

## АНАЛИЗ ВИБРАЦИЙ ОПОР КАЧЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ МАШИН

В статье проводится анализ вибраций опор качения и их влияние на работоспособность в течение заданного срока службы. Увеличение скорости работы, форсирование по мощности и нагрузке узлов машин и механизмов вызывает увеличение интенсивности вибрационных полей. Воздействие вибраций приводит к изменению характеристик контактирующих поверхностей, увеличению трения в стыках и нагреву сборочных единиц и узлов. В статье приводится описание факторов, возмущающих вибрации в ответственных узлах машин. Формулируются пути снижения вибраций, в том числе в результате применения различных смазочных материалов. Проводится анализ работоспособности опор качения узлов машин до и после применения ремонтно-восстановительных составов в смазочных материалах. Применение ремонтно-восстановительных составов на основе минеральных добавок и добавление его в смазочный материал позволяет оценить эффективность ремонтно-восстановительных составов на процессы трения и износа в опорах качения. Использование жидких смазочных материалов с минеральными добавками дисперсностью частиц до 10 мкм при смазывании дает возможность уменьшить уровень шумов и существенно снизить уровень вибрации в подшипниках качения машин и механизмов.

**Ключевые слова:** опоры качения, ремонтно-восстановительные составы (РВС), минеральные добавки, смазочные материалы, уровень вибраций, уровень шумов.

**Введение.** Создание высокопроизводительных механизмов и машин, форсированных по мощностям, нагрузкам и другим рабочим характеристикам, неизбежно приводят к увеличению интенсивности и расширению спектра вибрационных полей. Вредная вибрация нарушает планируемые конструктором законы движения механизмов и машин, а также систем управления, порождает неустойчивость рабочих процессов и может вызвать отказы и полное расстройство механической системы. Из-за вибрации увеличиваются динамические нагрузки в ответственных сборочных единицах и узлах механизмов и машин. В результате снижается несущая способность сборочных единиц и узлов. Одной из причин потери работоспособности является развитие усталостных трещин, а также возникновение локальных разрушений поверхностей контакта деталей сборочных единиц, в том числе опор качения.

В работах [1–3] указывается, что процессы зарождения дефектов в опорах качения ответственных узлов механизмов и машин происходят по времени значительно раньше, когда развитие дефекта проявится в виде изменения параметров их качества. В настоящее время в России и ряде зарубежных стран широко распространены и приняты методики виброакустической диагностики состояния подшипников качения после их изготовления. Разработаны испытательные стенды, предназначенные для базирования и закрепления, а также обкатки

подшипников со стандартными угловыми скоростями вращения, а также стандартными усилиями осевого натяга. Применяется контрольно-измерительная аппаратура параметров виброакустических сигналов, по которым можно судить о состоянии тел качения, подшипниковых колец и сепаратора [1–7]. Вместе с тем, как указано в данных работах, следует констатировать факт, что отклонения показателей качества подшипников, которые получены при стендовых испытаниях, не гарантируют его стабильной работы после его установки, например, в шпиндельный узел станка. К основным факторам, влияющим на работоспособность последнего можно отнести конструкцию узла, качество изготовления его деталей и сборочных единиц, способ смазывания, технологию сборки и др.

Установлено, что после окончательной сборки шпиндельного узла погрешности изготовления деталей и сборочных единиц, которые отображаются в виброакустическом сигнале, уже присутствуют [1–3]. Например, быстрый рост высокочастотной составляющей виброакустического сигнала говорит о развитии ударных процессов в опорах качения, что может привести к выходу их строя и всего узла. Рост амплитуды на оборотной частоте может говорить об увеличении зазора в подшипнике качения, что вызывает увеличение уровня вибрации и шумов.

Действие вибрации может изменить внутреннюю и поверхностную структуру материалов, ус-

ловия трения и износа контактных поверхностей деталей сборочных единиц машин и привести к недопустимому нагреву конструкции машины. Для уменьшения вибрации в опорах качения предлагается применение смазочных материалов с использованием минеральных добавок на основе природных минералов, позволяющих уменьшить трение и повысить износостойкость в 2,5 раза, а также увеличить время межремонтного пробега не менее чем в 2 раза.

Целью работы является уменьшение уровня вибрации и шумов в подшипниках качения механизмов и машин путем применения смазочных материалов с минеральными добавками.

**Постановка задачи.** Существуют различные способы продления срока службы подшипников качения. Это снижение вибрационной активности источника вибрации, изменение конструкции объекта, применение виброизоляции и виброзащитных устройств и многое другое [1–3]. Среди вышечисленных способов продления срока службы наиболее актуальным является способ снижения вибрационной активности источника вибрации. В данном случае возбуждение колебаний источниками возбуждения может быть обусловлено различными причинами.

Можно разделить возмущающие факторы на две группы. К первой группе факторов можно отнести явления, связанные с трением в кинематических парах или сборочных единицах, в то время как вторая группа факторов связана с движущимися неуравновешенными деталями (массами) сборочных единиц. Вторая группа возмущающих факторов в данной работе не рассматривается. Снижение вибрационной активности источника в этом случае заключается в уменьшении динамических реакций с помощью уравнивания движущихся неуравновешенных масс. Особое внимание следует уделить первой группе возмущающих факторов.

Снижение вибрационной активности факторов первой группы связано с изменением свойств материалов трущихся поверхностей и может быть достигнуто применением специальных смазочных материалов [8–14]. Применение специальных смазочных материалов на основе трибологических материалов являются продуктом переработки горных пород и представлены подклассом слоистых силикатов [15]. Известны случаи их применения

в смазочных материалах редукторов, коробок переключения передач, буксовых узлах, двигателях внутреннего сгорания и других механизмах машин [15]. Наиболее эффективным является способ увеличения долговечности работы опор качения машин путём ввода в жидкий смазочный материал ремонтно-восстановительных составов (РВС) на основе минеральных добавок определенной дисперсности частиц [8, 9, 15, 16]. Необходимо отметить, что минеральные добавки на основе природных минералов могут также вводиться и в пластичные смазочные материалы, которые предназначены для смазывания подшипников качения.

Из работ [16, 17] следует, что введение в жидкий смазочный материал РВС позволяет уменьшить значение коэффициента трения качения в подшипниках качения от 5,5 до 6,2 % при нагружении последних вращающим моментом и радиальной силой. Результаты исследований, полученные в лабораторных условиях и на производстве, дают знания о воздействии РВС в смазочных материалах на эксплуатационные параметры работы подшипников качения.

Для оценки работоспособности опор качения в механизмах специальных установок при добавлении в смазочный материал ремонтно-восстановительного состава на основе минеральных добавок были проведены замеры вибрации подшипниковых узлов при смазывании их без применения и с применением РВС в жидких смазочных материалах.

#### Результаты экспериментальных исследований.

В качестве объектов исследования были взяты подшипники качения типа 308. Различный частотный диапазон при действии рабочей нагрузки позволил построить несколько графиков, отображающих их эксплуатационные характеристики и уровень вибраций.

Для оценки эффективности РВС на процессы трения и износа были проведены дополнительные экспериментальные исследования вибрации подшипников качения с использованием виброанализатора типа «Кварц» (рис. 1). Данный прибор при выполнении измерений работает по схеме (рис. 2).

Экспериментальная установка состояла из испытуемого механизма и подключенного к нему виброанализатора посредством пьезодатчика. Уровень вибраций замерялся в процессе вращения ведущего вала механизма. Вал механизма установлен



Рис. 1. Анализатор вибрации «Кварц»



Д – пьезоэлектрический датчик, У – усилитель электрических сигналов,  
Ф – фильтр отбора спектра колебаний, РП – регистрирующий прибор

Рис. 2. Схема измерительного тракта прибора «Кварц»

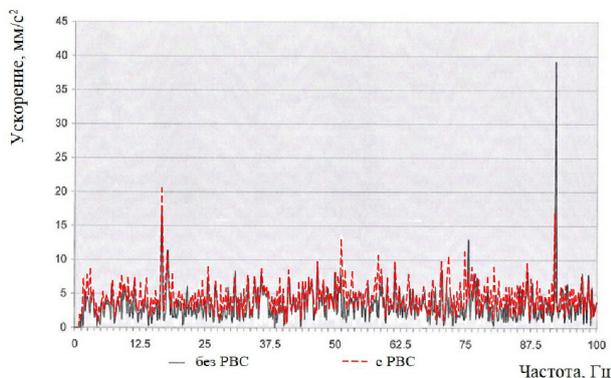


Рис. 3. Зависимость ускорения от частоты заднего подшипника качения механизма (вертикальная плоскость)

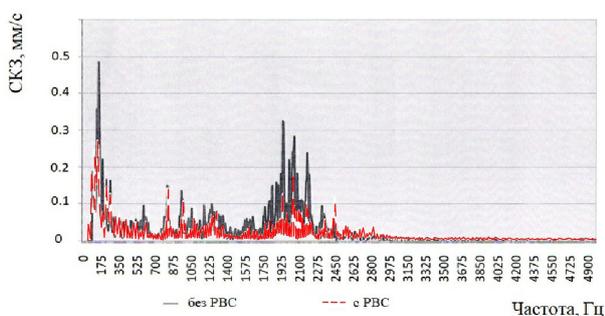


Рис. 4. Зависимость уровня вибрации переднего подшипника механизма (вертикальная плоскость)

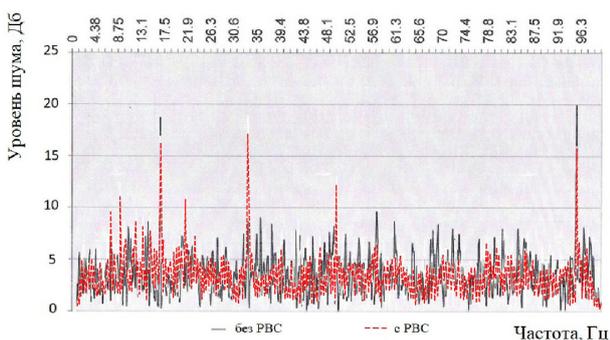


Рис. 5. Зависимость уровня шумов переднего подшипника механизма (горизонтальная плоскость)

на подшипниках качения по схеме «враспор». Частота вращения вала задавалась приводным механизмом.

В смазочный материал механизма вводился РВС из расчета 0,1 грамма на 1 литр смазки. В процессе испытаний рабочая температура масла не превышала 60 °С. Числовые параметры вибрационного процесса анализировались и выводились на дисплей

прибора в виде графиков спектра, уровня вибраций и шумов (рис. 3–5).

Для сравнения выполнялись замеры спектров вибрации среднеквадратических значений (СКЗ) в мм/с в диапазоне частот 50–5000 Гц и спектров огибающей случайного сигнала (Дб) для анализа сил трения и ударных импульсов непосредственно в подшипниковом узле. Огибающая случайного сигнала определялась в децибелах формулой вида:

$$СКЗ = 10 \log_{10}(a^2/a_{ref}^2) = 20 \log_{10}(a/a_{ref}),$$

где СКЗ — уровень в дБ;  $a$  — значение амплитуды механических колебаний, мкм;  $a_{ref}$  — заданное опорное значение, мкм.

Как следует из графика зависимости ускорения от частоты (рис. 3), стабильность работы исследуемых подшипников качения механизма не изменилась при применении смазочного материала с РВС для опор качения ведущего вала.

Результаты исследований показали, что при числе оборотов вращения ведущего вала 1000 об/мин исследуемого механизма для частот от 2800 до 5000 Гц уровень вибрации примерно одинаков и весьма незначителен как при обычном способе смазывания, так и при применении смазочных материалов с минеральными добавками частиц дисперсностью до 10 мкм (рис. 4).

Однако при частотах от 50 до 2800 Гц при использовании смазочных материалов с РВС наблюдается весьма резкое снижение вибрации. При различной частоте в этом диапазоне наблюдаются вибрации, изменяющиеся довольно в большом интервале (от 0 до 0,48 мм/с). Оценка результатов экспериментов показала, что уровень вибрации уменьшился после применения смазочных материалов с РВС примерно на 38 %. При особо сильном проявлении вибрации (частоты от 100 до 300 и от 1750 до 2275 Гц) применение РВС-технологий помогли снизить вибрационную активность до 50 %.

Для получения более точных результатов влияния РВС-технологий замеры выполнялись с использованием двух аналогичных механизмов с одинаковой кинематической схемой. Выяснилось, что значение модуляции спектров огибающей вибросигналов в первом механизме установки снизилось в 1,2 раза, а во втором механизме установки — в 1,39 раза, т.е.  $a/a_{РВС} = 10/7,2 = 1,39$ , где  $a$  — уровень шума или вибраций до и после добавления РВС в смазочный материал.

После сравнительного анализа данных можно сделать вывод о наличии положительного эффекта применения ремонтно-восстановительных составов в смазочных материалах подшипников качения, которые не имеют явных крупных дефектов в виде раковин, трещин в обоймах, телах качения, а также повышенный износ элементов подшипника. Кроме того, минеральные добавки к основному смазочному материалу позволяют снизить силы трения и ударные импульсы в подшипниковом узле.

Дополнительно проводились исследования и сравнивались замеры уровня шумов. Установлено, что при работе подшипников качения с применением РВС шумы снизились. При этом оказалось, что снижение шумов наблюдается при частоте выше 52 Гц, в то время как на интервале от 1 до 52 Гц уровень шума снизился незначительно (рис. 5). Это явление напрямую связано с частотой. Здесь имеют место нестационарные вибрационные воздействия, возбуждающиеся чаще всего переходными про-

цессами, происходящими в источниках вибрации. Например, это может быть силовое воздействие на корпус двигателя с неуравновешенным валом, возникающее при разгоне. Диапазон, в котором располагаются частоты полигармонических воздействий, возникающих в современных технических объектах, весьма широк. С помощью применения смазочных материалов с РВС удалось существенно сузить этот диапазон и уменьшить шумы.

**Заключение.** Из вышеприведенных результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Применение жидких смазочных материалов с минеральными добавками позволяет существенно снизить уровень вибрации в подшипниках качения от 38 до 50 % в диапазоне частот от 100 до 300 Гц и от 1750 до 2275 Гц.

2. Использование жидких смазочных материалов с минеральными добавками дисперсностью частиц до 10 мкм позволяет уменьшить уровень шумов при частоте выше 52 Гц.

3. При диагностике подшипников качения механизмов специальных установок, после смазывания жидким смазочным материалом с РВС, установлено снижение спектров огибающей вибросигналов от 1,2 до 1,39 раза.

4. Проведенные исследования подшипников качения при смазывании жидкими смазочными материалами с РВС позволили обеспечить их работоспособность в течение заданного срока службы и увеличить время межремонтных ревизий подшипникового узла не менее чем в 2 раза.

#### Библиографический список

1. Григорьев С. Н., Козочкин М. П., Сабиров Ф. С., Синопальников Ф. С. Техническая диагностика станочного оборудования автоматизированного производства // Контроль. Диагностика. 2011. № 8 (158). С. 48–54.

2. Козочкин М. П., Гусев А. В., Порватов А. Н. Разработка мобильных систем для мониторинга и диагностики станочных узлов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 3. С. 20–23.

3. Kozochkin M. P., Kochinev N. A., Sabirov F. S. Diagnostics and monitoring of complex production processes using measurement of vibration-acoustic signals // Measurement Techniques. 2006. Vol. 49, no. 7. P. 672–678. DOI: 10.1007/S11018-006-0169-6.

4. Козочкин М. П., Сабиров Ф. С. Выявление дефектов шпиндельных узлов виброакустическими методами // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 13, № 1. С. 133–137.

5. Kozochkin M. P., Sabirov F. S. Vibroacoustic diagnostics of spindles // Russian Engineering Research. 2009. Vol. 29, № 8. P. 827–830. DOI: 10.3103/S1068798X09080176.

6. Kozochkin M. P., Sabirov F. S., Suslov D. N., Abramov A. P. Vibroacoustic diagnostics of spindle bearings in high-speed machine tools // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30, № 9. P. 944–947. DOI: 10.3103/S1068798X10090194.

7. Козочкин М. П., Маслов А. Р., Порватов А. Н. Инновационный аппаратно-программный комплекс для диагностирования высокотехнологичных систем // Инновации. 2013. № 10 (180). С. 128–131.

8. Пат. № 2201998 Российская Федерация, МПК С 23 С 24/02, В 23 Р 6/00. Способ модификации железосодержащих поверхностей узлов трения / Нежданов В. И., Какоткин В. З.,

Балабин В. Н., Ермаков В. И. № 2001117721/02; заявл. 29.06.01; опубл. 10.04.03.

9. Пат. № 2201999 Российская Федерация, МПК С 23 С 024/02, С 23 С 026/00, В 23 Р 006/02. Способ модификации железосодержащих поверхностей узлов трения Нежданов В. И. / Нежданов В. И., Какоткин В. З., Балабин В. Н., Ермаков В. И. № 2001117722/02; заявл. 29.06.01; опубл. 10.04.03.

10. Хебда М., Чичинадзе А. В. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 1. Теоретические основы. Москва: Машиностроение, 1989. 397 с.

11. Matthews F. L., Rawlings R. D. Composite materials: Engineering and Science. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 1993. 470 p. DOI: 10.1016/0261-3069(95)90018-7.

12. Мэттьюс Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. Москва: Техносфера, 2004. 408 с. ISBN 5-94836-032-6.

9. Christensen R. M. Mechanics of composite materials. Dover Publications, 2005. 348 p. DOI: 10.1115/1.3153710.

13. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. Москва: МИР, 1982. 334 с.

14. Ильиных В. А., Гроховский В. С. Технология образования металлокерамических покрытий на деталях пар трения путем применения геоактиваторов // Заготовительные производства в машиностроении. 2003. № 12. С. 51–55.

15. Ильиных В. А., Гроховский В. С. Исследование влияния РВС на триботехнические параметры опор скольжения и качения // Вестник Читинского государственного университета. 2002. № 23. С. 110–114.

16. Ильиных В. А., Гроховский В. С. Внедрение ресурсосберегающей технологии РВС в различных узлах механизмов и машин // Вестник Читинского государственного университета (спец. выпуск). 30 лет Читинскому государственному университету. 2004. Т. 9, № 6. С. 190–192.

17. Ильиных В. А. Влияние смазочных материалов с минеральными добавками на трение в опорах шпиндельных узлов // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 11–15. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-11-15.

**ИЛЬИНЫХ Виктор Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Прикладная механика и математика» Забайкальского института железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ), г. Чита.

SPIN-код: 1446-6405

AuthorID (РИНЦ): 713503

AuthorID (SCOPUS): 57212555086

Адрес для переписки: ilinykh.viktor5@mail.ru

**ЛИНЕЙЦЕВ Владимир Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство железных дорог» ЗабИЖТ, г. Чита.

SPIN-код: 6839-0048

AuthorID (РИНЦ): 703424

Адрес для переписки: linetzev@mail.ru

#### Для цитирования

Ильиных В. А., Линейцев В. Ю. Анализ вибраций опор качения механизмов машин // Омский научный вестник. 2022. № 3 (183). С. 28–31. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-28-31.

Статья поступила в редакцию 31.03.2022 г.

© В. А. Ильиных, В. Ю. Линейцев