FAG

Токоизолирующие подшипники FAG

Защита от повреждений, вызванных электрическим током

SCHAEFFLER

Предисловие

Повреждения, вызванные прохождением электрического тока через подшипник, и их последствия

Прохождение электрического тока может возникнуть через подшипники качения, установленные:

- в буксовых узлах и тяговых электродвигателях (железнодорожный транспорт);
- в двигателях переменного и постоянного тока (приводная техника);
- в генераторах (ветроэнергетические установки).

При неблагоприятных условиях это может стать причиной повреждения дорожки качения и тел качения, расщепления смазки, что, в свою очередь, ведет к внезапному преждевременному выходу мотора или генератора из строя. Кроме ремонтных расходов возникают дополнительные затраты, вызванные простоем оборудования.

Существенно более экономично было бы еще на этапе проектирования предусмотреть использование токоизолирующих подшипников. Низкие затраты на обслуживание и бесперебойность работы позволяют добиться положительного экономического эффекта для заказчика.

В большинстве случаев достаточно прервать электрическую цепь между корпусом и валом, то есть установить токоизолирующие подшипники в одной или в обеих опорах вала, в зависимости от конкретного случая применения, *рис. 1*.

Рисунок 1
Примеры применения

Предисловие

Содержание

Страница

Основные свойства
Токоизолирующие подшипники как превентивная мера 4

Рекомендации конструктору и обеспечение надежности
Типовые повреждения вследствие прохождения электрического тока через подшипник 6

Подшипники с керамическим покрытием 8

Гибридные подшипники 15

Примеры применения
Трехфазный электродвигатель 17

Буксовый узел 18

Тяговый электродвигатель 19

Генератор ветроэнергетической установки 20

Токоизолирующие подшипники

Основные свойства

К токоизолирующим подшипникам относятся все подшипники качения, которые обеспечивают изоляцию от прохождения электрического тока.

Подшипники с защитным покрытием, т.е. имеющие внутреннее или наружное кольцо с керамическим покрытием, являются изолированными. Керамический слой изолирует от прохождения электрического тока.

Гибридные подшипники, у которых тела качения выполнены из керамики, также относятся к токоизолирующим. В них сопротивление прохождению тока обеспечивают тела качения.

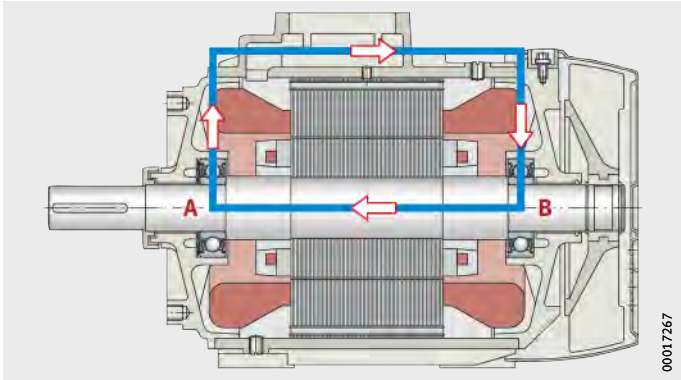
Токоизолирующие подшипники как превентивная мера

Как правило устранение причин, вызывающих электрическое напряжение в подшипнике качения, представляет собой трудную задачу. И все же, можно избежать повреждения подшипника, если воспрепятствовать прохождению тока или существенно снизить его силу. Для этого сегодня предлагается широкий ассортимент токоизолирующих подшипников качения в различных исполнениях. То, какие именно детали подшипника необходимо изолировать, зависит от вида напряжения.

Индуцированное напряжение вдоль вала

Индуцированное напряжение вдоль вала приводит к возникновению электрической цепи, проходящей через подшипник 1, корпус и подшипник 2, *рис. 1*.

Причиной такого напряжения на валу часто является несимметричное распределение магнитного потока в двигателе, что особенно часто встречается в двигателях с малым количеством пар полюсов. В этом случае для разрыва электрической цепи достаточно изолировать только один подшипник из двух. Как правило, изолируется подшипник не со стороны привода.



A = подшипник 1
B = подшипник 2

Рисунок 1
Индуцированное напряжение вдоль вала

Напряжение между валом и корпусом

При возникновении напряжения между валом и корпусом токи через оба подшипника текут в одном направлении. Причиной этому, прежде всего, является синфазное напряжение преобразователя частоты. В таких случаях рекомендуется изолировать оба подшипника, *рис. 2*.

Решающим критерием выбора токоизоляции является временная характеристика приложенного напряжения. При постоянном и медленно изменяющемся переменном напряжении наблюдается омическое сопротивление, при переменном напряжении повышенной частоты (которое зачастую присутствует при работе преобразователей частоты!) – емкостное сопротивление подшипника.

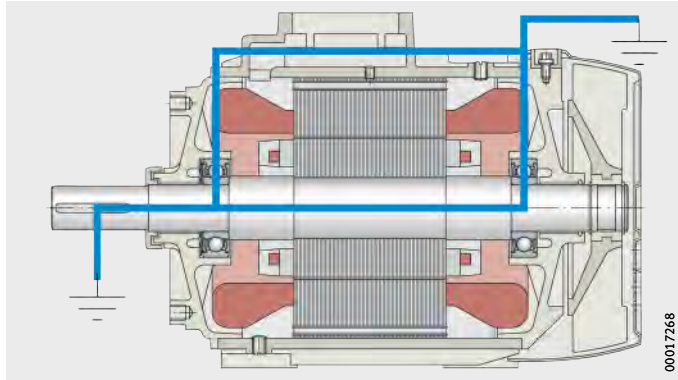


Рисунок 2
Напряжение между валом и корпусом

Рекомендации конструктору и обеспечение надежности

Типичные повреждения вследствие прохождения электрического тока через подшипник

Независимо от того, переменный (до частот в МГц-области) или постоянный ток проходил через подшипник, наблюдаются одинаковые картины изменения поверхностей.

Следы на дорожках качения и на поверхности тел качения

Часто наблюдаются матовые и серые следы одной ширины по всей дорожке качения и по поверхности тел качения. Такая картина не является специфической и может быть вызвана также и другими причинами (например, наличием абразивных частиц в масле), *рис. 3*.

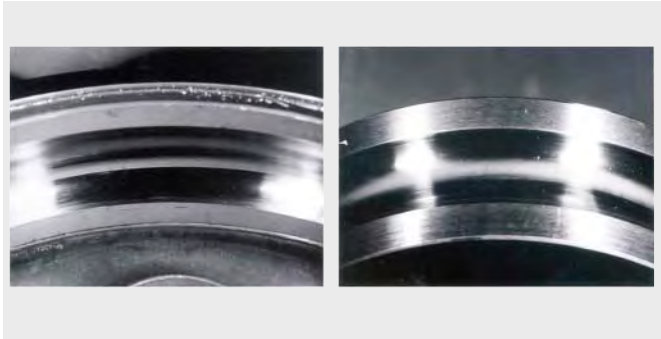


Рисунок 3
Следы на дорожках качения и на поверхности тел качения

Рифления

Так называемые рифления представляют собой периодические участки с канавками разной глубины, расположенные по окружности дорожки качения. Как правило, их появление бывает вызвано исключительно прохождением электрического тока, *рис. 4*.

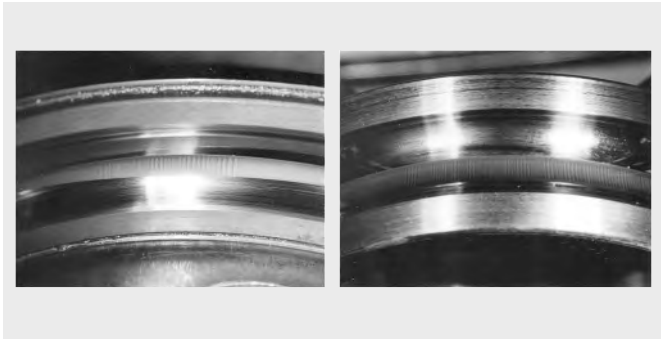


Рисунок 4
Рифления

Структура повреждений

Лишь в электронный растровый микроскоп становится видно, что обе картины повреждений характеризуются микроскопическими (мкм) наплавлениями и лунками, плотно покрывающими поверхности качения, *рис. 3* и *рис. 4*, стр. 6. Это подтверждает тот факт, что причиной повреждений стал электрический ток, *рис. 5*.

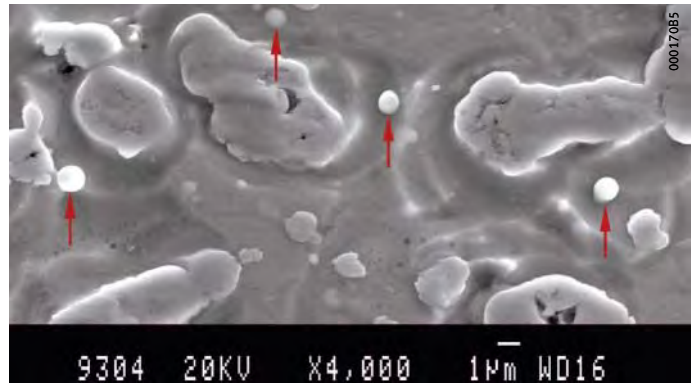


Рисунок 5
Структура повреждений, видимая в электронный растровый микроскоп

Возникновение повреждений подшипников

Микролунки и наплавления возникают при прохождении электрического разряда между всегда присутствующими пиками микронеровностей поверхностей дорожек качения и тел качения. При достаточной толщине масляной пленки в узких местах проходит искра, при этом основания пиков кратковременно расплавляются.

В области смешанного трения (металлический контакт) происходит микросваривание контактирующих поверхностей. Места микросварки сразу разрываются вследствие вращения подшипника. Кроме того, в обоих случаях материал вырывается из поверхности и затвердевает в виде капелек. Частично они попадают в смазочный материал, частично отлагаются на поверхности металла. Вследствие продолжительного перекатывания лунки и наплавления выравниваются и сглаживаются. При продолжительном протекании электрического тока контактирующие (тонкие) поверхностные слои с течением времени испытывают многократное переплавление.

Причиной большинства случаев выхода подшипников из строя является образование рифлений на дорожках качения, *рис. 4*, стр. 6. Эти периодические поврежденные участки на дорожках и телах качения возникают из-за продолжительного прохождения электрического тока и колебательных свойств деталей подшипника. Каждое наплавление достаточного размера при перекатывании через него вызывает радиальное перемещение тел качения. Параметры этих перемещений зависят от внутренней геометрии подшипника, частоты вращения и нагрузки.
При возвратном движении тел качения уменьшается толщина масляной пленки. В этой области увеличивается количество новых прохождений тока – начинается саморазвивающийся процесс. Спустя некоторое время поверхность дорожки качения по всей окружности кольца может покрыться рифлениями.
Они приводят к увеличению уровня вибрации и в дальнейшем являются причиной выхода подшипника из строя.

Токоизолирующие подшипники

Оценочным критерием опасности, создаваемой прохождением электрического тока через подшипник, на практике служит расчетная плотность тока, т.е. эффективная сила тока, распределенная по всей контактной поверхности тел качения с внутренним или наружным кольцом. Она зависит от типа подшипника и от рабочих условий. По современным данным, при плотности тока с действующей силой ниже приблизительно 0,1 А мм$^{-2}$ нет опасности повреждений подшипника. Если значение эффективной силы тока близко или превышает 1 А мм$^{-2}$, вероятность появления характерных повреждений подшипника весьма высока.

Влияние на смазочное вещество

Электрический ток оказывает негативное влияние также и на смазочное вещество. Под действием тока основное масло и присадки окисляются и расщепляются. Это хорошо прослеживается в инфракрасном спектре. Вследствие преждевременного старения и обогащения металлическими частицами смазывающие свойства ухудшаются, что может привести к выходу подшипника из строя вследствие перегрева.

Подшипники с керамическим покрытием

Подшипники с керамическим покрытием – это стандартные подшипники, у которых на внутреннее или наружное кольцо нанесено керамическое покрытие Insutect, *рис. 6* и *рис. 7*.

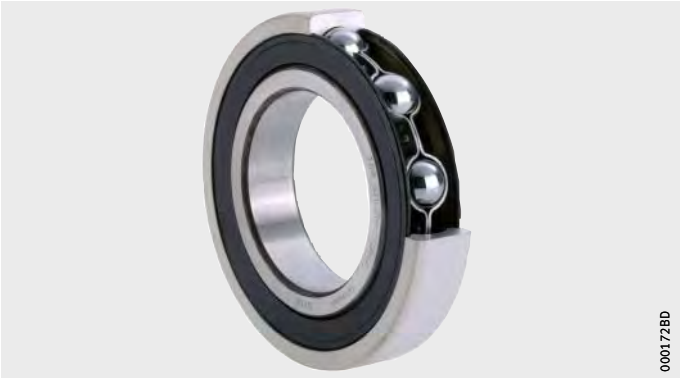
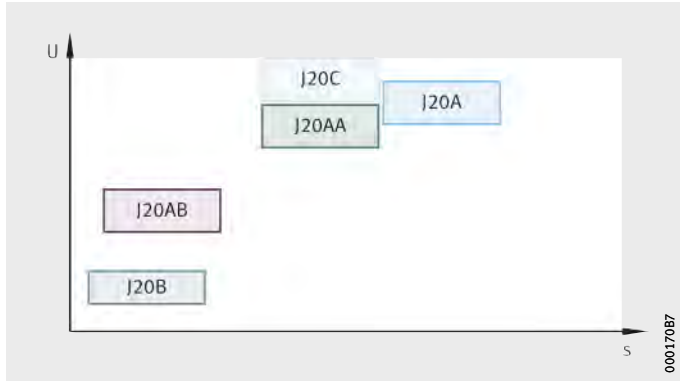


Рисунок 6
Радиальный шарикоподшипник с керамическим покрытием

Рисунок 7
Цилиндрический роликоподшипник с керамическим покрытием

Преимущества подшипников FAG с покрытием Insutect:

- Высокая степень электроизоляции:
  - Подшипники с покрытием из оксидной керамики имеют дополнительный знак в обозначении (J20). Такие покрытия наносятся на поверхности подшипника методом плазменного напыления, *рис. 9*, стр. 10. Слой оксидной керамики обладает очень высокой твердостью, износостойкостью и теплопроводностью.
- Изоляция J20AB превосходно защищает от протекания электрического тока из-за индуцированного напряжения вдоль вала. За счет специальной герметизации покрытие J20AB сохраняет изолирующие свойства во влажной атмосфере.
- Толщина слоя нанесенной на наружное кольцо изоляции J20AA вдвое превышает толщину слоя J20AB. Поэтому она обеспечивает дополнительную надежность защиты даже при высокочастотных токах.
- Такой же надежностью, как изоляция J20AA, обладает изоляция J20C. Но в данном случае покрытие нанесено на внутреннее кольцо. Благодаря меньшей площади покрытой поверхности она обладает еще более высокой степенью защиты от высокочастотных токов. Такая изоляция специально предназначена для применений с токами высокой частоты и вращающимся наружным кольцом.
- Семейство Insutect оптимально дополняют изолирующие покрытия J20B и J20A, применяемые в особых случаях, когда требуется обычная (J20B) или специальная защита, прежде всего, при больших диаметрах (J20A), *рис. 8*.
- Габаритные размеры токоизолированных подшипников соответствуют DIN 616 (ISO 15). Таким образом, токоизолированные подшипники взаимозаменяемы со стандартными подшипниками.
- Выпускаются радиальные шарикоподшипники, начиная с серии 62. Наряду с открытым исполнением поставляются подшипники с одно- или двусторонними встроенными уплотнениями. Это дает возможность потребителям продлить время использования подшипников, заполненных смазкой на весь срок службы. Кроме того, предлагается ряд специальных конструктивных исполнений.



U = напряжение пробоя
s = толщина слоя

Рисунок 8
Обзор покрытий

Метод нанесения покрытий

При плазменном напылении между двумя электродами создается электрическая дуга, и происходит ионизация подаваемого инертного газа. Возникший при этом свободный плазменный поток является несущим для подводимого порошка оксида алюминия. Порошок плавится и с высокой скоростью напыляется на наружное или на внутреннее кольцо, *рис. 9*. Нанесенный таким способом оксидный слой превосходно держится на основном материале кольца, поверхности которого до этого следует придать шероховатость. Затем проводится герметизация оксидного слоя.

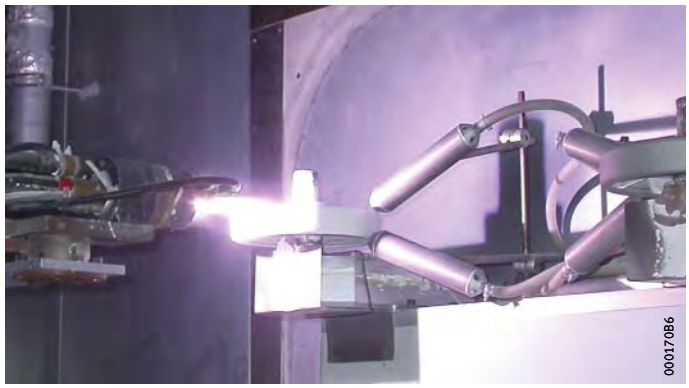


Рисунок 9
Метод плазменного напыления

Сопротивление на пробой

Все покрытия подвергаются стопроцентной проверке качества и гарантируют изоляцию на пробой, как минимум:

- J20AB – до 1 000 В пост. тока;
- J20AA, J20C – до 3 000 В пост. тока;
- J20B – до 500 В пост. тока.

При напряжении ниже указанных значений изолирующий слой пропускает через подшипник лишь очень малый ток.

В целом токоизолирующий подшипник можно представить в виде параллельной схемы из сопротивления и электроемкости, *рис. 10*. Для высокого качества изоляции омическое сопротивление должно быть как можно выше, а емкость – как можно ниже.

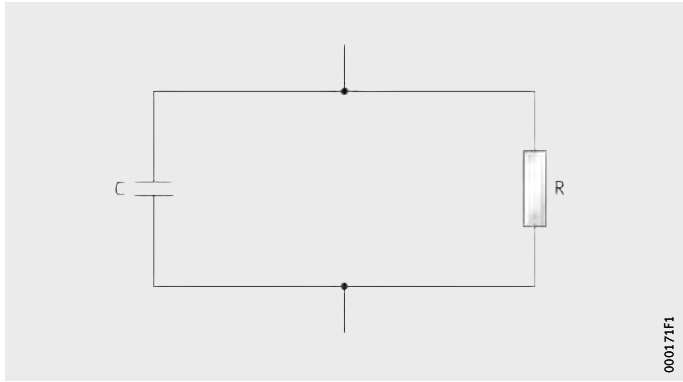


Рисунок 10
Параллельное подключение сопротивления и емкости

При этом различают два вида сопротивления:

- Сопротивление постоянному току.
  - Обычно оно составляет при комнатной температуре от 1 ГОм до 10 ГОм в зависимости от размера подшипника. С повышением температуры сопротивление снижается по экспоненциальному закону, обычно приблизительно на 40% – 50% на каждые 10 К. Однако даже при рабочей температуре +60 °C или +80 °C сопротивление изоляции имеет порядок нескольких МОм, что в соответствии с законом Ома I = U/R при напряжении до 1 000 В вызывает в подшипнике протекание токов силой значительно ниже 1 мА. Токи такой силы не являются критичными для подшипника.
- Сопротивление переменному току.
  - Изолированная конструкция обладает электроемкостью C, способной накапливать заряды. Под влиянием переменного напряжения это приводит к прохождению переменного тока через контактную поверхность тел качения и дорожек качения. Для действующих значений тока и напряжения в случае гармонического сигнала с круговой частотой ω справедлива формула $I = U \cdot \omega \cdot C$.
  - Аналогично закону Ома емкостное сопротивление подшипника обозначается $Z = 1/(\omega \cdot C)$. Электроемкость подшипника с покрытием из оксидной керамики, как правило, составляет от 2 нФ до 20 нФ в зависимости от размера подшипника. Его емкостное сопротивление при частоте 50 Гц находится в интервале 0,15 МОм – 1,5 МОм, то есть существенно ниже сопротивления постоянному току. При более высоких частотах это значение уменьшается. В большинстве случаев оно все же существенно выше, чем сопротивление неизолированного подшипника, которое при напряжении свыше приблизительно 1 В весьма низко (1 Ом и менее).

При одинаковом напряжении и одинаковой частоте прохождение тока определяется емкостью системы. Большая толщина слоя s и малая площадь снабженной покрытием контактной поверхности A подшипника обуславливают низкую электроемкость и, следовательно, низкую плотность тока, см. равенство.

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \left(\frac{A}{s}\right)$$

C — Ф
электроемкость подшипниковой опоры;

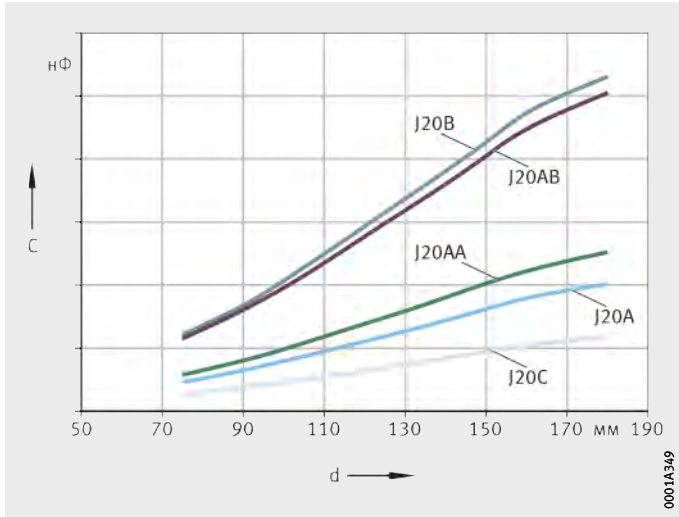
ε_0 — $ФВ^{-1}м^{-1}$
диэлектрическая постоянная;

ε_r — $ФВ^{-1}м^{-1}$
относительная диэлектрическая проницаемость, зависящая от материала;

A — $м^2$
площадь контактной поверхности подшипника;

s — мкм
толщина слоя.

Зависимость электроемкости подшипника от внутреннего диаметра и используемого покрытия показана на диаграмме, *рис. 11*.

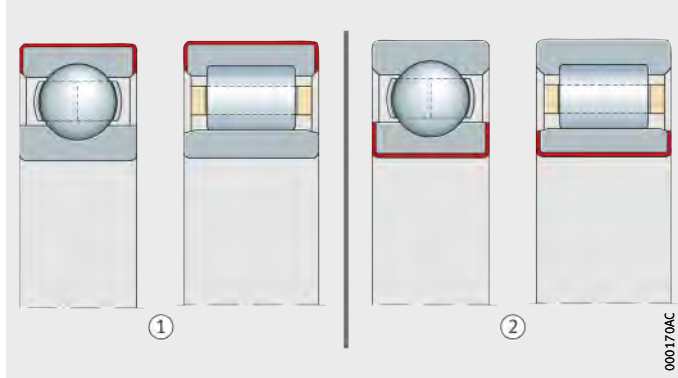


C = электроемкость
d = диаметр отверстия

Рисунок 11
Зависимость между электроемкостью и используемым покрытием

Виды покрытий и диапазоны размеров

Различные виды покрытий подшипников показаны в поперечном сечении, *рис. 12*. Параметры и диапазоны размеров покрытий представлены в сравнении, см. табл.



① наружное покрытие J20B, J20B, J20AB, J20AA

② внутреннее покрытие J20C

Рисунок 12
Виды покрытий

Параметры разных видов покрытий

Параметр	J20AB	J20AA	J20C
Напряжение пробоя	1 000 В пост. тока	3 000 В пост. тока	3 000 В пост. тока
Окружающая среда	Сухо, сыро	Сухо, сыро	Сухо, сыро
Толщина слоя	100 мкм	200 мкм	200 мкм
Возможные размеры подшипника	70 мм – 1 400 мм наружный диаметр	70 мм – 500 мм наружный диаметр	70 мм – 340 мм отверстие внутреннего кольца

Параметры разных видов покрытий Продолжение

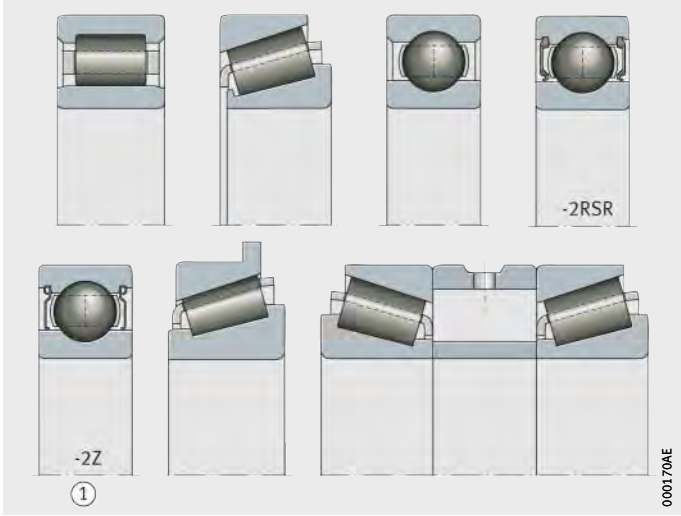
Параметр	J20B	J20A
Напряжение пробоя	500 В пост. тока	1 000 В пост. тока
Окружающая среда	Сухо	Сухо
Толщина слоя	≦ 100 мкм	> 300 мкм
Возможные размеры подшипника	70 мм – 1 400 мм наружный диаметр	70 мм – 1 400 мм наружный диаметр [1)]

[1)] Рекомендуется наносить на подшипники с наружным диаметром от 500 мм.

Поверхности колец подшипников, на которые необходимо нанести покрытие, должны быть цилиндрической формы и не должны иметь смазочных отверстий или масляных канавок.

Исполнения подшипников с керамическим покрытием

Доступные исполнения подшипников с керамическим покрытием показаны в поперечном сечении, *рис. 13*.



① только с покрытием J20C

Рисунок 13
Исполнения подшипников

По запросу покрытия можно нанести на другие типы подшипников.

Пример заказа
- Радиальный шарикоподшипник с покрытием наружного кольца, с уплотнениями с двух сторон
- Радиальный зазор C3

Обозначение для заказа **6220-2RSR-J20AA-C3**

Пример заказа
- Цилиндрический роликоподшипник с покрытием наружного кольца
- Радиальный зазор C4

Обозначение для заказа **NU214-E-M1-F1-J20B-C4**

Пример заказа
- Радиальный шарикоподшипник с покрытием внутреннего кольца
- Радиальный зазор C3

Обозначение для заказа **6220-2RSR-J20AA-C3**

Гибридные подшипники

В качестве альтернативы подшипникам с покрытиями Insutect FAG предлагает гибридные подшипники. Кольца гибридных подшипников выполнены из подшипниковой стали, тела качения – из керамики.

Гибридные подшипники обозначаются посредством дополнительных знаков HC слева от основного обозначения.

Тела качения обладают абсолютной износостойкостью и токоизолирующими свойствами.

В гибридном исполнении поставляются как шарикоподшипники, так и цилиндрические роликоподшипники, *рис. 14* и *рис. 15*.

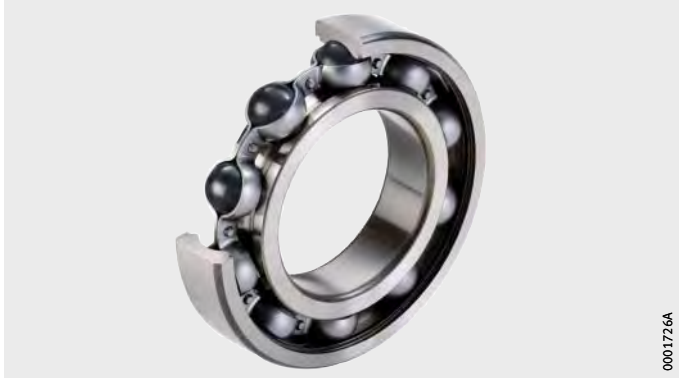


Рисунок 14
Гибридный шарикоподшипник

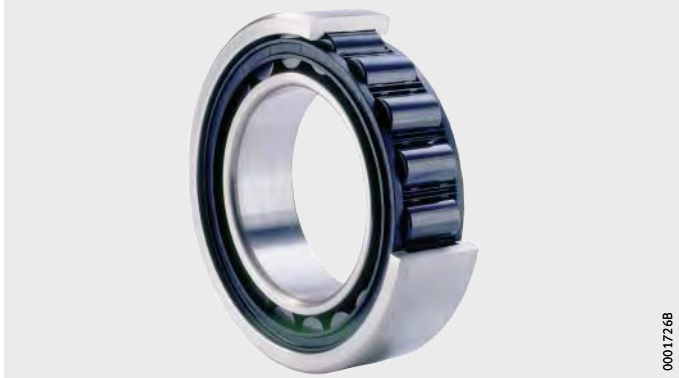


Рисунок 15
Гибридный цилиндрический роликоподшипник

Токоизолирующие подшипники

Преимущества гибридных подшипников

Гибридные подшипники имеют преимущества перед подшипниками с керамическим покрытием:

- Гибридные подшипники обладают самым высоким электрическим сопротивлением. И при более высокой температуре сопротивление постоянному току у них лежит в ГОм-области. Характерные значения электроемкости находятся в области 40 пФ, т.е. в 100 раз ниже, чем у подшипников с керамическим покрытием.
- Гибридные подшипники позволяют более высокие частоты вращения при пониженном трении и, тем самым, меньший нагрев при эксплуатации.
- Гибридные подшипники сохраняют свою функцию в условиях начавшегося разрушения более успешно, чем стандартные.

Прочие свойства

В сравнении со стальными шарикоподшипниками гибридные шарикоподшипники имеют:

- такую же динамическую грузоподъемность C_r;
- на 30% меньшую статическую грузоподъемность C_0;
- на 20% более высокую предельную частоту вращения n_G.

Кроме того, смазка в гибридных подшипниках служит дольше, чем в стандартных подшипниках с заложенной смазкой на весь срок службы, см. TPI WL 43-1210 «Гибридные радиальные шарикоподшипники FAG».

При малых размерах гибридные подшипники являются более экономичным решением, чем подшипники с керамическим покрытием.

Пример заказа

- Радиальный шарикоподшипник с керамическими шариками
- Массивный латунный сепаратор
- Повышенная точность P6
- Радиальный зазор C3

Обозначение для заказа **HC6214-M-P6-C3**

Пример заказа

- Цилиндрический роликоподшипник с керамическими роликами
- Коническое отверстие
- Массивный латунный сепаратор
- Повышенная точность SP

Обозначение для заказа **HCN1020-K-M1-SP**

Наши инженеры подберут для вас исполнение, оптимальное с точки зрения экономичности и технических характеристик.

Параметры материалов: керамика и сталь

Свойства керамики и стали различны. Параметры материалов см. в табл.

Параметры материалов

Параметр	Единица измерения	Керамика (нитрид кремния Si_3N_4)	Сталь (100Cr6)
Удельное электрическое сопротивление	Ом · мм^{2}м$^{-1}$	10^{17}	10^{-1}
Плотность	г/см^3	3,2	7,8
Коэффициент температурного расширения	10^{-6} К$^{-1}$	3,2	11,5
Модуль упругости	МПа	315 000	210 000
Твердость	HV 10	1 600 – 800	700 – 150

Трехфазный электродвигатель

В трехфазных электродвигателях с питанием от преобразователя применяются радиальные шарикоподшипники с покрытием J20AB для защиты от повреждений, вызванных прохождением электрического тока.

Технические характеристики

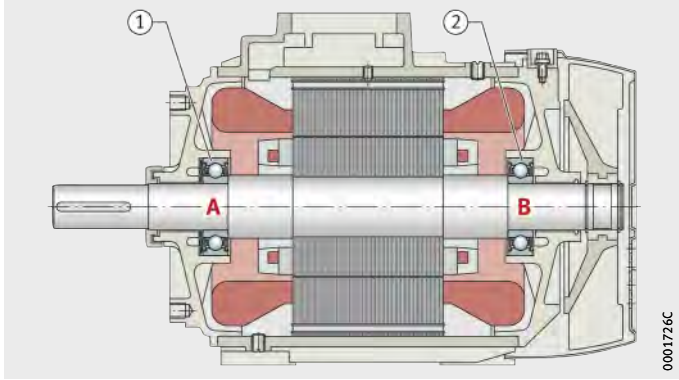
Показатель	Значение
Мощность	375 кВт
Исполнение	Четырехполюсное

Требование

Предотвращение повреждений подшипника, вызванных прохождением тока, из-за индуцированного напряжения.

Конструктивное решение

Со стороны вентилятора охлаждения трехфазного электродвигателя с питанием от преобразователя установлен токоизолированный радиальный шарикоподшипник FAG 6316-J20AB-C3, а со стороны привода – радиальный шарикоподшипник FAG 6320-C3, *рис. 1*. Благодаря токоизолированному радиальному шарикоподшипнику разрывается электрическая цепь, образующаяся вследствие индуцированного напряжения вдоль вала. Оба подшипника смазываются консистентной смазкой. Предусмотрено устройство для повторного смазывания.



A = сторона привода
B = сторона вентилятора

Рисунок 1
Трехфазный электродвигатель

Применяемая продукция

① FAG 6320-C3
② FAG 6316-J20AB-C3

Буксовый узел

В буксах сочлененных низкопольных моторных вагонов применяются конические роликоподшипники с покрытием J20B для защиты от повреждений, вызванных прохождением электрического тока.

Технические характеристики

Показатель	Значение
v_{max}	70 км/ч
Средний диаметр колеса	560 мм

Требование

Предотвращение повреждений подшипника, вызванных прохождением тока, из-за индуцированного напряжения.

Конструктивное решение

Конические роликоподшипники используются как подшипниковая опора свободновращающихся колес сочлененных низкорамных моторных вагонов, *рис. 1*.

В свободную подшипниковую опору буксы установлены конические роликоподшипники (по схеме «O»):

- наружный конический роликоподшипник FAG 580065.30228-A-J20B;
- внутренний конический роликоподшипник FAG Z-803889.32224-A-J20B.

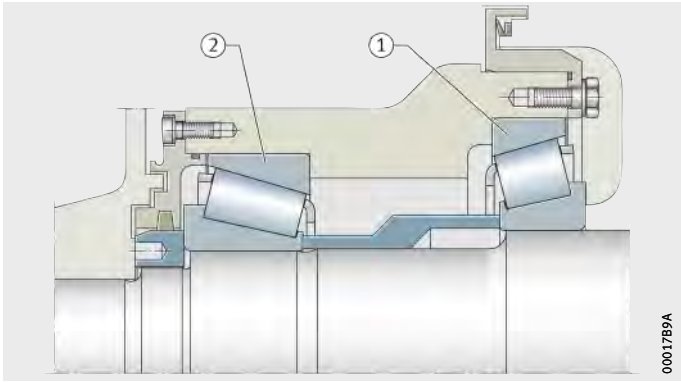


Рисунок 1
Буксовый узел

Применяемая продукция

① FAG 580065.30228-A-J20B
② FAG Z-803889.32224-A-J20B

Тяговый электродвигатель

В трехфазных электродвигателях мощностью 500 кВт применяется радиальный шарикоподшипник и цилиндрический роликоподшипник с покрытием J20AA для защиты от повреждений, вызванных прохождением электрического тока.

Требование

Предотвращение повреждений подшипника, вызванных прохождением тока, из-за индуцированного напряжения.

Конструктивное решение

В трехфазном электродвигателе на вал ротора монтируются радиальный шарикоподшипник FAG 6316-J20AA-C3 (со стороны вентилятора охлаждения) и цилиндрический роликоподшипник FAG NU320-E-M1-F1-J20AA-C4 (со стороны привода). Цилиндрический роликоподшипник, как и радиальный шарикоподшипник, снабжен премиум-покрытием J20AA, *рис. 1*.

Оба подшипника смазываются консистентной смазкой и защищены лабиринтными уплотнениями от загрязнений и других внешних воздействий. Предусмотрена возможность (приспособление) повторного смазывания.

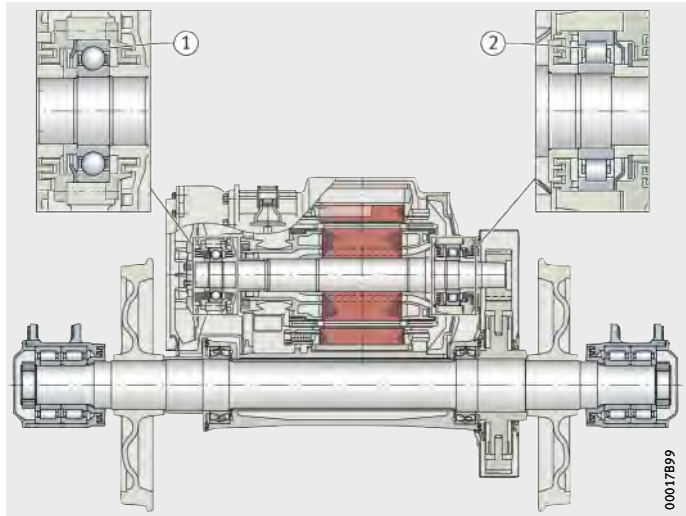


Рисунок 1
Подшипники тягового электродвигателя

Применяемая продукция

① FAG 6316-J20AA-C3
② FAG NU320-E-M1-F1-J20AA-C4

Генератор ветроэнергетической установки

В генераторах ветроэнергетических установок применяются радиальные шарикоподшипники с покрытием J20C для защиты от повреждений, вызванных прохождением электрического тока.

Требование

Предотвращение повреждений подшипника, вызванных прохождением тока, из-за индуцированного напряжения.

Конструктивное решение

В этот генератор ветроэнергетической установки монтируются два радиальных шарикоподшипника FAG 6332-M-J20C-C3. Вследствие наличия преобразователя напряжения через оба подшипника мог бы протекать высокочастотный ток. Максимально возможную защиту от прохождения тока для этих радиальных шарикоподшипников обеспечивает 200-мкм-слой покрытия на внутреннем кольце, *рис. 1*.

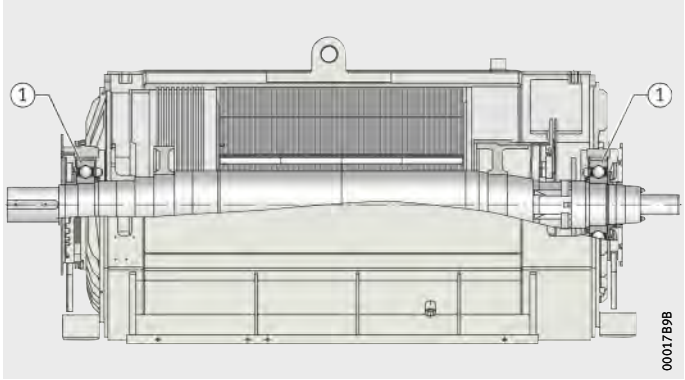


Рисунок 1
Генератор ветроэнергетической установки

Применяемая продукция

① FAG 6332-M-J20C-C3

MATNR 083137190-0000 / TPI 206 / RUS-RUS / 201308 / Printed in Russia

ООО «Шэффлер Руссланд»

Ленинградский проспект 47, стр.3
Бизнес-центр Avion
125167 Москва, Российская Федерация
Телефон +7 (495) 737-76-60
Телефакс +7 (495) 737-76-61
E-Mail info.ru@schaeffler.com
Internet www.schaeffler.ru

Данная брошюра была тщательно составлена и проверена на наличие ошибок. Все же мы не несем ответственность за возможные опечатки или неполноту информации. Мы оставляем за собой право внесения изменений, обусловленных техническим прогрессом.

© Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Издание: 2013, Август

Перепечатка, в том числе частичная, разрешается только с нашего согласия.

TPI 206 RUS-RUS