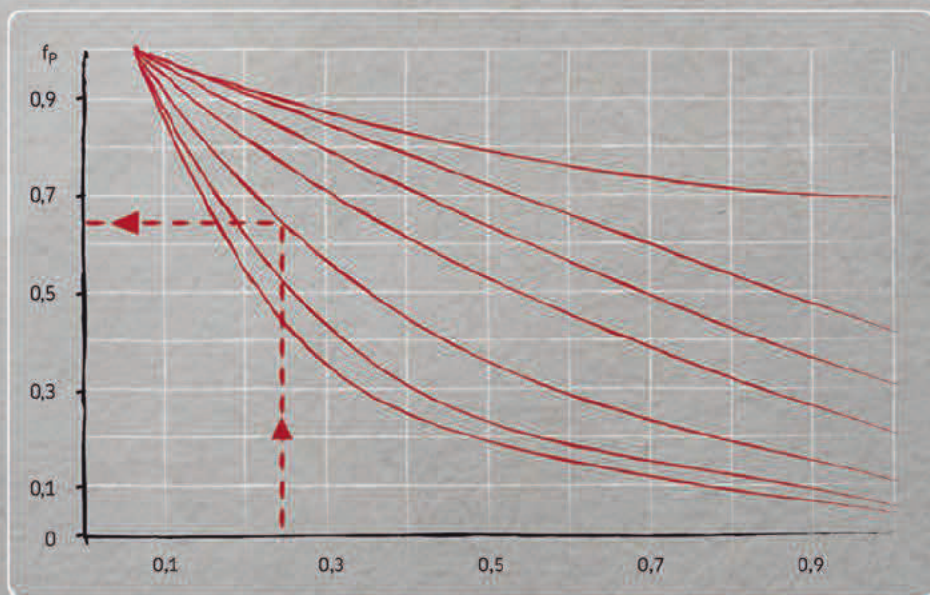




Частоты вращения

Основные сведения о частотах вращения подшипников	118
Номинальная частота вращения	118
Влияние нагрузки и вязкости масла на величину номинальной частоты вращения	120
Смазывание маслом	120
Смазывание пластичной смазкой	120
Частоты вращения, превышающие номинальные значения	125
Предельная частота вращения	126
Особые случаи	127
Малые частоты вращения	127
Колебательные движения	127
Возникновение вибрации на высоких частотах вращения	128
Изменение количества нагруженных тел качения	128
Точность сопряжённых деталей	128
Влияние подшипника на вибрацию оборудования	128

D

Основные сведения о частотах вращения подшипников

Существует предел скорости, при которой могут эксплуатироваться подшипники качения. Как правило, этот предел зависит от предельной рабочей температуры используемого смазочного материала или материалов, из которых изготовлены детали подшипника.

Частота вращения, при которой подшипник достигает предела рабочей температуры, зависит от мощности тепловыделения, обусловленного трением в подшипнике, внешних источников тепла, а также от эффективности отвода тепла от подшипника.

Количество выделяемого подшипником тепла зависит от его типа, размера, внутренней конструкции, нагрузки, смазывания и пр-вильности установки подшипника. Также влияние оказывает конструкция сепаратора, точность и внутренний зазор.

В таблицах подшипников обычно указываются две величины частоты вращения: номинальная (тепловая) и предельная (механическая).

В большинстве случаев предельная частота выше номинальной частоты вращения подшипника. Тем не менее, некоторые серии подшипников, благодаря низкому уровню трения и тепловыделения в сравнении с механической способностью подшипника выдерживать высокие скорости, могут иметь номинальную частоту вращения выше предельной. Однако, в любом случае, даже в самых благоприятных условиях необходимо строго соблюдать предельную частоту вращения подшипника.

Номинальная частота вращения

Номинальная частота вращения (тепловая) служит для быстрой оценки скоростных характеристик подшипника на основе нормированных эталонных значений тепловыделения при его работе, установленных стандартом ISO 15312 (→ **диаграмма 1**).

В стандарте ISO представлены нормальные рабочие условия и стандартные значения тепловыделения для данных условий. Стандартные значения плотности теплового потока, показанные на **диаграмме 1**, находятся

в пределах показателей работы подшипника в условиях, выделенных тёмным цветом.

Для оценки фактического увеличения температуры и теплового потока в конкретных условиях применения может потребоваться детальный анализ имеющегося теплоотвода из рабочей зоны подшипника. Данный анализ не рассматривается действующим стандартом ISO для определения частоты вращения. Для более подробного расчёта температурного режима обращайтесь в техническую службу SKF.

Значения номинальных частот вращения основаны на стандарте ISO 15312. Данный стандарт ISO разработан для смазывания маслом, но также действителен для пластичной смазки. В стандарте ISO не рассматривается вращение наружного кольца. Поэтому, в условиях вращения наружного кольца номинальную частоту вращения, возможно, потребуется уменьшить. За дополнительной информацией обращайтесь в техническую службу SKF.

Параметры частоты вращения подшипников с контактными уплотнениями не обуславливаются теплом, выделяемым при трении в зоне контакта тел и дорожек качения. Поэтому данные подшипники не включены в стандарт ISO о номинальных частотах вращения, и в таблицах подшипников перечислены только предельные частоты вращения.

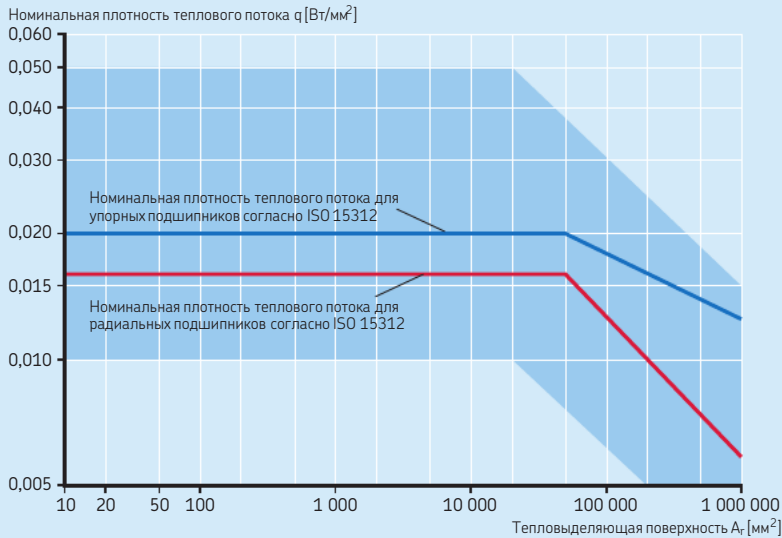
Номинальные частоты вращения по ISO указаны для открытых подшипников, работающих при следующих условиях:

- лёгкие нагрузки:
 - радиальная нагрузка $P = 0,05 C_0$ для радиальных подшипников
 - осевая нагрузка $P = 0,02 C_0$ для упорных подшипников
- номинальное повышение температуры на 50 °C (температура окружающей среды 20 °C)
- правильное смазывание и чистые рабочие условия
- нормальный внутренний зазор (→ **д-стр. 149**)

Значения SKF для номинальной частоты вращения соответствуют данным условиям, за исключением условия величины зазора. Значения SKF действительны при наличии достаточного рабочего зазора (→ **д-стр. 149**), что в некоторых

Диаграмма 1

Плотность теплового потока



D

случаях требует увеличения начального зазора в подшипнике.

При смазывании пластичной смазкой, в первое время после пуска возможен повышенный нагрев, пока подшипники не достигнут установившейся нормальной рабочей температуры.

Влияние нагрузки и вязкости масла на величину номинальной частоты вращения

Если величины нагрузки или вязкости превышают номинальные, возрастает сопротивление от сил трения, что требует коррекции номинальной частоты вращения. И наоборот, пониженные значения вязкости смазочного материала или нагрузки делают возможным увеличение частоты вращения.

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

- для радиальных шарикоподшипников (→ **диаграмма 2**)
- для радиальных роликоподшипников (→ **диаграмма 3, стр. 122**)
- для упорных шарикоподшипников (→ **диаграмма 4, стр. 123**)
- для упорных роликоподшипников (→ **диаграмма 5, стр. 124**)

Смазывание маслом

Значения поправочных коэффициентов при смазывании маслом можно определить по **диаграммам 2 – 5** как функцию P/C_0 и среднего диаметра подшипника d_m :

- f_P для влияния эквивалентной динамической нагрузки на подшипник P
- f_v для влияния вязкости

где

P = эквивалентная динамическая нагрузка на подшипник [кН]

C_0 = статическая грузоподъемность [кН]
(→ **таблицы подшипников**)

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

Величины вязкости на диаграммах указаны согласно ISO, например, ISO VG 32, где 32 — вязкость масла при 40 °C (

Скорректированная номинальная частота вращения в случае смазывания маслом определяется по формуле

$$n_{ar} = n_r \cdot f_P \cdot f_v$$

где:

n_{ar} = скорректированная номинальная частота вращения [об/мин]

n_r = номинальная частота вращения [об/мин]
(→ **таблицы подшипников**)

f_P = поправочный коэффициент влияния нагрузки на подшипник P

f_v = поправочный коэффициент влияния вязкости масла

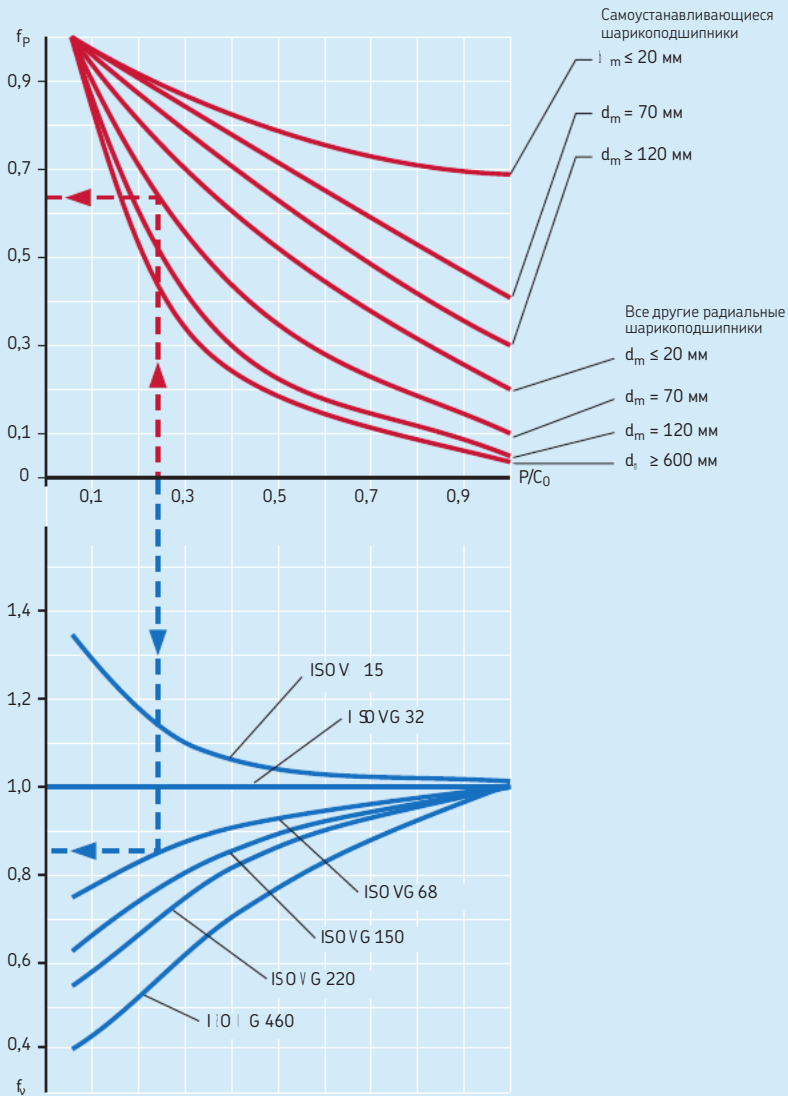
Смазывание пластичной смазкой

Значения поправочного коэффициента нагрузки на подшипник (f_P), представленные в **диаграммах 2 – 5**, также действительны в случае смазывания пластичными смазками. При использовании пластичных смазок с вязкостью базового масла от 100 до 200 мм²/с при 40 °C (

эффициента для вязкости $f_v = 1$. В случае других величин вязкости базового масла значение f_v следует сравнить со значением масла ISO VG 150. Скорректированная номинальная частота вращения в случае смазывания пластичной смазкой определяется по формуле

$$n_{ar} = n_r \cdot f_P \cdot \frac{f_{v \text{ фактическая вязкость базового масла}}}{f_{v \text{ ISO VG150}}}$$

Диаграмма 2

Поправочные коэффициенты f_p и f_v для радиальных шарикоподшипников

D

Поправочные коэффициенты f_p и f_v для радиальных роликоподшипников

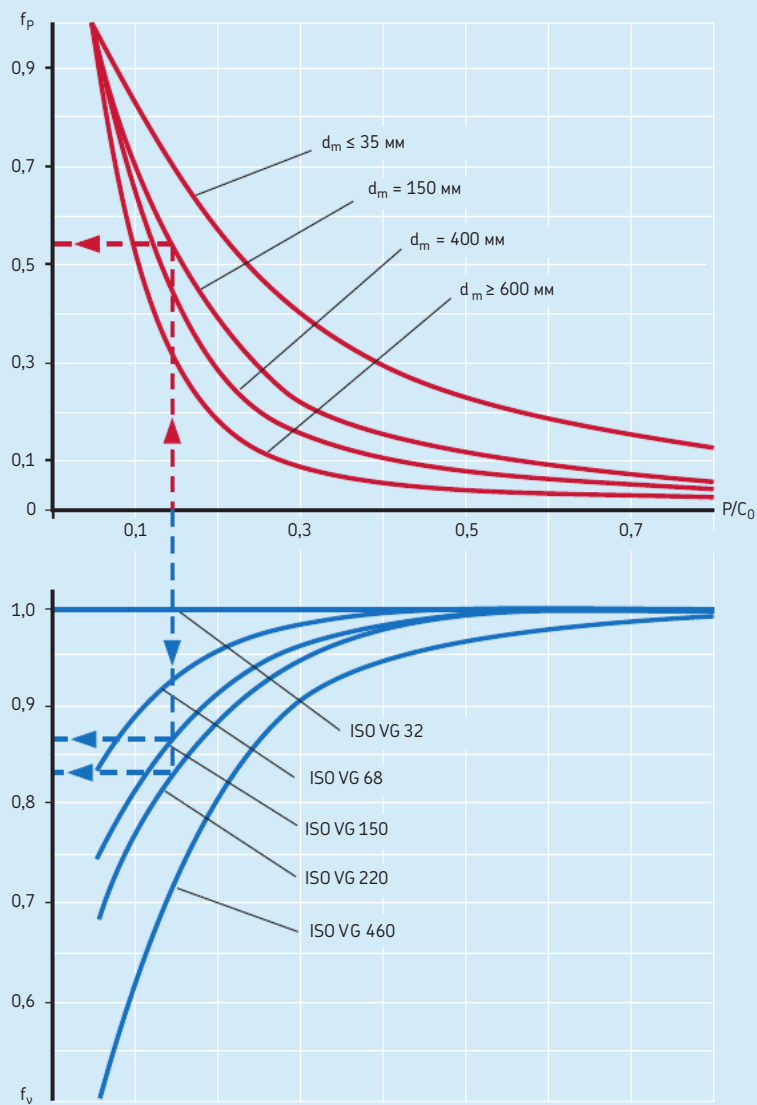
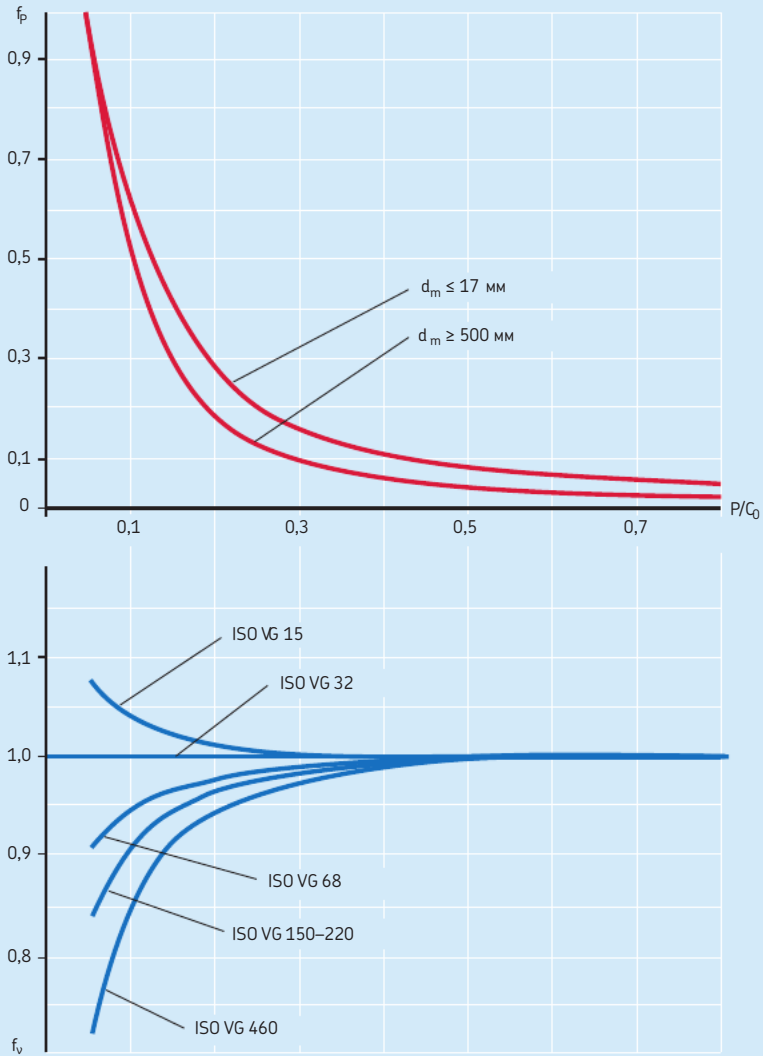


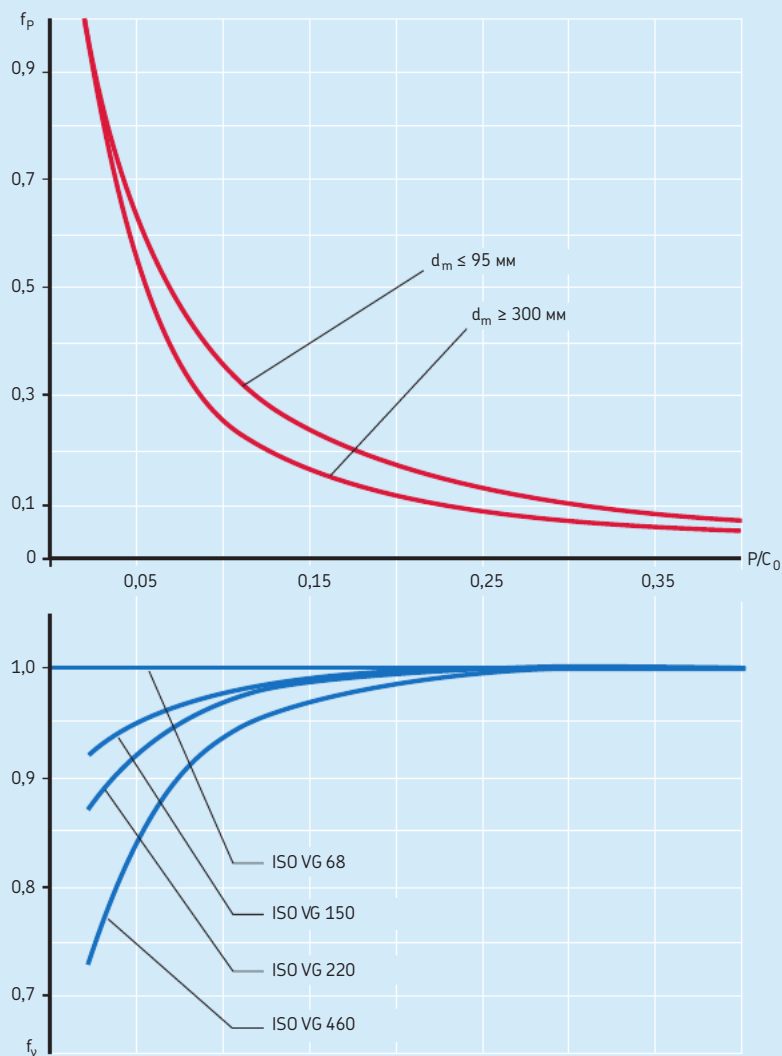
Диаграмма 4

Поправочные коэффициенты f_p и f_v для упорных шарикоподшипников



D

Поправочные коэффициенты f_p и f_v для упорных роликоподшипников



Пример 1

Радиальный шарикоподшипник 6210 класса SKF Explorer смазывается при частичном погружении в масляную ванну. Вязкость масла — $68 \text{ мм}^2/\text{с}$ при 40°C ( нагрузка $P = 0,24 C_0$. Какова будет скорректированная номинальная частота вращения?

Для подшипника 6210: $d_m = 0,5 (50 + 90) = 70 \text{ мм}$ и $n_r = 15\,000 \text{ об/мин}$. Из **диаграммы 2, стр. 121**, следует: при $d_m = 70 \text{ мм}$ и $P/C_0 = 0,24$, $f_p = 0,63$ и при $P/C_0 = 0,24$ и ISO VG 68, $f_v = 0,85$.

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

Предельная частота вращения для данного подшипника составляет $10\,000 \text{ об/мин}$, что превышает его скорректированную номинальную частоту вращения. В подобных случаях наиболее значимым для ресурса подшипника является меньшее из двух значений частоты вращения. Как правило, частота вращения, близкая к скорректированной номинальной частоте вращения, создаёт благоприятные условия для увеличения ресурса подшипника. В то же время, после дополнительной оценки конкретных условий окружающей среды и температурного баланса, могут быть также приемлемы повышенные значения, вплоть до предельной частоты вращения подшипника.

Пример 2

Сферический роликподшипник 22222 E класса SKF Explorer, смазываемый пластичной смазкой, воспринимает нагрузку $P = 0,15 C_0$. Вязкость базового масла пластичной смазки составляет $220 \text{ мм}^2/\text{с}$ при 40°C ( Какова будет скорректированная номинальная частота вращения?

Для подшипника 22222 E: $d_m = 0,5 (110 + 200) = 155 \text{ мм}$ и $n_r = 3\,000 \text{ об/мин}$. Из **диаграммы 3, стр. 122** следует: при $d_m = 155 \text{ мм}$ и $P/C_0 = 0,15$, $f_p = 0,53$ и при $P/C_0 = 0,15$ и ISO VG 220, $f_{v \text{ фактическая}} = 0,83$; при $P/C_0 = 0,15$ и ISO VG 150, $f_{v \text{ ISO VG150}} = 0,87$.

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

Вплоть до данной частоты вращения тепловые условия подшипника, как правило, считаются нормальными. При определённых об-

стоятельствах также могут быть приемлемыми повышенные частоты вращения до $4\,000 \text{ об/мин}$. Для этого необходимо произвести оценку повышения температуры подшипникового узла, исходя из фактических условий тепловыделения от сил трения и охлаждения. В подобных случаях необходима проверка и корректировка параметров рассеивания тепла, смазки, внутреннего зазора в подшипнике и точности его посадки для обеспечения повышенной частоты вращения. Такие корректировочные расчёты можно получить, обратившись в техническую службу SKF.

Частоты вращения, превышающие номинальные значения

Как было указано в предыдущем примере, подшипники могут работать при частотах вращения выше номинальных при условии контроля повышения рабочей температуры и отсутствия негативного влияния на подшипник или подшипниковый узел.

Прежде чем использовать подшипник на увеличенных частотах вращения, убедитесь, что все его детали, включая сепаратор(ы) и уплотнение(я), смогут выдержать повышение температуры. Кроме того, проверьте параметры необходимого зазора или предварительного натяга, а также смазочный материал на возможность работы при повышенных температурах.

Рабочая температура может контролироваться при возможности уменьшения трения в подшипнике или обеспечении теплоотвода от подшипникового узла.

Достичь определённого уменьшения трения можно, используя оптимизированную систему смазывания с подачей точно дозированного, небольшого количества пластичной смазки или масла в подшипник.

Отвод тепла из подшипникового узла может быть осуществлён несколькими способами. Стандартные методы охлаждения масла в смазываемом маслом оборудовании включают: вентиляторы, вспомогательные охлаждающие устройства и циркуляционные системы смазывания ( **стр. 262**).

Для подшипников, компенсирующих осевое смещение между одним из колец подшипника и его посадочным местом, важно проверить осевое перемещение подшипника

при фактических рабочих условиях. В некоторых случаях может потребоваться оптимизация других влияющих на частоту вращения факторов, таких как геометрические допуски, конструкция сепаратора и материал подшипника. Любое повышение температуры подшипника снижает вязкость и эффективность смазочного материала, усложняя поддержание достаточной толщины гидродинамической смазочной плёнки между телами и дорожкой качения.

В большинстве случаев это приводит к дополнительному повышению трения и тепловыделению из-за трения. При достижении режима работы, при котором внутреннее кольцо нагревается значительно больше наружного, рабочий зазор может уменьшиться вплоть до заклинивания подшипника. Любое увеличение частоты вращения выше номинальной означает, что разница температур между внутренним и наружным кольцом больше нормальной. Поэтому может потребоваться подшипник с внутренним зазором больше, чем у выбранного изначально (→  стр. 149).

Также может быть целесообразно более внимательно изучить распределение температуры в подшипнике и оценить предельно допустимые температуры для сепаратора и смазочного материала, поскольку температура в установившемся режиме работы выше 70 °C (→  стр. 153 и  стр. 244).

Если предполагается эксплуатировать подшипники в условиях частоты вращения выше номинальных значений (тепловых), следует обратиться в техническую службу SKF. Общим правилом является контроль предельной частоты вращения подшипника, даже при самых благоприятных условиях трения и охлаждения.

Предельная частота вращения

Предельная частота вращения подшипника (кинематическая) устанавливается с учётом таких факторов, как стабильность формы и прочность сепаратора, условия смазывания направляющих поверхностей сепаратора, величины центробежных и гироскопических сил, действующих на тела качения, точность посадки подшипника в корпусе и других факторов, ограничивающих частоту вращения, например, типа уплотнений и смазочного материала для уплотнённых подшипников.

Опыт показывает, что даже при самых благоприятных условиях нагрузки и минимальном трении существуют максимально допустимые частоты вращения подшипника, которые не должны превышать по техническим соображениям, а также в силу того, что поддержание рабочей температуры подшипника на приемлемом уровне требует очень высоких затрат.

Указанные в таблице подшипников предельные частоты вращения действительны для подшипников базовой конструкции. В случае, если предельная частота вращения выше номинальной, можно ожидать значительного превышения номинальной температуры. В данных условиях могут потребоваться соответствующие измерения (→  стр. 125).

Если такие меры неприемлемы, может привести к сущес-
твенному сокращению их ресурса (→  стр. 153 и  стр. 244).

Если предполагается эксплуатировать под-
шипники в условиях частоты вращения выше
номинальных значений (тепловых), следует
обратиться в техническую службу SKF. Общим
правилом является контроль предельной ча-
стоты вращения подшипника, даже при самых
благоприятных условиях трения и
охлаждения.

Также необходимо рассматривать совме-
стимость применяемых материалов в системе
подшипникового узла для обеспечения тре-
буемого ресурса подшипника при рабочей
температуре (→  стр. 150 и  стр. 244).

Если температура в установившемся
рабочем режиме выше максимально реко-
мендованной в соответствии со степенью тер-
мической стабилизации, например, 120 °C
(

→  стр. 82), следует использовать
подшипник с более высокой степенью стаби-
лизации для поддержания посадочного на-
тяга и внутреннего зазора в подшипнике.

В случае смазывания пластичной смазкой следует учитывать дополнительные факторы, такие как смазывание направляющих поверхностей сепаратора и консистенцию смазки при рабочей температуре (→  стр. 242).

Некоторые открытые шарикоподшипники имеют очень малое трение, и их номинальные частоты вращения могут превышать предельные значения. Поэтому необходимо вычислить и сравнить скорректированную номинальную частоту вращения с предельным значением. Должна быть использована меньшая из двух величин.

Для обеспечения стабильной работы подшипников, в частности при высоких частотах вращения, на них должна воздействовать определённая минимальная нагрузка. Подробная информация о необходимой минимальной нагрузке представлена в разделах  соответствующих глав каталога.

В некоторых случаях, например, для некоторых цилиндрических роликоподшипников, при выборе альтернативного типа сепаратора подшипники могут работать с более высокими частотами вращения, чем предельные для стандартных исполнений, значения которых указаны в таблицах (→  таблица 9, стр. 600).

Как правило, если предельная частота вращения не соответствует условиям эксплуатации, может потребоваться применение другого подшипника, модификация системы смазывания или подшипникового узла. Она может включать уменьшение геометрических допусков, замену материалов сепаратора, замену смазочного материала или изменение способа смазывания, а также оптимизацию теплоотвода.

В подобных случаях рекомендуется обратиться в техническую службу SKF за консультацией.

Особые случаи

В некоторых случаях особую важность по сравнению с предельными частотами вращения подшипника приобретают другие факторы.

Малые частоты вращения

При очень малой частоте вращения образование эластогидродинамической смазочной плёнки в зоне контакта тел и дорожек качения практически невозможно. В таких случаях следует рассмотреть возможность использования смазочных материалов, содержащих антизадирные (EP) присадки (→  стр. 242).

В качестве альтернативы можно рассмотреть применение антифрикционного заполнителя Solid Oil (→ стр. 1185).

Колебательные движения

При таком типе движения направление вращения изменяется прежде, чем подшипник совершит полный оборот. Поскольку частота вращения в точке изменения направления вращения равна нулю, практически невозможно обеспечить поддержание гидродинамической смазочной плёнки достаточной толщины. В связи с этим SKF рекомендует использовать антизадирную (EP) присадку для поддержания достаточной толщины граничной смазочной плёнки для работы в условиях приложенных нагрузок. Гибридные подшипники (→ стр. 1219) показывают хорошую работоспособность в условиях недостаточного смазывания и, следовательно, могут дать положительные результаты в условиях быстрых пусков, остановок и резкого изменения направления действия нагрузок.

В целом, установить какой-либо предел скорости совершения колебаний невозможно, поскольку верхний предел определяется не тепловым балансом, а силами инерции. При каждом изменении направления существует опасность, что силы инерции вызовут проскальзывание тел качения в подшипнике и задиры на дорожках качения. Величина ускорений и замедлений зависит от массы тел качения и сепаратора, типа и количества смазочного материала, величины рабочего зазора и нагрузки на подшипник.

D

Возникновение вибрации на высоких частотах вращения

Высокая рабочая частота вращения приводит к повышению частоты перекачивания ролика в подшипнике и генерации высокочастотного шума. То, что подразумевают под выражением «шум подшипника», относится к звуковому эффекту вибрации, производимой и передаваемой подшипником на сопряжённые детали. Сопряжённые детали также способствуют понижению или повышению шумовых характеристик конструкции. Рассматривая проблему шума при высоких частотах вращения подшипника, целесообразно учитывать следующие дополнительные аспекты.

Изменение количества нагруженных тел качения

Если на подшипник действует радиальная нагрузка, то количество тел качения, несущих нагрузку, в процессе работы изменяется, например, 2–3–2–3. Это вызывает смещение направления нагрузки. При этом неизбежно возникает вибрация, которую можно уменьшить при помощи осевого преднатяга для нагружения всех тел качения. Такое, однако, невозможно в случае цилиндрических роликоподшипников, игольчатых и тороидальных роликоподшипников CARB, а также не рекомендуется для двухрядных подшипников.

Точность сопряжённых деталей

При посадке с натягом между кольцом подшипника и корпусом или валом кольцо подшипника может принимать форму сопряжённой детали. При этом все отклонения формы могут вызывать вибрации в процессе работы. Поэтому важно, чтобы обработка посадочных мест на валах и в корпусах соответствовала требуемым допускам (→  стр. 200).

Наличие местного повреждения дорожек качения или вмятин от твёрдых загрязняющих частиц также снижает точность микрогеометрии дорожек качения и увеличивает вибрацию в подшипнике. Применение смазочного материала высокой степени чистоты и защита от попадания загрязняющих частиц могут снизить уровень шума от работы подшипника.

Влияние подшипника на вибрацию оборудования

Во многих конструкциях жёсткость подшипника примерно того же порядка, что и жёсткость сопряжённых деталей. Это позволяет снизить вибрации в механизме путём выбора другого подшипника или регулировки преднатяга (зазора) в подшипниковом узле. Существует три способа уменьшения вибрации:

- Устранение источника возбуждения вибрации.
- Демпфирование критической вибрации между возбуждающей и резонирующими деталями.
- Изменение жёсткости элементов конструкции для изменения критических частот собственных колебаний.