

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРИБОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ ПРОИЗВОДСТВА ЯПОНИИ И КИТАЯ

В.А. Воронкин

В связи с изменением конъюнктуры на европейском рынке свободных подшипников качения (ПК) возникает необходимость в оценке качества подшипниковой продукции, предлагаемой на азиатском рынке, и прежде всего, со стороны Китая. Проведено сравнение качества ограниченной выборки однотипных ПК приборного ряда производства Китая и Японии, исходя из того, что признанное качество японских ПК отвечает высшим стандартам европейских производителей. Оценивалось не только качество собственно подшипников, но и качество заложенных в них смазок. Проведённые исследования и анализ документации на ПК показали, что в отношении точности изготовления элементов ПК: колец, сепаратора, величины шероховатости деталей ПК, качество изготовления ПК Китая практически не отличается от качества изготовления ПК фирмы NSK (Япония). И китайские и японские изделия по вибрации практически соответствуют норме V3, что дополнительно свидетельствует о их высоком качестве. На основании вышеизложенного сделан вывод, что подшипники качения приборного ряда китайского производства перспективны для замены соответствующих аналогов европейских производителей.

Ключевые слова: подшипник качения, пластичная смазка, виброактивность, спектральный анализ, методы оценки качества подшипников, система тестирования смазок.

В связи с изменением конъюнктуры на рынке свободных подшипников качения (ПК) не исключено, что заинтересованным потребителям в ближайшее время придётся переориентироваться с европейского рынка на азиатский. Отсюда возникает необходимость в оценке качества подшипниковой продукции, предлагаемой на азиатском рынке, и прежде всего, со стороны Китая. Ниже приводится сравнение качества однотипных ПК приборного ряда производства Китая и Японии, полагая, что качество японских изделий отвечает высшим стандартам европейских производителей. Объектами исследований являлись: подшипники 629 Z известной японской фирмы NSK 6 шт. (далее 629 Z NSK) и подшипники 629 Z производства Китая 34 шт. (далее 629 Z) со смазками, определёнными их производителями, так как рабочие характеристики ПК определяются не только качеством изготовления собственно ПК, но и свойствами заложенной в них смазки, причём оценивались как сами ПК, так и их смазки. Следует учитывать, что реологическими свойствами смазок мы не располагали. Часть проведённых исследований представлена ниже.

При исследованиях использовалось следующее оборудование:

- специализированный стенд для сравнения качества подшипников [1];
- многофункциональная система тестирования смазочных материалов SRV 3 фирмы «Optimol Instruments GmbH».

Для контроля качества свободных ПК путём анализа их вибрационных характеристик на стенде использовался программный метод [2]. Программа функционирует в среде LabVIEW и может определить вклад каждого фактора в суммарную вибрацию подшипника.

Система тестирования смазочных материалов [3] применялась для оценки качества смазочных материалов, заложенных в ПК. В соответствии с принятыми методиками, разработанными фирмой-производителем, для испытаний выбран точечный контакт, т. е. пара трения шара по плоскости. Все результаты представлялись в виде типовых компьютерных обработок данных, получаемых по шести параметрам: коэффициент трения, нагрузка, амплитуда, частота, температура, а также путём анализа графиков износа за период испытания. Оптимальный режим нагружения подбирался эмпирически.

Для работы использовались образцы производства SRV, изготовленные в соответствии с производственными допусками стандарта SRV DIN/ASTM. Исследования проводились как с шарами диаметром 10 мм, так и с шарами диаметром 17,5 мм. Шар – материал сталь 100CR6, полирован DIN 51834. Диск 24×7,9 мм, материал – сталь 100CR6, закалён, полирован с двух сторон DIN51834, шероховатость 0,45 – 0,65 Rz.

Все образцы перед испытаниями подвергались очистке в промывочной ультразвуковой ванне TK20R фирмы «Bandelin Elektronik» по стандартной методике очистки.

Для подтверждения идентичности ПК был произведён контроль фактических геометрических размеров подшипников ПК 629 Z и ПК 629 Z NSK. Выборка из имеющегося количества ПК определялась произвольно. Также было определено количество пластичной смазки, заложенной в испытуемые подшипники и измерена реальная величина начального радиального зазора ПК.

По результатам проведённых измерений геометрических размеров можно заключить, что все подшипники отвечают требованиям для нормального класса

точности P0 (PN): $d = 9_{-0,008}^0$ мм – внутренний диаметр ПК; $D = 26_{-0,009}^0$ мм – наружный диаметр ПК; $B = 8_{-0,120}^0$ мм – ширина колец ПК.

Измерения начального радиального зазора в подшипниках 629 проводились на приборе ИРЗ-93А. Радиальный начальный зазор в ПК 629 Z (Китай) оказался больше, чем нормальный начальный радиальный зазор по DIN620 (C0) и соответствовал укороченному ряду увеличенных зазоров C3 (8 – 23 мкм), т. е. уменьшены максимальные значения допуска, и фактически радиальный зазор ПК 629 Z находился в интервале от 8 до 14 мкм. Радиальный зазор ПК 629 Z (NSK) больше, чем начальный радиальный у ПК 629 Z и соответствовал укороченному ряду зазоров C4 (14 – 29 мкм), т. е. уменьшены максимальные значения допуска, и фактически радиальный зазор ПК 629 Z (NSK) находился в интервале от 14 до 21 мкм.

Был произведён поверочный расчёт необходимого количества смазки и для подшипников исследуемого типоразмера и контроль реального количества заложённой в них смазки. Отметим, что для отечественных ПК с габаритом $9 \times 26 \times 8$ (например, 25-80029ЮТ), предназначенных для высоких частот вращения, количество закладываемой приборной пластичной смазки (марок ВНИИ НП-271, ВНИИ НП-274 и т. д.) находится в пределах от 250 до 320 мг, что соответствует, примерно, от 1/3 до 1/4 свободного объёма ПК.

Для приборных ПК количество закладываемой пластичной смазки критично и при необходимости его можно подсчитать точно, имея полные данные о геометрии ПК и параметрах применённой смазки:

$$V_{см} = \frac{2R_2}{0,64D_0 F_{im}} \frac{\omega^2 \eta^2}{2\theta + \omega\eta} \left(\frac{1}{a_2^2} \sqrt{\frac{b_2}{b_2}} + \frac{1}{a_1^2} \sqrt{\frac{b_1}{b_1}} \right) \times \left[4\pi(R_2 + R_1)B + \frac{13}{12}z\pi D_w^2 \right],$$

где R_2, R_1 – радиусы дорожек качения внутреннего и наружного колец ПК; D_w – диаметр шарика; z – число шариков; F_{im} – средняя нагрузка на шарик; ω – угловая скорость вращающегося кольца ПК; η – эффективная вязкость пластичной смазки; θ – предельное напряжение сдвига пластичной смазки; b_2, b_1 – ширина жёлоба внутреннего и наружного колец ПК;

$$a'_{1(2)} = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{d_\omega} \pm \frac{1}{R_{1(2)}} \right), \quad b'_{1(2)} = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{d_\omega} - \frac{1}{r_{1(2)}} \right) -$$

конструктивные параметры ПК; r_2, r_1 – радиус жёлоба внутреннего и наружного колец ПК.

В связи с отсутствием некоторых необходимых исходных данных о ПК от производителей для решения поставленной задачи использовалась известная в литературе [4] формула для оценки свободного объёма ПК. Хотя эта формула является ориентировочной и не может полностью учитывать конструктивные особенности ПК, она даёт приемлемую точность. Ориентировочно свободный объём испытуемых ПК равен $1,28 \text{ см}^3$.

Экспериментально определено, что количество смазки, заложённой в ПК 629 Z (NSK) (по партии 6 шт.) составляло от 0,240 г до 0,310 г, а количество смазки, заложённой в ПК 629 Z (по партии 10 шт.) составляло от 0,230 г до 0,260 г. В результате можно констатировать, что количество закладываемой смазки в ПК 629 Z и 629 Z (NSK) практически соответствует норме 0,240 – 0,300 г и отвечает существующим общепринятым нормам закладки пластичной смазки для высокооборотных ПК.

Оценка рабочих свойств смазочного материала контролируемых ПК производилась на трибометре, оснащённом программным обеспечением для ввода автоматического тестирования [3]. Смазка при тестировании вносилась в зону трения в количестве $0,025 \pm 0,001$ г.

Устанавливалась максимальная нагрузочная способность смазок по тесту грузоподъёмности ПК. Затем проводилась сравнительная оценка проб смазок, взятых из обоих видов ПК по тесту срабатывания смазочного материала.

В связи с большим объёмом полученных данных привести их в рамках настоящей статьи не представляется возможным. В целом результаты тестирования однозначно позволяют установить преимущество проб смазочного материала, взятого из ПК 629 Z (NSK). Время срабатываемости смазки NSK значительно превосходит время срабатываемости смазки, взятой из ПК 629 Z (Китай). При этом характер трения и его стабильность во времени у смазки NSK значительно превосходят аналогичные показатели смазки, отобранной из ПК 629 Z (Китай). Отметим, что вибродемпфирующие свойства смазок не оценивались.

Результаты измерения на стенде вибрации подшипников 629 Z (Китай), 629 Z NSK и взятых для сравнения отечественных подшипников аналогичного типоразмера (повышенного класса точности) 5-80029ЮТС7 представлены на рис. 1 – 3, из которых следует:

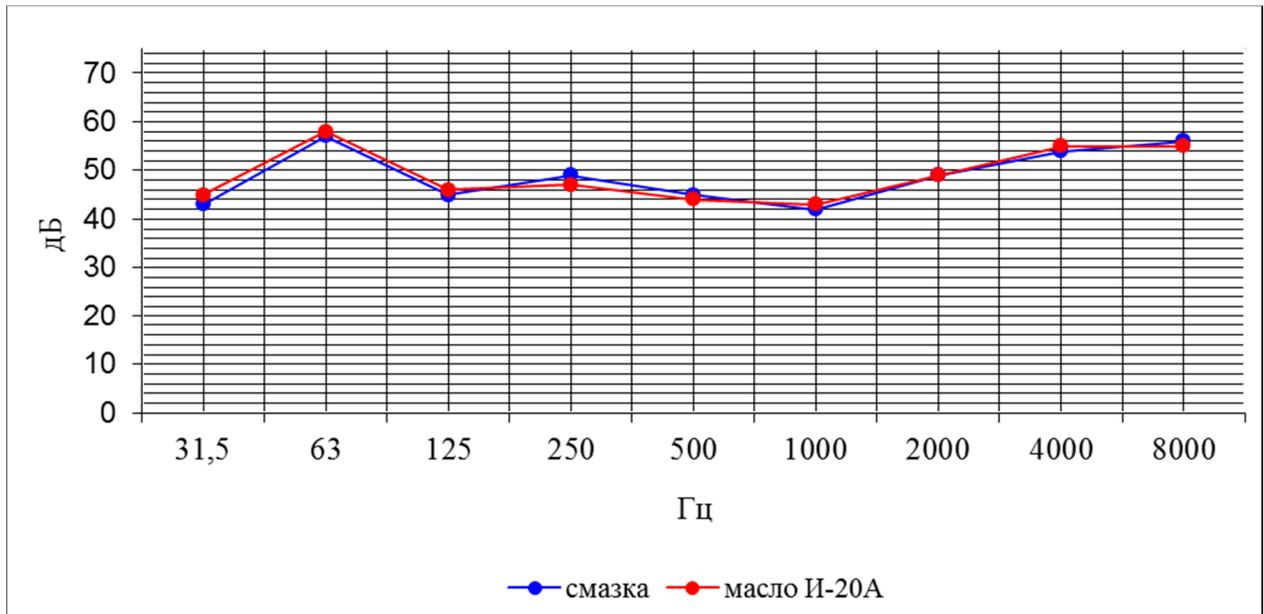


Рис. 1. Средние величины уровней вибрации ПК 629 Z (Китай) на пластичной смазке и масле И-20А (по партии 10 шт.)

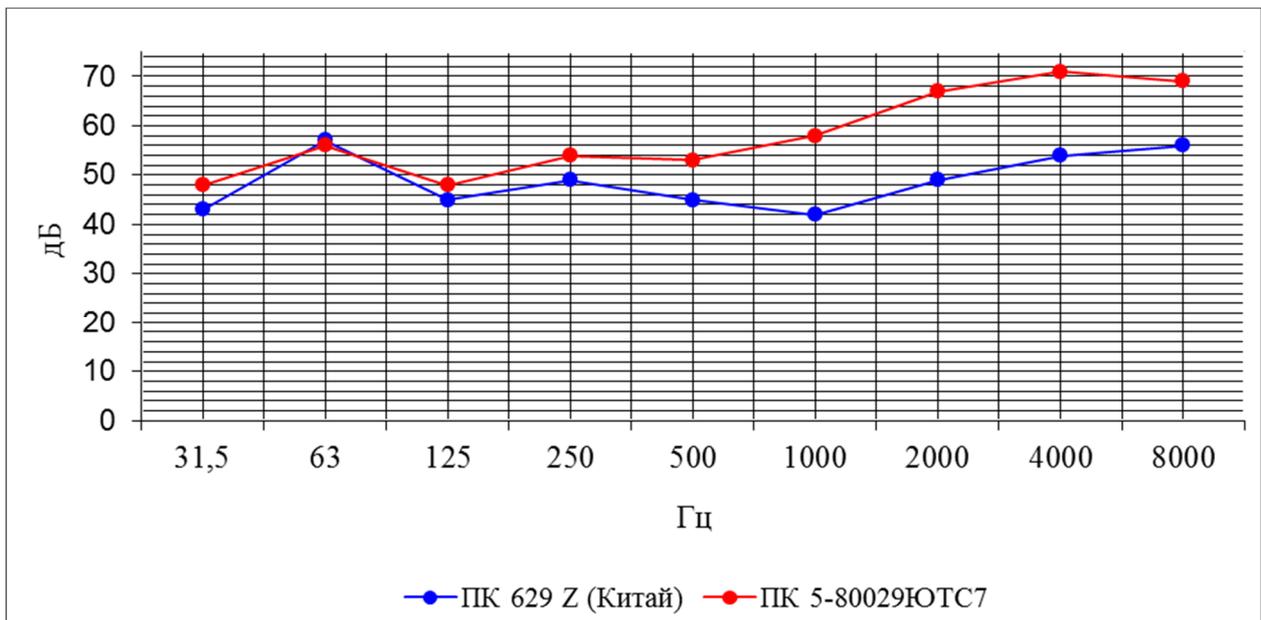


Рис. 2. Средние величины (по партии 6 шт.) уровней вибрации ПК 629 Z (Китай) и ПК 5-80029ЮТС7 с пластичной приборной смазкой ВНИИНП-271 (по консистенции – аналогом рабочей смазки ПК 629 Z (Китай))

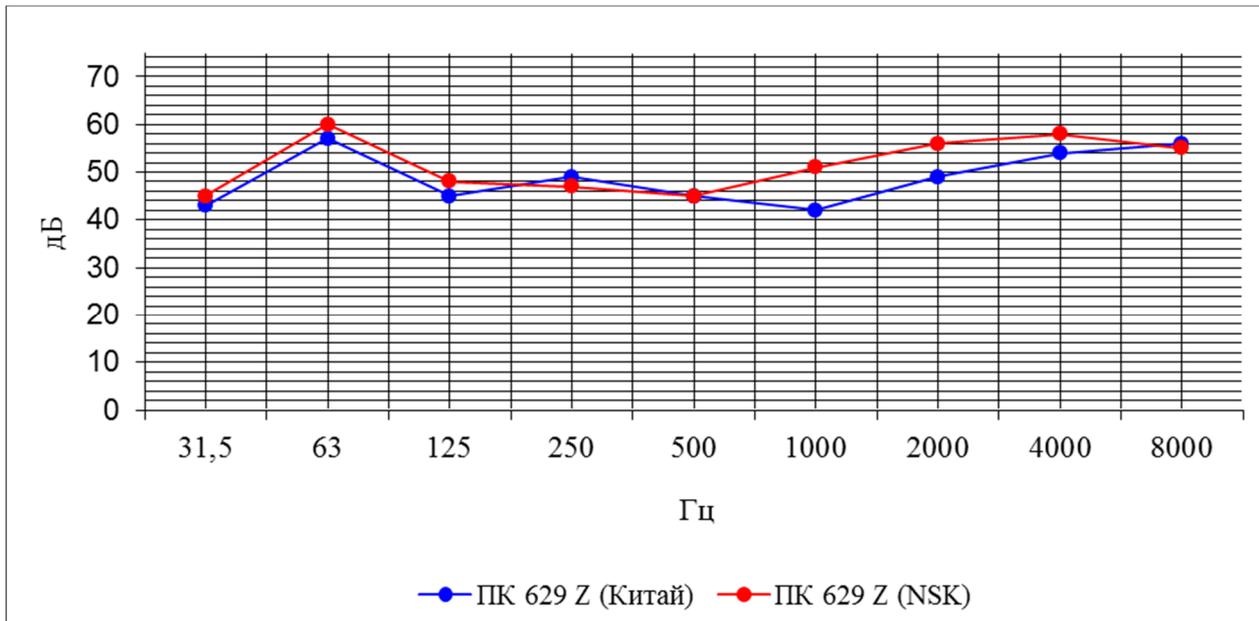


Рис. 3. Средние величины уровней вибрации ПК 629 Z (Китай) и ПК 629 Z (NSK) (по партии 6 шт.)

- уровни вибрации ПК 629 Z (Китай) с рабочей смазкой и маслом И-20А, практически одинаковы;
- уровни вибрации, генерируемые ПК 629 Z (Китай), значительно ниже, чем уровни вибрации, генерируемые ПК 5-80029ЮТС7, практически по всему спектру, а, начиная с полосы с центральной частотой 250 Гц, превышения ПК 5-80029ЮТС7 составляют до 15 дБ;
- уровни вибрации, генерируемые ПК 629 Z (Китай), не превышает уровней ПК 629 Z (NSK) практически по всему измеренному спектру;
- шайбы не влияют на спектр вибрации, генерируемой ПК.

Оценка качества ПК629 Z NSK, ПК 629 Z со смазкой проводилась на специальном стенде [2]. Для исследований ПК на компьютеризированном стенде необходимо знать рабочий угол контакта каждого исследуемого подшипника. В соответствии с [5] был произведён его расчёт с учётом предельных значений допусков параметров ПК для значений осевой нагрузки от 15 до 30 Н. Начальный угол контакта ПК629 Z равнялся: номинальный 11°38'59", максимальный 13°24'12", минимальный 9°6'42". Рабочий угол контакта ПК629 Z колебался от 12°53'15" до 14°58'29". Измеренный угол контакта находился в диапазоне от 9,2 до 11,5° по выборке ПК 629 Z – 10 шт. Измеренный в тех же условиях угол контакта ПК629 Z (NSK) в связи с увеличенным радиальным зазором достигал от 17 до 19,1°.

Далее были созданы компьютерные маски (с учётом рабочих углов контакта), отображающие

расчётные величины характерных дискрет свободного ПК в спектре. Программно идентифицируются следующие частоты:

- частота, связанная с сепаратором:

$$f_c = \frac{f_g}{2} \left(1 - \frac{d_w}{D_0} \cos \alpha \right), \text{ Гц,}$$

где f_g – частота вращения внутреннего кольца ПК, Гц; d_w – диаметр шарика, мм; D_0 – диаметр ПК по центрам шаров, мм; $D_0 = \frac{D_1 + d_1}{2}$, при этом D_1 – диаметр по дну жёлоба наружного кольца ПК, мм; d_1 – диаметр по дну жёлоба внутреннего кольца ПК, мм; α – рабочий угол контакта, град;

- частота, связанная с частотой вращения сепаратора относительно вращающегося внутреннего кольца ПК,

$$f_{c(e)} = \frac{f_g}{2} \left(1 + \frac{d_w}{D_0} \cos \alpha \right), \text{ Гц;}$$

- частота вращения шарика относительно своего центра:

$$f_w = \frac{f_g}{2} \left(\frac{D_0^2 - d_w^2 \cos^2 \alpha}{D_0 d_w} \right), \text{ Гц;}$$

- частота, связанная с прохождением комплекта шаров по неподвижному наружному кольцу ПК:

$$f_n = f_c z n, \text{ Гц,}$$

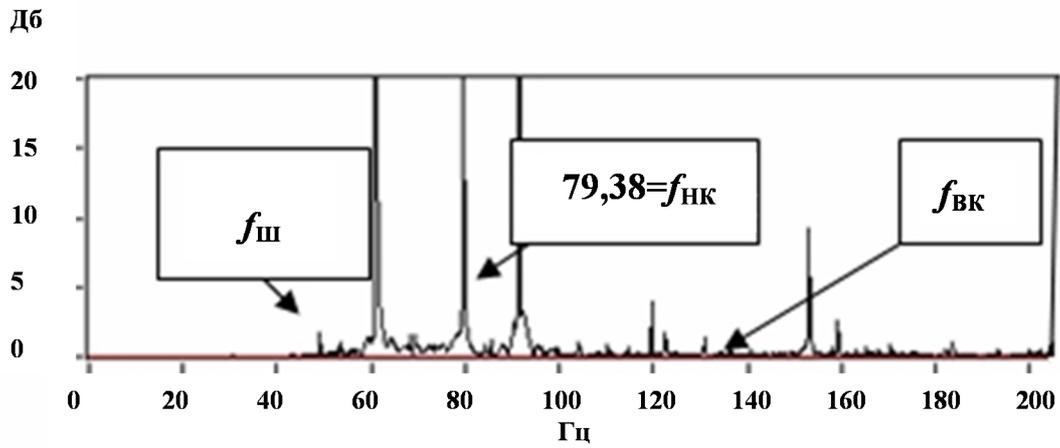


Рис. 4. Спектр вибрации подшипника 629 Z (NSK)

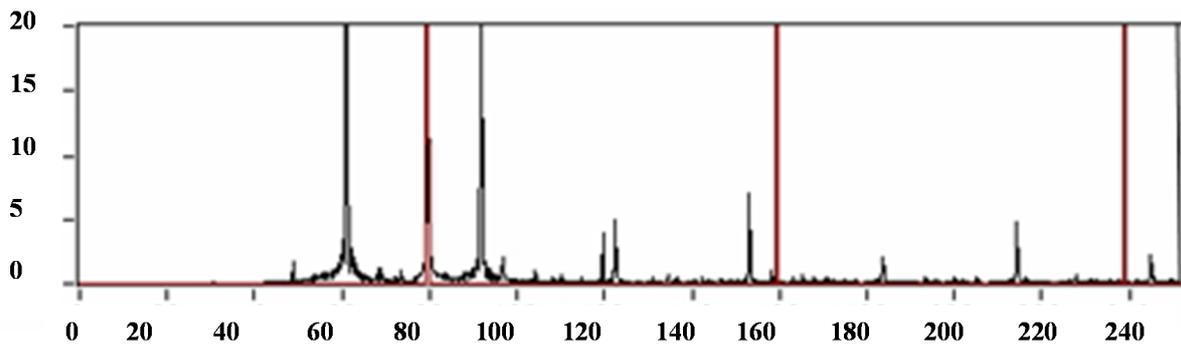


Рис. 5. Спектр вибрации подшипника 629 Z (NSK) с наложенной маской для наружного кольца

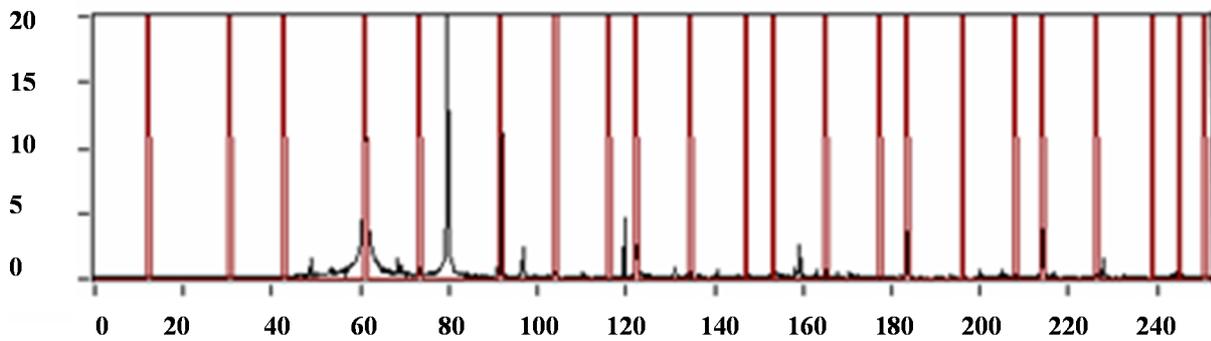


Рис. 6. Спектр вибрации подшипника 629 Z (NSK) с наложенной маской для внутреннего кольца

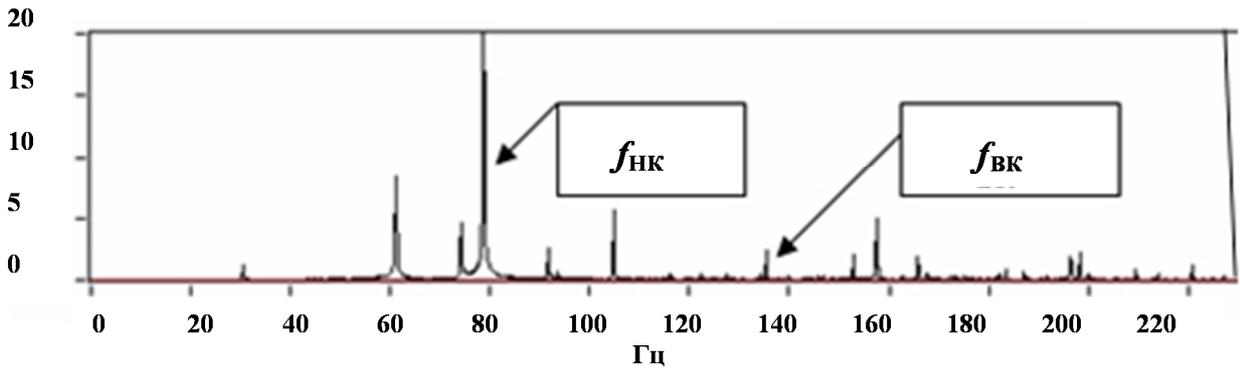


Рис. 7. Спектр вибрации подшипника 629 Z (Китай)

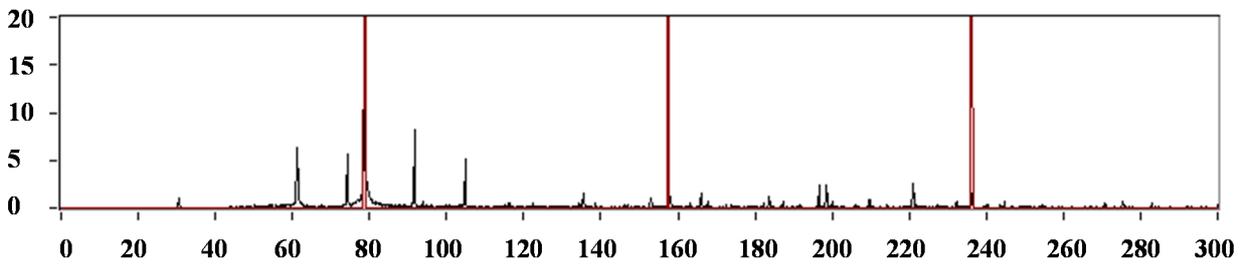


Рис. 8. Спектр вибрации подшипника 629 Z (Китай) № 28 с наложенной маской для наружного кольца

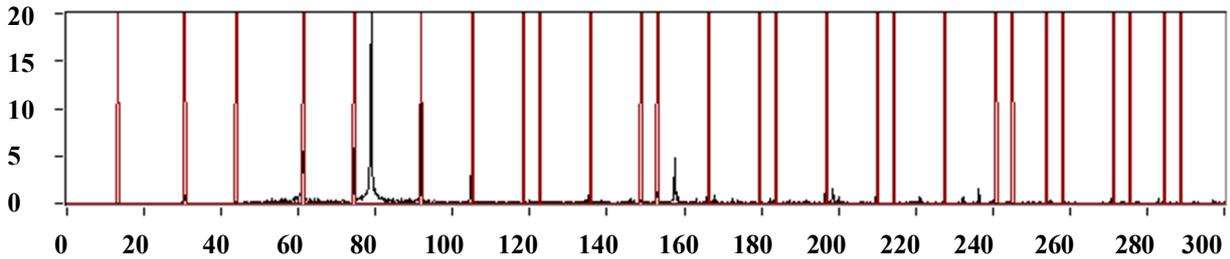


Рис. 9. Спектр вибрации подшипника 629 Z (Китай) с наложенной маской для внутреннего кольца

где f_c – частота сепаратора, Гц; z – количество шариков; n – номер гармоники, $n=1, 2, \dots, k$;

– частота, связанная с прохождением комплекта шаров по внутреннему кольцу ПК:

$$f_s = f_{c(s)} z n, \text{ Гц},$$

где $f_{c(s)}$ – частота сепаратора относительно вращающегося внутреннего кольца ПК; n – номер гармоники, $n=1, 2, \dots, k$;

– частота, связанная с обкатом комплекта шаров в ПК:

$$f_w = n f_w, \text{ Гц},$$

где n – номер гармоники, $n=2, 4, \dots, k$.

Для ПК 629 Z (NSK) контроль частоты, связанной с прохождением комплекта шаров по наружному кольцу (характеризующей единичный дефект кольца или вибрацию, связанную с переменной жёсткостью ПК) даёт следующие результаты:

$$f_c = \frac{30,5}{2} \left(1 - \frac{4,763}{17,7} 0,9537 \right) = 11,34 \text{ Гц}$$

при рабочем угле $\alpha=17,5$ град;

$$f_{c(s)} = \frac{30,5}{2} \left(1 + \frac{4,763}{17,7} 0,9537 \right) = 19,16 \text{ Гц};$$

$$f_c + f_{c(s)} = f_s = 30,5 \text{ Гц};$$

$$f_n = f_c z = 11,34 \cdot 7 = 79,38 \text{ Гц};$$

$$f_s = f_{c(e)}z = 19,16 \cdot 7 = 134,12 \text{ Гц.}$$

На рис. 4 – 6 приведены реальные спектры ПК 629 Z (NSK) и ПК 629 Z (Китай). С помощью компьютерных масок идентифицированы основные частоты, представленные выше.

Анализ спектров рис. 4 – 9 показал удовлетворительную сходимость измеренных и расчётных (программных) величин, характер и насыщенность обоих спектров близки, а уровень вибрации от наружного кольца у обоих видов ПК существенно превосходит уровень вибрации от внутреннего кольца.

Это обстоятельство было подтверждено при разделении уровней вибрации генерируемых ПК 629 Z и ПК 629 Z (NSK) в 3 полосах частот по виброскорости. Выборка по 5 шт. ПК. Типовые результаты приведены в табл. 1 и 2 (графа «Проценты»), где показан вклад (в %) в виброактивность подшипника каждого элемента ПК.

Из таблиц видно, что уровни вибрации обоих видов ПК достаточно близки, а также, что как у ПК 629 Z NSK, так и у ПК 629 Z основной вклад в виброактивность вносит наружное кольцо.

Таблица 1

ПК 629 Z NSK

№ ПК	Виброскорость, мкм/с; дБ			Проценты		
	Низкие	Средние	Высокие	Внутр.	Наружн.	Шары
1	32	13	27	47	7	46
2	38	15	12	40	19	41
3	42	21	21	31	40	29
4	33	20	26	30	38	32
5	37	28	21	6	87	6

Таблица 2

ПК 629 Z

№ ПК	Виброскорость, мкм/с; дБ			Проценты		
	Низкие	Средние	Высокие	Внутр.	Наружн.	Шары
23	20	11	15	27	57	16
24	44	11	15	3	94	3
25	50	10	13	18	63	19
26	44	17	14	6	84	8

Выводы

1. Проведённые исследования и анализ документации на ПК показали, что в отношении точности изготовления элементов ПК: колец (волнистость, отклонение продольного профиля, боковое биение, неперпендикулярность торцов к внутреннему и наружному диаметрам ПК), шариков (разноразмерность, отклонение от круглости), сепаратора (центрирование, зазор между шариками и гнездами сепаратора, небаланс), величины шероховатости деталей ПК, качество изготовления ПК 629 Z (Китай) практически не отличается от качества изготовления ПК 629 Z (NSK).

2. Норма V_3 производителей ПК (вибрация $\mu\text{m/s}$ (50 – 300) Гц; $44 \mu\text{m/s}$: (300 – 1800) Гц; $28 \mu\text{m/s}$; (1800 – 10000) Гц; $24 \mu\text{m/s}$) вводит весьма жёсткие ограничения на виброактивность подшипников этого типоразмера. За малым исключением (закрашенные строки табл. 1 – 2) ПК в своей массе практически соответствуют норме V_3 , что дополнительно свидетельствует о их высоком качестве.

3. Контроль геометрических размеров ПК 629 Z, ПК 629 Z (NSK) показал, что они идентичны и, что все они находятся в пределах допуска класса P0.

4. Выявленное при тестовом анализе различие характеристик микропроб смазок в ПК 629 Z (NSK) и в ПК 629 Z требует более детального изучения рабочих характеристик применённых пластичных смазок, либо использования в ПК проверенных отечественных пластичных смазок.

5. Анализ конструктивных особенностей ПК 629 Z (NSK) и ПК 629 Z выходит за рамки настоящего исследования.

6. Представленные данные следует понимать как предварительные, тем не менее дающие основания полагать, что приборные ПК производства Китая могут заместить изделия европейских производителей. Для полноты картины следует провести дополнительное исследование ПК классов P5 и P4, а также изделия другого размерного ряда.

Литература

1. Воронкин В. А., Геча В. Я. Практический метод оценки качества свободных приборных подшипников качения // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2001. – Т. 100.
 2. Воронкин В. А., Геча В. Я. Алгоритм анализа вибросигналов, возбуждаемых подшипниками качения электромеханических устройств // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. Приборы и сферы использования космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Итоги и перспективы развития. – 2005. – Т. 102.

3. Воронкин В. А., Евланов В. В. Тестирование работоспособности смазочных материалов для изделий космической техники // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. Приборы и сферы использования космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Итоги и перспективы развития. – 2005. – Т. 102.
4. Подшипники качения. Справочник-каталог /под ред. Н. В. Нарышкина и Р. В. Коросташевского. – М.: Машиностроение, 1984.
5. Зайцев В. А., Воронкин В. А. Расчёт осевых усилий и рабочих углов контакта подшипников качения при оценке их качества на стендах // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2009. – Т. 108. – № 1.

Поступила в редакцию 09.10.2014

Вячеслав Анатольевич Воронкин, канд. техн. наук,
начальник лаборатории, т. (495)366-33-65,
e-mail: vniiem@vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

QUALITY RATING OF THE INSTRUMENT BEARINGS, MANUFACTURED IN JAPAN AND CHINA

V.A. Voronkin

Due to the significant changes on the European market of the free rolling bearings, it is essential to evaluate the quality of these products supplied on the Asian market and above all – by China. Quality rating, evaluation of the limited edition of the single-type rolling bearings manufactured in China and Japan has been made, based on the fact, that the recognized quality of the Japanese rolling bearings meets the highest standards of the European producers. It's not just the quality of bearings itself, that has been evaluated, but also – the quality of grease coating, applied to it. The rolling bearings documentation analysis as well as the research performed – indicated that the Chinese rolling bearings' production quality does not differ much from the production quality of the NSK company (Japan), when referring to the manufacturing accuracy of the rolling bearings' components: Rings, retainers, and the roughness value of the rolling bearings' surface. Both the Chinese and Japanese components almost correspond to the V3 specification requirements, when referred to the vibration parameters, which also signalizes about the high quality of those components. In view of the above – we may conclude, that the rolling bearings of the Chinese manufacturing look very promising as a replacement for the corresponding analogies of the European manufacturers.

Key words: Rolling bearing, grease, vibration activities, spectral analysis, bearings' quality valuation methods, grease testing system.

References

1. Voronkin V. A., Gecha V. IA. Practical valuation method of the instrument free rolling bearings' quality. Tractates of NPP VNIEM. – 2001. – Т. 100.
2. Voronkin V. A., Gecha V. IA. Algorithm, analyzing the vibration signals, stimulated by the rolling bearings of the electromechanical devices // Electromechanical matters. Tractates of NPP VNIEM. Instruments and fields of application for the Earth's remote probing space crafts. Final results and development perspectives. – 2005. – Т. 102.
3. Voronkin V. A., Evlanov V. V. Greasing substances operability testing for the space-system engineering products // Electromechanical matters. Tractates of NPP VNIEM. Instruments and utilization areas of the Earth's remote probing space crafts. Final results and development perspectives. – 2005. – Т. 102.
4. Rolling bearings. Reference-catalog / edited by N. V. Naryshkin and R. V. Korostashevskiy. – М: Machine industry, 1984.
5. Zaitcev V. A., Voronkin V. A. Calculating the rolling bearings' operating angles of contact as well as its axial thrust values, while the quality of rolling bearings is being rated at the test-bench // Electromechanical matters. Tractates of NPP VNIEM. – 2009. – Т. 108. – № 1.

Viacheslav Anatolevich Voronkin, Candidate of Engineering,
Head of Laboratory, tel.: (495)366-33-65,
e-mail: vniiem@vniiem.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).