

ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ

Разработал: доцент каф. 202
Ковеза Юрий Владимирович
ауд. 227 МК
khai202.ho.ua

Лектор: ассистент каф. 202
Светличный Сергей Петрович
ауд. 246

Содержание лекции:

1. Назначение. Преимущества и недостатки.
2. Классификация подшипников качения.
3. Материалы и точность подшипников качения.
4. Кинематика подшипников качения.
5. Виды разрушения подшипников качения.
6. Подбор подшипников качения по статической грузоподъемности.
7. Подбор подшипников качения по динамической грузоподъемности.

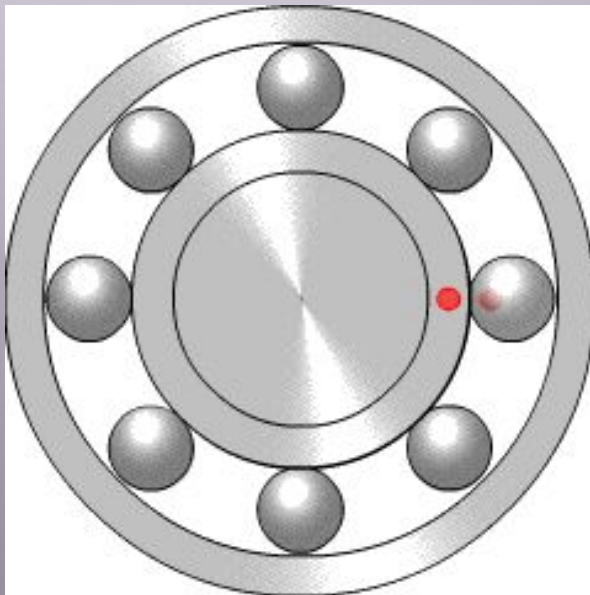
Содержание лекции:

8. Определение нагрузки на подшипники.
9. Определение расстояния между опорами.
10. Последовательность расчета подшипников по динамической грузоподъемности.
11. Предельная быстроходность.

Назначение

Подшипники – опорные устройства для поддержания вращающихся деталей в пространстве, обеспечения им возможности вращения или качания и восприятия действующих на них нагрузок.

Разделяют подшипники качения (ПК) и скольжения (ПС). В ПС элемент вращающейся детали непосредственно или через слой смазки взаимодействует с охватывающей его неподвижной поверхностью. В ПК – через тела качения.



Преимущества и недостатки

Преимущества ПК:

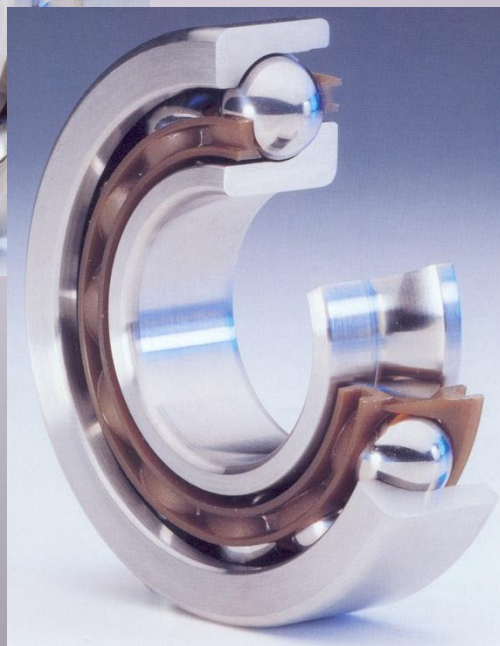
1. Лучше работают при частых пусках-остановках (момент трения при пуске ниже в 10...20 раз).
2. Потери на трение малы и мало зависят от вида смазки.
3. Невысокая стоимость и малые эксплуатационные расходы .
4. Простота обслуживания и замены.
5. Меньшие осевые размеры.
6. Высокий уровень стандартизации и взаимозаменяемости .

Преимущества и недостатки

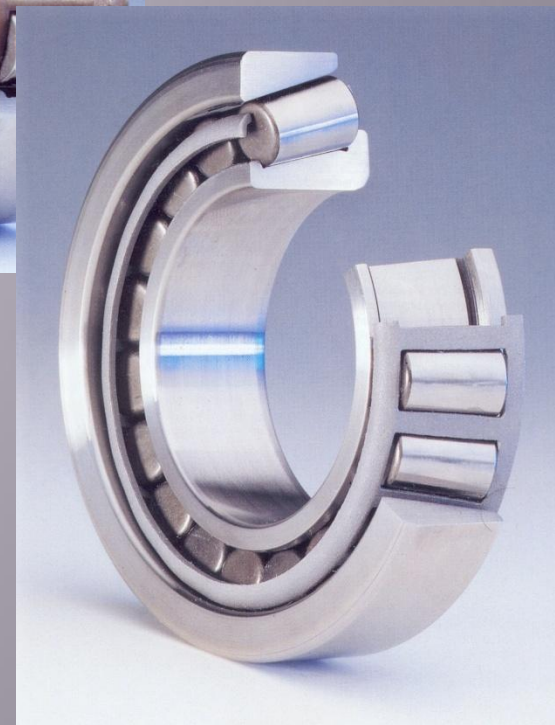
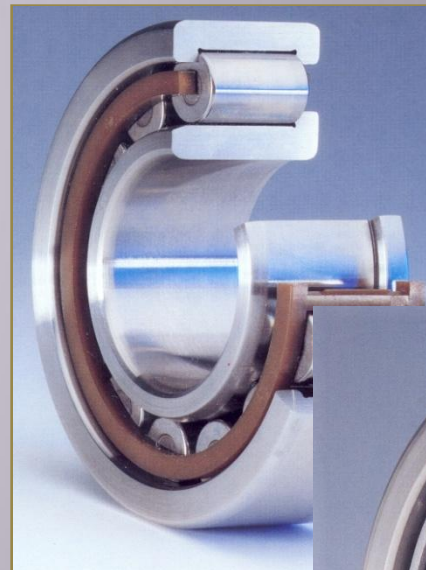
Недостатки ПК:

1. Большие диаметральные размеры.
2. Высокий уровень шума и виброактивность.
3. Ограниченная быстроходность.
4. Плохо воспринимают вибрацию и ударные нагрузки.
5. Большое рассеивание ресурса.

Классификация: по форме тел качения

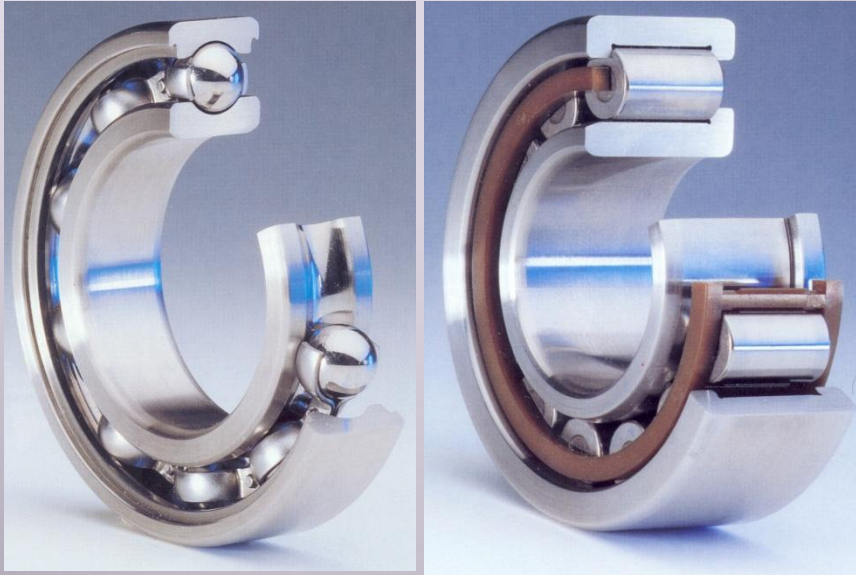


шариковые



роликовые

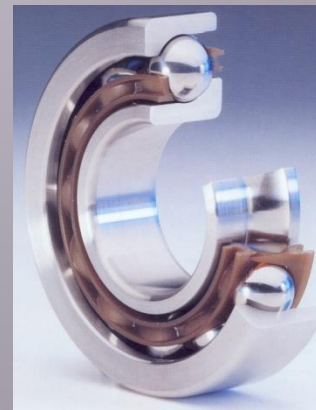
Классификация: по направлению воспринимаемой нагрузки



радиальные

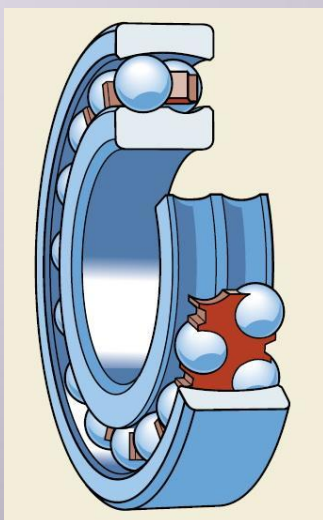


упорные



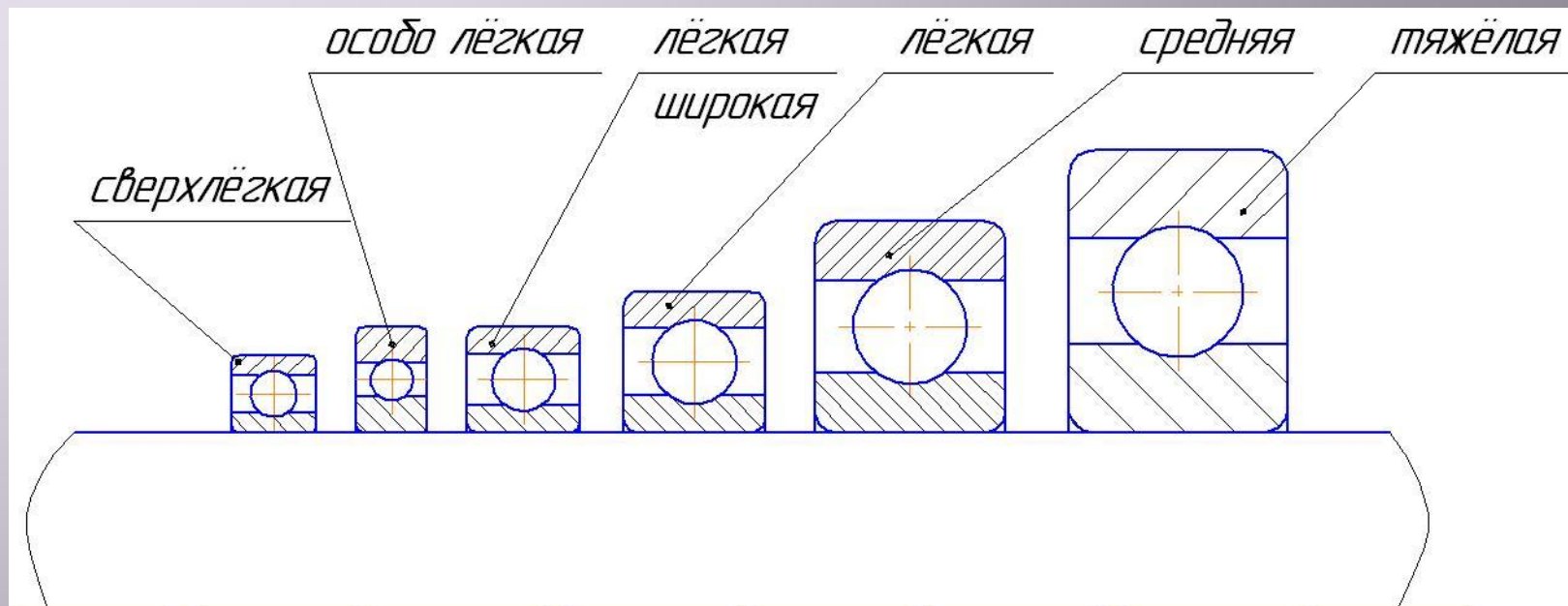
Радиально-упорные

Классификация: по самоустанавливаемости



самоустанавливающиеся

Классификация: по нагрузочной способности



№	D	B	C, кН	Цена отн.	Вес, кг
110	80	16	21,6	1	0,255
210	90	20	35,1	0,55	0,460
310	110	27	61,8	0,85	1,07
410	130	31	87,1	1,3	1,9

Сравнительная характеристика

Тип	Рад. шар.	Сф.	Рол. рад.	Шар. р-у	Кон. р-у
Fr	1	0,8	1,7	1,4...1,1	1,7...1,5
Fa	1	0,23	-	1,4...3,15	1,7...3,2
Быстроходность	1	0,9	1	1	0,7...0,5
Чувствительность к перекосам	незнач.	2...3	чувств.	чувств.	высокая чувств.

Материалы

Кольца и шарики изготавливают из специальных шарикоподшипниковых сталей ШХ15 и ШХ15СГ, содержащих 1...1,1 % углерода и до 1,5 % хрома. Применяют также цементированные стали 18ХГТ, 20Х2Н4А и др.

Твердость колец, роликов и шариков – HRC_{Σ} 60...65.

Клепанные сепараторы изготавливают из мягких углеродистых сталей.

Массивные сепараторы быстроходных подшипников – из бронзы, латуни, алюминиевых сплавов, металлокерамики, текстолита, полиамида.

Точность подшипников качения

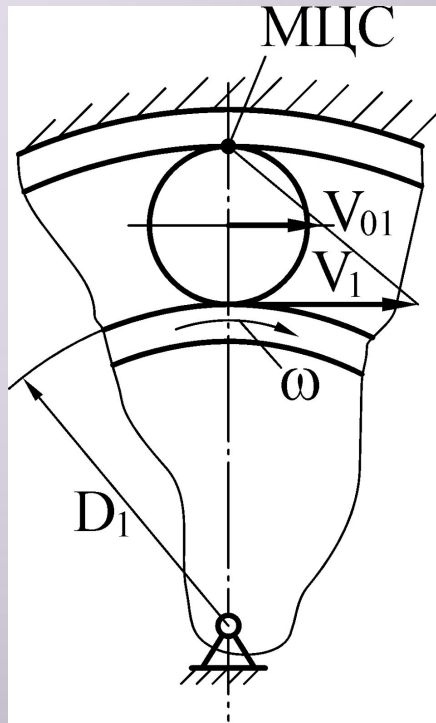
Характеризуют классом точности. Изготавливают ПК пяти классов точности в порядке ее увеличения:
0 6 5 4 2.

Для диаметров внутреннего кольца 50...80 мм

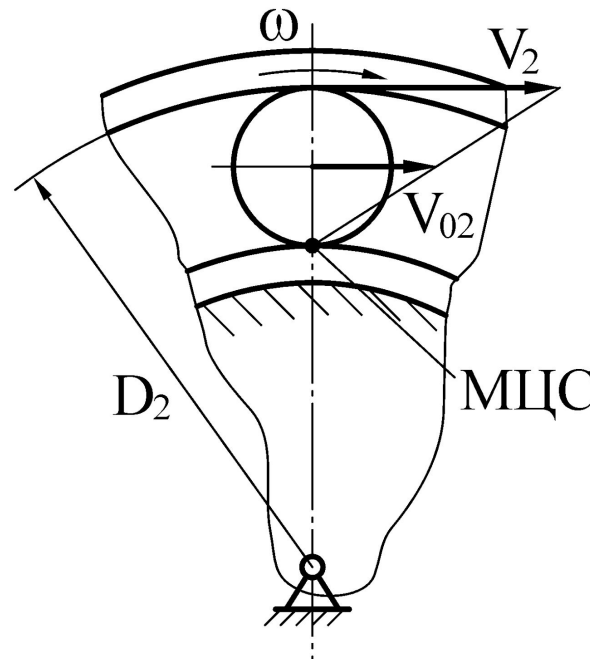
Класс точности	0	6	5	4	2
Биение, мкм	20	10	5	3	2,5
Шероховатость R_a , мкм	1,25	0,63	0,63	0,32	0,32
Поле допуска на размер, мкм	23	16	9	7	5

Кинематика подшипников качения

вращается
внутреннее
кольцо



вращается
наружное
кольцо



$$V_{01} = \frac{V_1}{2}$$

$$D_1 < D_2$$

$$V_{02} = \frac{V_2}{2}$$

$$V_1 = \omega \frac{D_1}{2}$$

$$V_1 < V_2$$

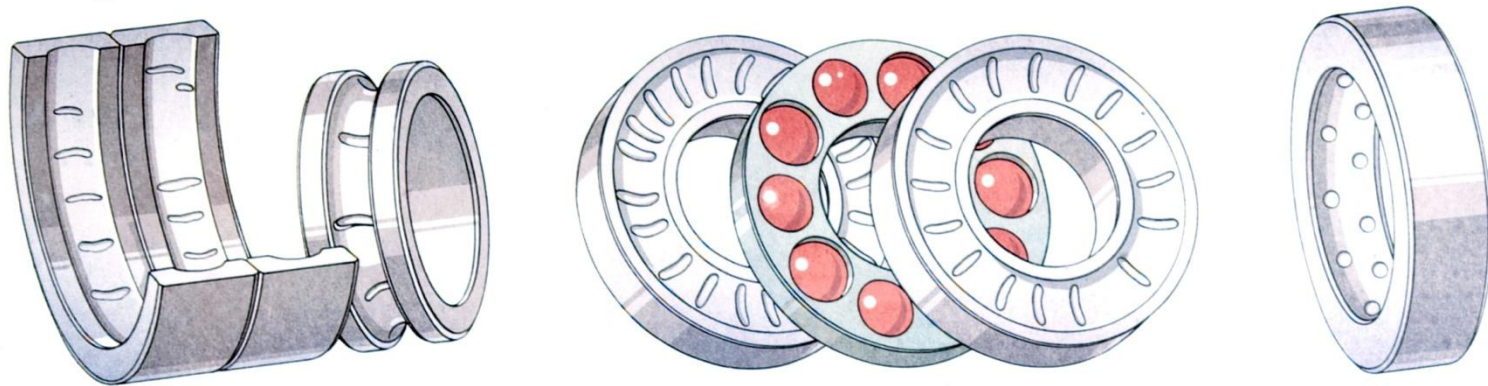
$$V_2 = \omega \frac{D_2}{2}$$

Виды разрушений подшипников качения

УСТАЛОСТНОЕ ВЫКРАШИВАНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

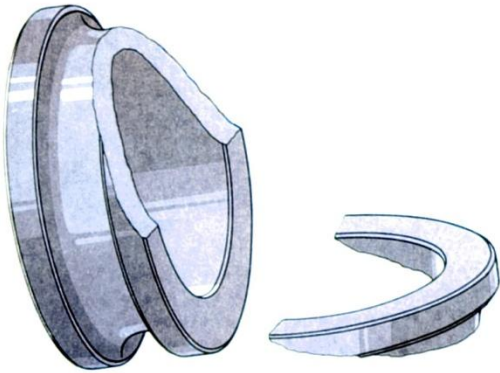


СМЯТИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

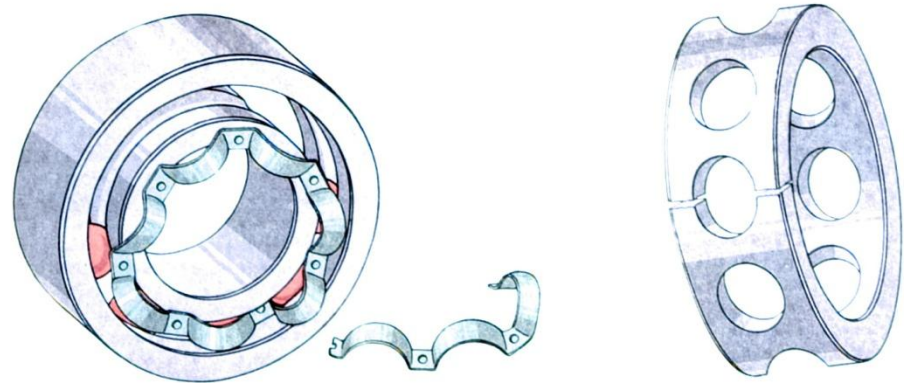


Виды разрушений подшипников качения

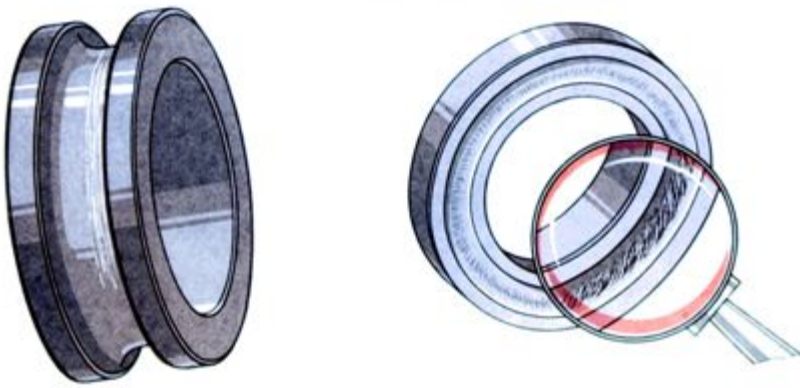
ИЗЛОМ КОЛЕЦ



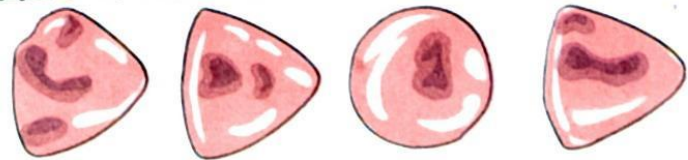
РАЗРУШЕНИЯ СЕПАРАТОРОВ



ИЗНОС КОЛЕЦ И ТЕЛ КАЧЕНИЯ



НАГРЕВ И ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТЕЛ КАЧЕНИЯ



Подбор подшипников качения по статической грузоподъемности

Под статической грузоподъемностью C_0 понимают такую статическую нагрузку, которая вызывает общую остаточную деформацию тел качения и колец

$$\delta_{\text{сум}} \leq 0,0001 D_W$$

По статической грузоподъемности рассчитывают подшипники качения при $n < 1 \text{ мин}^{-1}$.

Должно выполняться условие: $P_0 \leq C_0$.

C_0 определяют по каталогу.

Эквивалентная статическая нагрузка: $P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a$

где F_r и F_a – радиальная и осевая нагрузки;

X_0 и Y_0 – коэффициенты радиальных и осевых нагрузок, которые выбирают из каталогов.

Подбор подшипников качения по статической грузоподъемности

Статическая грузоподъемность упорных подшипников

$$C_{op} = F_a S$$

где $S = 1,2...1,5$ – коэффициент запаса.

Типы подшипников	X_0	Y_0
Шариковые радиальные	0.6	0.5
Шариковые радиально-упорные с углом контакта: $\alpha = 12^\circ$	0.6	0.5
$\alpha = 26^\circ$	0.5	0.37
$\alpha = 36^\circ$	0.5	0.28
Шариковые сферические и роликовые радиально-упорные конические	0.5	$0.22 \operatorname{ctg} \alpha$

Подбор подшипников качения по динамической грузоподъемности (по ресурсу)

Динамическая грузоподъемность — это постоянная нагрузка, которую с заданной вероятностью безотказной работы может выдержать подшипник в течение 10^6 оборотов без признаков усталостного разрушения.

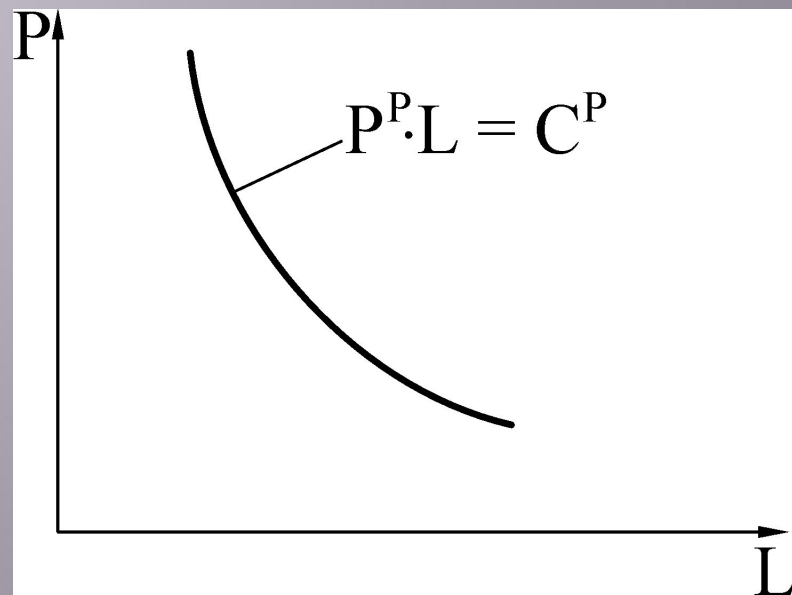
По динамической грузоподъемности подшипники подбирают при частоте вращения $n > 10 \text{ мин}^{-1}$; если $n = 1 \dots 10 \text{ мин}^{-1}$, то принимают $n = 10 \text{ мин}^{-1}$.

$$\sigma_H^m N = \text{const}$$

$$P^p L = C^p$$

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

$$C = L^{1/p} P$$



Подбор подшипников качения по динамической грузоподъемности (по ресурсу)

Подбор ведут:

-при известном подшипнике – по ресурсу;

$$L = a_1 a_{23} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad L = \frac{60n}{10^6} L_h \quad L_{hp} = \frac{10^6 L}{60n} \geq L_{h\text{зад}}$$

- при проектировании – по грузоподъёмности.

$$C = \left(\frac{L}{a_1 a_{23}} \right)^{1/p} P \quad C_{\text{расч}} \leq C_{\text{кат}}$$

Подбор подшипников качения по динамической грузоподъемности (по ресурсу)

a_1 – коэффициент, учитывающий надежность подшипника, вводимый при необходимости повышения надежности.

надежность	0,9	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
a_1	1	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21

Подбор подшипников качения по динамической грузоподъемности (по ресурсу)

a_{23} – коэффициент, учитывающий качество материала подшипника, смазку и условия эксплуатации.

Рекомендуются три вида расчетных условий:

- 1) обычные условия;
- 2) отсутствие повышенных перекосов и наличие масляной пленки в контактах;
- 3) те же, что и в 2), но при изготовлении колец и тел качения из электрошлаковой или вакуумной стали.

Тип подшипника	Условия		
	1	2	3
Шарикоподшипники (кроме сферических)	0,7...0,8	1,0	1,2...1,4
Роликоподшипники цилиндрические и шарикоподшипники сферические	0,5...0,6	0,8	1,0...1,2
Роликоподшипники конические	0,6...0,7	0,9	1,1...1,3
Роликоподшипники сферические	0,3...0,4	0,6	0,8...1,0

Подбор подшипников качения по динамической грузоподъемности (по ресурсу)

Эквивалентную нагрузку P для различных типов подшипников определяют по следующим формулам:

для радиальных

$$P = VF_r K_\sigma K_T ;$$

для упорных

$$P = F_a K_\sigma K_T ;$$

для радиально-упорных

$$P = (XVF_r + YF_a) K_\sigma K_T$$

K_σ – коэффициент безопасности, учитывающий характер нагрузки (спокойная нагрузка $K_\sigma = 1$, с умеренными толчками $K_\sigma = 1,3 \dots 1,8$, ударная $K_\sigma = 2 \dots 3$);

K_T – температурный коэффициент ($K_T = 1$ при $t < 125$ °С и $K_T = 1,05; 1,1; 1,25; 1,4$ соответственно при $t = 125, 150, 200$ и 250 °С; X, Y – коэффициенты радиальной и осевой нагрузок (определяют по справочникам или по формулам)

Подбор подшипников качения по динамической грузоподъемности (по ресурсу)

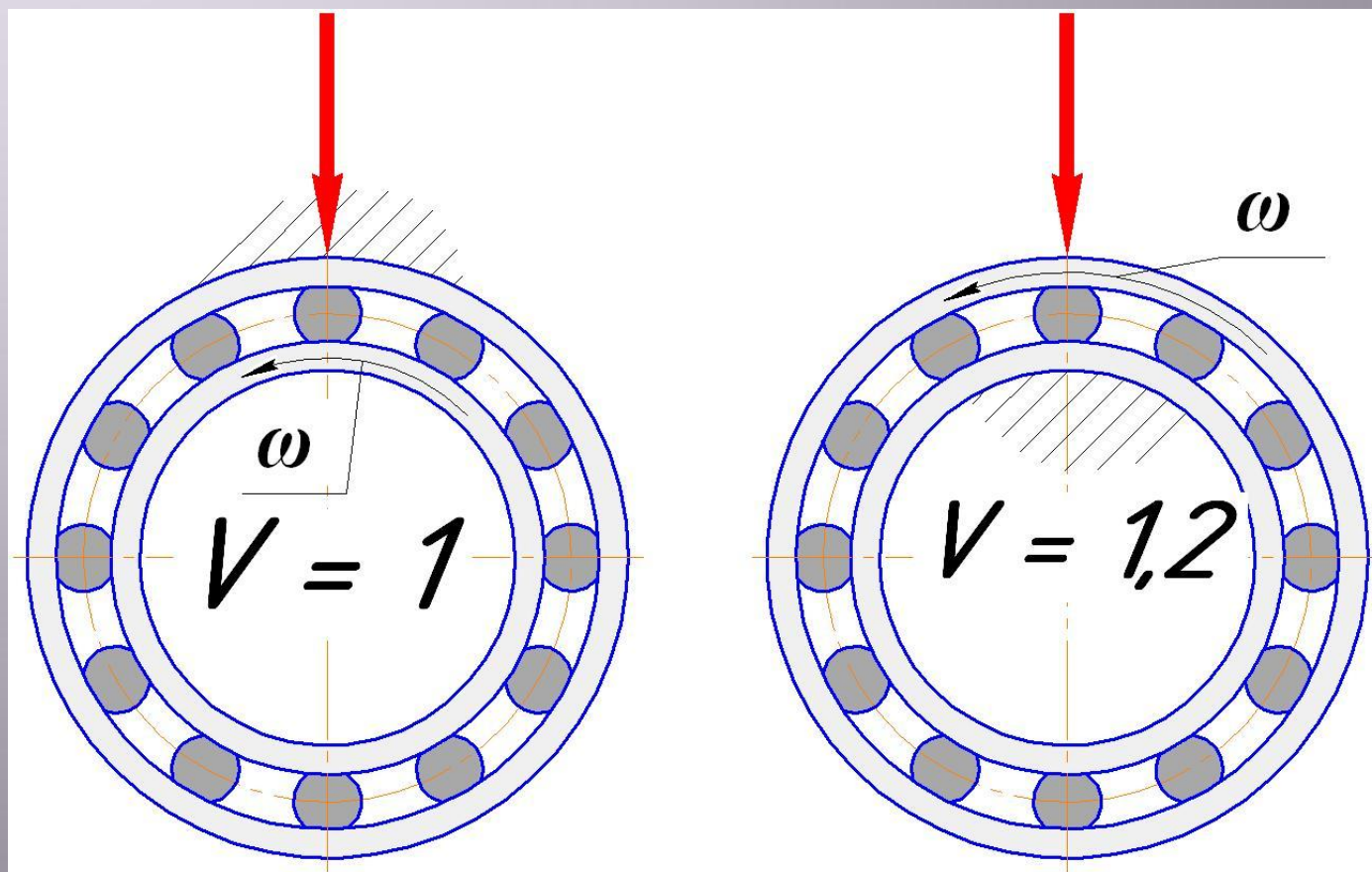
Угол контакта °	Относительная нагрузка F_a/C_o	Однорядные подшипники				e
		$\frac{F_a}{V F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{V F_r} > e$		
		X	Y	X	Y	
Шариковые радиальные						
0	0,014	1	0	0,56	2,30	0,19
	0,028				1,99	0,22
	0,056				1,71	0,26
	0,084				1,55	0,28
	0,110				1,45	0,30
	0,170				1,31	0,34
	0,280				1,15	0,38
	0,420				1,04	0,42
	0,560				1,00	0,44

$$e = 0.518 \left(\frac{F_a}{C_0} \right)^{0,24} \quad Y = \frac{1 - X}{e}$$

Подбор подшипников качения по динамической грузоподъемности (по ресурсу)

V – коэффициент вращения.

При вращении относительно вектора радиальной нагрузки внутреннего кольца $V = 1$, наружного – $V = 1,2$.



Подбор подшипников качения по динамической грузоподъемности (по ресурсу)

Эквивалентная динамическая нагрузка для подшипников, работающих при переменных режимах нагружения, задаваемых циклограммой

$$P_E = \sqrt[3]{\frac{P_1^3 L_1 + P_2^3 L_2 + \dots + P_n^3 L_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n}}$$

Для подшипников опор валов зубчатых передач, работающих при типовых режимах нагружения, расчёты удобно вести с помощью коэффициента эквивалентности K_E :

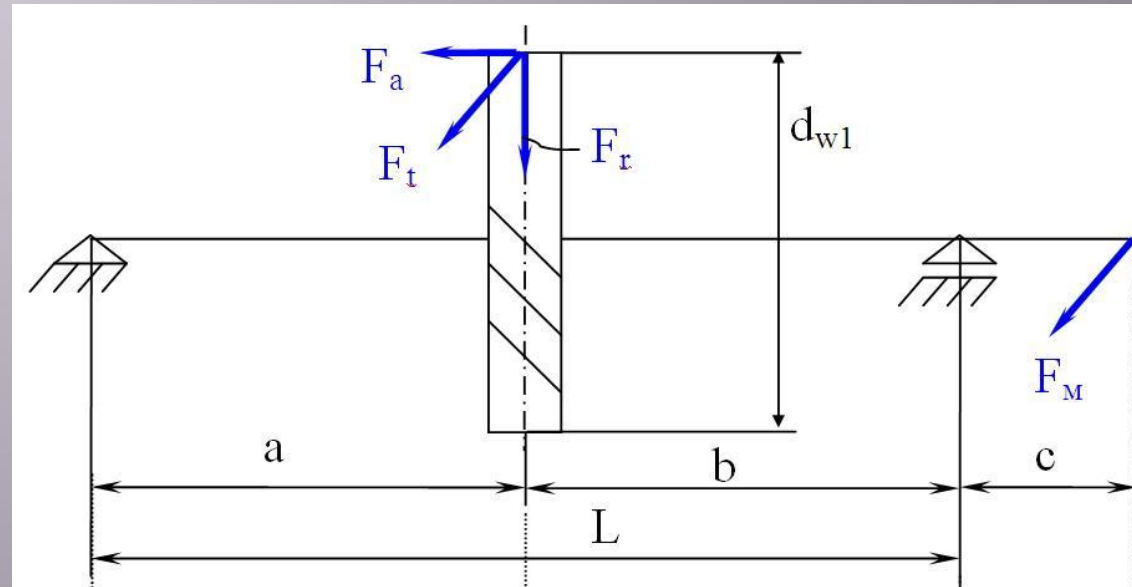
$$F_{r1} = K_E F_{r1max}, \quad F_{r2} = K_E F_{r2max}, \quad F_A = K_E F_{Amax}$$

Режим работы	0	I	II	III	IV	V
K_E	1	0,8	0,63	0,56	0,5	0,4

Определение нагрузки на подшипники

При расчёте подшипников считается, что все действующие силы определены по величине и направлению, а также известны точки их приложения. Если направление каких-то из действующих сил заранее неизвестно (например, от муфт), то рассматривают наиболее опасный для работы подшипников вариант.

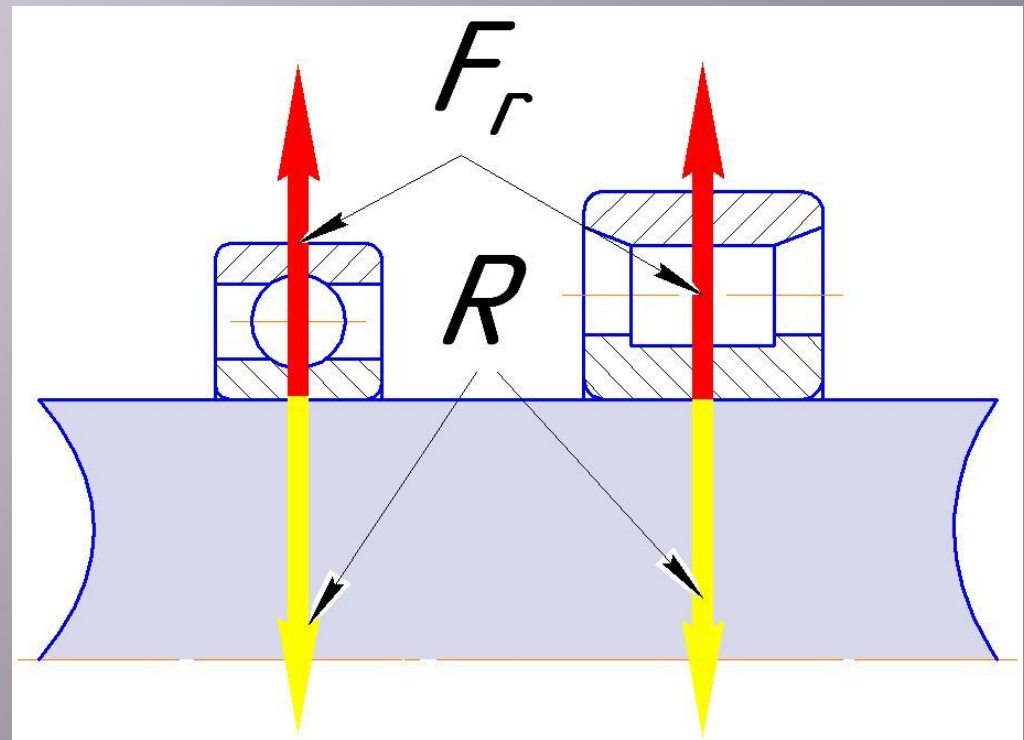
При двухопорной схеме одна из опор считается шарнирно-подвижной, вторая – шарнирно-неподвижной. Тогда реакции в опорах можно определить, решая уравнения равновесия.



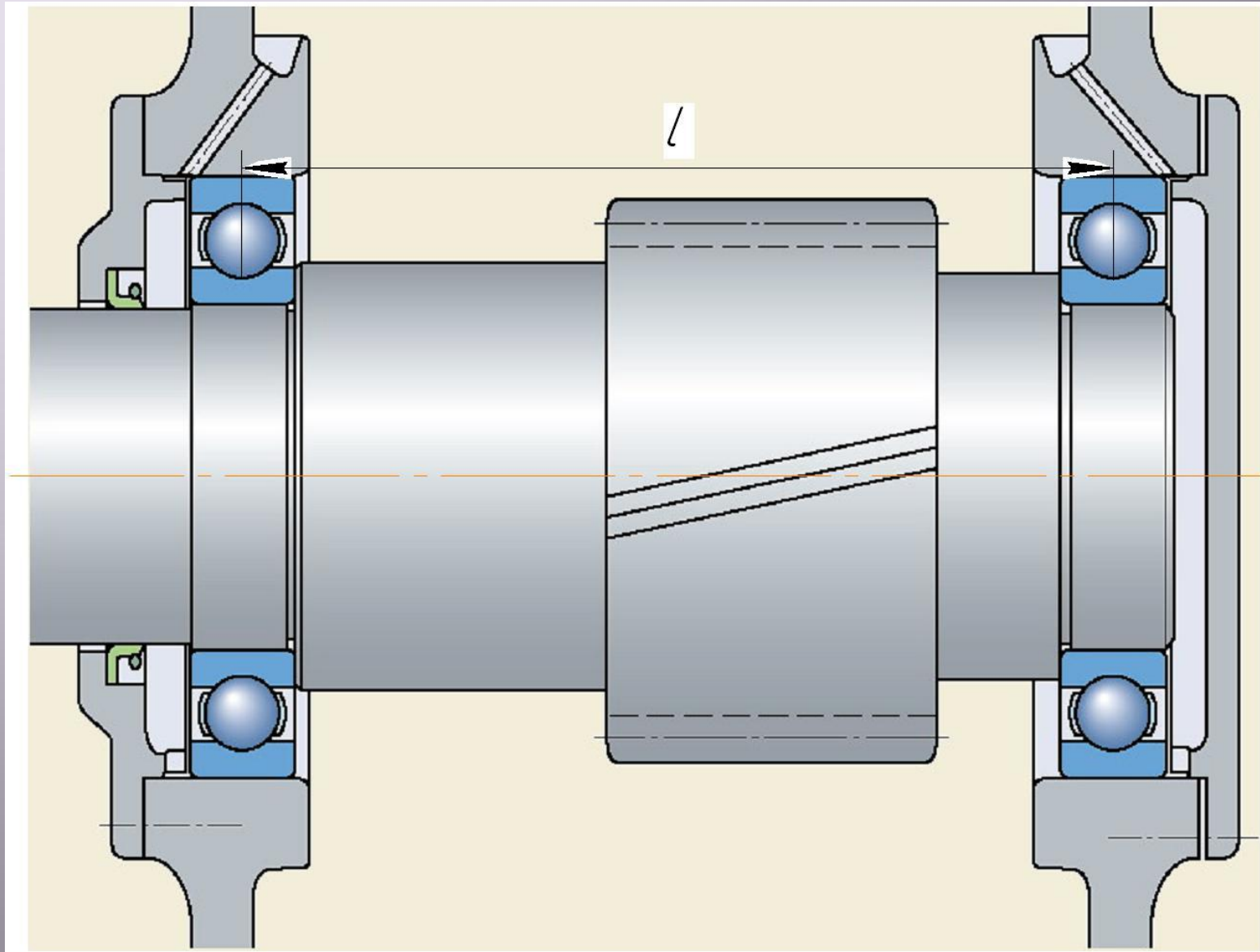
Определение нагрузки на подшипники

Принимают, что радиальные реакции от подшипников R (как и радиальные силы F_r) приложены к оси вала в точках пересечения с ней нормалей, проведенных к серединам контактных площадок на наружных кольцах.

Для радиальных подшипников эта точка находится на середине их ширины:



Определение расстояния между опорами



Определение расстояния между опорами

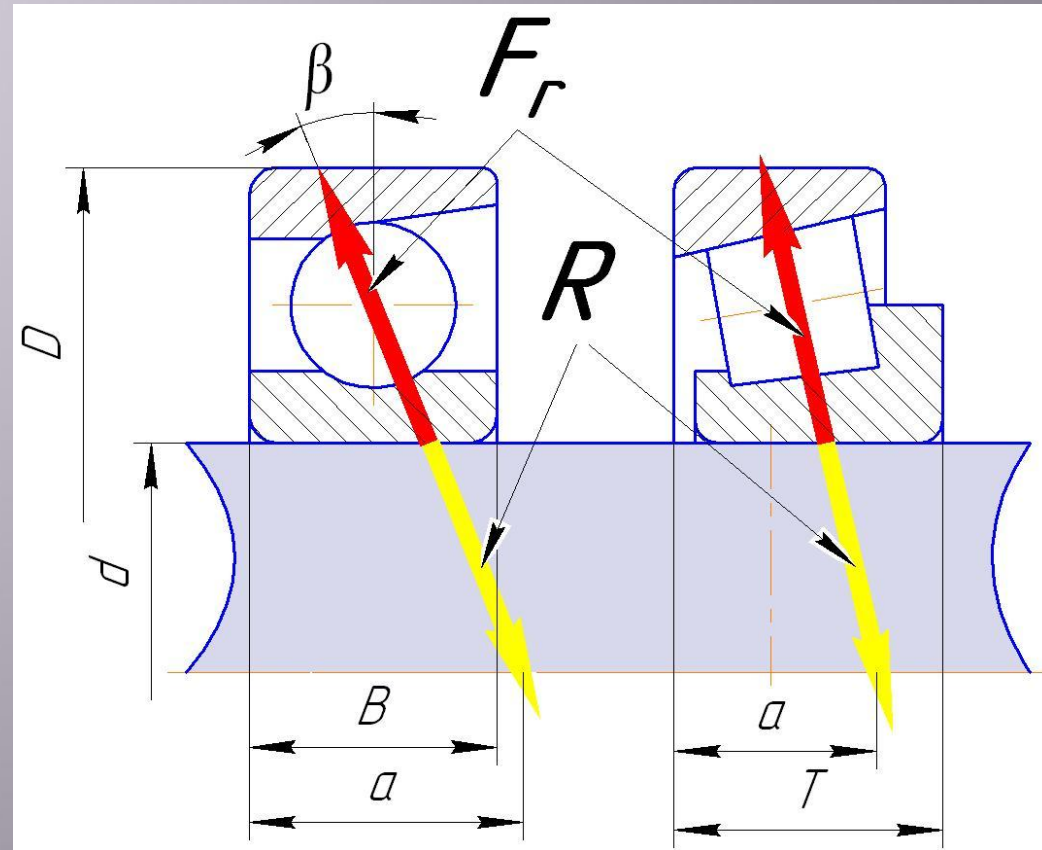
Для радиально-упорных шариковых и роликовых расстояние a между точкой приложения нагрузки и торцом подшипника может быть определено графически или аналитически.

Подшипники шариковые радиально-упорные однорядные

$$a = 0,5[B + 0,5(d + D) \operatorname{tg} \beta];$$

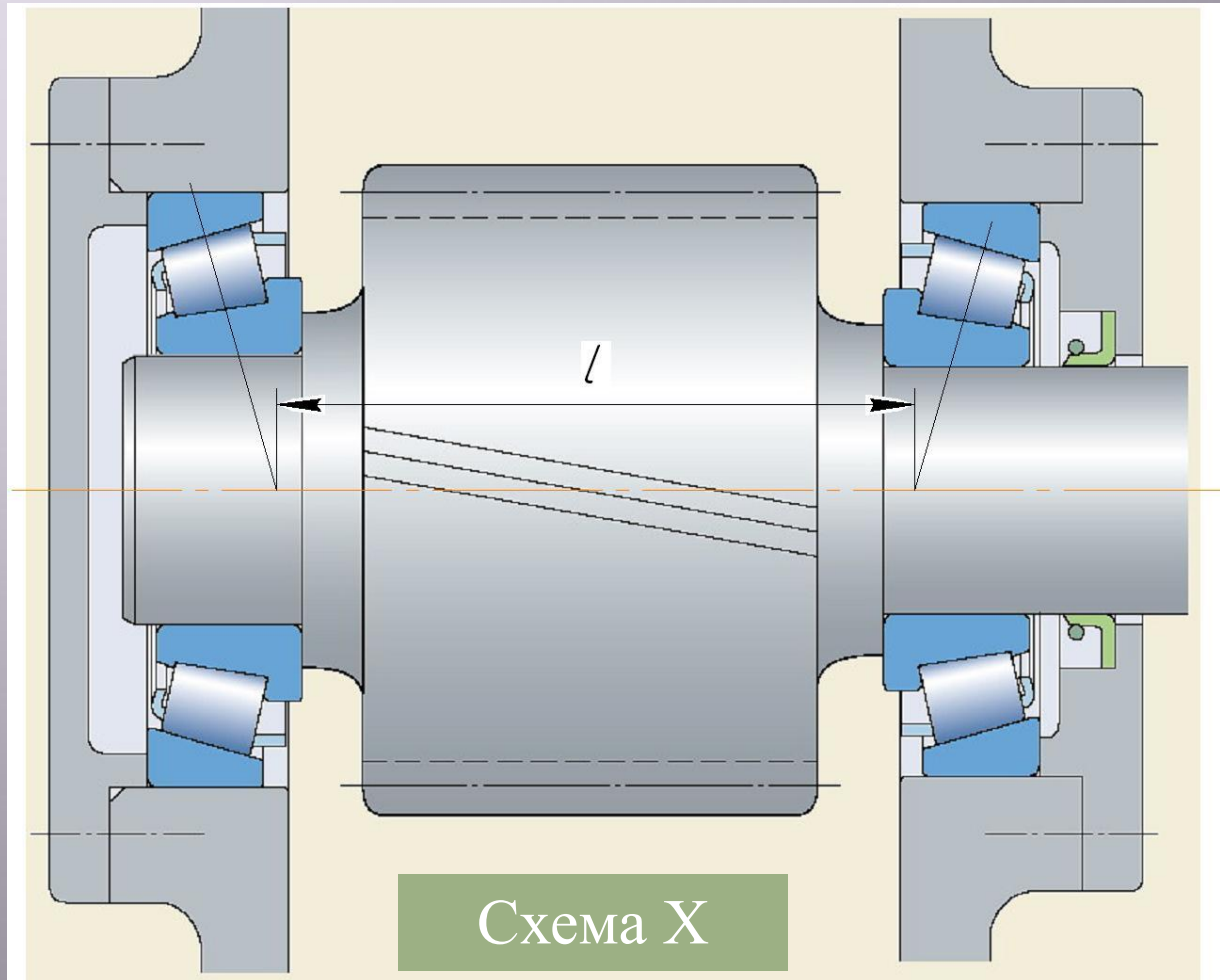
подшипники роликовые конические радиально-упорные однорядные

$$a = 0,5[T + e(d + D)/3].$$

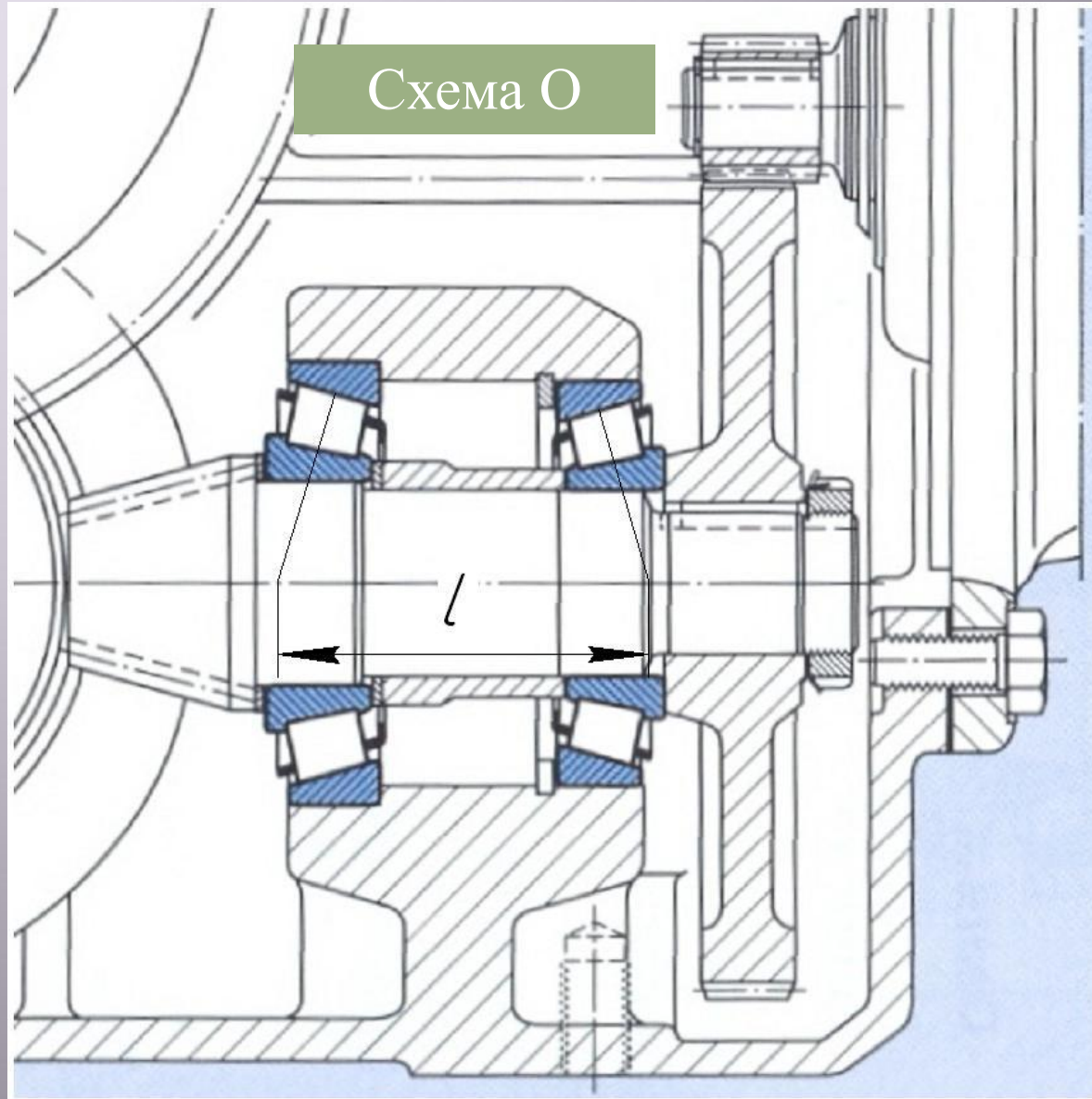


Определение расстояния между опорами

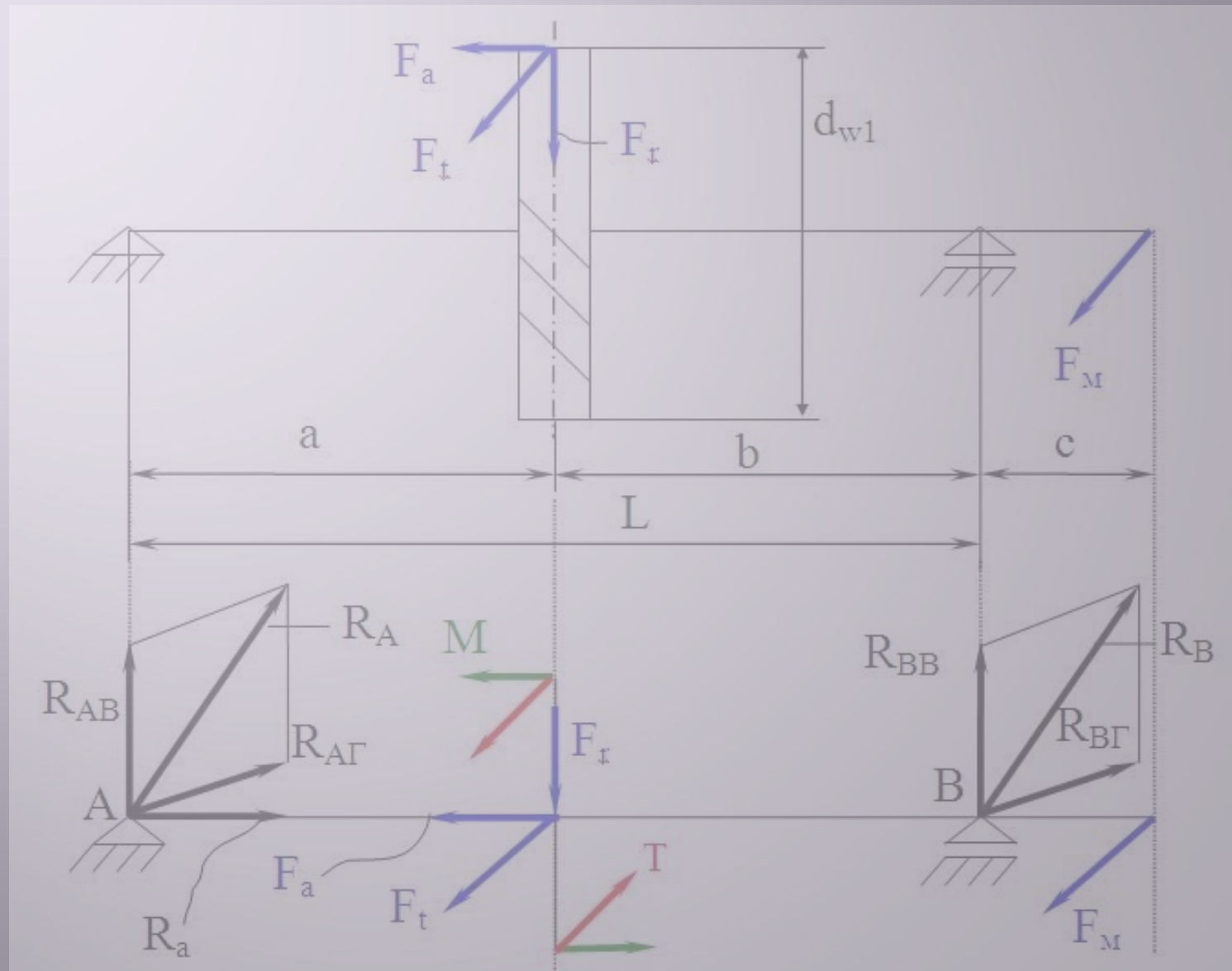
Изменением способа установки подшипников можно изменять расстояние между опорами с радиально-упорными подшипниками.



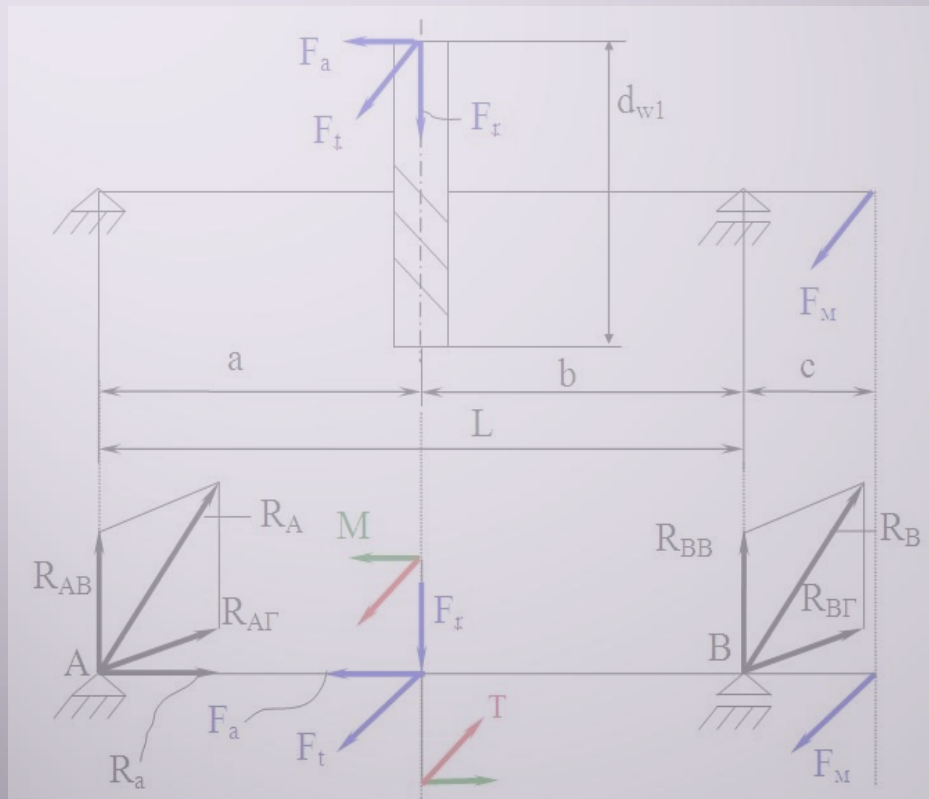
Определение расстояния между опорами



Определение нагрузки на подшипники



Определение нагрузки на подшипники



$$M = F_a \frac{d_w}{2} \quad R_a = F_a$$

$$R_{AB} = \frac{F_r b + M}{L}$$

$$R_{AG} = \frac{F_t b - F_M c}{L}$$

$$R_{BB} = \frac{F_r a - M}{L}$$

$$R_{BG} = \frac{F_t a + F_M (L + c)}{L}$$

$$R_A = \sqrt{R_{AB}^2 + R_{AG}^2}$$

$$R_B = \sqrt{R_{BB}^2 + R_{BG}^2}$$

Последовательность расчета подшипников по динамической грузоподъемности

Исходные данные для расчета:

- силы, действующие на вал;
- частота вращения вала n , мин⁻¹;
- требуемый ресурс подшипника L в млн. об. или L_h в ч
- надёжность;
- диаметр посадочной поверхности вала d ;
- расстояния между точками приложения действующих сил и реакций (a , b , c), которые берут с компоновочной схемы;
- режим нагружения;
- условия эксплуатации подшипникового узла (возможная перегрузка, рабочая температура и т.п.).

Последовательность расчета подшипников по динамической грузоподъемности

1. Предварительно назначают тип и схему установки подшипников.
2. Выбирают предварительно подшипники и из каталогов выписывают необходимую информацию.
3. В зависимости от конструктивной схемы определяют радиальные реакции в опорах.
4. При необходимости определяют эквивалентные нагрузки.
5. Выбирают коэффициенты a_1 , a_{23} , K_6 и K_T .
6. Рассчитывают эквивалентную нагрузку P . Если по соотношению радиальных и осевых нагрузок нельзя уверенно определить наиболее нагруженную опору, то рассчитывают эквивалентные нагрузки для обеих.

Последовательность расчета подшипников по динамической грузоподъемности

7. Заданный ресурс в часах (L_h), пересчитывают в миллионы оборотов L .
8. Определяют расчётную динамическую грузоподъемность подшипника или расчётный ресурс.
9. Если условие прочности не удовлетворено или ресурс слишком мал, выбирают подшипники более тяжелой серии, переходят на другие типы подшипников, увеличивают диаметр вала.

Последовательность расчета подшипников по динамической грузоподъемности

Если в одной опоре устанавливают два одинаковых радиальных подшипника, образующих один подшипниковый узел, то их рассматривают как один двухрядный подшипник.

При определении ресурса подставляют базовую динамическую радиальную грузоподъемность комплекта из двух подшипников:

для шариковых – $C_{сум} = 1,625C$,
для роликовых – $C_{сум} = 1,714 C$.

При определении эквивалентной нагрузки значения коэффициентов X и Y принимают как для двухрядных подшипников.

Последовательность расчета подшипников по динамической грузоподъемности

Дополнение к п.6 при наличии осевых сил:

- рассчитывают соотношение $\frac{F_a}{C_0}$
- по таблицам (формулам) находят параметр осевой нагрузки e ;
- сравнивают отношение $\frac{F_a}{VF_r}$ с коэффициентом e .

При $\frac{F_a}{VF_r} \leq e$ принимают $X = 1$ и $Y = 0$, при $\frac{F_a}{VF_r} \geq e$

значения коэффициентов X и Y принимают по таблицам или формулам.

Предельная быстроходность подшипников

Ограничена:

- повышением температуры, в результате снижается стойкость смазочного материала и увеличивается опасность отпуска тел качения и колец;
- прочностью и долговечностью сепараторов;
- ускоренным усталостным выкрашиванием, связанным с большим числом циклов нагружений в единицу времени.

$$n_{np} \leq [n_{np}] \quad [n_{np}] - \text{по каталогу}$$

$$d_m n \leq [d_m n] \quad [d_m n] = (4.5 \dots 6.5) 10^5 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$$

Предельная быстроходность подшипников

Пути повышения быстроходности:

- использование подшипников высоких классов точности;
- уменьшение потерь на трение в подшипниках;
- уменьшение диаметров шариков, переход на более легкие серии;
- использование массивных сепараторов, выполненных из бронзы, латуни, алюминиевых сплавов, текстолита, металлокерамики;
- совершенствование системы смазки подшипников.