

БЕССЕПАРАТОРНЫЙ ПОДШИПНИК КАЧЕНИЯ С ЗУБЧАТЫМ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

Богданов Д.А., Черемискина М.С., Пашков Е.Н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

Ключевые слова: подшипник качения, зубчатое зацепление, планетарная передача, вибрационные характеристики, аддитивное производство, 3D-печать.

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования бессепараторного подшипника качения с зубчатым зацеплением, в котором синхронизация движения роликов обеспечивается за счёт интеграции планетарной зубчатой передачи. Рассматриваемая конструкция направлена на устранение характерных недостатков традиционных подшипников качения, связанных с проскальзыванием элементов качения и износом сепаратора, что особенно актуально для высокоточных и малозумных механических систем. Целью работы является оценка работоспособности и сравнительный анализ вибрационных характеристик разработанного подшипника по отношению к традиционному роликовому подшипнику аналогичных габаритных размеров. Экспериментальные образцы изготовлены методом аддитивных технологий (FDM-печать) из полимера PETG, что позволило оперативно реализовать прототипы сложной конструкции. Испытания проведены на стенде входного контроля подшипников качения в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52545.1-2006 при заданных радиальных и осевых нагрузках и фиксированной частоте вращения. В ходе исследований выполнено измерение уровней виброскорости в низко-, средне- и высокочастотных диапазонах, а также анализ спектров вибрации. Полученные результаты показали, что подшипник с зубчатым зацеплением характеризуется снижением вибрационных показателей в средне- и высокочастотных полосах по сравнению с традиционной конструкцией, что указывает на изменение характера вибрационного возбуждения вследствие принудительной кинематической синхронизации роликов. Сделан вывод о перспективности дальнейшего развития и оптимизации данной конструкции для применения в мехатронике, робототехнике и прецизионном машиностроении.

NON-CAGE ROLLING BEARING WITH GEAR ENGAGEMENT

Bogdanov D.A., Cheremiskina M.S., Pashkov E.N.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

Keywords: rolling bearing, gear engagement, planetary transmission, vibration characteristics, additive manufacturing, 3D printing.

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of a cageless rolling bearing with geared engagement, in which the synchronization of roller motion is achieved through an integrated planetary gear mechanism. The proposed design is intended to eliminate the typical drawbacks of conventional rolling bearings associated with rolling element slippage and cage wear, which are especially critical for high-precision and low-noise mechanical systems. The aim of the study is to evaluate the operability and to perform a comparative analysis of the vibration characteristics of the developed bearing in comparison with a conventional roller bearing of identical overall dimensions. Experimental bearing samples were manufactured using additive manufacturing technologies (FDM printing) from PETG polymer, enabling rapid prototyping of a complex mechanical structure. The tests were carried out on a bearing inspection test rig in accordance with GOST R 52545.1-2006 under specified radial and axial loads and a fixed rotational speed. During the experiments, vibration velocity levels were measured in low-, medium-, and high-frequency ranges, and vibration spectra were analyzed. The results demonstrate that the bearing with geared engagement exhibits reduced vibration levels in the medium- and high-frequency bands compared to the conventional design. This behavior indicates a change in the nature of vibration excitation due to the forced kinematic synchronization of the rolling elements. The obtained findings confirm the prospects of further development and optimization of cageless geared rolling bearings for applications in mechatronics, robotics, and precision mechanical engineering.

Введение

Подшипники с зубчатым зацеплением относятся к перспективным типам опор качения, в которых стандартные элементы качения сочетаются с зубчатыми механизмами для обеспечения принудительной синхронизации движения и минимизации скольжения. Подобный подход способствует росту несущей способности при сохранении компактных размеров и отказу от сепаратора как источника уязвимости [1, 2].

Актуальность разработки таких подшипников связана с растущими требованиями к подшипниковым системам в современных областях, включая мехатронику и робототехнику, где ограничения традиционных конструкций, такие как скольжение элементов и преждевременный износ сепаратора, снижают общую эффективность и долговечность узлов. Исследования показывают, что интеграция зубчатых механизмов позволяет оптимизировать кинематику, уменьшить вибрации и повысить КПД до уровня 96-98% в условиях низких нагрузок, что особенно востребовано в высокоточных механизмах [3]. Кроме того, эволюция концепции от ранних патентных идей к современным моделям демонстрирует потенциал для снижения массы и количества компонентов, открывая возможности для использования в аэрокосмической отрасли, промышленном оборудовании и точной механике [4].

Новизна настоящей работы состоит в проведении первых экспериментальных испытаний физического прототипа бессепараторного подшипника с зубчатым зацеплением на специализированном оборудовании.

Цель исследования: оценить работоспособность и вибрационные параметры разработанного подшипника в сравнении с традиционным эквивалентом, подтвердив преимущества конструкции для дальнейшего применения в промышленных системах.

Описание конструкции

Разработанный образец бессепараторного подшипника с зубчатым зацеплением, предназначенный для испытаний (рис. 1), представляет собой конструкцию, основанную на принципах планетарной зубчатой передачи, интегрированной с опорой качения. В отличие от традиционных подшипников качения, в которых ролики разделены сепаратором и подвержены проскальзыванию, в предлагаемой модели синхронизация движения роликов обеспечивается зубчатым зацеплением, что исключает необходимость в сепараторе и повышает кинематическую точность. Габаритные размеры конструкции соответствуют стандартному подшипнику NUP 312: внутренний диаметр $d = 60$ мм, наружный диаметр $D = 130$ мм, ширина $B = 31$ мм.

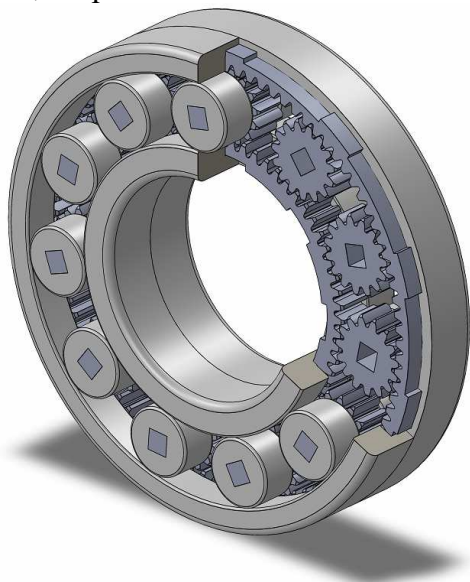


Рис. 1. Бессепараторный подшипник с зубчатым зацеплением в разрезе

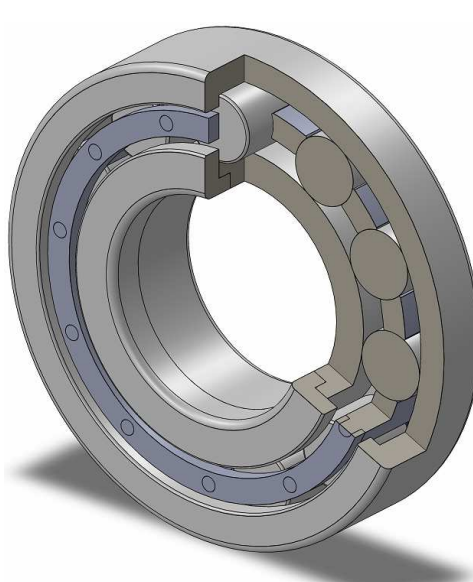


Рис. 2. Традиционный подшипник в разрезе

Внутреннее и наружное кольца состоят из двух половин, между которыми расположены соответственно солнечная и коронная шестерни планетарной передачи. Диаметры поверхностей качения внутреннего и наружного колец составляют 77,5 мм и 115 мм соответственно. Зубчатые шестерни установлены с применением шлицевого соединения для передачи крутящего момента. Половины колец соединены между собой с использованием клеевого соединения. Ролики (11 шт.) состоят из двух частей, между которыми расположены сателлиты планетарной передачи. Сборка роликов выполнена с использованием валов

квадратного сечения с натягом. Конструкция реализует однорядное планетарное зацепление, аналогичное описанному в работе [5], где продемонстрировано преимущество однорядной схемы по критериям прочности (коэффициент запаса $\geq 2,07$) и технологичности по сравнению с двухрядной. Модуль зацепления принят равным 1,25 мм.

Для сравнения изготовлен образец традиционного роликового подшипника (рис. 2), геометрически аналогичного NUP 312 и оснащенного сепаратором. Отличие от стандартного подшипника NUP 312 заключается в отсутствии отдельного фланцевого внутреннего кольца и в разборной конструкции сепаратора. Для обеспечения надёжности и безопасности проведения испытаний фланцевое внутреннее кольцо приклеено к основному внутреннему кольцу, а детали сепаратора склеены между собой. Диаметры поверхностей качения, длина линии контакта и число роликов в традиционном образце полностью соответствуют значениям бессепараторного подшипника с зубчатым зацеплением, что обеспечивает объективность сравнения вибрационных характеристик.

Технология изготовления и возникшие проблемы

Образцы подшипников изготовлены методом послойного наплавления (FDM) из полимера PETG на 3D-принтере. Выбор материала обусловлен простотой и высокой скоростью изготовления прототипов, а не целевым применением в полимерных подшипниках. Для печати использовались следующие ключевые параметры: температура сопла составляла 250°C, температура стола – 80°C, скорость печати внешних периметров – 50 мм/с, скорость заполнения – 150 мм/с, высота слоя – 0,12 мм, плотность заполнения – 100 %.

Одной из ключевых проблем при печати зубчатых шестерен явилось ограниченное число периметров (всего 3, шириной 0,4 мм каждый), обусловленное малым модулем зацепления (необходимым для размещения зацепления в пределах габаритных размеров подшипника) и диаметром сопла печатающей головки. Это может привести к снижению прочности зубчатых элементов (рис. 3).

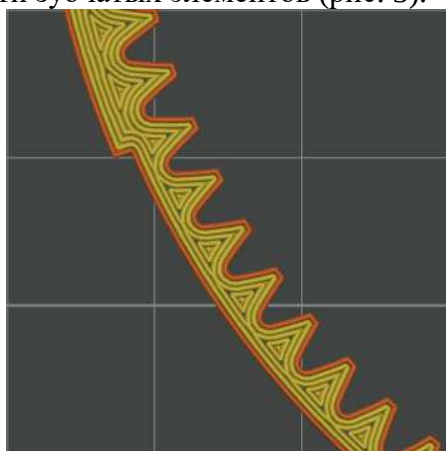


Рис. 3. Предпросмотр нарезки печати зубчатого колеса в слайсере



Рис. 4. Бессепараторный подшипник с зубчатым зацеплением в процессе сборки

Другой значимой проблемой стала сложность точного позиционирования роликов и последующей сборки подшипника с зубчатым зацеплением. Для упрощения позиционирования был изготовлен вспомогательный кондуктор с разделяющими выступами между роликами. Процесс сборки (рис. 4) включал следующие этапы:

- 1) установка половин колец и роликов на кондуктор;
- 2) монтаж солнечной и коронной шестерен на половины колец;
- 3) установка сателлитов планетарной передачи;
- 4) монтаж вторых половин роликов с фиксацией валов квадратного сечения с натягом;
- 5) установка вторых половин колец с использованием клеевого соединения.

Данный способ сборки применим для изготовления прототипов из пластика, однако неприемлем для промышленного производства металлических изделий. Альтернативные методы сборки бессепараторных подшипников рассмотрены в работе [6].

Методика испытаний

Испытания проводились на стенде входного контроля подшипников качения Диамех СП-180М. Измерения выполнялись в соответствии с ГОСТ Р 52545.1-2006 «Подшипники качения. Методы измерения вибрации. Часть 1. Основные положения».

Внутреннее кольцо испытуемых образцов подшипников (рис. 5) устанавливалось на оправку, которая фиксировалась на шпинделе стенда с обеспечением соосности и отсутствия перекосов. При помощи пневмоцилиндров радиального и осевого нагружения к наружному кольцу подшипников применялись радиальная нагрузка 49 Н и осевая нагрузка 9,8 Н, после чего выполнялся разгон внутреннего кольца до частоты вращения 900 об/мин. Вибрация регистрировалась в трёх частотных полосах виброскорости: VL (низкочастотная), VM (среднечастотная), VH (высокочастотная) с использованием виброизмерительного прибора ЯШМА и вибропреобразователя 608А11.



Рис. 5. Образцы испытуемых подшипников

Условия испытаний соответствовали требованиям указанного стандарта, что обеспечивало воспроизводимость результатов и объективность сравнения вибрационных параметров беспараторного подшипника с зубчатым зацеплением и традиционного подшипника.

Результаты

Получены уровни виброскорости в трех частотных полосах: VL (низкочастотная), VM (среднечастотная), VH (высокочастотная). Результаты представлены на столбчатой диаграмме (рис. 6), где по оси абсцисс указаны частотные полосы, а по оси ординат – уровни виброскорости в децибелах.

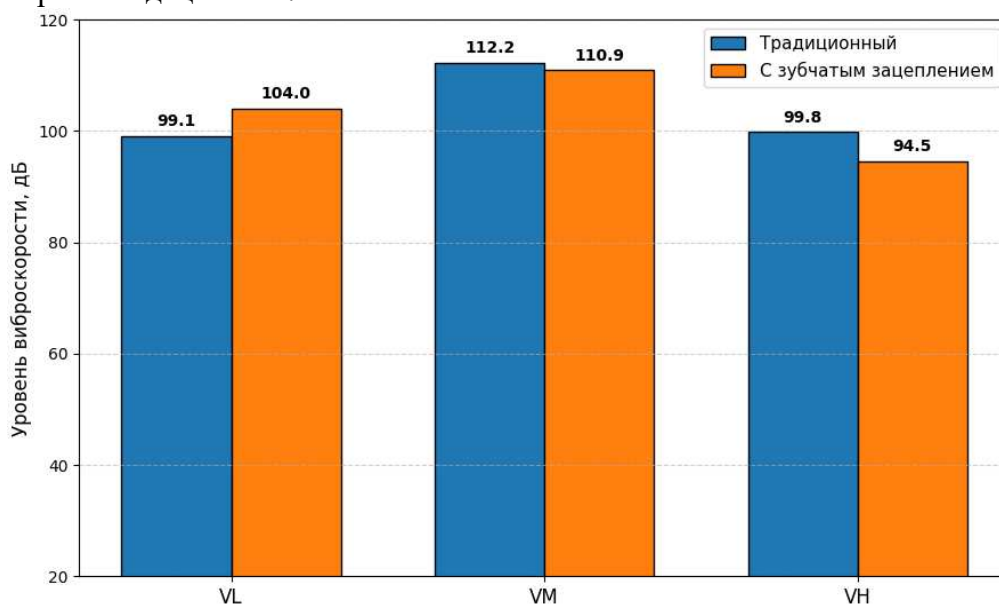


Рис. 6. Сравнение уровней виброскорости подшипников

Сравнение уровней виброскорости в полосах частот показывает, что в низкочастотной полосе VL подшипник с зубчатым зацеплением имеет значение на 4,9 дБ выше по сравнению с традиционным. В среднечастотной полосе VM наблюдается снижение на 1,3 дБ, а в высокочастотной полосе VH снижение составляет 5,3 дБ.

Анализ спектров виброскорости в диапазоне 0-10000 Гц (рис. 7) подтверждает общую тенденцию: традиционный подшипник демонстрирует более низкие пики амплитуды в низкочастотной области и отдельные всплески в высокочастотном диапазоне. Подшипник с зубчатым зацеплением характеризуется более гладким спадом амплитуды в среднем диапазоне частот и существенно меньшими значениями в высокочастотной области, что свидетельствует о различиях в характере вибрационного возбуждения, обусловленных особенностями кинематики конструкции.

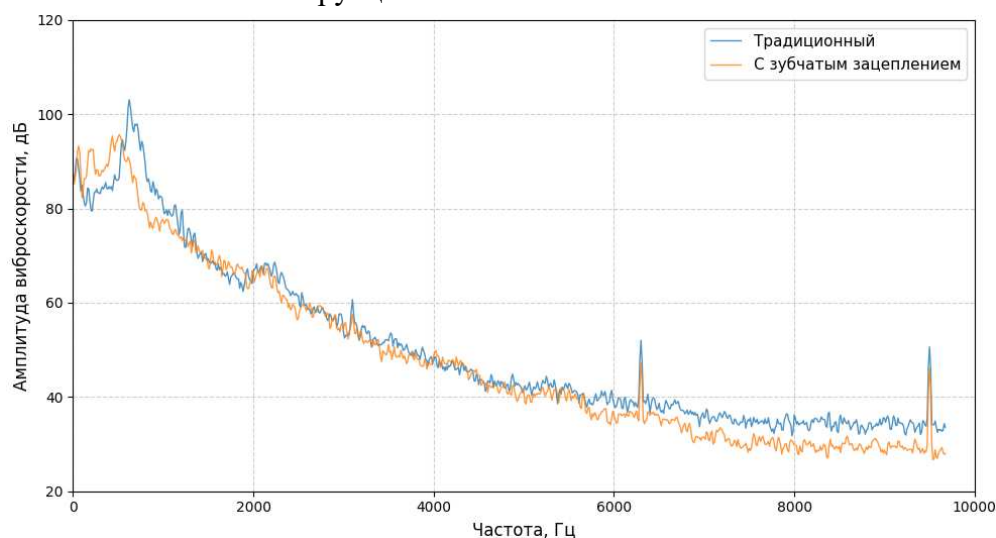


Рис. 7. Сравнение спектров вибрации подшипников

Полученные результаты обеспечивают количественное сравнение вибрационных характеристик двух конструкций в идентичных условиях испытаний и позволяют оценить влияние зубчатого зацепления на распределение вибрационной энергии. Снижение уровней виброскорости в средне- и высокочастотных полосах, а также более равномерный характер спектра у подшипника с зубчатым зацеплением указывают на различия в кинематическом возбуждении вибраций, связанные с особенностями конструкции.

Заключение

Проведенные исследования демонстрируют работоспособность бессепараторного подшипника с зубчатым зацеплением, изготовленного методом аддитивных технологий из полимера PETG. Сравнительный анализ вибрационных характеристик с традиционным аналогом подтверждает преимущества синхронизации роликов за счет зубчатой передачи. Полученные данные обосновывают потенциал конструкции для снижения шумности и износа в кинематических узлах мехатронных и робототехнических систем. Для всесторонней оценки эксплуатационных свойств необходимы дальнейшие исследования, включая испытания при различных нагрузках, скоростях вращения и материалах изготовления, а также оптимизацию профиля зубьев с целью повышения КПД и долговечности.

Список литературы

1. Патент №2135851 РФ. Подшипник качения радиальный роликовый бессепараторный / Н.В. Филонов, В.Л. Юрьева, Г.А. Матвеев. – Заявка №97117677 от 16.10.1997; опубл. 27.08.1999.
2. Patent No. 6626792 US. Gear Bearings / J.M. Vranish – Appl. No. US13/214,182 from 24.08.2011; publ. 21.08.2014.
3. Sheyko S. Gear Bearings and Fine Mechanical Applications of them // Advanced Engineering Forum. 2017, vol. 23, pp. 104113.
4. The Future of Gear Bearing Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gearsolutions.com/features/the-future-of-gear-bearing-technology>.

5. Дубровский Д.Д., Пашков Е.Н., Панин С.В. Расчет роликового бессепараторного подшипника качения с однорядным зубчатым зацеплением // Вестник машиностроения. – 2025. – Т. 104, № 4. – С. 291-295. – DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-4-291-295.
6. Патент №2427734 РФ. Бессепараторный подшипник качения (варианты) и способ его сборки (варианты) / Е.Н. Захаров, Ю.В. Богачев, А.С. Харчев – Заявка №2007157338 от 23.11.2007; опубл. 10.06.2009, Бюл. №16.
7. Юрьева В.Л., Матвеев Г.А., Филонов Н.В. Кинематический синтез зубчатого механизма, заменяющего радиальный роликовый подшипник качения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №1(2). – С. 573-577.
8. Moldovan C., Sticlaru C. Performance Analysis of Polymer Additive Manufactured Gear Bearings // Applied Sciences. 2023, vol. 13, no. 22, p. 12383. doi.org/10.3390/app132212383.
9. Патент №135377 РФ. Шариковый радиально-упорный подшипник качения (варианты) / Д.П. Снигирев, Ю.А. Крюков, К.В. Щедривый, А.А. Соткин – Заявка №2013109481 от 04.03.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. №34.
10. Brassitos E., Mavroidis C. Kinematics Analysis and Design Considerations of the Gear Bearing Drive // Kumar V., Schmiedeler J., Sreenivasan S., Su HJ. (eds) Advances in Mechanisms, Robotics and Design Education and Research. Mechanisms and Machine Science. 2013, vol. 14. Springer, Heidelberg. doi.org/10.1007/978-3-319-00398-6_12.

References

1. Patent No. 2135851 RU. Cageless Radial Roller Rolling Bearing / N.V. Filonov, V.L. Yuryeva, G.A. Matveev. – Appl. No. 97117677 from 16.10.1997; publ. 27.08.1999.
2. Patent No. 6626792 US. Gear Bearings / J.M. Vranish – Appl. No. US13/214,182 from 24.08.2011; publ. 21.08.2014.
3. Sheyko S. Gear Bearings and Fine Mechanical Applications of them // Advanced Engineering Forum. 2017, vol. 23, pp. 104113.
4. The Future of Gear Bearing Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gearsolutions.com/features/the-future-of-gear-bearing-technology>.
5. Dubrovsky D.D., Pashkov E.N., Panin S.V. Calculation of a Cageless Roller Rolling Bearing with Single-Row Gear Meshing // Bulletin of mechanical engineering. 2025, vol. 104, no. 4, pp. 291-295. DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-4-291-295.
6. Patent No. 2427734 RU. Cageless Rolling Bearing (Variants) and Method of Its Assembly (Variants) / E.N. Zakharov, Yu.V. Bogachev, A.S. Kharchev. – Appl. No. 2007157338 from 23.11.2007; publ. 10.06.2009, Bul. No. 16.
7. Yuryeva V.L., Matveev G.A., Filonov N.V. Kinematic Synthesis of a Gear Mechanism Replacing a Radial Roller Rolling Bearing // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2014, vol. 16, no. 1(2), pp. 573-577.
8. Moldovan C., Sticlaru C. Performance Analysis of Polymer Additive Manufactured Gear Bearings // Applied Sciences. 2023, vol. 13, no. 22, p. 12383. doi.org/10.3390/app132212383.
9. Patent No. 135377 RU. Angular Contact Ball Rolling Bearing (Variants) / D.P. Snigirev, Yu.A. Kryukov, K.V. Shchedrivyy, A.A. Sotkin. – Appl. No. 2013109481 from 04.03.2013; publ. 10.12.2013, Bul. No. 34.
10. Brassitos E., Mavroidis C. Kinematics Analysis and Design Considerations of the Gear Bearing Drive // Kumar V., Schmiedeler J., Sreenivasan S., Su HJ. (eds) Advances in Mechanisms, Robotics and Design Education and Research. Mechanisms and Machine Science. 2013, vol. 14. Springer, Heidelberg. doi.org/10.1007/978-3-319-00398-6_12.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Богданов Дмитрий Андреевич – аспирант	Bogdanov Dmitry Andreevich – postgraduate student
Черемискина Мария Сергеевна – старший преподаватель Отделения машиностроения	Cheremiskina Maria Sergeevna – senior lecturer of the Department of mechanical engineering
Пашков Евгений Николаевич – кандидат технических наук, доцент Отделения машиностроения	Pashkov Evgeny Nikolaevich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of mechanical engineering
cms1@tpu.ru	

Получена 11.02.2026