

УДК 621.833.7

Влияние способа изготовления гибкого колеса на кинематическую погрешность волновой передачи

Ю.В. Костиков, Г.А. Тимофеев, Ф.И. Фурсяк

Волновые зубчатые передачи (ВЗП) находят все более широкое применение в машиностроении и приборостроении, обеспечивая получение высоких качественных показателей (кинематической точности, ошибки мертвого хода, КПД, крутильной жесткости и др.). Нарезание зубьев на круглых заготовках гибких зубчатых колес не позволяет полностью реализовать точностные возможности ВЗП, поэтому актуальна оценка увеличения точности ВЗП за счет изменения технологии изготовления зубьев гибких колес. В статье рассмотрено влияние способа изготовления гибкого колеса на кинематическую точность волновой передачи. Проведены экспериментальные исследования кинематической точности, проанализировано влияние способа изготовления гибкого колеса и погрешностей изготовления элементов волнового зацепления на кинематическую точность волновых передач. Показано, что кинематическая точность ВЗП, гибкие колеса которых нарезаны в деформированном состоянии, выше, чем у передач, гибкие колеса которых изготовлены в недеформированном состоянии.

Ключевые слова: волновая зубчатая передача, гибкое и жесткое колеса, кинематическая точность, ошибка мертвого хода, крутильная жесткость.

The influence of the method of manufacturing a flexible wheel on the kinematic error of the wave gear

Yu.V. Kostikov, G.A. Timofeev, F.I. Fursyak

Over several decades, wave gears have been intensively used in engineering and instrumentation, providing high quality characteristics, that is, kinematic accuracy, backlash error, efficiency, torsional stiffness, etc. The process of cutting teeth on round work parts of flexible gears cannot provide adequate accuracy. Therefore, it is important to estimate the possibility of increasing the accuracy of flexible gears by changing the manufacturing technology of flexible wheel teeth. This paper analyses the influence of the flexible wheel manufacturing technique on the kinematic accuracy of the wave gear. Experimental studies of the kinematic accuracy are performed. The effect of manufacturing technique of the flexible wheel and manufacturing errors of wave gear elements on the kinematic accuracy of the wave gear is investigated. It is shown that the kinematic accuracy of the wave gear with flexible wheels cut in the deformed state is higher than that for the wave gear with wheels manufactured in the undeformed state. The results of the study will be useful for manufacturing high-precision kinematic gears.

Keywords: wave gear, flexible and rigid wheels, kinematic accuracy, backlash error, torsional stiffness.



КОСТИКОВ
Юрий Васильевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

KOSTIKOV
Yuriy Vasil'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ТИМОФЕЕВ
Геннадий Алексеевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

TIMOFEEV
Gennadiy Alekseevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ФУРСЯК
Федор Иосифович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

FURSYAK
Fedor Iosifovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

Повышение требований к точности воспроизведения заданных законов движения автоматических систем регулирования предопределило применение в качестве исполнительных механизмов волновых зубчатых передач (ВЗП) с генераторами волн внутреннего и внешнего деформирования и поставило задачу постоянного повышения их точностных характеристик [1–7]. Одним из возможных путей повышения точности ВЗП является выбор технологического способа нарезания зубчатого венца гибкого колеса. Формирование зубчатого венца гибкого колеса может осуществляться различными методами (огибание, деление, копирование и др.), но при этом возможны два способа: 1) самый распространенный — гибкие колеса 1 (рис. 1) устанавливаются на цилиндрической круглой оправке 2, что не соответствует форме зубчатого венца при зацеплении с жестким колесом 3 (нарезание в недеформированном состоянии); 2) малоисследованный — гибкое колесо 1 (рис. 2) устанавливается на неподвижной некруглой оправке 2, которая своей формой имитирует форму внутренней поверхности гибкого колеса 1 в реальном волновом зацеплении, создаваемым дисковым или кулачковым генератором волн 2 (рис. 3), в зацеплении его с жестким колесом (формирование зубчатого венца в деформированном состоянии гибкого колеса).

Данная работа впервые выполнялась в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Теория механизмов и машин» в рамках исследования влияния метода нарезания зубчатого венца гибкого колеса в деформированном состоянии на кинематическую погрешность волновой передачи с дисковым генератором волн.

В технической литературе [1–11] сведений о таком нарезании зубчатых колес ВЗП авторы не нашли. Известно, что кинематическая погрешность ВЗП имеет следующие составляющие [10]:

- суммарная кинематическая погрешность F_{Σ} — наибольшая алгебраическая разность значений кинематической погрешности передачи за полный цикл изменения относительного положения зубчатых колес, включая прямое и обратное вращение;



Рис. 1. Колеса ВЗП:

1 — гибкие колеса; 2 — цилиндрическая круглая оправка; 3 — жесткие колеса

- циклическая погрешность f_{zi} — удвоенная амплитуда гармонической составляющей кинематической погрешности;
- местная кинематическая погрешность f_{ir} — наибольшая алгебраическая разность значений циклических погрешностей в пределах полного изменения относительного положения зубчатых колес без реверса вращения выходного звена;
- ошибка мертвого хода $\Delta\varphi$ — алгебраическая сумма люфтов в кинематических парах и упругих перемещений соответствующих элементов передачи, приведенные к ведомому валу. Определяется, как дополнительный угол поворота ведомого звена при неподвижном ведущем.

Следует отметить, что мертвый ход затрудняет обеспечение стабилизации следящей системы и вызывает появление ее автоколебаний, а кинематическая погрешность вносит нелинейные искажения в функцию выходного сигнала [3, 6, 9].

Для выявления экспериментальных зависимостей между кинематической погрешностью

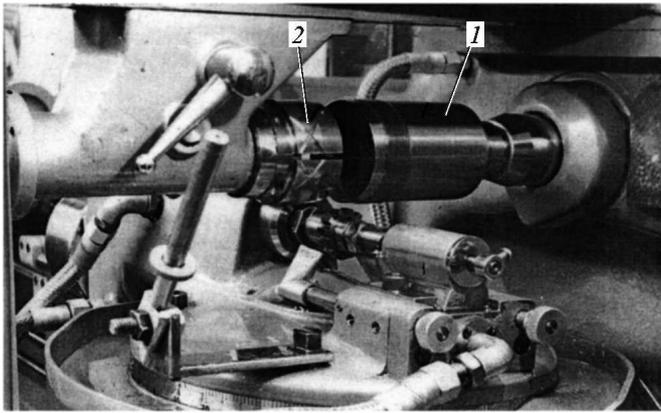


Рис. 2. Нарезание гибких колес в деформированном состоянии:

1 — заготовка гибкого колеса;
2 — некруглая оправка

волновой передачи и ошибками деталей было изготовлено:

- 6 гибких колес, зубчатый венец которых был нарезан в круглом (недеформированном) состоянии;
- 6 гибких колес, зубчатый венец которых был нарезан в деформированном состоянии;
- 7 жестких колес;
- 9 пар эксцентриков с различными значениями эксцентриситета;
- 9 пар деформирующих дисков с различными наружными диаметрами.

Действительные размеры всех указанных деталей были паспортизированы, примеры конструктивного исполнения основных узлов и деталей приведены на рис. 1 и 3.

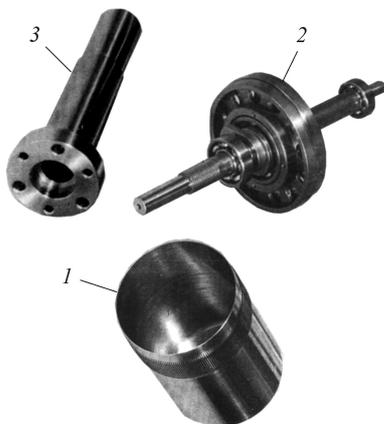


Рис. 3. Узел генератора волн:

1 — гибкое колесо; 2 — дисковый генератор волн;
3 — ведомый вал

Принципиальное отличие при нарезании зубчатого венца на гибких колесах в недеформируемом состоянии состоит в том, что вращение от шпинделя зубофрезерного станка к тонкостенной заготовке гибкого колеса передавалось через круглую оправку, на которую плотно насаживалась заготовка (см. рис. 1, поз. 2). При нарезании зубчатого венца гибких колес в деформированном состоянии использовалась некруглая оправка (см. рис. 2). Вращательное движение от шпинделя станка здесь передавалось непосредственно на тонкостенную заготовку, а некруглая оправка, выполненная по форме внутренней поверхности деформированного гибкого колеса, оставалась неподвижной. Предварительно она устанавливалась так, чтобы ее большая ось кривой деформации была перпендикулярна оси червячной фрезы. Между внутренней поверхностью, деформированной в радиальном направлении, тонкостенной заготовки и наружной поверхностью некруглой оправки создавался подшипник скольжения за счет уменьшения величины радиальной деформации от расчетного значения. Уменьшение радиальной деформации заготовки допускалось лишь в той волне деформации, где отсутствовала зона резания. Геометрические размеры части деформированного сечения гибкого колеса, находящегося в зоне резания, совпадали с инструментальной точностью и с размерами заготовки условного (расчетного) гибкого колеса, по которому рассчитывалась геометрия волнового зацепления [7, 8].

Нарезание гибких колес в деформируемом состоянии на неподвижной некруглой оправке позволяет получить более точный зубчатый венец, так как в этом случае исключается радиальное биение оправки, а формообразование зубьев происходит в условиях, полностью соответствующих форме деформированного зубчатого венца при зацеплении гибкого колеса с жестким в волновой передаче.

Метрический анализ гибких колес ВЗП показал, что по норме кинематической точности гибкие колеса, нарезанные в деформированном состоянии, получают 4–5 степени точности, а нарезанные в недеформированном состоянии — 6–7 степени точности. Характер

кривых накопленной погрешности окружного шага у гибких колес существенно зависит от способа их изготовления. Для гибких колес, нарезанных в деформированном состоянии, на кривой накопленной погрешности окружного шага зубчатого венца не наблюдается ярко выраженного эксцентриситета, так как оправка в этом случае не вращалась (см. рис. 2).

Исследование кинематической погрешности ВЗП с различными комбинациями сборки элементов волнового зацепления (гибкого и жесткого колес, дисков генератора волн) проводилось индуктивно-амплитудным методом [10].

Выводы

1. Кривые кинематической погрешности двухволновых передач с дисковым генератором волн имеют вид периодических колебаний с переменной амплитудой и являются результатом осредненного сложения амплитуд кинематических погрешностей зубчатых колес и деформирующих дисков при непрерывном изменении их фаз за период одного оборота ведомого вала. Низкочастотные составляющие кривых обусловлены радиальным биением ведомого вала, высокочастотные — кинематическими погрешностями жесткого и гибкого колес ВЗП.

2. Циклические ошибки жестких и гибких колес на кривых кинематической погрешности передач не проявляются.

3. Кинематическая точность двухволновых отсчетных передач с гибкими колесами, изготовленными в деформированном состоянии, в 1,5 раза выше по сравнению с передачами, гибкие колеса которых изготовлены в недеформированном состоянии при одной и той же степени точности изготовления других деталей.

Литература

- [1] Ghorbel F.H., Gandhi P.S., Alpeter F. On the kinematic error in harmonic drive gears. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2001, vol. 123, no. 1, pp. 90–97.
- [2] Янгулов В.С. Кинематическая погрешность волновой передачи с промежуточными телами качения. *Известия Томского политехнического университета*, 2009, т. 314, № 2, с. 49–54.
- [3] Борзилов Б.М. Волновые зубчатые передачи: достижения и перспективы. *Редукторы и приводы*, 2006, № 1, с. 26–28.
- [4] Янгулов В.С. Перспективы развития передач с промежуточными телами для повышения точности и долговечности механических передач. *Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф., посвященной 40-летию запуска на орбиту*

навигационного КА «Космос-192» и 25-летию запуска КА «Глонасс». Железногорск, 10–14 октября 2007, Красноярск, СибГАУ, 2007, с. 274–277.

[5] Поляков А.В. *Повышение точности вращения круговых приводов подач станков с волновыми редукторами*. Автореф. дис. канд. ... техн. наук. Москва, 2004. 22 с.

[6] Slatter R., Degen R. Miniature zero-backlash gears and actuators for precision positioning applications. *Proceedings of the 11 European Space Mechanisms and Tribology Symposium (ESMATS 2005)*, Lucerne, 21–23 September 2005. Noordwijk, ESTEC, 2005, pp. 9–15.

[7] Тимофеев Г.А., Тарабарин В.Б., Яминский А.В. Конструкции и САПР ВЗП с генераторами волн внутреннего и внешнего деформирования. Дип. в ВИНТИ. Москва, 1988, БУ №1, № 6202-И87. 71 с.

[8] Тимофеев Г.А. *Разработка методов расчета и проектирования волновых зубчатых передач для приводов следящих систем*. Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. Москва, 1997. 32 с.

[9] Тимофеев Г.А., Костиков Ю.В., Фурсяк Ф.И. Исследование малоинерционного привода с волновыми зубчатыми передачами. *Приводы и компоненты машин*, 2011, № 2–3, с. 19–22.

[10] Скворцова Н.А., Тарабарин В.Б., Тимофеев Г.А. Новое в проектировании волновых приводов для следящих систем. *Использование ВЗП в промышленности: Тр. республиканского семинара НТО Машипром*. Минск, 1978, с. 31–40.

[11] Люминарский С.Е. Влияние погрешности обката гибкого колеса на кинематическую погрешность ВЗП-80. *Электронный журнал «Наука и образование»*, 2012, № 1. URL: <http://technomag.bmstu.ru/file/out/505084> (дата обращения 15 января 2012).

References

- [1] Ghorbel F.H., Gandhi P.S., Alpeter F. On the kinematic error in harmonic drive gears. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2001, vol. 123, no. 1, pp. 90–97.
- [2] Iangulov V.S. Kinematicheskaja pogreshnost' volnovoi peredachi s promezhutochnymi telami kacheniiia [Kinematic error of wave gear with intermediate rolling bodies]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 2009, vol. 314, no. 2, pp. 49–54.
- [3] Borzilov B.M. Volnovye zubchatye peredachi: dostizheniia i perspektivy [Wave gears: achievements and prospects]. *Reduktory i privody* [Gearboxes and drives]. 2006, no. 1, pp. 26–28.
- [4] Iangulov V.S. *Perspektivy razvitiia peredach s promezhutochnymi telami dlia povysheniia tochnosti i dolgovechnosti mekhanicheskikh peredach* [Prospects for the development of gears with intermediate bodies to improve the accuracy and durability of mechanical transmissions]. *Navigatsionnye sputnikovye sistemy, ikh rol' i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka: Tezisy dokladov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi 40-letiiu zapuska na orbitu navigatsionnogo KA «Kosmos-192» i 25-letiiu zapuska KA «Glonass»* [Navigation satellite systems, their role and importance in the life of modern man: Abstracts of All-Russian scientific conference dedicated to the 40th anniversary of the launch into orbit navigation of «Cosmos-192» and the 25th anniversary of the launch of «Glonass»]. Zheleznogorsk, 10–14 October 2007, Krasnoiar'sk, SibGAU publ., 2007, pp. 274–277.
- [5] Poliakov A.V. *Povyshenie tochnosti vrashcheniia krugovykh privodov podach stankov s volnovymi reduktorami*. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Increasing the accuracy of the rotation innings circular drive with wave machine gearboxes. Cand. of tech. sci. diss.]. Moscow, 2004. 22 p.
- [6] Slatter R., Degen R. Miniature zero-backlash gears and actuators for precision positioning applications. *Proceedings of the 11 European Space Mechanisms and Tribology Symposium (ESMATS 2005)*, Lucerne, 21–23 September 2005. Noordwijk, ESTEC, pp. 9–15.

[7] Timofeev G.A., Tarabarin V.B., Iaminskii A.V. Konstruktsii i SAPR VZP s generatorami voln vnutrennego i vneshnego deformirovaniia [Design and CAD CDW wave generators with internal and external deformation]. *Deponirovanie nauchnykh rabot: VINITI* [Depositing of scientific works: VINITI]. 1988, BU no. 1, no. 6202. 187. 71 p.

[8] Timofeev G.A. *Razrabotka metodov rascheta i proektirovaniia volnovykh zubchatykh peredach dlia privodov slediashchikh system*. Avtoreferat diss. dokt. tekh. nauk [Development of methods of calculation and design of wave gear drives for servo systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, IMASH RAN publ., 1997. 32 p.

[9] Timofeev G.A., Kostikov Iu.V., Fursiak F.I. Issledovanie maloinertsionnogo privoda s volnovymi zubchatymi peredachami [Analysis of low-inertia drive with harmonic gear]. *Privody i komponenty mashin* [Drive vehicles and components]. 2011, no. 2–3, pp. 19–22.

[10] Skvortsova N.A., Tarabarin V.B., Timofeev G.A. *Novoe v proektirovanii volnovykh privodov dlia slediashchikh sistem* [In designing a new wave of drives for servo systems]. *Ispol'zovanie VZP v promyshlennosti: Trudy respublikanskogo seminara NTO Mashprom* [Using the CDW in the industry: Proceedings of the national seminar NTO Mashprom]. Minsk, 1978, pp. 31–40.

[11] Liuminarskii S.E. Vliianie pogreshnosti obkata gibkogo koleasa na kinematicheskuiu pogreshnost' VZP-80 [Influence of an error in running-in of flexible gear on the kinematic error VZP-80]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie* [Science and education: electronic scientific and technical periodical]. 2012, no. 1. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/file/out/505084> (accessed 15 January 2012).

Статья поступила в редакцию 29.11.2013

Информация об авторах

КОСТИКОВ Юрий Васильевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ТИМОФЕЕВ Геннадий Алексеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: timga@bmstu.ru).

ФУРСЯК Федор Иосифович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Information about the authors

KOSTIKOV Yuriy Vasil'evich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Theory of Mechanisms and Machines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

TIMOFEEV Gennadiy Alekseevich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Theory of Mechanisms and Machines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: timga@bmstu.ru).

FURSYAK Fedor Iosifovich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Theory of Mechanisms and Machines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие «Объемная штамповка на автоматах», авторов Ю.А. Лавриненко, С.А. Евсюкова, В.Ю. Лавриненко.

На основе обобщения отечественного и мирового опыта приведен обзор прогрессивных технологических процессов холодной объемной штамповки на автоматах. Представлены основные этапы технологического процесса: выплавка стали и изготовление проволоки, входной контроль металла (проволоки), термическая обработка и подготовка поверхности проволоки, объемная штамповка деталей на автоматах, термическое упрочнение, нанесение покрытий на детали и др. Приведены примеры технологических переходов получения штамповкой конкретных деталей и чертежи рабочих частей штампов, а также даны рекомендации по их расчету.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru