

## Трение и нагрев

### Трение

Трение в подшипнике качения определяется многими факторами, см. табл. Вследствие многообразия таких факторов влияния, как динамичность частоты вращения и нагрузки, перекосы и несоосность вследствие ошибок монтажа действительные моменты трения и потери на трение могут существенно отличаться от их расчетных значений. Если момент трения является особо важным критерием при проектировании опоры, следует обратиться за консультацией в инженерную службу фирмы Schaeffler.

#### Составляющие трения и факторы влияния

Составляющая трения	Фактор влияния
Трение качения	Величина нагрузки
Трение скольжения тел качения Трение скольжения сепаратора	Величина и направление нагрузки Частота вращения и смазывание, степень приработанности
Жидкостное трение (гидравлическое сопротивление)	Конструкция и частота вращения Тип, количество и рабочая вязкость смазки
Трение уплотнений	Конструкция и предварительный натяг уплотнений

Трение холостого хода зависит от количества смазки, частоты вращения, рабочей вязкости смазки, уплотнений и степени приработанности подшипника.

### Теплоотвод

Энергия трения преобразуется в теплоту, которая должна быть отведена из подшипника. Из баланса мощности тепловыделения от трения и теплоотвода вычисляют допустимую по температуре частоту вращения  $n_{\text{д}}$ , см. стр. 72.

#### Теплоотвод через смазку

Смазочное масло отводит часть тепла. Особенно эффективно смазывание с циркуляцией и промежуточным охлаждением масла. Консистентные смазки не отводят тепло.

#### Теплоотвод через вал и корпус

Интенсивность теплоотвода через вал и корпус зависит от разности температур подшипника и окружающей среды, *рис. 1*.



Следует учитывать дополнительные источники тепла и теплового излучения поблизости от подшипника.

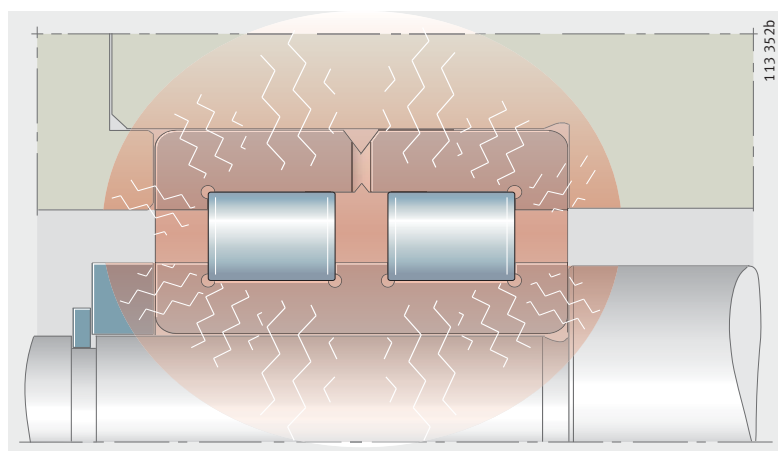


Рисунок 1  
Распределение температур  
между подшипником,  
валом и корпусом

## Трение и нагрев

### Расчет моментов трения

Для расчета должна быть известна частота вращения и нагрузка. Прочие необходимые исходные параметры: вид применяемой смазки, способ смазывания и вязкость смазки при рабочей температуре.

Совокупный момент трения  $M_R$   
(расчет для нагруженных осевой силой радиальных цилиндрических роликоподшипников приведен на стр. 69):

$$M_R = M_0 + M_1$$

Мощность потерь на трение  $N_R$ :

$$N_R = M_R \cdot \frac{n}{9550}$$

Зависящий от частоты вращения момент трения при  $v \cdot n \geq 2000$ :

$$M_0 = f_0 \cdot (v \cdot n)^{\frac{2}{3}} \cdot d_M^3 \cdot 10^{-7}$$

Зависящий от частоты вращения момент трения при  $v \cdot n < 2000$ :

$$M_0 = f_0 \cdot 160 \cdot d_M^3 \cdot 10^{-7}$$

Зависящий от нагрузки момент трения для игольчатых и цилиндрических роликоподшипников:

$$M_1 = f_1 \cdot F \cdot d_M$$

Зависящий от нагрузки момент трения для шарикоподшипников, конических и сферических роликоподшипников:

$$M_1 = f_1 \cdot P_1 \cdot d_M$$

$M_R$  Нмм  
совокупный момент трения;

$M_0$  Нмм  
момент трения, зависящий от частоты вращения;

$M_1$  Нмм  
момент трения, зависящий от нагрузки;

$N_R$  Вт  
мощность потерь на трение;

$n$  мин<sup>-1</sup>  
рабочая частота вращения;

$f_0$  —  
коэффициент зависящего от частоты вращения момента трения,  
см. рис. 2, стр. 65 и таблицы от стр. 66 до стр. 68;

$f_1$  —  
коэффициент зависящего от нагрузки момента трения,  
см. таблицы от стр. 66 до стр. 68;

$v$  мм<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>  
кинематическая вязкость смазки при рабочей температуре.  
В случае консистентной смазки определяющей является вязкость базового масла при рабочей температуре;

$F_r, F_a$  Н  
радиальная нагрузка для радиальных подшипников,  
осевая нагрузка для упорных подшипников;

$P_1$  Н  
нагрузка, определяющая момент трения.

Для шарикоподшипников, конических и сферических роликоподшипников  
смотри расчет на стр. 68;

$d_M$  мм  
средний диаметр подшипника  $(d + D)/2$ .

**Определение коэффициентов**

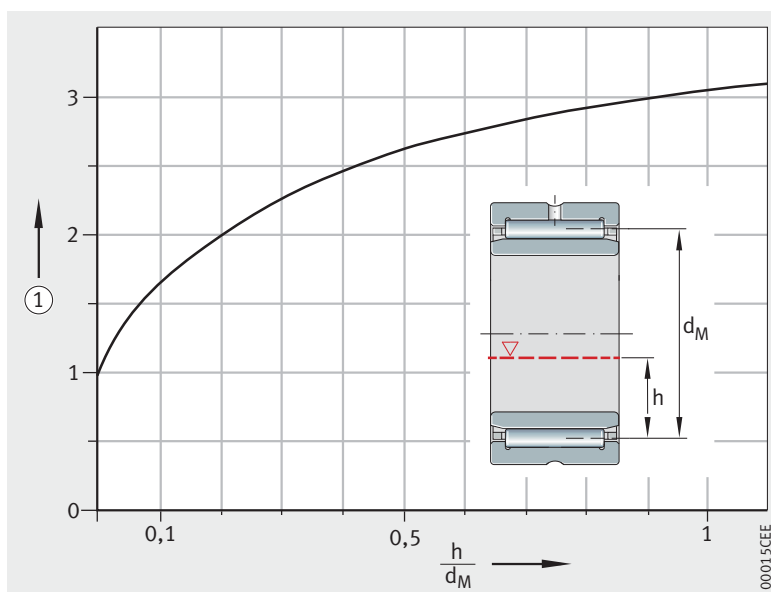
Коэффициенты  $f_0$  и  $f_1$  являются усредненными значениями, полученными в ходе серии экспериментов, и соответствуют данным ISO 15 312.

Они действительны для приработанных подшипников с равномерно распределенной смазкой. Для свежесмазанных подшипников коэффициент  $f_0$  может иметь от 2 до 5 раз более высокие значения.

При смазывании в масляной ванне уровень масла должен достигать середины нижнего тела качения. При более высоком уровне масла коэффициент  $f_0$  может до трех раз превышать значение из таблицы, см. *рис. 2*.

① возрастание коэффициента  $f_0$   
 $h$  = уровень масла  
 $d_M$  = средний диаметр подшипника  $(d + D)/2$

*Рисунок 2*  
 Возрастание коэффициента  $f_0$   
 в зависимости от уровня масла



## Трение и нагрев

### Коэффициенты для игольчатых роликоподшипников

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консистентная смазка, масляный туман	Масляная ванна или с циркуляцией	
NA48	3	5	0,0005
NA49	4	5,5	
RNA48	3	5	
RNA49	4	5,5	
NA69	7	10	
RNA69			
NKI, NK, NKIS, NKS, NAO, RNO, K	$(12 \cdot B)/(33 + d)$	$(18 \cdot B)/(33 + d)$	
HK, BK	$(24 \cdot B)/(33 + d)$	$(36 \cdot B)/(33 + d)$	
HN	$(30 \cdot B)/(33 + d)$	$(45 \cdot B)/(33 + d)$	

### Коэффициенты для цилиндрических роликоподшипников без сепаратора

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консистентная смазка, масляный туман	Масляная ванна или с циркуляцией	
SL1818	3	5	0,00055
SL1829	4	6	
SL1830	5	7	
SL1822	5	8	
SL0148, SL0248	6	9	
SL0149, SL0249	7	11	
SL1923	8	12	
SL1850	9	13	

### Коэффициенты для цилиндрических роликоподшипников с сепаратором

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консистентная смазка, масляный туман	Масляная ванна или с циркуляцией	
LSL1923	1	3,7	0,00020
ZSL1923	1	3,8	0,00025
2..-E	1,3	2	0,00030
3..-E			0,00035
4			0,00040
10, 19			0,00020
22..-E	2	3	0,00040
23..-E	2,7	4	0,00040
30	1,7	2,5	0,00040

### Коэффициенты для упорных роликоподшипников

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консистентная смазка, масляный туман	Масляная ванна или с циркуляцией	
AXK, AXW	3	4	0,0015
811, K811	2	3	
812, K812			
893, K893			
894, K894			

**Коэффициенты  
для комбинированных  
подшипников**

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консистентная смазка, масляный туман	Масляная ванна или с циркуляцией	
ZARN, ZARF	3	4	0,0015
NKXR	2	3	
NX, NKX	2	3	0,001 · $(F_a/C_0)^{0,33}$
ZKLN, ZKLF	4	6	
NKIA, NKIB	3	5	0,0005

**Коэффициенты  
для конических  
роликподшипников**

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консистентная смазка, масляный туман	Масляная ванна или с циркуляцией	
302, 303, 320, 329, 330, T4CB, T7FC	2	3	0,0004
313, 322, 323, 331, 332, T2EE, T2ED, T5ED	3	4,5	

**Коэффициенты  
для упорно-радиальных и  
радиальных сферических  
роликподшипников**

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консист. смазка, масляный туман	Масляная ванна/ с циркуляцией	
213	2,3	3,5	0,0005 · $(P_0/C_0)^{0,33}$
222	2,7	4	
223	3	4,5	0,0008 · $(P_0/C_0)^{0,33}$
230, 239			0,00075 · $(P_0/C_0)^{0,5}$
231	3,7	5,5	0,0012 · $(P_0/C_0)^{0,5}$
232	4	6	0,0016 · $(P_0/C_0)^{0,5}$
240	4,3	6,5	0,0012 · $(P_0/C_0)^{0,5}$
241	4,7	7	0,0022 · $(P_0/C_0)^{0,5}$
292..-E	1,7	2,5	0,00023
293..-E	2	3	0,00030
294..-E	2,2	3,3	0,00033

**Коэффициенты  
для радиальных  
шарикоподшипников**

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консист. смазка, масляный туман	Масляная ванна/ с циркуляцией	
618, 618..-2Z, (2RSR)	1,1	1,7	0,0005 · $(P_0/C_0)^{0,5}$
160	1,1	1,7	0,0007 · $(P_0/C_0)^{0,5}$
60, 60..-2RSR, 60..-2Z, 619, 619..-2Z, (2RSR)	1,1	1,7	
622..-2RSR	1,1	—	0,0009 · $(P_0/C_0)^{0,5}$
623..-2RSR	1,1	—	
62, 62..-2RSR, 62..-2Z	1,3	2	
63, 63..-2RSR, 63..-2Z	1,5	2,3	
64	1,5	2,3	0,0010 · $(P_0/C_0)^{0,5}$
42..-B	2,3	3,5	
43..-B	4	6	

## Трение и нагрев

### Коэффициенты для радиально-упорных шарикоподшипников

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консист. смазка, масляный туман	Масляная ванна/с циркуляцией	
70...-B, 70...-B-2RS	1,3	2	$0,001 \cdot (P_0/C_0)^{0,33}$
718...-B, 72...-B, 72...-B-2RS			
73...-B, 73...-B-2RS	2	3	
30...-B, 30...-B-2RSR, 30...-B-2Z	2,3	3,5	
32...-B, 32...-B-2RSR, 32...-B-2Z, 32			
38...-B, 38...-B-2RSR, 38...-B-2Z			
33...-B, 33...-B-2RSR, 33, 33...-DA	4	6	

### Коэффициенты для сферических шарикоподшипников

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консист. смазка, масляный туман	Масляная ванна/с циркуляцией	
12	1	2,5	$0,0003 \cdot (P_0/C_0)^{0,4}$
13	1,3	3,5	
22	1,7	3	
23	2	4	

### Коэффициенты для радиально-упорных шарикоподшипников с четырехточечным контактом

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консист. смазка, масляный туман	Масляная ванна/с циркуляцией	
QJ2, QJ3	2,7	4	$0,001 \cdot (P_0/C_0)^{0,33}$

### Коэффициенты для упорных шарикоподшипников

Конструктивный ряд	Коэффициент $f_0$		Коэффициент $f_1$
	Консист. смазка, масляный туман	Масляная ванна/с циркуляцией	
511, 512, 513, 514, 532, 533	1	1,5	$0,0012 \cdot (F_a/C_0)^{0,33}$
522, 523, 524, 542, 543	1,3	2	

### Эффективная нагрузка для шарикоподшипников, конических и сферических роликоподшипников

Тип подшипника	Одиночные подшипники		Сдвоенные подшипники
	$P_1$	$P_1$	
Радиальные шарикоподшипники	$3,3 \cdot F_a - 0,1 \cdot F_r$	—	
Однорядные радиально-упорные шарикоподш.	$F_a - 0,1 \cdot F_r$	$1,4 \cdot F_a - 0,1 \cdot F_r$	
Двухрядные радиально-упорные шарикоподш.	$1,4 \cdot F_a - 0,1 \cdot F_r$	—	
Шарикоподшипники с четырехточ. контактом	$1,5 \cdot F_a + 3,6 \cdot F_r$	—	
Конические роликоподшипники	$2 \cdot Y \cdot F_a$ или $F_r$ , следует использовать большее значение	$1,21 \cdot Y \cdot F_a$ или $F_r$ , следует использовать большее значение	
Сферические роликоподшипники	$1,6 \cdot F_a/e$ , если $F_a/F_r > e$ $F_r \{1 + 0,6 \cdot [F_a/(e \cdot F_r)]^3\}$ , если $F_a/F_r \leq e$		



Если  $P_1 \leq F_r$ , то следует принять  $P_1 = F_r$ .

## Радиальные цилиндрические роликоподшипники под осевой нагрузкой

При осевом нагружении радиальных цилиндрических роликоподшипников трение скольжения между торцами роликов и упорными торцами бортов колец создает дополнительный момент трения  $M_2$ .

Таким образом, совокупный момент трения рассчитывается:

$$M_R = M_0 + M_1 + M_2$$

$$M_2 = f_2 \cdot F_a \cdot d_M$$

$$A = k_B \cdot 10^{-3} \cdot d_M^{2,1}$$

$M_R$	Нмм
совокупный момент трения;	
$M_0$	Нмм
момент трения, зависящий от частоты вращения;	
$M_1$	Нмм
момент трения, зависящий от радиальной нагрузки;	
$M_2$	Нмм
момент трения, зависящий от осевой нагрузки;	
$f_2$	–
коэффициент, зависящий от конструктивного ряда подшипника, рис. 3 и рис. 4, стр. 70;	
$A$	–
рассчитываемый по формуле параметр;	
$F_a$	Н
динамическая осевая нагрузка;	
$k_B$	–
коэффициент конструктивного ряда подшипника, см. табл., стр. 70;	
$d_M$	мм
средний диаметр подшипника $(d + D)/2$ .	



Значения коэффициента  $f_2$  подвержены большой дисперсии. Они действительны при смазывании с циркуляцией при достаточном количестве масла. Графики не подлежат экстраполяции, см. рис. 3 и рис. 4, стр. 70.

## Подшипники в исполнении ТВ

У подшипников в исполнении ТВ с помощью новых методов расчета и изготовления была существенно повышена осевая грузоподъемность.

Специальное профилирование торцовых поверхностей роликов обеспечивает оптимальные условия контакта между роликом и опорным торцом борта. Благодаря этому осевые контактные напряжения по торцу существенно снижаются, и достигается образование более устойчивой масляной пленки. При обычных условиях эксплуатации износ и усталость упорных торцов бортов и торцов роликов полностью исключаются.

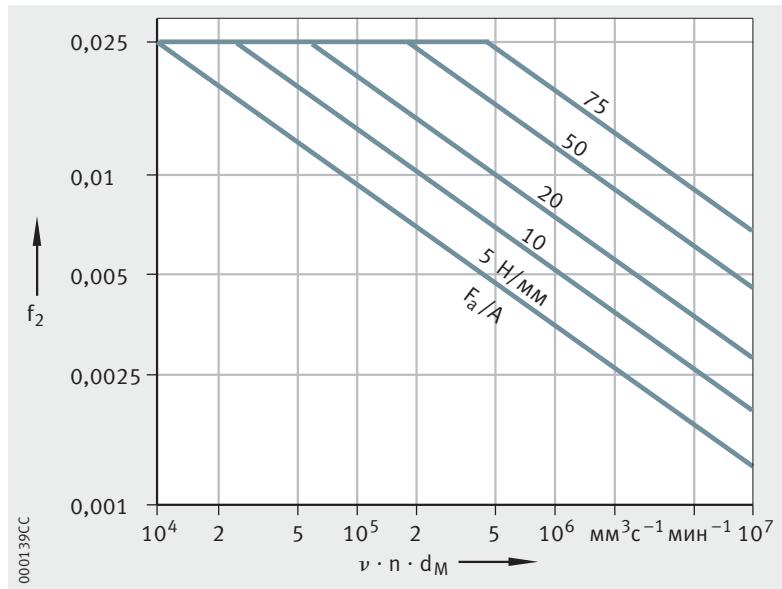
Дополнительно, момент трения, вызванный осевой силой, снижается на величину до 50%. Вследствие этого подшипник нагревается значительно меньше.

## Трение и нагрев

### Цилиндрические роликоподшипники в стандартном исполнении

$f_2$  = коэффициент  
 $F_a$  = динамическая осевая нагрузка  
 $A$  = рассчитываемый по формуле параметр  
 $\nu$  = рабочая вязкость  
 $n$  = рабочая частота вращения  
 $d_M$  = средний диаметр подшипника  
 $\nu \cdot n \cdot d_M$  = скоростная характеристика с учетом вязкости

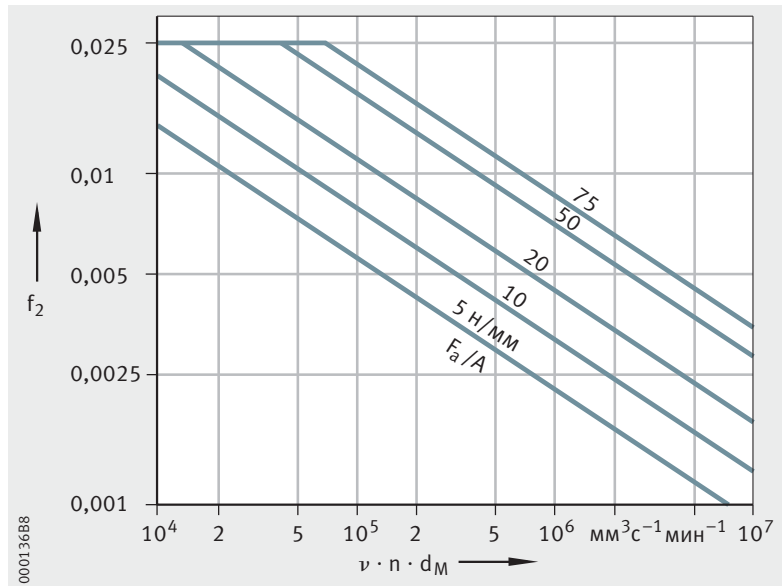
*Рисунок 3*  
 Коэффициент  $f_2$ , зависящий от скоростной характеристики с учетом вязкости



### Цилиндрические роликоподшипники в исполнении ТВ

$f_2$  = коэффициент  
 $F_a$  = динамическая осевая нагрузка  
 $A$  = рассчитываемый по формуле параметр  
 $\nu$  = рабочая вязкость  
 $n$  = рабочая частота вращения  
 $d_M$  = средний диаметр подшипника  
 $\nu \cdot n \cdot d_M$  = скоростная характеристика с учетом вязкости

*Рисунок 4*  
 Коэффициент  $f_2$ , зависящий от скоростной характеристики с учетом вязкости



### Коэффициент конструктивного ряда подшипника $k_B$

Конструктивный ряд подшипника	Коэффициент $k_B$
SL1818, SL0148	4,5
SL1829, SL0149	11
SL1830, SL1850	17
SL1822	20
LSL1923, ZSL1923	28
SL1923	30
NJ2..-E, NJ22..-E, NUP2..-E, NUP22...-E	15
NJ3..-E, NJ23..-E, NUP3..-E, NUP23...-E	20
NJ4	22