

Tření

Odhad třecího momentu	88
Přesnější výpočet třecího momentu	88
Nový model SKF pro výpočet třecího momentu	89
Moment valivého tření	90
Moment smykového tření	90
Třecí moment těsnění.....	90
Další vlivy na velikost třecího momentu v ložisku.....	96
Redukční součinitel vířivého ohřevu.....	97
Redukční součinitel následného nezalítí stopy.....	98
Odpor brodění při mazání olejovou lázní	98
Směšené mazání v oblasti nízkých otáček a viskozit	100
Vliv vůle a nesouososti na tření.....	101
Vliv náplně plastického maziva na tření.....	102
Tření v hybridních ložiscích	102
Rozběhový moment.....	103
Ztrátový výkon a teplota ložiska.....	103
Příklad výpočtu	104

Tření v ložisku má zásadní vliv na vývin tepla v ložisku, a tedy i na provozní teplotu.

Tření závisí na zatížení a na několika dalších činitelích, z nichž je nejdůležitější typ ložiska, jeho velikost, provozní otáčky, vlastnosti maziva a jeho množství.

Celkový valivý odpor v ložisku se skládá z valivého a smykového tření v místě valivého kontaktu, v místě styku mezi valivými tělesy a klecí, jakož i na vodících plochách pro valivá tělesa nebo klec, z tření v mazivu a smykového tření třecího těsnění u ložisek s těsněním.

Odhad třecího momentu

Za určitých podmínek

- zatížení ložiska $P \approx 0,1 C$
- dobré mazání
- normální provozní podmínky

Lze hodnotu třecího momentu vypočítat s dostatečnou přesností podle následujícího vztahu, do něhož je dosazen konstantní součinitel tření μ

$$M = 0,5 \mu P d$$

kde

M = třecí moment ložiska, Nmm

μ = konstantní součinitel tření ložiska

(→ **tabulka 1**)

P = ekvivalentní dynamické zatížení ložiska, N

d = průměr díry ložiska, mm

Přesnější výpočet třecího momentu

Podle jednoho způsobu výpočtu třecího momentu valivých ložisek je celkový třecí moment dán součtem tzv. momentu M_0 , který nezávisí na zatížení, a momentu M_1 , který závisí na zatížení

$$M = M_0 + M_1$$

Pro výpočet třecího momentu se doposud používal tento postup. Mnohem přesnější postupy jsou však založeny na rozdělení momentů podle typu tření a nikoli podle závislosti na zatížení. Ve skutečnosti M_0 zahrnuje přídatné vnější zdroje tření spolu s "hydrodynamickou" složkou valivého tření, která rovněž závisí na zatížení.

Tabulka 1

Konstantní součinitel tření μ ložisek bez těsnění	
Typ ložiska	Součinitel tření μ
Kuličková ložiska	0,0015
Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem	
– jednořadá	0,0020
– dvouřadá	0,0024
– čtyřbodová	0,0024
Naklápací kuličková ložiska	0,0010
Válečková ložiska	
– s klecí při $F_a \approx 0$	0,0011
– s plným počtem válečků při $F_a \approx 0$	0,0020
Kuželíková ložiska	0,0018
Soudečková ložiska	0,0018
Toroidní ložiska CARB	0,0016
Axiální kuličková ložiska	0,0013
Axiální válečková ložiska	0,0050
Axiální soudečková ložiska	0,0018

Pro přesný výpočet třecího momentu ve valivém ložisku je třeba počítat se čtyřmi zdroji

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

kde

M = celkový třecí moment, Nmm

M_{rr} = moment valivého tření, Nmm

M_{sl} = moment smykového tření, Nmm

M_{seal} = třecí moment těsnění, Nmm

M_{drag} = třecí moment způsobený odporem brodění, hnětením, odstříkovaním atd, Nmm

Tento nový přístup definuje zdroje tření v každém styku, k němuž dochází v ložisku, a kombinuje je. Kromě toho lze přičíst podíl tření, které je způsobeno těsněním, a jinými vnějšími zdroji, a tak vypočítat celkový třecí moment. Vzhledem k tomu, že model se zabývá každým jednotlivým kontaktem (na oběžných dráhách a přírubách), lze do modelu zahrnout také změny konstrukce a zvýšení kvality povrchu. Model tedy lépe odráží zlepšení, jimiž konstrukce ložisek SKF stále prochází, a navíc může být snadněji aktualizován.

V následující části se nový model SKF pro výpočet třecích momentů zabývá nejjednodušší formou valivého pohybu, prokluzování a vlivu těsnění. V další části jsou popisovány vlivy hladiny oleje v ložisku, následného nezalítí stopy, nedostatečného mazání ložiska při vysokých otáčkách, vířivého ohřevu a smíšeného mazání.

Nový model SKF pro výpočet třecího momentu

Nový model SKF pro výpočet třecího momentu umožňuje přesněji vypočítat třecí moment, který vzniká v ložiskách SKF, podle níže uvedené rovnice:

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

Nový model SKF je založen na progresivnějších počítačových modelech, které vyvinula skupina SKF, a umožňuje stanovit přibližné referenční hodnoty za následujících podmínek:

- Mazání plastickým mazivem nebo běžnými způsoby olejového mazání: olejová lázeň, mazání olej-vzduch a mazání vstříkovaným olejem.
- Pro párovaná ložiska je třeba vypočítat třecí momenty pro každé ložisko zvlášť a výsledné momenty sečíst. Radiální zatížení je rovnoměrně rozděleno na obě ložiska – axiální zatížení je přenášeno v závislosti na uspořádání ložisek.
- Zatížení je rovno nebo větší než doporučené minimální zatížení.
- Zatížení má konstantní velikost a směr.
- Normální provozní vůle.

Upozornění

Vztahy, které jsou zde uvedeny, vedou k poměrně složitým výpočtům. Z toho důvodu je vhodné používat výpočtové nástroje, které obsahuje interaktivní katalog "SKF Interactive Engineering Catalogue", který je dostupný online na adrese www.skf.com.

Moment valivého tření

Pro výpočet momentu valivého tření je určen vztah

$$M_{rr} = G_{rr} (v n)^{0,6}$$

kde

M_{rr} = moment valivého tření, Nmm

G_{rr} = proměnná, která závisí na

- typu ložiska
- středním průměru ložiska
 $d_m = 0,5 (d + D)$, mm
- radiálním zatížení F_r , N
- axiálním zatížení F_a , N

n = otáčky, min^{-1}

v = kinematická viskozita maziva při provozní teplotě, mm^2/s (viskozita základní olejové složky při mazání plastickým mazivem)

Hodnoty G_{rr} lze určit z rovnic uvedených v **tabulce 2** a geometrické konstanty R z **tabulky 3**, v části, která začíná na **str. 92**. Zatížení F_r a F_a jsou vždy považována za kladná.

Moment smykového tření

Moment smykového tření se vypočítá podle vztahu

$$M_{sl} = G_{sl} \mu_{sl}$$

kde

M_{sl} = moment smykového tření, Nmm

G_{sl} = proměnná, která závisí na

- typu ložiska,
- středním průměru ložiska
 $d_m = 0,5 (d + D)$, mm
- radiálním zatížení F_r , N
- axiálním zatížení F_a , N

μ_{sl} = součinitel smykového tření, který může být nastaven na hodnotu pro souvislý mazivový film, tj. $\kappa \geq 2$,
0,05 pro mazání minerálními oleji
0,04 pro mazání syntetickými oleji
0,1 pro mazání převodovými oleji
Pro válečková a kuželíková ložiska je třeba používat následující hodnoty:
0,02 pro válečková ložiska
0,002 pro kuželíková ložiska

Hodnoty G_{sl} lze určit z rovnic uvedených v **tabulce 2** a geometrické konstanty S z **tabulky 3**, v části, která začíná na **straně 92**.

Třecí moment těsnění

U ložisek opatřených třecím těsněním mohou třecí ztráty způsobené třením těsnění být větší než ztráty vzniklé v samotném ložisku. Třecí moment těsnění ložisek, která mají těsnění po obou stranách, lze odhadnout podle následujícího empirického vztahu

$$M_{seal} = K_{S1} d_s^\beta + K_{S2}$$

kde

M_{seal} = třecí moment těsnění, Nmm

K_{S1} = konstanta, která závisí na typu ložiska

K_{S2} = konstanta, která závisí na typu ložiska a těsnění

d_s = průměr těsnící plochy (→ **tabulka 4**, na **str. 96**)

β = exponent, který závisí na typu ložiska a těsnění

Hodnoty konstant K_{S1} a K_{S2} a exponentu β jsou uvedeny v **tabulce 4**, na **str. 96**.

M_{seal} je třecí moment, který je vyvolán dvěma těsněními. Pokud je ložisko opatřeno pouze jedním těsněním, generované tření se rovná $0,5 M_{seal}$.

Pro kuličková ložiska s vnějším průměrem větším než 25 mm s těsněním RSL použijte vypočítanou hodnotu M_{seal} bez ohledu na to, zda ložisko má těsnění na jedné nebo na obou stranách.

Proměnné momentů valivého a smykového tření, které závisejí na geometrii a zatížení – radiální ložiska

Typ ložiska	Proměnné valivého tření G_{rr}	Proměnné smykového tření G_{sl}
Kuličková ložiska	<p>při $F_a = 0$</p> $G_{rr} = R_1 d_m^{1,96} F_r^{0,54}$ <p>při $F_a > 0$</p> $G_{rr} = R_1 d_m^{1,96} \left(F_r + \frac{R_2}{\sin \alpha_F} F_a \right)^{0,54}$ <p>$\alpha_F = 24,6 \left(\frac{F_a}{C_0} \right)^{0,24}$, stupně</p>	<p>při $F_a = 0$</p> $G_{sl} = S_1 d_m^{-0,26} F_r^{5/3}$ <p>při $F_a > 0$</p> $G_{sl} = S_1 d_m^{-0,145} \left(F_r^5 + \frac{S_2 d_m^{1,5}}{\sin \alpha_F} F_a^4 \right)^{1/3}$
Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem¹⁾	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^4 n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,26} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^4 n^2$
Čtyřbodová ložiska	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^4 n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,26} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^4 n^2$
Naklápací kuličková ložiska	$G_{rr} = R_1 d_m^2 [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^{3,5} n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{-0,12} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^{3,5} n^2$
Válečková ložiska	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,41} F_r^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,9} F_a + S_2 d_m F_r$
Kuželíková ložiska¹⁾ Součinitel axiálního zatížení Y jednořadých ložisek → tabulková část	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,38} (F_r + R_2 Y F_a)^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,82} (F_r + S_2 Y F_a)$
Soudečková ložiska	$G_{rr,e} = R_1 d_m^{1,85} (F_r + R_2 F_a)^{0,54}$ $G_{rr,l} = R_3 d_m^{2,3} (F_r + R_4 F_a)^{0,31}$ <p>při $G_{rr,e} < G_{rr,l}$</p> $G_{rr} = G_{rr,e}$ <p>jinak</p> $G_{rr} = G_{rr,l}$	$G_{sl,e} = S_1 d_m^{0,25} (F_r^4 + S_2 F_a^4)^{1/3}$ $G_{sl,l} = S_3 d_m^{0,94} (F_r^3 + S_4 F_a^3)^{1/3}$ <p>při $G_{sl,e} < G_{sl,l}$</p> $G_{sl} = G_{sl,e}$ <p>jinak</p> $G_{sl} = G_{sl,l}$
Toroidní ložiska CARB	<p>při $F_r < (R_2^{1,85} d_m^{0,78} / R_1^{1,85})^{2,35}$</p> $G_{rr,e} = R_1 d_m^{1,97} F_r^{0,54}$ <p>jinak</p> $G_{rr,l} = R_2 d_m^{2,37} F_r^{0,31}$	<p>při $F_r < (S_2 d_m^{1,24} / S_1)^{1,5}$</p> $G_{sl,e} = S_1 d_m^{-0,19} F_r^{5/3}$ <p>jinak</p> $G_{sl,l} = S_2 d_m^{1,05} F_r$

¹⁾ Za F_a je třeba dosadit axiální zatížení.

Tabulka 2b

Proměnné momentů valivého a smykového tření, které závisejí na geometrii a zatížení – axiální ložiska		
Typ ložiska	Proměnné valivého tření G_{rr}	Proměnné smykového tření G_{sl}
Axiální kuličková ložiska	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,83} F_a^{0,54}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,05} F_a^{4/3}$
Axiální válečková ložiska	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,38} F_a^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,62} F_a$
Axiální soudečková ložiska	$G_{rr,e} = R_1 d_m^{1,96} (F_r + R_2 F_a)^{0,54}$ $G_{rr,l} = R_3 d_m^{2,39} (F_r + R_4 F_a)^{0,31}$ při $G_{rr,e} < G_{rr,l}$ $G_{rr} = G_{rr,e}$ jinak $G_{rr} = G_{rr,l}$	$G_{sl,e} = S_1 d_m^{-0,35} (F_r^{5/3} + S_2 F_a^{5/3})$ $G_{sl,l} = S_3 d_m^{0,89} (F_r + F_a)$ při $G_{sl,e} < G_{sl,l}$ $G_{sr} = G_{sl,e}$ jinak $G_{sr} = G_{sl,l}$ $G_f = S_4 d_m^{0,76} (F_r + S_5 F_a)$ $G_{sl} = G_{sr} + \frac{G_f}{e^{10^{-6} (n v)^{1,4} d_m}}$

Tabulka 3

Geometrické konstanty pro momenty valivého a smykového tření						
Typ ložiska	Geometrické konstanty pro momenty valivého tření			momenty smykového tření		
	R_1	R_2	R_3	S_1	S_2	S_3
Kuličková ložiska	Viz tabulka 3a			Viz tabulka 3a		
Kuličková ložiska s kosohýlým stykem						
– jednořadá	$5,03 \times 10^{-7}$	1,97	$1,90 \times 10^{-12}$	$1,30 \times 10^{-2}$	0,68	$1,91 \times 10^{-12}$
– dvouřadá	$6,34 \times 10^{-7}$	1,41	$7,83 \times 10^{-13}$	$7,56 \times 10^{-3}$	1,21	$7,83 \times 10^{-13}$
– čtyřřadová	$4,78 \times 10^{-7}$	2,42	$1,40 \times 10^{-12}$	$1,20 \times 10^{-2}$	0,9	$1,40 \times 10^{-12}$
Naklápací kuličková ložiska	Viz tabulka 3b			Viz tabulka 3b		
Válečková ložiska	Viz tabulka 3c			Viz tabulka 3c		
Kuželíková ložiska	Viz tabulka 3d			Viz tabulka 3d		
Soudečková ložiska	Viz tabulka 3e			Viz tabulka 3e		
Toroidní ložiska CARB	Viz tabulka 3f			Viz tabulka 3f		
Axiální kuličková ložiska	$1,03 \times 10^{-6}$			$1,6 \times 10^{-2}$		
Axiální válečková ložiska	$2,25 \times 10^{-6}$			0,154		
Axiální soudečková ložiska	Viz tabulka 3g			Viz tabulka 3g		

Tabulka 3a

Geometrické konstanty pro momenty valivého a smykového tření kulíčkových ložisek

Ložiskové řady	Geometrické konstanty pro momenty valivého tření		momenty smykového tření	
	R ₁	R ₂	S ₁	S ₂
2, 3	$4,4 \times 10^{-7}$	1,7	$2,00 \times 10^{-3}$	100
42, 43	$5,4 \times 10^{-7}$	0,96	$3,00 \times 10^{-3}$	40
60, 630	$4,1 \times 10^{-7}$	1,7	$3,73 \times 10^{-3}$	14,6
62, 622	$3,9 \times 10^{-7}$	1,7	$3,23 \times 10^{-3}$	36,5
63, 623	$3,7 \times 10^{-7}$	1,7	$2,84 \times 10^{-3}$	92,8
64	$3,6 \times 10^{-7}$	1,7	$2,43 \times 10^{-3}$	198
160, 161	$4,3 \times 10^{-7}$	1,7	$4,63 \times 10^{-3}$	4,25
617, 618, 628, 637, 638	$4,7 \times 10^{-7}$	1,7	$6,50 \times 10^{-3}$	0,78
619, 639	$4,3 \times 10^{-7}$	1,7	$4,75 \times 10^{-3}$	3,6

Tabulka 3b

Geometrické konstanty pro momenty valivého a smykového tření naklápěcích kulíčkových ložisek

Ložiskové řady	Geometrické konstanty pro momenty valivého tření			momenty smykového tření		
	R ₁	R ₂	R ₃	S ₁	S ₂	S ₃
12	$3,25 \times 10^{-7}$	6,51	$2,43 \times 10^{-12}$	$4,36 \times 10^{-3}$	9,33	$2,43 \times 10^{-12}$
13	$3,11 \times 10^{-7}$	5,76	$3,52 \times 10^{-12}$	$5,76 \times 10^{-3}$	8,03	$3,52 \times 10^{-12}$
22	$3,13 \times 10^{-7}$	5,54	$3,12 \times 10^{-12}$	$5,84 \times 10^{-3}$	6,60	$3,12 \times 10^{-12}$
23	$3,11 \times 10^{-7}$	3,87	$5,41 \times 10^{-12}$	0,01	4,35	$5,41 \times 10^{-12}$
112	$3,25 \times 10^{-7}$	6,16	$2,48 \times 10^{-12}$	$4,33 \times 10^{-3}$	8,44	$2,48 \times 10^{-12}$
130	$2,39 \times 10^{-7}$	5,81	$1,10 \times 10^{-12}$	$7,25 \times 10^{-3}$	7,98	$1,10 \times 10^{-12}$
139	$2,44 \times 10^{-7}$	7,96	$5,63 \times 10^{-13}$	$4,51 \times 10^{-3}$	12,11	$5,63 \times 10^{-13}$

Tabulka 3c

Geometrické konstanty pro momenty valivého a smykového tření válečkových ložisek

Ložiskové řady	Geometrické konstanty pro momenty valivého tření	momenty smykového tření	
	R ₁	S ₁	S ₂
Ložiska s klíci v provedení N, NU, NJ nebo NUP			
2, 3	$1,09 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015
4	$1,00 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015
10	$1,12 \times 10^{-6}$	0,17	0,0015
12, 20	$1,23 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015
22	$1,40 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015
23	$1,48 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015
Ložiska s plným počtem valivých těles v provedení NCF, NJG, NNCL, NNCF, NNC nebo NNF			
Všechny řady	$2,13 \times 10^{-6}$	0,16	0,0015

Geometrické konstanty pro momenty valivého a smykového tření kuželíkových ložisek

Ložiskové řady	Geometrické konstanty pro momenty valivého tření		momenty smykového tření	
	R ₁	R ₂	S ₁	S ₂
302	$1,76 \times 10^{-6}$	10,9	0,017	2
303	$1,69 \times 10^{-6}$	10,9	0,017	2
313 (X)	$1,84 \times 10^{-6}$	10,9	0,048	2
320 X	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,014	2
322	$2,27 \times 10^{-6}$	10,9	0,018	2
322 B	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,026	2
323	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,019	2
323 B	$2,79 \times 10^{-6}$	10,9	0,030	2
329	$2,31 \times 10^{-6}$	10,9	0,009	2
330	$2,71 \times 10^{-6}$	11,3	0,010	2
331	$2,71 \times 10^{-6}$	10,9	0,015	2
332	$2,71 \times 10^{-6}$	10,9	0,018	2
LL	$1,72 \times 10^{-6}$	10,9	0,0057	2
L	$2,19 \times 10^{-6}$	10,9	0,0093	2
LM	$2,25 \times 10^{-6}$	10,9	0,011	2
M	$2,48 \times 10^{-6}$	10,9	0,015	2
HM	$2,60 \times 10^{-6}$	10,9	0,020	2
H	$2,66 \times 10^{-6}$	10,9	0,025	2
HH	$2,51 \times 10^{-6}$	10,9	0,027	2
Všechny ostatní	$2,31 \times 10^{-6}$	10,9	0,019	2

Geometrické konstanty pro momenty valivého a smykového tření soudečkových ložisek

Ložiskové řady	Geometrické konstanty pro momenty valivého tření				momenty smykového tření			
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
213 E, 222 E	$1,6 \times 10^{-6}$	5,84	$2,81 \times 10^{-6}$	5,8	$3,62 \times 10^{-3}$	508	$8,8 \times 10^{-3}$	117
222	$2,0 \times 10^{-6}$	5,54	$2,92 \times 10^{-6}$	5,5	$5,10 \times 10^{-3}$	414	$9,7 \times 10^{-3}$	100
223	$1,7 \times 10^{-6}$	4,1	$3,13 \times 10^{-6}$	4,05	$6,92 \times 10^{-3}$	124	$1,7 \times 10^{-2}$	41
223 E	$1,6 \times 10^{-6}$	4,1	$3,14 \times 10^{-6}$	4,05	$6,23 \times 10^{-3}$	124	$1,7 \times 10^{-2}$	41
230	$2,4 \times 10^{-6}$	6,44	$3,76 \times 10^{-6}$	6,4	$4,13 \times 10^{-3}$	755	$1,1 \times 10^{-2}$	160
231	$2,4 \times 10^{-6}$	4,7	$4,04 \times 10^{-6}$	4,72	$6,70 \times 10^{-3}$	231	$1,7 \times 10^{-2}$	65
232	$2,3 \times 10^{-6}$	4,1	$4,00 \times 10^{-6}$	4,05	$8,66 \times 10^{-3}$	126	$2,1 \times 10^{-2}$	41
238	$3,1 \times 10^{-6}$	12,1	$3,82 \times 10^{-6}$	12	$1,74 \times 10^{-3}$	9 495	$5,9 \times 10^{-3}$	1 057
239	$2,7 \times 10^{-6}$	8,53	$3,87 \times 10^{-6}$	8,47	$2,77 \times 10^{-3}$	2 330	$8,5 \times 10^{-3}$	371
240	$2,9 \times 10^{-6}$	4,87	$4,78 \times 10^{-6}$	4,84	$6,95 \times 10^{-3}$	240	$2,1 \times 10^{-2}$	68
241	$2,6 \times 10^{-6}$	3,8	$4,79 \times 10^{-6}$	3,7	$1,00 \times 10^{-2}$	86,7	$2,9 \times 10^{-2}$	31
248	$3,8 \times 10^{-6}$	9,4	$5,09 \times 10^{-6}$	9,3	$2,80 \times 10^{-3}$	3 415	$1,2 \times 10^{-2}$	486
249	$3,0 \times 10^{-6}$	6,67	$5,09 \times 10^{-6}$	6,62	$3,90 \times 10^{-3}$	887	$1,7 \times 10^{-2}$	180

Tabulka 3f

Geometrické konstanty pro momenty valivého a smykového tření toroidních ložisek CARB

Ložiskové řady	Geometrické konstanty pro momenty valivého tření		momenty smykového tření	
	R ₁	R ₂	S ₁	S ₂
C 22	$1,17 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$0,8 \times 10^{-2}$
C 23	$1,20 \times 10^{-6}$	$2,28 \times 10^{-6}$	$1,24 \times 10^{-3}$	$0,9 \times 10^{-2}$
C 30	$1,40 \times 10^{-6}$	$2,59 \times 10^{-6}$	$1,58 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-2}$
C 31	$1,37 \times 10^{-6}$	$2,77 \times 10^{-6}$	$1,30 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$
C 32	$1,33 \times 10^{-6}$	$2,63 \times 10^{-6}$	$1,31 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$
C 39	$1,45 \times 10^{-6}$	$2,55 \times 10^{-6}$	$1,84 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-2}$
C 40	$1,53 \times 10^{-6}$	$3,15 \times 10^{-6}$	$1,50 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-2}$
C 41	$1,49 \times 10^{-6}$	$3,11 \times 10^{-6}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-2}$
C 49	$1,49 \times 10^{-6}$	$3,24 \times 10^{-6}$	$1,39 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$
C 59	$1,77 \times 10^{-6}$	$3,81 \times 10^{-6}$	$1,80 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-2}$
C 60	$1,83 \times 10^{-6}$	$5,22 \times 10^{-6}$	$1,17 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-2}$
C 69	$1,85 \times 10^{-6}$	$4,53 \times 10^{-6}$	$1,61 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-2}$

Tabulka 3g

Geometrické konstanty pro momenty valivého a smykového tření axiálních soudečkových ložisek

Ložiskové řady	Geometrické konstanty pro momenty valivého tření				momenty smykového tření			S ₄	S ₅
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	S ₁	S ₂	S ₃		
292	$1,32 \times 10^{-6}$	1,57	$1,97 \times 10^{-6}$	3,21	$4,53 \times 10^{-3}$	0,26	0,02	0,1	0,6
292 E	$1,32 \times 10^{-6}$	1,65	$2,09 \times 10^{-6}$	2,92	$5,98 \times 10^{-3}$	0,23	0,03	0,17	0,56
293	$1,39 \times 10^{-6}$	1,66	$1,96 \times 10^{-6}$	3,23	$5,52 \times 10^{-3}$	0,25	0,02	0,1	0,6
293 E	$1,16 \times 10^{-6}$	1,64	$2,00 \times 10^{-6}$	3,04	$4,26 \times 10^{-3}$	0,23	0,025	0,15	0,58
294 E	$1,25 \times 10^{-6}$	1,67	$2,15 \times 10^{-6}$	2,86	$6,42 \times 10^{-3}$	0,21	0,04	0,2	0,54

Třecí moment těsnění: Exponent a konstanty						
Typ těsnění Typ ložiska	Vnější průměr ložiska		Exponent a konstanty			Průměr těsnící plochy $d_s^{(1)}$
	D přes	včetně	β	K_{S1}	K_{S2}	
Těsnění RSL Kuličková ložiska	25	25 52	0 2,25	0 0,0018	0	d_2 d_2
Těsnění RZ Kuličková ložiska		175	0	0	0	d_1
Těsnění RSH Kuličková ložiska		52	2,25	0,028	2	d_2
Těsnění RS1 Kuličková ložiska		62 80 80 100	2,25 2,25 2,25 2,25	0,023 0,018 0,018 0,018	2 20 15 0	d_1, d_2 d_1, d_2 d_1, d_2 d_1, d_2
Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem	30	120	2	0,014	10	d_1
Naklápací kuličková ložiska	30	125	2	0,014	10	d_2
Těsnění LS Válečková ložiska	42	360	2	0,032	50	E
Těsnění CS, CS2 a CS5 Soudečková ložiska	62	300	2	0,057	50	d_2
Toroidní ložiska CARB	42	340	2	0,057	50	d_2

¹⁾ Označení a rozměry jsou uvedeny v tabulkové části.

Další vlivy na velikost třecího momentu v ložisku

Pokud je požadován přesnější výpočet, nový model SKF dokáže zahrnout i další vlivy, které lze doplnit do rovnice, aby bylo možné přesněji sledovat skutečné chování ložiska. Tyto další vlivy jsou

- redukce od vířivého ohřevu
- vliv otáček, při nichž nastává následné nezalíhání stopy při mazání olej-vzduch, mazání vstříkovaným olejem, mazání plastickým mazivem a při nízké hladině oleje při mazání olejovou lázní
- odpor brodní při mazání olejovou lázní
- smíšené mazání v oblasti nízkých otáček a/nebo nízké viskozity.

Výsledný vztah pro výpočet celkového třecího momentu ložiska jenž zahrnuje tyto přídavné vlivy, je

$$M = \Phi_{ish} \Phi_{rs} M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

kde

M = celkový třecí moment ložiska, Nmm

$M_{rr} = G_{rr} (v n)^{0,6}$

$M_{sl} = G_{sl} \mu_{sl}$

$M_{seal} = K_{S1} d_s^\beta + K_{S2}$

M_{drag} = třecí moment způsobený odporem brodní, hnětením, odstříkáváním atd., Nmm

Φ_{ish} = redukční součinitel vířivého ohřevu

Φ_{rs} = redukční součinitel následného nezalíhání stopy

Redukční součinitele Φ_{ish} a Φ_{rs} jsou zavedeny do nového modelu tření SKF, aby zahrnuly vliv vířivého ohřevu a následného nezalítí stopy při vysokých otáčkách v případě valivého tření. Součinitel smykového tření μ_{sl} je vyšší při nízkých otáčkách a/nebo viskozitě a zahrnuje vliv mazání v oblasti režimu smíšeného mazání.

Redukční součinitel vířivého ohřevu

I když je v ložisku dostatečné množství maziva, ne vše může proniknout mezi stykové plochy. Na tvorbu mazivového filmu je spotřebováno pouze malé množství maziva. Vlivem tohoto jevu je část oleje, který se nachází v blízkosti vstupu do stykové plochy, vytlačena a olej začne proudit opačným směrem (→ obr. 1). Tento zpětný tok vyvolává tření v mazivu, které způsobuje ohřev oleje, a tedy snížení viskozity maziva, zeslabení tloušťky mazivového filmu i zmenšení složky valivého tření.

Výše uvedený jev může být vyjádřen redukčním součinitelem vířivého ohřevu

$$\Phi_{ish} = \frac{1}{1 + 1,84 \times 10^{-9} (n d_m)^{1,28} v^{0,64}}$$

kde

Φ_{ish} = redukční součinitel vířivého ohřevu

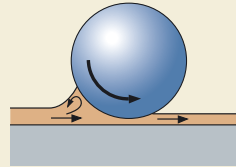
n = otáčky, min^{-1}

d_m = střední průměr ložiska
= $0,5 (d + D)$, mm

v = kinematická viskozita maziva při provozní teplotě, mm^2/s (viskozita základní olejové složky při mazání plastickým mazivem)

Hodnoty součinitele vířivého ohřevu Φ_{ish} lze stanovit podle **diagramu 1** jako funkci kombinovaného parametru $(n d_m)^{1,28} v^{0,64}$.

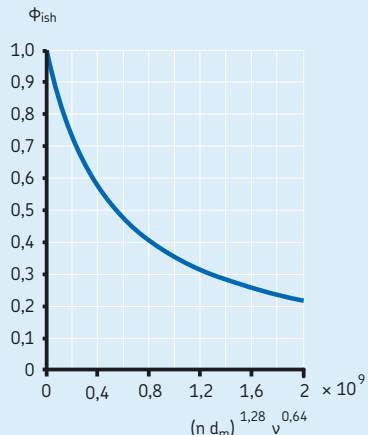
Zpětný tok na vstupu do místa styku



Zpětný tok maziva

Diagram 1

Redukční součinitel vířivého ohřevu Φ_{ish}



Redukční součinitel následného nezalíť stopy

Při mazání olej-vzduch, mazání vstřikovaným olejem, nízké hladině oleje při mazání olejovou lázní (např. hladina oleje nesahá ke středu nejnižšího valivého tělesa) a při mazání plastickým mazivem může být při opakovaném převalování oběžných drah mazivo vytlačováno z oběžných drah. Vlivem otáček ložiska nebo vysoké viskozity nemusí mít mazivo na okrajích místa styku dostatečný čas, aby se vrátilo na oběžné dráhy. Tento jev se nazývá "následné nezalíť stopy" a vyvolává úbytek tloušťky mazivového filmu a zmenšení složky valivého tření.

Pro výše uvedené podmínky mazání lze vypočítat přibližnou hodnotu redukčního součinitele následného nezalíť stopy podle vztahu

$$\phi_{rs} = \frac{1}{e^{K_{rs}} v n (d + D) \sqrt{\frac{K_z}{2(D-d)}}}$$

kde

ϕ_{rs} = redukční součinitel následného nezalíť stopy

e = základ přirozeného logaritmu $\approx 2,718$

K_{rs} = konstanta následného nezalíť stopy
 3×10^{-8} mazání nízkou hladinou olejové lázně a mazání vstřikovaným olejem
 6×10^{-8} mazání plastickým mazivem a mazání olej-vzduch

K_z = geometrická konstanta závislá na typu ložiska (\rightarrow **tabulka 5**)

v = kinematická viskozita maziva při provozní teplotě, mm^2/s

n = otáčky, min^{-1}

d = průměr díry ložiska, mm

D = vnější průměr ložiska, mm

Odpor brodění při mazání olejovou lázní

Vzhledem k tomu, že odpor brodění představuje nejdůležitější zdroj přídavného tření, člen, který vyjadřuje přídavný zdroj, zahrnuje pouze složku odporu brodění M_{drag} .

Při mazání olejovou lázní je ložisko částečně, popř. v některých zvláštních případech zcela ponořeno. Za těchto podmínek může mít velikost a geometrie olejové nádrže spolu se stavem hladiny oleje zásadní význam na třecí moment ložiska. Pokud u velmi velkých nádrží s olejem zanedbáme vliv velikosti nádrže a vlivy

ostatních mechanických dílů, které se nacházejí v blízkosti ložiska, jako např. víření oleje vně ložiska, ozubených kol a vaček, odpor brodění v ložisku lze přibližně stanovit jako funkci stavu hladiny oleje v nádrži z proměnné V_M v **diagramu 2** v závislosti na výšce hladiny oleje H (\rightarrow **obr. 2**) a středního průměru ložiska $d_m = 0,5(d + D)$. **Diagram 2** lze použít pro otáčky ložiska menší nebo maximálně rovné referenčním otáčkám daného ložiska. Při vyšších otáčkách a vysokých hladinách oleje se může projevit vliv ještě dalších významných faktorů.

Proměnná V_M z **diagramu 2** určuje třecí moment odporu brodění u ložisek s bodovým stykem podle

Tabulka 5

Geometrické konstanty K_z a K_L

Typ ložiska	Geometrické konstanty K_z	Geometrické konstanty K_L
Kuličková ložiska		
– jednořadá a dvouřadá	3,1	–
Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem		
– jednořadá	4,4	–
– dvouřadá	3,1	–
– čtyřbodová	3,1	–
Naklápěcí kuličková ložiska	4,8	–
Válečková ložiska		
– s klecí	5,1	0,65
– s plným počtem valivých těles	6,2	0,7
Kuželíková ložiska	6	0,7
Soudečková ložiska	5,5	0,8
Toroidní ložiska CARB		
– s klecí	5,3	0,8
– s plným počtem valivých těles	6	0,75
Axiální kuličková ložiska	3,8	–
Axiální válečková ložiska	4,4	0,43
Axiální soudečková ložiska	5,6	0,58 ¹⁾

1) Pouze pro samostatně montovaná ložiska.

$$M_{\text{drag}} = V_M K_{\text{ball}} d_m^5 n^2$$

a pro ložiska s čárovým stykem podle

$$M_{\text{drag}} = 10 V_M K_{\text{roll}} B d_m^4 n^2$$

kde

M_{drag} = třecí moment odporu brodnění, Nmm

V_M = proměnná jako funkce výšky hladiny oleje podle **diagramu 2**

K_{ball} = konstanta pro ložiska s bodovým stykem, viz níže

K_{roll} = konstanta pro ložiska s čárovým stykem, viz níže

d_m = střední průměr ložiska, mm

B = šířka vnitřního kroužku ložiska, mm

n = otáčky, min^{-1}

Hodnoty proměnné V_M lze určit podle **diagramu 2**, v němž červená křivka platí pro ložiska s bodovým stykem a modrá křivka pro ložiska s čárovým stykem.

Konstanta pro ložiska s bodovým stykem je definována následujícím způsobem

$$K_{\text{ball}} = \frac{i_{\text{rw}} K_Z (d + D)}{D - d} \times 10^{-12}$$

a pro ložiska s čárovým stykem

$$K_{\text{roll}} = \frac{K_L K_Z (d + D)}{D - d} \times 10^{-12}$$

kde

K_{ball} = konstanta pro ložiska s bodovým stykem

K_{roll} = konstanta pro ložiska s čárovým stykem

i_{rw} = počet řad kuliček

K_Z = geometrická konstanta typu ložiska
(→ **tabulka 5**)

K_L = geometrická konstanta typu ložiska
s čárovým stykem (→ **tabulka 5**)

d = průměr díry ložiska, mm

D = vnější průměr ložiska, mm

Upozornění

Pro výpočet odporu brodnění při mazání vstřikovaným olejem lze použít model pro mazání olejovou lázní, kdy hladina oleje sahá do poloviny průměru valivého tělesa, přičemž vypočtenou hodnotu M_{drag} je nutno vynásobit dvěma.

Výška hladiny oleje v olejové lázni

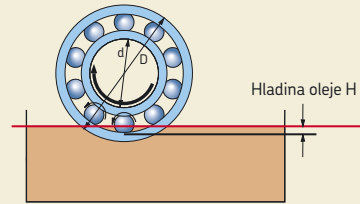
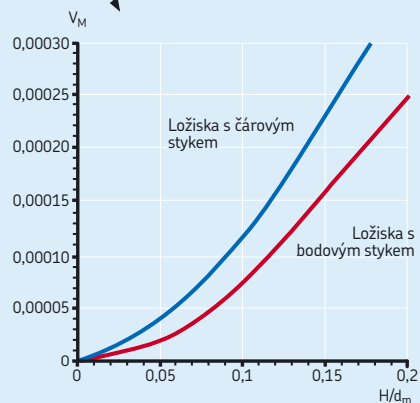
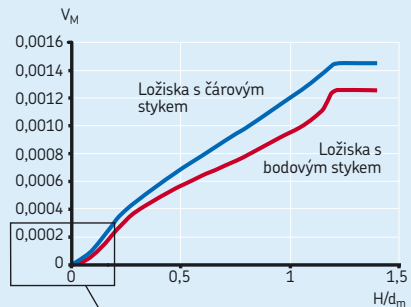


Diagram 2

Proměnná odporu brodnění V_M



Tření

Pro výpočet odporu brodnění pro uložení se svislou hřídelí je možné použít pro stanovení přibližné hodnoty model pro zcela ponořené ložisko a výslednou hodnotu M_{drag} je třeba vynásobit součinitelem, který se rovná poměru ponořené šířky (výšky) a celkové šířky (výšky) ložiska.

Smíšené mazání v oblasti nízkých otáček a viskozit

Při provozních podmínkách s nízkou hodnotou κ (≤ 2) pracuje uložení v režimu smíšeného mazání, kdy může dojít k občasnému styku kov na kov, což se projeví zvýšením tření. Křivka závislosti typického třecího momentu ložiska jako funkce otáček a viskozity je zachycena v **diagramu 3**. Při rozběhu klesá třecí moment se vzrůstajícími otáčkami nebo viskozitou, protože vzniká mazivový film a ložisko přechází do elastohydrodynamického režimu (EHL). S vyššími otáčkami nebo viskozitou vzrůstá tření vlivem rostoucí tloušťky filmu, dokud mazání následně nezalítí stopy při vysokých otáčkách a teplo znovu nesníží tření.

Součinitel smykového tření lze vypočítat podle následujícího vztahu

$$\mu_{sl} = \Phi_{bl} \mu_{bl} + (1 - \Phi_{bl}) \mu_{EHL}$$

kde

μ_{sl} = součinitel smykového tření

Φ_{bl} = váhový faktor pro součinitel smykového tření, viz níže

μ_{bl} = koeficient závislý na přídavných aditivech v mazivu, přibližná hodnota 0,15

μ_{EHL} = součinitel tření pro podmínky plného mazivového filmu:

0,05 pro mazání minerálními oleji

0,04 pro mazání syntetickými oleji

0,1 pro mazání převodovými kapalinami

Pro uložení s válečkovými nebo

kuželíkovými ložisky použijte následující hodnoty:

0,02 pro válečková ložiska

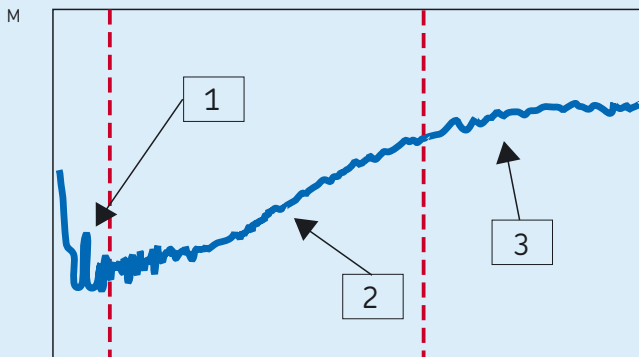
0,002 pro kuželíková ložiska

Váhový faktor pro moment smykového tření lze stanovit podle následující rovnice

$$\Phi_{bl} = \frac{1}{e^{2,6 \times 10^{-8} (n v)^{1,4} d_m}}$$

Diagram 3

Třecí moment ložiska jako funkce otáček a viskozity



Oblast 1: Smíšené mazání
Oblast 2: EHL Elastohydrodynamické mazání
Oblast 3: EHL + vliv tepla a následného nezalítí stopy

kde

Φ_{bl} = váhový faktor pro součinitel smykového tření

e = základ přirozeného logaritmu = 2,718

n = otáčky, min^{-1}

v = kinematická viskozita maziva při provozní teplotě, mm^2/s (pro mazání plastickým mazivem viskozita základní olejové složky)

d_m = střední průměr ložiska,
= $0,5 (d + D)$, mm

Váhový faktor Φ_{bl} pro součinitel smykového tření lze odhadnout podle křivky v **diagramu 4**.

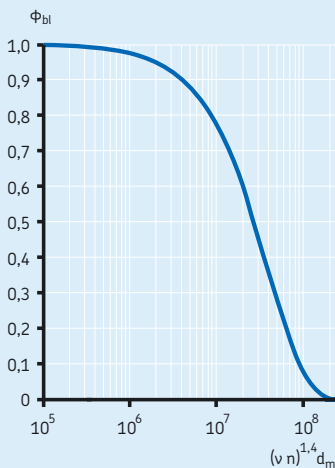
Vliv vůle a nesouososti na tření

Změny vůle a/nebo nesouososti v ložisku mohou ovlivnit moment tření. Výše uvedený model je založen na Normální vůli a souose namontovaném ložisku. Při vysoké provozní teplotě nebo otáčkách může dojít ke zmenšení ložiskové vůle, a tedy ke zvýšení tření. Nesouosost v zásadě zvyšuje tření, avšak u naklápěcích kuličkových ložisek, soudečkových ložisek, toroidních ložisek CARB a axiálních soudečkových ložisek je zvýšení tření způsobené nesouosostí zanedbatelné.

Pokud je příslušné uložení citlivé na změny vůle nebo nesouososti, je vhodné se obrátit na technicko-konzultační služby SKF.

Diagram 4

Váhový faktor pro součinitel smykového tření Φ_{bl}



Vliv náplně plastického maziva na tření

Jestliže ložisko mazané plastickým mazivem bylo právě naplněno (nebo domazáno) doporučeným množstvím maziva, může vykazovat postatně vyšší tření v průběhu prvních hodin nebo dnů provozu (v závislosti na otáčkách) než vychází podle výpočtu. Důvodem je skutečnost, že trvá určitou dobu, než dojde k rozmístění plastického maziva ve volném prostoru ložiska, a do té doby je mazivo hněteno a přemístováno. Pro určení tohoto jevu je třeba vynásobit původní moment valivého tření dvěma pro lehké řady a čtyřmi pro těžké řady. Nicméně po tomto "záběhu" klesne třecí moment na hodnotu srovnatelnou s ložisky mazanými olejem a v některých případech na ještě nižší hodnotu. Je-li ložisko naplněno nadměrným množstvím plastického maziva, může dojít ke zvýšení tření v ložisku. Prostudujte si prosím část "Domazávání", která začíná na **str. 237** nebo se obraťte na technicko-konzultační služby SKF.

Tření v hybridních ložiscích

Vzhledem k vyšším hodnotám modulu pružnosti keramiky se hybridní ložiska vyznačují menšími stykovými plochami, což se příznivě projevuje nižšími složkami valivého a smykového tření. Kromě toho má keramika ve srovnání s ocelí nižší měrnou hmotnost, což se projevuje menšími odstředivými silami, čímž může dojít ke snížení tření při vysokých otáčkách.

Výše uvedené rovnice lze použít pro výpočet třecího momentu v hybridních kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem, přičemž místo geometrických konstant R_3 a S_3 celooceľových ložisek se použijí hodnoty $0,41 R_3$ a $0,41 S_3$.

Ve vysokootáčkových uloženích jsou hybridní kuličková ložiska zpravidla montována s axiálním předpětím. Tato ložiska budou za takových podmínek pracovat jako kuličková ložiska s kosoúhlým stykem, a tedy dojde ke srovnatelnému snížení tření při vysokých otáčkách. Tento výpočet tření však musí být proveden ve spolupráci s technicko-konzultačními službami SKF.

Rozběhový moment

Rozběhový moment valivého ložiska je definován jako třecí moment, který musí být překonán, pokud se má ložisko uvést do pohybu z klidového stavu. Při rozběhu z nulových otáček za normální okolní teploty, +20 až +30 °C, a pro $\mu_{sl} = \mu_{bl}$, lze rozběhový moment vypočítat pouze z momentu smykového tření a třecího momentu těsnění, jde-li o ložisko s těsněním. Tedy platí, že

$$M_{\text{start}} = M_{\text{sl}} + M_{\text{seal}}$$

kde

M_{start} = rozběhový třecí moment, Nmm

M_{sl} = moment smykového tření, Nmm

M_{seal} = třecí moment těsnění, Nmm

Rozběhový moment však může být podstatně vyšší u valivých ložisek s velkým stykovým úhlem. U kuželíkových ložisek řad 313, 322 B, 323 B a T7FC může dosahovat až čtyřnásobku a u axiálních soudečkových ložisek až osminásobku.

Ztrátový výkon a teplota ložiska

Ztrátový výkon v ložisku v důsledku tření v ložisku lze vypočítat podle vztahu

$$N_R = 1,05 \times 10^{-4} M n$$

kde

N_R = ztrátový výkon, W

M = celkový třecí moment ložiska, Nmm

n = otáčky, min^{-1}

Jestliže je znám součinitel chlazení (teplo, které se odvede z ložiska vztážené na jeden stupeň rozdílu mezi teplotou ložiska a okolní teplotou), je možné provést přibližný odhad zvýšení teploty v ložisku podle vztahu

$$\Delta T = N_R / W_s$$

kde

ΔT = nárůst teploty, °C

N_R = ztrátový výkon, W

W_s = součinitel chlazení, $\text{W}/^\circ\text{C}$

Příklad výpočtu

Soudečkové ložisko 22208 E má pracovat s otáčkami $3\ 500\ \text{min}^{-1}$ za následujících provozních podmínek:

Skutečné radiální zatížení ložiska $F_r = 2\ 990\ \text{N}$

Skutečné axiální zatížení ložiska $F_a = 100\ \text{N}$

Rotující vnitřní kroužek

Provozní teplota $+40\ ^\circ\text{C}$

Mazání olejovou lázní

Hladina oleje $H = 2,5\ \text{mm}$ nad hranou oběžné dráhy vnějšího kroužku v klidu. Minerální olej má kinematickou viskozitu $\nu = 68\ \text{mm}^2/\text{s}$ při $40\ ^\circ\text{C}$

Požadavek:

Jaký bude celkový třecí moment?

1. Výpočet proměnných, které závisí na geometrii a zatížení

Podle **tabulky 2a** na **str. 91** pro střední průměr ložiska je

$$d_m = 0,5 (d + D) = 0,5 (40 + 80) = 60\ \text{mm}$$

- Proměnné valivého tření

$$\begin{aligned} G_{rr,e} &= R_1 d_m^{1,85} (F_r + R_2 F_a)^{0,54} \\ &= 1,6 \times 10^{-6} \times 60^{1,85} \times \\ &\quad (2\ 990 + 5,84 \times 100)^{0,54} \\ &= 0,26 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{rr,l} &= R_3 d_m^{2,3} (F_r + R_4 F_a)^{0,31} \\ &= 2,81 \times 10^{-6} \times 60^{2,3} \times \\ &\quad (2\ 990 + 5,8 \times 100)^{0,31} \\ &= 0,436 \end{aligned}$$

jelikož $G_{rr,e} < G_{rr,l}$, pak

$$G_{rr} = 0,26$$

- Proměnné smykového tření

$$\begin{aligned} G_{sl,e} &= S_1 d_m^{0,25} (F_r^4 + S_2 F_a^4)^{1/3} \\ &= 3,62 \times 10^{-3} \times 60^{0,25} \times \\ &\quad (2\ 990^4 + 508 \times 100^4)^{1/3} \\ &= 434 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{sl,l} &= S_3 d_m^{0,94} (F_r^3 + S_4 F_a^3)^{1/3} \\ &= 8,8 \times 10^{-3} \times 60^{0,94} \times \\ &\quad (2\ 990^3 + 117 \times 100^3)^{1/3} \\ &= 1\ 236,6 \end{aligned}$$

jelikož $G_{sl,e} < G_{sl,l}$, pak

$$G_{sl} = 434$$

2. Výpočet momentu valivého tření

$$\begin{aligned} M_{rr} &= G_{rr} (\nu n)^{0,6} = 0,26 \times (68 \times 3\ 500)^{0,6} \\ &= 437\ \text{Nmm} \end{aligned}$$

3. Výpočet momentu smykového tření

Za předpokladu, že je vytvořen souvislý mazivový film, $k > 2$

$$M_{sl} = \mu_{sl} G_{sl} = 0,05 \times 434 = 21,7\ \text{Nmm}$$

4. Výpočet redukčního součinitele vířivého ohřevu

$$\begin{aligned} \Phi_{ish} &= \frac{1}{1 + 1,84 \times 10^{-9} \times (n \times d_m)^{1,28} \nu^{0,64}} \\ &= \frac{1}{1 + 1,84 \times 10^{-9} \times (3\ 500 \times 60)^{1,28} 68^{0,64}} \\ &= 0,85 \end{aligned}$$

5. Výpočet redukčního součinitele následného nezalítí stopy při mazání olejovou lázní

$$\begin{aligned}\Phi_{rs} &= \frac{1}{e^{K_{rs}} v n (d + D) \sqrt{\frac{K_z}{2(D-d)}}} \\ &= \frac{1}{2,718^3 \times 10^{-8} \times 68 \times 3\,500 \times (40 + 80) \sqrt{\frac{5,5}{2 \times (80 - 40)}}} \\ &\approx 0,8\end{aligned}$$

6. Výpočet odporu brodění při mazání olejovou lázní

Proměnná odporu brodění je funkce

$$H/d_m = 2,5/60 = 0,041$$

Z **diagramu 2** na **str. 99** vyplývá, že odpor brodění je malý, protože $H/d_m < 0,1$, avšak přesto může být zahrnut do výpočtu. U ložisek s čárovým stykem se proměnná odporu brodění V_M rovná přibližně $0,3 \times 10^{-4}$.

Konstantu pro ložiska s čárovým stykem lze vypočítat z

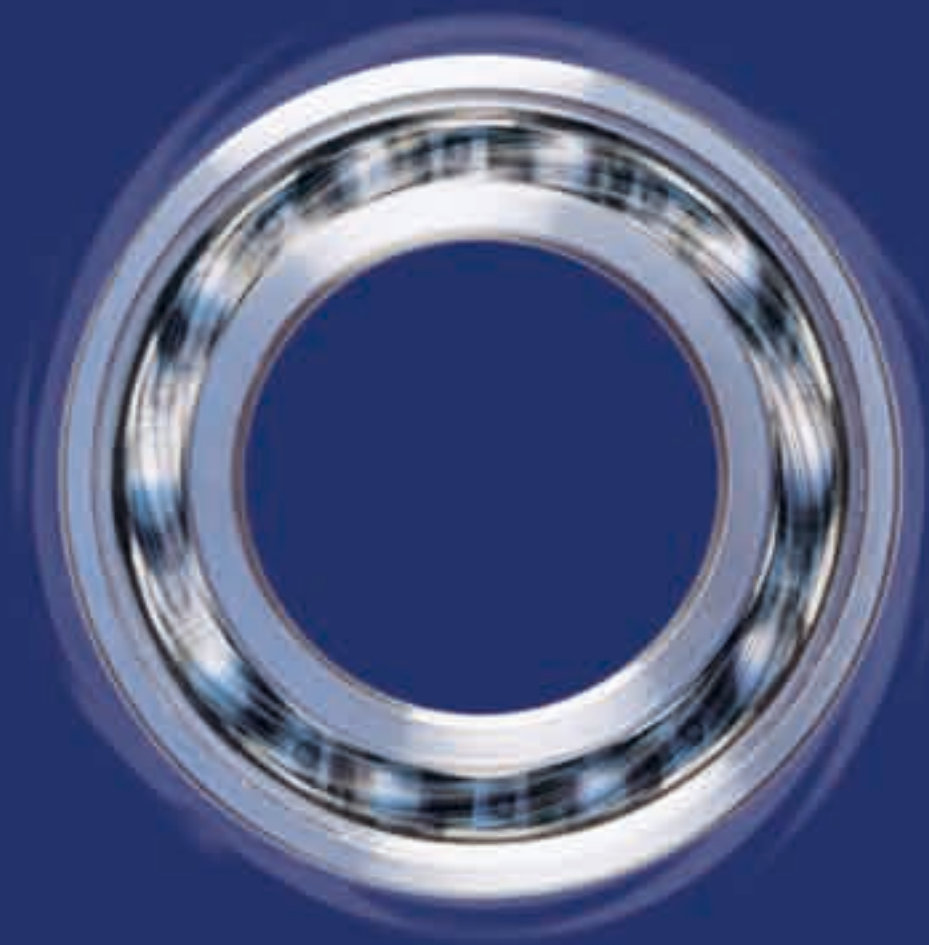
$$\begin{aligned}K_{roll} &= \frac{K_L K_Z (d + D)}{D - d} \times 10^{-12} \\ &= \frac{0,8 \times 5,5 \times (40 + 80)}{80 - 40} \times 10^{-12} \\ &= 13,2 \times 10^{-12}\end{aligned}$$

Odpor brodění lze přibližně vypočítat ze vztahu

$$\begin{aligned}M_{drag} &= 10 V_M K_{roll} B d_m^4 n^2 \\ &= 10 \times 0,3 \times 10^{-4} \times \\ &\quad 13,2 \times 10^{-12} \times 23 \times 60^4 \times 3\,500^2 \\ &= 14,5 \text{ Nmm}\end{aligned}$$

7. Výpočet celkového třecího momentu ložiska 22208 E podle nového modelu SKF

$$\begin{aligned}M &= \Phi_{ish} \Phi_{rs} M_{rr} + M_{sl} + M_{drag} \\ &= 0,85 \times 0,8 \times 437 + 21,7 + 14,5 \\ &= 334 \text{ Nmm}\end{aligned}$$



Otáčky a vibrace

Referenční otáčky	108
Vliv zatížení a viskozity oleje na referenční/připustné otáčky.....	108
Otáčky, které jsou vyšší než referenční	109
Mezní otáčky	114
Zvláštní případy	114
Nízké otáčky	114
Oscilační pohyby	114
Vznik vibrací v ložisku	115
Buzení vibrací vyvolané proměnným počtem zatížených valivých těles	115
Přesnost souvisejících dílů	115
Místní poškození	115
Nečistoty	115
Vliv ložiska na vibrace uložení	115

Otáčky, při nichž mohou pracovat valivá ložiska, jsou omezeny. V zásadě je toto omezení určeno provozní teplotou používaného maziva nebo materiálem dílů ložiska.

Otáčky, při nichž je dosažena mezní provozní teplota, závisí na teple vyvolaném třením v ložisku (včetně působícího externího zdroje tepla) a množství tepla, které může být odvedeno z ložiska.

Na stanovení otáčkových schopností ložiska má vliv typ a velikost ložiska, vnitřní konstrukce, mazání a chlazení, jakož i konstrukce klece, přesnost a vnitřní vůle ložiska.

V tabulkové části jsou zpravidla uváděny dvě hodnoty otáček: (tepelné) referenční otáčky a (kinematické) mezní otáčky, jejichž hodnota závisí na tom, jaká kritéria jsou vzata v úvahu.

Referenční otáčky

(Tepelné) referenční otáčky uvedené v tabulkové části představují hodnotu referenčních otáček, které je třeba použít pro stanovení přípustných provozních otáček ložiska, na které působí určité zatížení a které je mazáno mazivem určité viskozity.

Hodnoty referenčních otáček jsou uvedeny podle ISO 15312:2003 (s výjimkou axiálních kuličkových ložisek). Standard ISO byl stanoven pro mazání olejem, avšak platí rovněž pro mazání plastickým mazivem.

Referenční otáčky pro určité ložisko představují otáčky, při nichž je za určených provozních podmínek dosaženo rovnováhy mezi teplem, které vznikne v ložisku, a teplem odvedeným z ložiska do hřídele, ložiskového tělesa a maziva. Referenční podmínky podle ISO 15312:2003, které definují tepelnou rovnováhu jsou

- zvýšení teploty o 50 °C nad okolní teplotu 20 °C, tzn. ložisko má teplotu 70 °C na nepohyblivém vnějším kroužku nebo tělesovém kroužku
- pro radiální ložisko: konstantní radiální zatížení, které je 5 % statické únosnosti C_0
- pro axiální ložisko: konstantní axiální zatížení, které je 2 % statické únosnosti C_0
- nezakryté ložisko s Normální vůlí.

pro ložiska mazaná olejem:

- mazivo: minerální olej bez EP přísad s kinematickou viskozitou při teplotě 70 °C:
 $v = 12 \text{ mm}^2/\text{s}$ (ISO VG 32) pro radiální ložiska,
 $v = 24 \text{ mm}^2/\text{s}$ (ISO VG 68) pro axiální ložiska s čárovým stykem
- způsob mazání: olejovou lázní, přičemž hladina oleje sahá až ke středu nejnižšího valivého tělesa

pro ložiska mazaná plastickým mazivem:

- mazivo: běžné mazivo s lithným zahušťovadlem s minerální základní olejovou složkou o viskozitě 100 až 200 mm^2/s při 40 °C (např. ISO VG 150)
- množství maziva: cca. 30 % volného prostoru v ložisku.

Při rozběhu ložiska namazaného plastickým mazivem může dojít k teplotní špičce. Z tohoto důvodu ložisko může v některých případech pracovat 10 až 20 hodin, než dosáhne normální provozní teploty.

Za těchto určených podmínek jsou referenční otáčky pro mazání olejem a plastickým mazivem shodné.

V uloženích s rotujícím vnějším kroužkem ložiska může být nutné limity otáček snížit.

Pro některá ložiska, jejichž otáčkové schopnosti nejsou určeny teplem vznikajícím v místě styku valivého tělesa a oběžné dráhy, jsou uváděny v tabulkové části pouze mezní otáčky. To platí např. pro ložiska s kontaktními třecími těsněními.

Vliv zatížení a viskozity oleje na referenční/přípustné otáčky

Jestliže je působící zatížení a viskozita vyšší než referenční hodnoty, třecí odpor vzroste natolik, že ložisko nemůže pracovat při navrhovaných referenčních otáčkách, ledaže by byla povolena vyšší teplota. Nižší viskozita může umožnit vyšší provozní otáčky.

Vliv zatížení a kinematické viskozity na referenční otáčky lze zjistit v následujících diagramech:

Diagram 1: Radiální ložiska s bodovým stykem, str. 110.

Diagram 2: Radiální ložiska s čárovým stykem, str. 111.

Diagram 3: Axiální ložiska s bodovým stykem, str. 112.

Diagram 4: Axiální ložiska s čárovým stykem, str. 113.

Mazání olejem

Hodnoty opravných součinitelů pro mazání olejem

- f_p : pro vliv ekvivalentního dynamického zatížení P a
- f_v : pro vliv viskozity

Lze zjistit v **diagramech 1 až 4** jako funkci P/C_0 a středního průměru ložiska d_m

kde

P = ekvivalentní dynamické zatížení, kN

C_0 = statická únosnost, kN

d_m = střední průměr ložiska
= $0,5 (d + D)$, mm

Hodnoty viskozity jsou vyjádřeny podle ISO, např. ISO VG 32, kde 32 je viskozita oleje při teplotě 40 °C.

Pokud se referenční teplota 70 °C nemá změnit, přípustné otáčky lze vypočítat ze vztahu

$$n_{perm} = n_r f_p f_v$$

kde

n_{perm} = přípustné otáčky ložiska, min^{-1}

n_r = referenční otáčky, min^{-1}

f_p = opravný součinitel pro zatížení ložiska P

f_v = opravný součinitel pro viskozitu oleje

Mazání plastickým mazivem

Diagramy platí rovněž pro mazání plastickým mazivem. Referenční otáčky pro mazání plastickým mazivem jsou založeny na viskozitě základní olejové složky VG 150, avšak mohou být rovněž použity pro rozsah viskozity od ISO VG 100 do ISO VG 200. Pro jiné hodnoty viskozity musí být hodnota f_v vypočtena jako podíl f_v pro viskozitu základní olejové složky při 40 °C zvoleného plastického maziva a f_v pro olej ISO VG 150.

$$n_{perm} = n_r f_p \frac{f_v \text{ základ. olej. sl. zvoleného plast. maziva}}{f_v \text{ oleje ISO VG150}}$$

Příklad 1

Na kuličkové ložisko SKF Explorer 6210 působí zatížení $P = 0,24 C_0$ a ložisko je mazáno olejovou lázní s olejem s viskozitou 68 mm^2/s při 40 °C. Jaké jsou přípustné otáčky?

Pro ložisko 6210: $d_m = 0,5 (50 + 90) = 70$ mm. Z **diagramu 1**, na **str. 110**, pro $d_m = 70$ mm a $P/C_0 = 0,24$, $f_p = 0,63$ a pro $P/C_0 = 0,24$ a ISO VG 68, $f_v = 0,85$.

Přípustné otáčky ložiska n_{perm} , při nichž lze očekávat dosažení provozní teploty 70 °C, činí

$$n_{perm} = 15\,000 \times 0,63 \times 0,85 = 8\,030 \text{ min}^{-1}$$

Příklad 2

Na soudečkové ložisko SKF Explorer 2222 E působí zatížení $P = 0,15 C_0$ a ložisko je namazáno plastickým mazivem se základní olejovou složkou s viskozitou 220 mm^2/s při 40 °C. Jaké jsou přípustné otáčky?

Pro ložisko 2222 E: $d_m = 0,5 (110 + 200) = 155$ mm. Z **diagramu 2**, na **str. 111**, pro $d_m = 155$ mm a $P/C_0 = 0,15$, $f_p = 0,53$ a pro $P/C_0 = 0,15$ a ISO VG 220, $f_v \text{ základ. olej. sl.} = 0,83$; pro $P/C_0 = 0,15$ a ISO VG 150, $f_v \text{ olej ISO VG150} = 0,87$. Přípustné otáčky ložiska n_{perm} , při nichž lze očekávat dosažení provozní teploty 70 °C, činí

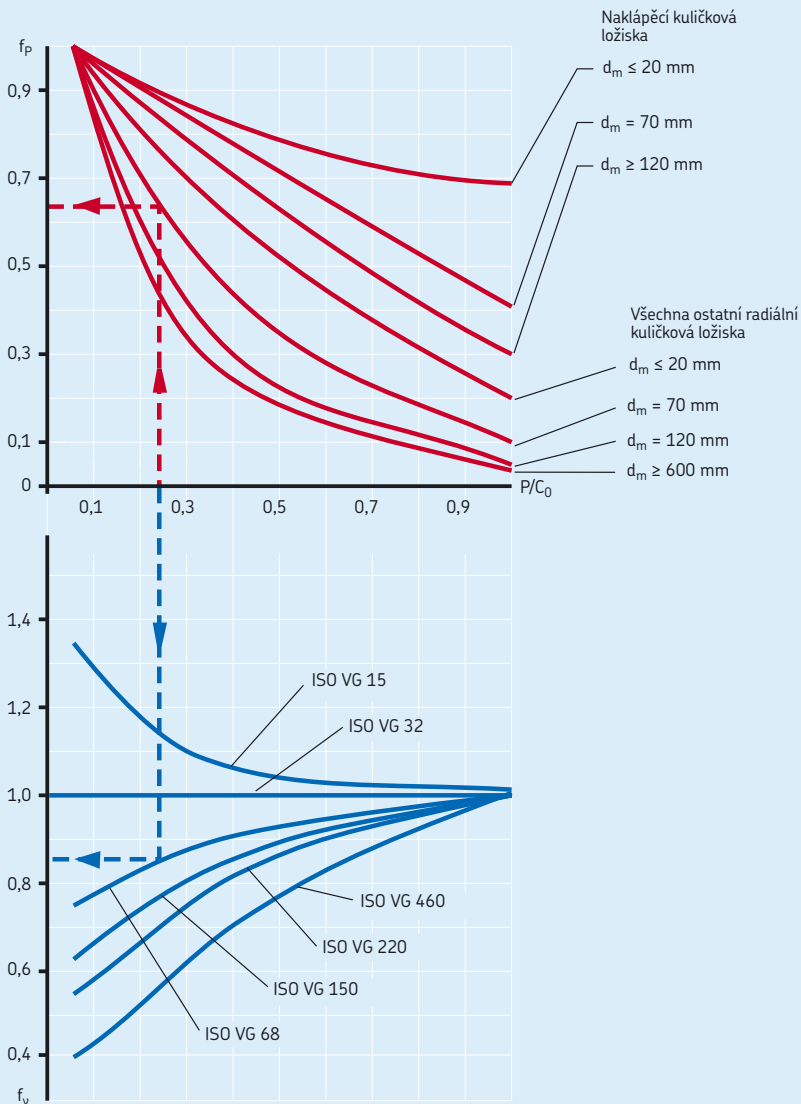
$$n_{perm} = 3\,000 \times 0,53 \times 0,83/0,87 = 1\,520 \text{ min}^{-1}$$

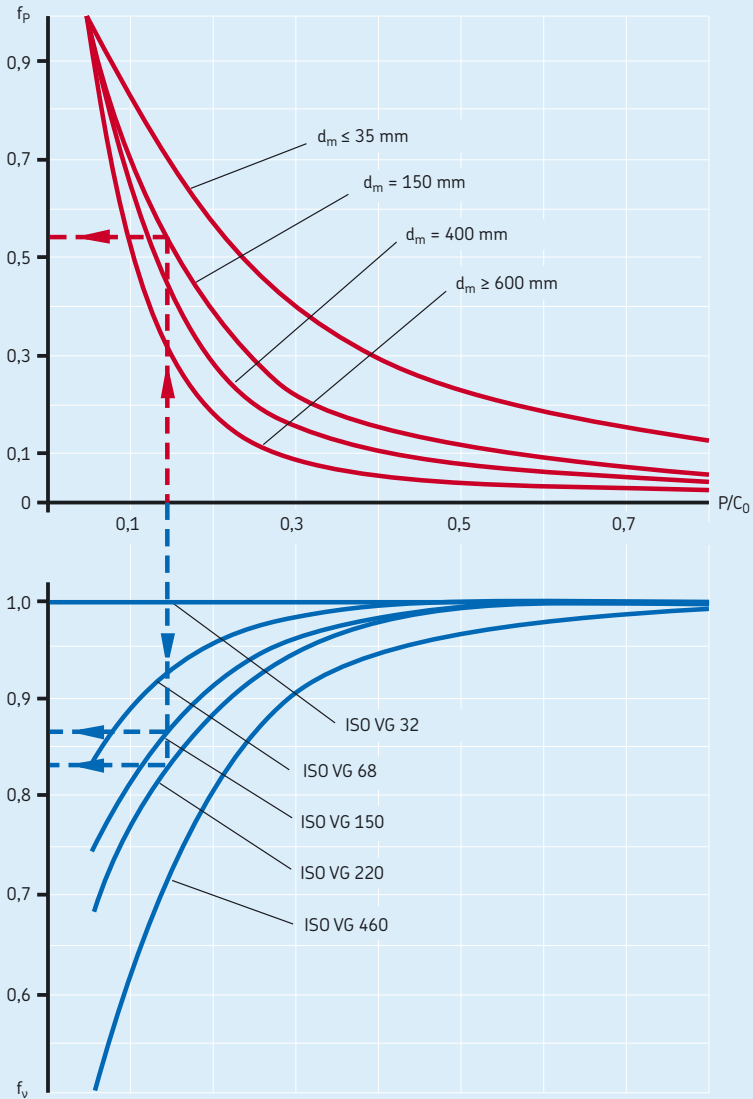
Otáčky, které jsou vyšší než referenční

Ložiska mohou pracovat při otáčkách vyšších než jsou referenční otáčky, pokud lze tření v ložisku snížit mazacím systémem, který dodává přesně odměřená množství maziva nebo odváděním tepla nuceným oběhem oleje, chladicími žebry, tělesem nebo nasměrováním proudu chladicího vzduchu (\rightarrow část "Způsoby mazání olejem", která začíná na **str. 248**).

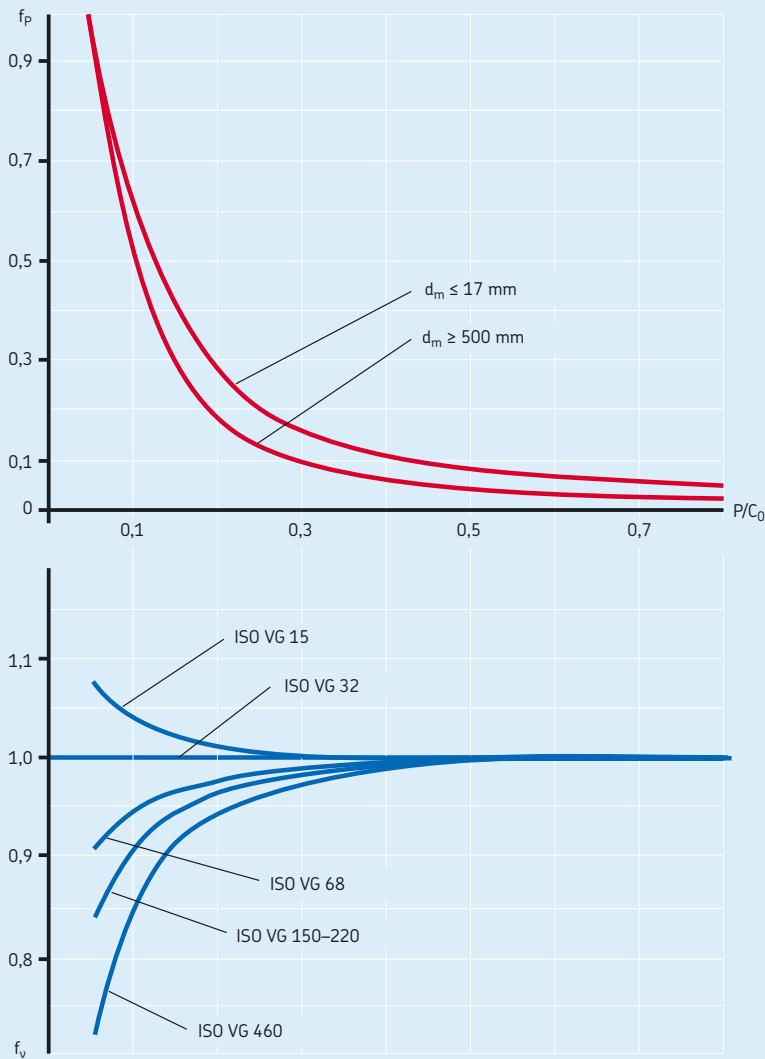
Jakékoli zvýšení otáček nad referenční otáčky bez splnění uvedených předpokladů by mohlo způsobit nadměrný nárůst teploty. Zvýšení teploty ložiska vyvolá snížení viskozity maziva a zhorší podmínky pro tvorbu mazivového filmu, což vyvolá ještě vyšší tření a další zvýšení teploty. Současně provozní vůle ložiska je zmenšena vlivem zvýšené teploty vnitřního kroužku, v konečném důsledku dojde k zadření ložiska. Jakékoli zvýšení otáček nad referenční otáčky v zásadě znamená, že rozdíl teplot mezi vnitřním a vnějším

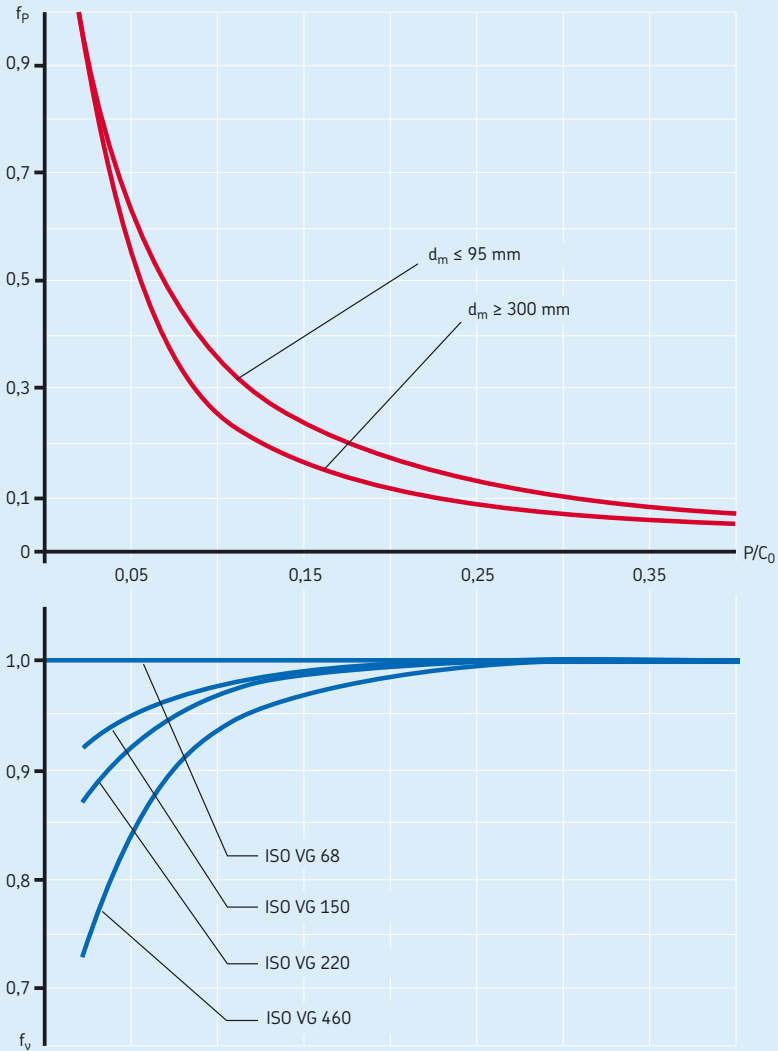
Opravné součinitelé f_p a f_v pro radiální ložiska s bodovým stykem



Opravné součinitelé f_p a f_v pro radiální ložiska s čárovým stykem

Opravné součinitelé f_p a f_v pro axiální ložiska s bodovým stykem



Opravné součinitelé f_p a f_v pro axiální ložiska s čárovým stykem

šim kroužkem je větší než obvyklý. Z tohoto důvodu je zpravidla nutné použít ložisko s vůlí C3, která je větší než Normální, a rovněž může být zapotřebí se podrobněji zaměřit na rozložení teploty v ložisku.

Mezní otáčky

Mezní otáčky jsou stanoveny na základě určitých kritérií, která zahrnují tvarovou stabilitu a pevnost klece, mazání vodících povrchů klece, odstředivé a setrvačné síly působící na valivá tělesa, přesnost a další omezující faktory, jako např. těsnění a mazivo v ložiscích s těsněním.

Zkušebnosti získané při laboratorních zkouškách a s praktickými aplikacemi ukazují, že existují maximální otáčky, které by neměly být překročeny z technických důvodů nebo kvůli velmi vysokým nákladům, které by si vyžádalo udržení provozní teploty na přijatelné úrovni.

Mezní otáčky uvedené v tabulkové části platí pro uvedené provedení ložiska a standardní klec.

Pokud má ložisko pracovat s vyššími otáčkami než jsou uvedeny v tabulkách, je nutné změnit faktory omezující otáčky, jako např. přesnost chodu, materiál a konstrukci klece, mazání a odvod tepla. V takovém případě je vhodné se obrátit na technicko-poradenské služby SKF.

V případě mazání plastickým mazivem je třeba zvážit další vlivy, jako např. mazání vodících ploch a pevnost ve smyku maziva, která je určena základní olejovou složkou a zahušťovadlem (→ část "Mazání plastickým mazivem", která začíná na **str. 231**).

Některá nezakrytá kuličková ložiska se vyznačují velmi nízkým třením a uvedené referenční otáčky by mohly být vyšší než mezní otáčky. Z toho důvodu musí být vypočteny přípustné otáčky a porovnány s mezními otáčkami, přičemž je třeba použít nižší z obou hodnot.

Je nutno zdůraznit, že pokud ložiska mají uspokojivě pracovat při vysokých otáčkách, musí na ně působit určité minimální zatížení. Podrobné informace jsou uvedeny v části textu "Minimální zatížení", který je zařazen před tabulkovou částí.

Zvláštní případy

V některých uloženích je hledisko otáčkových limitů nahrazeno jinými kritérii, které mají větší význam.

Nízké otáčky

Při velmi nízkých otáčkách se nemůže vytvořit elastohydrodynamický mazivový film v místě styku mezi valivými tělesy a oběžnými drahami. V takových uloženích by se v zásadě měla používat maziva s obsahem EP přísad (→ část "Mazání plastickým mazivem", která začíná na **str. 231**).

Oscilační pohyby

U tohoto typu pohybu se smysl otáčení změní dříve, než ložisko dokončí jednu otáčku. Vzhledem k tomu, že otáčky jsou nulové v okamžiku, kdy se změní smysl otáčení, souvislý hydrodynamický mazivový film nemůže být zachován.

V takových případech je nutno používat mazivo s obsahem EP přísad. Takové mazivo vytvoří mazivový film v oblasti smíšeného mazání, který bude schopen přenášet zatížení.

Pro oscilační pohyby nelze stanovit mezní ani přípustné otáčky, protože horní mez není určena tepelnou rovnáhou, nýbrž setrvačnými silami. Při každé změně smyslu pohybu vzniká nebezpečí, že setrvačnost způsobí krátkodobé prokluzování valivých těles a poškození oběžných drah. Přípustné zrychlení a zpomalení závisí na hmotnosti valivých těles a klece, typu a množství maziva, provozní vůli a zatížení ložiska. V uložení ojnice jsou např. použita poměrně malá ložiska s malou hmotností, která jsou předepjata. Všeobecné zásady není možné stanovit a v každém jednotlivém případě je třeba tyto pohyby přesněji analyzovat. V takovém případě je vhodné se obrátit na technicko-poradenské služby SKF.

Vznik vibrací v ložisku

Ložisko zpravidla není zdrojem hluku. To, co je považováno za "hluk ložiska", je ve skutečnosti slyšitelný efekt vibrací, způsobených přímo či nepřímo ložiskem, na souvisejících dílech. To je důvod, proč problémy s hlukem lze většinou považovat za otázku vibrací, která se týká celého uložení.

Buzení vibrací vyvolané proměnným počtem zatížených valivých těles

Jestliže na ložisko působí radiální zatížení, za provozu se mění počet valivých těles, která přenášejí zatížení, tzn. 2-3-2-3... V důsledku toho dochází k posouvání ve směru působení zatížení. Výsledným vibracím nelze zabránit, avšak lze je omezit působením axiálního předpětí, které zajistí zatížení všech valivých těles (u válečkových ložisek to není možné).

Přesnost souvisejících dílů

V případech, kdy je ložiskový kroužek uložen s přesahem v ložiskovém tělese nebo na hřídeli, kroužek může převzít tvar souvisejícího dílu. Úchytky tvaru mohou být příčinou vibrací za provozu. Z tohoto důvodu je nutné, aby hřídel a opěrná plocha v ložiskovém tělese byly vyrobeny v požadovaných tolerancích (→ část "Úchytky válcovitosti" na **str. 194**).

Místní poškození

Při nesprávné manipulaci nebo nesprávné montáži může dojít k místnímu poškození oběžných drah a valivých těles. Za provozu vyvolává převalování poškozených částí ložiska vibrace určité frekvence. Frekvenční analýza vibrací umožňuje zjistit, který díl ložiska je poškozený. Tohoto principu využívá zařízení pro bezdemontážní diagnostiku SKF pro zjišťování poškození ložiska.

Při výpočtu frekvencí ložiska laskavě postupujte podle části "Calculations" v "SKF Interactive Engineering Catalogue" na adrese www.skf.com nebo využijte technicko-konzultačních služeb SKF.

Nečistoty

Pokud ložisko pracuje ve znečištěném prostředí, částice nečistot mohou proniknout do ložiska, v němž se přes ně převalují valivá tělesa. Velikost vyvolaných vibrací závisí na množství, velikosti a složení částic, přes něž se valivá tělesa převalují. Přitom však nevznikají typické frekvence, avšak může se ozývat slyšitelný a pronikavý hluk.

Vliv ložiska na vibrace uložení

V mnoha uloženích má ložisko řádově stejnou tuhost jako související sestava dílů. Vibrace uložení lze tedy snížit volbou správného ložiska (včetně předpětí a vůle) a uspořádáním ložisek v uložení. Vibrace je možné omezit třemi způsoby:

- Odstraněním budiče kritických vibrací z uložení.
- Tlumením buzení kritických vibrací mezi budičem vibrací a rezonančními díly.
- Změnou tuhosti konstrukce, která se projevuje změnou kritické frekvence.