

Научная статья
УДК 621.924.56
doi: 10.30987/2223-4608-2024-30-40

Влияние микрогеометрических параметров сферической поверхности ролика на звуковое давление и вибрацию подшипника

Владимир Андреевич Носенко¹, д.т.н.

Александр Владимирович Зуев², главный конструктор

Владимир Евгеньевич Орлянский³, начальник КО

¹ ВПИ (филиал) ВолгГТУ, Волгоградская обл., Волжский, Россия

² ОАО «ЕПК Волжский», Волгоградская обл., Волжский, Россия

³ НТЦ ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия

¹ vladim.nosenko2014@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5074-1099>

² a.zuev@epkgroup.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3743-1138>

³ vladimir.orlyanskiy@kamaz.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3570-1455>

Аннотация. В производственных условиях ОАО «ЕПК Волжский» показана возможность повышения вибрационного разряда подшипников с коническими роликами в результате использования роликов из общего производственного потока с заданными микрогеометрическими параметрами сферической поверхности. Сфера формируется на операции совмещенного черного, чистового и окончательного шлифования сборным абразивным инструментом из трех кругов различных характеристик. Установлено, что в подшипнике при последовательной замене роликов, шероховатость сферы которых изменяется в интервале $0,10 < Ra \leq 0,20$ мкм на ролики с шероховатостью $Ra \leq 0,10$ мкм среднее значение микрогеометрических параметров сферы роликов в подшипниках (Ra , волнистость W , отклонение от круглости Δ) снижаются в 2,4 – 4,3 раза. Проведена оценка влияния комплекта роликов подшипника с различными параметрами микрогеометрии сферического торца ролика на звуковое давление и вибрацию подшипника. Установлено, что с увеличением количества роликов с микрогеометрическими параметрами сферы ближе к нижней границе поля допуска значения общего уровня вибрации, уровня вибрации в третьей полосе частот и уровень звукового давления подшипника улучшаются. Выполнен статистический анализ данных параметров. Определены значимость анализируемых факторов и условия повышения вибрационного разряда подшипника при обеспечении режимов обработки в рамках действующего технологического процесса. Установлены корреляционная и функциональные связи между средними значениями микрогеометрических параметров сфер роликов в подшипниках и параметрами звукового давления и вибрации.

Ключевые слова: подшипник, конический ролик, шлифование сферы, микрогеометрия, вибрации, звуковое давление

Для цитирования: Носенко В.А., Зуев А.В., Орлянский В.Е. Влияние микрогеометрических параметров сферической поверхности ролика на звуковое давление и вибрацию подшипника // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 1 (151). С. 30–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-30-40

Microgeometric parameters effect of the spherical roller surface on bearing sound pressure and vibration

Vladimir A. Nosenko¹, D. Eng.

Alexander V. Zuev², Chief Designer

Vladimir E. Orlyansky³, CD manager

¹ VPC (branch) VolgSTU, Volgograd region, Volzhsky, Russia

² JSC UPC Volzhsky, Volgograd region, Volzhsky, Russia

³ STC of KAMAZ PJSC, Naberezhnie Chelni, Russia

¹ vladim.nosenko2014@yandex.ru

² a.zuev@epkgroup.ru

³ vladimir.orlyanskiy@kamaz.ru

Abstract. In a production environment of JSC UPC Volzhsky it is shown how to increase the vibration discharge of bearings with conical rollers due to the use of rollers with the specified microgeometric parameters of the spherical surface made in the general production flow. The sphere is formed under the combination of rough grinding, finish grinding and final grinding using an assembled abrasive tool consisting of three rolls of various characteristics. It was found that in a bearing, with sequential replacement of rollers, where sphere roughness varies in the range of $0.10 Ra \leq 0.20$ microns for rollers with roughness $Ra \leq 0.10$ microns, the average value of the microgeometric parameters of the roller sphere in bearings (Ra , undulation W , deviation of circularity Δ) decreases by 2,4 – 4,3 times. The impact assessment of bearing rollers set having different parameters of the microgeometry of the spherical roller end on the sound pressure and vibration of the bearing was carried out. It was found that with an increase in the number of rollers with microgeometric parameters of the sphere closer to the lower edge of the tolerance field, the values of the overall vibration level, the vibration level in the third frequency band and the sound pressure level of the bearing improved. A statistical analysis of these parameters was carried out. The significance of the analyzed factors and conditions for increasing the vibration discharge of the bearing while ensuring processing modes within the framework of the current technological process are determined. Correlation and functional relationships between the average values of the microgeometric parameters of rollers spheres in bearings and the parameters of sound pressure and vibration were found.

Keywords: bearing, conical roller, spherical grinding, microgeometry, vibrations, sound pressure.

For citation: Nosenko V.A., Zuev A.V., Orlyansky V.E. Microgeometric parameters effect of the spherical roller surface on bearing sound pressure and vibration / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 1 (151). P. 30–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-30-40

Введение

С развитием отечественного автомобилестроения появляется необходимость к снижению шума и вибрации узлов транспортных средств, в том числе подшипников, входящих в их состав. Подшипники используются во множестве автомобильных узлов (ступицы, коробки передач, ведущие мосты) и качество их изготовления во многом определяет гарантийные сроки эксплуатации машины. Повышение комфорта водителя и пассажиров, наряду с обеспечением требований законодательства по защите от вредного воздействия вибрации и шума, являются актуальной задачей. Вибрационные параметры подшипников, в отличие от статических, например, температуры, являются носителями динамических характеристик технического состояния [1]. Инструментальный метод контроля вибрации и шума в

процессе производства используется для комплексной оценки соответствия параметров подшипников требованиям конструкторской документации [2], а в процессе эксплуатации является вспомогательным диагностическим признаком при планировании технического обслуживания машин и механизмов [3 – 5], позволяющим выявить дефект до того, как произойдет отказ изделия [6].

Существенное влияние на образование вибраций подшипников оказывают микрогеометрические параметры деталей, входящих в его состав. В работе [7] описаны методы определения неисправностей роликовых подшипников на основе анализа параметров вибрации и звукового давления с последующим определением причин их возникновения, в том числе, на роликах или кольцах. Влияние геометрических размеров ролика на вибрации подшипника рассмотрено в работах [8, 9],

микрogeометрических параметров, такие как волнистость дорожек качения колец – в работах [10, 11]. Существенное влияние на вибрации подшипника оказывают шероховатость, волнистость и форма профиля поверхности упорного борта внутреннего кольца подшипника, контактирующего со сферой ролика, волнистость дорожки качения внутреннего кольца подшипника [12, 13]. Уровень вибраций зависит от соотношения количества волн на поверхности дорожки качения кольца с числом роликов в подшипнике [12]. Установлено, что с увеличением шероховатости сферы ролика уровень шума и вибрации подшипника возрастают [14]. Для определения источников повышенной вибрации конического подшипника в дополнении к измерению общего уровня вибраций рассмотрены вибрации в трех диапазонах частот, что позволяет определить более узкий диапазон частот, в котором происходят наиболее значимые изменения [15].

Литературный анализ позволяет сделать следующие основные выводы: вибрационные показатели относятся к числу важнейших динамических показателей подшипника, узлов и изделий, где данный подшипник установлен; уровень вибраций и шума подшипника зависят от большого количества факторов, в том числе, от качества изготовления деталей подшипника, что во многом определяется микрogeометрическими параметрами обработанных поверхностей. Одними из факторов, влияние которых рассмотрено в меньшей степени, являются микрogeометрические параметры сферы роликов конических подшипников, что и определило цель работы: исследование влияния микрogeометрических параметров сферы ролика на уровни вибраций и звукового давления конического подшипника.

Методика исследований

Для исследований выбран подшипник (стандартного исполнения из общего производственного потока), ведущей шестерни заднего моста автомобиля с большим углом контакта (более 20°), воспринимающий значительные осевые нагрузки. Обработку торца ролика конического подшипника на ОАО «ЕПК Волжский» выполняют на сферошлифовальных автоматах модели SХК-5А методом шлифования на проход. До входа в зону контакта с

абразивным инструментом обрабатываемая поверхность заготовки конического ролика плоская, сформированная на предыдущей операции двустороннего шлифования торцов. Абразивный инструмент на операции шлифования сферы представляет собой сборный шлифовальный круг, состоящий из трех кругов различных характеристик: 14AF90OB, 14AF120KR, 14AF400JB4. Перед шлифованием цилиндрическую поверхность сборного инструмента правят на радиус, соответствующий радиусу сферической поверхности конического ролика подшипника. За один проход по вогнутоправленной сферической поверхности сборного абразивного инструмента происходит совмещение в одной операции черного, чистового и окончательного шлифования сферической поверхности конического ролика. В результате плоская торцовая поверхность конического ролика преобразуется в сферическую с заданными геометрическими и микрogeометрическими параметрами. Стойкость шлифовального круга по технологическому процессу 2,0 ч. После операции совмещенного шлифования измеряли шероховатость сферического торца (параметр Ra – среднее арифметическое отклонение профиля) на профилометре Form Talysurf, волнистость W и отклонение от круглости ΔEFK – на кругломере Talu-
gond.

Вибрации подшипника исследовали на установке КВП-3 с использованием измерителя уровня вибраций ИУВ-3М. Замер выполняли пьезоэлектрическим датчиком, установленным на наружное кольцо подшипника. Определяли общий уровень вибрации (ОУВ) по виброускорению в диапазоне частот 50...10000 Гц и уровень вибраций в трех полосах частот по виброскорости в диапазоне частот: 50...300 Гц (УВ1), 300...1800 Гц (УВ2) и 1800...10000 Гц (УВ3). Уровень звукового давления (УЗД) подшипника измеряли анализатором шума и вибрации «Ассистент S» в фильтре частот «А» (общее звуковое давление) и в полосах частот в диапазоне 31,5...16 000 Гц.

Результаты измерений. Анализ результатов

Для исследований подготовлена партия из 200 роликов. По параметру шероховатости Ra из данной партии отобрано два комплекта

роликов по семнадцать штук в каждом комплекте, что соответствует количеству роликов в одном подшипнике. Комплект 1 сформирован роликами, шероховатость сферической поверхности которых находится в пределах нижней границы поля допуска: $Ra \leq 0,10$ мкм. В

комплекте 2 параметр Ra находится середине поля допуска: $0,10 < Ra \leq 0,20$ мкм. На отобранных комплектах роликов дополнительно измерены волнистость W и отклонение от круглости Δ сферы ролика (табл. 1).

1. Микрогеометрические параметры сферы роликов

1. Microgeometric parameters of the roller sphere

Ролик	Комплект 1			Комплект 2		
	Ra , мкм	W , мкм	Δ , мкм	Ra , мкм	W , мкм	Δ , мкм
1	0,06	0,51	1,57	0,12	1,00	6,37
2	0,07	0,27	0,85	0,16	1,12	10,21
3	0,07	0,22	0,67	0,11	1,17	8,08
4	0,10	0,40	2,32	0,12	0,74	5,21
5	0,07	0,36	1,31	0,17	1,10	6,89
6	0,05	0,23	1,43	0,18	1,14	6,70
7	0,06	0,18	1,31	0,14	0,66	5,38
8	0,06	0,44	1,39	0,18	1,02	12,24
9	0,05	0,28	1,80	0,16	1,00	5,74
10	0,06	0,14	2,82	0,20	0,98	4,47
11	0,06	0,23	2,41	0,11	0,83	6,77
12	0,05	0,27	1,28	0,14	1,12	7,91
13	0,07	0,35	1,53	0,19	1,51	11,59
14	0,07	0,52	2,83	0,13	1,29	3,43
15	0,05	0,25	0,77	0,15	1,02	4,41
16	0,06	0,46	1,32	0,16	0,84	6,53
17	0,07	0,51	1,14	0,12	0,73	4,30
Среднее	0,06	0,33	1,57	0,15	1,02	6,84

В каждом комплекте определены средние значения микрогеометрических параметров сферы роликов: Ram , Wm , Δm . Средние значения микрогеометрических параметров сфер роликов комплекта 2 больше средних значений микрогеометрических параметров сфер роликов комплекта 1: Ram – в 2,4 раза; Wm – в 3,1 раза; Δm – в 4,3 раза.

Ролики комплекта 2 собраны в подшипник. В соответствии с методикой измерений

определены численные значения параметров вибрации и уровня звукового давления собранного подшипника. С целью определения влияния количества роликов комплекта 1 на изменение шума (уровня звукового давления) и вибраций подшипника, ролики комплекта 2 были поочередно заменены в подшипнике на ролики комплекта 1 с такими же номерами. При каждой смене ролика комплекта 2 на ролик комплекта 1 измеряли уровень звукового

давление и вибрации подшипника. В конечном итоге все 17 роликов комплекта 2 были

заменены на ролики комплекта 1. Результаты измерений приведены в табл. 2.

2. Уровни вибраций и звукового давления, вибрационный разряд подшипников

2. Vibration and sound pressure levels, vibration discharge of bearings

n	ОУВ, дБ	Уровень вибрации по виброскорости в полосах частот, дБ			УЗД, дБ	ВРП
		УВ1 (50...300 Гц)	УВ2 (300...1800 Гц)	УВ3 (1800...10000 Гц)		
0*	103	76	81	88	78	Ш1
1**	103	76	81	88	78	Ш1
2**	102	76	81	87	77	Ш1
3**	102	76	81	87	77	Ш1
4**	102	76	81	87	77	Ш1
5**	102	76	80	87	76	Ш1
6**	102	76	80	86	76	Ш2
7**	101	76	80	86	75	Ш2
8**	100	76	80	85	75	Ш2
9**	100	75	80	85	75	Ш2
10**	100	75	80	84	75	Ш2
11**	99	75	80	84	75	Ш2
12**	99	75	80	83	74	Ш3
13**	98	75	80	83	74	Ш3
14**	97	75	80	82	74	Ш3
15**	97	75	80	82	74	Ш3
16**	97	75	80	81	74	Ш3
17***	96	74	80	78	73	Ш3

Примечания: * – подшипник с роликами комплекта 2;
** – количество роликов в подшипнике комплекта 2, заменённые на ролики комплекта 1;
*** – подшипник, в котором все ролики комплекта 2 заменены на ролики комплекта 1.

Из табл. 3, следует, что увеличение количества роликов из первого комплекта снижает уровень вибрации подшипника по третьей полосе частот и соответственно повышает вибрационный разряд подшипника (ВРП) до Ш3 (вибрационный разряд подшипника определяли в соответствии с РД ВНИПП.038-08).

На основании данных табл. 1 определены средние значения микрогеометрических параметров сфер роликов в подшипнике при каждой замене роликов комплекта 2 на ролики комплекта 1. Среднее значение параметров шероховатости Ram , волнистости Wm , отклонения от круглости Δm и доверительные

интервалы на данные параметры с учетом погрешности измерений приведены в табл. 3.

Взаимосвязь между количеством роликов n комплекта 1, заменивших ролики комплекта 2, средними значениями микрогеометрических

и геометрических параметров сфер роликов в подшипнике, параметрами шума и вибрации подшипника оценивали коэффициентом корреляции (табл. 4).

3. Средние значения микрогеометрических параметров сфер роликов в подшипниках

3. Average values of microgeometric parameters of roller spheres in bearings

n	Ram , мкм	$\pm\Delta Ram$, мкм	Wm , мкм	$\pm\Delta Wm$, мкм	Δm , мкм	$\pm\Delta m$, мкм
0*	0,15	0,02	1,02	0,10	6,84	1,16
1**	0,15	0,02	1,00	0,11	6,65	1,30
2**	0,14	0,02	0,98	0,12	6,34	1,43
3**	0,13	0,02	0,94	0,15	6,13	1,55
4**	0,13	0,02	0,89	0,15	6,10	1,56
5**	0,12	0,02	0,82	0,14	5,50	1,50
6**	0,12	0,02	0,77	0,15	5,11	1,54
7**	0,12	0,02	0,74	0,16	4,86	1,55
8**	0,11	0,02	0,69	0,17	4,76	1,57
9**	0,1	0,02	0,64	0,17	4,53	1,60
10**	0,09	0,02	0,61	0,17	3,89	1,34
11**	0,09	0,02	0,58	0,17	3,65	1,36
12**	0,08	0,02	0,53	0,17	3,34	1,33
13**	0,08	0,01	0,49	0,15	3,01	1,28
14**	0,07	0,01	0,47	0,15	2,84	1,25
15**	0,07	0,01	0,41	0,12	2,41	1,11
16**	0,07	0,01	0,36	0,09	1,86	0,62
17***	0,06	0,01	0,33	0,06	1,57	0,30

Примечания: * – подшипник с роликами комплекта 2;

** – количество роликов в подшипнике комплекта 2, имеющих соответствующие номера от 1 до 17, заменённые на ролики комплекта 1 с такими же номерами;

*** – подшипник, в котором все ролики комплекта 2 заменены на ролики комплекта 1.

4. Коэффициенты корреляции

4. Correlation coefficients

Ram	Wm	Δm	ОУВ	УВ1	УВ2	УВ3	УЗД
1,00	1,00	1,00	0,98	0,88	0,78	0,96	0,96

В соответствии с классификацией Чеддока сила связи между количеством n замененных роликов комплекта 2 на ролики комплекта 1 и средними значениями микрогеометрических параметров сферы ролика весьма высока, коэффициент корреляции положительный ($r = 1,00$). Взаимосвязь n с параметрами ОУВ, УВ2 и УЗД так же весьма высока. Коэффициенты корреляции между данными параметрами приближаются к единице. Взаимосвязь между n и уровнем вибрации по виброскорости в первой (УВ1) и второй (УВ2) полосам частот относится к категории «высокая». Коэффициент корреляции, определяющий взаимосвязь между параметрами уровней вибрации и звукового давления положительный, что свидетельствует о прямой связи между ними.

Графические зависимости изменения средних микрогеометрических параметров сфер роликов в подшипнике Ram , Wm и Δm от количества замененных роликов n показаны на рис. 1. Графики аппроксимированы линейными зависимостями:

$$Y = an + b, \quad (1)$$

где Y – среднее значение микрогеометрического параметра; a и b – постоянные коэффициенты. Значения коэффициентов a , b и достоверности аппроксимации R^2 приведены в табл. 5. Коэффициент $R^2 = 0,99$ свидетельствует о правомерности описания взаимосвязи микрогеометрических параметров Ram , Wm , Δm от n линейной зависимостью (1).

Аналогичные зависимости между показателями вибраций и шума от количества замененных роликов n приведены на рис. 1, б. Наибольшее значение коэффициента достоверности аппроксимации получены для параметров ОУВ, УЗД и УВ3 (см. табл. 5). Снижение R^2 наблюдается при аппроксимации линейной зависимостью от n уровня вибрации по виброскорости во второй и третьей полосах частот (УВ1, УВ2). Статистический анализ дисперсий данных параметров показал отсутствие значимого различия между средними значениями данных параметров в интервале n от 1,0 до 17. В отношении УВ1, УВ2 можно говорить лишь о тенденции снижения данных параметров с увеличением n .

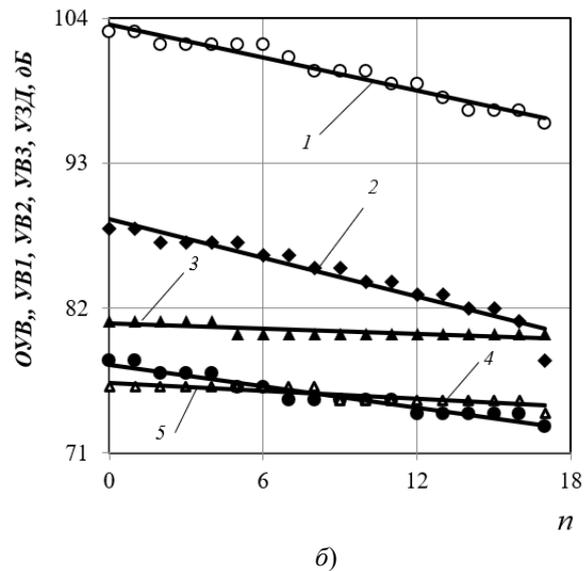
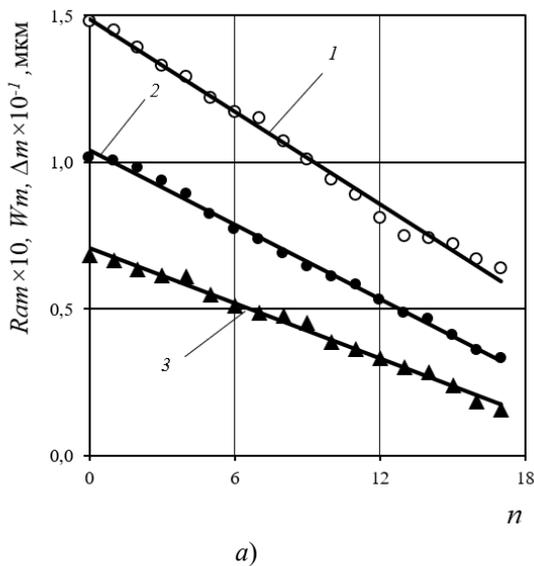


Рис. 1. Зависимости от количества роликов n :

a – для средних значений микрогеометрических параметров:
1 – Ram ; 2 – Wm ; 3 – Δm ;

b – для параметров вибрации и шума подшипников:
1 – ОУВ; 2 – УВ3; 3 – УВ2; 4 – УЗД; 5 – УВ1

Fig. 1. Dependences on the number of rollers n :

a – for average values of microgeometric parameters:

1 – Ram ; 2 – Wm ; 3 – Δm ;

b – for vibration and noise parameters of bearings:

1 – OUV; 2 – UV3; 3 – UV2; 4 – UZD; 5 – UV1

5. Коэффициенты a , b и достоверности аппроксимации R^2 линейных уравнений (1)

5. Coefficients a , b and reliability of the R^2 approximation linear equations (1)

Параметры	Коэффициенты		
	a	b	R^2
Ram	0,053	0,059	0,99
Wm	0,042	0,321	0,99
Δm	0,312	1,761	0,99
ОУВ	0,417	96,50	0,96
УВ1	0,277	72,70	0,93
УВ2	0,101	74,60	0,71
УВ3	0,067	79,70	0,60
УЗД	0,490	80,40	0,92

Из сравнения результатов аппроксимации геометрических параметров роликов, уровней вибраций и шума подшипников от количества роликов n (см. рис. 1) следует, что анализируемые параметры должны быть взаимосвязанными. С увеличением n снижаются средние значения параметров шероховатости Ram , волнистости Wm , отклонения от круглости Δm сферы ролика, параметры шума и вибрации. Силу корреляционной связи между микрогеометрическими параметрами, параметрами звукового давления и вибраций также оценили по коэффициенту парной корреляции. В связи с отсутствием значимого различия между параметрами уровня вибрации по виброскорости во второй и третьей полосах частот (УВ2, УВ3), влияние микрогеометрических параметров на данные параметры не рассматривали (см. табл. 5).

Максимальные значения R^2 получены между теми параметрами, которые имели высокий коэффициент парной корреляции с

количеством замещенных роликов (см. табл. 6).

Наибольшее влияние на показатели уровня вибраций и звукового давления подшипников оказывают среднее значение шероховатости Ram , волнистости Wm и отклонение от круглости Δm сферы ролика. Коэффициенты парной корреляции между данными параметрами и показателями вибрации и шума (общий уровень вибрации по виброускорению ОУВ, скорректированный по фильтру А, уровень звукового давления УЗД и уровень вибрации по виброскорости УВ3 в третьей полосе частот) находятся в интервале 0,95...0,98, что свидетельствует о высокой силе корреляционной связи между ними. Взаимосвязь между параметрами прямая, т. е. с уменьшением показателей микрогеометрических параметров (Ram ; Wm ; Δm) показатели уровня вибраций и шума подшипников снижаются.

6. Коэффициенты парной корреляции R^2 между показателями уровня вибраций и шума подшипников и микрогеометрическими параметрами сферы роликов

6. Coefficients of the pair correlation R^2 of bearing vibration and noise level indicators and microgeometric parameters of the roller sphere

Факторы	ОУВ	УВ1	УЗД
Ram	0,97	0,97	0,95
Wm	0,97	0,96	0,95
Δm	0,98	0,95	0,97

Графические зависимости между анализируемыми параметрами приведены на рис. 2. Функциональные связи по аналогии с формулой (1) представлены линейными зависимостями:

$$Y_2 = a_2 x_2 + b_2, \quad (2)$$

где Y_2 – показатели уровня вибраций и шума подшипников (ОУВ, УВ3, УЗД), x_2 – средние значения соответствующих показателей

микрogeометрических параметров, a_2 и b_2 – постоянные коэффициенты. Значения коэффициентов a_2 , b_2 и достоверности аппроксимации R^2 приведены в табл. 7.

Из этого следует, что основными факторами, влияющими на шум и вибрацию подшипника, являются микрogeометрические параметры.

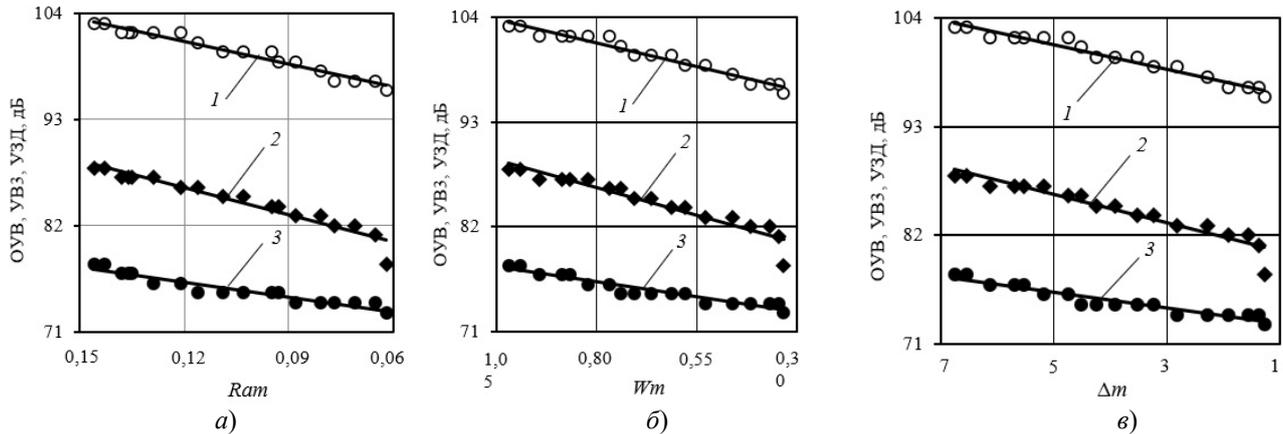


Рис. 2. Зависимости параметров уровней вибраций и шума подшипников от параметров качества обработанной поверхности сферы ролика:

а – зависимость ОУВ, УВ3, УЗД от Ram ; б – зависимость ОУВ, УВ3, УЗД от Wm ; в – зависимость ОУВ, УВ3, УЗД от Δm ; 1 – ОУВ; 2 – УВ3; 3 – УЗД

Fig. 2. Dependences of vibration and noise levels parameters of bearings on the quality parameters of roller sphere treated surface:

а – dependence of OUV, UV3, UZD on Ram ; б – dependence of OUV, UV3, UZD on Wm ; в – dependence of OUV, UV3, UZD on Δm ;

1 – OUV; 2 – UV3; 3 – UZD

7. Коэффициенты a_2 , b_2 и достоверности аппроксимации R^2

7. Coefficients a_2 , b_2 and reliability of approximation R^2

Параметры	Ram			Wm			Δm		
	a_2	b_2	R^2	a_2	b_2	R^2	a_2	b_2	R^2
ОУВ	78,4	91,8	0,94	9,76	93,4	0,94	1,33	94,1	0,95
УВ3	91,6	75,1	0,90	11,50	76,8	0,91	1,58	77,6	0,94
УЗД	52,5	69,9	0,94	6,54	70,9	0,93	0,87	71,5	0,91

В соответствии с принятой методикой первоначальное формирование групп роликов конических подшипников осуществлялось по параметру шероховатости обработанной поверхности – среднему арифметическому отклонению профиля Ra . Остальные микрogeометрические параметры – волнистость и максимальное отклонение от круглости, специально не выбирали. В данном случае они являлись как бы второстепенными факторами, привязанными к конкретному значению параметра Ra . Но в результате принятой методики

усреднения микрogeометрических параметров в каждом из семнадцати рассмотренных подшипников, содержащих семнадцать различных комплектов роликов, информативность усредненных значений Wm и Δm , относящихся к подшипнику в целом, по сравнению с индивидуальными параметрами конкретного конического ролика Wi и Δi , возросла. В связи с этим, представляет интерес рассмотреть связь данных средних микрogeометрических параметров со средним параметром Ram (см. рис. 3). Графические данные аппроксимированы

двумя функциональными зависимостями: линейной и логарифмической. В первом случае коэффициент достоверности Wm (Ram) $R^2 = 0,91$, во втором – $0,99$. В связи с более высоким значением R^2 взаимосвязь параметров аппроксимировали логарифмической зависимостью:

$$Wm = 5,92 \ln(Ram) + 18,04,$$

где $R^2 = 0,99$.

При моделировании взаимосвязи параметров Δm (Ram) также использовали логарифмическую зависимость:

$$\Delta m = 0,80 \ln(Ram) + 2,52,$$

где $R^2 = 0,98$.

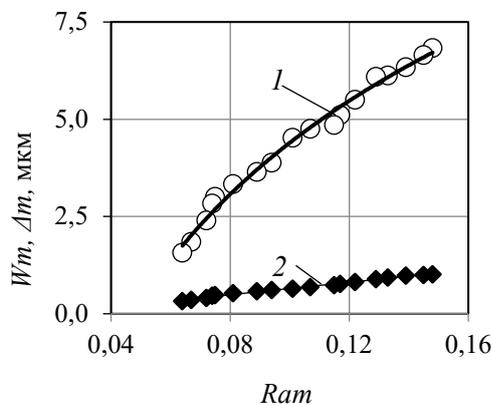


Рис. 3. Зависимости от среднего значения Ram средних значений параметров:

1 – Wm ; 2 – Δm

Fig. 3. Dependencies on the average value Ram average parameter values:

1 – Wm ; 2 – Δm

Выводы

При обеспечении параметров шероховатость Ra сферической поверхности роликов стандартного исполнения из общего производственного потока в соответствии с требованиями конструкторской документации в пределах до 25 % поля допуска возможно повышение вибрационного разряда подшипника с Ш1 до Ш2 и Ш3. Подшипники с вибрационным разрядом Ш3 обладают лучшими характеристиками по шуму (звуковому давлению) и вибрации и составляют конкуренцию аналогам подшипников иностранного производства, применяемым в узлах легковых и грузовых автомобилей, прицепной техники.

Микрогеометрические параметры сферы роликов подшипника оказывают значимое

влияние на следующие показатели уровня вибраций и шума подшипников: общий уровень вибрации по виброускорению ОУВ, уровень вибрации по виброскорости УВЗ в третьей полосе частот и уровень звукового давления УЗД.

Установлена линейная зависимость между параметрами вибрации и шума подшипников и средними арифметическими значениями микрогеометрических параметров сферической поверхности роликов в подшипниках. При снижении средних значений параметров шероховатости сферы роликов в подшипнике Ra в 2,5 раза, волнистости – в 3,1 раза, максимального отклонения от круглости сферы роликов – в 4,4 раза общий уровень вибрации и уровень звукового давления снижаются на 7,0 %, уровень вибрации в третьей полосе частот УВЗ – на 13 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Никитин А.А., Погораздов В.В., Дробязко С.В., Лукьяненко В.В., Шпак П.Ф. Вибрация как показатель технического состояния подшипника качения и технологического уровня его восстановления // Тяжелое машиностроение. 2010. №10. С. 35–37. EDN NAVEND.
2. Чечуевский В.П., Шкалик Э.А. Экспериментальные исследования оценки технического состояния неразборных подшипников качения авиационных двигателей по уровню их вибрации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2011. №1. С. 76–82. EDN QYVRZL
3. Ляхов В.В., Кобыляцкий Ю.В. Шум и вибрация в подшипниковых узлах электродвигателей. Виды и способы их устранения // Вестник современных технологий. 2016. № 2 (2). С. 50–55. EDN YFMTLN.
4. Бальяба М.В., Крючков А.Н., Ермилов М.А., Плотников С.М., Ермилова Е.Н., Видяскина А.Н. Анализ вибрационного состояния подшипников качения при дефекте «износ внутренней обоймы подшипника» // Динамика и виброакустика. 2021. Т. 7. № 1. С. 6–14. EDN JIGYBG.
5. Орлов А.В. Вибрация в радиальном роликовом подшипнике, вызываемая износом // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 4. С. 63–69. EDN QYWVGF.
6. Vishwagna Ramya, J. Chandra Sekhar FEA Study on Vibration Analysis of Tapper Roller Bearing. International journal and magazine of engineering, technology, management and research. 2015. V. 2. P. 1474–1493.
7. T. Xu, Y. Liu, A. Pei, and L. Jiang. The Roller Bearing Fault Diagnosis Methods with Harmonic Wavelet Ppacket and Multi-classification Relevance Vector Machine/ Journal of Vibroengineering, 2015. Vol. 17, No. 6. P. 2962–2976.
8. F. Gu, X. Tian, Z. Chen, T. Wang, I. Rehab A. Ball. Fault Severity Diagnosis of Rolling Element Bearings Based on Kurtogram and Envelope Analysis. International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering, 04-05 January 2014, p. 25–29. ID: 1123057.
9. Tandon N., Choudnury A. A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings. Tribology International. 1999. №32. P. 469–480.

10. Kiral Z., Karagulle H. Vibration Analysis of Rolling Element Bearings with Various Defects Under the Action of an Unbalanced Force. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006. №20. P. 1967–1991. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.05.001.

11. Щербя М.Ю., Кохановский В.А. Статистические исследования отклонений профилей дорожек качения подшипников цилиндрических станков // Вестник ДГТУ. № 1(62). Вып. 1. 2012. С. 74–78. EDN PBKETZ.

12. Jing Liu. Investigation for Vibrations of Tapered Roller Bearing Considering the Surface Waviness on the Rib of the Inner Race / Journal of Mechanical Engineering. 2018. 54(8):26. DOI: 10.3901/JME.2018.08.026/

13. Xintao Xia. Information Poor Relation of Inner Ring Rib Roughness with Tapered Rroller Bearing Vbration / 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. 2011. Inner Mongolia, China. DOI: 10.1109/MACE.2011.5988139

14. Носенко В.А., Зуев А.В., Голованов А.Н. Влияние шероховатости сферической поверхности ролика на шумовые характеристики конического подшипника // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. № 1 (224). С. 29–32. EDN VTRZRK.

15. P. Li, Y. Zhang, D. Huang. Study on Three Axis Vibration Measurement Technology of Roller Bearing. Vibroengineering Procedia. 2016. Vol. 10. P. 144–148.

REFERENCES

1. Nikitin A.A., Pogorazdov V.V., Drobyazko S.V., Lukyanenko V.V., Shpak P.F. Vibration as an indicator of the technical condition of a rolling bearing and the technological level of its restoration // Heavy engineering, 2010, No.10, pp. 35–37. EDN NAVAND.

2. Chechuyevsky V.P., Shkalikov E.A. Experimental studies of health assessment for non-separable roller bearings of aircraft engines by their vibration level // Scientific Bulletin of SRDE SA, 2011, No.1, pp. 76–82. EDN QYVRZL

3. Lyakhov V.V., Kobylatsky Yu.V. Noise and vibration in bearing units of electric motors. Types and methods of their elimination // Bulletin of modern technologies, 2016, No. 2 (2), pp. 50–55. EDN YFMTLN.

4. Balyaba M.V., Kryuchkov A.N., Ermilov M.A., Plotnikov S.M., Ermilova E.N., Vidyaskina A.N. Analysis of the vibration state of roller bearings with a defect of inner bearing cage wear // Dynamics and vibroacoustics. 2021, vol. 7, No. 1, pp. 6–14. EDN JIGYBG.

5. Orlov A.V. Vibration in a radial roller bearing caused by wear // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2013, No. 4, pp. 63–69. EDN QYWVGF.

6. Vishwagna Ramya, J. Chandra Sekhar FEA Study on Vibration Analysis of Tapper Roller Bearing. International journal and magazine of engineering, technology, management and research. 2015. V. 2. P. 1474–1493.

7. T. Xu, Y. Liu, A. Pei, and L. Jiang. The Roller Bearing Fault Diagnosis Methods with Harmonic Wavelet Ppacket and Multi-classification Relevance Vector Machine/ Journal of Vibroengineering, 2015. Vol. 17, No. 6. P. 2962–2976.

8. F. Gu, X. Tian, Z. Chen, T. Wang, I. Rehab A. Ball. Fault Severity Diagnosis of Rolling Element Bearings Based on Kurtogram and Envelope Analysis. International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering, 04-05 January 2014, p. 25–29. ID: 1123057.

9. Tandon N., Choudnury A. A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings. Tribology International. 1999. №32. P. 469–480.

10. Kiral Z., Karagulle H. Vibration Analysis of Rolling Element Bearings with Various Defects Under the Action of an Unbalanced Force. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006. №20. P. 1967–1991. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.05.001

11. Shcherba M.Yu., Kokhanovsky V.A. Statistical studies of roller path profile deviations for bearings of cylindrical grinding machines // Bulletin of DSTU, No. 1(62), issue 1. 2012, pp. 74–78. EDN PBKETZ.

12. Jing Liu. Investigation for Vibrations of Tapered Roller Bearing Considering the Surface Waviness on the Rib of the Inner Race / Journal of Mechanical Engineering. 2018. 54(8):26. DOI: 10.3901/JME.2018.08.026

13. Xintao Xia. Information Poor Relation of Inner Ring Rib Roughness with Tapered Rroller Bearing Vbration / 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. 2011. Inner Mongolia, China. DOI: 10.1109/MACE.2011.5988139

14. Nosenko V.A., Zuev A.V., Golovanov A.N. Influence of the roughness of the spherical roller surface on the noise characteristics of a conical bearing // Proceedings of the Volga-Grad State Technical University. 2019, No. 1 (224), pp. 29–32. EDN VTRZRK

15. P. Li, Y. Zhang, D. Huang. Study on Three Axis Vibration Measurement Technology of Roller Bearing. Vibroengineering Procedia. 2016. Vol. 10. P. 144–148.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.11.2023; одобрена после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 02.12.2023

The article was submitted 05.11.2023; approved after reviewing 20.11.2023; assepted for publication 02.12.2023