



$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} \left(\frac{C}{P} \right)^P$$

Určení velikosti ložiska

Systémový přístup k uložení a spolehlivost ložiska	50
Únosnosti a trvanlivost	51
Dynamické zatížení ložiska a jeho trvanlivost	51
Statické zatížení ložiska	51
Volba velikosti ložiska pomocí rovnice pro výpočet trvanlivosti	52
Základní trvanlivost	52
Trvanlivost podle SKF	52
Součinitel a_{SKF} teorie trvanlivosti podle SKF	53
Mazání – viskozitní poměr κ	59
Zahrnutí vlivu EP přísad	61
Součinitel znečištění η_c	62
Zvláštní případ – opravný součinitel a_{23}	68
Výpočet trvanlivosti za proměnných provozních podmínek	70
Vliv provozní teploty	71
Požadovaná trvanlivost	71
Dynamické zatížení ložiska	73
Výpočet dynamického zatížení ložiska	73
Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska	74
Potřebné minimální zatížení	75
Volba velikosti ložiska podle statické únosnosti	76
Ekvivalentní statické zatížení ložiska	76
Potřebná statická únosnost	77
Kontrola statické únosnosti	77
Příklady výpočtu	78
Výpočtové nástroje SKF	82
SKF Interaktivní katalog	82
SKF bearing beacon	82
Orpheus	82
Beast	83
Další programy	83
Technicko-konzultační služby SKF	84
Moderní počítačové programy	84
Testování trvanlivosti SKF	85

Velikost ložiska, které má být použito v uložení, lze zvolit na základě jeho únosnosti s ohledem na působící zatížení, požadovanou provozní trvanlivost a spolehlivost. Hodnoty základní dynamické únosnosti C a statické únosnosti C_0 jsou uvedeny v tabulkové části. Dynamické i statické zatěžovací podmínky musí být posuzovány samostatně. Dynamické zatížení je třeba zkontrolovat v reprezentativním rozsahu zatížení, která působí na ložisko. Posuzované spektrum zatížení by mělo zahrnovat i velká špičková zatížení, která se mohou vyskytnout. Statické zatížení zahrnuje jak zatížení působící na ložisko v klidu nebo při velmi nízkých otáčkách ($n < 10 \text{ min}^{-1}$), ale i velká rázová zatížení (zatížení, které působí velmi krátce).

Systémový přístup k uložení a spolehlivost ložiska

Rovnice pro výpočet trvanlivost podle SKF zahrnuje vliv napětí vyvolaného vnějším zatížením spolu s napětími, která jsou způsobena topografii povrchu, mazáním a kinematikou ploch v místě valivého styku. Zahrnutí vlivu tohoto kombinovaného systému napětí na trvanlivost ložiska umožňuje lépe předpovědět skutečné chování ložiska v konkrétním uložení.

Vzhledem ke složitosti této teorie však není možné v tomto katalogu podat podrobnější vysvětlení. Z toho důvodu je uveden zjednodušený "katalogový" postup, který je nazván "rovnice pro výpočet trvanlivost podle SKF". Uvedený postup umožní uživateli plně využít trvanlivost

ložiska, zmenšit kontrolovaným způsobem rozměry dílů a posoudit vliv maziv a znečištění na trvanlivost ložiska v provozních podmínkách.

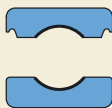
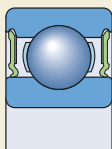
Únava materiálu v místě valivého styku představuje převládající mechanismus vzniku poruch ve valivých ložiscích. Z toho důvodu je kritérium založené na teorii únavy materiálu oběžných drah dostačující pro volbu a dimenzování valivého ložiska pro dané uložení. Mezinárodní normy, jako např. ISO 281, jsou založeny na teorii únavy materiálu v místě valivého styku. Přesto se nesmí zapomínat, že úplné ložisko lze považovat za systém, jehož každý díl (tzn. klec, mazivo a těsnění (→ **obr. 1**)), pokud je používán, má stejný vliv na trvanlivost, a v některých případech dokonce rozhoduje o skutečné provozní trvanlivosti ložiska. Teoreticky je dosaženo optimální provozní trvanlivosti tehdy, když všechny díly dosáhnou stejné trvanlivosti.

Jinými slovy, výpočtová trvanlivost odpovídá skutečné provozní trvanlivosti, jestliže provozní trvanlivost souvisejících dílů je alespoň stejně tak dlouhá jako výpočtová trvanlivost ložiska. Souvisejícími díly jsou v tomto případě klec, těsnění a mazivo. V praxi představuje nejdůležitější faktor únava kovového materiálu.

Obr. 1

Systémová trvanlivost ložiska

$$L_{\text{ložisko}} = f(L_{\text{oběžné dráhy}}, L_{\text{valivá tělesa}}, L_{\text{klec}}, L_{\text{mazivo}}, L_{\text{těsnění}})$$



Únosnosti a trvanlivost

Dynamické zatížení ložiska a jeho trvanlivost

Základní dynamická únosnost ložiska C je používána pro výpočet trvanlivosti ložiska, které je dynamicky namáháno, tzn. ložiska, které se otáčí pod zatížením. Vyjadřuje zatížení, při němž ložisko dosáhne základní trvanlivosti 1 000 000 otáček podle ISO 281:1990. Předpokládá se, že zatížení má konstantní velikost a směr a je čistě radiální pro radiální ložiska a čistě axiální v ose ložiska pro axiální ložiska.

Základní dynamická únosnost ložisek SKF je stanovena postupy podle normy ISO 281:1990. Číselné hodnoty uvedené v tomto katalogu platí pro ložiska z chromové ocele, tepelně zpracované na minimální tvrdost 58 HRC, a běžné provozní podmínky.

U ložisek řady SKF Explorer se projevují mj. zlepšené vlastnosti materiálu a moderní výrobní postupy, které zavedla skupina SKF, a tedy pro stanovení základní dynamické únosnosti je nutno použít opravné součinitele podle ISO 281:1990.

Trvanlivost valivých ložisek je definována jako

- počet otáček nebo
- počet provozních hodin při dané rychlosti otáčení

kteří ložisko vykoná, než se projeví první známky únavy materiálu (odlupování materiálu, trhliny) na jednom z kroužků či valivých tělesech.

Praktické zkušenosti však ukazují, že stejná ložiska, která pracují za stejných podmínek, dosahují různé trvanlivosti. Pro určení velikosti ložiska má tudíž zásadní význam definice pojmu "trvanlivost". Všechny údaje o dynamické únosnosti uváděné SKF se zakládají na předpokladu, že 90 % ložisek v dostatečně velké skupině stejných ložisek dosáhne nebo překročí danou trvanlivost.

Existuje mnoho dalších typů trvanlivosti. Jedním z nich je "provozní trvanlivost", která odpovídá skutečné trvanlivosti určitého ložiska za skutečných provozních podmínek. Upozorňujeme, že trvanlivost ložiska může být stanovena jen statisticky. Výpočty trvanlivosti se vždy vztahují pouze na populaci ložisek a na daný stupeň spolehlivosti, tzn. 90 %. Havárie ložiska však nemusí být v zásadě způsobena jen únavou materiálu. Častější příčinou bývá znečištění, opotřebení, nesouosost, korozí, poškození klece, selhání těsnění nebo mazání.

Další typ trvanlivosti je "specifická trvanlivost". Taková trvanlivost je stanovena určitým úřadem a je založena např. na hypotetickém zatížení a otáčkách určených stejným úřadem. V zásadě se jedná o požadovanou základní trvanlivost L_{10} , která je stanovena na základě zkušeností získaných v podobných aplikacích.

Statické zatížení ložiska

Statická únosnost ložiska C_0 se používá pro výpočet, jestliže ložiska

- se otáčejí s velmi nízkou rychlostí otáčení ($n < 10 \text{ min}^{-1}$)
- provádějí velmi pomalé oscilační pohyby
- se pod zatížením nepohybují určitou delší dobu.

Je rovněž velmi důležité zkontrolovat bezpečnost v případech krátkodobě působících zatížení, jako např. rázových zatížení a špičkových zatížení, která působí na rotující ložisko (dynamicky zatížené) nebo na nepohyblivé ložisko.

Statická únosnost podle definice ISO 76:1987 odpovídá vypočtenému stykovému napětí ve středu nejvíce zatíženého místa styku valivého tělesa a oběžné dráhy

- 4 600 MPa pro naklápěcí kuličková ložiska
- 4 200 MPa pro všechna ostatní ložiska s bodovým stykem
- 4 000 MPa pro všechna ložiska s čárovým stykem.

Toto napětí vyvolává trvalou deformaci valivých těles a oběžných drah, která přibližně činí 0,0001 průměru valivého tělesa. Zatížení je čistě radiální pro radiální ložiska a čistě axiální v ose ložiska pro axiální ložiska.

Ověření statického zatížení ložiska se provádí kontrolou součinitele bezpečnosti pro dané uložení, který je definován jako

$$s_0 = C_0/P_0$$

kde

C_0 = statická únosnost, kN

P_0 = ekvivalentní statické zatížení, kN

s_0 = statická bezpečnost

Maximální zatížení, které může působit na ložisko, by mělo být použito ve výpočtu ekvivalentního statického zatížení ložiska. Další informace o

hodnotách statické bezpečnosti a jejím výpočtu jsou uvedeny v části "Volba velikosti ložiska podle statické únosnosti", která začíná na **str. 76**.

Volba velikosti ložiska pomocí rovnice pro výpočet trvanlivosti

Základní trvanlivost

Základní trvanlivost ložiska podle ISO 281:1990 je

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Pokud jsou otáčky (rychlost otáčení) konstantní, je vhodnější vypočítat trvanlivost v provozních hodinách podle vztahu

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n} L_{10}$$

kde

L_{10} = základní trvanlivost (při 90 % spolehlivosti), milióny otáček

L_{10h} = základní trvanlivost (při 90 % spolehlivosti), provozní hodiny

C = základní dynamická únosnost, kN

P = ekvivalentní dynamické zatížení, kN

n = otáčky (rychlost otáčení), min^{-1}

p = exponent rovnice trvanlivosti
= 3 pro ložiska s bodovým stykem
= 10/3 pro ložiska s čárovým stykem

Trvanlivost podle SKF

Základní trvanlivost moderních, vysoce kvalitních ložisek se může výrazně lišit od skutečné provozní trvanlivosti v dané aplikaci. Provozní trvanlivost uložení závisí na mnoha faktorech, mj. na mazání, stupni znečištění, nesouososti, správné montáži a okolních podmínkách.

Z toho důvodu ISO 281:1990/Amd 2:2000 obsahuje i modifikovanou rovnici pro výpočet trvanlivosti, která doplňuje základní trvanlivost. Tento způsob výpočtu zavádí modifikovaný faktor, který zahrnuje vliv mazání a znečištění ložiska, jakož i mezní únavové zatížení materiálu.

ISO 281:1990/Amd 2:2000 rovněž obsahuje ustanovení, které umožňuje výrobcům ložisek

doporučit vhodný postup pro výpočet opravného součinitele, jež mají použít při výpočtu trvanlivosti ložiska s ohledem na provozní podmínky. Součinitel a_{SKF} modifikovaného výpočtu trvanlivosti podle SKF závisí na mezním únavovém zatížení P_u , které je srovnatelné s odpovídajícím parametrem používaným při výpočtu jiných strojních dílů. Hodnoty mezního únavového zatížení jsou uvedeny v tabulkové části. Součinitel a_{SKF} modifikovaného výpočtu trvanlivosti podle SKF dále závisí na mazání (viskozitní poměr κ) a součiniteli η_c , který vyjadřuje stupeň znečištění a zavádí do výpočtu provozní podmínky uložení.

Rovnice SKF pro výpočet trvanlivosti odpovídá ISO 281:1990/Amd 2:2000

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} L_{10} = a_1 a_{SKF} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Jestliže otáčky (rychlost otáčení) jsou konstantní, trvanlivost lze vyjádřit v provozních hodinách ze vztahu

$$L_{nmh} = \frac{10^6}{60 n} L_{nm}$$

kde

L_{nm} = trvanlivost podle SKF (při spolehlivosti $100 - n^{11}$ %), milióny otáček

L_{nmh} = trvanlivost podle SKF (při spolehlivosti $100 - n^{11}$ %), provozní hodiny

L_{10} = základní trvanlivost (při 90 % spolehlivosti), milióny otáček

a_1 = součinitel spolehlivosti (→ **tabulka 1**)

a_{SKF} = součinitel teorie trvanlivosti podle SKF (→ **diagramy 1 až 4**)

C = základní dynamická únosnost, kN

P = ekvivalentní dynamické zatížení, kN

n = otáčky (rychlost otáčení), min^{-1}

p = exponent rovnice trvanlivosti
= 3 pro ložiska s bodovým stykem
= 10/3 pro ložiska s čárovým stykem

¹¹⁾ Faktor n představuje pravděpodobnost poruchy, t.j. rozdíl mezi požadovanou spolehlivostí a 100 % spolehlivostí.

V některých případech je vhodnější vyjádřit trvanlivost v jiných jednotkách, než jsou milióny otáček nebo provozní hodiny. Např. trvanlivost nápravového ložiska používaného v silničních a kolejových vozech je běžně vyjadřována v počtu ujetých kilometrů. **Tabulka 2, str. 58,** uvádí používané převodní součinitele, které usnadní převod vypočítané trvanlivosti na jiné jednotky.

Součinitel a_{SKF} teorie trvanlivosti podle SKF

Jak je uvedeno výše, tento součinitel představuje závislost poměru mezního únavového zatížení (P_u/P), mazání (viskozitní poměr κ) a úrovně znečištění ložiska (η_c). Hodnoty součinitele a_{SKF} lze zjistit ze čtyř diagramů v závislosti na typu ložiska jako funkci η_c (P_u/P) pro standardní ložiska SKF a ložiska řady SKF Explorer a různé hodnoty viskozitního poměru κ :

- Diagram 1:** Radiální ložiska s bodovým stykem, str. 54.
- Diagram 2:** Radiální ložiska s čárovým stykem, str. 55.
- Diagram 3:** Axíální ložiska s bodovým stykem, str. 56.
- Diagram 4:** Axíální ložiska s čárovým stykem, str. 57.

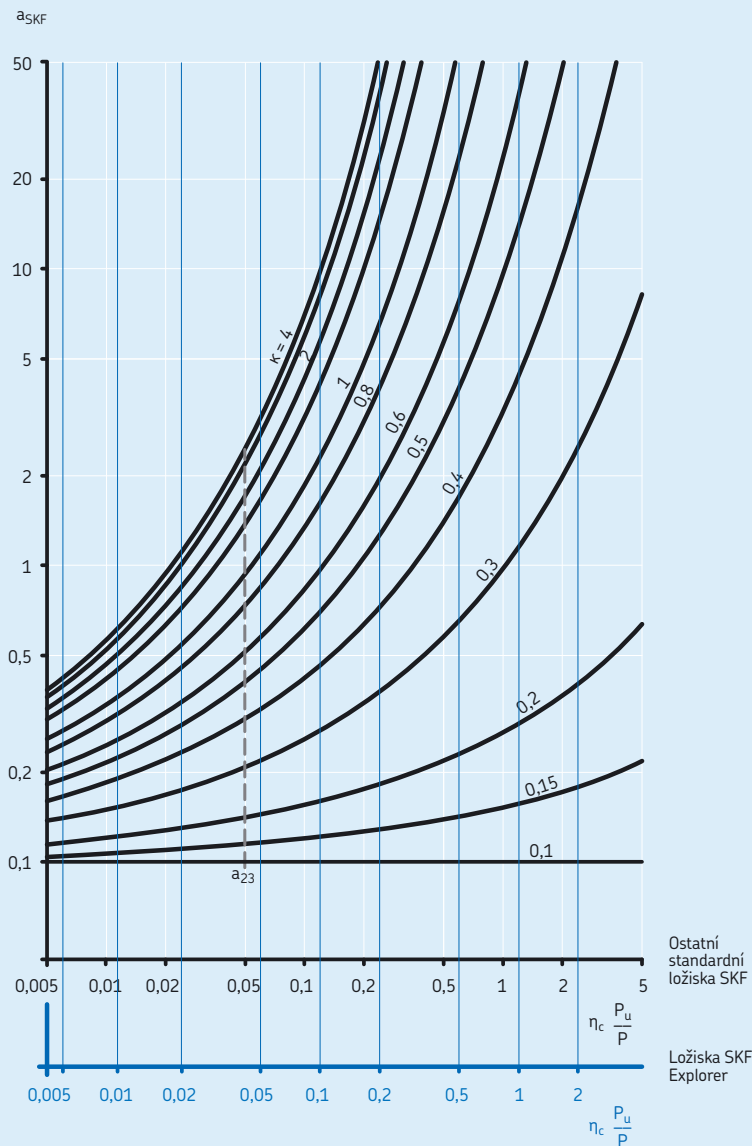
Diagramy jsou zpracovány pro typické hodnoty součinitele bezpečnosti, který se obvykle používá ve spojení s mezním únavovým zatížením jiných strojních součástí. Vzhledem ke

skutečnosti, že rovnice trvanlivosti podle SKF obsahuje určitá zjednodušení, není vhodné používat hodnoty a_{SKF} větší než 50, a to ani v případě, že jsou přesně známé provozní podmínky.

Tabulka 1

Hodnoty součinitele spolehlivosti a_1			
Spolehlivost %	Pravděpodobnost havárie n %	Trvanlivost podle SKF L_{nm}	Součinitel a_1
90	10	L_{10m}	1
95	5	L_{5m}	0,62
96	4	L_{4m}	0,53
97	3	L_{3m}	0,44
98	2	L_{2m}	0,33
99	1	L_{1m}	0,21

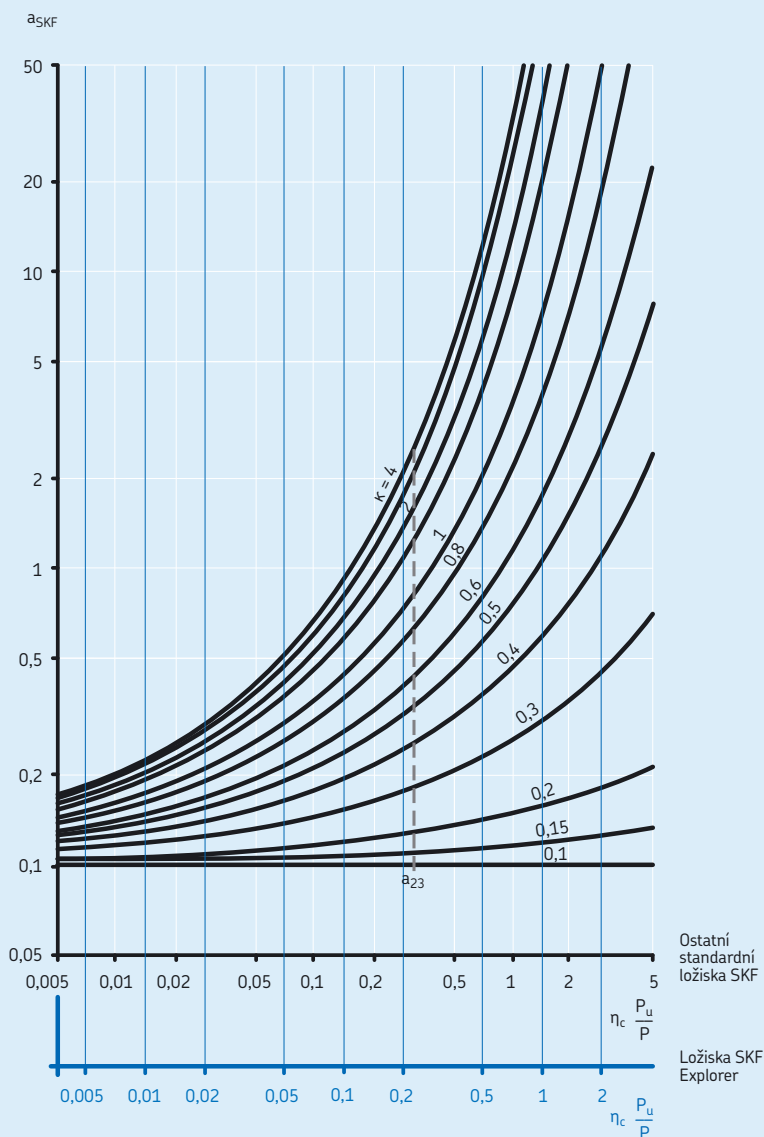
Součinitel a_{SKF} pro radiální ložiska s bodovým stykem



Jestliže $\kappa > 4$, zvolte křivku pro $\kappa = 4$.

Jestliže hodnota $\eta_c (P_u/P)$ se blíží k nule, a_{SKF} se volí 0,1 pro všechny hodnoty κ .

Přerušovaná čára označuje polohu staré stupnice $a_{23}(\kappa)$ kde $a_{SKF} = a_{23}$.

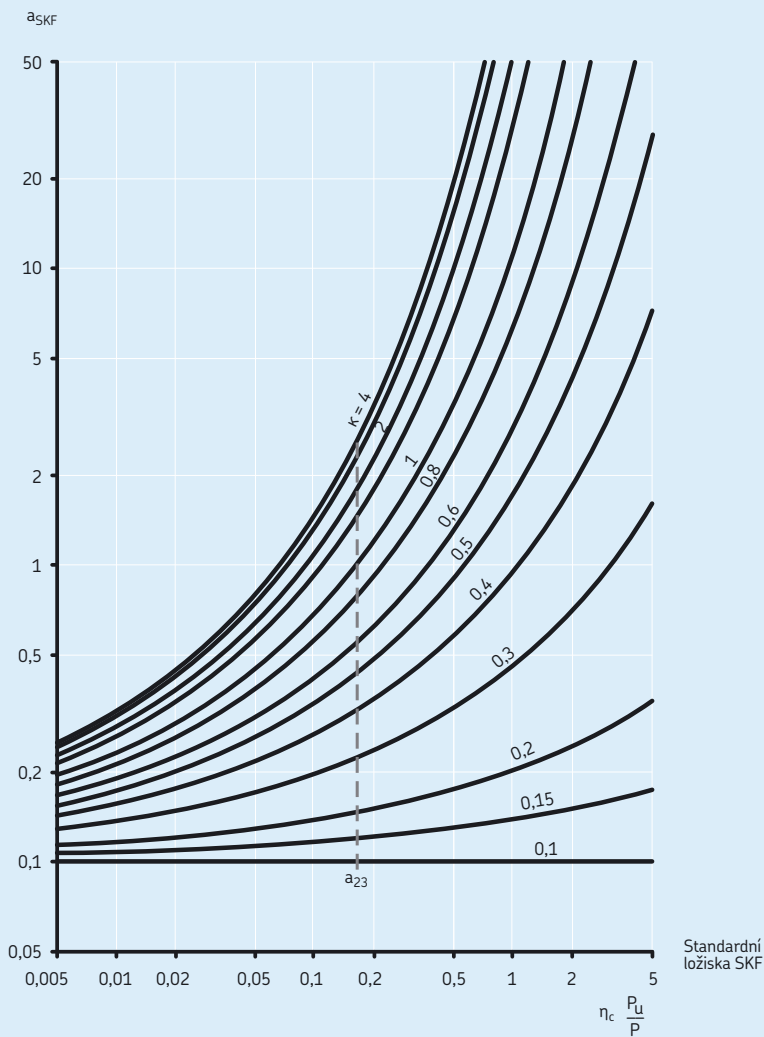
Součinitel a_{SKF} pro radiální ložiska s čárovým stykem

Jestliže $\kappa > 4$, zvolte křivku pro $\kappa = 4$.

Jestliže hodnota $\eta_c (P_u/P)$ se blíží k nule, a_{SKF} se volí 0,1 pro všechny hodnoty κ .

Přerušovaná čára označuje polohu staré stupnice $a_{23}(\kappa)$, kde $a_{SKF} = a_{23}$.

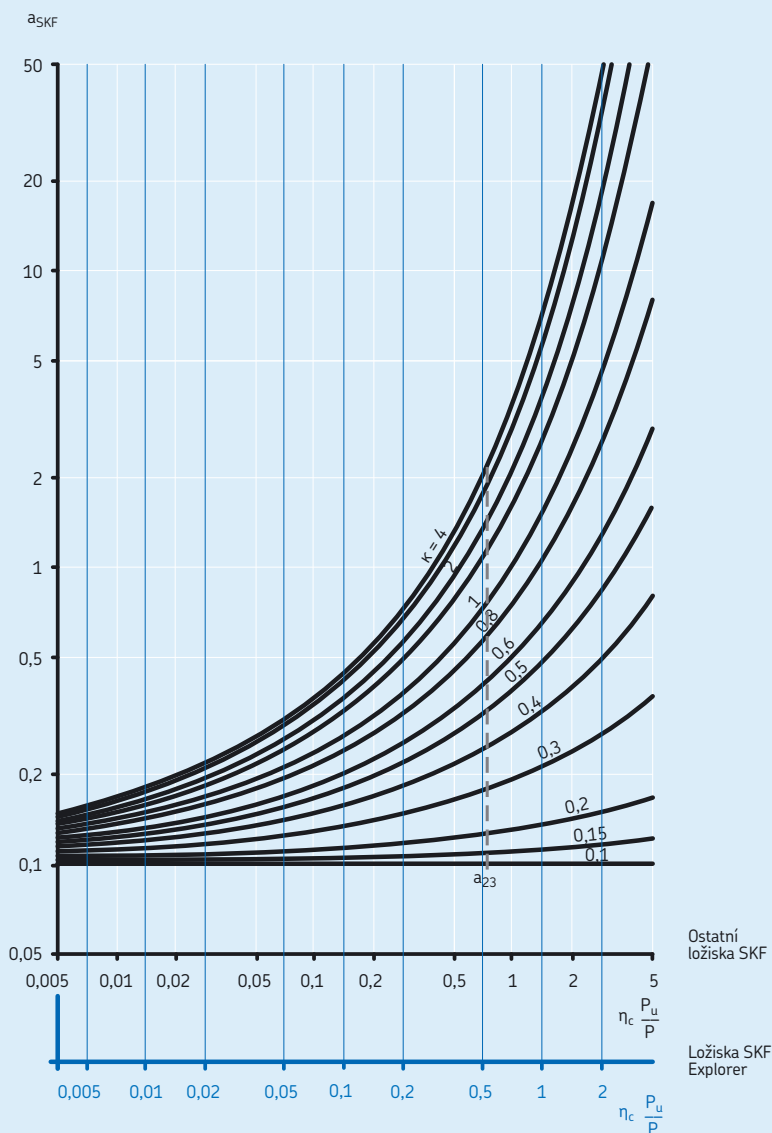
Součinitel a_{SKF} pro axiální ložiska s bodovým stykem



Jestliže $\kappa > 4$, zvolte křivku pro $\kappa = 4$.

Jestliže hodnota $\eta_c (P_u/P)$ se blíží k nule, a_{SKF} se volí 0,1 pro všechny hodnoty κ .

Přerušovaná čára označuje polohu staré stupnice $a_{23}(\kappa)$, kde $a_{SKF} = a_{23}$.

Součinitel a_{SKF} pro axiální ložiska s čárovým stykem

Jestliže $\kappa > 4$, zvolte křivku pro $\kappa = 4$.

Jestliže hodnota $\eta_c (P_u/P)$ se blíží k nule, a_{SKF} se volí 0,1 pro všechny hodnoty κ .

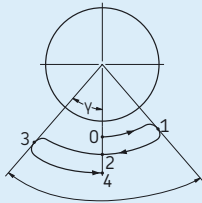
Přerušovaná čára označuje polohu staré stupnice $a_{23}(\kappa)$, kde $a_{SKF} = a_{23}$.

Výpočet součinitele a_{SKF}

Pro výpočet součinitele a_{SKF} lze rovněž využít programy SKF pro strojírenskou praxi, jako např. “SKF Interactive Engineering Catalogue”, který je k dispozici online na internetové adrese www.skf.com. Skupina SKF dále vyvinula moderní počítačové programy, které využívají rovnice trvanlivosti podle SKF přímo na úrovni napětí v místě valivého styku, a tedy umožňují zahrnout další činitele ovlivňující trvanlivost ložiska, jako např. nesouosost, průhyb hřídele a deformace tělesa (→ část “Výpočtové nástroje SKF”, která začíná na **str. 82**).

Tabulka 2

Přepočítací součinitele pro trvanlivost



Úplný kmit = 4 γ ,
tzn. z bodu 0 do bodu 4

Základní jednotky	Přepočítací koeficient		Ujeté milióny kilometrů	Milióny oscilačních cyklů ¹⁾
	Milióny otáček	Provozní hodiny		
1 milión otáček	1	$\frac{10^6}{60 n}$	$\frac{\pi D}{10^3}$	$\frac{180}{2 \gamma}$
1 provozní hodina	$\frac{60 n}{10^6}$	1	$\frac{60 n \pi D}{10^9}$	$\frac{180 \times 60 n}{2 \gamma 10^6}$
1 milion kilometrů	$\frac{10^3}{\pi D}$	$\frac{10^9}{60 n \pi D}$	1	$\frac{180 \times 10^3}{2 \gamma \pi D}$
1 milion oscilačních cyklů ¹⁾	$\frac{2 \gamma}{180}$	$\frac{2 \gamma 10^6}{180 \times 60 n}$	$\frac{2 \gamma \pi D}{180 \times 10^3}$	1

D = průměr kola vozidla, m
n = otáčky (rychlost otáčení), min^{-1}
 γ = amplituda oscilace (úhel maximální výchylky ze střední polohy), stupně

¹⁾ Neplatí pro malé amplitudy ($\gamma < 10^\circ$)

Mazání – viskozní poměr κ

Účinnost mazání je určena především mírou oddělení valivých ploch. Má-li se vytvořit vhodný mazací film, musí mazivo mít za provozní teploty určitou minimální viskozitu. Vhodnost maziva je popsána viskozním poměrem κ , který je poměrem skutečné viskozity v a viskozity v_1 , která ještě zajišťuje správné mazání, přičemž obě hodnoty jsou stanoveny pro mazivo při provozní teplotě (→ část “Volba mazacího oleje”, která začíná na **str. 252**).

$$\kappa = \frac{v}{v_1}$$

kde

κ = viskozní poměr

v = skutečná provozní viskozita maziva, mm^2/s

v_1 = viskozita, která ještě zajišťuje správné mazání, závisí na středním průměru ložiska a otáčkách, mm^2/s

Mazivo musí mít za provozní teploty určitou minimální viskozitu, aby mezi valivými plochami mohl vzniknout požadovaný mazivový film. Viskozitu v_1 , potřebnou pro zajištění správného mazání lze stanovit z **diagramu 5, str. 60**, v závislosti na středním průměru ložiska $d_m = 0,5 (d + D)$, mm, a otáčkách (rychlosti otáčení) ložiska n , min^{-1} . Tento diagram byl zrevidován s ohledem na poslední poznatky z oblasti tribologie valivých ložisek.

Jestliže provozní teplota je ze zkušenosti známá nebo může být stanovena jiným způsobem, odpovídající viskozitu při mezinárodně standardizované vztažné teplotě 40°C lze zjistit z **diagramu 6, str. 61**, anebo může být vypočítána. Diagram je vypracován pro viskozitní index 95. **Tabulka 3** podává přehled viskozitních tříd podle ISO 3448:1992 a ukazuje rozsah viskozit pro každou třídu při 40°C . Některé typy ložisek, např. soudečková ložiska, kuželíková ložiska a axiální soudečková ložiska mají za srovnatelných provozních podmínek vyšší provozní teplotu než jiné typy ložisek, např. kuličková a válečková.

Tabulka 3

Viskozitní třída ISO podle ISO 3448

Viskozitní třída	Kinematická viskozita při 40°C		
	střední	min	max
–	mm^2/s		
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11,0
ISO VG 15	15	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90,0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1 000	1 000	900	1 100
ISO VG 1 500	1 500	1 350	1 650

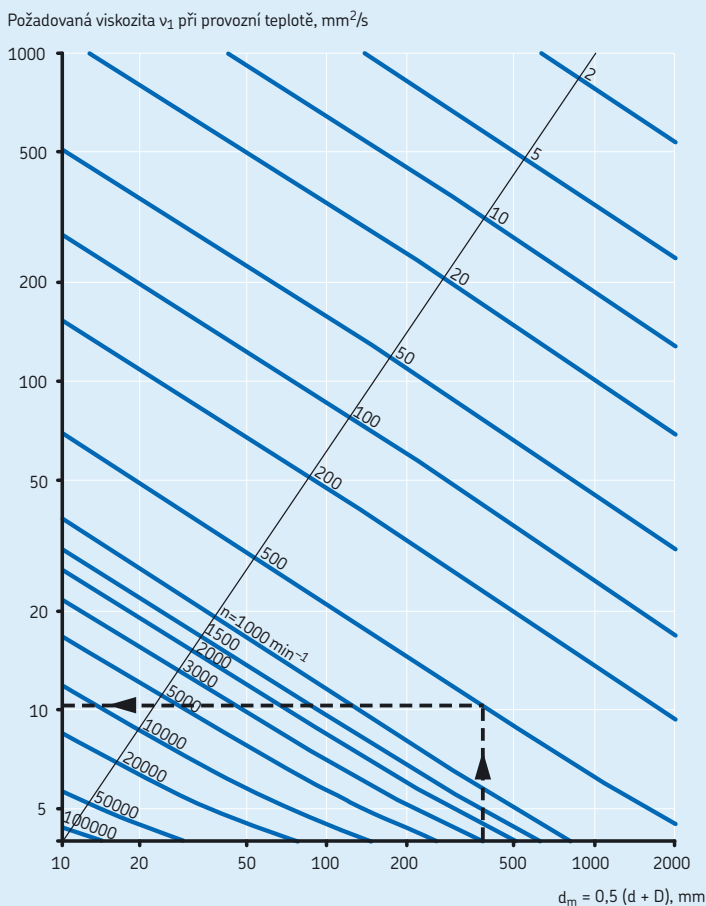
Příklad výpočtu

Ložisko s dírou o průměru $d = 340$ mm a vnějším průměru $D = 420$ mm má pracovat při otáčkách $n = 500 \text{ min}^{-1}$. Pro $d_m = 0,5 (d + D)$, $d_m = 380$ mm, lze z **diagramu 5** stanovit minimální viskozitu ν_1 potřebnou pro zajištění správného mazání při provozní teplotě. Tato hodnota je cca. $11 \text{ mm}^2/\text{s}$. Za předpokladu, že provozní teplota je 70°C , z **diagramu 6** lze zjistit, že je nutné použít mazivo podle viskozitní třídy ISO

VG 32 s viskozitou v min. $32 \text{ mm}^2/\text{s}$ při vztažené teplotě 40°C .

Diagramu 5

Určení minimální kinetické viskozity ν_1 při provozní teplotě



Zahrnutí vlivu EP přísad

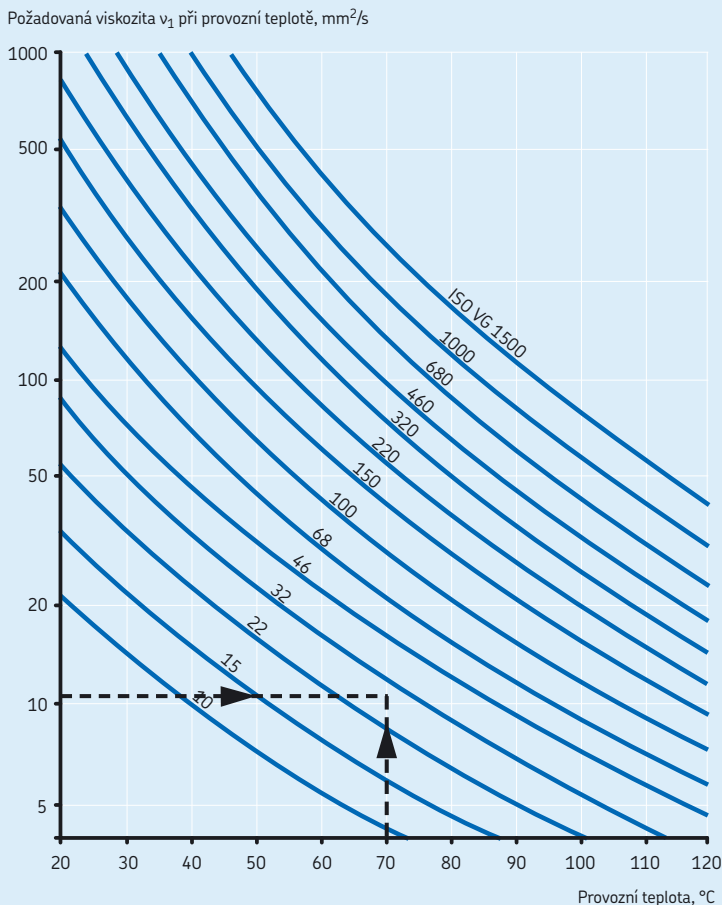
Je všeobecně známo, že některé EP přísady v mazivu mohou přispět k prodloužení provozní trvanlivosti ložiska, pokud by mazivo bez těchto přísad zajišťovalo jen nedostatečné mazání, např. pro $\kappa < 1$ jestliže součinitel znečištění je $\eta_c \geq 0,2$, podle DIN ISO 281 Addendum 1:2003. Do výpočtu lze dosadit hodnotu $\kappa = 1$, pokud je používáno mazivo s osvědčenými účinnými EP přísadami. V takovém případě musí být součinitel

a_{SKF} omezen ≤ 3 , avšak nesmí být menší než pro normální maziva.

Ve zbývajícím rozsahu lze součinitel a_{SKF} stanovit podle skutečné hodnoty κ v uložení. V případě silného znečištění, tzn. pro součinitel znečištění $\eta_c < 0,2$, je nutno ověřit vhodnost EP přísady zkouškou. Další informace o EP přísadách jsou uvedeny v části "Mazání", která začíná na **str. 229**.

Diagramu 6

Potřebná kinematická viskozita v při vztažné teplotě (klasifikace dle ISO VG)



Součinitel znečištění η_c

Tento součinitel byl zaveden, aby bylo možné vyjádřit vliv znečištění maziva na výpočet trvanlivosti ložiska. Vliv znečištění na únavové poškození ložiska závisí na mnoha činitelích, jako např. velikosti ložiska, relativní tloušťce mazivového filmu, velikosti a rozmístění pevných částic nečistot, typu nečistot (měkké, tvrdé atd.). Vliv těchto veličin na trvanlivost ložiska je velmi složitý a mnohé z nich lze jen obtížně kvantifikovat. Z toho důvodu není možné stanovit přesné hodnoty η_c , které by měly všeobecnou platnost. Alespoň některé směrné hodnoty jsou uvedeny v **tabulce 4**.

Jestliže je ložisko používáno v uloženích, která se osvědčila v praktických provozních podmínkách a v předchozích výpočtech byl použit starý

opravný součinitel a_{23} , pak odpovídající (implicitní) hodnota součinitele η_c může být stanovena tak, aby bylo dosaženo rovnosti mezi součinitelem a_{SKF} a součinitelem a_{23} , jak je vysvětleno v části “Zvláštní případ – opravný součinitel a_{23} ” na **str. 68**.

Upozorňujeme, že tento přístup pravděpodobně určí pouze přibližnou hodnotu efektivního součinitele η_c pro stupeň znečištění daného uložení. Druhý způsob, jak získat hodnotu součinitele η_c reprezentativní pro danou aplikaci, je vyčíslení úrovně znečištění maziva.

Tabulka 4

Hodnoty součinitele η_c pro různé stupně znečištění	Součinitel η_c ¹⁾ pro ložiska o průměru $d_m < 100$ mm $d_m \geq 100$ mm	
Provozní podmínky		
Velmi čisté Částice velikosti odpovídající tloušťce mazivového filmu Laboratorní podmínky	1	1
Čisté Oleř filtrovaný velmi jemným filtrem Podmínky typické pro ložiska utěsněná a namazaná na celou dobu trvanlivosti	0,8 ... 0,6	0,9 ... 0,8
Normální Oleř filtrovaný jemným filtrem Podmínky typické pro ložiska zakrytá a namazaná na celou dobu trvanlivosti	0,6 ... 0,5	0,8 ... 0,6
Mírně znečištěné Mírně znečištěné mazivo	0,5 ... 0,3	0,6 ... 0,4
Typické znečištění Podmínky typické pro ložiska bez integrovaných těsnění, hrubé filtrování, částice oděru a částice pronikající z okolí	0,3 ... 0,1	0,4 ... 0,2
Velmi znečištěné Prostředí, v němž pracuje ložisko, je velmi znečištěné a uložení je nevhodně utěsněné	0,1 ... 0	0,1 ... 0
Extrémně znečištěné V extrémně znečištěných podmínkách mohou hodnoty η_c ležet mimo uvedené rozsahy, což se projeví výraznějším zkrácením trvanlivosti, než které odpovídá výsledku zjištěnému ze vztahu pro L_{nm}	0	0

¹⁾ Rozsah η_c platí pouze pro typické pevné částice nečistot. Škodlivé účinky vody a jiných kapalin, které ovlivňují negativně trvanlivost ložisek, nejsou zahrnuty. Při velmi vysokém znečištění ($\eta_c = 0$) je havárie způsobena opotřebením, a skutečná trvanlivost ložiska může být kratší než výpočtová trvanlivost.

Klasifikace znečištění podle standardu ISO a odlučovací schopnost filtru

Standardní způsob pro klasifikaci stupně znečištění v mazacím systému je popsán v normě ISO 4406:1999. V tomto klasifikačním systému je výsledný počet pevných částic převeden na kód podle číselné stupnice (→ **tabulka 5 a diagram 7, str. 65**).

Jedním ze způsobů určení stupně znečištění ložiskového oleje je metoda mikroskopického počítání částic. Tato metoda je založena na dvou hodnotách na stupnici, které odpovídají počtu částic velikosti $\geq 5 \mu\text{m}$ a $\geq 15 \mu\text{m}$. Další metoda využívá automatické čítače částic a používá tři hodnoty stupnice, které odpovídají počtům částic velikosti $\geq 4 \mu\text{m}$, $\geq 6 \mu\text{m}$ a $\geq 14 \mu\text{m}$. Klasifikace stupně znečištění uvádí tři hodnoty na stupnici.

Tabulka 5

Rozdělení podle ISO – přiřazení hodnot na stupnici

Počet částic na 1 ml oleje přes		Hodnota na stupnici
včetně		
2 500 000		> 28
1 300 000		28
640 000	2 500 000	27
320 000	1 300 000	26
160 000	640 000	25
	320 000	24
80 000	160 000	24
40 000	80 000	23
20 000	40 000	22
10 000	20 000	21
5 000	10 000	20
2 500	5 000	19
1 300	2 500	18
640	1 300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2,5	5	9
1,3	2,5	8
0,64	1,3	7
0,32	0,64	6
0,16	0,32	5
0,08	0,16	4
0,04	0,08	3
0,02	0,04	2
0,01	0,02	1
0,00	0,01	0

Typickými příklady klasifikace úrovně znečištění mazacího oleje jsou -/15/12 (A) či 22/18/13 (B), jak ukazuje **diagram 7 na str. 65**.

Příklad A ukazuje, že olej obsahuje 160 až 320 částic $\geq 5 \mu\text{m}$ a 20 až 40 částic $\geq 15 \mu\text{m}$ na mililitr oleje. Mazací oleje by měly být v ideálním případě stále filtrovány, avšak použití filtračního systému je otázkou dosažení optimálního vztahu mezi vyššími náklady a zvýšením provozního výkonu ložiska.

Odlučovací schopnost je měřítkem účinnosti filtru. Účinnost filtrů je definována jako odlučovací schopnost neboli redukční součinitel β , který závisí na dané velikosti částice. Čím je vyšší hodnota β tím má filtr vyšší účinnost při oddělování částic určité velikosti. Z toho důvodu je nutno vzít do úvahy částici určité velikosti a hodnotu β , která je vyjádřena jako vztah mezi počtem určitých částic před filtrací a po filtraci. Odlučovací schopnost lze vypočítat podle následujícího vztahu

$$\beta_x = \frac{n_1}{n_2}$$

kde

β_x = odlučovací schopnost pro částice stanovené velikosti x

x = velikost částice, μm

n_1 = počet částic na jednotku objemu (100 ml) větších než x , před průchodem filtrem

n_2 = počet částic na jednotku objemu (100 ml) větších než x , po průchodu filtrem.

Upozornění

Odlučovací schopnost β platí pouze pro jednu velikost částice v μm , která je uvedena jako index, např. β_3 , β_6 , β_{12} , atd. Např. odlučovací schopnost " $\beta_6 = 75$ " znamená, že filtrem projde pouze 1 částice ze 75 částic velikosti $6 \mu\text{m}$ nebo větších.

Stanovení η_c jestliže je známý stupeň znečištění

Jestliže při mazání olejem je známý stupeň znečištění oleje neboť byl zjištěn buď počítáním pod mikroskopem, automatickým čítačem podle ISO 4406:1999 či nepřímo na základě odlučovací schopnosti filtru použitého v systému oběhového mazání, lze tento údaj použít pro stanovení součinitele znečištění η_c . Upozorňujeme, že η_c nelze určit pouze na základě úrovně znečištění oleje. Závisí především na mazání, tzn. na viskozním poměru κ a velikosti ložiska. Tato část uvádí zjednodušený postup podle DIN ISO 281 Addendum 4:2003 pro výpočet součinitele η_c pro dané uložení. Podle kódu znečištění oleje (nebo odlučovací schopnosti daného filtru) je stanoven součinitel η_c v závislosti na středním průměru ložiska $d_m = 0,5 (d + D)$, mm, a viskozním poměru κ ložiska (→ **diagramy 8 a 9, str. 66**).

Diagramy 8 a 9 uvádějí typické hodnoty součinitele η_c pro nucené oběhové mazání, různé stupně filtrace oleje a kódy úrovně znečištění oleje. Podobné kódy úrovně znečištění lze použít pro uložení, v nichž olejová lázeň v podstatě nevykazuje zvýšení počtu částic nečistot v systému. Na druhé straně, pokud počet částic v olejové lázni v průběhu doby stále vzrůstá z důvodů nadměrného opotřebení nebo pronikání nečistot, je nutné tento stav vyjádřit volbou součinitele η_c používaného pro mazání olejovou lázní, jak je uvedeno DIN ISO 281 Addendum 4:2003.

Pro mazání plastickým mazivem lze rovněž stanovit η_c podobným způsobem, ačkoli znečištění lze stanovit obtížně a je proto definováno pouze zjednodušeným způsobem a to kvalitativně.

Diagramy 10 a 11, str. 67, uvádějí typické hodnoty součinitele η_c pro mazání plastickým mazivem za podmínek extrémní čistoty a při normální čistotě.

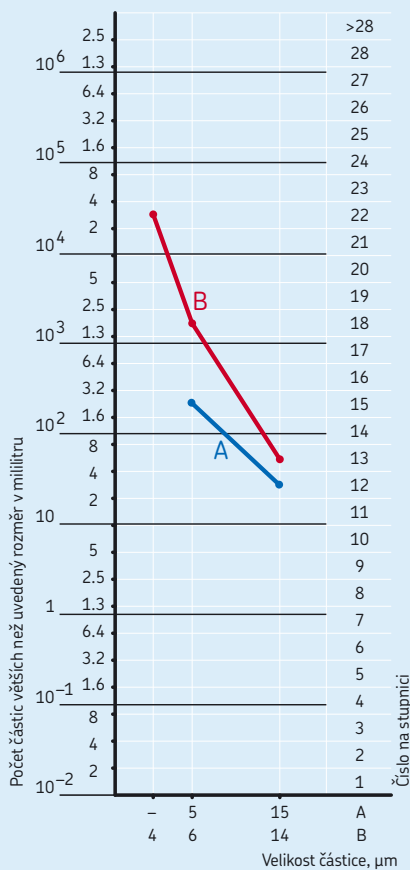
Další stupně znečištění pro mazání oběhem oleje, olejovou lázní a plastickým mazivem jsou uvedeny v DIN ISO 281 Addendum 4:2003 nebo je sdělí technicko-konzultační služby SKF.

Následující příklad ukazuje, jak velký vliv má znečištění na únavovou trvanlivost. Několik kuličkových ložisek s a bez těsnění 6305 bylo zkoušeno ve vysoce znečištěném prostředí (převodovka s velkým počtem částic otěru). V průběhu zkoušek nedošlo k poškození ložisek s těsněním a testy byly přerušeny z praktických důvodů, jakmile tato ložiska běžela alespoň tři-

četkrát déle než ložiska bez těsnění. Trvanlivost ložisek bez těsnění se rovnala 0,1 výpočtové trvanlivosti L_{10} , což odpovídá součiniteli $\eta_c = 0$ jak je uvedeno v **tabulce 4, str. 62**.

Diagramy 1 až 4, které začínají na **str. 54**, dokazují velkou důležitost čistoty maziva tím, jak prudce klesají hodnoty součinitele a_{SKF} s klesajícími hodnotami součinitele η_c . Při použití ložisek s integrovaným těsněním je v podstatě zamezeno znečištění ložisek.

Klasifikace a příklad počítání částic podle ISO



A = počítání částic mikroskopem (-/15/12)
 B = automatický čítač částic (22/18/13)

Diagram 8

Součinitel znečištění η_c pro
 – oběhové olejové mazání
 – stupeň znečištění pevnými částicemi -/15/12 podle ISO 4406:1999
 – odlučovací schopnost $\beta_{12} = 200$

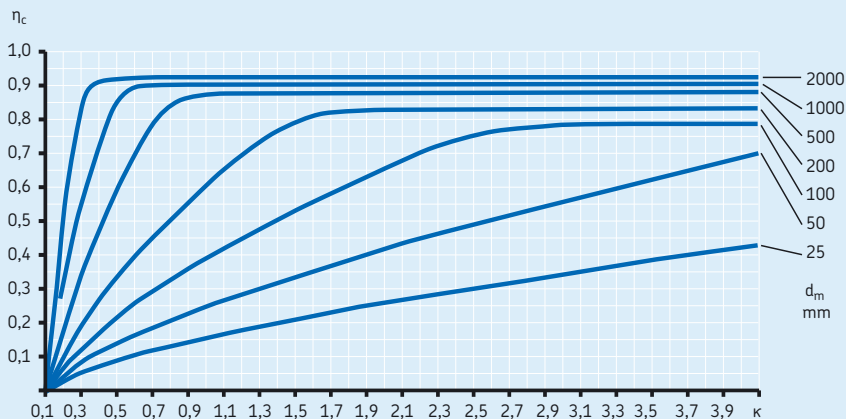


Diagram 9

Součinitel znečištění η_c pro
 – oběhové olejové mazání
 – stupeň znečištění pevnými částicemi -17/14 podle ISO 4406:1999
 – odlučovací schopnost $\beta_{25} = 75$

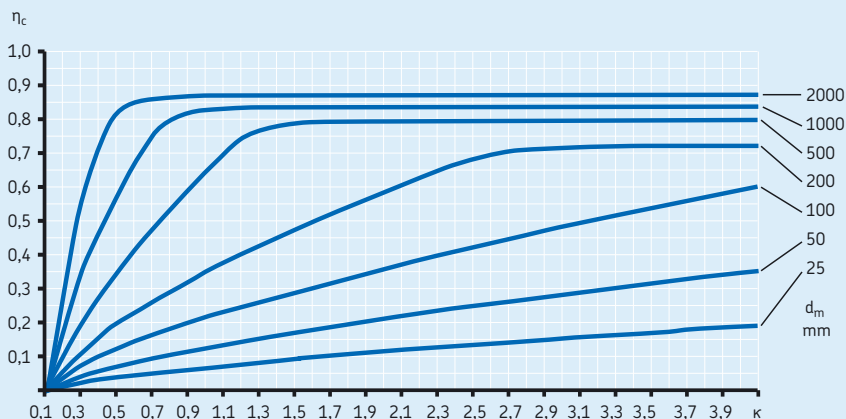


Diagram 10

Součinitel znečištění η_c pro mazání plastickým mazivem, při extrémní čistotě

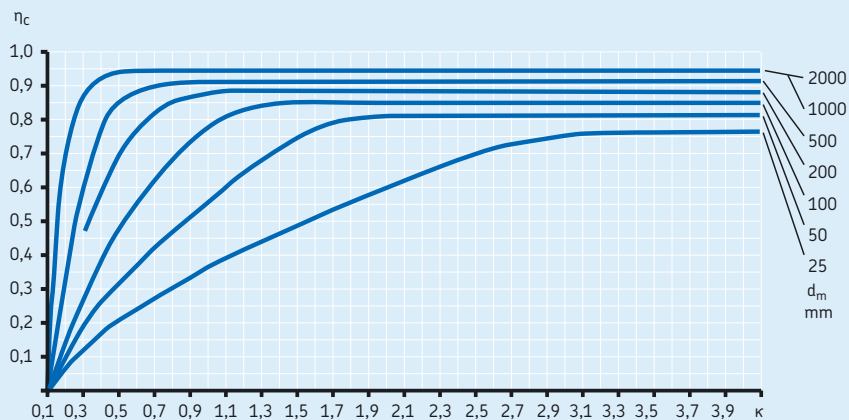
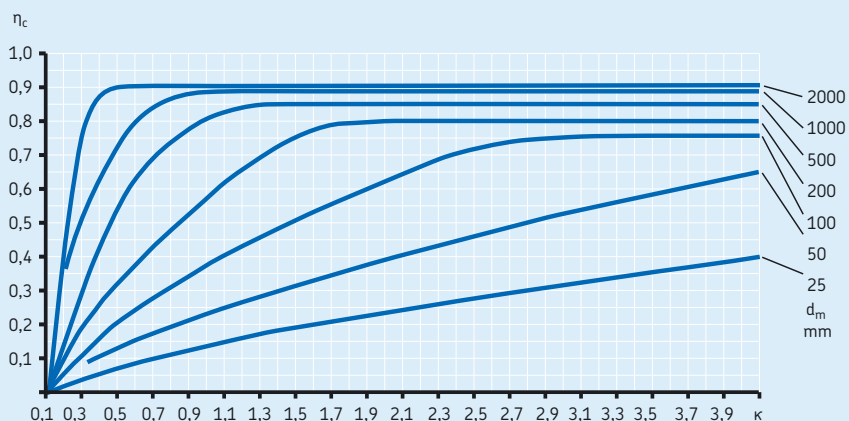


Diagram 11

Součinitel znečištění η_c pro mazání plastickým mazivem, při normální čistotě



Zvláštní případ – opravný součinitel a_{23}

Ve starších katalogích SKF je do rovnice základní trvanlivosti zaveden součinitel a_{23} , který zahrnuje vliv materiálu a maziva. Tento součinitel zavedla SKF v roce 1975.

V ISO 281:1990/Amd 2:2000 je uveden odkaz na tento součinitel pro výpočet trvanlivosti s tím, že se jedná o zvláštní případ obecnějšího součinitele a_{SKF} . Součinitel a_{23} zahrnuje určitou hodnotu “podílu znečištění a zatížení” $[\eta_c (P_u/P)]_{23}$, která je uvedena v diagramech pro součinitel a_{SKF} . Vzhledem k tomu, že součinitel a_{23} závisí pouze na viskozním poměru κ , stupnice a_{23} je zavedena do křivek κ v **diagramech 1 až 4**, které začínají na **str. 54**, pro součinitel a_{SKF} v bodě, v němž $\eta_c (P_u/P) = [\eta_c (P_u/P)]_{23}$. Součinitel znečištění η_c tedy vychází

$$\eta_c = [\eta_c (P_u/P)]_{23} / (P_u/P)$$

Poloha bodu, v němž platí $\eta_c (P_u/P) = [\eta_c (P_u/P)]_{23}$, je označena přerušovanou čarou, a hodnoty jsou uvedeny v **tabulce 6** pro ložiska SKF ve standardním provedení i pro ložiska třídy SKF Explorer. Např. pro radiální kuličková ložiska ve standardním provedení je odpovídající η_c

$$\eta_c = \frac{0,05}{P_u/P}$$

V bodě “poměr znečištění-zatížení” $[\eta_c (P_u/P)]_{23} = 0,05$ v **diagramu 1, str. 54**, $a_{SKF} = a_{23}$ a a_{23} lze odečíst přímo z osy a_{SKF} a stupnice κ přerušované čáry. Trvanlivost může být pak vypočítána podle zjednodušeného vztahu

$$L_{nm} = a_1 a_{23} L_{10}$$

kde

L_{nm} = trvanlivost podle SKF (při spolehlivosti 100 – n %), milióny otáček

L_{10} = základní trvanlivost (při 90 % spolehlivosti), milióny otáček

a_1 = součinitel spolehlivosti (→ **tabulka 1, str. 53**)

a_{23} = opravný součinitel zahrnující vliv materiálu a maziva, pro $\eta_c (P_u/P) = [\eta_c (P_u/P)]_{23}$ (→ **diagramy 1 až 4**, které začínají na **str. 54**)

Tabulka 6

Poměr znečištění – zatížení $[\eta_c (P_u/P)]_{23}$

Typ ložiska	Poměr $[\eta_c (P_u/P)]_{23}$	
	pro standardní ložiska SKF	pro ložiska SKF Explorer
Radiální ložiska		
Ložiska s bodovým stykem	0,05	0,04
Ložiska s čárovým stykem	0,32	0,23
Axiální ložiska		
Ložiska s bodovým stykem	0,16	–
Ložiska s čárovým stykem	0,79	0,56

Použití opravného součinitele a_{23} zahrnuje v praxi napěťové podmínky charakterizované hodnotou $\eta_c (P_u/P) = [\eta_c (P_u/P)]_{23}$. Jestliže skutečná hodnota $\eta_c (P_u/P)$ je nižší nebo vyšší než hodnota $[\eta_c (P_u/P)]_{23}$, pak i trvanlivost bude buď vyšší nebo nižší. Jinak řečeno – případy, kdy je ložisko v uložení vystaveno působení velkého zatížení a zvýšenému znečištění nebo jestliže na ložisko v čistším prostředí působí malé zatížení, nejsou v součiniteli a_{23} dobře reprezentovány.

U standardních ložisek, která pracují při zatížení C/P cca. 5, bude hodnotě a_{23} odpovídat součinitel znečištění η_c 0,4 až 0,5. Jestliže skutečná čistota uložení je nižší než normální úroveň, použití součinitele a_{23} se projeví nadhodnocenou trvanlivostí ložiska. Z toho důvodu SKF doporučuje používat pouze postup se součinitelem a_{SKF} , který zajišťuje spolehlivou volbu velikosti ložiska.

Vztah mezi součiniteli a_{23} a a_{SKF} je užitečný při přechodu ze součinitele a_{23} , který byl použit při návrhu uložení, na všeobecnější součinitel a_{SKF} . Je samozřejmé, že z uložení, která pracovala uspokojivě a byla původně navržena na základě výpočtu se součinitelem a_{23} , lze jednoduše odvodit ekvivalentní součinitel a_{SKF} .

V praxi to znamená zahrnutí součinitele znečištění η_c uložení založeného na "poměru znečištění-zatížení" $[\eta_c (P_u/P)]_{23}$, který je uveden v **tabulce 6**. Součinitel η_c odvozený tímto způsobem představuje jednoduchou aproximaci popř. skutečný součinitel η_c . První odhad součinitele η_c může být dále zlepšen zavedením údaje o čistotě oleje, jak je uvedeno v části "Stanovení η_c , jestliže je známý stupeň znečištění", která začíná na **str. 64**. Viz rovněž příklad výpočtu 2 na **str. 78**.

Výpočet trvanlivosti za proměnných provozních podmínek

V uloženích, v nichž na ložisko působí zatížení, jehož velikost a směr se mění v průběhu času v závislosti na otáčkách, teplotě, mazání a úrovní znečištění, nelze trvanlivost ložiska počítat přímo a je nutno nejprve určit ekvivalentní zatížení odpovídající proměnnému zatížení. Vzhledem ke složitosti celého systému není snadné stanovit ekvivalentní zatížení a výpočet není v žádném případě jednoduchý.

Z toho důvodu je nutné v případě proměnných provozních podmínek nahradit zatěžovací spektrum nebo pracovní cyklus uložení omezeným počtem jednoduchých zatěžovacích případů (→ **diagram 12**). Jestliže trvale působí proměnné zatížení, lze stanovit jednotlivé velikosti zatížení a zatěžovací spektrum nahradit histogramem, který se bude skládat ze sloupců konstantního zatížení, přičemž každý sloupec bude představovat určité procento neboli časový úsek provozu uložení. Upozorňujeme, že velká a střední zatížení zkrátí trvanlivost ložiska rychleji než malá zatížení. Z toho důvodu je nutné řádně zaznamenat rázové a špičkové zatížení do zatěžovacího diagramu, i když se tato zatížení mohou vyskytovat jen zřídka a jsou omezena pouze na několik otáček.

V každém pracovním intervalu lze zatížení ložiska a provozní podmínky nahradit střední konstantní hodnotou. Počet provozních hodin nebo otáček v každém pracovním intervalu představuje část trvanlivosti odpovídající určitému zatížení. N_1 označíme počet otáček, v jejichž průběhu působí zatížení P_1 , a N označíme celkovou trvanlivost uložení v otáčkách. Dílčím úsekům trvanlivostního cyklu ložiska $U_1 = N_1/N$ a příslušnému zatížení P_1 , odpovídá dílčí výpočtová trvanlivost L_{10m1} . Za proměnných provozních podmínek lze trvanlivost ložisek vypočítat podle vztahu

$$L_{10m} = \frac{1}{\frac{U_1}{L_{10m1}} + \frac{U_2}{L_{10m2}} + \frac{U_3}{L_{10m3}} + \dots}$$

kde

L_{10m}

= trvanlivost podle SKF (při 90 % spolehlivosti), milióny otáček

$L_{10m1}, L_{10m2}, \dots$ = dílčí trvanlivost podle SKF (při 90 % spolehlivosti) při konstantních podmínkách 1, 2, ..., milióny otáček

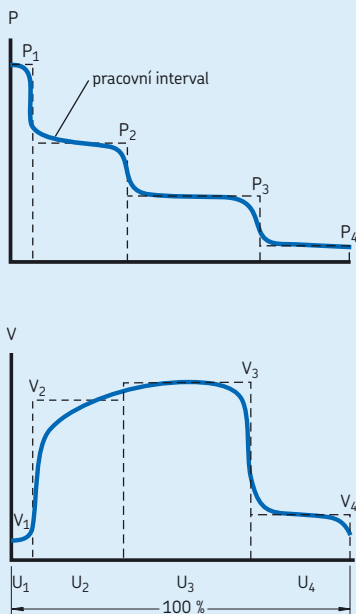
$U_1, U_2, \dots$ = dílčí úseky při působícím zatížení 1, 2, ...

Poznámka: $U_1 + U_2 + \dots$

$U_n = 1$

Použití tohoto postupu výpočtu závisí především na tom, zda jsou k dispozici reprezentativní diagramy zatížení pro dané uložení. Takové informace lze rovněž získat z typických provozních podmínek nebo standardních pracovních cyklů, které jsou běžné pro daný typ uložení.

Diagram 12



Vliv provozní teploty

Rozměry ložiska se za provozu mění v důsledku přeměny struktury materiálu. Tyto přeměny jsou ovlivněny teplotou, časem a napětím.

Nepřípustným změnám rozměrů za provozu z důvodů přeměny struktury lze zabránit speciálním procesem tepelného zpracování (stabilizací) (→ **tabulka 7**).

V závislosti na typu ložiska je pro standardní ložiska vyrobená z prokalitelných ocelí a indukčně kalených ocelí stanovena doporučená maximální provozní teplota, která se pohybuje mezi 120 a 200 °C. Maximální provozní teplota závisí přímo na procesu tepelného zpracování. Kde je to možné, jsou podrobnější informace uvedeny v úvodním textu k příslušné tabulkové části.

Jestliže běžná provozní teplota uložení je vyšší než doporučená maximální teplota, je vhodné použít ložisko tepelně stabilizované pro vyšší teploty.

V uloženích, kde ložiska pracují nepřetržitě při vyšších teplotách, může být potřebné upravit dynamickou únosnost.

Další informace poskytnou technicko-konzultační služby SKF.

Uspokojivá funkce ložisek při vysokých teplotách rovněž závisí na tom, zda si zvolené mazivo uchová mazací vlastnosti, zda těsnění a klece jsou vyrobeny z vhodných materiálů atd.

(→ část "Mazání", která začíná na **str. 229**, a "Materiály valivých ložisek", která začíná na **str. 138**).

Pokud jsou požadována ložiska, která mají pracovat při vysokých teplotách, kdy je zapotřebí vyšší stabilizace než S1, je třeba se obrátit na technicko-konzultační služby SKF.

Požadovaná trvanlivost

Při stanovení velikosti ložiska je vhodné ověřit vypočítanou trvanlivost podle SKF s doporučenou trvanlivostí pro danou aplikaci, pokud je k dispozici. Trvanlivost zpravidla závisí na typu stroje a na požadované provozní trvanlivosti, jakož i provozní spolehlivosti. Není-li možné využít předcházející zkušenosti, lze použít doporučené hodnoty uvedené v **tabulkách 8 a 9, str. 72**.

Tabulka 7

Rozměrová stabilita	
Stabilizace	Stabilizace do
SN	120 °C
S0	150 °C
S1	200 °C
S2	250 °C
S3	300 °C
S4	350 °C

Určení velikosti ložiska

Tabulka 8

Orientační hodnoty trvanlivosti pro různé typy strojů	
Typ stroje	Doporučená trvanlivost Provozní hodiny
Zařízení pro domácnost, zemědělské stroje, přístroje, technická zařízení pro lékařské účely	300 ... 3 000
Stroje pro krátkodobý nebo přerušovaný provoz: elektrické ruční nářadí, dílenské kladkostroje, stavební stroje a zařízení	3 000 ... 8 000
Stroje s vysokou provozní spolehlivostí pro krátkodobý nebo přerušovaný provoz: výtahy, jeřáby pro balené zboží nebo svázané sudy, atd.	8 000 ... 12 000
Stroje pro osmihodinový denní provoz, které však nejsou vždy plně využívány: ozubené převody pro všeobecné použití, elektromotory pro průmyslové použití, drtiče	10 000 ... 25 000
Stroje pro osmihodinový denní provoz, které jsou plně využívány: obráběcí stroje, dřevoobráběcí stroje, stroje pro všeobecné strojírenství, jeřáby pro sypké materiály, ventilátory, pásové dopravníky, polygrafická zařízení, separátory a odstředivky	20 000 ... 30 000
Stroje pro nepřetržitý provoz: převodovky válcovacích stolic, středně velké elektromotory, kompresory, důlní výtahy, čerpadla, textilní stroje	40 000 ... 50 000
Vybavení větrných elektráren – hlavní hřídel, otoč, převodovka, ložiska generátoru	30 000 ... 100 000
Vodárenské stroje, rotační pece, slaňovací stroje, převodová ústrojí zaoceánských lodí	60 000 ... 100 000
Velké elektromotory, elektrárenská zařízení, důlní čerpadla, důlní ventilátory, ložiska hlavních hřídelí zaoceánských lodí	> 100 000

Tabulka 9

Orientační hodnoty trvanlivosti pro nápravová ložiska a ložiskové jednotky pro kolejová vozidla	
Typ vozidla	Doporučená trvanlivost Miliony km
Nákladní vagóny podle specifikace UIC, trvale provozované do maximálního nápravového zatížení	0,8
Vozidla pro hromadnou dopravu: příměstské vlaky, vozy metra, lehká kolejová vozidla a tramvaje	1,5
Osobní vagóny pro dálkovou dopravu	3
Dieslové a elektrické vlakové jednotky provozované na hlavních tratích	3 ... 4
Dieslové a elektrické lokomotivy provozované na hlavních tratích	3 ... 5

Dynamické zatížení ložiska

Výpočet dynamického zatížení ložiska

Zatížení, působící na ložisko je možné stanovit na základě platných zákonů mechaniky, jsou-li známy nebo lze-li určit vnější síly (např. síly z přenášeného výkonu, technologické síly, setrvačné síly). Při výpočtu složek zatížení působícího na jedno ložisko se pro jednoduchost předpokládá, že hřídel je nosník spočívající na tuhých podpěrách, na něž nepůsobí momenty. Rovněž se neuvažuje s pružnými deformacemi ložiska, ložiskového tělesa ani rámu stroje a ani s momenty vyvolanými v ložisku průhybem hřídele.

Je nutné provést tato zjednodušení, pokud se má provést kontrolní výpočet uložení pomocí běžně dostupných prostředků, např. kapesní kalkulačkou. Standardizované metody výpočtu únosností ložisek a ekvivalentního zatížení ložisek jsou založeny na podobných předpokladech.

Zatížení ložisek lze vypočítat na základě teorie pružnosti bez předchozích zjednodušení, avšak takový postup vyžaduje použití komplexních počítačových programů. V těchto programech jsou ložiska, hřídele a tělesa považovány za pružné prvky systému.

Vnější síly vyvolané např. vlastní hmotností hřídele a dílů na ni namontovaných či hmotností vozidla a setrvačnými silami, jsou buď známé nebo je možné je vypočítat. Naproti tomu technologické síly (válcovací síly, řezné síly u obráběcích strojů apod.), rázové či přídatné dynamické síly, které jsou způsobeny např. nevyvážeností, se dají většinou zjistit jen odhadem na základě zkušeností s obdobnými stroji či uloženími.

Ozubené převody

V ozubených převodech lze vypočítat teoretické síly, působící v ozubení, z přenášeného výkonu a z konstrukčních vlastností ozubení. Přesto však zde působí i přídatná dynamická zatížení, vznikající buď přímo v ozubení nebo vyvolaná pohonem či přenosem výkonu. Přídatné dynamické síly jsou způsobeny geometrickými chybami tvaru ozubení a nevyvážeností rotujících součástí. V současné době jsou již ozubená kola kvůli nízké hlučnosti vyráběna s vysokou přesností, a proto tyto síly jsou velmi malé a lze je při výpočtu ložisek zanedbat.

Přídatné dynamické síly přenášené ze strojů připojených k převodu mohou být určeny pouze tehdy, jsou-li známé provozní podmínky. Jejich vliv na trvanlivost ložisek je zahrnut v "provozním"

součiniteli, který je založen na rázových silách a účinnosti převodu. Hodnoty tohoto součinitele pro různé provozní podmínky jsou uvedeny v dokumentaci výrobců převodů.

Řemenové převody

Při výpočtu sil v ložiscích uložení řemenových převodů je třeba počítat s efektivní tažnou silou v řemenu (obvodová síla), která závisí na přenášeném krouticím momentu. Obvodová síla se vynásobí součinitelem, jehož velikost je určena typem řemene, jeho napnutím a přídatnými dynamickými silami. Údaje jsou obvykle uvedeny v podkladech výrobců řemenů. Pokud však nejsou dostupné, lze použít následující hodnoty

- ozubené řemeny = 1,1 až 1,3
- klínové řemeny = 1,2 až 2,5
- ploché řemeny = 1,5 až 4,5

Vyšší hodnoty platí pro malé vzdálenosti hřídelí, těžký provoz či rázová zatížení anebo pro velké napnutí řemene.

Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska

Jestliže vypočítané zatížení ložiska F , určené výše uvedeným postupem, odpovídá podmínkám definice základní dynamické únosnosti C , tj. velikost a směr zatížení se nemění a působí u radiálních ložisek čistě radiálně a u axiálních ložisek čistě axiálně v ose ložiska, pak $P = F$ a vypočtené zatížení je možné přímo dosadit do rovnice trvanlivosti.

Ve všech ostatních případech musí být nejprve stanoveno ekvivalentní dynamické zatížení ložiska. Toto zatížení je definováno jako hypotetické, neproměnné zatížení působící u radiálních ložisek v radiálním směru a u axiálních ložisek v axiálním směru v ose ložiska, které má na trvanlivost stejný vliv jako skutečná zatížení působící na ložisko (→ **obr. 2**).

Radiální ložiska jsou často současně zatížena radiálním a axiálním zatížením. Je-li velikost a směr výsledného zatížení konstantní, vypočítá se ekvivalentní dynamické zatížení ze základní rovnice

$$P = X F_r + Y F_a$$

kde

P = ekvivalentní dynamické zatížení, kN

F_r = skutečné radiální zatížení, kN

F_a = skutečné axiální zatížení, kN

X = součinitel radiálního zatížení ložiska

Y = součinitel axiálního zatížení ložiska

U jednořadých radiálních ložisek ovlivňuje přídatná axiální síla ekvivalentní zatížení P tehdy, jestliže poměr F_a/F_r přesáhne určitou mezní

hodnotu e . U dvouřadých radiálních ložisek mají na ekvivalentní zatížení vliv i malé axiální síly.

Stejná základní rovnice platí i pro axiální soudečková ložiska, která mohou přenášet jak axiální, tak radiální zatížení. Pro axiální ložiska, která přenášejí pouze axiální síly, tzn. axiální kuličková ložiska a axiální válečková ložiska, se může rovnice zjednodušit za předpokladu, že axiální síla působí v ose ložiska

$$P = F_a$$

Veškeré informace a údaje potřebné pro výpočet ekvivalentního dynamického zatížení jsou uvedeny v textové části a v tabulkové části příslušného typu ložiska.

Proměnné zatížení ložiska

V provozu se často velikost zatížení mění. Pro výpočet trvanlivosti je třeba použít vztah pro proměnné provozní podmínky (→ **str. 70**).

Střední zatížení v průběhu pracovního intervalu

V každém zatěžovacím intervalu se mohou provozní podmínky poněkud lišit od jmenovité hodnoty. Za předpokladu, že provozní podmínky, tj. otáčky a směr zatížení, jsou poměrně konstantní a velikost zatížení se neustále mění v rozsahu od minimální hodnoty $F_{\min}$ a do maximální hodnoty $F_{\max}$ (→ **diagram 13**), střední zatížení lze vypočítat ze vztahu

$$F_m = \frac{F_{\min} + 2 F_{\max}}{3}$$

Rotující zatížení

Jestliže se zatížení skládá, tak jako na **diagramu 14**, ze zatížení F_1 , jehož velikost a směr zůstává konstantní (např. hmotnost rotoru) a konstantního rotujícího zatížení F_2 např. nevyváženost rotoru), střední zatížení se vypočítá ze vztahu

$$F_m = f_m (F_1 + F_2)$$

Hodnoty součinitele f_m naleznete v **diagramu 15**.

Obr. 2

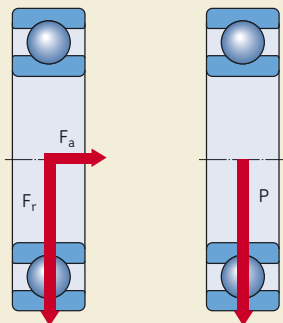


Diagram 13

Stanovení průměrné hodnoty zatížení

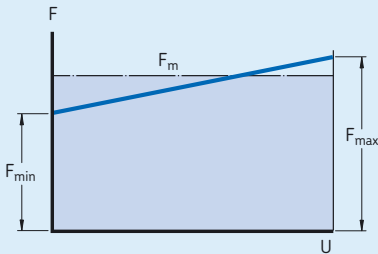


Diagram 14

Rotující zatížení

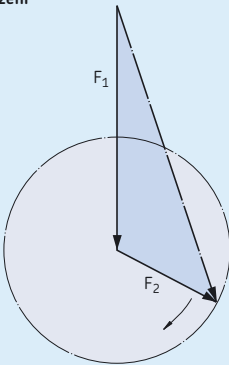
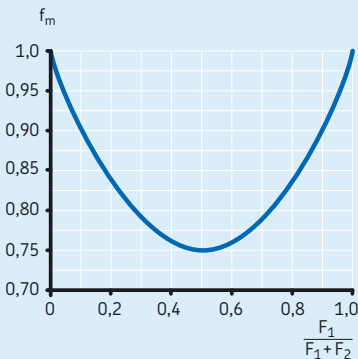


Diagram 15



Potřebné minimální zatížení

Závislost mezi zatížením a provozní trvanlivostí je méně zřetelná při působení nízkých zatížení. V takovém případě jsou rozhodující jiné mechanismy než únava materiálu.

Má-li valivé ložisko uspokojivě pracovat, musí být vždy zatíženo určitým minimálním zatížením. Základní praktická zásada říká, že ložisko s čárovým stykem by mělo být zatíženo silou, která se rovná 0,02 C, a ložisko s bodovým stykem silou odpovídající 0,01 C. Důležitost minimálního zatížení vzrůstá při velkých zrychleních v ložisku anebo v případě, že otáčky jsou vyšší než 50 % mezních otáček uvedených v tabulkové části (→ část "Otáčky a vibrace", která začíná na **str. 107**). Jestliže není možné zajistit potřebné minimální zatížení, je třeba zvážit možnost použití ložisek NoWear (→ **str. 943**).

Doporučení pro výpočet potřebného minimálního zatížení různého typu ložiska uvádí textová část zařazená před příslušnou tabulkovou částí.

Volba velikosti ložiska podle statické únosnosti

Velikost ložiska by se měla určit podle statické únosnosti C_0 a nikoli podle výpočtové trvanlivosti, pokud nastává některý z následujících případů:

- Ložisko nerotuje a působí na ně nepřetržité nebo přerušované (rázové) zatížení.
- Ložisko vykonává pomalé kývavé pohyby pod zatížením anebo se naklápí pod zatížením.
- Ložisko rotuje s velmi nízkými otáčkami ($n < 10 \text{ min}^{-1}$) a požaduje se pouze krátká trvanlivost (z rovnice trvanlivosti pro dané ekvivalentní zatížení P vychází tak nízká potřebná základní dynamická únosnost C , že takto zvolené ložisko by v provozu bylo velmi přetíženo).
- Ložisko se otáčí a kromě normálního provozního zatížení je vystaveno i působení silných rázů.

Ve všech uvedených případech závisí přípustné zatížení ložiska nikoli na únavě materiálu, nýbrž na plastické deformaci působícím stykem valivého tělesa a oběžné dráhy vyvolané zatížením. Zatížení působící na nepohyblivé se ložisko nebo na ložisko vykonávající pomalé kývavé pohyby, jakož i rázové zatížení působící na rotující ložisko může vyvolat trvalé deformace na valivých tělesech a vtisky v oběžných drahách. Vtisky mohou být rozmístěny na oběžné dráze nepravidelně anebo i pravidelně v místech odpovídajících rozeči valivých těles. Jestliže zatížení působí po několik otáček, deformace jsou rovnoměrně rozloženy po celé oběžné dráze. Plastické deformace mohou vyvolat vibrace v ložisku, hluknost a zvýšené tření. Může rovněž dojít ke zvětšení vůle v ložisku nebo změně v uložení kroužků.

Vážnost vlivu těchto změn na funkci ložiska závisí na požadavcích kladených na aplikaci. Je tedy nutné buď zabránit vzniku plastické deformace, anebo ji omezit volbou ložiska s dostatečně vysokou statickou únosností, má-li být splněn některý z následujících požadavků

- vysoká spolehlivost
- tichý chod (např. u elektromotorů)
- chod bez vibrací (např. obráběcí stroje)
- konstantní třecí moment ložiska (např. měřicí zařízení a zkušební přístroje)
- nízký rozběhový moment při zatížení (např. jeřáby).

Ekvivalentní statické zatížení ložiska

Statické zatížení složené z radiálních a axiálních složek se musí převést na ekvivalentní statické zatížení. Statickým ekvivalentním zatížením se rozumí zatížení (radiální u radiálních ložisek a axiální u axiálních ložisek), které by způsobilo stejné maximální zatížení valivého elementu v ložisku jako skutečné zatížení. Vypočítá se z rovnice

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a$$

kde

P_0 = ekvivalentní statické zatížení, kN

F_r = skutečné radiální zatížení (viz níže), kN

F_a = skutečné axiální zatížení (viz níže), kN

X_0 = součinitel radiálního zatížení ložiska

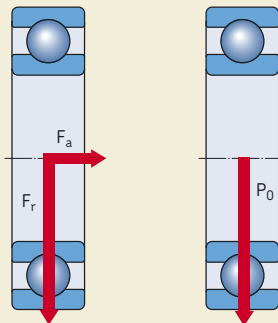
Y_0 = součinitel axiálního zatížení ložiska

Upozornění

Při výpočtu P_0 je třeba použít maximální zatížení, které na ložisko v provozu působí, přičemž radiální a axiální složku tohoto zatížení (**→ obr. 3**) je nutno dosadit do výše uvedeného vztahu. Jestliže statické zatížení působí na ložisko v různých směrech, mění se velikost těchto složek. V takových případech je třeba počítat se složkami, které představují maximální statické ekvivalentní zatížení.

Údaje potřebné pro výpočet ekvivalentního statického zatížení jsou uvedeny v textové části a tabulkové části příslušného typu ložisek.

Obr. 3



Potřebná statická únosnost

Při určování velikosti ložiska podle jeho statické únosnosti se k výpočtu požadované statické únosnosti používá součinitel statické bezpečnosti s_0 . Tento součinitel vyjadřuje vztah mezi základní statickou únosností C_0 a ekvivalentním statickým zatížením ložiska P_0 .

Potřebnou statickou únosnost C_0 lze vypočítat ze vztahu

$$C_0 = s_0 P_0$$

kde

C_0 = základní statická únosnost, kN

P_0 = ekvivalentní statické zatížení, kN

s_0 = statická bezpečnost

Tabulka 10 uvádí doporučené hodnoty součinitele statické bezpečnosti s_0 pro ložiska s bodovým a čárovým stykem, pro různé aplikace vyžadující tichý chod. Při vyšších teplotách statická únosnost ložisek klesá. Další informace budou poskytnuty na požádání.

Kontrola statické únosnosti

Pro dynamicky zatěžovaná ložiska je vhodné zkontrolovat i statickou únosnost v případě, že je známé ekvivalentní statické zatížení P_0

$$s_0 = C_0/P_0$$

Jestliže hodnota s_0 je nižší než doporučená hodnota (→ **tabulka 10**), je třeba zvolit ložisko s vyšší statickou únosností.

Tabulka 10

Orientační hodnoty součinitele statické bezpečnosti s_0								
Provozní podmínky	Rotující ložisko Požadavky na tichý chod zanedbatelné				Nepohyblivé ložisko			
	normální		vysoké		normální		vysoké	
	Bodový styk	Čárový styk	Bodový styk	Čárový styk	Bodový styk	Čárový styk	Bodový styk	Čárový styk
Klidný běh bez vibrací	0,5	1	1	1,5	2	3	0,4	0,8
Normální	0,5	1	1	1,5	2	3,5	0,5	1
Výrazné rázové zatížení ¹⁾	≥ 1,5	≥ 2,5	≥ 1,5	≥ 3	≥ 2	≥ 4	≥ 1	≥ 2

Pro axiální soudečková ložiska doporučujeme zvolit $s_0 \geq 4$

¹⁾ Jestliže není známá velikost rázového zatížení, je třeba použít hodnoty s_0 , které se rovnají přinejmenším hodnotám v tabulce. Pokud je známa přesná velikost rázového zatížení, lze použít nižší hodnoty s_0 .

Příklady výpočtu

Příklad 1

Kuličkové ložisko SKF Explorer 6309 má pracovat s otáčkami 3000 min^{-1} při konstantním radiálním zatížení $F_r = 10 \text{ kN}$. Ložisko má být mazáno olejem s kinematickou viskozitou $\nu = 20 \text{ mm}^2/\text{s}$ při normální provozní teplotě. Požadovaná spolehlivost je 90 % a podle předpokladů bude ložisko pracovat ve velmi čistém prostředí. Jaká bude základní trvanlivost a trvanlivost podle SKF?

a) Základní trvanlivost při 90 % spolehlivosti je

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$$

Z tabulkové části pro ložisko 6309 je $C = 55,3 \text{ kN}$. Vzhledem k tomu, že zatížení je čisté radiální, $P = F_r = 10 \text{ kN}$ ($\rightarrow$ "Ekvivalentní dynamické zatížení" na **str. 74**).

$$L_{10} = (55,3/10)^3$$

$$= 169 \text{ miliónů otáček}$$

nebo v provozních hodinách podle

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n} L_{10}$$

$$L_{10h} = 1\,000\,000 / (60 \times 3\,000) \times 169$$

$$= 940 \text{ provozních hodin}$$

b) Trvanlivost podle SKF pro 90 % spolehlivost je

$$L_{10m} = a_1 a_{SKF} L_{10}$$

- Vzhledem k tomu, že je požadována spolehlivost 90 %, je třeba vypočítat trvanlivost L_{10m} a $a_1 = 1$ ($\rightarrow$ **tabulka 1, str. 53**).
- Podle tabulkové části pro ložisko 6309, $d_m = 0,5 (d + D) = 0,5 (45 + 100) = 72,5 \text{ mm}$
- Z **diagramu 5, str. 60**, vychází viskozita oleje při provozní teplotě pro otáčky $3\,000 \text{ min}^{-1}$, $\nu_1 = 8,15 \text{ mm}^2/\text{s}$. Z toho vyplývá $\kappa = \nu/\nu_1 = 20/8,15 = 2,45$

- V tabulkové části opět najdeme $P_u = 1,34 \text{ kN}$ a $P_u/P = 1,34/10 = 0,134$. Vzhledem k vysoce čistému prostředí, $\eta_c = 0,8$ a $\eta_c P_u/P = 0,107$. Pro $\kappa = 2,45$ a podle stupnice pro SKF Explorer v **diagramu 1, str. 54**, vychází $a_{SKF} = 8$. Poté dle rovnice pro výpočet trvanlivosti podle SKF vychází

$$L_{10m} = 1 \times 8 \times 169$$

$$= 1\,352 \text{ miliónů otáček}$$

nebo v provozních hodinách podle

$$L_{10mh} = \frac{10^6}{60 n} L_{10m}$$

$$L_{10mh} = 1\,000\,000 / (60 \times 3\,000) \times 1\,352$$

$$= 7\,512 \text{ provozních hodin}$$

Příklad 2

Kuličkové ložisko SKF Explorer 6309 v příkladu 1 má být namontováno do stávajícího uložení, které bylo vypočítáno před několika lety na základě opravného součinitele a_{23} . Toto uložení plně splnilo požadavky na něj kladené. Nyní je požadováno přepočítat trvanlivost tohoto ložiska s ohledem na součinitel a_{23} a také součinitel a_{SKF} (na základě praktických zkušeností s tímto uložením), tzn. $a_{SKF} = a_{23}$. Nakonec má být stanoven ekvivalentní součinitel η_c pro úroveň znečištění v uložení za podmínky $a_{SKF} = a_{23}$.

- Pro $\kappa = 2,45$, a podle stupnice a_{23} zavedené do křivek κ pro součinitel a_{SKF} v **diagramu 1 na str. 54**, lze odečíst součinitel $a_{23} \approx 1,8$ na ose a_{SKF} . Jestliže si uvědomíme, že toto uložení zcela splňuje požadavky na něj kladené, lze bezpečně předpokládat, že $a_{SKF} = a_{23}$, a tedy

$$L_{10mh} = a_{23} L_{10h} = a_{SKF} L_{10h}$$

a

$$L_{10mh} = 1,8 \times 940 = 1\,690 \text{ provozních hodin}$$

- Součinitel η_c který odpovídá této modifikaci trvanlivosti je určen na základě **tabulky 6** na **str. 68** a pro ložisko SKF Explorer 6309 a $P_u/P = 0,134$

$$\eta_c = [\eta_c (P_u/P)]_{23}/(P_u/P) = 0,04/0,134 = 0,3$$

Příklad 3

Má být zkontrolována následující existující aplikace. Jednořadé kuličkové ložisko třídy SKF Explorer s těsněním 6309-2RS1 s náplní plastického maziva pracuje za stejných podmínek, které jsou uvedeny v příkladu 2 ($\kappa = 2,45$). U tohoto uložení má být zkontrolován stupeň znečištění a zjištěno, zda lze snížit náklady na uložení, je-li požadována minimální trvanlivost 3 000 provozních hodin.

- Vzhledem k tomu, že bylo zvoleno mazání plastickým mazivem a ložisko s těsněním, prostředím lze označit jako vysoce čisté a z **tabulky 4** na **str. 62**, vychází $\eta_c = 0,8$. Pro $P_u/P = 0,134$, $\eta_c (P_u/P) = 0,107$ podle stupnice pro SKF Explorer v **diagramu 1** na **str. 54** a $\kappa = 2,45$ je $a_{SKF} = 8$.

$$L_{10mh} = 8 \times 940 = 7\,520 \text{ provozních hodin}$$

- Jako levnější řešení by bylo možné použít ve stejné aplikaci zakryté ložisko SKF Explorer 6309-2Z. Prostředí lze označit za normálně čisté, a tedy z **tabulky 4** na **str. 62**, vychází $\eta_c = 0,5$. Pro $P_u/P = 0,134$, $\eta_c (P_u/P) = 0,067$, ze stupnice pro SKF Explorer v **diagramu 1** na **str. 54** a $\kappa = 2,45$ je $a_{SKF} \approx 3,5$.

$$L_{10mh} = 3,5 \times 940 = 3\,290 \text{ provozních hodin}$$

Závěr: Pokud by to bylo možné, u tohoto uložení by ložiska s těsněním mohla být nahrazena ekonomičtějším řešením se zakrytými ložisky.

Je třeba upozornit, že trvanlivost vypočtená s použitím opravného součinitele a_{23} by neumožnila takto posoudit uložení. Dále by ani nebylo možné dosáhnout požadované trvanlivosti (→ příklad 2, trvanlivost vypočtená s použitím součinitele a_{23} činí pouhých 1 690 provozních hodin).

Příklad 4

Kuličkové ložisko 6309 podle příkladu 1 má být namontováno do stávajícího uložení, které bylo vypočítáno před několika lety na základě opravného součinitele a_{23} . V praxi se však množily stížnosti na havárie ložiska. Je požadováno posouzení konstrukce tohoto uložení a stanovení vhodných opatření pro zvýšení spolehlivosti.

- Nejprve stanovíme trvanlivost na základě součinitele a_{23} . Pro $\kappa = 2,45$, a podle stupnice a_{23} zavedené do křivek κ pro součinitel a_{SKF} **diagramu 1** na **str. 54**, lze odečíst součinitel $a_{23} = 1,8$ na ose a_{SKF} .

$$L_{10mh} = a_{23} \times L_{10h} = 1,8 \times 940$$

$$= 1\,690 \text{ provozních hodin}$$

- Součinitel η_c , který odpovídá tomuto způsobu výpočtu, je určen na základě **tabulky 6** na **str. 68** a pro ložisko SKF Explorer 6309 a $P_u/P = 0,134$

$$\eta_c = [\eta_c (P_u/P)]_{23}/(P_u/P) = 0,04/0,134 = 0,3$$

- Mikroskopická analýza vzorku oleje odebraného z uložení ukazuje, že úroveň znečištění odpovídá klasifikaci $-/17/14$ podle ISO 4406: 1999. Znečištění je způsobeno především částicemi otěru, které vznikají v systému. Tuto úroveň znečištění lze označit za "typické znečištění", a tedy podle **tabulky 4** na **str. 62** a dále podle **diagramu 9** na **str. 66**, $\eta_c = 0,2$. Pro $P_u/P = 0,134$, $\eta_c (P_u/P) = 0,0268$ a $\kappa = 2,45$, ze stupnice SKF Explorer **diagramu 1** na **str. 54** je $a_{SKF} \approx 1,2$.

$$L_{10mh} = 1,2 \times 940 = 1\,130 \text{ provozních hodin}$$

- Pokud je použito ložisko SKF Explorer 6309-2RS1 s integrovanými kontaktními těsněními, úroveň znečištění lze snížit na úroveň "vysoká čistota". Z **tabulky 4** na **str. 62** je $\eta_c = 0,8$. Pro $P_u/P = 0,134$, $\eta_c (P_u/P) = 0,107$ a ze stupnice pro SKF Explorer v **diagramu 1** na **str. 54** a $\kappa = 2,45$ je $a_{SKF} = 8$.

$$L_{10mh} = 8 \times 940 = 7\,520 \text{ provozních hodin}$$

Závěr: V tomto uložení je úroveň znečištění vyšší, nežli znečištění odpovídající součiniteli $\eta_c = 0,3$, určenému s použitím součinitele a_{23} .

Určení velikosti ložiska

Skutečné provozní podmínky, které jsou typické pro průmyslové převodovky odpovídají součiniteli $\eta_c = 0,2$, jestliže je použit součinitel a_{SKF} .

To může vysvětlovat havárie, k nimž docházelo v tomto uložení. Použití ložiska SKF Explorer 6309-2RS1 s integrovanými kontaktními těsněním zvýší podstatně spolehlivost a odstraní uvedenou závadu.

Příklad 5

Soudečkové ložisko s těsněním SKF Explorer 24026-2CS2/VT143, použité v těžkém dopravním systému v ocelárně, pracuje v podmínkách, které jsou uvedeny v tabulce níže.

Statické zatížení tohoto uložení je určeno poměrně přesně, přičemž byla vzata v úvahu setrvačnost zatížení v průběhu nakládání a výskyt rázových zatížení při náhodném pádu břemena.

Je třeba ověřit dynamické a statické zatěžovací podmínky tohoto uložení za předpokladu, že má být dosaženo trvanlivosti 60 000 hodin a minimálního součinitele bezpečnosti 1,5.

- Z tabulkové části a úvodního textu vyplývá:

Únosnosti:

$C = 540 \text{ kN}$; $C_0 = 815 \text{ kN}$; $P_u = 81,5 \text{ kN}$

Rozměry:

$d = 130 \text{ mm}$; $D = 200 \text{ mm}$,

tedy $d_m = 0,5 (130 + 200) = 165 \text{ mm}$

Náplň plastického maziva:

Plastické mazivo pro extrémní zatížení na bázi

minerálního oleje a lithného mýdla konzistenční třídy NLGI 2, s teplotním rozsahem -20 až $+110 \text{ °C}$ a s viskozitou základní olejové složky 200 resp. $16 \text{ mm}^2/\text{s}$ při teplotě 40 resp. 100 °C .

- Na základě uvedených hodnot byly provedeny následující výpočty anebo byly stanoveny hodnoty:

1. v_1 = viskozita potřebná pro zajištění správného mazání, mm^2/s (→ **diagram 5** na **str. 60**) – dosadit: d_m a otáčky

2. v = skutečná provozní viskozita, mm^2/s (→ **diagram 6** na **str. 61**) – dosadit: viskozita maziva při 40 °C a provozní teplotu

3. κ = viskozitní poměr – vypočtený (v/v_1)

4. η_c = součinitel znečištění (→ **tabulka 4** na **str. 62**) – “vysoká čistota”, ložisko s těsněním: $\eta_c = 0,8$

5. L_{10h} = základní trvanlivost podle vztahu na **str. 52** – dosadit: C , P a n

6. a_{SKF} = z **diagramu 2** na **str. 55** – dosadit: ložisko SKF Explorer, η_c , P_u , P a κ

7. $L_{10mh1,2}, \dots$ = trvanlivost podle SKF dle vztahu na **str. 52** – dosadit a_{SKF} a $L_{10h1,2}, \dots$

Příklad 5/1

Provozní podmínky					
Pracovní interval	Ekvivalentní dynamické zatížení	Časový interval	Otáčky	Teplota	Ekvivalentní statické zatížení
–	kN	–	min^{-1}	$^{\circ}\text{C}$	kN
1	200	0,05	50	50	500
2	125	0,40	300	65	500
3	75	0,45	400	65	500
4	50	0,10	200	60	500

8. L_{10mh} = trvanlivost podle SKF dle vztahu
na **str. 70** – dosadit L_{10mh1} , L_{10mh2} , ...
a U_1 , U_2 , ...

Trvanlivost podle SKF činí 84 300 hodin, a tedy je delší než požadovaná provozní trvanlivost. Dynamické zatížení je tedy ověřeno. Nakonec je posouzen součinitel bezpečnosti tohoto uložení.

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{815}{500} = 1,63$$

$$s_0 = 1,63 > s_{0 \text{ req}}$$

Tímto je statická bezpečnost tohoto uložení ověřena. Vzhledem k tomu, že statické zatížení je určeno přesně, poměrně malý rozdíl mezi vypočtenou a doporučenou statickou bezpečností lze zanedbat.

Příklad 5/2

Výpočtové hodnoty

Pracovní interval	Ekvivalentní dynamické zatížení	Žádaná viskozita v_1	Provozní viskozita v	$k^{1)}$	η_c	Základní trvanlivost L_{10h}	a_{SKF}	Trvanlivost podle SKF L_{10mh}	Časový úsek U	Výsledná trvanlivost podle SKF L_{10mh}
–	kN	mm ² /s	mm ² /s	–	–	h	–	h	–	h
1	200	120	120	1	0,8	9 136	1,2	11 050	0,05	84 300
2	125	25	60	2,3	0,8	7 295	7,8	57 260	0,40	
3	75	20	60	3	0,8	30 030	43	1 318 000	0,45	
4	50	36	75	2	0,8	232 040	50	11 600 000	0,10	

¹⁾ Plastické mazivo s EP přísadami.

Výpočtové nástroje SKF

SKF má k dispozici jeden z nejkompaktnějších a nejvýkonnějších souborů programového vybavení pro modelování a simulaci v ložiskovém průmyslu. Zahrnuje jak jednoduché nástroje založené na vztazích uvedených v Hlavním katalogu SKF, tak nejsložitější výpočtové a simulační systémy, které mohou být využívány paralelně několika uživateli PC.

Filosofií společnosti je vyvíjet programy, které plní nejrůznější potřeby zákazníků – od poměrně jednoduché kontroly uložení přes středně náročná posouzení po nejnáročnější simulace konstrukcí uložení a strojů. Podle možností jsou tyto programy upravovány tak, aby je mohli používat přímo v praxi zákazníci nebo technici SKF na laptopu, stolních osobních počítačích nebo pracovních stanicích. Kromě toho je věnována zvláštní péče zajištění integrace a kompatibilitě systémů navzájem.

SKF Interaktivní katalog

Interaktivní katalog "SKF Interactive Engineering Catalogue" je nástroj s jednoduchou obsluhou, který je určen pro volbu a výpočet ložisek. Ložiska v něm lze vyhledávat podle označení nebo rozměrů a je jím možné posuzovat i jednoduchá uložení. Použité rovnice jsou převzaty z tohoto Hlavního katalogu.

Umožňuje rovněž vytvořit výkres ložiska CAD, který si uživatel může přenést do svého výkresu, vytvořeného některým běžným CAD softwarem.

Interaktivní katalog "SKF Interactive Engineering Catalogue" obsahuje kromě všech katalogů valivých ložisek i ložiskové jednotky, ložisková tělesa, kluzná ložiska a těsnění.

Interaktivní katalog SKF je přístupný online na internetu na adrese www.skf.com.

SKF bearing beacon

SKF bearing beacon je nový základní program pro návrh ložiskových uložení, který využívají technici SKF pro zjišťování nejvhodnějšího řešení pro zákazníka. SKF bearing beacon, nahrazuje předchozí program Beacon. Umožňuje modelovat v 3D grafice pružné systémy a slouží k nalezení nejvhodnějšího řešení uložení v konkrétní aplikaci zákazníka. Spojuje schopnost modelovat mechanické systémy (tedy hřídele, ozubená kola, tělesa atd.) s přesným modelem ložiska pro



podrobnou analýzu chování systémů ve virtuálním prostředí. Program dokáže rovněž vyhodnotit únavu v místě valivého styku v ložisku podle rovnice SKF pro výpočet trvanlivosti. SKF bearing beacon je výsledkem několikaletého, úzce zaměřeného výzkumu a vývoje v rámci SKF.

Orpheus

Numerický nástroj Orpheus umožňuje studovat a optimalizovat dynamické chování z hlediska hlučnosti a vibrací v kritických uloženích s ložisky (např. elektromotorech, převodovkách). Nachází uplatnění při řešeních komplexních nelineárních pohybových rovnic soustav ložisek a souvisejících dílů včetně ozubených kol, hřídelí a ložiskových těles.

Tento program umožňuje pochopit a získat informace o dynamickém chování uložení, přičemž bere v úvahu i úchytky tvaru (vlnitost oběžných drah) a montážní chyby (nesouosost). Program umožňuje technikům SKF zvolit nejvhodnější typ a velikost ložiska, jakož i odpovídající způsob montáže a předpětí pro konkrétní uložení.

Beast

Beast je simulační program, který využívají technici SKF pro podrobnou simulaci dynamických dějů uvnitř ložiska. Program lze považovat za virtuální zkušební zařízení, na němž lze detailně studovat působení sil, momentů, atd. uvnitř ložiska v podstatě při jakýchkoli zatěžovacích podmínkách. Umožňuje “testovat” nové koncepce a konstrukce ve velmi krátké době a získat více údajů ve srovnání s běžným testováním skutečných ložisek.

Další programy

Kromě výše uvedených programů vyvinula skupina SKF speciální počítačové programy, které umožňují odborníkům v rámci skupiny SKF nabídnout zákazníkům ložiska s optimalizovanou kvalitou povrchu a prodloužit tak trvanlivost ložiska i v nejnáročnějších provozních podmínkách. Tyto programy jsou schopny počítat tloušťku mazivového filmu v místě styku při elasto-hydrodynamickém mazání. Navíc umožňují provádět podrobný výpočet místní tloušťky mazivového filmu na základě deformace trojrozměrné topografie povrchu v místě takového styku a následného zkrácení únavové trvanlivosti ložiska.

Technici SKF však využívají při své práci i běžné programy např. pro výpočty metodou konečných prvků a nebo pro dynamické analýzy systémů, které doplňují jejich nástroje potřebné pro dokončení úkolu. Tyto nástroje jsou integrovány do vlastních výpočtových nástrojů SKF a vytváří tak rychlejší a těsnější propojení s daty a modely zákazníka.

Technicko-konzultační služby SKF

Tento katalog obsahuje základní informace potřebné pro výpočet a návrh uložení. V případě některých uložení je však žádoucí předpovědět trvanlivost ložiska s nejvyšší přesností, protože buď nejsou k dispozici dostatečné zkušenosti s podobnými uloženími nebo má zásadní význam hledisko hospodárnosti a/nebo provozní spolehlivosti. V takových případech je vhodné se obrátit na technicko-konzultační služby SKF, které zajistí výpočty a simulace s využitím špičkových počítačových programů a zkušeností, které byly shromažďovány na celém světě v oblasti techniky točivých strojů v průběhu téměř celého století.

Mohou rovněž nabídnout veškeré aplikačního know-how skupiny SKF. Odborníci SKF jsou schopni

- analyzovat technické problémy
- navrhnout odpovídající systémové řešení
- zvolit odpovídající způsob mazání a optimalizovaný postup údržby

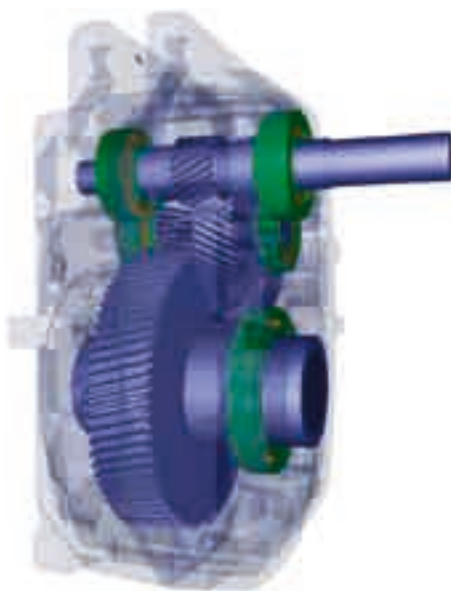
Technicko-konzultační služby SKF představují nový přístup ke službám poskytovaným dodavateli základních zařízení a konečným uživatelům. Některé přednosti nabízených služeb jsou uvedeny níže:

- Rychlejší vývojové procesy a zkrácení doby potřebné pro uvedení výrobku na trh.
- Snížení nákladů dosažené virtuálním testováním před zahájením výroby.
- Zvýšení kvality uložení omezením hlučnosti a vibrací.
- Dosažení vyšší hodnoty výkonu modernizací uložení.
- Delší provozní trvanlivost dosažená zlepšením mazání nebo utěsnění.

Moderní počítačové programy

V rámci technicko-konzultačních služeb SKF lze využívat moderní počítačové programy, které jsou určeny pro

- analytické modelování úplného uložení, které se skládá z hřídele, ložiskového tělesa, ozubených kol, spojky atd.



- statickou analýzu, tzn. pro určení pružných deformací a napětí v dílech mechanických systémů
- dynamickou analýzu, tj. pro určení vibračního chování systémů za provozních podmínek ("virtuální testování")
- vizuální a animované prezentace průhybu konstrukce a dílů
- optimalizování nákladů na systém, provozní trvanlivost, vibrace a hlučnost.

Špičkové výpočetní programy standardně používané technicko-konzultačními službami SKF pro výpočet a simulaci jsou stručně popsány v části "Výpočtové nástroje SKF", na **str. 82**.

Další informace o činnosti technicko-konzultačních služeb SKF poskytne zastoupení společnosti SKF.

Testování trvanlivosti SKF

SKF provádí únavové zkoušky ve výzkumném a vývojovém středisku SKF Engineering Research Centre v Nizozemí. Vybavení tohoto střediska zkušebními zařízeními nemá ve světě obdoby, především z hlediska sofistikovanosti a počtu zkušebních přístrojů. Výzkumné středisko rovněž poskytuje podporu výzkumným činnostem, které provádějí výrobní závody skupiny SKF.

SKF provádí zkoušky trvanlivosti z důvodu zdokonalování vlastních výrobků. Je nezbytně nutné pochopit a formulovat základní fyzikální zákony, které řídí chování ložisek, jako funkci vnitřních a vnějších proměnných. Takové proměnné mohou vyjadřovat vlastnosti materiálu, vnitřní geometrii ložiska a přesnost jeho provedení, konstrukci klece, nesouosost, teplotu a další provozní podmínky. Mnoho důležitých faktorů má však spíše dynamickou povahu, než statickou. Příkladem může být topografie povrchu, struktura materiálu, vnitřní geometrie a vlastnosti maziva, které se neustále mění v průběhu provozu.

Skupina SKF dále provádí zkoušky trvanlivosti se záměrem

- zajišťovat shodu s údaji uváděnými v katalozích
- ověřovat jakost vyráběných standardních ložisek SKF
- zkoumat vliv maziva a podmínek mazání na trvanlivost ložiska
- podporovat rozvoj teorie únavy materiálu v místě valivého styku
- porovnat konkurenční výrobky.

Efektivní postupy pro zkoušky trvanlivosti prováděné za přesně definovaných podmínek spolu s analýzou prováděnou po ukončení zkoušek na moderních a velmi sofistikovaných zařízeních umožňují systematicky zkoumat jednotlivé faktory a jejich vzájemné souvislosti.

Ložiska řady SKF Explorer představují příklad praktického zavedení výsledků optimalizace pomocí analytických simulačních modelů a experimentálního ověření na úrovni jednotlivých součástí ložiska i celého ložiska.

