

Скорости и вибрация

Номинальные частоты вращения.....	108
Влияние нагрузки и вязкости масла на величину номинальной/допустимой скорости	109
Частоты вращения, превышающие номинальные значения	114
Предельные частоты вращения.....	114
Особые случаи.....	114
Малые скорости.....	114
Колебательные движения	115
Возникновение вибрации в подшипнике.....	115
Изменение количества нагруженных тел качения	115
Волнистость деталей.....	115
Местные повреждения	115
Воздействие загрязнений	115
Влияние подшипника на вибрацию машин и механизмов	115

Скорости и вибрация

Существует предел скорости, с которой могут вращаться подшипники качения. Как правило, этот предел зависит от предельной рабочей температуры используемого смазочного материала или материала, из которого изготовлены детали подшипника.

Скорость, при которой достигается предел рабочей температуры, зависит от тепловыделения вследствие трения в подшипнике (включая все внешние источники тепла) и количества тепла, которое может отводиться от подшипника.

Скоростные характеристики определяются типоразмером и внутренней конструкцией подшипника, величиной нагрузки, условиями смазывания и охлаждения, а также типом сепаратора, точностью и внутренним зазором подшипника.

В общем случае в таблицах подшипников указаны две частоты вращения: (тепловая) номинальная частота вращения и (кинематическая) предельная частота вращения, величины которых зависят от критериев, принимаемых во внимание при ее оценке.

Номинальные частоты вращения

Номинальная (тепловая) частота вращения, указанная в таблицах подшипников, соответствует величине скорости, которая используется для определения допустимой эксплуатационной частоты вращения подшипника, нагруженного определенной нагрузкой и в присутствии смазочного материала определенной вязкости.

Величины указанных номинальных частот вращения соответствуют стандарту ISO 15312:2003 (за исключением упорных шарикоподшипников). Данный стандарт ISO разработан для смазывания маслом, но также действителен для пластичной смазки.

Номинальная частота вращения отдельного подшипника – это скорость при определенных условиях, при которой достигается тепловой баланс между теплом, выделяемым подшипником, и теплом, отводимым от подшипника через вал, корпус и смазочный материал. Эталонными условиями для достижения такого теплового баланса согласно ISO 15312:2003 являются

- превышение на 50 °C температуры окружающей среды, равной 20 °C, т.е. температура подшипника 70 °C, измеренная на неподвижном наружном или свободном кольце подшипника
- радиальный подшипник: постоянная радиальная нагрузка, составляющая 5 % от базовой статической грузоподъемности C_0
- упорный подшипник: постоянная осевая нагрузка, составляющая 2 % от базовой статической грузоподъемности C_0
- открытые подшипники с нормальным зазором

для подшипников, смазываемых маслом:

- смазочный материал: минеральное масло без добавок EP, имеющее кинематическую вязкость при 70 °C:
 $v = 12 \text{ мм}^2/\text{с}$ (ISO VG 32) для радиальных подшипников
 $v = 24 \text{ мм}^2/\text{с}$ (ISO VG 68) для упорных роликоподшипников
- способ смазывания: масляная ванна с уровнем масла, достигающим середины тела качения, находящегося в самом нижнем положении

для подшипников, смазываемых пластичной смазкой:

- смазочный материал: пластичная смазка на основе литиевого мыла/минерального масла, вязкость 100–200 $\text{мм}^2/\text{с}$ при 40 °C (например, ISO VG 150)
- количество смазки: примерно 30 % свободного пространства в подшипнике.

Т.к. пиковая температура возникает в начальный период эксплуатации подшипника, смазываемого пластичной смазкой, подшипник, возможно, должен отработать 10–20 часов, прежде чем его рабочая температура достигнет нормальной величины.

При этих определенных условиях номинальная частота вращения для смазывания маслом и пластичной смазкой будет одинаковой.

В случае вращения наружного кольца, показатели скорости, возможно, потребуются уменьшить.

Для некоторых подшипников, где предельная скорость не определяется тепловыделением контакта тел и дорожек качения, в таблицах подшипников приведены только величины предельных скоростей. К таким подшипникам относятся, в частности, подшипники с контактными уплотнениями.

Влияние нагрузки и вязкости масла на величину номинальной/допустимой скорости

Если величины нагрузки и вязкости превышают номинальные, сопротивление трению возрастает, и подшипник не может вращаться с рекомендуемой номинальной скоростью, если не будет расширен диапазон допустимых температур. Понижение вязкости приводит к повышению эксплуатационной частоты вращения.

Влияние нагрузки и кинематической вязкости на величину номинальной скорости можно определить по следующим диаграммам:

Диаграмма 1: Радиальные шарикоподшипники **стр. 110.**

Диаграмма 2: Радиальные шарикоподшипники **стр. 111.**

Диаграмма 3: Упорные шарикоподшипники **стр. 112.**

Диаграмма 4: Упорные шарикоподшипники **стр. 113.**

Смазывание маслом

Величины поправочных коэффициентов при смазывании маслом

- f_P : на влияние эквивалентной динамической нагрузки на подшипник P и
- f_V : на влияние вязкости

можно определить по **диаграмме 1–4** как зависимость между P/C_0 и средним диаметром подшипника d_m ,

где

P = эквивалентная динамическая нагрузка на подшипник, кН

C_0 = статическая грузоподъемность, кН

d_m = средний диаметр подшипника
= $0,5 (d + D)$, мм

Величины вязкости на диаграммах указаны согласно ISO, например, ISO VG 32, где 32 – вязкость масла при 40 °С.

Для условий постоянной номинальной температуры 70 °С допустимая частота вращения подшипника составляет

$$n_{perm} = n_r f_P f_V,$$

где

n_{perm} = допустимая частота вращения подшипника, об/мин

n_r = номинальная частота вращения, об/мин

f_P = поправочный коэффициент нагрузки подшипника P

f_V = поправочный коэффициент вязкости масла

Смазывание пластичной смазкой

Эти диаграммы также действительны для смазывания пластичной смазкой. Однако величины номинальной частоты вращения для смазывания пластичной смазкой основаны на вязкости базового масла VG 150, хотя также может использоваться диапазон вязкости ISO VG 100 – ISO VG 200. Для других вязкостей требуется вычислить величину u_{f_V} , которую необходимо рассчитать как отношение f_V для вязкости базового масла используемой пластичной смазки при 40 °С к f_V для масла ISO VG 150, т.е.

$$n_{perm} = n_r f_P \frac{f_V \text{ текущая вязкость}}{f_V \text{ вязкость ISO VG150}}$$

Пример 1

Радиальный шарикоподшипник SKF Explorer 6210 подвергается нагрузке $P = 0,24 C_0$ и смазывается масляной ванной с вязкостью масла 68 мм²/с при 40 °С. Какова величина допустимой частоты вращения?

Для подшипника 6210: $d_m = 0,5 (50 + 90) = 70$ мм. По **диаграмме 1, стр. 110**, для $d_m = 70$ мм и $P/C_0 = 0,24$, $f_P = 0,63$ и для $P/C_0 = 0,24$ и ISO VG 68, $f_V = 0,85$.

Тогда допустимая скорость вращения подшипника n_{perm} , при которой можно ожидать, что его рабочая температура будет 70 °С

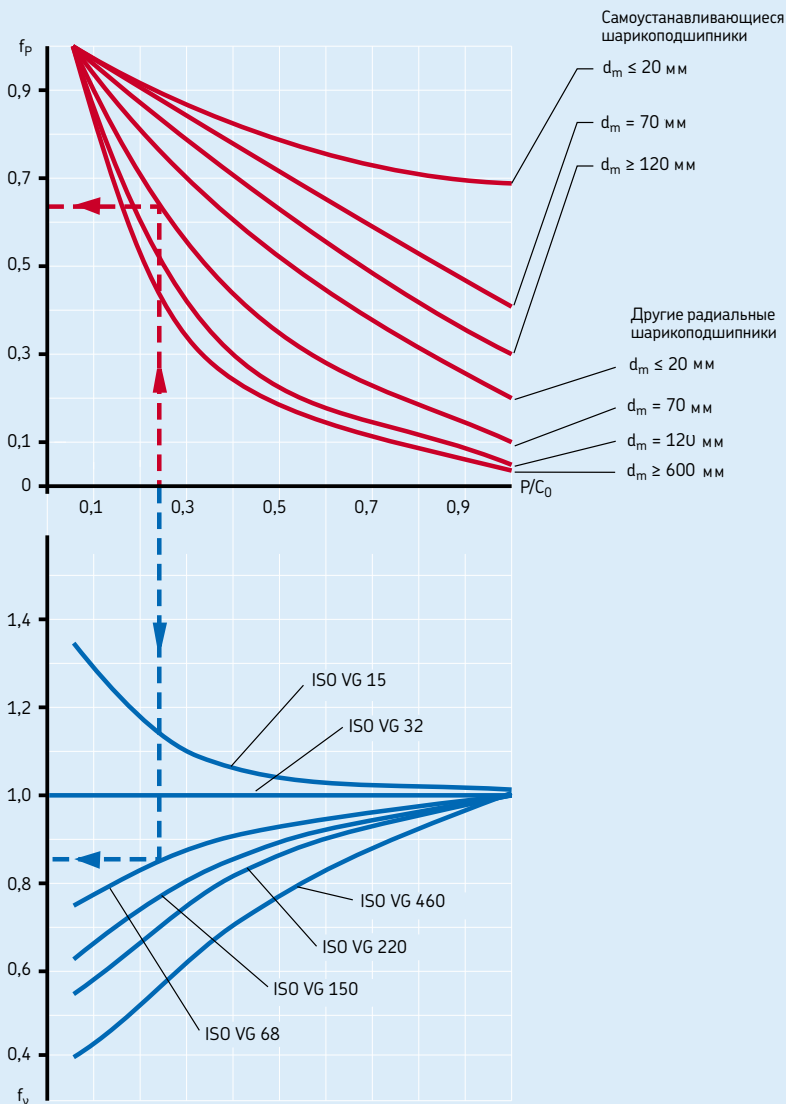
$$n_{perm} = 15\,000 \times 0,63 \times 0,85 = 8\,030 \text{ об/мин}$$

Пример 2

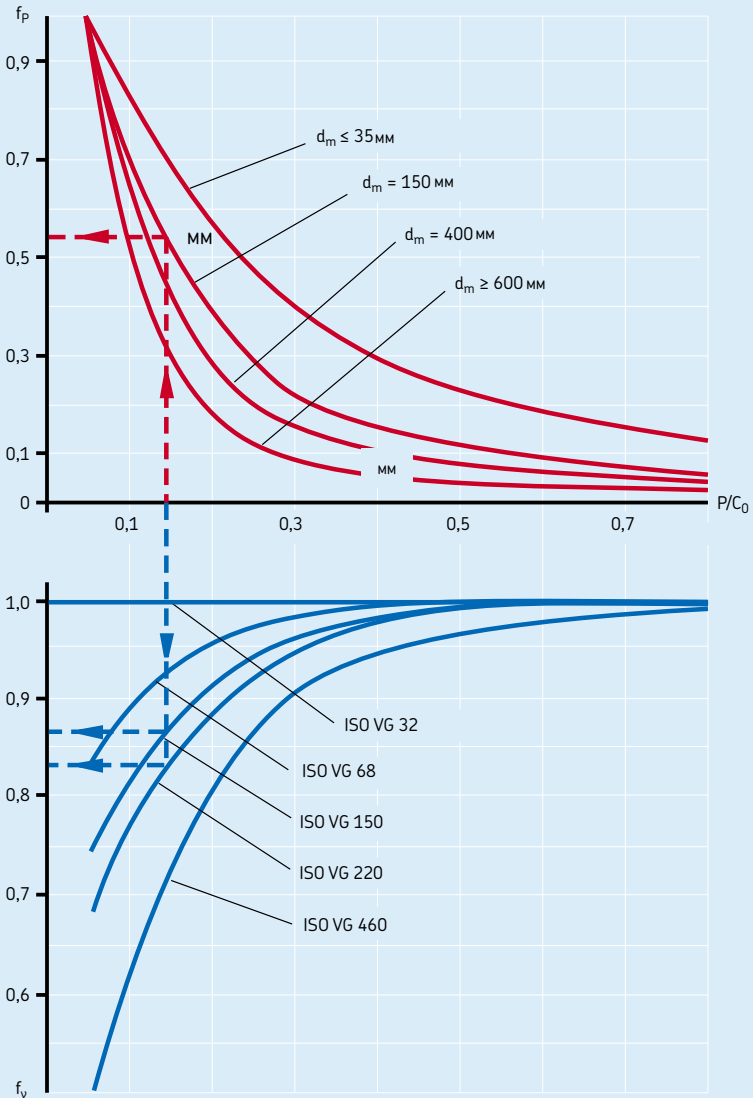
Сферический роликоподшипник SKF Explorer 22222 E подвергается нагрузке $P = 0,15 C_0$ и смазывается пластичной смазкой, имеющей вязкость базового масла 220 мм²/с при 40 °С. Какова величина допустимой частоты вращения?

Для подшипника 22222 E: $d_m = 0,5 (110 + 200) = 155$ мм. По **диаграмме 2, стр. 111**, для $d_m = 155$ мм и $P/C_0 = 0,15$, $f_P = 0,53$ и для $P/C_0 =$

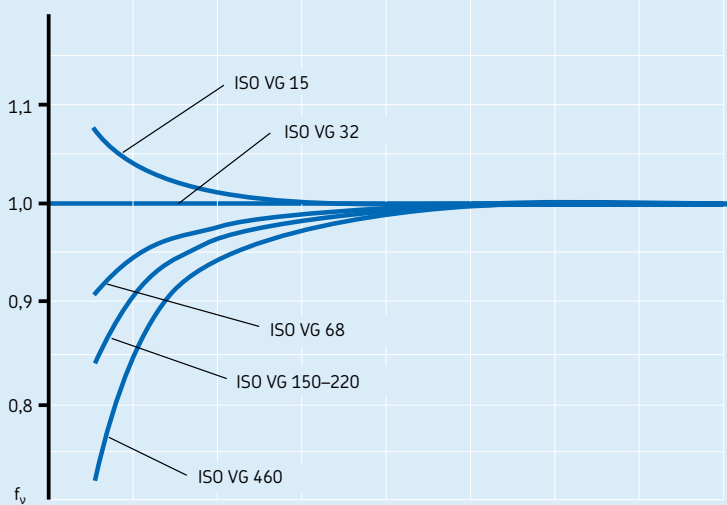
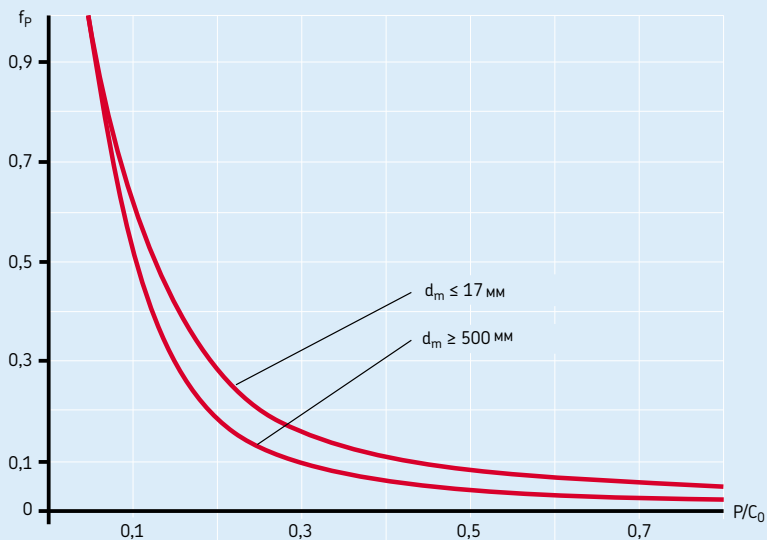
Поправочные коэффициенты f_p и f_v для радиальных шарикоподшипников



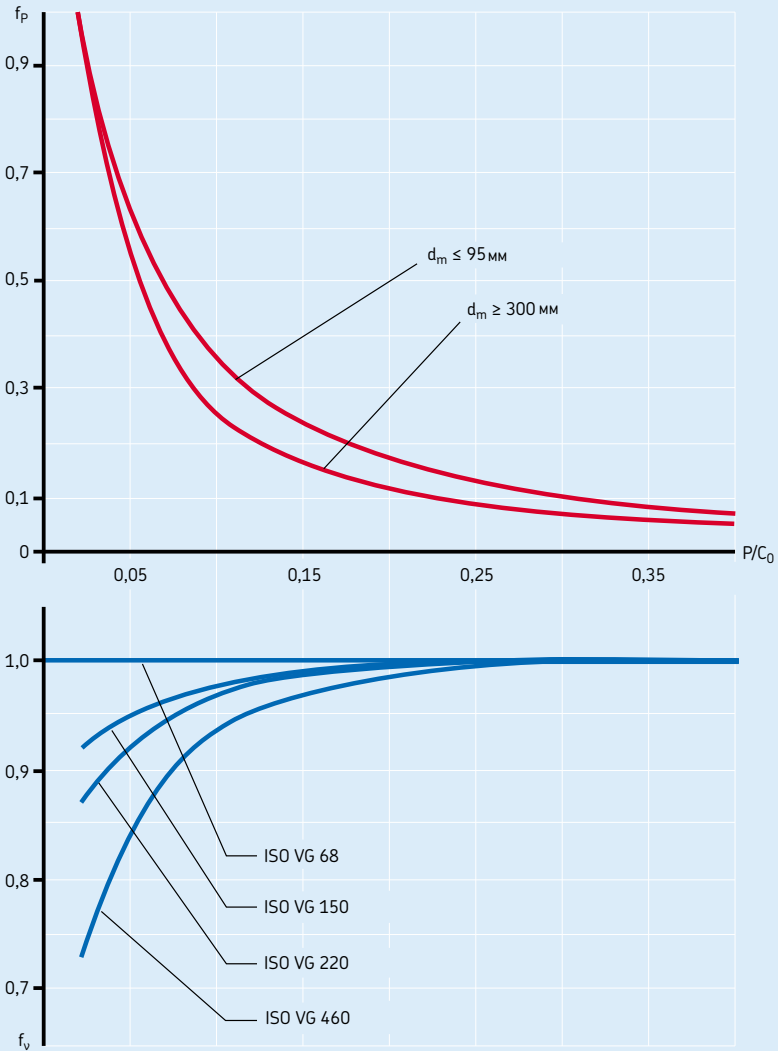
Поправочные коэффициенты f_p и f_v для радиальных роликоподшипников



Поправочные коэффициенты f_p и f_v для упорных шарикоподшипников



Поправочные коэффициенты f_p и f_v для упорных роликоподшипников



Скорости и вибрация

0,15 и ISO VG 220, $f_{v, \text{actual}} = 0,83$; для $P/C_0 = 0,15$ и ISO VG 150, $f_{v, \text{ISO VG150}} = 0,87$.

Тогда допустимая скорость вращения подшипника n_{perm} , при которой можно ожидать, что его рабочая температура будет 70 °С:

$$n_{\text{perm}} = 3\,000 \times 0,53 \times 0,83/0,87 = 1\,520 \text{ об/мин}$$

Частоты вращения, превышающие номинальные значения

Подшипники способны вращаться со скоростями, превышающими номинальные, если трение в них может быть уменьшено за счет смазки малыми, точно дозированными количествами смазочного материала или за счет отвода тепла циркулирующей масла, при помощи ребер охлаждения на корпусе подшипника или направленными потоками охлаждающего воздуха (→ раздел «Способы смазывания маслом», на стр. 248).

Любое превышение номинальных скоростей без принятия вышеуказанных мер предосторожности вызывает сильный нагрев подшипника. Повышение температуры подшипника влечет за собой снижение вязкости смазочного материала и ухудшение условий образования смазочной пленки, что приводит к увеличению трения и дальнейшему повышению температуры. Если при этом рабочий зазор подшипника уменьшается из-за повышения температуры внутреннего кольца, конечным результатом будет заклинивание подшипника. В большинстве случаев превышение номинальных скоростей означает, что разница температур между внутренним и наружным кольцом больше нормальной. Поэтому, в таких случаях внутренний зазор подшипника, как правило, должен быть больше нормального (С3), и дополнительное внимание должно быть уделено распределению температур в подшипнике.

Предельные частоты вращения

Предельная частота вращения подшипника устанавливается с учетом таких факторов, как стабильность формы и прочность сепаратора, условия смазывания направляющих поверхностей сепаратора, величина центробежных и гироскопических сил, действующих на тела качения, точность и факторы, ограничивающие скорость, например, тип уплотнений и смазоч-

ного материала для подшипников с уплотнениями.

Величины предельных частот вращения, приведенные в таблицах подшипников, действительны для указанных типов подшипников и стандартных типов сепараторов.

Для эксплуатации подшипников на более высоких скоростях должны быть модифицированы такие ограничивающие скорость факторы, как точность вращения, материал и конструкция сепаратора, система смазывания и отвода тепла. По таким вопросам целесообразно обращаться в техническую службу SKF.

При смазывании пластичной смазкой должны дополнительно учитываться такие аспекты, как условия смазывания направляющих поверхностей сепаратора и сопротивление сдвигу смазочного материала, которые обусловлены характеристиками базового масла и загустителя (→ раздел «Смазывание пластичной смазкой», стр. 231).

Поскольку некоторые открытые шарикоподшипники имеют очень малое трение и их номинальные скорости вращения могут превышать предельные частоты вращения, необходимо произвести расчет величины допустимой скорости вращения, сравнить ее с величиной предельной частоты и оставить наименьшую из двух величин.

Следует помнить, что для стабильной работы подшипников на высоких частотах вращения на них должна действовать определенная минимальная нагрузка. Подробную информацию по этому вопросу можно найти во вступительных статьях соответствующих разделов под заголовком «Минимальная нагрузка».

Особые случаи

В некоторых случаях предельные частоты вращения подшипников не важны по сравнению с другими соображениями.

Малые скорости

При очень малой частоте вращения образование эластогидродинамической смазочной пленки в контакте тел и дорожек качения невозможно. В таких случаях обычно используют смазочные материалы, содержащие антизадирные (EP) добавки (→ раздел «Смазывание пластичной смазкой», стр. 231).

Колебательные движения

При таком типе движения направление вращения изменяется прежде, чем подшипник совершит полный оборот. Поскольку скорость в точке изменения направления вращения равна нулю, поддерживать в ней полную толщину гидродинамической смазочной пленки невозможно. В таких случаях, для формирования необходимой смазочной пленки, важно использовать смазочный материал, содержащий добавку EP.

Установить какой-либо предел скорости совершения таких колебательных движений невозможно, т.к. верхний предел скорости определяется не тепловым балансом, а силами инерции. При каждом изменении направления вращения существует опасность, что силы инерции вызовут проскальзывание в подшипнике и задирирование. Допустимые величины ускорений и замедлений зависят от массы тел качения и сепаратора, типа и количества смазочного материала, величины рабочего зазора и нагрузки на подшипник. Например, для подшипниковых узлов шатунов применяются подшипники с преднатягом, имеющие тела качения малого размера и веса. По таким вопросам следует обращаться в техническую службу SKF.

Возникновение вибрации в подшипнике

Сам по себе подшипник, как правило, не производит шумов. То, что подразумевают под выражением «шум подшипника», относится к звуковому эффекту вибрации, который прямо или косвенно передается подшипником сопряженным с ним деталям и узлу в целом. По этой причине проблемы шума можно расценивать как проблемы вибрации, относящиеся ко всей машине, в которой используется подшипник.

Изменение количества нагруженных тел качения

Если на подшипник действует радиальная нагрузка, то количество тел качения, несущих такую нагрузку, в процессе работы изменяется, например, 2-3-2-3. Это вызывает постоянное смещение направления нагрузки. При этом возникает вибрация, которую можно уменьшить при помощи осевого преднатяга для нагружения всех тел качения (невозможно в случае цилиндрических роликоподшипников).

Волнистость деталей

При посадке с натягом, подшипника на валу или в корпусе, кольцо подшипника может принимать форму сопряженной детали. При этом отклонения формы могут вызывать вибрации в процессе работы. Поэтому важно, чтобы обработка посадочных мест на валах и в корпусах соответствовала требуемым допускам (→ раздел «Допуски размеров и формы посадочных мест подшипников» стр. 194).

Местные повреждения

В результате небрежного обращения или неправильной установки подшипников на дорожках и телах качения могут возникать повреждения. В процессе работы вращение поврежденного подшипника вызывает вибрацию особой частоты. Частотный анализ вибраций помогает выявить поврежденные детали подшипника. Именно этот принцип используется в диагностическом оборудовании SKF для обнаружения дефектов подшипников.

Порядок расчета частот подшипника представлен в разделе «Расчеты» «Интерактивного инженерного каталога SKF» на интернет-сайте www.skf.com.

Воздействие загрязнений

При работе в загрязненных условиях частицы грязи проникают в подшипник и прокатываются между дорожками и телами качения. Уровень вибрации зависит от количества, размера и состава загрязняющих частиц. Никакой характерной частотной модели такая вибрация не имеет.

Влияние подшипника на вибрацию машин и механизмов

Во многих конструкциях жесткость подшипника составляет величину того же порядка, что и жесткости окружающих деталей. Это дает возможность уменьшить вибрацию машины за счет тщательного подбора подшипника (включая величину преднатяга и зазора) и его положения в машине. Существует три способа уменьшения вибрации:

- Устранение источника вибрации из механизма.
- Демпфирование.
- Изменение жесткости для изменения критических частот.