

УДК 621.55.01.81, 658.58

DOI 10.18698/0536-1044-2017-3-48-55

Диагностика подшипников качения фазохронометрическим методом*

В.И. Пронякин, Е.А. Кудрявцев, А.С. Комшин, К.Г. Потапов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

The Diagnostics of Roller Bearings Using the Phase-Chronometric Method

V.I. Pronyakin, E.A. Kudryavtsev, A.S. Komshin, K.G. Potapov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

@ e-mail: vip-u@yandex.ru

i Актуальность статьи обусловлена широким применением подшипников качения в машинах и механизмах и необходимостью дальнейшей разработки эффективных методов и средств диагностики в условиях эксплуатации подшипниковых опор. На виброакустические и электропараметрические методы диагностирования подшипников качения приходится около 60 % изобретений. Рассмотрено использование фазохронометрического метода для диагностики и аварийной защиты подшипников качения в процессе работы, который обеспечивает информационно-метрологическое сопровождение подшипника в течение его жизненного цикла на базе единого формата измерительной информации (интервалы времени) и средств измерений. Приведены схема измерения параметров и состав фазохронометрической системы. Путем математической обработки полученных рядов интервалов времени определены характеристики, сопровождающие работу подшипников качения и являющиеся их устойчивым фазохронометрическим портретом. Для взаимосвязи результатов измерений интервалов времени с конструкцией подшипников качения и зарождающимися дефектами использована математическая модель в фазохронометрическом представлении, разработанная на базе теории машин и механизмов. Представлены результаты расчета, показывающие возможность моделирования дефектов и разработки их классификации на этапе создания подшипника качения. Проведена оценка возможности диагностики подшипника при съеме информации только с вала вращающегося кольца.

Ключевые слова: подшипник качения, подшипниковая опора, зарождающиеся дефекты, математическая модель, фазохронометрический метод диагностики, информационно-метрологическое сопровождение.

i This paper is prompted by the wide use of roller bearings in machines and mechanisms and the necessity to further develop efficient methods and diagnostic tools for bearing assemblies under operation. Vibroacoustic and electroparametric methods of diagnostics account for about 60% of innovations. The use of the phase-chronometric method for diagnostics and emergency protection of roller bearings in operation is studied in the paper. This method provides information-metrological support of the bearing throughout its life cycle using

* Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-3625.2015.8. Отдельные результаты поддержаны в рамках НИР 9.1265.2014/К по выполнению проектной части государственного задания в рамках научной деятельности (код проекта 1265), а также НИР в рамках базовой части государственного задания № 2088.

the unified format of the measured data (time intervals) and measurement instruments. The diagram of parameter measurement and the design of the phase-chronometric system are shown. Using mathematical analysis of the obtained series of time intervals, the characteristics pertaining to the operation of roller bearings and describing their phase-chronometric features are determined. A mathematical model in the phase-chronometric formulation based on the theory of machines and mechanisms is used to link the results of the time interval measurements with the design of roller bearings and emerging defects. The calculation results that demonstrate the possibility of modelling defects and developing their classification at the design stage of roller bearings are presented. The authors assess the possibility of performing diagnostics of the bearing when data is obtained only from the shaft of the rotating ring.

Keywords: roller bearing, bearing assembly, emerging defects, mathematical model, phase-chronometric method of diagnostics, information-metrological support.

Подшипники качения (ПК) являются одними из самых распространенных технических устройств, применяемых в машинах и механизмах. Они в значительной степени определяют надежность и работоспособность устройства, вследствие чего разработка методов и средств диагностики и аварийной защиты подшипниковых опор в условиях эксплуатации является актуальной задачей. Среди методов и средств диагностики преобладают оценки вибросостояния подшипников [1–4]. При этом на виброакустические и электропараметрические методы диагностирования ПК приходится около 60 % изобретений.

Причиной вибраций являются колебательные процессы, возникающие при взаимодействии частей устройства [1–5]. Машины и механизмы из-за погрешностей изготовления имеют характерные вибрации, уровень которых, как правило, значительно выше, чем у сигналов от зарождающихся дефектов. Вследствие приработки, изнашивания, изменения режимов работы, условий эксплуатации и деградации технической системы происходит неизбежное изменение параметров колебательных процессов. В связи с этим отсутствуют устойчивые во времени диагностические признаки, необходимые для диагностики ПК. Устанавливаемые предельные значения параметров вибрации и спектры отражают статистические, а не индивидуальные характеристики работы устройств [1].

Цель работы — представить принципиально новый подход к получению информации о работе подшипниковых опор.

Фазохронометрический метод диагностики роторных машин и механизмов, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана [6–9], позволяет реализовать информационно-метрологическое со-

провождение ПК в течение его жизненного цикла на базе единых подхода и структуры фазохронометрических систем (ФХС). На всех этапах жизненного цикла ПК измеряемой величиной являются интервалы времени, соответствующие кинематическим параметрам движения вращающихся элементов ПК. Обработка рядов интервалов времени позволяет получить стабильные характеристики для оценки технического состояния ПК. Метрологический уровень ФХС (относительная погрешность $5 \cdot 10^{-4}$ % от номинального периода на промышленной частоте) позволяет охватить весь диапазон режимов работы ПК и выявить зарождающиеся дефекты.

Пример ФХС для диагностики подшипника приведен на рис. 1.

ФХС измеряет вариации интервалов времени, соответствующие полному обороту и его долям вращающегося кольца подшипника, обороту сепаратора и перемещению тел качения внутри оборота на заданное угловое расстояние между ними. В результате измерений формируются ряды интервалов времени. Математическая обработка полученных рядов

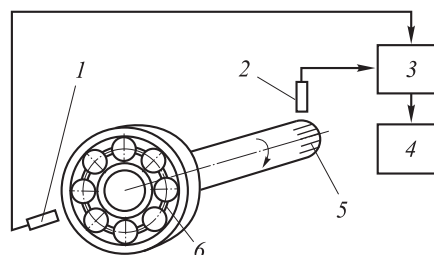


Рис. 1. Фазохронометрическая система диагностики ПК:

- 1 — датчик сепаратора; 2 — датчик; 3 — блок измерения интервалов времени и обработки информации; 4 — компьютер; 5 — информационные метки; 6 — сепаратор

интервалов времени позволяет определить диагностические признаки, сопровождающие работу и являющиеся устойчивым фазохронометрическим портретом ПК.

ФХС (см. рис. 1) включает в себя первичные преобразователи (датчики) 1 и 2, вырабатывающие измерительные импульсы при прохождении мимо них тел качения, сепаратора 6 или специальных информационных меток 5, а также блок измерения интервалов времени и обработки информации 3, связанный с компьютером 4. Наиболее эффективной является диагностика ПК, когда измеряются интервалы времени, соответствующие параметрам движения вращающегося кольца, сепаратора и тел качения. В этом случае гарантируются и выявление нарушений в работе ПК (например, заклинивание), и надежная аварийная защита [10].

В настоящее время тенденцией в совершенствовании ПК является создание функциональных и зачастую полностью закрытых ПК, рассчитанных на гарантийный пробег (например, буксовые подшипники фирмы SKF). Однако сложные условия эксплуатации не исключают необходимости диагностирования подшипниковой опоры. В данном варианте для съема диагностической информации имеется доступ только к вращающемуся валу. Для взаимосвязи результатов измерений интервалов времени с конструкцией ПК и зарождающимися дефектами используют математическую модель в фазохронометрическом представлении на базе теории машин и механизмов. Результаты расчета представляют собой ряды интервалов времени, соответствующие данным реальных измерений

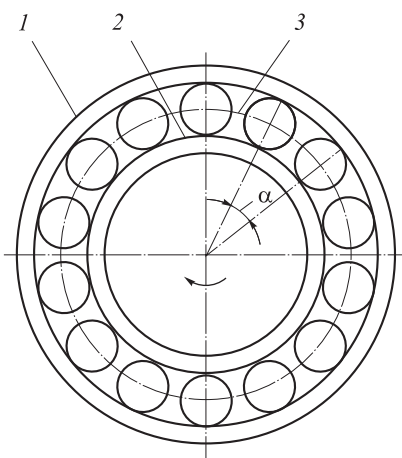


Рис. 2. Схема работы подшипника качения:
1 — наружное кольцо; 2 — внутреннее кольцо;
3 — сепаратор

с применением ФХС. Математическое моделирование формирует диагностический признак дефекта в виде алгоритма обработки измерительной информации.

В данной статье представлена математическая модель для случая, когда внешнее кольцо зафиксировано в опоре, а внутреннее — вращается вместе с валом. Подшипник испытывает воздействие постоянной радиальной нагрузки. Между дорожкой и роликом имеет место эластичная деформация, и процессы описываются с применением инструментария теории Герца.

Объединив модели всех тел качения, связанных между собой углами α (рис. 2), получим систему уравнений. Поскольку она нелинейная, для ее решения необходимо выполнить линеаризацию, обеспечивающую связь приращений параметров модели. Связав приращения угла вращения $\Delta\alpha$ и интервалов времени (периодов) ΔT , имеем

$$\Delta T = -\frac{2\pi\Delta\omega}{\omega_0^2} = -\frac{2\pi\Delta\dot{\alpha}}{\omega_0^2}, \quad (1)$$

где $\Delta\omega$, $\Delta\dot{\alpha}$ — колебание угловой скорости сепаратора; ω_0 — угловая скорость сепаратора в установившемся режиме.

Введя для всех роликов связь между изменениями угла вращения и интервала времени, получим зависимость в общем виде

$$\Delta T_n = f(\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3, \dots, \Delta\varphi_n, \Delta N_n, \Delta F_n), \quad (2)$$

где n — количество тел качения; $\Delta\varphi_i$ — приращение угла положения центра i -го тела качения относительно центра колец подшипника, $i = 1, \dots, n$; ΔN_n — дополнительная нагрузка, связанная с функционированием ПК (например, для буксового подшипника воздействие при прохождении стрелки колесной парой); ΔF_n — приращение сил трения от изменения различных факторов.

Рассмотрим возможности фазохронометрической диагностики при снятии измерительной информации с вала, вращающегося вместе с кольцом ПК, на примере системы электродвигатель–муфта–вал на двух подшипниковых опорах и с радиальной нагрузкой на вал.

Для систем, в которых происходят потери энергии на трение, уравнение баланса мощности можно записать в виде

$$P_{\text{под}} = P_{\text{пол}} + P_{\text{тр}},$$

где $P_{\text{под}}$ и $P_{\text{пол}}$ — подводимая и полезная мощность; $P_{\text{тр}}$ — мощность потерь на трение.

Известно, что мощность можно вычислить через произведение момента силы на угловую скорость вращения. Тогда уравнение баланса для системы, представленной на рис. 2, можно переписать в виде

$$M_d \omega_d = M_n \omega + (M_{ПК1} \omega + M_{ПК2} \omega),$$

где ω_d, ω — угловые скорости вращения двигателя и вала соответственно; M_d — крутящий момент электродвигателя; M_n — момент сопротивления присоединенной к двигателю нагрузки; $M_{ПК1}, M_{ПК2}$ — моменты трения в первом и втором подшипниках соответственно.

Полагая, что двигатель отдает постоянную мощность при установившемся режиме работы системы, следует рассматривать уравнение равновесия

$$(M_{н0} + M_{ПК10} + M_{ПК20}) \omega_0 = (M_{н1} + M_{ПК11} + M_{ПК21}) \omega_1,$$

где индексом «0» обозначено начальное состояние системы, а индексом «1» — состояние, регистрируемое в данный промежуток времени.

Уравнение (1) можно переписать в фазохронометрическом представлении

$$(M_{н0} + M_{ПК10} + M_{ПК20}) \frac{2\pi}{\tau_0 k} = (M_{н1} + M_{ПК11} + M_{ПК21}) \frac{2\pi}{\tau_1 k},$$

где τ_0 и τ_1 — регистрируемые доли оборота вала; k — количество долей, на которые разбит один оборот.

Различные дефекты ПК влияют на баланс мощности и вызывают изменения в угловой скорости вращения разного характера.

Рассмотрим ситуацию при наличии в одном из ПК дефекта тела качения и выкрашивания в локальной зоне. При прохождении телом качения этой зоны будет возникать микроудар. Согласно уравнению баланса мощности, микроудар приведет к скачкообразному изменению момента сопротивления в подшипнике, что, в свою очередь, найдет отражение в регистрируемых интервалах времени.

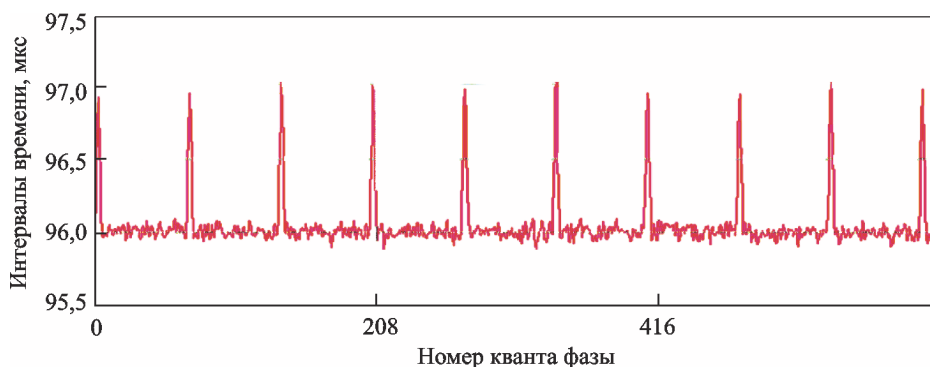


Рис. 3. Расчетная хронограмма вращения вала при наличии дефектного шарика в подшипнике

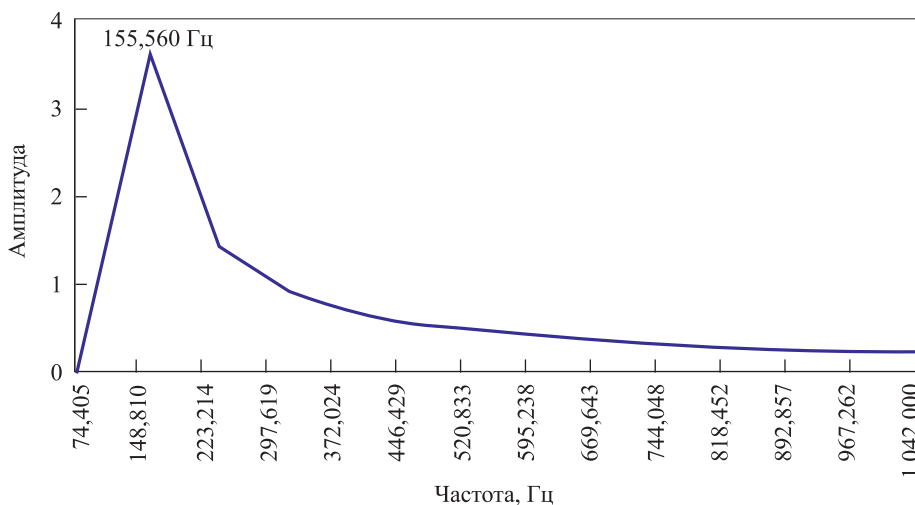


Рис. 4. Спектр хронограммы вращения вала при наличии дефектного шарика одного из подшипников

Частоту вращения тела качения вокруг своей оси при условии, что оно вызвано движением внутреннего кольца, можно определить из выражения

$$f_T = f_B \left(\frac{d_{cp}}{d_T} - 1 \right),$$

где f_B — частота вращения внутреннего кольца; d_T и d_{cp} — диаметр тела качения и средний диаметр ПК.

Для реализации модельного эксперимента приняты следующие параметры: $d_{cp} = 85$ мм; $d_T = 15$ мм; $f_B = 1\,000$ мин⁻¹.

В системе присутствует случайный шум, связанный с нелинейностью зазоров и распределенный по нормальному закону со следующими параметрами:

$$M = 0; \sigma = 0,0004 \frac{1}{625 f_B},$$

где M — математическое ожидание шума; σ — дисперсия шума; 625 — количество долей, на которые разбит один оборот рабочего цикла.

Для данного случая расчетная хронограмма вращения вала представлена на рис. 3.

При заданных параметрах подшипника за один оборот внутреннего кольца тело качения

делает пять оборотов вокруг своей оси. С учетом двух ударов за оборот на хронограмме вращения будут выделяться 10 пиков. Проведение спектрального анализа позволяет определить доминирующую частоту при возмущении, отражающемся в хронограмме вращения (рис. 4).

Экспериментальные работы по измерению интервалов времени, соответствующих обороту шпинделя и его долей, выполнены на металлорежущем оборудовании (модернизированный вариант станка — 16К20Ф3), в котором был обнаружен дефект сборки, приводивший к проскальзыванию тел качения в переднем подшипнике.

На рис. 5, а показан пример хронограммы при проскальзывании тел качения в переднем подшипнике металлорежущего станка на частоте вращения шпинделя 1 000 мин⁻¹, а на рис. 5, б — без их проскальзывания.

При отсутствии проскальзывания тел качения характер вращения в целом является равномерным. В случае возникновения проскальзывания появляются «скачки» при вращении, регистрируемые через равные промежутки времени. В соответствии с уравнением баланса (2) происходит периодическое повышение мо-

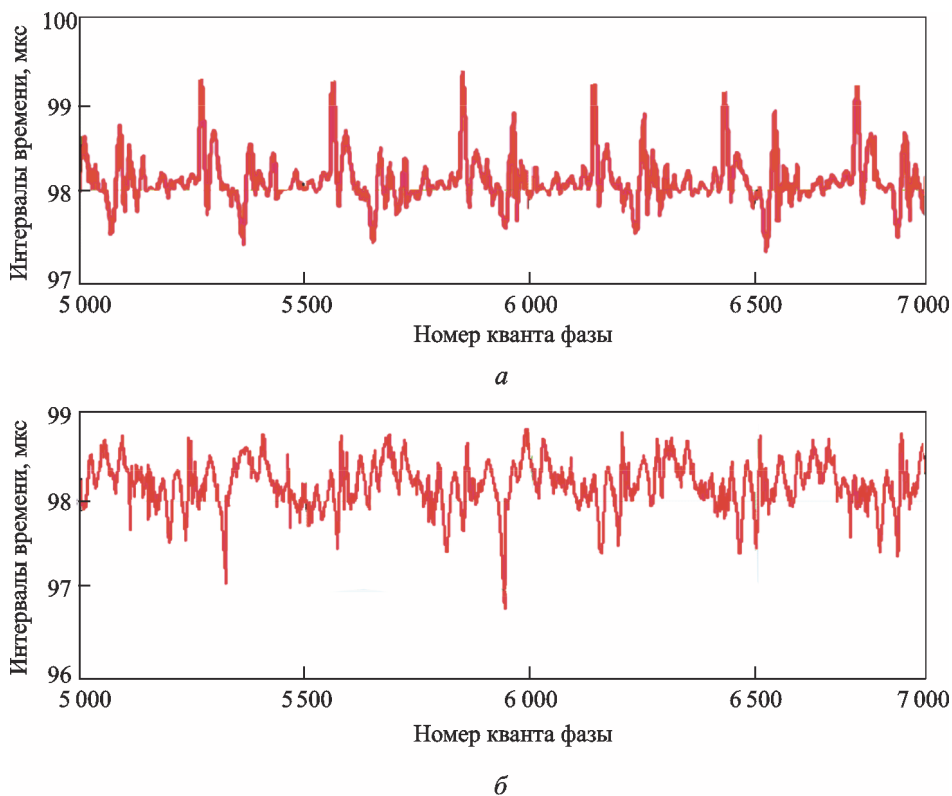


Рис. 5. Хронограммы при наличии (а) и отсутствии (б) проскальзывания тел качения в переднем шпиндельном подшипнике металлорежущего станка

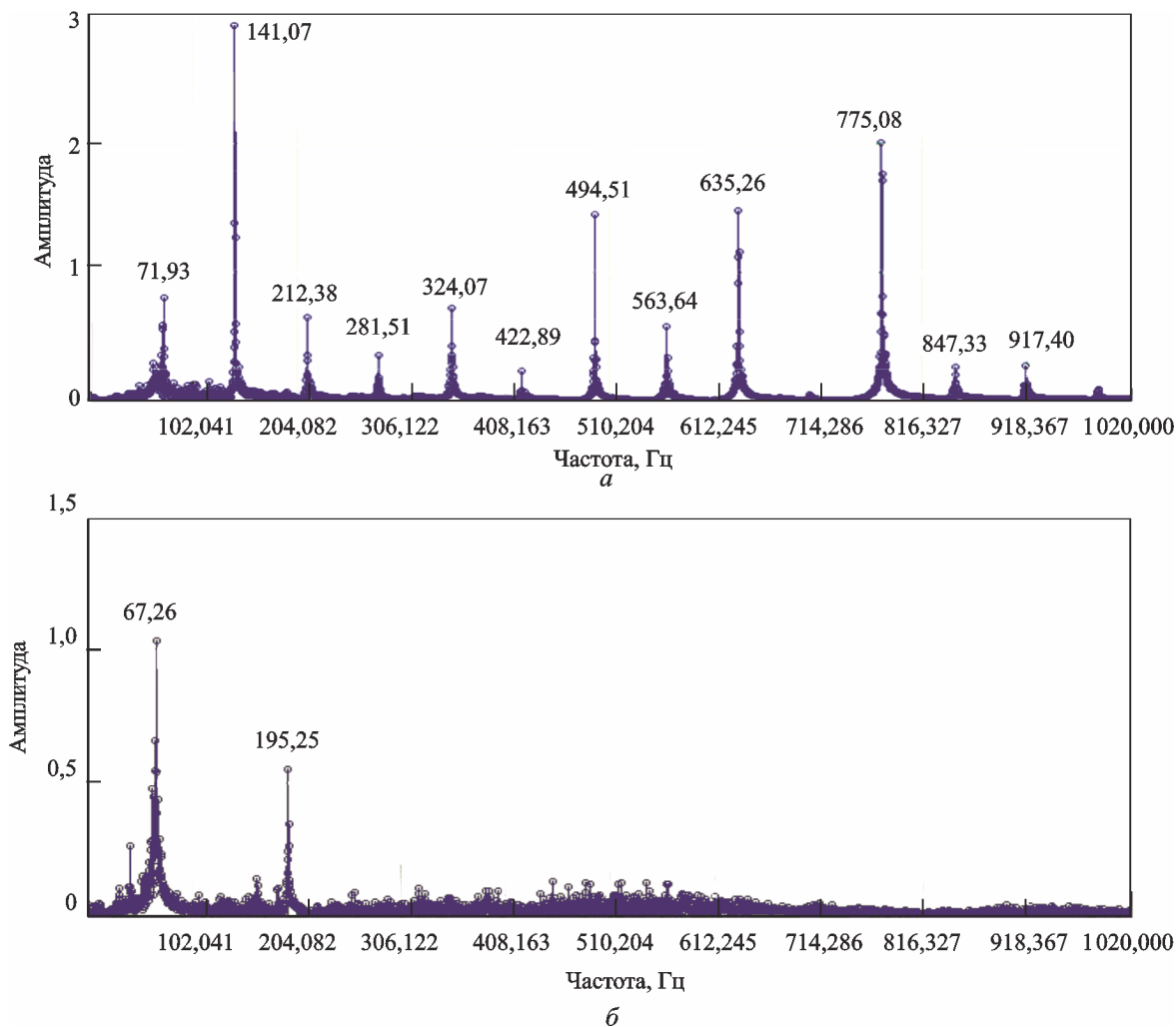


Рис. 6. Спектры хронограммы вращения вала при наличии (а) и отсутствии (б) проскальзывания подшипника в режиме холостого хода

мента сопротивления в системе. Ослабление опоры приводит к уменьшению жесткости системы и появлению моментов дисбаланса и гироскопических моментов сил. В результате нагрузка на вторую, более жесткую опору возрастает и приводит к изменению параметров ее движения. Спектральный анализ хронограмм позволяет выявить данные изменения. Частоты, присутствующие в спектрах, кратны частоте перекатывания тел качения по внутреннему кольцу.

Спектральный анализ хронограмм (рис. 6) показал значительное различие в работе подшипниковой опоры и возможность выявления диагностических признаков проскальзывания подшипника.

Например, появление микротрещин и естественный износ тел качения будет сопровождаться изменением интервалов времени враще-

ния сепаратора, соответствующих долям оборота между соседними телами качения. При этом скорость вращения сепаратора уменьшается, а временные интервалы между роликами увеличиваются. Данная характеристика также связана с естественным износом подшипника.

Выводы

Предлагаемый подход позволяет выполнять диагностику подшипников путем регистрации изменения параметров движения их элементов уже на стадии зарождения дефектов. При этом обеспечивается получение устойчивых диагностических признаков в течение всего процесса эксплуатации, на базе которых в сочетании с математическим моделированием формируется алгоритм обработки измерительной информации.

Литература

- [1] Рагульскис К.М., Юркаускас А.Ю. *Вибрация подшипников*. Ленинград, Машиностроение, 1985. 119 с.
- [2] Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. *Диагностика технологических систем*. Ч. 2. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 128 с.
- [3] Барков А.В., Баркова Н.А. *Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации*. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГМТУ, 2004. 156 с.
- [4] Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. *Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации*. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГМТУ, 2000. 169 с.
- [5] Генкин М.Д., Соколова А.Г. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов*. Москва, Машиностроение, 1987. 288 с.
- [6] Булатов В.П., ред. *Проблемы машиноведения: точность, трение и износ, надежность, перспективные технологии*. Санкт-Петербург, Наука, 2005. 740 с.
- [7] Пронякин В.И., Тумакова Е.В. Методы и средства измерений, испытаний и эксплуатации изделий авиакосмической техники. *Авиакосмическое приборостроение*, 2016, № 11, с. 30–36.
- [8] Комшин А.С. Математическое моделирование измерительно-вычислительного контроля электромеханических параметров турбоагрегатов фазохронометрическим методом. *Измерительная техника*, 2013, № 8, с. 12–15.
- [9] Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. Реализация измерительной фазохронометрической системы для диагностики технического состояния токарных станков. *Приборы*, 2014, № 5, с. 18–22.
- [10] Пронякин В.И., Киселев М.И., Комшин А.С., Кудрявцев Е.А. *Способ (варианты) и устройство диагностики подшипника качения*. Пат. 2536797 РФ, 2012, бюл. № 36. 9 с.

References

- [1] Ragul'skis K.M., Iurkauskas A.Iu. *Vibratsiia podshipnikov* [Vibration bearings]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1985. 119 p.
- [2] Gavrilin A.N., Moizes B.B. *Diagnostika tekhnologicheskikh sistem. Ch. 2* [Diagnosis of technological systems. Pt 1]. Tomsk, TPU publ., 2014. 128 p.
- [3] Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibratsionnaia diagnostika mashin i oborudovaniia. Analiz vibratsii* [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis]. St. Petersburg, SPbSMTU publ., 2004. 156 p.
- [4] Barkov A.V., Barkova N.A., Azovtsev A.Iu. *Monitoring i diagnostika rotornykh mashin po vibratsii* [Monitoring and diagnosis of rotating machines by vibration]. St. Petersburg, SPbSMTU publ., 2000. 169 p.
- [5] Genkin M.D., Sokolova A.G. *Vibroakusticheskaia diagnostika mashin i mekhanizmov* [Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1987. 288 p.
- [6] *Problemy mashinovedeniia: tochnost', trenie i iznos, nadezhnost', perspektivnye tekhnologii* [Problems of mechanical engineering: accuracy, friction and wear, reliability, advanced technologies]. Ed. Bulatov V.P. St. Petersburg, Nauka publ., 2005. 740 p.
- [7] Proniakin V.I., Tumakova E.V. *Metody i sredstva izmerenii, ispytanii i ekspluatatsii izdelii aviakosmicheskoi tekhniki* [Methods and measuring tools, tests and operation of products in aviation branch]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making]. 2016, no. 11, pp. 30–36.
- [8] Komshin A.S. Mathematical modelling of measurement-computational monitoring of the electromechanical parameters of turbine units by a phase-chronometric method. *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 8, pp. 850–855.
- [9] Potapov K.G., Syritskii A.B. *Realizatsiia izmeritel'noi fazokhronometricheskoi sistemy dlia diagnostiki tekhnicheskogo sostoiianiia tokarnykh stankov* [Realization of measurement phasechronometric system for technical state diagnostic of lathes]. *Pribory* [Instruments]. 2014, no. 5, pp. 18–22.

- [10] Proniakin V.I., Kiselev M.I., Komshin A.S., Kudriavtsev E.A. *Sposob (varianty) i ustroistvo diagnostiki podshipnika kachenii* [Method (variants) and device diagnostic rolling bearing]. Patent RF no. 2536797, 2012. 9 p.

Статья поступила в редакцию 10.11.2016

Информация об авторах

ПРОНЯКИН Владимир Ильич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Метрология и взаимозаменяемость». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vip-u@yandex.ru).

КУДРЯВЦЕВ Евгений Александрович (Москва) — ведущий инженер. НИИ КМ и ТП МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

КОМШИН Александр Сергеевич (Москва) — доцент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ПОТАПОВ Константин Геннадьевич (Москва) — кандидат технических наук, ассистент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

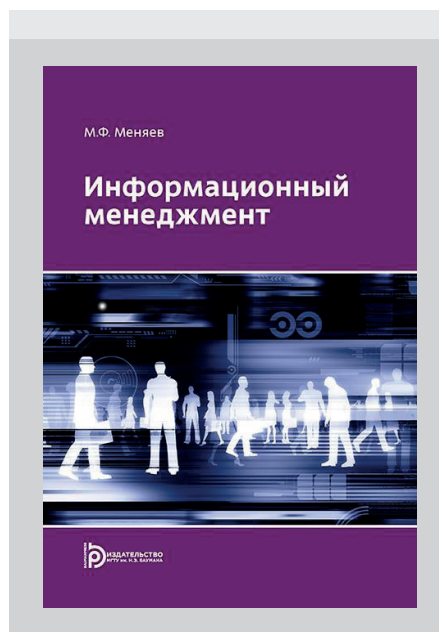
Information about the authors

PRONYAKIN Vladimir Ilyich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department Metrology and Interchangeability. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vip-u@yandex.ru).

KUDRYAVTSEV Evgeniy Aleksandrovich (Moscow) — Leading Engineer. Scientific and Research Institute of Construction Materials and Engineering Processes, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

KOMSHIN Aleksandr Sergeevich (Moscow) — Associate Professor, Metrology and Interchangeability Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

POTAPOV Konstantin Gennadievich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Teaching Assistant, Metrology and Interchangeability Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник
М.Ф. Меняева

«Информационный менеджмент»

Учебник знакомит с основными научными концепциями в области информационного менеджмента. Рассмотрены методологические и практические вопросы классификации и использования информационных технологий в управлении ресурсами организации и связанные с ними вопросы построения и оптимизации системы информационного управления предприятием.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru