

ПРАКТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВОБОДНЫХ ПРИБОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

С разрушением монопольного рынка производства подшипников качения, существовавшего в СССР, перед многими производителями электромашин возникает необходимость комплектации своих изделий импортными подшипниками. Проблема заключается в том, что в документацию на серийные изделия в обязательном порядке входит ведомость согласования применённых подшипников, однозначно определяющая гарантированный срок службы и ресурс изделия, а при вынужденной комплектации серийных изделий подшипниками других фирм-производителей возникает необходимость подтверждения гарантий на изделие вновь, для чего необходимо проводить новые длительные ресурсные испытания изделия.

Целью настоящей работы является создание методики испытаний свободных приборных подшипников качения (ПК), которая смогла бы обосновать возможность замены отечественных ПК на аналогичные импортные с сохранением гарантии на достигнутые ресурсы и сроки службы микроэлектродвигателей, в которых изначально применялись отечественные ПК.

Для решения поставленной задачи был задействован программно-аппаратный комплекс ВНИПП, предназначенный для контроля процесса изготовления элементов ПК. Возможность использования данного комплекса основывалась на следующем утверждении: если геометрические размеры сравниваемых ПК, характеристики стали и закладываемой смазки одинаковы, а также, если начальные несовершенства (гранность, волнистость и шероховатость) основных элементов ПК (шаров, наружного и внутреннего колец) и степень загрязненности смазки «равноценны», то можно полагать, что ресурс работы этих подшипников будет одинаков при одинаковых условиях эксплуатации. основополагающий момент данного утверждения – способ оценки «равноценности» несовершенств изготовления ПК и загрязненности смазки.

В качестве дополнения для решения этой же задачи была разработана вспомогательная методика оценки качества ПК. Эта методика основывалась на следующем близком к предыдущему, утверждении: если геометрические размеры сравниваемых ПК, характеристики стали и закладываемой смазки одинаковы, а также, если

назначенные характеристики виброактивности ПК «равноценны» в начальной стадии, то можно полагать, что ресурс работы этих ПК будет одинаков при одинаковых условиях эксплуатации. Основной вопрос этой методики – оценка характеристик виброактивности ПК. В качестве критериев такой оценки теоретически могут быть предложены: анализ среднего квадратичного значения общего уровня вибрации, статистические методы, уровни характерных дискретных составляющих, значения пик-фактора и некоторые другие [1-3]. В разработанной методике, виброактивность ПК оценивается и сравнивается с помощью характеристик метода анализа спектра огибающей.

С помощью указанных методик были исследованы две группы типопредставителей отечественных и импортных приборных радиальных однорядных шарикоподшипников, технические данные которых приведены в табл.1.

Таблица 1

| Тип ПК | Наружный диаметр, мм | Внутренний диаметр, мм | Диаметр шарика, мм | Число шаров | Класс точности |
|---------|----------------------|------------------------|--------------------|-------------|----------------|
| 6001-2Z | 28 | 12 | 4,76 | 8 | 5 |
| 60201 | 32 | 12 | 5,56 | 7 | 0 |

В состав программно-аппаратного комплекса (рис. 1) входили:

1 - приводная установка КВП-3. Набор усилителей НЧ, набор специальных фильтров НЧ, согласующий усилитель, датчик (не-стандартный, повышенной чувствительности для ПК малых размеров), специальная система установки и контроля датчика, оснастка;

2 - аппаратура изображения и вывода сигнала, специальная плата обработки сигнала с ПК;

3 - программное обеспечение: пакет обработки сигналов, пакет диагностики подшипников и смазочного материала.

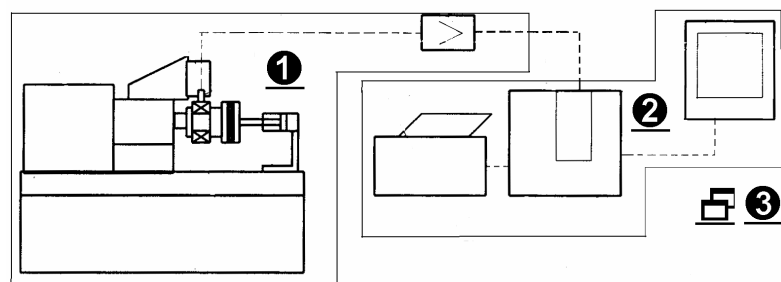


Рис. 1. Схема программно-аппаратного комплекса

Ввод вибросигнала производился в трех режимах. Частота среза фильтра устанавливалась программно поочередно на 300, 1800 и 10000 Гц. Вибросигналы после их преобразования в цифровую форму записывались в буфер памяти компьютера, а затем подвергались преобразованию Фурье и усреднению. В итоге анализировались три амплитудных спектра виброускорений в трех полосах частот: (50 – 300), (300 – 1800) и (1800 – 10000) Гц. Данные полосы частот выбраны так в связи с тем, что вибрации в них определяются наличием различных несовершенств на элементах ПК, а именно, преимущественно гранностью, волнистостью и шероховатостью.

В основу программы вибродиагностики, был положен метод узкополосного спектрального анализа. Суть программы метода заключается в том, что в спектре вибраций выделяются дискретные составляющие, частоты которых определяются механизмом возбуждения вибраций, вызываемых несовершенствами отдельных элементов подшипника: шаров, сепаратора, дорожек качения наружного и внутреннего колец [4].

Ниже приводятся использованные формулы для определения этих частот:

$$f_c = \frac{1}{2} f_1 \left[1 - \frac{d_{ш}}{d_c} \cos(\alpha) \right];$$

$$f_n = \frac{1}{2} f_1 \left[1 - \frac{d_{ш}}{d_c} \cos(\alpha) \right] Z = f_c \cdot Z;$$

$$f_b = \frac{1}{2} f_1 \left[1 + \frac{d_{ш}}{d_c} \cos(\alpha) \right] Z = (f_1 - f_c) Z;$$

$$f_{ш} = \frac{1}{2} f_1 \frac{d_c}{d_{ш}} \left[1 - \frac{d_{ш}^2}{d_c^2} \cos^2(\alpha) \right],$$

где f_1 - частота вращения ротора и, соответственно, внутреннего кольца, f_c - частота вращения сепаратора относительно наружного кольца, f_n - частота перекачивания шаров по наружному кольцу, f_b - частота перекачивания шаров по внутреннему кольцу, $f_{ш}$ - частота вращения шаров относительно поверхности колец, $d_{ш}$ - диаметр шара, d_c - диаметр сепаратора, являющийся средним между диаметром наружного и внутреннего колец, Z - число шаров, α - угол контакта шаров и дорожек качения.

Дискретные составляющие с указанными частотами являются базовыми, образующими в спектре вибрации различные последовательности и группы дискрет, в результате чего даже спектр вибра-

ции свободного подшипника является насыщенным многочисленными гармониками. В спектре вибрации присутствуют дискретные частоты с частотами, кратными каждой из указанных частот, т.е. с частотами n, f_c, n_2, f_n, n_3f_B и $n_4f_{ш}$, с комбинированными частотами, представляющими собой всевозможные сочетания, например вида $n_2f_n \pm kf_1$ или $n_3f_B \pm mf_1$ и т.п.

После идентификации всех дискрет, обусловленных наличием несовершенств изготовления различных элементов ПК, в спектре вибрации остаются дискретные частоты, которые могут быть вызваны загрязнением смазки.

Далее вычислялись уровни вибраций, возбуждаемые отдельно каждым элементом подшипника в каждом из указанных частотных диапазонов и определялся вклад (в процентах) каждого элемента в общий уровень вибрации. Результаты анализа представлялись в виде таблиц. В табл. 2 приведены результаты в мм/с для трех одинаковых подшипников 6001-2Z.

Таблица 2

| Частотный диапазон, Гц | Наружное кольцо | | | Внутреннее кольцо | | | Шары | | | Загрязненность | | | ПК в целом | | |
|------------------------|-----------------|----|----|-------------------|----|----|------|----|----|----------------|----|----|------------|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 50-300 | 80 | 30 | 10 | 76 | 32 | 53 | 35 | 65 | 16 | 10 | 6 | 7 | 98 | 78 | 55 |
| 300-1800 | 20 | 19 | 16 | 36 | 39 | 20 | 49 | 69 | 89 | 12 | 12 | 9 | 67 | 75 | 69 |
| 1800-10000 | 13 | 19 | 14 | 8 | 15 | 9 | 36 | 34 | 42 | 23 | 28 | 22 | 55 | 47 | 40 |

Из данных табл. 2 следует: ПК № 1 имеет повышенную гранность на наружном кольце, ПК № 2 имеет повышенную гранность и волнистость шариков. Шероховатость и загрязненность всех ПК примерно одинакова. ПК № 3 имеет повышенную волнистость шаров. В целом все три подшипника примерно идентичны, хотя можно предположить, что ПК №1 будет иметь преимущество в отношении срока службы.

В табл. 3 представлены результаты сравнительного анализа отобранных групп ПК 6001-2Z и 60201.

С учетом того, что опыт эксплуатации ПК во ВНИПП и во ВНИИЭМ свидетельствует о том, что особо критичным для новых подшипников качения с точки зрения их работоспособности являются геометрические несовершенства прежде всего тел качения, затем внутреннего кольца, а потом наружного кольца, из таблиц следует: ПК 6001-2Z по виброактивности примерно идентичны, причем основной вклад в виброактивность всех трех подшипников вносит наружное кольцо. Оба ПК 60201 также по виброактивности пример-

но идентичны, но у них основной вклад в виброактивность вносят шары. Таким образом можно утверждать, что ПК 6001-2Z в отношении ресурсных показателей будут предпочтительней.

Таблица 3

| Тип № ПК | Уровень вибрации ПК в целом, дБ | | | Вклад (%) элементов ПК в уровень вибрации в диапазоне частот 50 - 10000 Гц | | |
|----------|---------------------------------|----------|------------|--|-----------------|-------------------|
| | Диапазон частот, Гц | | | Шары | Наружнее кольцо | Внутреннее кольцо |
| | 50-300 | 300-1800 | 1800-10000 | | | |
| 6001-2Z | | | | | | |
| № 1 | 38 | 45 | 59 | 29 | 50 | 21 |
| № 2 | 39 | 49 | 62 | 22 | 65 | 13 |
| № 3 | 41 | 52 | 57 | 34 | 58 | 8 |
| 60201 | | | | | | |
| № 1 | 46 | 69 | 79 | 70 | 12 | 18 |
| № 2 | 46 | 66 | 71 | 58 | 16 | 26 |

Как указывалось выше, для решения поставленной задачи была разработана вспомогательная методика, основанная на оценке и сравнении виброактивности ПК. Для оценки и сравнения виброактивности ПК использовалось сочетание методов узкополосного спектрального анализа и анализа спектра огибающей вибрации.

Практическая реализация методики осуществляется так же с помощью испытательного стенда КВП-3, специального спектроанализатора и персонального компьютера. Проводился экспресс-анализ узкополосного спектра вибрации и спектра огибающей высокочастотного вибросигнала на нескольких несущих частотах, а затем записанная информация обрабатывалась ЭВМ.

Суть анализа заключалась в выделении и идентификации дискретных составляющих, частоты которых определяются механизмом возбуждения вибраций, вызываемых несовершенствами изготовления отдельных элементов ПК. Базовые частоты, определяющие последовательности дискрет, характеризующих наличие несовершенств изготовления отдельных элементов ПК те же, что приведены выше. Трудности применения этого метода для решения поставленной задачи заключаются в том, что недостаточно разделить дискретные составляющие и определить, какие именно несовершенства элементов подшипника возбуждают данные гармоники вибраций. Необходимо установить критерии, по которым можно оценивать качество изготовления сравниваемых подшипников и на основании этого сравнения обосновать возможность их взаимозаменяемости.

В качестве таких критериев в данной методике использовались характеристики метода анализа спектра огибающей высокочастотного вибросигнала, а именно: уровень огибающей на несущей частоте и разница между этим уровнем и уровнями отдельных дискрет, характеризующих механизм возбуждения вибраций.

Были приняты следующие критерии идентичности качества изготовления ПК: подшипники являются идентичными, если разница между уровнями дискретных составляющих, определяющих несовершенства изготовления элементов подшипника, и уровнем огибающей на несущей частоте составляет не менее 20 дБ, а сами уровни огибающей сравниваемых подшипников отличаются друг от друга не более, чем на 4 дБ.

Продемонстрируем применение данной методики сравнения подшипников на нескольких примерах.

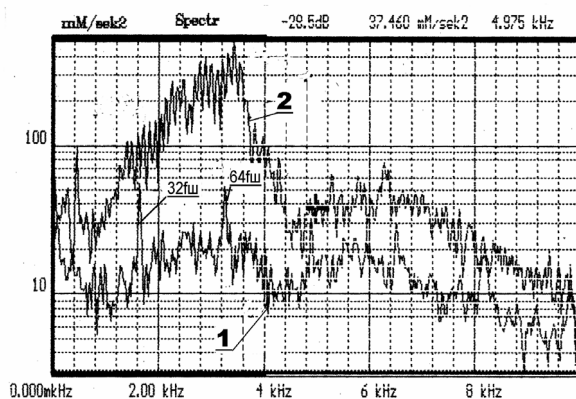


Рис. 2. Спектры вибрации ПК

На рис.2 представлены спектры вибрации в диапазоне частот 0-10 кГц импортного подшипника типа 6001-2Z (кривая 1) и отечественного подшипника типа 60201 (кривая 2). Из этого рисунка следует, что эти подшипники резко отличаются по своей виброактивности. Уровень вибрации подшипника 60201 во всем диапазоне частот значительно превосходит уровень вибрации подшипника 6001-2Z. Однако из анализа спектра вибрации подшипника 60201 практически трудно определить, в чем причина его повышенной виброактивности, так как в спектре невозможно выделить какие-либо дискретные составляющие, определяющие высокий уровень вибрации. Получить ответ на этот вопрос возможно лишь из анализа спектров огибающей вибрации этих подшипников, приведенных на рис.3. В спектре огибающей вибрации подшипника 60201 (кри-

вая 2) резко выделяются дискретные составляющие с частотами, кратными частоте перекачивания шаров по внутреннему кольцу, т.е. с частотами f_B , $2f_B$, $3f_B$ и $4f_B$. Уровень максимальной из этих дискрет, равный 65,7 дБ, почти не отличается от уровня огибающей на несущей частоте 3,1 кГц, равного 67,5 дБ. Это свидетельствует о том, что в подшипнике типа 60201, вероятно, имеет место дефект на внутреннем кольце, и именно этот дефект вносит основной вклад в виброактивность данного подшипника.

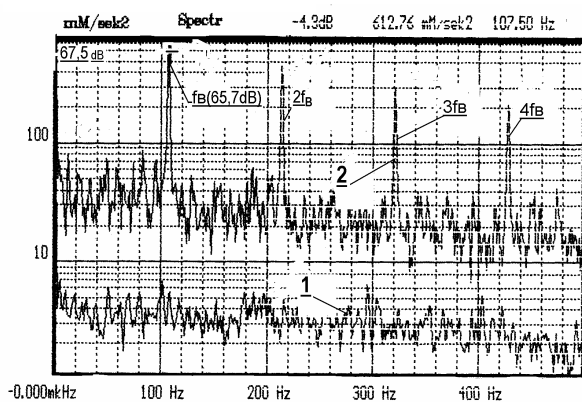


Рис. 3. Спектр огибающей вибрации ПК

Отмеченные выше трудности сравнения качества изготовления подшипников можно проиллюстрировать на примере сравнения спектров вибрации этих же подшипников в диапазоне низких частот 0-500 Гц, приведенных на рис.4.

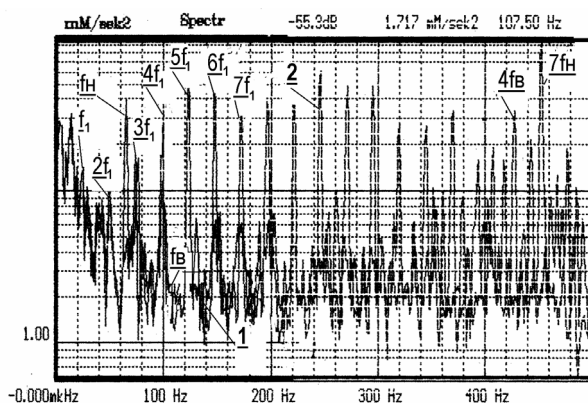


Рис. 4. Спектры вибрации ПК 6001-2Z (1) и ПК 60201(2)

В спектрах вибрации обоих подшипников прежде всего выделяются дискретные составляющие с частотами, кратными частоте вращения внутреннего кольца f_1 , $2f_1$ и т.д. Наличие этих дискрет не характеризует качество изготовления подшипников, а определяется, главным образом, несовершенством испытательного стенда, условиями осевого поджатия наружного кольца и возможностью его проскальзывания. Тот факт, что дискретные составляющие с частотами, кратными частоте вращения, в спектре вибрации подшипника 60201 значительно превосходят по своему уровню аналогичные дискреты в спектре вибрации подшипника 6001-2Z, обусловлен, прежде всего, тем, что второй из указанных подшипников выбран более высокого класса точности, чем первый. Кроме отмеченных дискретных составляющих, которые преобладают в спектре вибрации во всем частотном диапазоне, в спектре вибрации подшипника 60201, можно выделить дискретные составляющие с частотами f_n , $4f_n$, $7f_n$ и другие дискреты, характеризующие качество изготовления подшипников. Однако в спектре вибрации этого подшипника практически невозможно выделить дискретную составляющую с базовой частотой f_n , частотой перекатывания шаров по внутреннему кольцу, хотя несовершенства изготовления или возможный дефект именно этого кольца вносят основной вклад в виброактивность этого подшипника.

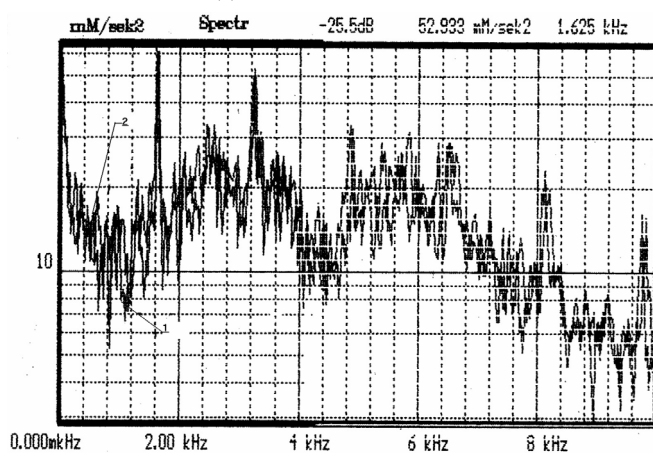


Рис. 5. Спектры вибрации двух ПК в диапазоне частот 0-10 кГц

Рассмотрим пример применения данной методики при сравнении двух пар подшипников с малым и существенным внешним отличием в их виброактивности.

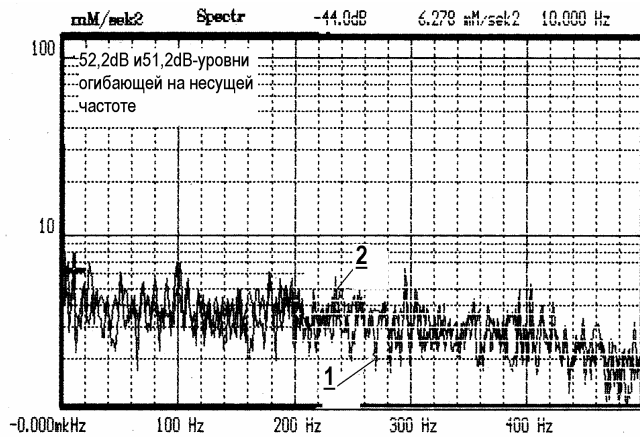


Рис. 6. Спектры огибающей вибрации двух ПК на частоте 3,1 кГц

На рис.5 и 6 приведены спектры вибрации и огибающей вибрации двух идентичных подшипников типа 6001-2Z (кривые 1 и 2). Из этих рисунков следует, что и спектры вибрации и спектры огибающей вибрации этих подшипников практически не отличаются. Уровни огибающей на несущей частоте отличаются всего на 1 дБ. В спектре огибающей вибрации подшипника (кривая 2) очень незначительно выделяются дискретные составляющие с частотами, кратными частоте вращения сепаратора f_c . Однако уровни всех дискретных составляющих спектра огибающей вибрации отличаются от уровня огибающей на несущей частоте больше, чем на 20 дБ.

Таким образом, в соответствии с приведенным выше критерием сравнимости подшипников можно утверждать, что эти подшипники (6001-2Z) характеризуются одинаковым качеством изготовления.

На рис. 7 и 8 приведены спектры вибрации и огибающей вибрации двух других подшипников этого же типа (кривые 1 и 2). Из этих рисунков видно, что уровни дискретных составляющих и в спектре вибрации и в спектре огибающей вибрации в подшипнике (кривая 2) несколько больше, чем в подшипнике (кривая 1). Особенно заметна разница в уровнях дискрет в спектре вибрации в диапазоне частот 1,6 - 10 кГц. Уровень огибающей вибрации на несущей частоте в подшипнике (кривая 2) больше соответствующего уровня огибающей в подшипнике (кривая 1) на 3,8 дБ, что меньше указанной пороговой разности 4 дБ, характеризующей одинаковое качество изготовления подшипников. В спектре огибающей вибрации подшипника (кривая 2) значительно более резко, чем в под-

шипнике (кривая 1), выделяются отдельные дискретные составляющие. Среди этих дискрет следует отметить дискреты с частотами, кратными частоте вращения подшипника f_1 , частоте перекачивания шаров по наружному кольцу f_n , и с комбинационными частотами, представляющими различные сочетания этих частот, например $3f_n \pm 2f_1$. Однако уровень всех этих дискретных составляющих отличается от уровня огибающей на несущей частоте более, чем на 20 дБ.

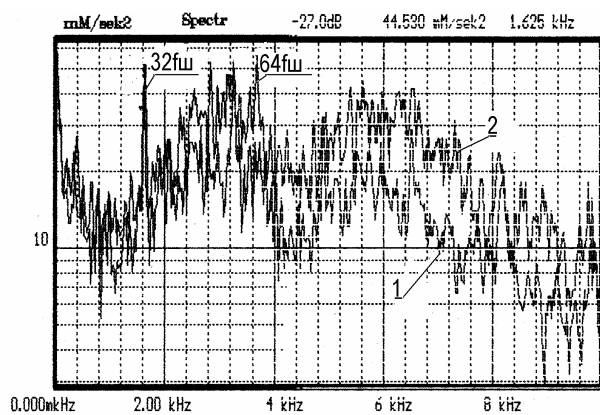


Рис. 7. Спектры вибрации двух ПК в диапазоне частот 0-10 кГц

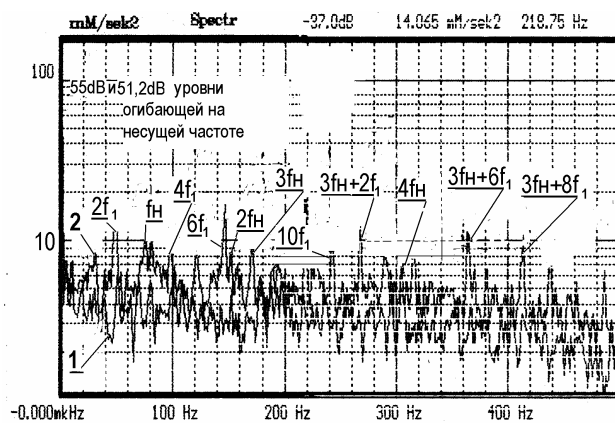


Рис. 8. Спектры огибающей вибрации двух ПК на частоте 3,1 кГц

В соответствии с приведенным выше критерием сравнимости подшипников можно утверждать, что, несмотря на имеющиеся различия в спектрах вибрации и в спектрах огибающей вибрации, эти подшипники также характеризуются одинаковым качеством изготовления.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Программно-аппаратный комплекс ВНИПП позволяет оценивать качество изготовления подшипников и определять возможность их взаимозаменяемости при наличии требований сохранения достигнутого (назначенного) ресурса работы:

- метод позволяет идентифицировать геометрические несовершенства (колец и тел качения);

- возможно разделить вклад геометрических несовершенств в виброактивность ПК отдельно для каждого из колец ПК и комплекта тел качения;

- в принципе комплекс дает возможность определять вклад в виброактивность ПК непосредственно от смазочного материала;

- возможность разделения геометрических несовершенств в % отношении создает реальную основу для инструментальных выводов о прогнозируемой работоспособности сравниваемых подшипников. К тому же комплекс позволяет оценивать исходное состояние ПС в ПК с точки зрения ее загрязненности, т.е. имеется дополнительный существенный фактор оценки работоспособности ПК.

2. Представленные результаты подтверждают, что метод огибающей является важным дополнением к возможностям программно-аппаратного комплекса ВНИПП при решении задач идентификации качества изготовления подшипников качения. Однако его практическое внедрение требует весьма высокой квалификации и опыта оператора, а также накопления дополнительных экспериментальных данных по уточнению принятых критериев оценки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вопросы прогнозирования эксплуатационного состояния подшипниковых узлов судовых электромашин с дефектом типа износа / Воронкин В.А., Евланов В.В. // Электротехника. 1994. № 4.

2. Диагностика подшипниковых узлов электрических машин / Воронкин В.А., Цирлин А.Л. // Машиностроитель. 1993. № 5.

3. Актуальные вопросы создания подшипников качения с низкими уровнями вибрации для судовых электрических машин / Воронкин В.А., Курасов Е.В. // Техническая акустика. 1999. Том 5. вып. 1-2.

4. Снижение вибрации и шума подшипников качения, диагностика их качества в стендах при испытании на долговечность и при эксплуатации в составе изделий / Самохин О.Н. и др. // Подшипниковая промышленность. Серия X. 1988.