DOI: 10.17117/na.2016.04.03.197

<http://ucom.ru/doc/na.2016.04.03.197.pdf>

Поступила (Received): 18.04.2016

Ступин А.В., Пудов Д.И. Эксплуатационные дефекты подшипников качения и их проявление в вибросигнале

Stupin A.V., Pudov D.I.
Operational defects of rolling bearings and their manifestation in the vibration signal

Рассмотрены причины возникновения эксплуатационных повреждений подшипников качения и методы их диагностирования на конкретных примерах вибросигналов и спектров огибающих вибросигнала

Ключевые слова: подшипники качения, дефекты подшипников качения, вибрационный сигнал, спектр вибросигнала, спектр огибающей вибросигнала, амплитудная модуляция, частотная модуляция, несущая частота

Examined the causes of operational damages of rolling bearings and methods of diagnosing on specific examples of vibration signals and spectra of the envelopes of vibration signals

Key words: rolling bearings, rolling bearing defects, vibration signal, vibration signal spectrum, spectrum of envelope of the vibration signal, amplitude modulation, frequency modulation, carrier frequency

Ступин Александр Валерьевич

Кандидат технических наук, доцент
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет
г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27

Stupin Alexander Valerievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Komsomolsk-on-Amur state technical university
Komsomolsk-on-Amur, Lenina ave., 27

Пудов Денис Иванович

Магистрант
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет
г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27

Pudov Denis Ivanovich

Master
Komsomolsk-on-Amur state technical university
Komsomolsk-on-Amur, Lenina ave., 27

Важнейшими узлами большинства технологических машин являются подшипники качения. От их несущей способности и надёжности в значительной мере зависит техническое состояние технологических машин в целом. Поэтому подшипники качения на протяжении многих лет являются предметом интенсивных исследований. В настоящее время теория и технология подшипников качения развилась в особую область научных исследований, основоположником в которой является фирма SKF, занимающая ведущие позиции в данной области знаний.

Благодаря проведённым исследованиям стал возможен расчёт долговечности подшипников с высокой точностью. Это сделало возможным согласо-

ние между собой долговечности подшипников и машины в целом [1, с. 3]. Однако в ряде случаев фактическая долговечность подшипника оказывается ниже расчётной. Это происходит по ряду причин:

- недопустимо высокая нагрузка на подшипник;
- недостаток смазки или неправильно выбранный смазочный материал;
- погрешности монтажа подшипника;
- невысокая эффективность используемых уплотнений;
- посадка подшипника с чрезмерным натягом и, соответственно, недостаточный внутренний зазор или чрезмерный внутренний натяг подшипника.

Перечисленные ситуации порождают специфические повреждения элементов подшипника. В большинстве случаев при исследовании повреждённого подшипника устанавливаются причины повреждения и принимаются соответствующие меры для их избежания после возобновления работы машины.

Основными частотами (несущими частотами), на которых проявляются эксплуатационные дефекты подшипников качения, являются:

- частота перекатывания тел качения по наружному кольцу подшипника (дефект дорожки качения наружного кольца) $f_{н.к.}$ (f_{BPFO})

$$f_{н.к.} = k_1 \cdot f_{вр} \cdot z;$$

- частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу подшипника (дефект дорожки качения внутреннего кольца) $f_{в.к.}$ (f_{BPF1})

$$f_{в.к.} = k_2 \cdot f_{вр} \cdot z;$$

- частота вращения тела качения (дефект тела качения) $f_{т.к.}$ (f_{BSF})

$$f_{т.к.} = k_1 \cdot k_2 \cdot 2f_{вр} \cdot D_0/D_w; f_{т.к.} \approx k_3 \cdot f_{вр} \cdot z;$$

- частота дефекта сепаратора $f_{т.к.}$ (f_{FTF})

$$f_{т.к.} = k_1 \cdot f_{вр};$$

где $k_1 = 0,5 \cdot (1 - D_w/D_o \cdot \cos \alpha)$; $k_2 = 0,5 \cdot (1 + D_w/D_o \cdot \cos \alpha)$, $k_1 \approx 0,4$, $k_2 \approx 0,6$, $k_3 \approx 0,18$ при $z > 10$, $k_3 \approx 0,23$ при $z \leq 10$, $f_{вр}$ – частота вращения вала (роторная частота); z – число тел качения D_w – диаметр тела качения; D_o – диаметр окружности, проведенной через центры тел качения; α – угол контакта.

Как правило, к виброанализаторам прилагается программное обеспечение (ПО), которое позволяет специалисту анализировать измеряемые параметры вибрации. Обычно к ПО прикладывается база данных по подшипникам качения, используя которую можно рассчитать характерные частоты дефектов. Например, ПО «Атлант» позволяет автоматически рассчитывать гармоники частоты вращения и несущие частоты колебаний подшипников качения. Для этого необходимо на спектре вибросигнала или огибающей вибросигнала выделить частоту вращения вала (рис. 1).

Усталостное изнашивание (выкрашивание). Основной причиной потери работоспособности подшипников качения является усталостное изнашивание поверхностей тел качения и дорожек качения колец подшипника [2, с. 40; 3 с. 64]. Данный вид изнашивания в основном определяет ресурс (долговечность) подшипника.

Рис. 1. Спектры вибрации: а – всего вибросигнала; б – огибающей вибросигнала

В реальных условиях подшипник качения не может работать произвольно долго. В определенный момент времени возникает усталостное разрушение материала в виде появления усталостных раковин, и работа подшипника становится невозможной. Промежуток времени до появления первых признаков усталости материала зависит от частоты вращения подшипника и величины нагрузки. Усталостное разрушение является следствием переменных напряжений сдвига непосредственно под поверхностью качения в зоне действия нагрузки. Эти напряжения обуславливают образование трещин, которые постепенно распространяются к поверхности. Когда по таким трещинам перекачиваются тела качения, происходит отделение частиц материала. Такой процесс со временем прогрессирует до тех пор, когда подшипник становится непригодным для работы (рис. 2) [1, с. 4].

Долговечность подшипника качения определяется числом оборотов, которое совершит наружное или внутреннее кольцо подшипника прежде, чем станут заметными первые признаки усталостного разрушения на дорожках и телах качения. Это не означает, что после этого подшипник не может продолжать работу. Усталостное выкрашивание распространяется медленно и обнаруживает себя возрастанием шума и вибраций.

Рис. 2. Стадии усталостного разрушения кольца внутреннего подшипника

Поэтому, как правило, остаётся достаточно времени для подготовки замены подшипника.

Периодическое попадание раковин, образующихся при усталостном изнашивании, в зону контакта при относительном движении колец и тел качения приводит к появлению в вибросигнале периодических всплесков (рис. 3).

Рис. 3. Вибросигнал шарикоподшипника 310 с усталостной раковиной на дорожке наружного кольца

Частота всплесков вибросигнала ($f = 1/T$) зависит от того, на каком кольце подшипника зародился дефект. При зарождении усталостного разрушения дорожки качения неподвижного наружного кольца подшипника частота всплесков вибросигнала определяется частотой перекатывания тел качения по наружному кольцу подшипника $f_{н.к.}$ (f_{BPFO}). В спектре вибросигнала или огибающей вибросигнала появляется соответствующая гармоника f_{BPFO} . С развитием усталостной раковины число гармоник частоты $f_{н.к.}$ (f_{BPFO}) увеличивается.

Рис. 4. Спектр огибающей вибросигнала шарикоподшипника 310 с усталостной раковиной на дорожке качения наружного кольца

В качестве примера на рис. 4 приведен спектр огибающей вибросигнала шарикоподшипника 310 с частотой вращения внутреннего кольца $f_{вр} = 23,61$

Гц. Для данного подшипника $k_1 = 0,38$, число шариков $z = 8$, частота перекатывания тел качения по наружному кольцу подшипника (дефект дорожки качения наружного кольца) $f_{BPFO} = 0,38 \cdot 23,61 \cdot 8 = 71,8$ Гц. При зарождении дефекта на дорожке качения внутреннего кольца подшипника частота всплесков вибросигнала определяется частотой вращения вала $f_{вр}$. В спектре вибросигнала или огибающей вибросигнала (рис. 5) присутствуют первая $f_{вр}$ и вторая $2f_{вр}$ гармоники частоты вращения вала, а также появляется пик на частоте перекатывания тел качения по внутреннему кольцу подшипника $f_{в.к.}$ (f_{BPFI}). При развитии усталостного изнашивания (развитие раковины) (см. рис. 2) подшипник начинает вести себя, как нелинейная система, для которой характерен один из видов модуляции несущей частоты вибросигнала: амплитудная, частотная или фазовая.

Рис. 5. Спектр огибающей вибросигнала роликоподшипника 36318 с раковиной на дорожке качения внутреннего кольца подшипника

При усталостном изнашивании дорожки качения внутреннего кольца подшипника имеет место амплитудная модуляция несущей частоты $f_{в.к.}$ (f_{BPFI}) частотой вращения вала $f_{вр}$. Периодическое попадание раковин с частотой $f_{вр}$ в зону контакта при относительном движении кольца и тел качения приводит к появлению в спектре вибросигнала сигнала комбинационных частот типа $p \cdot f_{BPFI} \pm k \cdot f_{вр}$ (рис. 5) в окрестности основной частоты возбуждения колебаний $f_{в.к.}$ (f_{BPFI}). Рост числа выбросов при увеличении их амплитуд, вызванных развитием данного дефекта, приводит к увеличению глубины амплитудной модуляции, росту числа комбинационных частот и перераспределению энергии между ними при неизменности амплитуд основной частоты возбуждения и её гармоник $p \cdot f_{BPFI}$. Одновременно наблюдается явление *амплитудно-импульсной модуляции* в окрестности собственных частот элементов подшипника, что сопровождается появлением комбинационных частот типа $f_c \pm r f_{вр}$ [4, с. 160]. Как правило, данный вид изнашивания начинается на поверхностях дорожек качения наиболее напряженных колец: у большинства подшипников – на внутреннем, а у сферических подшипников – на наружном.

Возникновение раковин в подшипниках во многих случаях имеет причины, отличные от процесса нормального усталостного изнашивания (выкра-

шивания) материала, которое возникает в конце обычной долговечности подшипника. Если раковины обнаружены на ранней стадии, когда их размеры не слишком большие, то часто становится возможным определение причины повреждения, что позволяет разработать соответствующие мероприятия и тем самым предотвратить повторные повреждения. Полезным исходным пунктом является анализ следов качения. Если раковины достигли определенной стадии развития, то наличие повреждения обнаруживают по шуму и вибрациям – это сигнал к замене подшипника.

Причинами преждевременного возникновения раковин могут быть [1, с. 30]:

- превышение допустимой нагрузки и недостаточность смазки (рис. 6);
- чрезмерный внутренний предварительный натяг вследствие слишком тугой посадки кольца подшипника на вал или в отверстие корпуса;
- чрезмерный натяг внутреннего кольца подшипника на коническую шейку вала;
- деформации, обусловленные некруглостью посадочных мест под подшипник (рис. 7);
- дополнительные осевые нагрузки, например, возникающие в результате температурных деформаций.

Рис. 6. Образование раковин на внутреннем кольце и роликах конического роликоподшипника из-за повышенной нагрузки и недостатка смазки

Рис. 7. Усталостные раковины на наружном кольце сферического роликоподшипника, установленного в овальное отверстие корпуса

При возникновении трещин на кольцах подшипника вибросигнал и спектр огибающей вибросигнала имеют такой же характер, как и при возникновении раковин на кольцах подшипника (рис. 8).

Рис. 8. Спектр огибающей вибросигнала роликоподшипника с трещиной на дорожке качения внутреннего кольца подшипника

Трещины в кольцах подшипников возникают по ряду причин. Одной из самых распространённых причин является неправильное обращение с подшипником во время монтажа или демонтажа. Удары молотком, наносимые непосредственно или через закалённую оправку по кольцу подшипника, могут стать причиной мельчайших трещин. В результате этого в процессе работы подшипника от него отламываются частицы металла. Другой причиной образования трещин в кольцах является чрезмерный натяг кольца на коническую шейку вала. Возникающие при этом большие растягивающие напряжения кольца во время работы подшипника приводят к возникновению трещин. Аналогичный процесс наблюдается при горячей посадке кольца подшипника на вал при превышении максимально допустимого значения натяга в посадке.

Изнашивание при заедании. Причиной возникновения данного вида изнашивания является разрушение смазочного слоя между трущимися поверхностями и взаимодействие физически чистых контактирующих поверхностей на молекулярном уровне. Потеря защищающей способности смазочного слоя происходит при повышенных температурах в зоне контакта. Заедание возможно также при срабатывании смазочного материала и при недостаточном его дополнительном поступлении в подшипниковый узел. Изнашивание при заедании является следствием схватывания и переноса материала с одной поверхности трения на другую. Заедание может сопровождаться последующим *задиром* поверхностей трения с образованием широких и глубоких борозд в направлении скольжения (рис. 9). Данные явления приводят к нарушению периодичности движения деталей машин и оборудования, флуктуациям (колебаниям) скорости вращения, появлению выбросов в виброакустическом сигнале, явлению *частотной модуляции* на основных частотах возбуждения.

Рис. 9. Изнашивание при заедании дорожки качения из-за недостаточной смазки

С ухудшением состояния поверхности трения вследствие заедания и задира виброакустический сигнал становится существенно нестационарным из-за нерегулярности выбросов. В спектре виброакустического сигнала и огибающей вибросигнала наблюдается падение амплитуд основных частот возбуждения колебаний, например, f_{BPFI} и её гармоник $p \cdot f_{BPFI}$ при одновременном росте амплитуд комбинационных частот $p \cdot f_{BPFI} \pm k \cdot f_{вр}$ и $f_c \pm r f_{вр}$.

При одновременном возникновении и развитии дефектов колец подшипника и тел качения колебания возникают не только на соответствующих несущих частотах и их гармониках, но и происходит взаимодействие колебаний с появлением в спектре вибросигнала или огибающей вибросигнала частот типа $p \cdot f_{BPFI} \pm k \cdot f_{BPFO}$ и других аналогичных частот, характерных для нелинейных механических систем. Нелинейность механических систем проявляются в объектах с неисправностями, близкими к критическим, когда дальнейшее ухудшение технического состояния приводит не к росту амплитуд спектральных компонент, а к появлению новых компонент, перераспределению энергии между ними и даже к уменьшению колебательной энергии.

Список используемых источников:

1. Повреждения подшипников качения и их причины. Санкт-Петербург: Авторское право SKF AB, 2002.
2. Ступин А.В., Мокрицкий Б.Я., Схиртладзе А.Г. Детали машин и механизмов. Старый Оскол: ТНТ, 2015. 508 с.
3. Попеско А.И., Шпилев А.М., Ступин А.В. и др. Износ технологических машин и оборудования при оценке их рыночной стоимости. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 211 с.
4. Попеско А.И., Ступин А.В., Чесноков С.А. Износ технологических машин и оборудования при оценке их рыночной стоимости. М.: Российское общество оценщиков, 2002. 241 с.

© 2016, Ступин А.В., Пудов Д.И.

Эксплуатационные дефекты подшипников качения и их проявление в вибросигнале

© 2016, Stupin A.V., Pudov D.I.

Operational defects of rolling bearings and their manifestation in the vibration signal