

УДК 621.9.08

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-248-255

**Для цитирования:** Карабонцева М. В., Брижинская Н. В., Левко В. А. Автоматизация контроля геометрических характеристик червячных и конических зубчатых колес при помощи координатно-измерительных машин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 2. С. 248–255. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-248-255.

**For citation:** Karabontseva M. V., Brizhinskaya N. V., Levko V. A. [Automation of control of geometrical characteristics of worm and bevel gears by means of coordinate measuring]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 2, P. 248–255. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-2-248-255.

## **Автоматизация контроля геометрических характеристик червячных и конических зубчатых колес при помощи координатно-измерительных машин**

М. В. Карабонцева<sup>1\*</sup>, Н. В. Брижинская<sup>2</sup>, В. А. Левко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>АО «Красмаш»

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

\*E-mail: karaboncevamaria@mail.ru

*Статья содержит результаты исследований по автоматизации контроля геометрических характеристик зубчатых колес. Применение координатно-измерительных машин позволяет существенно повысить производительность и точность измерений. Однако их применение для контроля зубчатых колес требует использования специальных программ для проведения и обработки результатов измерений изделий со сложной формой поверхности. Использование для метрологического контроля геометрических характеристик червячных и конических зубчатых колес программного обеспечения позволяет достичь высокой точности проведения контрольно-измерительных работ. Для автоматизации контроля геометрических характеристик червячных и конических зубчатых колес создан дополнительный модуль к стандартной программе. С его помощью все точки измеряемой криволинейной поверхности зубчатых колес, полученные контактным методом по типовой программе измерений, структурируются в единый массив данных с протоколом измерений. На основе этих данных модуль формирует профиль измеренной поверхности зуба колеса и выстраивает геометрический контур профиля измеряемого зуба. Результатом работы модуля является формирование общего профиля всего зубчатого колеса и его сравнение с исходным (теоретическим) профилем зубчатого колеса в целом. Сам процесс контроля осуществляется в небольшом временном интервале, что позволяет использовать предложенный подход к автоматизации контроля профиля зубчатых колес в мелкосерийном производстве.*

*Ключевые слова:* координатно-измерительная машина, зубчатое колесо, отклонение профиля зуба, автоматизация контроля.

## **Automation of control of geometrical characteristics of worm and bevel gears by means of coordinate measuring**

M. V. Karabontseva<sup>1\*</sup>, N. V. Brizhinskaya<sup>2</sup>, V. A. Levko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC “Krasmash”

29, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: karaboncevamaria@mail.ru

*The article contains the results of research on the automation of control of the geometric characteristics of gears. The use of coordinate measuring machines can significantly improve the productivity and accuracy of measurements. However, their use for testing gears requires the use of special programs for carrying out and processing the results of measurements of products with complex surface shapes. The use of software for metrological control of the geometric characteristics of worm and bevel gears makes it possible to achieve high accuracy of control and measurement work. To automate the control of geometric characteristics of worm and bevel gears, an additional module has been created for the standard program. With its help, all points of the measured curved surface of gears, obtained by contact method according to a standard measurement program, are structured into a single data array with a measurement protocol. Based on these data, the module generates a profile of the measured surface of a wheel tooth and builds a geometric contour of the profile of the measured tooth. The result of the module's operation is the formation of a general profile of the entire gear and its comparison with the original (theoretical) profile of the gear as a whole. The control process itself is carried out in a short time interval, which makes it possible to use the proposed approach to automating the control of gear profiles in small-scale production.*

*Keywords: coordinate measuring machine, control, gear wheel, tooth profile deviation, control automation.*

### **Введение**

В настоящее время все производственные процессы должны соответствовать строгим критериям и обеспечивать производство изделий требуемого качества и точности размеров. Эти требования особенно актуальны для производства деталей, имеющих сложную (криволинейную) форму, в том числе червячных и зубчатых колес. Эти детали имеют высокую себестоимость и трудоемкость изготовления, а требования к производственной технологичности их конструкции высоки [1].

Погрешности изготовления зубчатых колес приводят к повышению динамических нагрузок, вибрации, шуму в редукторах и преждевременному выходу механизмов из строя. ГОСТ 1643–81 насчитывает более 20 параметров точности цилиндрических зубчатых передач, разделенных на четыре нормы точности: кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев и бокового зазора. На стадии механической обработки основной проблемой, как правило, является получение профиля зуба, соответствующего заявленной степени точности [2].

В производстве деталей с криволинейными поверхностями широко применяются различные технологические процессы, в том числе процессы контроля геометрических размеров. В условиях серийного производства ручные операции контроля геометрических параметров криволинейных поверхностей не отвечают требованиям по стабильность и надежность измерений, а также их производительности. При этом не исключено появление случайных погрешностей измерений, обусловленных человеческим фактором. В связи с этим на современном уровне промышленного производства широко применяются технологические процессы контроля с использованием координатно-измерительных машин (КИМ). Данные средства контроля характеризуются высокой степенью универсальности и малыми значениями паспортных погрешностей. Они могут использоваться для решения широкого круга задач – от контроля деталей до аттестации технологической оснастки. Однако паспортные данные о погрешностях КИМ могут приписываться лишь небольшому количеству простейших измеряемых геометрических параметров, остальное же большинство не может быть однозначно характеризовано [3].

Современные КИМ, используемые для измерений координат точек поверхности изготовленных моделей (деталей), представляют собой высокоточные устройства, обеспечивающие шесть степеней свободы при перемещении и ориентации измерительного щупа в пространстве. Управляемые компьютером или вручную оператором, они комплектуются развитыми библиотеками программ для проведения измерений изделий различной формы и обработки результатов измерений. Прежде всего их составляют типовые геометрические объекты, такие как пло-

ские криволинейные контуры, составленные из отрезков прямых и конических сечений, а также пространственные – плоскости, призмы, тела вращения и др. Наряду с этим, проведение измерений и обработка их результатов применительно к изделиям со сложной формой поверхности обеспечиваются недостаточно, особенно при необходимости раздельного контроля специфических контролируемых параметров [4]. В связи с этим измерение основных параметров зубчатых колес и резьбовых деталей на КИМ является нетривиальной задачей [5; 6].

Лучшим на сегодняшний день решением является проверка зубчатых колес и зуборезного инструмента на универсальных зубоизмерительных центрах (ЗЦ). Такие центры имеют возможность прямого измерения не только погрешности профиля, направления, шага и радиального биения, но и топологии поверхности зуба, а также формы и расположения поверхностей самой детали. Зубоизмерительные центры позволяют измерять все геометрические параметры цилиндрического зубчатого венца по основным отечественным и международным стандартам, что является необходимым при наладке станков с ЧПУ на современном зубообрабатывающем производстве [7].

Однако применение зубоизмерительных центров окупается только в условиях крупносерийного и массового производства зубчатых колес на специализированных предприятиях. Для производства изделий, в состав которых входят червячные и конические зубчатые колеса в условиях мелкосерийного производства, предпочтительнее использование стандартных КИМ с применением специальных подходов к процессам измерения [8].

### **Направления автоматизации контроля геометрических характеристик зубчатых колес**

Эффективность и достоверность процессов координатных измерений в равной степени зависит как от технических и метрологических характеристик базовой аппаратной части КИМ, так и от функциональности специализированного метрологического программного обеспечения [9; 10].

Использование КИМ с различными типами измерительных головок и наконечников для контроля геометрических параметров зубчатых колес целесообразно ввиду достаточно высокой точности. Эта технология позволяет определить и построить эвольвенту и угол профиля архимедова червяка с погрешностью 2–3 мкм [11].

Контроль зубчатых колес с записью погрешности позволяют значительно повысить точность и объективность двухпрофильного контроля зубчатых колес, расширить информационную базу для оценки качества зубчатых колес и производить целенаправленный отбор зубчатых колес с требуемыми свойствами. Оснащение записывающего устройства измерительного межосевого расстояния (ИМР) дополнительными программами позволяет производить статистическую обработку результатов измерения зубчатых колес и находить корреляционные зависимости между параметрами ИМР и такими элементными погрешностями зубчатого колеса, как погрешность направления зуба, погрешность угла исходного контура, погрешность толщины зуба, погрешность профиля зуба [12].

Проблема объединения всех результатов измерения для построения общего профиля зубчатого колеса решается на базе универсального программного модуля, позволяющего проводить автоматизированный контроль требуемых параметров вне зависимости от типа КИМ и вида зубчатого колеса [13].

Основные рекомендации по разработке такого модуля приведены в статье, рассматривающей методические основы построения программ, математические зависимости, примерную схему движений измерительного элемента [14–16]. Однако они направлены на автоматизацию измерения эвольвентных прямозубых колес.

Автоматизация контроля геометрических характеристик червячных и конических зубчатых колес при помощи координатно-измерительных машин возможна с применением стандартного программного обеспечения. При измерении на КИМ с применением данного программного обеспечения происходит автоматическое измерение конуса вершин или конуса впадин зуба для регулировки (выравнивания). При вводе параметров шестерни (количество зубьев, угол давле-

ния на полюсе зубчатого зацепления, модуль зубчатого зацепления, углы конуса детали и т. д.) происходит создание образцовой боковой поверхности из параметров зубчатого колеса.

Следующим шагом процесса контроля является создание образцовых боковых поверхностей путём топографического измерения. При этом происходит оценка шага с толщиной зуба, боковой и профильной линии. Далее осуществляется контроль отклонения допусков на взаимное расположение поверхностей колеса (радиальное биение, отклонение от соосности). Как правило, для измерения используется один контактный датчик, а само измерение реализуется без поворотного стола. Результатом измерений является набор данных по общему отклонению профиля зуба.

Однако обработка результатов измерений в этом программном продукте не подразумевает визуализации геометрического контура профиля измеряемого зуба, а также построения общего профиля всего зубчатого колеса с его последующим сравнением с исходной моделью. Целью данной работы было создание дополнительного модуля к данной программе для решения задач, описанных выше.

### Дополнительный модуль к стандартной программе

Для автоматизации контроля геометрических характеристик червячных и конических зубчатых колес написан дополнительный модуль к стандартной программе. С его помощью все точки измеряемой криволинейной поверхности зубчатых колес, полученные контактным методом по типовой программе измерений, структурируются в единый массив данных. При этом в автоматическом режиме формируется протокол измерений. Погрешность линейных измерений при этом составляет 0,1 мкм. Определяется общая профилограмма отклонения профиля зуба (рис. 1) и формируется профилограмма суммарных и отдельных отклонений профиля зуба (рис. 2).

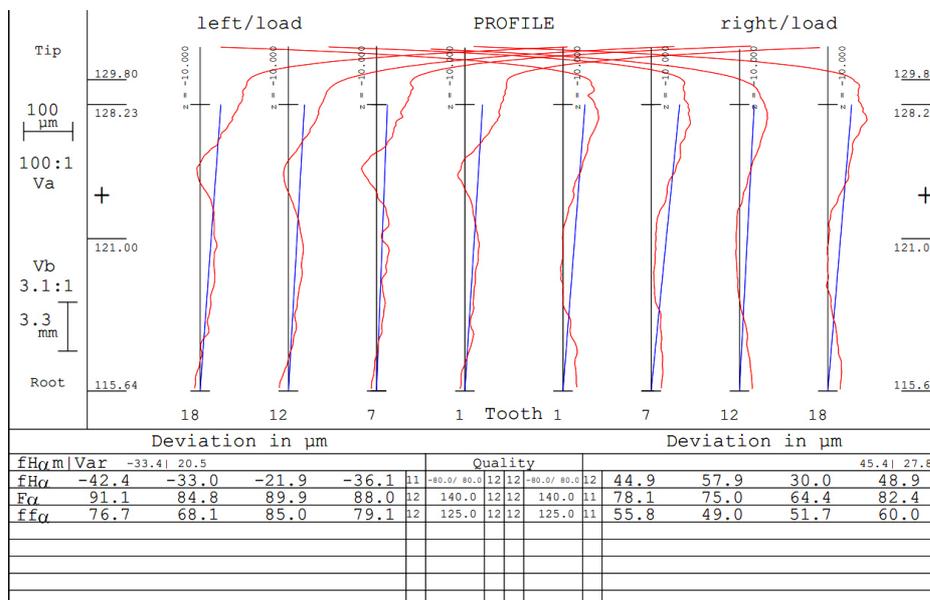


Рис. 1. Общая профилограмма отклонения профиля зуба

Fig. 1. General profilogram of tooth profile deviation

Данные протокола измерений являются исходными. На основе этих данных разработанный модуль формирует профиль измеренной поверхности зуба конического (червячного) колеса и выстраивает геометрический контур профиля измеряемого зуба (рис. 3). Для этого построения применяются функции работы с геометрическими переменными и преобразования их в различные типы данных. Это позволяет не только сформировать массив точек, описывающих пространственные поверхности, но производить с ним различного типа вычисления. Результаты

этих расчетов применяются как для построения общего (суммарного) профиля всего зубчатого колеса, так и сравнения его с исходным (теоретическим) профилем зубчатого колеса.

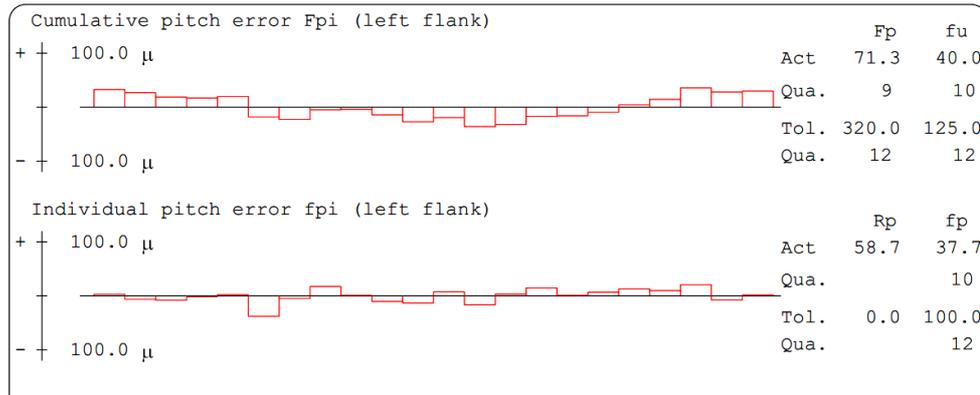


Рис. 2. Профилограмма суммарных и отдельных отклонений профиля зуба

Fig. 2. Profilogram of total and individual deviations of the tooth profile

Далее на основании полученных профилей всех зубьев колеса при помощи специального модуля формируется общий (суммарный) профиль всего зубчатого колеса. Полученный профиль сравнивается с исходным (теоретическим) профилем зубчатого колеса.

На основе протокола измерений и визуализации профиля измеренной поверхности производится заключение о соответствии (отклонении) контролируемых геометрических размеров червячных и конических зубчатых колес от заданных в технической документации, в том числе допусков на взаимное расположение поверхностей колеса.

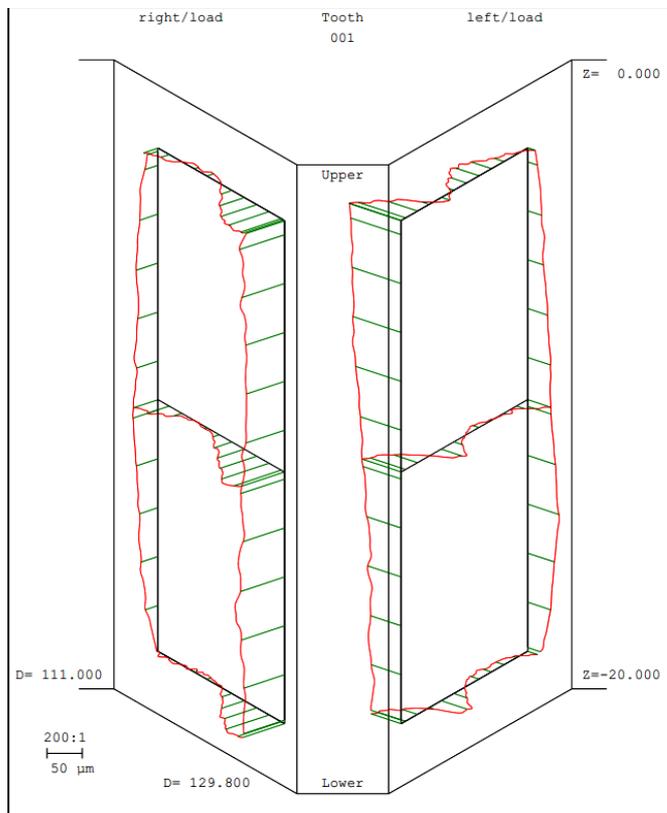


Рис. 3. Геометрический контур профиля измеряемого зуба конического колеса

Fig. 3. Geometric contour of the bevel gear tooth profile being measured

Сам процесс контроля геометрических характеристик червячных и конических зубчатых колес осуществляется в небольшом временном интервале, что позволяет использовать предложенный подход к автоматизации контроля профиля зубчатых колес в мелкосерийном производстве.

### **Заключение**

Предложенный подход к автоматизации контроля геометрических характеристик червячных и конических зубчатых колес с помощью созданного дополнительного модуля к стандартному программному обеспечению позволяет повысить производительность данного процесса и реализовывать его на типовых координатно-измерительных машинах. Формирование единого массива данных всех точек измеряемой криволинейной поверхности зуба червячного или конического колеса с последующим их объединением в общий профиль колеса позволяет оперативно проводить технологический процесс контроля за счет сравнения измеренного профиля с теоретическим.

Данный подход обеспечивает высокую точность (до 0,1 мкм) и быстроту процесса контроля зубчатых колес (сокращение времени на процесс измерения в два раза) в условиях мелкосерийного производства.

### **Библиографические ссылки**

1. Сысоев С. К., Сысоев А. С., Левко В. А. Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов. СПб. : Лань, 2016. 288 с.
2. Ковальчук С. Н. Контроль зубчатых колес на координатно-измерительной машине GLOBAL // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та. 2014. № 5(105). С. 124–126.
3. Болотов, М. А., Чевелева А. О., Жидяев А. Н. Оптимизация методик измерения геометрических параметров деталей ГТД при их контроле на КИМ // Вестник Самарского гос. аэрокосм. ун-та им. академика С. П. Королёва (нац. исследоват. ун-та). 2011. № 3-3(27). С. 100–105.
4. Методика оценки точности изготовления аэродинамических моделей по материалам измерений на координатно-измерительной машине / М. А. Архангельская, В. Д. Вермель, В. Ф. Забалуев и др. // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45, № 5. С. 78–90.
5. Kinematics of point-conjugate tooth surface couple and its application in mixed mismatched conical worm drive / Q. Meng, Y. Zhao, J. Cui et al. // Mechanism and Machine Theory. 2022. Vol. 167. P. 104528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104528>.
6. Тигнибидин А. В., Зайнуллина Л. В., Ромащенко В. А. Определение достоверных методик проведения измерений на координатно-измерительных машинах // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. № 1 (6). С. 171–191.
7. Плиско О. П., Попова В. А., Николаева Е. В. Измерение зубчатых колес и резьбовых деталей на координатно-измерительной машине // Стандартизация, метрология и управление качеством : мат. Всеросс. науч.-техн. конф., посвященной 90-летию Росстандарта и 170-летию метрол. службы России. Омск, 2015. С. 133-135.
8. Береснева А. В. Применение САI-системы PowerINSPECT и портативной CimCore Infinite 2.0 для измерения корпусов спироидных редукторов // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения : сб. докл. науч.-практ. конф. Ижевск, 2017. С. 27–32.
9. Park N. G., Lee H. W. The spherical involute bevel gear: its geometry, kinematic behavior and standardization // J Mech Sci Technol. 2011. Vol. 25. P. 1023–1034. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0145-1>.
10. Сурков И. В., Волков Д. А. Развитие координатной метрологии в России // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста : мат. Всеросс. науч.-техн. конф. Уфа, 2018. С. 322–327.
11. Никольский С. М. Контроль зубчатых колес с применением современных средств измерений // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2022. № 4. С. 395–399. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-4-395-399.

12. Антонюк В. Е., Русецкий В. Н. Возможности современных средств двухпрофильного контроля зубчатых колес // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. 2009. № 8. С. 101–105.

13. Ушаков М. В., Воробьев И. А., Никольский С. М. Анализ результатов расчета точек измерительной траектории при контроле зубчатых колес // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении : сб. докладов IV Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. уч. Тула, 2023. С. 46–49.

14. Ушаков М. В., Воробьев И. А., Никольский С. М. Рекомендации по разработке методики контроля зубчатых колес на КИМ // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25, № 9(291). С. 46–51. DOI: 10.14489/td.2022.09.pp.046-051.

15. Ушаков М. В., Воробьев И. А., Никольский С. М. Алгоритмизация процесса обработки измерительной информации при контроле зубчатых колес на координатно-измерительных машинах // Альманах современной метрологии. 2022. № 3(31). С. 154–159.

16. Applied iterative closest point algorithm to automated inspection of gear box tooth / S. Boukebbab, H. Bouchenitfa, H. Boughouas, J. M. Linares // Computers & Industrial Engineering. 2007. Vol. 52, Is. 1. P. 162–173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.12.001>.

## References

1. Sysoev S. K., Sysoev A. S., Levko V. A. *Tekhnologiya mashinostroyeniya. Proyektirovaniye tekhnologicheskikh protsessov* [Mechanical engineering technology. Process engineering]. St. Petersburg, Lan Publ., 2016, 288 p.

2. Kovalchuk S. N. [Control of gears on the GLOBAL coordinate measuring machine]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014, No. 5(105), P. 124–126. (In Russ.)

3. Bolotov M. A., Cheveleva A. O., A. N. Zhidyaev [Optimization of methods for measuring the geometric parameters of gas turbine engine parts when monitoring them on coordinate measuring machines]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Korolova (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*. 2011, No. 3-3(27), P. 100–105. (In Russ.)

4. Arkhangelskaya M. A., Vermel V. D., Zabaluev V. F. et al. [Methodology for assessing the accuracy of manufacturing aerodynamic models based on measurement materials on a coordinate measuring machine]. *Uchenyye zapiski TSAGI*. 2014, Vol. 45, No. 5, P. 78–90. (In Russ.)

5. Meng Q., Zhao Y., Cui J. et al. Kinematics of point-conjugate tooth surface couple and its application in mixed mismatched conical worm drive. *Mechanism and Machine Theory*. 2022, Vol. 167, P. 104528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104528>.

6. Tignibidin A. V., Zainullina L. V., Romashchenko V. A. [Determination of reliable methods for carrying out measurements on coordinate measuring machines]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*. 2018, No. 1 (6), P. 171–191. (In Russ.)

7. Plisko O. P., Popova V. A., Nikolaeva E. V. [Measurement of gears and threaded parts on a coordinate measuring machine]. *Standartizatsiya, metrologiya i upravleniye kachestvom : Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu Rosstandarta i 170-letiyu metrologicheskoy sluzhby Rossii*. [Standardization, metrology and quality management: Materials of the All-Russian scientific and technical conference dedicated to the 90th anniversary of Rosstandart and the 170th anniversary of the metrological service of Russia]. Omsk, 2015, P. 133–135. (In Russ.)

8. Beresneva A. V. [Application of the CAI-system PowerINSPECT and portable CimCore Infinite 2.0 for measuring housings of spiroid gearboxes]. *Teoriya i praktika zubchatykh peredach i reduktorstroyeniya : Sbornik докладов nauchno-prakticheskoy konferentsi* [Theory and practice of gears and gear engineering: Collection of reports of a scientific and practical conference]. Izhevsk, 2017, P. 27–32. (In Russ.)

9. Park N. G., Lee H. W. The spherical involute bevel gear: its geometry, kinematic behavior and standardization. *J Mech Sci Technol*. 2011, Vol. 25, P. 1023–103. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0145-1>.

10. Surkov I. V., Volkov D. A. [Development of coordinate metrology in Russia]. *Stankostroyeniye i innovatsionnoye mashinostroyeniye. Problemy i tochki rosta : Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Machine tool building and innovative mechanical engineering. Problems and growth points: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Ufa, 2018, P. 322–327. (In Russ.)

11. Nikolsky S. M. [Testing of gears using modern measuring instruments]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki*. 2022, No. 4, P. 395–399. DOI 10.24412/2071-6168-2022-4-395-399.

12. Antonyuk V. E. Rusetsky V. N. [Possibilities of modern means of dual-profile control of gears]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki*. 2009, No. 8, P. 101–105. (In Russ.)

13. Ushakov M. V., Vorobyov I. A., Nikolsky S. M. [Analysis of the results of calculating points of the measuring trajectory when monitoring gears]. *Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt obezpecheniya kachestva v mashinostroyenii : IV Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem: sbornik dokladov* [Domestic and foreign experience in quality assurance in mechanical engineering: IV All-Russian scientific and technical conference with international participation : collection of reports]. Tula, 2023, P. 46–49. (In Russ.)

14. Ushakov M. V., Vorobyov I. A., Nikolsky S. M. [Recommendations for the development of methods for monitoring gear wheels on CMMs]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2022, Vol. 25, No. 9(291), P. 46–51. DOI: 10.14489/td.2022.09.pp.046-051.

15. Ushakov M. V., Vorobyov I. A., Nikolsky S. M. [Algorithmization of the process of processing measurement information when monitoring gears on coordinate measuring machines]. *Al'manakh sovremennoy metrologii*. 2022, No. 3(31), P. 154–159. (In Russ.)

16. Boukebbab S., Bouchenitfa H., Boughouas H., Linares J. M. Applied iterative closest point algorithm to automated inspection of gear box tooth. *Computers & Industrial Engineering*. 2007, Vol. 52, Is. 1, P. 162–173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.12.001>.

© Карабонцева М. В., Брижинская Н. В., Левко В. А., 2024

---

**Карабонцева Мария Васильевна** – аспирант кафедры технологии машиностроения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: karaboncevamarina@mail.ru

**Брижинская Надежда Васильевна** – инженер; АО «Красмаш». E-mail: karabonceva@mail.ru.

**Левко Валерий Анатольевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: levko@sibsau.ru.

**Karabontseva Maria Vasilievna** – postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering Technology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: karaboncevamarina@mail.ru.

**Brizhinskaya Nadezhda Vasilievna** – engineer; JSC “Kras mash”. E-mail: karabonceva@mail.ru.

**Levko Valery Anatolyevich** – Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: levko@sibsau.ru.

---