработки кода программы, непосредственно на станочном рабочем месте [2].

При переходе от одной конструкции зубчатого колеса к другой на станке с числовым программным управлением выполняется наладка станка. Наладка заключается в установке зажимных оправок, изготовленных под конструктивные особенности обрабатываемого зубчатого колеса, установки вылета и наладки вылета и радиального биения по режущим кромкам сменных многогранных пластин дисковой фрезы и отладке программы обработки зубчатых венцов колеса, выполнению пробной обработки.

Поскольку устанавливаемая в процессе переналадки станка зажимная оснастка имеет свои индивидуальные отклонения, инструмент — различную степень износа, а также различные параметры процесса обработки, то погрешность обработки зубчатых венцов будет различна. Ключевым параметром

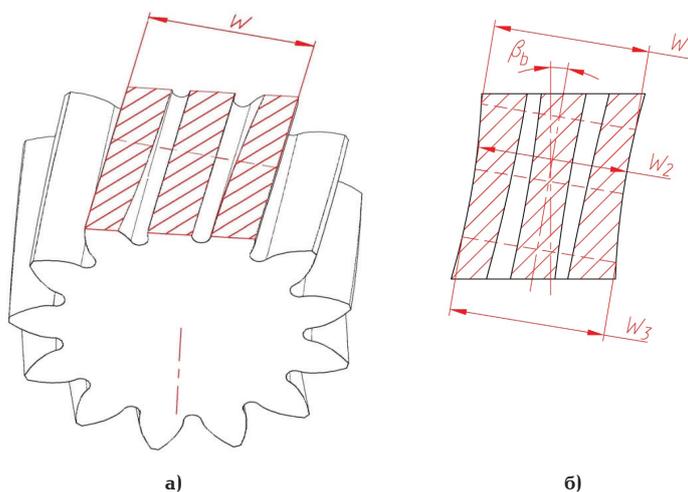


а)



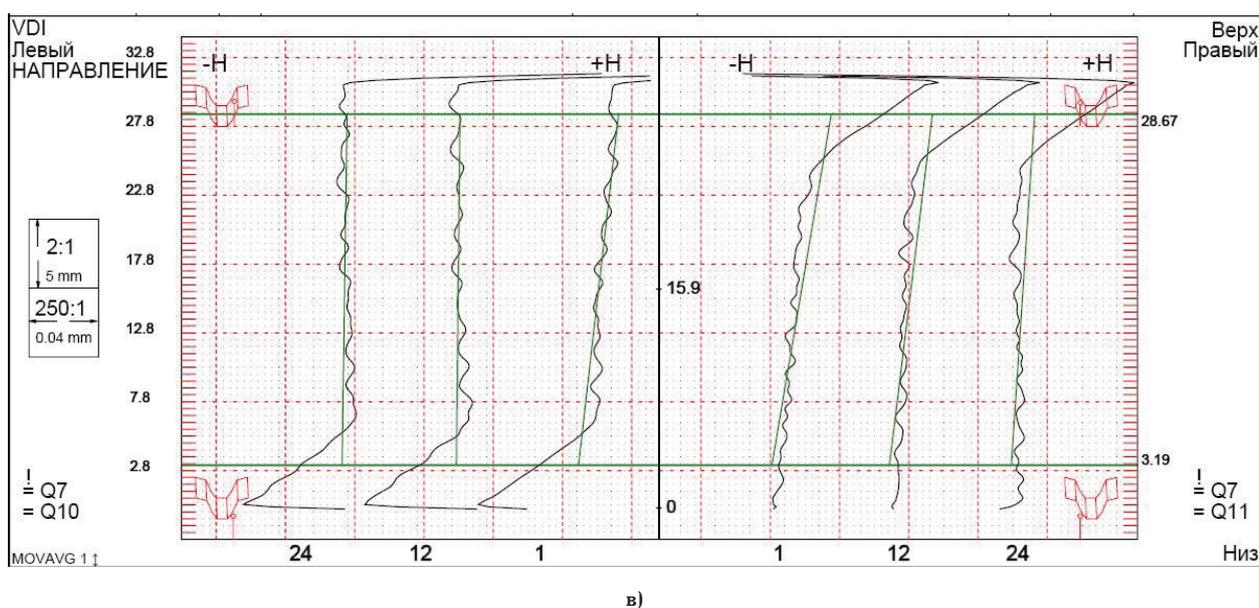
б)

Рис. 1. Рабочие зоны пятикоординатного станка обработки:
а) многошпинцового вала-шестерни, б) вала шестерни



а)

б)



в)

Рис. 2. Погрешности измерений длины общей нормали при измерении универсальным инструментом: а) 3D модель зубчатого цилиндрического зубчатого колеса; б) сечение плоскостью, касательной к основному цилиндру, где W_2 — искомый минимальный размер длины общей нормали, W_1 и W_3 — показатели длины общей нормали в крайних сечениях; в) профилограмма измерений продольного профиля на зубоизмерительной машине фирмы Gleason



а)



б)

Рис. 3. а) использование щупа Renishaw для поиска «нулевой» точки обработки детали; б) параметры ЧПУ подвода щупа

после зубофрезерования является длина общей нормали (рис. 2а). По этому параметру осуществляется приемка продукции на последующей чистовой зубошлифовальной операции червячными кругами. Длина общей нормали должна обеспечить гарантированную величину припуска на боковых поверхностях зубьев зубчатого венца.

Измерение параметров длины общей нормали на рабочих местах зубообрабатывающих операций выполняется наладчиками или контролерами «вручную» при помощи нормалемеров. При «ручных» измерениях длины общей нормали у косозубых колес высока вероятность перекоса измерительных наконечников в точках измерений. Причиной ошибочных измерений является обработка венцов зубчатого колеса дисковым инструментом при недостаточных его перебегах, которая приводит к вогнутой форме профиля зуба (рис. 2в). Вогнутая форма профиля зуба приводит к контакту измерительных элементов универсального инструмента не в проектных точках измерений. Схема образования погрешности показателя приведена на рис. 2б.

Устранить погрешность возможно, увеличив перебег инструмента, однако в большинстве случаев это невозможно из-за габаритных ограничений обрабатываемых деталей и недостаточного диапазона перемещений суппортов станка. В результате погрешности измерений может достигать величины, превышающей значение поля допуска на длину общей нормали и несколько пробных первых заготовок могут быть обработаны с недостаточным припуском под шлифовку. В экспериментальном единичном и мелкосерийном изготовлении зубчатых колес, а особенно многовенцовых валов, возникновение подобного наладочного брака недопустимо из малых объемов партий. Более точным цеховым методом измерений длины общей норма-

ли и других геометрических показателей лишенным недостатков «ручного» способа измерений является измерение на специальном приспособлении эвольвентомере [3] либо на различных координатно-измерительных машинах — специализированных [4] или универсальных трехкоординатных [5], шестиосевых [6], оснащенных специальным модулем измерений зубчатых колес. Вышеперечисленные способы измерений являются основными для измерений геометрических параметров обработанных зубчатых колес.

Для выполнения измерений на эвольвентомере или координатных машинах обработанное зубчатое колесо необходимо снять и подготовить к измерениям. Эти процессы значительно удлиняют сроки наладки обрабатывающего пятикоординатного станка с ЧПУ. Таким образом, более точное измерение геометрических параметров зубчатого колеса решает задачу нахождения объективных значений ключевого параметра, но не решает полностью задачу минимизации вероятности возникновения брака. Процесс обработки и измерений остается итерационным.

Решением задачи исключения брака является выполнение измерений длины общей нормали без снятия обрабатываемого колеса с оправки, исключив из выполнения самого процесса измерений наладчика станка, вычислением угловых и линейных поправок компенсации величины длины общей нормали, с внесением в программу ЧПУ управления станочными модуля.

Теоретическая часть. Современные обрабатывающие станки с ЧПУ обеспечивают высокую повторяемость перемещений подвижных частей, что позволяет использовать их для выполнения измерений деталей, обрабатываемых на этом же станке с контактными щупами различных производителей.

Наиболее распространены и интегрированы в различные станочные системы с ЧПУ щупы фирмы Renishaw. Как правило, целью измерений щупами является обеспечение точности обработки деталей за счет коррекции положения оснастки или программы обработки детали, либо состояния инструмента. Например, в [7] авторы применили датчик для измерений вылета и диаметального размера концевой фрезы диаметром 6 мм. В результате автоматизированных измерений повысилась точность измерений на 3 мкм, уменьшилось количество измерений с 3-х до одного. Таким образом, повышается точность обработки и уменьшается длительность наладки станка с ЧПУ.

Результаты измерений деталей с использованием щуповых средств измерений приводятся в различных литературных источниках. Например, в работе [8] приведены данные о сокращении длительности изготовления сложных корпусных деталей из алюминия в 3–4 раза по сравнению с обработкой с измерением универсальными средствами измерений. На станке измеряются линейные размеры деталей без сложной математической обработки данных измерений (рис. 3). Эффект достигается за счет экономии времени на разметочные работы, выверку положения обрабатываемой детали и дополнительную обработку измерительных баз детали. В [9] станок используется вместо координатно-измерительной машины для измерения диаметральных размеров и межосевых размеров обрабатываемых в корпусе редуктора отверстий. Предлагаются и более сложные математические модели расчета компенсационных смещений станка. Так, в работе [10] рассматривается методика компенсации погрешностей обработки торцевой поверхности корпусной детали торцевой фрезой. Применив аппарат матричных расчетов измеренных геометрических значений величин, авторы рассчитывают величину угловых и линейных смещения поворотных модулей станка с ЧПУ, которые используются для выполнения наладчиком компенсационных поворотов и смещений модулей станочной системы нулевой системы координат, либо внесения коррекций в программу обработки в системе координат детали.

В [11] приводятся в общем виде математические модели обработки измерительной информации системы активного контроля обрабатывающего центра с ЧПУ. К сожалению, авторы не приводят примера применения приведенных в статье математических моделей.

Таким образом, приведенные в литературы примеры измерений геометрических показателей и величин коррекции реализованы на геометрически простых конструктивных элементах деталей. Особенности измерения геометрических параметров зубчатых колес с применением щуповых средств измерений на станках с ЧПУ не рассматриваются.

Зарубежные исследователи для выявления ошибок используют обкат сферических эталонов, закрепленных на поворотном суппорте. Так, в [12] рассматривается процесс аттестации поворотных столов пятикоординатных станков измерением погрешностей их позиционирования щуповым прибором, закрепленным в шпинделе станка специально изготовленного эталонного приспособления с шариками, расположенными через заранее заданные углы. В [13, 14] погрешность пятикоординатного станка оценивается по измерениям шаровидного эталона, закрепленного на поворотном столе с эксцентриситетом по отношению к его центральной точке. В [15] авторы оценивают погрешности пятикоординатных станков по измерениям четырех сферических пальцев щупом, закрепленным в шпинделе станка. Другим способом определения погрешностей пятикоординатных станков является использование интерферометров и меток, расположенных на рабочих поверхностях суппортов [16, 17]. Для определения погрешностей координатных осей станка в этих исследованиях применяются матричный математический аппарат. Таким образом, зарубежные исследователи предпочитают определять погрешности пятикоординатных станков без привязки к обрабатываемым на них изделиям по данным тестовых испытаний. Особенности измерений зубчатых венцов на пятикоординатных станках с ЧПУ также не рассматриваются.

Для измерений длины общей нормали необходимо осуществить автоматизированный подвод щупа.



Рис. 4. Средства контактных измерений: а) контактный датчик Renishaw; б) трехкоординатный индикатор MarTest 802 EW; в) щуп в инструментальном магазине станка

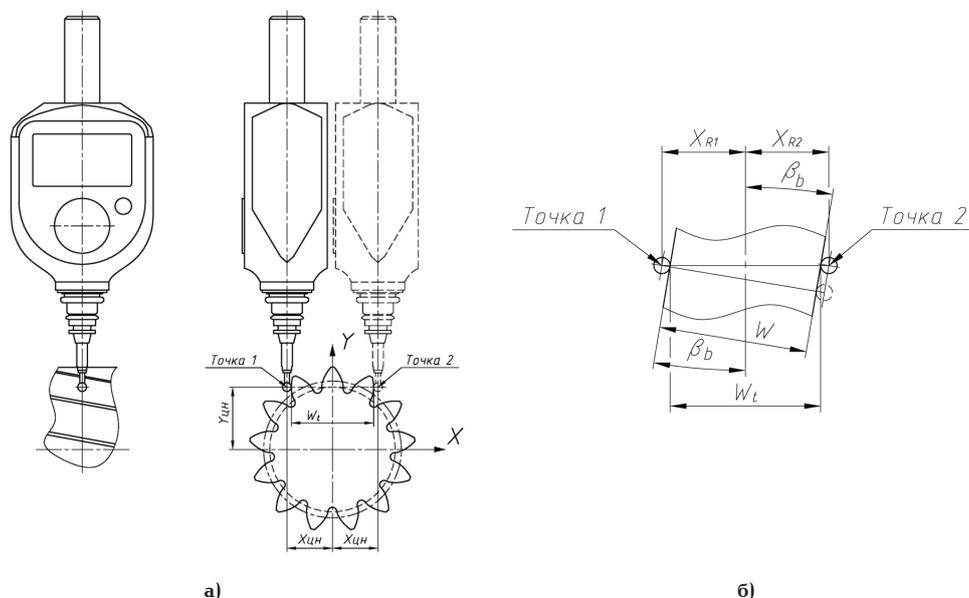


Рис. 5. Схемы а) положений измерительного наконечника при двухточечном измерении длины общей нормали; б) измерения показателей в торцевом и нормальном сечениях

Система управления шупом и обработки данных измерений многих станков с числовым программным управлением не предполагает их программирования и перемещения по внешней управляющей программе, поэтому для измерений решено воспользоваться универсальным трехкоординатным индикатором фирмы Mahr (рис. 4б), напрямую не связанным с системой ЧПУ. Индикатор используется для поиска нулевых точек станка, выполняется во влагозащищенном исполнении и устанавливается в инструментальный магазин станка (рис. 4в).

Для измерения длины общей нормали сферический наконечник индикатора необходимо выполнять в направлении измеряемого показателя [18, 19] до касания с боковыми сторонами зубьев (рис. 5а) в торцевом сечении косозубого колеса. Центр наконечника подводится последовательно в точки 1 и 2, координаты положения которых возникают при его касании боковых сторон зубьев, ограничивающих длину общей нормали W с припуском под последующую обработку ΔS .

Величина общей нормали в торцевом сечении W_t рассчитывается с учетом припуска по следующей формуле:

$$W_t = \frac{W + 2 \cdot \Delta S}{\cos \beta_b},$$

где W — длина общей нормали в нормальном сечении (без учета припуска); ΔS — припуск по нормали к боковой поверхности зуба; β_b — угол наклона зубьев на основной окружности.

Теоретические координаты точек 1 и 2 рассчитываются по следующим зависимостям:

$$X_{цн} = \frac{W_t + d_n / \cos \beta_b}{2},$$

$$Y_{цн} = \frac{D_b^2}{2},$$

где d_n — диаметр сферического наконечника; D_b — диаметр основной окружности зубчатого колеса.

Учитывая тот факт, что отклонение размера длины общей нормали на обработанной детали может быть как положительным, так и отрицательным, координаты X точек подвода должны быть скорректированы на величину гарантированного перебега, величина которого определяется опытным путем $\Delta X = 0,1 \dots 0,3$ мм.

С учетом этого координаты точек подвода вершины наконечника определяются следующим образом:

$$X_1 = -\frac{W_t + d_n / \cos \beta_b}{2} + \Delta X,$$

$$Y_1 = \frac{D_b - d_n}{2},$$

$$X_2 = \frac{W_t + d_n / \cos \beta_b}{2} + \Delta X,$$

$$Y_2 = \frac{D_b - d_n}{2}.$$

Подвод наконечника в точки измерения обеспечивается по программе ЧПУ с условным остановом в них. Регистрация показаний индикатора в виде отклонений ΔR_1 и ΔR_2 с последующим вводом в программный модуль зубообработки осуществляется наладчиком станка с ЧПУ.

Фактические координаты центра измерительного наконечника X_{R1} и X_{R2} (рис. 6б) будут зависеть от фактической величины длины общей нормали и могут быть определены по формулам:

$$X_{R1} = X_1 + \Delta R_1$$

$$X_{R2} = X_2 + \Delta R_2,$$

где ΔR_1 , ΔR_2 — показание индикатора в точках 1 и 2 соответственно.

Действительное значение длины общей нормали в торцевом сечении W_t определяется по формуле:

$$W_{iR} = X_{R1} + X_{R2} - d_n / \cos \beta_b.$$

Действительное значение длины общей нормали в нормальном сечении W определяется по формуле:

$$W_R = (X_{R1} + X_{R2}) \cos \beta_b - d_n.$$

Измеренные действительные значения длины общей нормали используются для расчета величины коррекции, которая рассчитывается как разница расчетной длины общей нормали (с припуском) и ее фактического значения:

$$\Delta W_R = \frac{W_R - W}{2}.$$

Найденное значение коррекции ΔW_R вводится в программный продукт, формирования управляющей программы пятикоординатного станка с ЧПУ и траектории перемещений базовой точки инструмента пересчитываются.

Приведенный выше способ двухточечного измерения предполагает для проведения измерений обработки хотя бы одной детали. Однако возможно обеспечить значение общей нормали, выполнив обработку только одной впадины зубчатого колеса.

При этом способе измерение координаты профиля боковой стороны зуба выполняется по односточечной схеме. На рис. 6 приведена схема контакта сферического наконечника 2 трехкоординатного щупа 1 с боковой поверхностью зуба колеса.

Центр сферического наконечника по программе ЧПУ подводят в точку с координатами:

$$Y_{цн} = \frac{W + 2\Delta W + d_n}{2 \cos \beta_b} - \Delta L,$$

$$X_{цн} = \frac{D_b - d_n}{2},$$

где d_n — диаметр сферического наконечника; D_b — диаметр основной окружности зубчатого колеса; β_b — угол наклона винтовой линии зуба на основной окружности; W — расчетная длина общей нормали; ΔW — припуск под окончательную обработку по длине общей нормали (на сторону); ΔL — величина гарантированного перебега.

Затем регистрируют по показаниям индикатора величину отклонения ΔR , на основе которой определяют величину коррекции на длину инструмента ΔW_R (рис. 7) и угловое положение заготовки $\varphi_{\Delta W}$:

$$\Delta W_R = \Delta R - \Delta L \cdot \cos \beta_b,$$

$$\varphi_{\Delta W} = \frac{2\Delta W_R}{D_b \cdot \cos \beta_b}.$$

После внесения коррекции на длину инструмента и углового положения заготовки вокруг оси обрабатывают оставшиеся впадины зубьев по обеим сторонам зубчатого венца.

Таким образом, в процессе наладки измерения выполняются только с одной стороны впадины зубчатого колеса, поскольку другая сторона зуба, формирующая длину нормали, еще не обработана. Такой способ измерений и расчета величин коррекции позволяет полностью исключить наладочный брак.

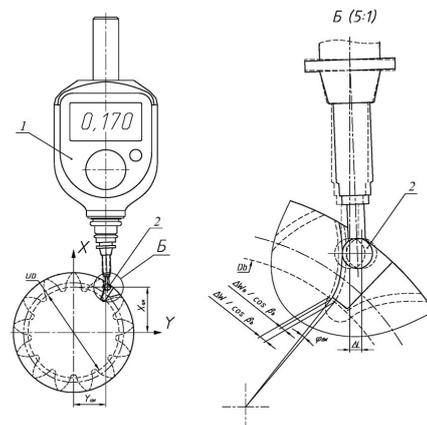


Рис. 6 Схема контакта трехкоординатного щупа с боковой поверхностью измеряемого зуба при выполнении односточечной схемы измерений координат профиля зуба колеса: 1 — трехкоординатный щуп; 2 — сферический наконечник

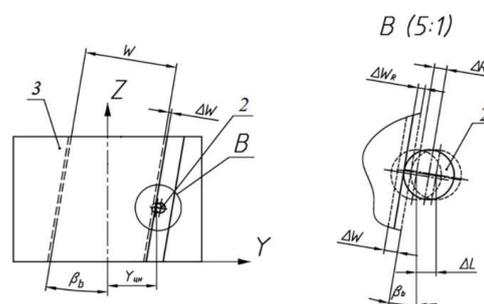


Рис. 7. Схема расчета величины коррекции при односточечной схеме измерения координат профиля зуба колеса

Выводы и практическая реализация. Сравнение измеренных значений длины общей нормали шестерен, измеренных трехкоординатным индикатором, с данными измерений этих же шестерен на специализированной зубоизмерительной машины фирмы Gleason показали близкие значения, отличающиеся не более чем на 0,03 мм, что является допустимой величиной для обеспечения припуска на боковые стороны зубьев зубчатого венца под шлифование 0,15 мм.

Благодаря двухточечным измерениям длины общей нормали без снятия со станка обрабатываемой заготовки зубчатого колеса, появляется возможность оперативного промежуточного контроля обрабатываемых зубчатых колес, снижается длительность наладки станка в процессе мелкосерийной обработки. Найденные в результате выполнения односточечной схемы измерений угловые и линейные поправки программы обработки ЧПУ зубчатого венца позволяют исключить вероятность возникновения наладочного брака.

Библиографический список

1. InvoMilling. Революция в обработке прямозубых и косозубых зубчатых колес. Каталог продукции. Sandvik Coromant, 2014. 8 с.
2. Сафаров Д. Т., Кондрашов А. Г., Хафизов И. И. Повышение эффективности обработки зубчатых венцов косозубых зубчатых колес на этапе конструкторской подготовки производства // Инновационные машиностроительные технологии,

оборудование и материалы-2018: сб. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. Казань, 2018. С. 384–388.

3. Дербабба В. А. Моделирование влияния погрешностей измерения общих нормалей зубьев на показатели разбраковки // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. Т. 6, № 4 (66). С. 48–52.

4. Локтев Д. А., Егоров С. Б., Капитанов А. В. [и др.]. Инновационные средства обеспечения управляемости технологических процессов // Инновации. 2016. № 8 (214). С. 113–119.

5. Ковальчук С. Н. Контроль зубчатых колес на координатно-измерительной машине GLOBAL // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 5 (105). С. 124–126.

6. Николаева Е. В., Николаев М. Ю., Молодцов А. С., Пимнева Н. Е., Козаков М. В. Измерение косозубых шестерней и червячных колес на координатно-измерительной машине // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 140–145. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-140-145.

7. Аверченков В. И., Филиппова Л. Б., Пугач Л. И. Программный комплекс определения величины коррекции на инструмент для обрабатывающих центров с датчиками активного контроля // Известия ТулГУ. 2013. № 7-1. С. 70–78.

8. Штриплинг Л. О., Попов М. Г. Обеспечение точности изготовления сложных корпусных деталей при пятиосевой обработке на основе применения контактного датчика // Омский научный вестник. 2009. № 3 (83). С. 88–90.

9. Мигачева Г. Н., Минимиров А. Ю., Бирюкова Е. А. Порядок операционного контроля в системе RENISHAW детали «Корпус редуктора» // Наука без границ. 2018. № 3 (20). С. 10–14.

10. Федотов А. В. Математическая модель коррекции положения обрабатываемой грани на станке с ЧПУ // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 2. С. 368–373.

11. Лазаренко И. В., Федотов А. В. Система активного контроля для обрабатывающего центра // Известия высших учебных заведений. 2012. № 12. С. 21–25.

12. Suh S., Lee E., Jung S. Error modelling and measurement for the rotary table of five-axis machine tools // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1998. Vol. 14 (9). P. 656–663. DOI: 10.1007/BF01192286.

13. Suh S., Lee E., Jung S. Error modelling and measurement for the rotary table of five-axis machine tools // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1998. Vol. 14 (9). P. 656–663. DOI: 10.1007/BF01192286.

14. Lei W. T., Hsu Y. Y. Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part I: Design and modeling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2002. Vol. 42 (10). P. 1153–1162. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00047-0.

15. Lei W. T., Hsu Y. Y. Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part I: Design and modeling //

International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2002. Vol. 42 (10). P. 1153–1162. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00047-0.

16. Chen J. S., Kou T. W., Chiou S. H. Geometric error calibration of multi-axis machines using an auto-alignment laser interferometer // Precision Engineering. 1999. Vol. 23 (4). P. 243–252. DOI: 10.1016/S0141-6359(99)00016-1.

17. Xiang S., Altintas Y. Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2016. Vol. 101. P. 65–78. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2015.11.006.

18. Леун Е. В. Гибридная 3D измерительная головка для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий сложной формы // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 140–146.

19. Леун Е. В. Вопросы построения многоканальных гибридных измерительных головок для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий // Омский научный вестник. 2017. № 6 (156). С. 126–131.

КОНДРАШОВ Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры конструкторско-технологического проектирования машиностроительных производств.

Адрес для переписки: Kondrahovag@mail.ru
SPIN-код: 3684-5751, AuthorID (РИНЦ): 618266
ORCID: 0000-0002-9193-3505
AuthorID (SCOPUS): 24780979600
ResearcherID: AAE-9345-2019

САФАРОВ Дамир Тамасович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры материалов, технологий и качества.

SPIN-код: 4346-4997, AuthorID (РИНЦ): 741369
ORCID: 0000-0002-8297-4524
AuthorID (SCOPUS): 6603409746
ResearcherID: 6834-2018
Адрес для переписки: Safarov-dt@mail.ru

Для цитирования

Кондрашов А. Г., Сафаров Д. Т. Автоматизированное измерение и коррекция длины общей нормали зубчатых колес в операциях зубофрезерования на пятикоординатном станке с ЧПУ // Омский научный вестник. 2021. № 3 (177). С. 13–19. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-13-19.

Статья поступила в редакцию 14.04.2021 г.

© А. Г. Кондрашов, Д. Т. Сафаров