

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЛЬНОЙ И ОСЕВОЙ ЖЕСТКОСТИ ГИБРИДНОГО ШАРИКОВОГО ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ

Барманов И.С.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара*

Ключевые слова: шариковый подшипник качения, керамические шарики, радиальная нагрузка, осевая нагрузка, коэффициент радиальной жесткости, коэффициент осевой жесткости.

Аннотация. Тяжёлые условия работы опор роторов авиационных двигателей приводят к снижению ресурса и изменению вибрационных характеристик. Для повышения надёжности опорных узлов в настоящее время находят применение гибридные подшипники качения. Применение материалов с другими механическими характеристиками оказывает влияние на характеристики подшипника, поэтому актуальным является исследование изменения коэффициентов жесткости гибридного подшипника. В данной работе приведены результаты расчёта радиальных и осевых относительных перемещений колец и коэффициента радиальной и осевой жёсткости гибридного шарикового радиально-упорного подшипника. Отмечено, что коэффициенты жесткости носят нелинейный характер в зависимости от нагрузок. Характер зависимостей идентичен подшипникам со стальными шариками. При средних и высоких осевых нагрузках характеристики жесткости хорошо согласуются с результатами теоретических и экспериментальных исследований других авторов. При определенных условиях работы (соотношение осевой и радиальной нагрузки, температурное состояние, высокие центробежные силы) гибридные подшипники могут иметь существенное отличие характеристик жесткости от подшипников со стальными шариками.

NUMERICAL RESEARCHES OF RADIAL AND AXIAL STIFFNESS CHARACTERISTICS OF HYBRID BALL BEARING

Barmanov I.S.

Samara National Research University, Samara

Keywords: ball bearing, ceramic balls, radial load, axial load, radial stiffness coefficient, axial stiffness coefficient.

Abstract. Severe operating conditions of the rotor supports of aircraft engines lead to a decrease in the service life and a change in vibration characteristics. Hybrid rolling bearings are currently being used to increase the reliability of the support units. The use of materials with other mechanical characteristics has an impact on the bearing characteristics, so it is relevant to study changes in the stiffness coefficients of a hybrid bearing. This paper presents the results of calculating the radial and axial relative displacements of the rings and the coefficient of radial and axial stiffness of a hybrid ball bearing. It is noted that the stiffness coefficients are nonlinear depending on the loads. The nature of the dependencies is identical to bearings with steel balls. At medium and high axial loads, the stiffness characteristics are in good agreement with the results of theoretical and experimental studies by other authors. Under certain operating conditions (axial and radial load ratio, temperature condition, high centrifugal forces), hybrid bearings can have a significant difference in stiffness characteristics from bearings with steel balls.

Введение

Характеристики опор роторов современных газотурбинных двигателей существенно влияют на работоспособность и долговечность работы. Одними из важнейших характеристик являются характеристики жесткости опор, которые в свою очередь определяются характеристиками структурных элементов (упругие элементы, демпферы, подшипники, уплотнения, корпус). Решение задачи динамики ротора на упругодемпферных опорах требует точного определения характеристик структурных элементов, в особенности подшипников [1], поскольку они имеют нелинейные характеристики жесткости [2]. К тому же им свойственно рассеивание характеристик жесткости вследствие разброса размеров в пределах установленных допусков [3]. Также делаются попытки улучшить вибрационное состояние двигателя с помощью более сложных опор, например, для демпфирования колебаний ротора находят применение магнитоупругие подшипники [4].

Подшипники опор роторов работают при высоких нагрузках, частотах вращения и температурах, что вынуждает постоянно искать новые конструктивные решения и проводить

исследования для создания двигателей с высокими эксплуатационными показателями. Для обеспечения ресурса и вибрационных характеристик двигателя, в настоящее время стали активно применять гибридные подшипники качения – с керамическими телами качения [5]. Согласно [6] жесткость подшипника авиационного двигателя существенно зависит от конструктивных и технологических особенностей и оказывает значительное влияние на долговечность работы подшипника в зависимости от величины контактной деформации и деформаций внутреннего и наружного колец подшипника. Это связано с перераспределением нагрузки между телами качения. В работе [7] отмечено изменение распределения нагрузки между телами качения вследствие переменной жесткости корпуса. Следовательно, подобные конструктивные и технологические особенности опоры роторов необходимо учитывать при определении характеристик жесткости подшипника.

Исследование характеристик жесткости различных типов подшипников проводилось рядом автором. В работах [8, 9] исследовано влияние размера и серии подшипников на жесткость. Однако точность определения характеристик жесткости вызывает сомнения, поскольку математические модели не учитывают ряд влияющих факторов. В работе [10] установлено значительное влияние частоты вращения, нагрузки, температуры на жесткость. В работе [11] рассмотрен метод определения коэффициента радиальной жесткости с учетом геометрии тел и дорожек качения, коэффициент жесткости определяется как коэффициент пропорциональности между нагрузкой и радиальным смещением. В работе [12] получены выражения для расчета коэффициента жесткости, полученные путем решения системы уравнений: совместности деформаций и перемещений с учетом зазоров и уравнения равновесия. Показано влияние радиального зазора на коэффициент жесткости – с увеличением зазора коэффициент жесткости снижается нелинейно, что связано с уменьшением количества тел качения одновременно находящихся в контакте. В работе [13] предлагается методика расчета характеристик жесткости, полученная на основе энергетической модели подшипника. Это позволяет упростить расчеты. Данный подход оправдан в случае невозможности получения достоверных результатов при недостаточной сходимости при использовании итерационных методик расчета. В связи с этим актуальным является исследование характеристик жесткости гибридных подшипников, поскольку механические свойства керамики отличаются от стали и могут оказать значительное влияние на изменение характеристик подшипника.

Материалы и методы исследования

Широкие диапазоны изменения рабочих параметров, а также влияние их на конструктивные параметры подшипников, не позволяют применить рассмотренные методики для исследования характеристик жесткости подшипников. Поэтому целесообразно использовать методику расчета, изложенную в монографии [14] для исследования характеристик гибридного подшипника. Методика расчёта учитывает перекосы наружного и внутреннего колец, посадки колец подшипника, свойства материала, центробежные силы, геометрию подшипника и дорожек качения, температуру и другие влияющие факторы. При расчётах не учитывается разноразмерность шариков, а также неточности формы колец.

Решение задачи определения нагрузок в контактах шариков с желобами колец возможно только численными методами с учётом условий совместности перемещений и деформаций. Расчёт ведётся методом простой итерацией. Исследование характеристик радиальной и осевой жёсткости гибридного шарикового радиально-упорного подшипника проводилось при частотах вращения вала $n = 3000$ об/мин, осевых нагрузках $F_a = 0 \dots 4000$ Н, радиальных нагрузках $F_r = 0 \dots 4000$ Н.

Коэффициенты жёсткости рассчитываются как производные перемещений от нагрузки, которые в окрестности точки заменяются приращениями:

$$C_r = \frac{\partial F_r}{\partial S_r} = \frac{\Delta F}{\Delta S_r}; \quad C_a = \frac{\partial F_a}{\partial S_a} = \frac{\Delta F_a}{\Delta S_a}.$$

Результаты

На рисунке 1 приведены графики зависимости радиальных перемещений в подшипнике от радиальной и осевой нагрузок. Как видно из графиков, зависимости имеют нелинейный

характер. Радиальные перемещения практически линейно зависят от радиальной нагрузки при соотношении $F_a / F_r = 0,7 \dots 1,2$. Дальнейшее увеличение радиальной нагрузки приводит к резкому увеличению радиальных перемещений. С увеличением осевой нагрузки радиальные перемещения снижаются, что обусловлено центрированием колец.

На рисунке 2 приведены графики зависимости коэффициента радиальной жесткости от радиальной и осевой нагрузок. Коэффициент радиальной жесткости с ростом радиальной нагрузки сначала уменьшается, график сначала более пологий, затем снижение происходит более интенсивно. Минимальное значение коэффициента жесткости соответствует соотношению осевых и радиальных нагрузок $F_a / F_r = 0,4 \dots 0,5$. Далее по мере увеличения радиальной нагрузки коэффициент жесткости возрастает. Осевая нагрузка может двояко влиять на коэффициент радиальной жесткости: увеличение осевой нагрузки может, как увеличивать, так и уменьшать коэффициент жесткости.

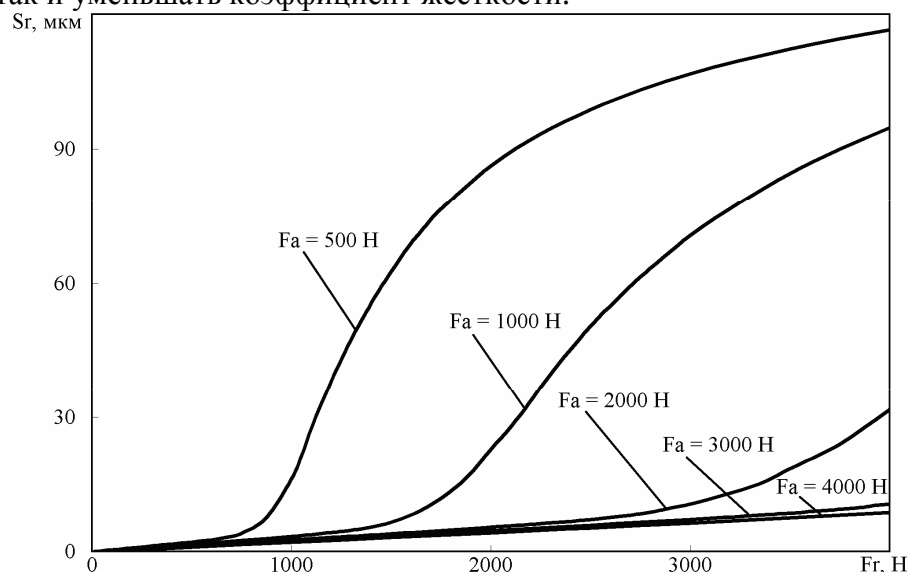


Рис. 1. Зависимости радиальных перемещений от радиальной нагрузки при различных значениях осевой нагрузки

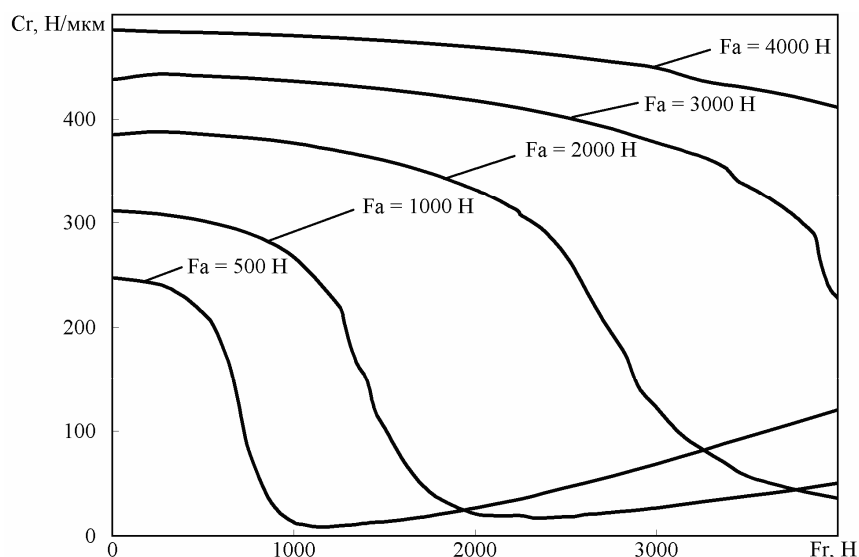


Рис. 2. Зависимости коэффициента радиальной жёсткости от радиальной нагрузки при различных значениях осевой нагрузки

На рисунке 3 представлены графики зависимости осевых перемещений в подшипнике от осевой и радиальной нагрузок. По мере увеличения осевой нагрузки осевые перемещения возрастают, причем сначала происходит резкое возрастание, далее более пологое. Зависимости на двух характерных участках практически линейные с перегибом при соотношении сил $F_a / F_r = 0,4 \dots 0,5$. Более пологий участок после перегиба кривых

объясняется более равномерным распределением действующей нагрузки между всеми телами качения подшипника.

Как видно из рисунка 4, коэффициенты осевой жёсткости увеличиваются с ростом осевой нагрузки. При малых значениях осевой нагрузки, коэффициенты осевой жёсткости растут линейно и незначительно. При соотношении сил $F_a / F_r = 0,4...0,5$ коэффициенты осевой жёсткости начинают резко увеличиваться и при соотношении сил $F_a / F_r = 0,9...1,0$ зависимости принимают более пологий вид, близкий к линейному.

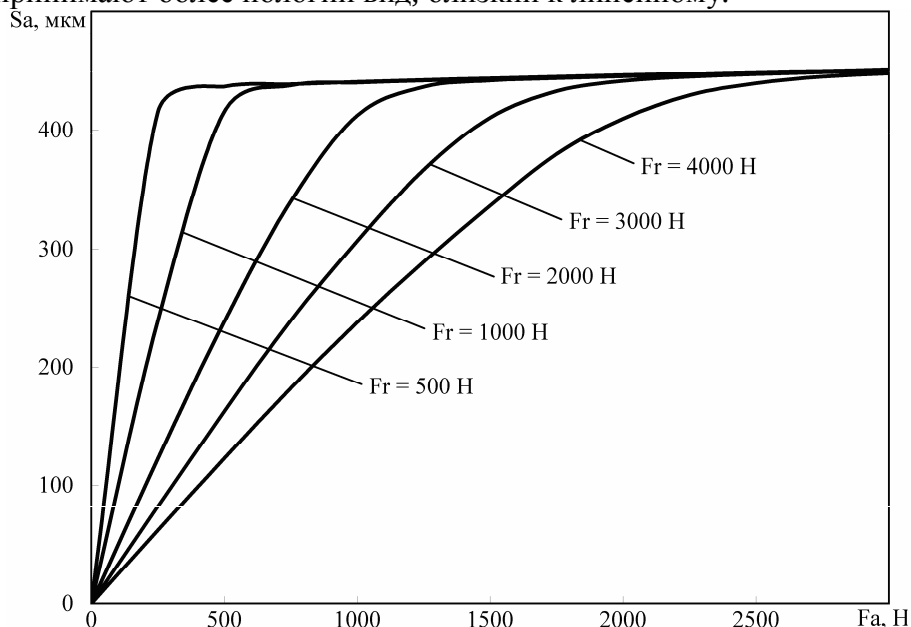


Рис. 3. Зависимости осевых перемещений от осевой нагрузки при различных значениях радиальной нагрузки

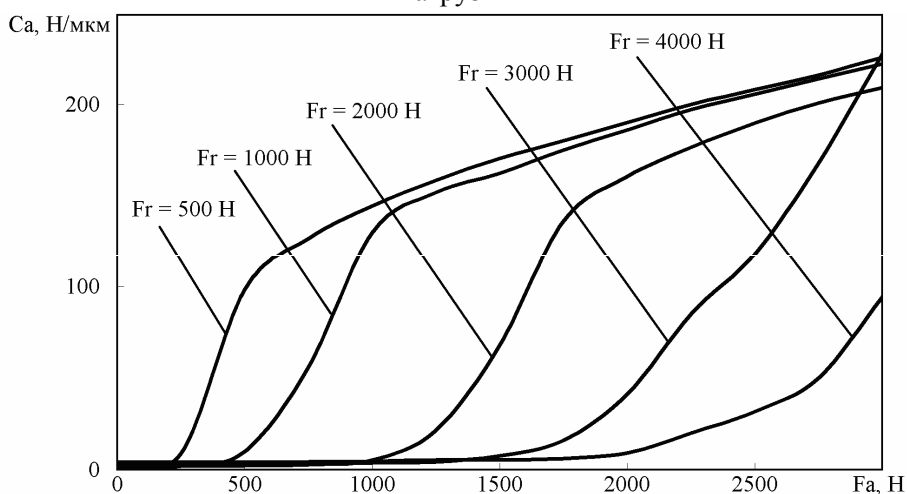


Рис. 4. Зависимости коэффициента осевой жёсткости от осевой нагрузки при различных значениях радиальной нагрузки

Выводы

Сравнивая полученные результаты с данными согласно [15, 16] можно сделать вывод, что зависимости перемещений и коэффициентов жесткости гибридных подшипников и подшипников со стальными шариками качественно совпадают. Стоит отметить, что существенное различие в характеристиках жесткости наблюдается при определенных соотношениях осевых и радиальных нагрузок.

В работе [17] предлагается упрощенная методика расчета характеристик жесткости шарикового радиально-упорного подшипника шпиндельных узлов. Проведено сравнение результатов с результатами других авторов: характеристики жесткости подшипников, как с керамическими, так и со стальными шариками качественно совпадают, но есть отличия,

связанные с принятыми допущениями и отличиями в условиях работы. Результаты, полученные в данной работе, качественно совпадают с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов в области средних и высоких значений осевых нагрузок. Данные по характеристикам жесткости при низких значениях осевых нагрузок отсутствуют, что вероятно связано с особенностями работы шпиндельных узлов.

Заключение

Таким образом, можно заключить, что характеристики жесткости гибридных подшипников качественно совпадают с характеристиками подшипников со стальными шариками. Количественно значения коэффициентов радиальной и осевой жесткости может существенно отличаться, как в большую, так и в меньшую сторону в зависимости от соотношения действующих осевых и радиальных нагрузок. Коэффициент радиальной жесткости с ростом нагрузки может изменяться в достаточно широких пределах, при этом сначала уменьшаясь, а затем увеличиваясь. Коэффициент осевой жесткости с ростом нагрузки увеличивается.

Более существенное отличие характеристик жесткости подшипников с разными материалами шариков следует ожидать при высоких частотах вращения валов и большой разности температур деталей подшипника. В первом случае будет существенно изменяться распределение нагрузки между шариками вследствие влияния центробежных сил (керамика имеет меньшую плотность, чем сталь). Во втором случае возможно также существенное перераспределение нагрузки вследствие тепловых деформаций деталей из-за разных величин коэффициентов линейного расширения, что может привести к изменению зазоров (натягов) в подшипнике.

Список литературы

1. Дегтярев С.А., Кутаков М.Н., Леонтьев М.К., Попов В.В., Ромашин Ю.С. Учет контактных взаимодействий при моделировании жесткостных свойств роликовых подшипников // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – Т. 22, № 2. – С. 137-141.
2. Леонтьев М.К., Снеткова Е.И., Дегтярев С.А. Динамика неуравновешенного ротора на роликовом подшипнике // Вестник Московского авиационного института. – 2013. – Т. 20, № 1. – С. 95-105.
3. Ершов Д.Ю., Лукьяненко И.Н. Статистические исследования коэффициентов жесткости и углов контакта приборных радиально-упорных шарикоподшипников // Journal of advanced research in technical science. – 2019. – № 17. – С. 114-119. – DOI: 10.26160/2474-5901-2019-17-114-119.
4. Кожухов Е.А., Петровский Э.А., Башмур К.А., Коленчуков О.А. Применение магнитоупругих подшипников для демпфирования колебаний роторов турбодетандеров // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 137-144.
5. Кривошеев И.А., Чечулин А.Ю., Новиков М.В., Ялалов Р.Ф. Обоснование выбора типа подшипников для опор роторов современных малоразмерных ГТД // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева. – 2018. – № 1 (44). – С. 31-38.
6. Беломытцев О.М., Шобей М.М. О влиянии жесткости подшипникового узла на долговечность подшипников качения в авиационных опорах ГТД // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2017. – Т. 1. – С. 41-43.
7. Щенятский А.В., Имангулова А.А. Интеллектуальные тяжело нагруженные подшипниковые опоры // Материала VIII международной конференции «Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования». – Ижевск: ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2019. – Т. 2. – С. 143-150.
8. Раменский В.В., Филиппов К.Ю., Бокова В.И. Расчет радиальной жесткости подшипников качения // Сборник материалов VII международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики «Актуальные проблемы авиации и космонавтики». – Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2021. – Т.1. – С. 54-56.
9. Макеев В.В., Сыроежко С.Ю., Жилина К.Е. Математическое моделирование жесткости радиально-упорных подшипников в LABVIEW // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2013. – Т.1, № 9. – С. 21-22.
10. Зверев И.А. Расчетно-экспериментальное исследование жесткости высокоскоростных шпинделей // Вестник машиностроения. – 2020. – № 9. – С. 33-39.
11. Чернышенко А.В., Павлова А.А. К вопросу определения жесткости подшипников качения в буксах крановых колес // Восточно-Европейский журнал передовых исследований. – 2009. – Т. 1, № 5(37). – С. 47-50.
12. Нахатакян Ф.Г. Жесткость роликовых подшипников с учетом радиального зазора // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 93-97.

13. Сорокин Ф.Д., Хао Чжан, Иванников В.В. Разработка энергетической модели роликового подшипника // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 3(696). – С. 14-23.
14. Балякин В.Б., Жильников Е.П., Самсонов В.Н., Макачук В.В. Теория и проектирование опор роторов авиационных ГТД. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 254 с.
15. Ахмеров Р.Р., Горшкова Е.Е. Определение коэффициента радиальной жесткости шарикового подшипника с керамическими телами качения // Материалы I международной научно-практической конференции «Механика и машиностроение. Наука и практика». – СПб.: НИЦ МС, 2018. – № 1. – С. 84-86.
16. Барманов И.С. Исследование осевых динамических характеристик подшипника №126126 с керамическими шариками // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2014. – № 2. – С. 194-195.
17. Фролов А.В., Смирнов С.В. Моделирование квазистатической переменной жесткости шарикоподшипников шпиндельных узлов металлорежущих станков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2018. – № 6. – С. 44-59. – DOI: 10.18698/0236-3941-2018-6-44-59.

References

1. Degtyarev S.A., Kutakov M.N., Leont'ev M.K., Popov V.V., Romashin YU.S. Consideration of contact interactions in modeling the stiffness properties of roller bearings // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2015, vol. 22, no. 2, pp. 137-141.
2. Leont'ev M.K., Snetkova E.I., Degtyarev S.A. Dynamics of an unbalanced rotor on a roller bearing // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2013, vol. 20, no. 1, pp. 95-105.
3. Ershov D.YU., Luk'yanenko I.N. Statistical studies of stiffness coefficients and contact angles of instrument angular contact ball bearings // Journal of advanced research in technical science. 2019, iss. 17, pp. 114-119. DOI: 10.26160/2474-5901-2019-17-114-119.
4. Kozhuhov E.A., Petrovskij E.A., Bashmur K.A., Kolenchukov O.A. Application of magnetoelastic bearings for vibration damping of Turbopetander rotors // Oil and Gas Business. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 137-144.
5. Krivosheev I.A., CHEchulin A.YU., Novikov M.V., YAlalov R.F. Justification of the choice of the type of bearings for the rotor supports of modern small-sized GTE // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solov'yov. 2018, no. 1 (44), pp. 31-38.
6. Belomytcev O.M., SHobej M.M. On the effect of bearing unit stiffness on the durability of rolling bearings in aircraft supports of the GTD // Aerospace Engineering, high technologies and Innovations. 2017, vol. 1, pp. 41-43.
7. SHCHenyatskij A.V., Imangulova A.A. Intelligent heavy-loaded bearing supports // Materials of the VIII International Conference "Technical Universities: integration with European and world education systems". – Izhevsk: IzhSTU, 2019. – Vol. 2. – P. 143-150.
8. Ramenskij V.V., Filippov K.YU., Bokova V.I. Calculation of radial stiffness of rolling bearings // Collection of materials of the VII International Scientific and practical conference dedicated to the Cosmonautics Day "Actual problems of aviation and cosmonautics". – Krasnoyarsk: SibSU, 2021. – Vol. 1. – P. 54-56.
9. Makeev V.V., Syroezhko S.YU., ZHilina K.E. Mathematical modeling of the stiffness of angular contact bearings in LABVIEW // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2013, vol. 1, no. 9, pp. 21-22.
10. Zverev I.A. Computational and experimental study of stiffness of high-speed spindles // Bulletin of Mechanical Engineering. 2020, no. 9, pp. 33-39.
11. CHernyshenko A.V., Pavlova A.A. On the issue of determining the rigidity of rolling bearings in the axle boxes of crane wheels // Eastern European Journal of Advanced Research. 2009, vol. 1, no. 5(37), pp. 47-50.
12. Nahatkyan F.G. Rigidity of roller bearings taking into account radial clearance // Bulletin of M.T. Kalashnikov IzhSTU. 2017, vol. 20, no. 2, pp. 93-97.
13. Sorokin F.D., Hao CHzhan, Ivannikov V.V. Development of an energy model of a roller bearing // Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2018, no. 3(696), pp. 14-23.
14. Balyakin V.B., ZHil'nikov E.P., Samsonov V.N., Makarchuk V.V. Theory and design of rotor supports for aviation gas turbine engines. – Samara: SSAU, 2007. – 254 p.
15. Ahmerov R.R., Gorshkova E.E. Determination of the radial stiffness coefficient of a ball bearing with ceramic rolling elements // Materials of the I international scientific and practical conference "Mechanics and Mechanical Engineering. Science and Practice". – SPb.: SRC MS, 2018. – No. 1. – P. 84-86.
16. Barmanov I.S. Investigation of axial dynamic characteristics of bearing No.126126 with ceramic balls // Computer-aided design in mechanical engineering. 2014, no. 2, pp. 194-195.
17. Frolov A.V., Smirnov S.V. Modeling of quasi-static variable stiffness of ball bearings of spindle assemblies of metal-cutting machines // Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering. 2018, no. 6, pp. 44-59. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-6-44-59.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Барманов Ильядар Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин	Barmanov Ildar Sergeevich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of machine design principles
isbarmanov@mail.ru	

Получена 20.06.2022