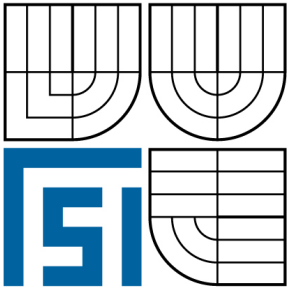


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

DESKRIPCE KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ

DESCRIPTION OF BALL-SCREWS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ STRAPINA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ZDENĚK KOLÍBAL, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Strapina

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Deskripce kuličkových šroubů

v anglickém jazyce:

Description of baal-screws

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce představuje odbornou rešerši různých kuličkových šroubů domácí i zahraniční výroby

Cíle bakalářské práce:

Výsledkem práce bude seznam a popis činnosti kuličkových šroubů domácí i zahraniční výroby včetně popisu činnosti teleskopického šroubu TOS Kuřim KSK. Popis vymezení vřutí.

Seznam odborné literatury:

1. Prospekty různých firem
2. INTERNET

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.

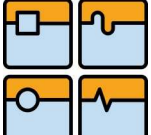
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 28.11.2008

L.S.

Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 4
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

ANOTACE

Tomáš Strapina

Deskripce kuličkových šroubů

BP, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2009, str. 34, obr. 32, přílohy 0

Bakalářské práce se zabývá popisem funkce kuličkových šroubů.

Klíčová slova

Kuličkový šroub, Předepínání, Technologie kuličkové klece, Teleskopický kuličkový šroub

SUMMARY

Tomáš Strapina

Description of ball-screws

BT, Institute of Production Machines, Systems and Robotics, 2009, p. 34, fig. 32, appendices 0

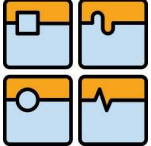
Bachelor thesis refers about function of ball screws.

Key worlds

Ball screw, Preloading, Caged ball technology, Telescopic ball screw

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRAPINA, T. *Deskripce kuličkových šroubů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 34 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.

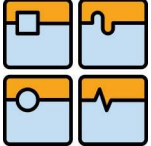
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Deskripce kuličkových šroubů. vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který je součástí této práce

Datum:

.....
Tomáš Strapina

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Poděkování

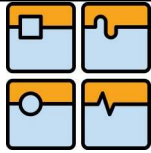
Tímto děkuji pánům

prof. Ing. Zdeňku Kolíbalovi, CSc. za poskytnutí podkladů a rad k mé bakalářské práci a

Ing. Milanu Dobešovi za informace o teleskopickém kuličkovém šroubu a prohlídku výrobního závodu KSK Kuřim

OBSAH

1 Úvod	8
2 Kinematický princip KŠ	9
3 Konstrukce kuličkového šroubu	10
3.1 Uložení kuličkového šroubu	11
3.2 pohybové možnosti	12
3.3 Geometrie kuličkového závitu	12
3.4 Konstrukční provedení šroubů	13
3.5 Konstrukční provedení matic	15
3.6 Dorazy	16
3.7 Mazání	16
3.8 Stěrače a kryty	17
3.9 Provozní teploty	18
3.10 Materiály	18
3.11 Konstrukční novinky	18
4 Dynamické vlastnosti Kuličkových šroubů	21
4.1 Stanovení trvanlivosti kuličkového šroubu	21
4.1.1 Výpočet ekvivalentních otáček zatížení	21
4.1.2 Trvanlivost	22
4.1.3 Výsledná trvanlivost	22
4.1.4 Maximální otáčky hřídele KŠ	23
4.1.5 Maximální axiální zatížení vzhledem k vzpěrné tuhosti	23
4.2 Vůle a předepínání šroubů a matic	24
4.2.1 Vůle kuličkového šroubu	24
4.2.2 Průběh sil a deformací v předepnuté maticové jednotce	27
5 Přesnost kuličkových šroubů	28
5.1 stupně přesnosti	28
5.2 Parametry geometrické přesnosti dráhy kuličkového šroubu	28
5.3 Kontrola a korekce pohonu s kuličkovým šroubem	29
5.3.1 Auto-kalibrace řídicím systémem.	29
5.3.2 Kalibrace externím měřidlem – interferometrem.	29
6 Teleskopický kuličkový šroub – KSK Kuřim	30
6.1 Popis kuličkového šroubu	30
6.2 Kinematika TKŠ	31
6.3 Využití TKŠ	32
7 Závěr	33
8 Seznam použitých symbolu a značek	34
9 Použité zdroje	35



1 Úvod

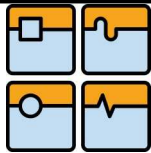
Stavba automatizovaných, číslicově řízených, obráběcích strojů si vynucuje vývoj nových a dokonalejších konstrukčních prvků, jelikož dosavadní konvenční elementy již nesplňují zvýšené požadavky. Jako příklad je možné uvést trapézové třecí šrouby, které jsou používány na přenos pohybu a sil. Nízká mechanická účinnost pohybových šroubů s kluzným závitem je vážnou překážkou ve stavbě programově řízených obráběcích strojů. V této oblasti lze neobyčejně výhodně uplatnit šrouby s kuličkovým závitem, které představují valivé převody s vysokou mechanickou účinností přesahující 90%.

Tyto valivé převody umožňují velmi přesný přenos rotačního pohybu na přímočarý a naopak při minimálních třecích ztrátách.

Vysoká mechanická účinnost kuličkových šroubů poskytuje velmi příznivé podmínky pro úspory na rozměrech a na váze pohonných jednotek, což je základní a podstatnou podmínkou pro nasazení řídicích systémů na výrobní stroje nebo na jiné druhy strojů a přístrojů.

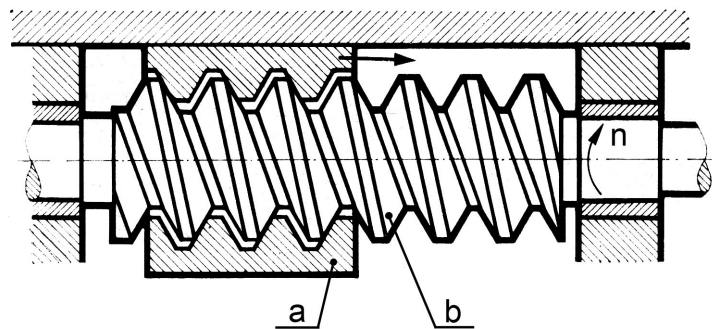


Obr. 1 - Ukázka kuličkových šroubů [10]

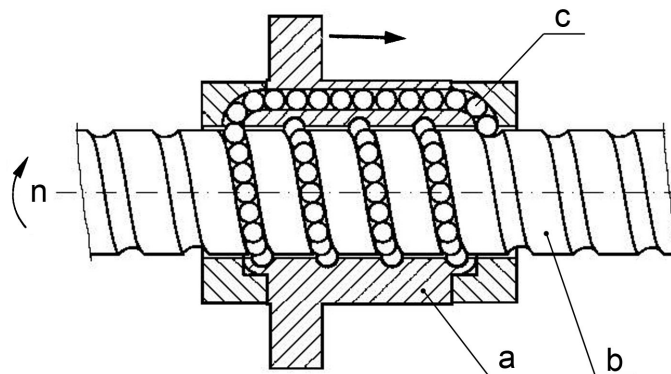


2 Kinematický princip KŠ

Kuličkový šroub převádí lineární pohyb na rotační a naopak. Kuličkový šroub je pohybový šroub s vysokou mechanickou účinností. Tato účinnost je dána tím že závity šroubu a matice nejsou v přímém kontaktu ale jsou odděleny kuličkami. U konvenčního pohybového šroubu (Obr. 2) dochází ke tření boku lichoběžníkového závitu šroubu a matice. Toto tření snižuje mechanickou účinnost na hodnoty okolo 24%. U kuličkového šroubu se kuličky odvalují v souhlasných závitových dráhách na šroubu i v matici. Šroubovitá oběžná dráha v matici je naplněna kuličkami, které se odvalují a zajišťují valivé tření mezi šroubem a maticí. Valivý odpor je značně menší než třecí což se příznivě projevuje na mechanické účinnosti která se u kuličkových šroubů pohybuje okolo 95%.

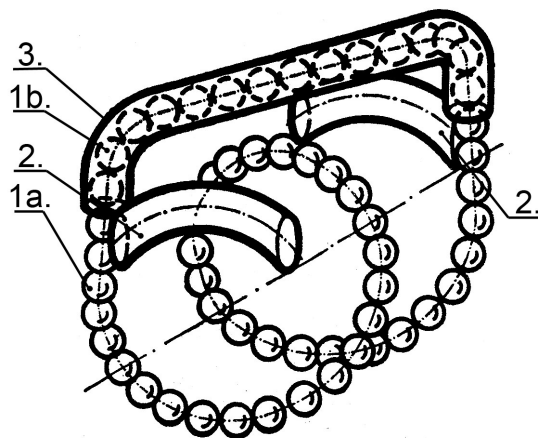
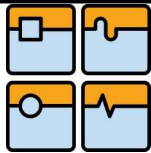


Obr. 2- Konvenční pohybový šroub [2]



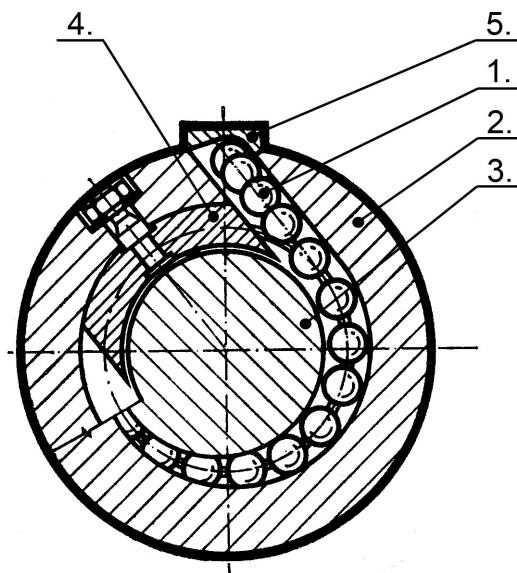
Obr. 3 - Kuličkový pohybový šroub [13]

Otáčíme-li kuličkovým šroubem (b na Obr. 3), odvalují se kuličky (c na Obr. 3) a postupují planetovým pohybem po šroubovici a pohybují s maticí (a na Obr. 3). Kuličky se postupně posouvají po šroubovici v matici až se dostanou na konec kde narážejí na deflektory, která je usměřňují do převáděcích kanálů. Kuličky, které se odvalují po závitové dráze, tlačí před sebou kuličky nahromaděné v převáděcím kanálu a na konci kanálu je opět deflektor vrací do závitu. Závitová dutina, převáděcí kanál (uzavřený převáděcí příložkou) a deflektory tvoří uzavřená systém vyplněný kuličkami, které při otáčení šroubu nebo matice cirkulují v jednom či druhém směru a tak vytvářejí recirkulační systém.



- 1a Zatížené pracovní kuličky
- 1b Odlehčené kuličky
- 2 Deflektor
- 3 Převáděcí trubka

Obr. 4 - Recirkulační kuličkový okruh [2]

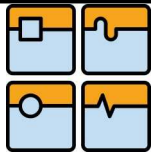


- 1 Kuličky
- 2 Matice
- 3 Šroub
- 4 Deflektor
- 5 převáděcí příložka uzavírající převáděcí kanál

Obr. 5 - Radiální řez kuličkovým šroubem [2]

3 Konstrukce kuličkového šroubu

Základní sestava kuličkového šroubu se skládá ze šroubu, matice a zařízení zajišťujícího oběh kuliček. Hřídel je vyroben s přesnou šroubovou drážkou, která je vyrobena po celé délce hřídele. Matice je vyrobena s odpovídajícím vnitřní drážkou. Drážka na hřídeli má v podstatě funkci vnitřní oběžné dráhy a drážka v matici odpovídá vnější oběžné dráze, po níž se odvalují přesné ocelové kuličky. Kuličky, které se pohybují v drážce mezi hřídelí a maticí, vyvolávají lineární pohyb hřídele nebo matice v závislosti na požadavcích aplikace. (viz. kapitola 2.2). Jedním z nejdůležitějších dílů každého kuličkového šroubu je zařízení, které vrací kuličky, jež dosáhly konce oběžné dráhy uvnitř matice, zpátky na začátek dráhy a zajistí tak jejich oběh (deflektory). Zpravidla je k účelu převádění kuliček zpět do oběhu používá vratná trubice nebo dutina vniklá použitím příváděcí příložky.

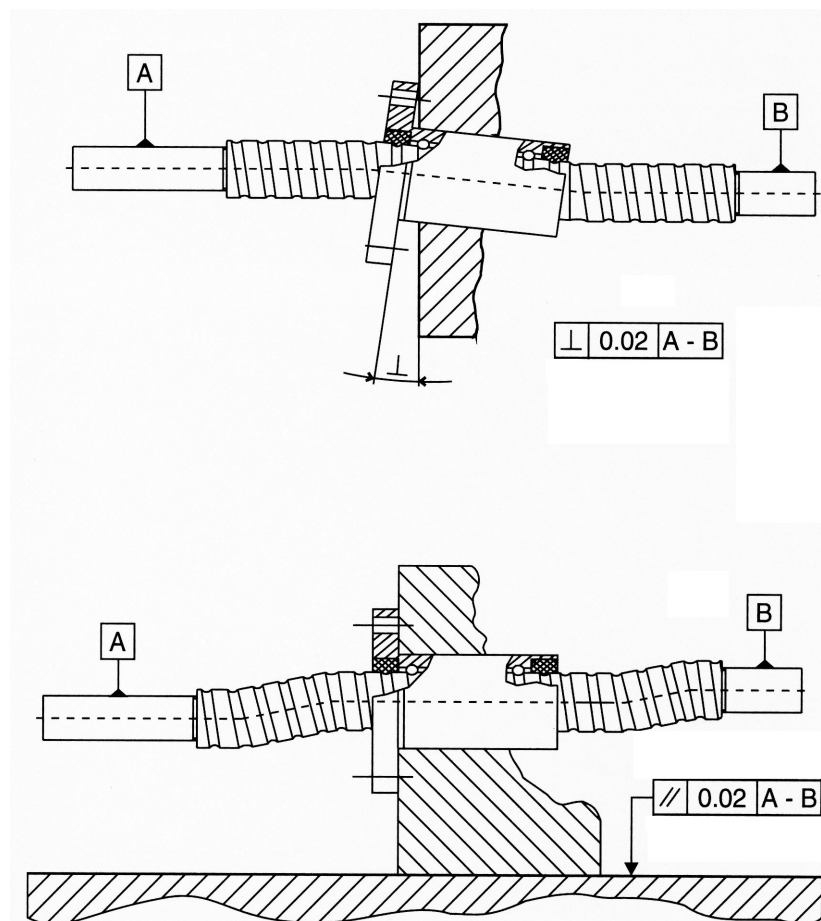


Vnější vratná trubka, která spojuje konec matice s jejím začátkem a tím uzavírá okruh obíhajících kuliček, však může být poškozena při montáži, a proto jsou v současné době vyvíjena alternativní řešení. Jedno z neúčinnějších řešení představuje kuličkový šroub s vestavěným systémem „bez vratné trubky“, s takzvanými „vločkami“. Toto řešení využívá vodící čepy, které rychle odebírají kuličky na konci drážky matice, vracejí je na začátek a tím uzavírají okruh obíhajících kuliček.

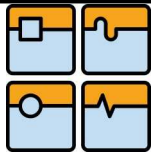
3.1 Uložení kuličkového šroubu

Kuličkové šrouby vyžadují přesné a tuhé uložení s rovnoběžností kuličkového šroubu a vodících ploch do 0,02 mm/1000 mm, rovněž uložení maticové jednotky musí zajišťovat její kolmost k podélné ose šroubu do 0,02 mm/1000 mm.

Maticové jednotky musí být zatěžovány pouze v axiálním směru. U dlouhých a štíhlých kuličkových šroubů musí být konstrukcí pohybového ústrojí vhodně eliminován průhyb hřídele vzniklý jeho hmotností.



Obr. 6 - Geometrické požadavky na uložení kuličkového šroubu [3]



3.2 pohybové možnosti

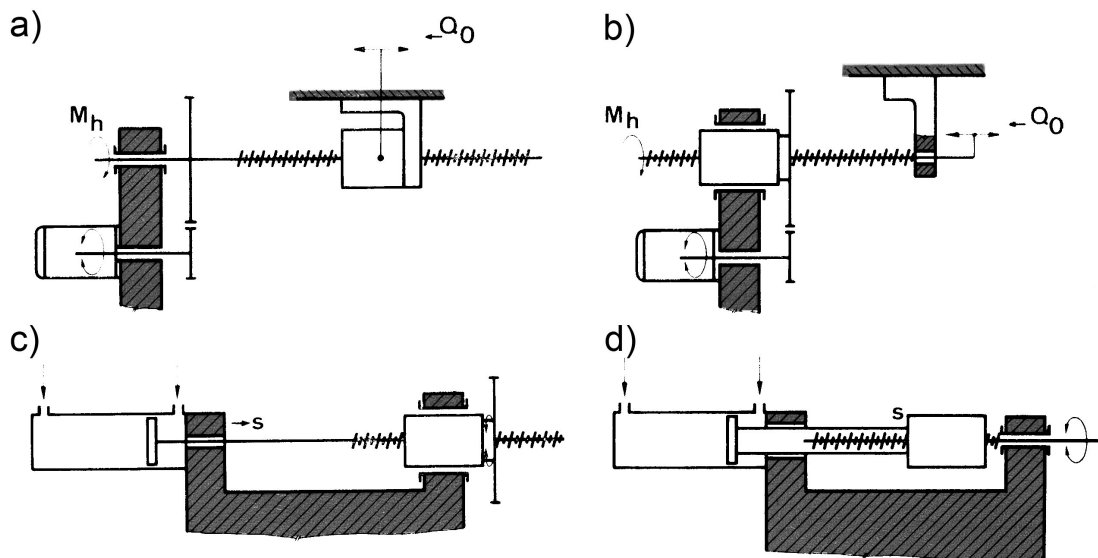
Vysoká mechanická účinnost kuličkového převodu umožňuje několik možností jak lze kuličkový šroub použít. Hnací pohyb může být rotační nebo přímočarý a může být přiváděn jak na šroub tak na matici. Lze sestavit 4 pohybové kombinace pro kuličkový šroub:

a - šroub se otáčí a posouvá matici. V tomto případě je šroub hnací člen a matice hnaný. Dochází k přeměně z rotačního pohybu na lineární

b - matice se otáčí a posouvá šroubem. V tomto případě je matice hnací člen a šroub hnaný. Dochází k přeměně rotačního pohybu na lineární.

c - šroub se posouvá a otáčí matici. V tomto případě je šroub hnací člen a matice hnaný. Dochází k přeměně lineárního pohybu na rotační.

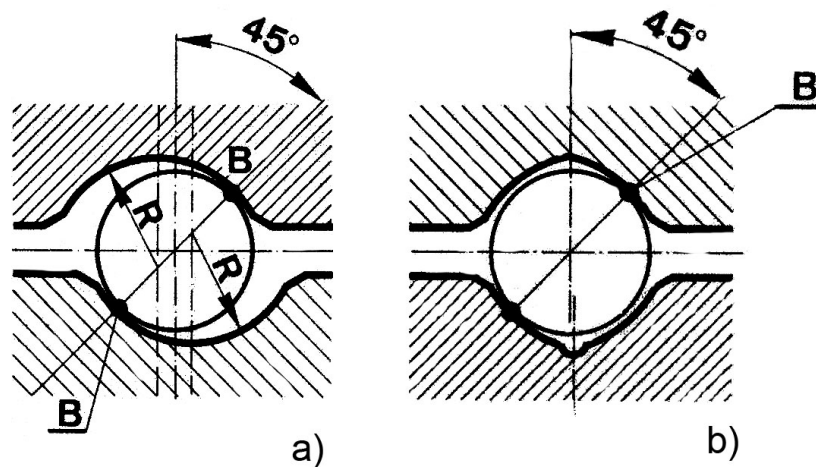
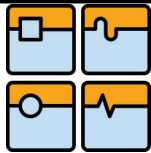
d - matice se posouvá a otáčí šroubem. V tomto případě je matice hnací člen a šroub hnaný. Dochází k přeměně lineárního pohybu na rotační.



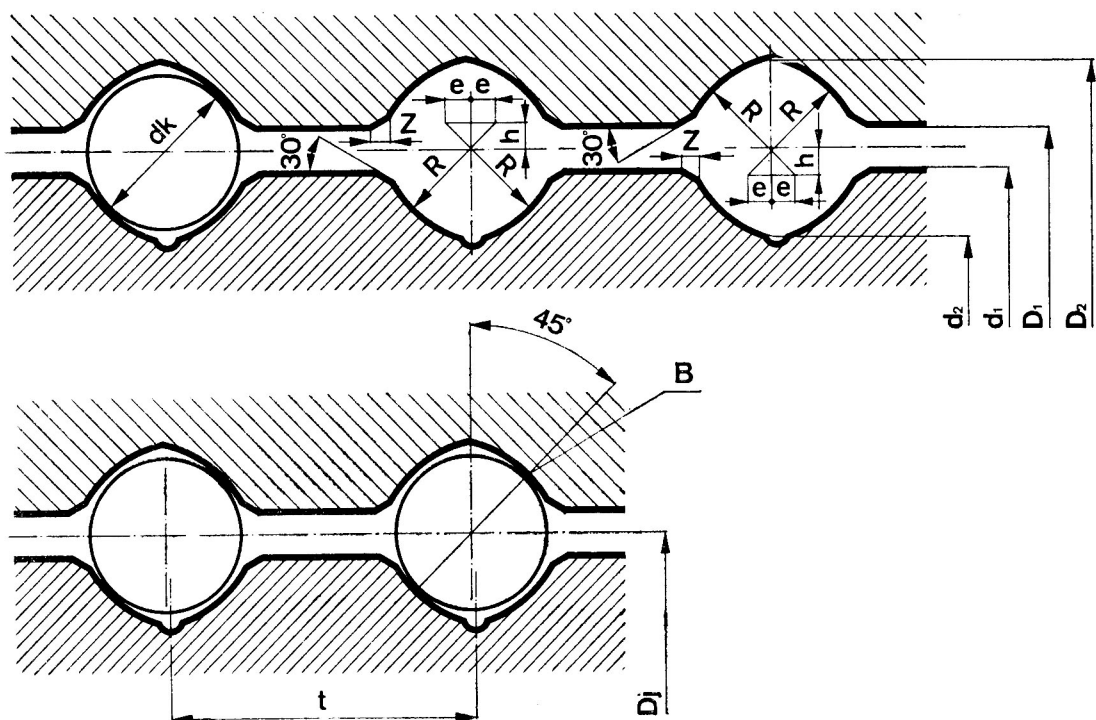
Obr. 7 - Pohybové možnosti kuličkového šroubu [2]

3.3 Geometrie kuličkového závitu

Profil kuličkového závitu (kruhový) (Obr. 8 a) je tvořen kruhovým obloukem, o poloměru poněkud větším než je poloměr kuličky, nebo gotickým obloukem (Obr. 8 b), který je tvořen dvěma stejnými poloměry, opět poněkud většími než je poloměr kuličky. Gotický profil zabezpečuje menší axiální vůli matice na šroubu než jednoduchý kruhový profil. Závitové profily šroubu a matice jsou voleny tak aby úhel styku α kuliček se závitovou plochou byl pod 45%. Za tohoto styku jsou zabezpečeny optimální podmínky z hlediska tuhosti a mechanické účinnosti kuličkového šroubu.



Obr. 8 - Profily kuličkového závitu. a) kruhový b) gotický [2]



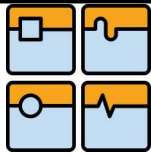
Obr. 9 - Gotický profil kuličkového závitu [2]

3.4 Konstrukční provedení šroubů

Šrouby nemají žádné zvláštní konstrukční podrobnosti. Konstrukční odlišnosti, na jednotlivých šroubech, jsou především jejich zakončení, které je dáno jejich uložením. Tyto konstrukční specifikace si většinou navrhuje zákazník a výrobce KŠ je vyrábí podle zadání.

Kvalita Kuličkového Šroubu se liší především metodou výroby a dosaženou třídou přesnosti. (viz kapitola 4.1)

Běžnými způsoby výroby šroubu jsou: válcování, soustružení, broušení a vykružování. Jednotlivé metody se od sebe liší rychlostí obrábění a také dosahovanými přesnostmi.

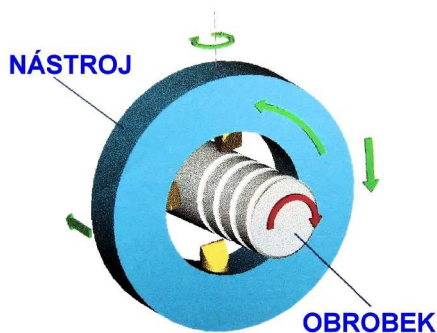


Válcování: Velmi rychlá a produktivní metoda pro výrobu šroubovice na hřídeli. Jde o tvářecí metodu, která umožňuje dosažení přesností IT5 a IT7 (stupeň přesnosti 3 a 4). Rychlost výroby se pohybuje řádově v jednotkách minut na jeden metr stoupání závitu.

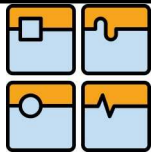
Broušení: Tato metoda lze použít jako výrobní metoda šroubovice, nebo jako dokončovací metoda pro soustružené šroubovice. Jedná se o třískové obrábění kterým lze obrábět i kalené materiály. Třídy přesnosti broušených šroubů jsou IT1, IT3 a IT5 (stupně přesnosti 1, 2 a 3). Rychlost výroby touto metodou se pohybuje v řádech stovek minut na jeden metr stoupání závitu.

Soustružení: Metoda třískového obrábění pro výrobu šroubovice na hřídeli který není vytvrzen. Rychlost obrábění se pohybuje řádově okolo několika desítek minut na jeden metr stoupání závitu. Tato metoda není koneční a obrobenou hřídel je nutno po obrobení zakalit a poté přebrousit. Přesnosti hřídelí takto vyrobených je dána finálním broušením.

Vykružování (Rotační frézování): Nová velmi produktivní metoda pro třískové obrábění šroubovice. Rychlost a produktivita je dána tím že se obrábí na hotovo přímo do kaleného materiálu. Přesnost dosahovaná touto metodou je IT5 (stupeň přesnosti 3). A rychlost výroby je řádově okolo několika desítek minut na jeden metr šroubovice.

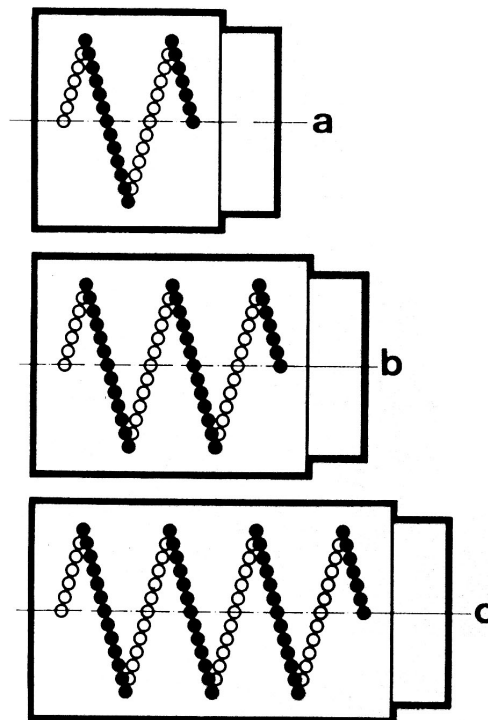


Obr. 10 - Princip vykružování [6][7]

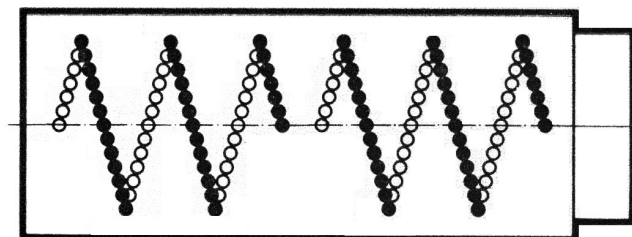


3.5 Konstrukční provedení matic

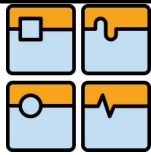
Konstrukční provedení matic se různí především vnějším tvarem matice a to jestli je proveden jako válcová s přírubou nebo bez a nebo jestli je proveden jako kostka. Tyto vnější tvary určuje zákazník. Dále se matice dělí podle toho jestli je matice předeprnutá nebo ne. Bližší popis k tomuto téma tu je v kapitole 3.2. Kuličky, které jsou ve styku se závitovými boky šroubu a matice jsou při práci zatíženy (Obr. 4 položka 1a), a proto jsou označovány jako pracovní kuličky. Na Obr. 4 v části 1b jsou kuličky odlehčeny a ty jsou nazývány nepracovní kuličky. Část 1a a 1b tvoří jeden kuličkový okruh, který může být složen z $1+1/3$, $2+3/4$, $3+3/4$ pracovních kuličkových závitů. (Obr. 11) Obvykle jsou kuličkové matice opatřeny jedním uzavřeným okruhem kuličkovým okruhem. Pro velké zatížení lze používat matice se dvěma či třemi pracovními okruhy. (Obr. 12)



Obr. 11 - Matice s různým počtem pracovních závitů [2]



Obr. 12 - Matice s 2 pracovními okruhy [2]



3.6 Dorazy

Podélné pohyby matice nebo šroubu je nutno omezit v obou směrech tak, aby nedocházelo k vypadávání kuliček v krajních polohách nebo k tvrdému nárazu matice na nákržky šroubu nebo na tvrdá tělesa soustavy. Za nejvýhodnější řešení se považuje omezování zdvihu vypínáním hnacího pohonu (případně ve spojení se zapnutím brzdy), při kterém nevznikají významnější zatěžující síly.

Při zastavování pohybujících se součástí na pevném dorazu, je nutno přesně vypočítat velikost zatěžující síly která vznikne při nárazu a výsledek zahrnout do výpočtu únosnosti šroubu.

3.7 Mazání

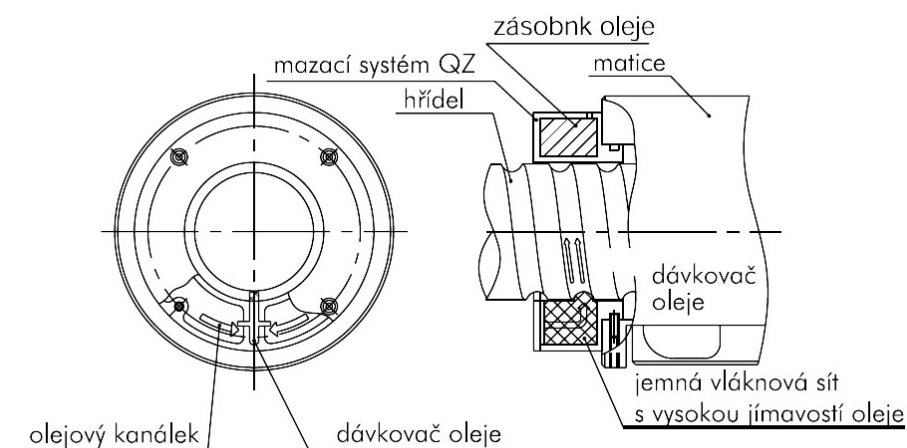
Správně dimenzovaný a vhodně uložený kuličkový šroub nevyžaduje zvláštní dohled a jeho údržba se soustřeďuje pouze na občasné namazání. Kuličkový šroub není choulostivý na mazání ale je nutné zajistit sice slabou ale stálou vrstvu maziva ve valivých plochách.

Olejové mazání: Všeobecně se pro mazání kuličkových šroubů používají stejné oleje jako pro mazání valivých ložisek, tj. převodové lineární oleje s minimální viskozitou $50\text{mm}^2/\text{s}$ při 40°C . Množství použitého oleje závisí na podmínkách provozu.

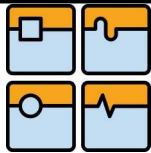
Tukové mazání: Pro kuličkové šrouby jsou doporučeny tuky dle stupně 2 DIN 51825

-Nejsou-li použity stěrače na koncích kuličkové matice, postačí přívod maziva na závitovou část šroubu. U matic se stěrači je vhodné upravit přívod maziva do matice.

Pro prodloužení servisního intervalu používá například japonský výrobce THK mazací technologii QZ, která zajišťuje konstantní přívod maziva na valivé plochy. Tento systém spočívá v tom že okolo šroubu je pouzdro s vláknovitým zásobníkem maziva s vysokou jímavostí. Mazivo je na kontaktní plochy přiváděno kapilárním systémem. Během provozu nelze zabránit stálé spotřebě maziva, S mazacím systémem QZ je u KŠ zajištěn neustálý přívod maziva a tak je možné interval údržby značně prodloužit.



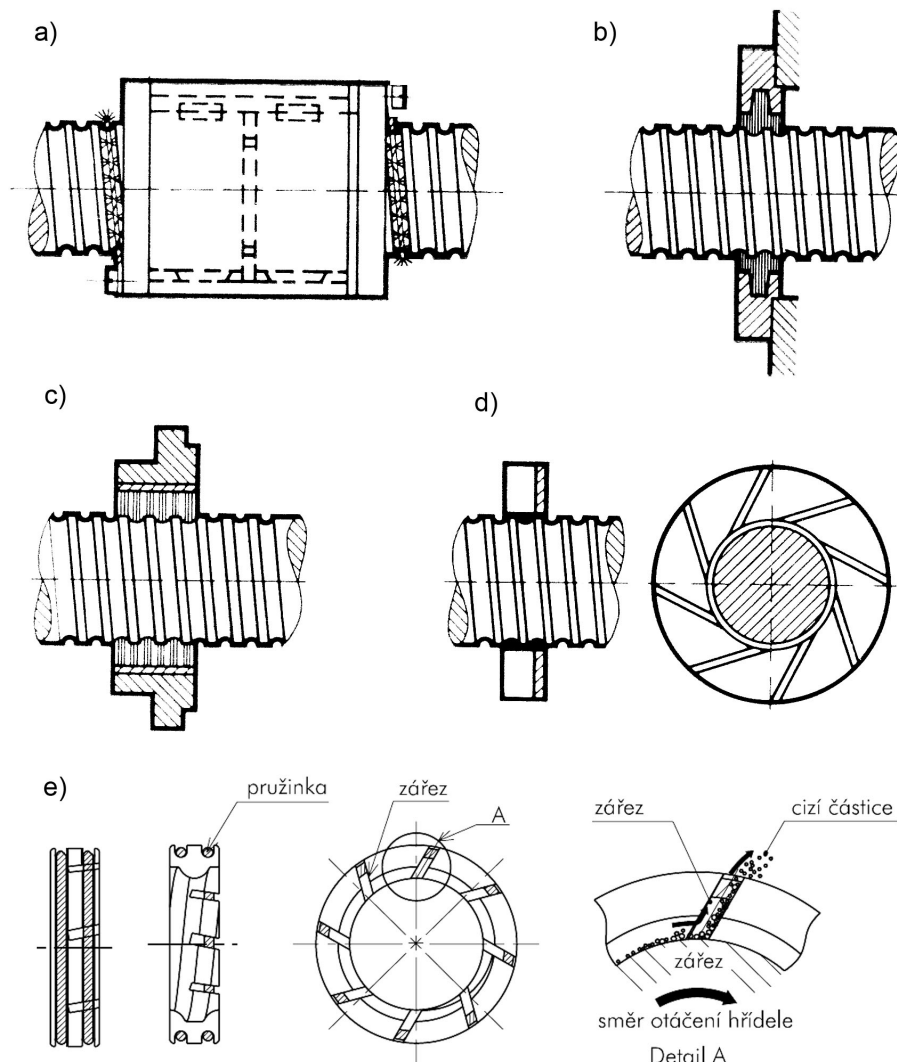
Obr. 13 - Mazací systém QZ [8]



3.8 Stěrače a kryty

Kuličkový šroub je náchylný na poškození kuličkových drah při kontaktu valivého ustrojí s nečistotami. Proto pokud není kuličkový šroub uložen tak aby byl kompletně chráněn je vhodné použít stěrače které neustále čistí kuličkové dráhy. Na Obr. 14 jsou vyznačeny příklady stěračů které jsou doporučeny pro případy, ve kterých je nebezpečí v vnikání nečistot na valivé tělíska kuličkového šroubu. Jako stěračů lze použít kartáčů, plsti nebo měkkého plastu.

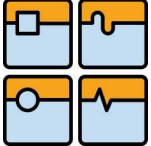
Pokud kuličkový šroub pracuje v prostředí s prachem nečistotami doporučuje se také chránit jej kryty. Mohou to být pružné kryty harmonického typu nebo kovové teleskopické kryty. Význam krytování narůstá se stupňováním požadavků na přesnost a trvanlivost kuličkového šroubu.



Obr. 14 - Různé typy stěračů [2][8]

a) kartáč navinutý do kuličkové dráhy
c) radiální kartáč v matici
e) stírací kroužek W výrobce THK

b) radiální plstěná vložka
d) plastový stěrač

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 18
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

3.9 Provozní teploty

Kolísání teploty v mezích, které jsou běžné v dílnách nemá vliv na funkci kuličkového převodu. Ovšem odchylky od 20°C u velmi přesných šroubů se projeví nepříznivým vlivem na ustavovací nebo odměřovací přesnosti příslušného zařízení.

Pokud je spolehlivě vyřešena otázka mazání kuličkového šroubu, může pak pracovat za provozních teplot od -35°C do +100°C. Samozřejmě musíme brát ohled na související doplňky KŠ jako jsou stěrače, těsnění a kryty.

Kuličkové šrouby mohou pracovat i za teplot přesahujících uvedený rozsah, avšak tím se podstatně snižuje jejich únosnost.

3.10 Materiály

Kuličkové šrouby jsou obvykle vyráběny z oceli jakosti 14 260 (hříděle) a 14 109, 14 209 (matice). Matice a závitová část hříděle jsou zakaleny na tvrdost 60 ± 2 HRC. Jádro a nekalené části hříděle mají pevnost $E_{min} = 700\text{MPa}$.

3.11 Konstrukční novinky

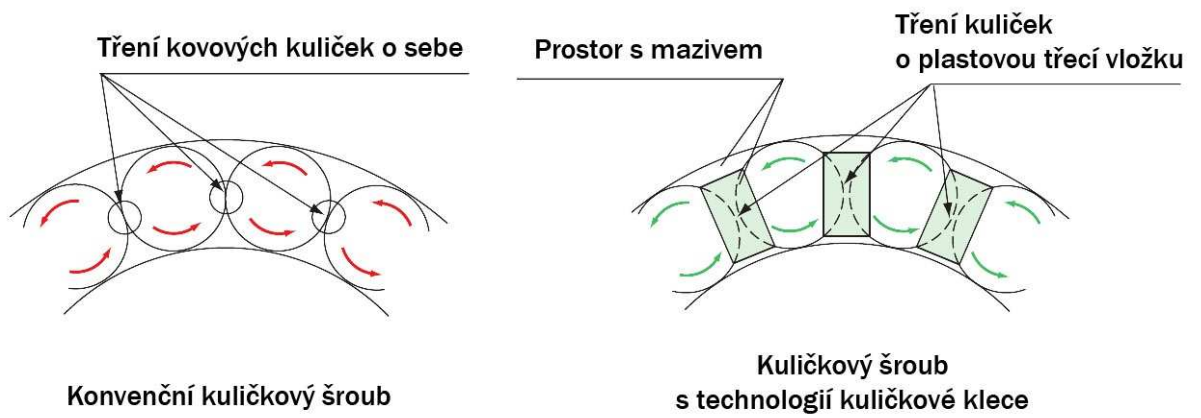
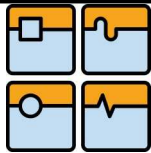
Konstrukční novinkou je technologie kuličkové klece (Caged ball technology). S touto novinkou prodává KŠ japonský výrobce THK.

Principem této konstrukční úpravy je vložení plastových vložek mezi kuličky. Vložky jsou uzpůsobeny tak že cirkulují spolu s kuličkami uvnitř KŠ. Kuličky se tudíž neotírají o sousední kuličky ale o plastovou vložku a tím se dosahuje lepších vlastností. Výrobce THK označuje tuto technologii jako SBN (pro vysoké rychlosti) a nebo jako HBN (pro vysoké zatížení)

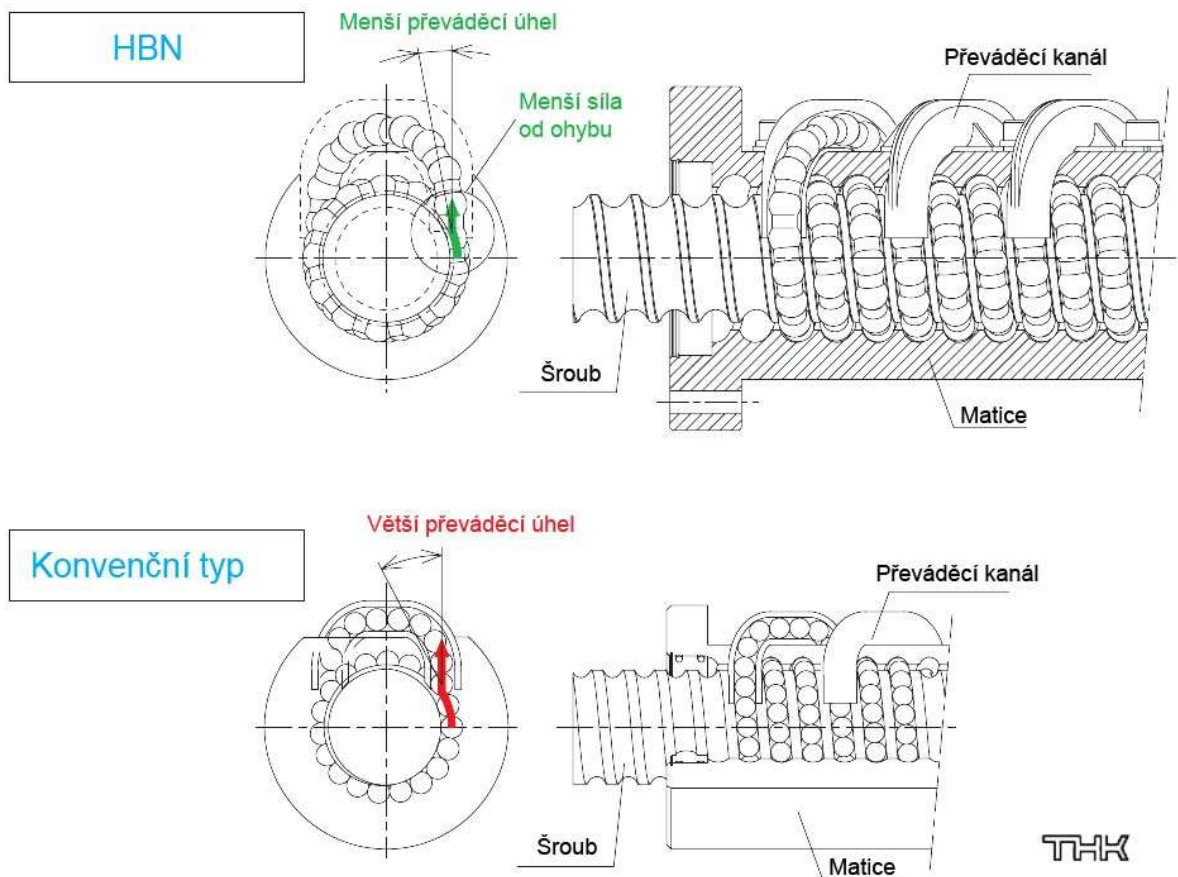
Technologie kuličkové klece udržuje kuličky v konstantním odstupu, takže nedochází k jejich vzájemnému otěru nebo narážení, a tím je dosažena nižší emise hluku a rovnoměrný pohybový moment. Dále technologie kuličkové klece optimalizuje rozdělování maziva, čímž prodlužuje servisní interval.

Technologie kuličkové klece poskytuje výhody jako:

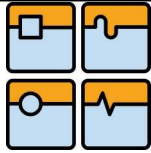
- Možnost použít extrémní zátěže
- Možnost použít vysoké otáčky
- Dlouhý cyklus údržby
- Nízké emise hluku
- Rovnoměrný třecí moment



Obr. 15 - Technologie kuličkové klece [8]

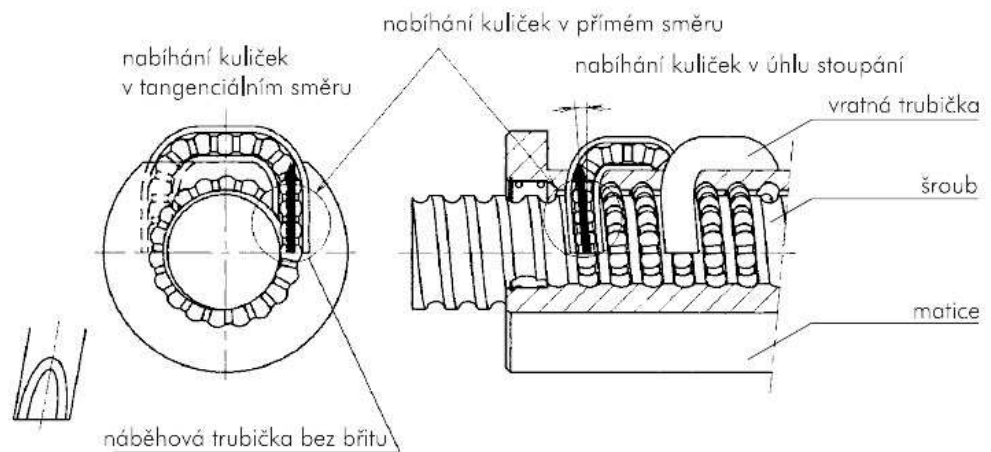


Obr. 16 - Porovnání konvenčního TŠ a THK-HBN s technologií kuličkové klece [8]

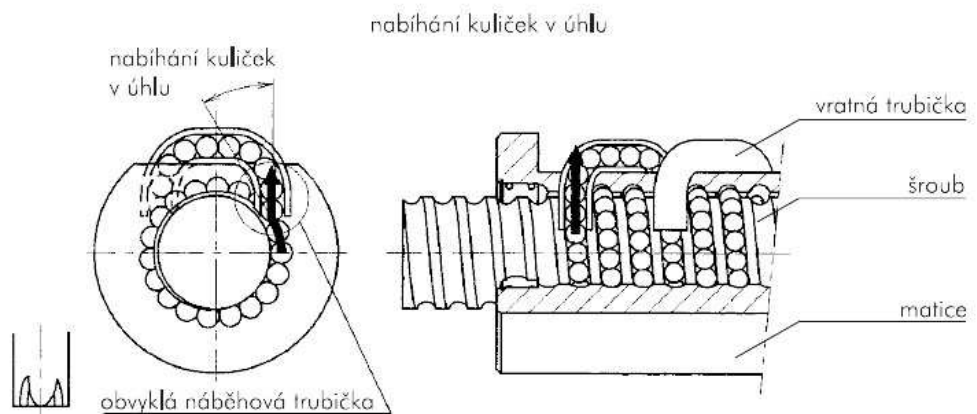


Šroub THK - SBN má optimalizovaný oběh kuliček s náběhem v tangenciálním směru a zesílenou vratnou trubičku bez náběhového bříty, která vede kuličky v úhlu stoupání.

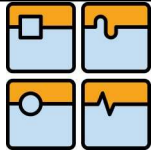
Kuličkový šroub SBN



Obvyklý kuličkový šroub



Obr. 17 - Odlíšnosti standardního KŠ a THK-SBN [8]



4 Dynamické vlastnosti Kuličkových šroubů

4.1 Stanovení trvanlivosti kuličkového šroubu

4.1.1 Výpočet ekvivalentních otáček zatížení

V případě proměnlivých otáček a proměnného zatížení se pro výpočet trvanlivosti dle ISO3408 používají hodnoty n_m a F_{ma} , kde n_m (min^{-1}) jsou střední otáčky a F_{ma} (N) je střední vnitřní axiální zatížení (tj. střední zatížení, které zahrnuje vnější axiální zatížení a předepnutí)

$$n_m = \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{100} \cdot n_j$$

kde q je poměrná doba působení v %

$$F_{ma(1),(2)} = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^n F_{a(1),(2)j}^3 \cdot \frac{n_j}{n_m} \cdot \frac{q_j}{100}}$$

pro konstantní otáčky

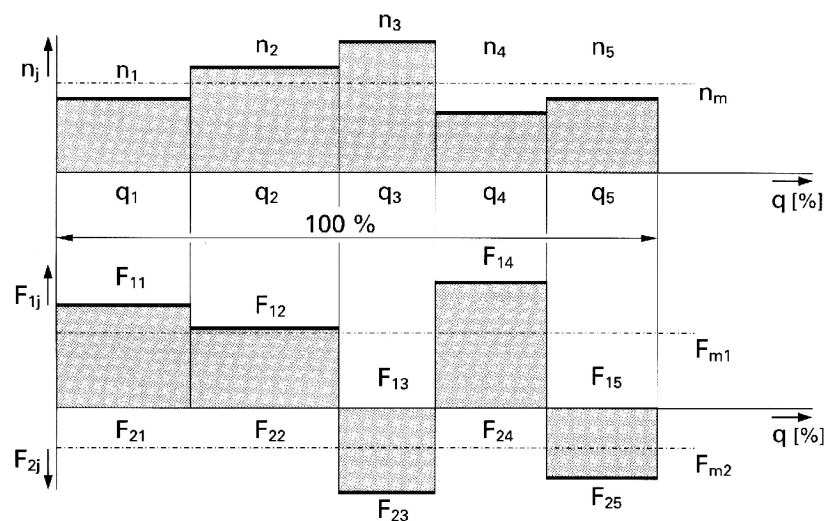
$$F_{ma(1),(2)} = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^n F_{a(1),(2)j}^3 \cdot \frac{q_j}{100}}$$

kde F_a je vnitřní axiální zatížení, které se spočítá dle:

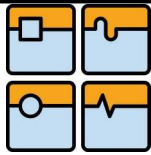
$$F_{a(1),(2)} = F_v \cdot \left(1 + \frac{F_{1,2j}}{2,83 \cdot F_v} \right)^{\frac{3}{2}}$$

kde F_v je předepnutí (standardně $F_v = 0,1 \cdot C_a$), F je síla od vnějšího axiálního zatížení, indexy 1 resp. 2 označují směr zatížení a indexy (1) resp. (2) označují příslušnost k matici 1 resp. 2

Poznámka: Pokud $F_{1,2j} \geq 2,83 \cdot F_v$, pak platí $F_{a(1),(2)j} = F_{1,2j}$



Obr. 18 - Stanovení středního zatížení [1]



4.1.2 Trvanlivost

V otáčkách

$$L_{1,2} = \left(\frac{C_a \cdot f_m}{F_{ma(1),(2)}} \right)^3 \cdot 10^6$$

V hodinách

$$L_h = \frac{L}{n_m \cdot 60}$$

kde C_a je základní dynamická únosnost (N), odpovídající stálému neměnnému zatížení, které kuličkový šroub může teoreticky přenášet při trvanlivosti 1 milionu otáček, f_m je koeficient vlivu jakosti a stavu materiálu (standardně $f_m = 1,25$).

Poznámka: V předchozím výpočtu je uvažováno s předepnutou maticí. U matice s vřtí se do vzorce pro výpočet $L_{1,2}$ dosadí místo střední vnitřní síly $F_{ma(1),(2)}$ střední síla od vnějšího zdroje zatížení F_{m12} .

Pro proměnné otáčky:

$$F_{m1,2} = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^n F_{1,2j}^3 \cdot \frac{n_j}{n_m} \cdot \frac{q_j}{100}}$$

pro konstantní otáčky:

$$F_{m1,2} = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^n F_{1,2j}^3 \cdot \frac{q_j}{100}}$$

4.1.3 Výsledná trvanlivost

Výsledná trvanlivost oboustranně zatíženého kuličkového šroubu s předepnutou maticí nebo maticí s vřtí

V otáčkách:

$$L = \left(L_{(1)}^{\frac{10}{9}} + L_{(2)}^{\frac{10}{9}} \right)^{\frac{9}{10}}$$

V hodinách:

$$L_h = \frac{L}{n_m \cdot 60}$$

Korekce trvanlivosti s ohledem na požadovanou spolehlivost

V otáčkách

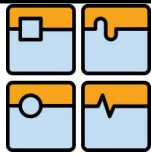
$$L_a = L \cdot f_{a1}$$

V hodinách

$$L_{ha} = L_h \cdot f_{a1}$$

Faktor spolehlivosti $f_{a1}[-]$

Spolehlivost [%]	Fa1[-]
90	1,00
95	0,62
96	0,53
97	0,44
98	0,33
99	0,21



4.1.4 Maximální otáčky hřídele KŠ

Pro maximální otáčky n_{\max} rotujícího hřídele KŠ platí následující vztah:

$$n_{\max} = 0,8 \cdot n_{\text{kr}} \quad n_{\text{kr}} = \frac{1 \cdot 10^7 \cdot f_n \cdot d_0}{L_8^2}$$

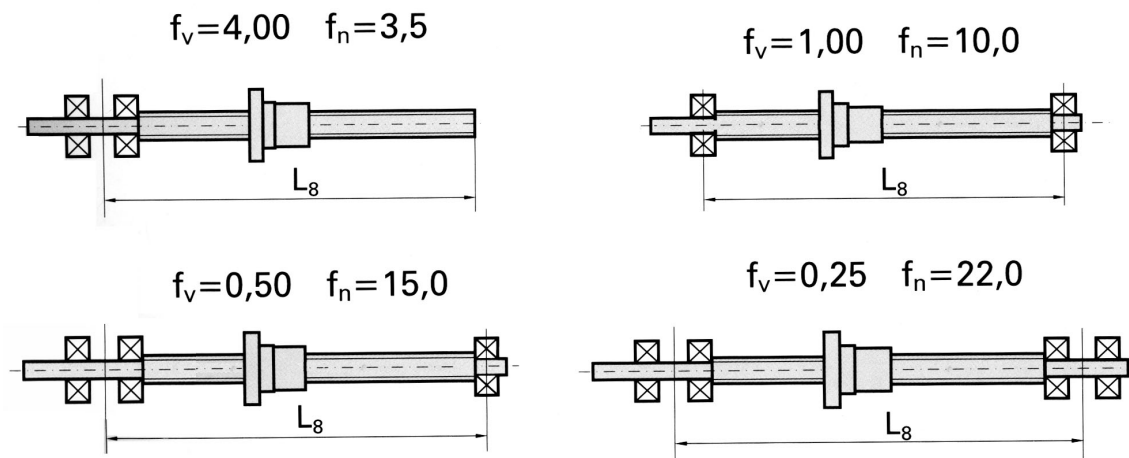
Kde n_{kr} jsou kritické otáčky dané materiálovými vlastnostmi hřídele, jeho uložením a délkou, d_0 je jmenovitý průměr KŠ, L_8 vzdálenost uložení hřídele a f_n je součinitel dle typu uložení hřídele.

4.1.5 Maximální axiální zatížení vzhledem k vzpěrné tuhosti

Pro stanovení maximálního axiálního zatížení $F_{(a)\max}$ s ohledem na vzpěrnou tuhost hřídele KŠ platí následující vztah:

$$F_{(a)\max} = 0,33 \cdot Q_{\text{kr}} \quad Q_{\text{kr}} = \frac{\pi^3 \cdot 500 \cdot d_0^4}{f_v \cdot L_8^2}$$

Kde Q_{kr} je kritická zatěžující síla odvozená od materiálových vlastností hřídele KŠ, jeho uložení a délky. d_0 je jmenovitý průměr KŠ, L_8 vzdálenost uložení hřídele a f_v je součinitel dle typu uložení hřídele.



Obr. 19 - Určení součinitelů f_v a f_n dle typu uložení [1]

4.2 Vůle a předepínání šroubů a matic

4.2.1 Vůle kuličkového šroubu

I když je kuličkový šroub v klidu, dochází vždy k určitému axiálnímu pohybu mezi šroubem a maticí. Tento pohyb se nazývá vůle v závitě. Nežádoucí vůle se většinou projeví při změně směru zatížení a výsledné posunutí vyvolá chybu polohy.

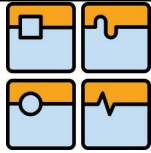
Obvyklá metoda pro odstranění vůle je zavedení předpětí do kuličkového šroubu. Tím se zvýší tuhost, odstraní se axiální vůle a současně se zlepší spolehlivost a přesnost polohování.

Kuličkový šroub s gotickým profilem závitu, který má jednu matici, vykazuje axiální vůli teoreticky 0,02 až 0,08 mm. V podstatě existují 3 způsoby řešení vůle:

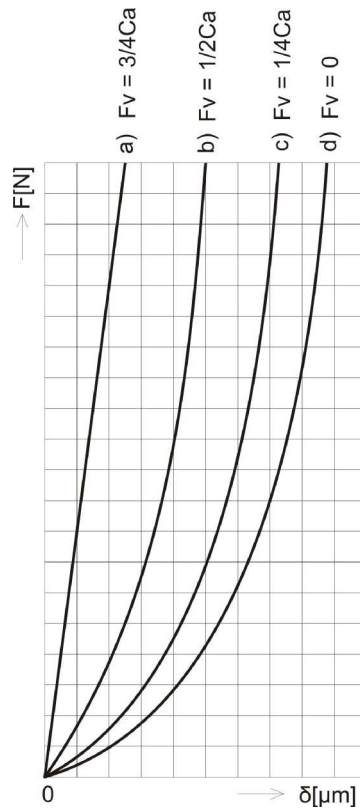
1. Kuličkový šroub má jednu matici. Která má axiální vůli. Toto řešení je vhodné v takových případech, ve kterých zmíněná vůle není na závadu a je kladen důraz na vysokou mechanickou účinnost. Toto je použitelné například u svislých KŠ, u kterých účinkem váhy je vyloučen vliv vůle. Přesnost je zajištěna bez ohledu na to, zda je závaží šroubem zdvíháno nebo spouštěno. Další výhodou aplikace, která vykonává svislý pohyb, spočívá v menším točivém momentu, který je potřebný pro spouštění závaží dolů a který je nižší než při zdvíhání závaží. To znamená, že v některých případech lze použít menší motor. Vždy je však nutné brzdit šroubový hřídel motorem, aby nedošlo k přeběhu.
2. Kuličkový šroub má dvě matice, které jsou seřizeny tak, aby jejich axiální vůle na šroub byla menší než 0,02 mm nebo zcela vymezena. Je to případ např. odměřovacích zařízení, nebo bezslovných ustavovacích systémů, u kterých nejsou zvláštní požadavky na tuhost, avšak záleží na minimálním třecím momentu.
3. Kuličkový šroub má dvě matice, které jsou předepnuté axiální silou odpovídající obvykle třetině únosnosti převodu. Účinkem předepnutí je axiální vůle zcela vymezena a současně je zvýšena tuhost. Předepnutí lze samozřejmě nastavit i na jinou hodnotu případně i vyšší ale je nutné brát v úvahu, že každé předepínání je na úkor životnosti kuličkového převodu a také snížení účinnosti.

Tuhost KŠ posoudíme podle tuhostní charakteristiky (Obr. 20 d), která udává vzájemné posunutí matice a šroubu pro různé hodnoty zatížení F . Jak vidno tuhost se postupně zvyšuje s narůstajícím zatížením.

Předepneme-li maticovou dvojici silou F_v , dosáhneme vyšší tuhosti, která zůstává konstantní při proměnlivém zatěžování i v širším rozsahu. (Obr. 20)



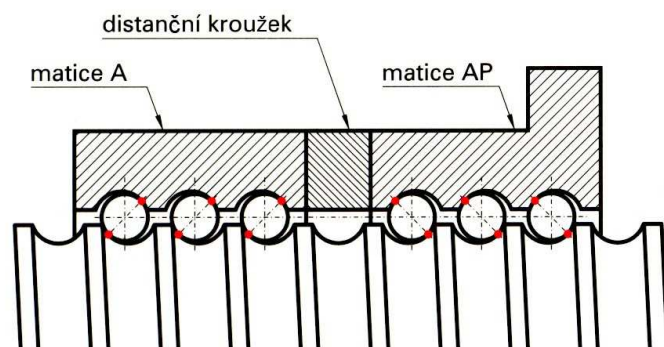
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



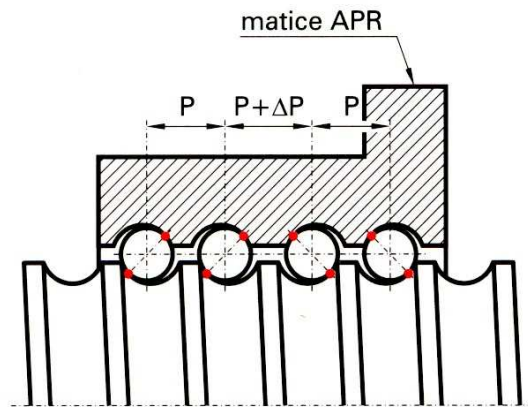
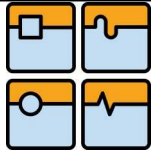
Obr. 20 - Tuhostní charakteristika při různém zatížení

Předpětí se dosáhne použitím předepjaté matice. Axiální síla může být vyvinuta dělenou/tandemovou maticí nebo použitím matice s kuličkami s kladnou tolerancí.

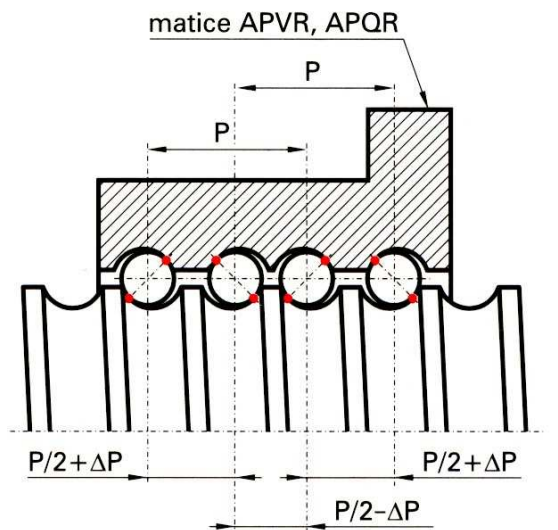
Konstrukční způsoby vyvolání předpětí:



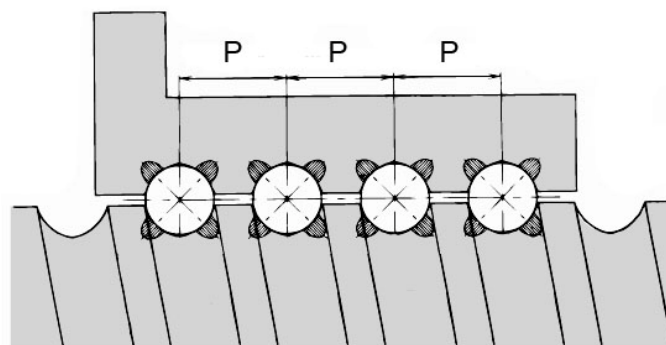
Obr. 21 - Předepnutí vloženým distančním kroužkem [1]



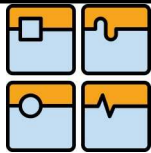
Obr. 22 - Předepnutí diferencí ve stoupání závitu [1]



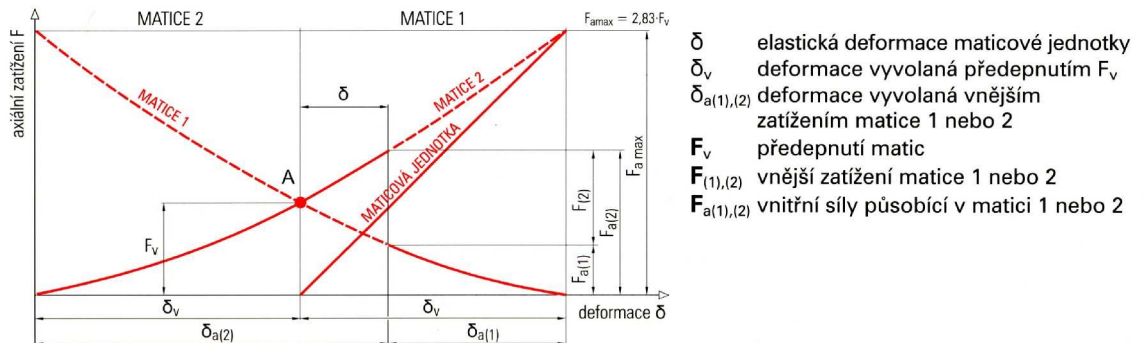
Obr. 23 - Předepnutí diferencí mezi jednotlivými chody závitu [1]



Obr. 24 - Předepnutí použitím kuliček s kladnou tolerancí [8]



4.2.2 Průběh sil a deformací v předepnuté maticové jednotce



Obr. 25 - Průběh deformací v předepnuté maticové jednotce [1]

Diagram tuhosti maticové dvojice předepnuté pevnou vložkou je na Obr. 25. Průsečík A určuje hodnotu předpětí F_v , která je dosažena vložkou o hodnotě $2\delta_v$, vsazenou mezi matice. Zatěžující vnější síla $F_{(2)}$ vyvolávají posunutí šroubu vůči matici o hodnotu δ . Zatížení matic pro tento případ plyne z této rovnice:

$$F_{(2)} = F_{a(2)} - F_{a(1)}$$

Při maximální hodnotě zatížení $F_{a \max}$ ještě nevznikne vůle.

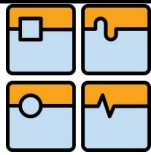
Je vhodné připomenout, že zvyšování předpětí F_v vede ke snížení účinnosti, únosnosti a životnosti kuličkového převodu. A proto je F_v nutné zahrnout do výpočtů. Velikost předpětí volíme s ohledem na tyto vztahy:

A, Osová tuhost kuličkového šroubu roste se zvětšujícím se předpětím, současně narůstá třecí moment a snižuje se účinnost.

B, Při vysokém požadavku na osovou tuhost je vhodné stanovit maximální dovolené napětí.

C, Jestliže požadavky na osovou tuhost nejsou zvláště vysoké, nebo šroub je značně dlouhý, je účelné použít minimální předpětí.

D, Se zvyšováním předpětí se zvětšuje oblast zatížení, při kterém je převod samo-brzdící.



5 Přesnost kuličkových šroubů

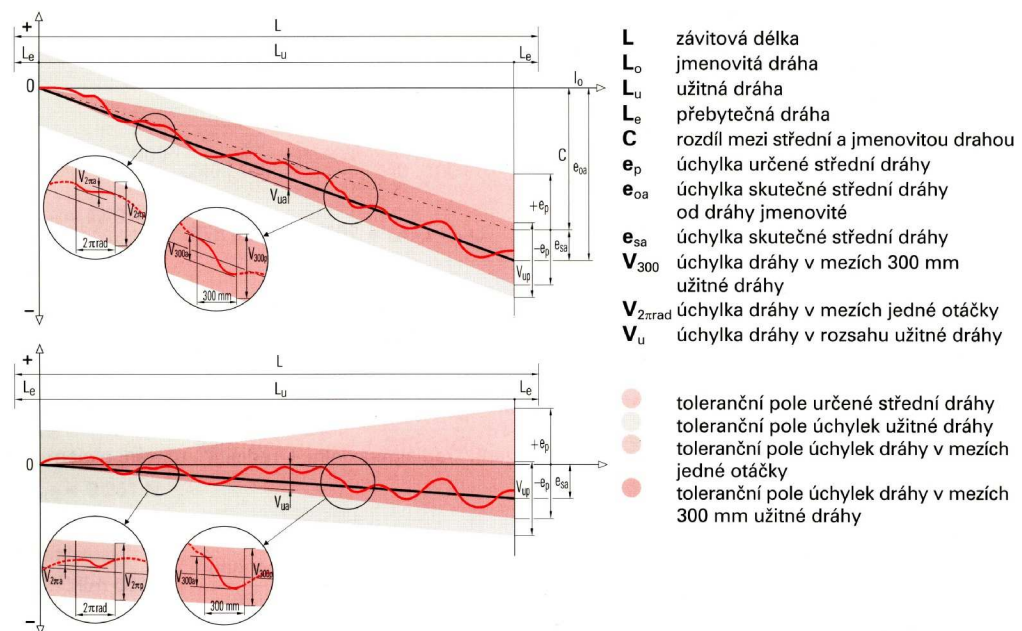
5.1 stupně přesnosti

Z hlediska přesnosti je nejdůležitější veličinou stoupání závitu na šroubu a v matici.

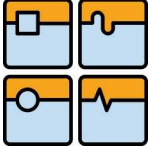
Kuličkové šrouby jsou rozděleny do pěti stupňů přesnosti a pro každý stupeň jsou stanoveny mezní úchytky stoupání. Součtová úchytky skutečného součtového stoupání se udávají a měří na délce 300mm v libovolném místě závitového stoupání a na celkové závitové délce. Hodnoty uvedených jednotek IT mají platnost plus – minus. Pro přejímku KŠ je rozhodující součtová úchytky stoupání na 300mm.

Stupeň přesnosti	Třída přesnosti	Rozsah dovoleného kolísání skutečného stoupání V_p [μm]	Příklady použití
1	IT 1	± 2	Měřicí stroje a přístroje, velmi přesné výrobní stroje na dokončovací operace
2	IT 3	± 3	Přesné programově řízené obráběcí a tvářecí stroje na dokončovací operace
3	IT 5	± 5	Produkční programově řízené obráběcí a tvářecí stroje
4	IT 7	± 5	Řídící, manipulační a transportní zařízení
5	IT 9	± 10	Stroje a zařízení bez požadavků na přesnost

5.2 Parametry geometrické přesnosti dráhy kuličkového šroubu



Obr. 26 - Parametry geometrické přesnosti dráhy kuličkového šroubu [1]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 29
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

5.3 Kontrola a korekce pohonu s kuličkovým šroubem

Pro uživatele je směrodatné proměření kompletní sestavy pohonu s kuličkovým šroubem, tj. šroub s maticí, uložení šroubu, vedení a odměřovací systém.

5.3.1 Auto-kalibrace řídicím systémem.

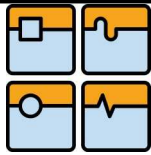
Při této metodě řídicí systém pohonu porovnává údaje snímače na hřídeli motoru s údaji lineárního inkrementálního snímače umístěného na vedení pohonu. Proměření odchylky zdvihu šroubu se provede ve 4 a více bodech pro každou otáčku šroubu a odchylky jsou uloženy do paměti řídicího systému. Hodnoty korekcí mezi body měření jsou vypočítány lineární interpolací.

Nejistota polohování je dána nejistotou určení polohy lineárním inkrementálním snímačem. Například firma Heidenhain garantuje u zapouzdřených lineárních snímačů při rozlišovací schopnosti 50 nm absolutní hodnotu odchylky do 3 mikrometrů pro délky do 4 m.

5.3.2 Kalibrace externím měřidlem – interferometrem.

Moderní řídicí systémy obráběcích strojů jsou schopny použít ke korekci navíc i externího snímače – laserového interferometru. Hlavice interferometru s laserem se upevní na rám stroje a na pohyblivé části stroje je umístěno odrazné zrcadlo. Interferometr je schopen kromě posuvu (i ve více osách) proměřit i průhyb vedení a rychlost pohybu.

Laserový interferometr firmy Renishaw garantuje při měření posuvu rozlišení 1 nm a absolutní odchylku 0,5 ppm, tedy 1 mikrometr na 2 m posuvu.



6 Teleskopický kuličkový šroub – KSK Kuřim

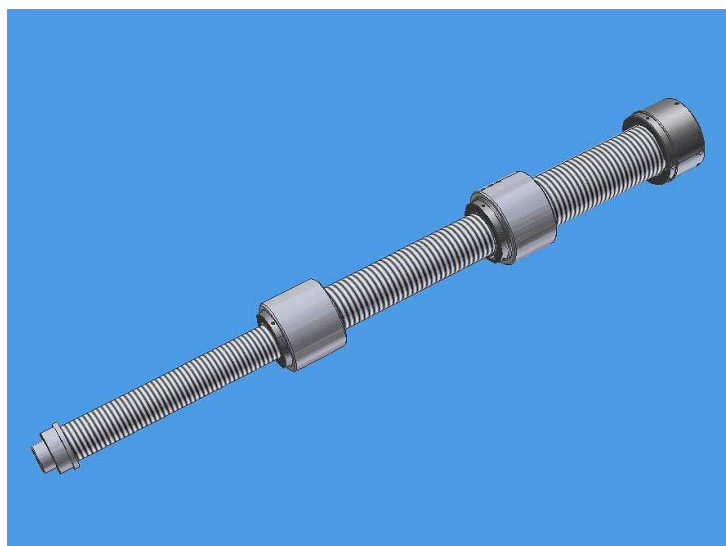
6.1 Popis kuličkového šroubu

Představuje soustavu 2 a více do sebe vzájemně zašroubovaných kuličkových šroubů. Jejichž matice mají zároveň funkci ložiska pro uložení dalšího hřídele soustavy. Unikátní systém vzájemných vazeb umožňuje současné otáčení všech stupňů soustavy teleskopického šroubu a tím dosazení několikanásobného zdvihu. Například třístupňový TKŠ potřebuje pro požadovaný zdvih jen třetinu otáček v porovnání s klasickým KŠ. Chová se tedy jako KŠ s trojnásobným stoupáním při zachování vyšší tuhosti jednotlivých stupňů TKŠ oproti klasickému KŠ s vysokým stoupáním.

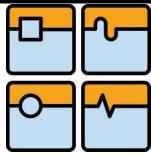
Teleskopický KŠ umožňuje, vzhledem ke své zastavovací délce v zasunutém stavu, velký zdvih. Tato vlastnost může být s výhodou využita všude tam, kde je třeba řešit zdvih bez možnosti aplikace průchozích a dlouhých zdvihových mechanismů.



Obr. 27 - Teleskopický kuličkový šroub v zašroubovaném stavu [13]

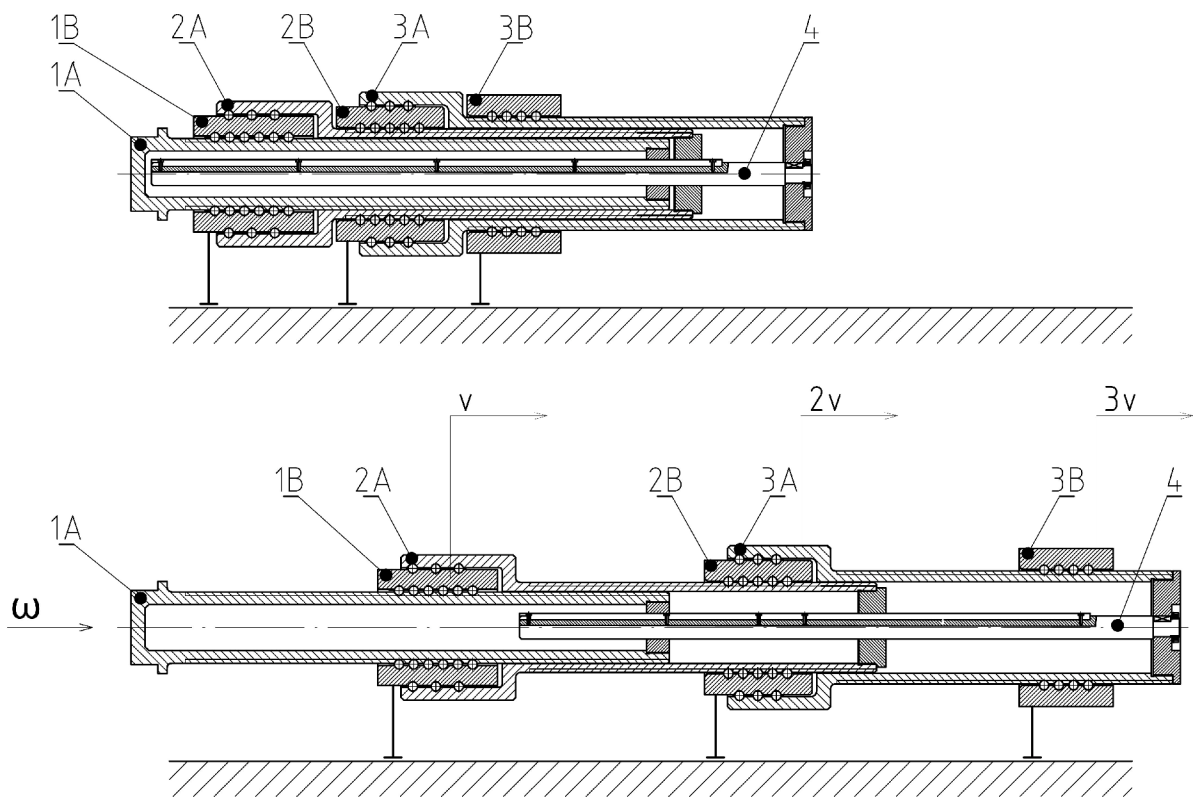


Obr. 28 - Teleskopický kuličkový šroub ve vyšroubovaném stavu [13]



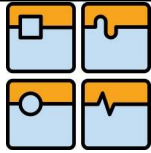
6.2 Kinematika TKŠ

Podstatou funkce TKŠ je současný pohyb matic na všech šroubech najednou. Hřídele jednotlivých stupňů jsou propojeny vnitřní posuvnou hřídelí která přes pero přenáší krouticí moment na ostatní stupně. Při otáčení hřídek prvního stupně se také otáčí, stejnou úhlovou rychlostí, hřídele dalších stupňů TKŠ. Jednotlivé hřídele se tedy otáčejí společně a mohou se vzájemně osově posouvat. Matice KŠ na každém stupni se neotáčejí a je potřeba je uložit tak aby se mohly posouvat pouze osově a zároveň umožňovaly ještě nesení dalších stupňů. Následující stupeň se na matici protáčí proto je potřeba zajistit konstrukčně matici aby zároveň z vnější strany sloužila jako ložisko.



Obr. 29 - Kinematické schéma teleskopického kuličkového šroubu

Na schématu je třístupeňový TKŠ kde je vstupní rotační pohyb (ω) přiváděn na hřídel prvního stupně (**1A**) a výstupem je lineární pohyb matice na třetím stupni (**3B**). Hřídel prvního stupně (**1A**) přenáší krouticí moment na ostatní hřídele přes vnitřní hřídel (**4**). Při otáčení hřídek se matice po svých šroubech posouvají rychlostí v . Stupeň 3 (**3A+3B**) je nesen na matici stupně 2 (**2B**) a stupeň 2 (**2A+2B**) je nesen na matici stupně 1 (**1B**). Toto způsobuje že se celý hřídel 2. stupně (**2A**) se posouvá rychlostí v a na jeho matici (**2B**) nesený hřídel 3. stupně (**3A**) se posouvá rychlostí $2v$ a jeho matice (**3B**) se posouvá výslednou rychlostí $3v$.



6.3 Využití teleskopického kuličkového šroubu

Výhodou teleskopické konstrukce oproti klasické je že teleskopické uložení nevyžaduje průchozí uložení což je výhodou například u různých manipulačních plošin. TKŠ lze také použít jako náhradu za pneumatické a hydraulické posuvy. Polohování a řízení TKŠ se provádí jednoduše pomocí servomotoru. TKŠ lze využít v obráběcích strojích s nekonvenční kinematickou strukturou (hexapody).

Spojením TKŠ s moderními střídavými servomotory je možné zkonstruovat lineární aktuátory s minimálními nároky na údržbu a přesným řízením všech dynamických parametrů. Perspektivní je také použití lineárních aktuátorů s TKŠ ve vojenské a letecké technice jako náhrada za pneumatické a hydraulické posuvy, s výhodou snadného a přesného řízení a polohování.



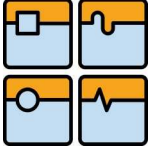
Obr. 30 - Lineární aktuátor s jednostupňovým kuličkovým šroubem [13]



Obr. 31 - Model třístupňového TKŠ [13]

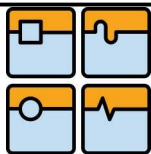


Obr. 32 - Aplikace TKŠ [13]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 33
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

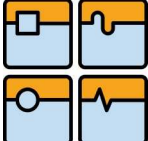
7 Závěr

Kuličkové šrouby jsou určeny pro použití v pohybových ústrojích vyžadujících vysokou přesnost, účinnost, tuhost a životnost. Jejich prostřednictvím lze vyrábět ekonomické, spolehlivé a vysoce produktivní mechanismy ve všech oblastech všeobecného strojírenství, v automobilovém a leteckém průmyslu, v jaderné a vojenské technice, v medicínské a měřicí technice, při konstrukci automatizovaných linek nebo jednoúčelových strojů.



8 Seznam použitých symbolu a značek

Značka	Jednotka	Popis
d_k	mm	průměr kuličky
D_j	mm	jmenovitý průměr KŠ
R	mm	poloměr profilu kuličkové dráhy
n_m	min^{-1}	střední otáčky
F_{ma}	mm	střední vnitřní axiální zatížení
q	%	poměrná doba působení zatížení
F_v	N	předepínací síla
C_a	N	základní dynamická únosnost šroubu
F_a	N	vnitřní axiální zatížení
L	-	trvanlivost v otáčkách
L_h	hod	trvanlivost v hodinách
f_m	-	koeficient vlivu jakosti materiálu
f_{a1}	-	koeficient spolehlivosti
n_{max}	min^{-1}	maximální otáčky
n_{kr}	min^{-1}	kritické otáčky
Q_{kr}	N	kritická zatěžující síla
d_0	mm	jmenovitý průměr hřídele
L_8	mm	vzdálenost uložení hřídele
f_v	-	součinitel dle typu uložení hřídele
f_n	-	součinitel vlivu otáček dle typu uložení
δ	mm	deformace maticové jednotky
δ_v	mm	deformace vyvolaná předepnutím
δ_a	mm	deformace vyvolaná vnějším zatížením
F	N	vnější zatížení
F_a	N	vnitřní síly působící v matici
L	mm	závitová délka
L_0	mm	jmenovitá délka
L_u	mm	užitná délka
L_e	mm	přebytečná dráha
C	mm	rozdíl mezi střední a přebytečnou dráhou
e_p	mm	úchylka určené střední dráhy
e_{oe}	mm	úchylka skutečné střední dráhy od jmenovité
e_{sa}	mm	úchylka skutečné střední dráhy
V_{300}	mm	úchylka dráhy v mezích 300mm
$V_{2\pi\text{rad}}$	mm	úchylka dráhy v mezích jedné otáčky
V_u	mm	úchylka dráhy v rozsahu užité dráhy

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 35
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

9 Použité zdroje

- [1] KSK KUŘIM. *Katalog výrobků*. aktualizace 01/2007.
- [2] TOZ KUŘIM. *Recirkulační kuličkové šrouby*.
- [3] STEINMEYER. *Antriebstechnik Kugelgewindetriebe*. aktualizace 10/1997.
- [4] KSK KUŘIM. Příloha přihlášky do soutěže o nejlepší exponáty při 49. MSV 2007 Brno. *Teleskopický kuličkový šroub*.
- [5] THÜRING, J. *Technika a trh. Kuličkové šrouby nejenom v obráběcím procesu*. [online]. Vydáno: 11/2008. Dostupné z: http://www.technikaatrh.cz/index.php?sec=rubrika&id_zprava=15043#zprava_15043
- [6] KSK KUŘIM, J. *Technika a trh. Okružovaný kuličkový šroub*. [online]. Vydáno: 11/2008. Dostupné z: http://www.technikaatrh.cz/index.php?sec=rubrika&id_rubrika=33&id_zprava=14933#zprava_14933
- [7] KSK KUŘIM, *Okružované kuličkové šrouby*. [online]. Vydáno: 27. 1. 2009. Dostupné z: <http://www.ks-kurim.cz/aktuality/okruzovane-kulickove-srouby-a834004>
- [8] HENNLICH, [online]. Dostupné z: <http://www.hennlich.cz/index.php?dokument=5848>
- [9] MARTING, [online]. Dostupné z: <http://www.marting.cz/ks.htm>
- [10] DESIGN WORLD, [online]. Poslední aktualizace 15. 10. 2008. Dostupné z: <http://www.designworldonline.com/articles/2797/21/Thomson-NEFF%E2%84%A2-Precision-Rolled-Metric-Ball-Screws.aspx>
- [11] HEIDENHAIN, [online]. Dostupné z: <http://www.heidenhain.cz/>
- [12] RENISHAW, [online]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/1030.aspx>
- [13] KSK KUŘIM, Archiv obrázků KSK Kuřim.