

FEM ANALYSIS OF PRELOADED BALL OF BALL SCREW APPARATUS

L. Novotný*

Summary: *The paper deals with kinematics of the ball screw mechanism as a single point that is moved on helical sweep. The second part studies the motion of the ball as a deflector in dependency on deflector dimensions and ball speed. At the end of the paper is shown contact analysis between ball and helical surface of the nut and screw.*

1. Úvod

Do skupiny mechanismů, které slouží pro převod rotačního pohybu na translační patří kuličkový šroub a matice. Jedná se o převážně používaný mechanismus pro pohon přímočarých os obráběcích strojů, který je stále vyvíjen a modernizován za účelem zlepšení technických parametrů a vlastností. Funkce kuličkového šroubu a matice je založena na odvalování kuličky vložené mezi šroub a matici. Kuličky se v matici odvalují obdobně jako v kuličkovém ložisku s tím rozdílem, že musí závitovou část opustit a jsou převedeny na začátek činné závitové části matice. Aby byly silové poměry mezi kuličkou co nejlepší, je profil závitu gotický. Zatížení způsobují vnitřní síly (předpětí) a zatížení vnější (řezné síly, gravitační a odstředivé účinky na pohybované hmoty).

2. Analytické výpočty kuličkových šroubů

Analytické modelování kuličkového šroubu je založeno na matematických nástrojích analytické geometrie, teorii křivek ale i maticovém počtu. Základním tvořícím prvkem kuličkového šroubu je šroubovice.

Parametrické vyjádření šroubovice:

$$x(t) = r \cdot \cos(t), \quad y(t) = r \cdot \sin(t), \quad z(t) = P \cdot t \quad (1)$$

Prvá derivace:

$$\dot{x}(t) = -r \cdot \sin(t), \quad \dot{y}(t) = r \cdot \cos(t), \quad \dot{z}(t) = P \quad (2)$$

* Ing. Lubomír Novotný: Detašované pracoviště TOSHULIN a.s.; Čechyňská 18; 602 00 Brno; tel.: +420.543 255 093; e-mail: lubomir.novotny@toshulin.cz, nolub@post.cz

Druhá derivace:

$$\ddot{x}(t) = -r \cdot \cos(t), \quad \ddot{y}(t) = -r \cdot \sin(t), \quad \ddot{z}(t) = 0 \quad (3)$$

Tečna v bodě:

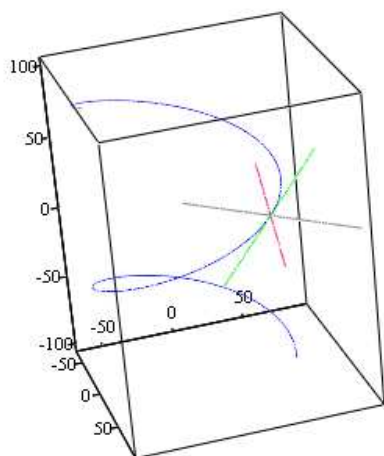
$$T_x(\alpha) = r \cdot (\cos(t_0) - \alpha \cdot \sin(t_0)), \quad T_y(\alpha) = r \cdot (\sin(t_0) + \alpha \cdot \cos(t_0)), \\ T_z(\alpha) = P(t_0 + \alpha) \quad (4)$$

Normála:

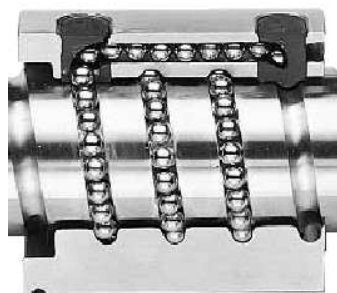
$$N_x(\alpha) = r \cdot (1 - \alpha) \cos(t_0), \quad N_y(\alpha) = r(1 - \alpha) \sin(t_0), \quad N_z(\alpha) = P \cdot t_0 \quad (5)$$

Binormála:

$$B_x(\alpha) = r \cdot (\cos(t_0) + P \cdot \alpha \cdot \sin(t_0)), \quad B_y(\alpha) = r \cdot (\sin(t_0) - P \cdot \alpha \cdot \cos(t_0)), \\ B_z(\alpha) = P \cdot t_0 + r^2 \cdot \alpha \quad (6)$$



Obrázek1 Šroubovice a její tečna, normála a binormála



Obrázek2 Řez kuličkovým šroubem (firma Korta)

3. Numerické výpočty kuličkových šroubů – kinematika, dynamika

Převáděč může mít různé konstrukční provedení. S jeho tvarem souvisí vlastnosti kuličkových šroubů. Dlouhý převáděč a tedy velký počet kuliček je předpokladem pro vyšší pasivní odpory a tím se snižuje schopnost kuliček převáděčem procházet, proto je snaha navrhovat převáděče co možná nejkratší. Je mnoho parametrů, které je při návrhu převáděče potřeba zohlednit, jako jsou například stoupání a průměr šroubu, průměr kuličky, otáčky a další. Jedním z parametrů je také vztah mezi vnitřním průměrem převáděče a průměrem kuličky.

Byl vytvořen model trubkového převáděče, zajišťující cirkulaci kuliček mezi třemi závity. Převáděč sestává z tří přímých částí a dvou zakřivených ploch. Vzdálenost vstupního a výstupního otvoru je jednoznačně dána geometrii (stoupáním, průměrem) zvoleného šroubu, zaoblení bylo navrženo tak, aby byla zaručena konstrukční realizace takového převodu. Výsledný geometrický model je zobrazen na obrázku 3. Hodnoty vnitřního průměru převáděče byly pro jednotlivé varianty voleny 10,5; 11,0; 11,5 mm a kulička o průměru 10,3 mm. Výrobní nepřesnosti, ať rozměrové nebo tvarové, nebyly uvažovány.

Na takto vytvořeném převaděči bylo modelováno chování procházející kuličky, která vstoupila do trubky rychlostí odpovídající posuvové rychlosti $3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Vyčíslená rychlost udělená středu kuličky otáčejícím se šroubem byla převedena do souřadného systému převaděče.



Obrázek3 Geometrický model převaděče

Modelovány byly tři stavy označené V1, V2 a V3. Varianta V1 představuje stav bez pasivních odporů. Zbývající dvě varianty modelují provoz při suchém (součinitel tření 0,1) a kluzném tření. Protože se kulička může v kanálku klouzat, ale také se valí, není stanovení vhodné velikosti součinitele tření popisující reálný stav jednoznačnou záležitostí. Volená velikost součinitele tření je 0,04.

Při sledování chování průchodu kuličky převaděčem můžeme sledovat několik veličin. Byla zvolena referenční vzdálenost 60 mm (na základě poznatků ze zkušebních výpočtů) ve směru osy x a sledována doba, za jak dlouho kulička dorazí do tohoto místa. Výsledné doby jsou uvedené v tabulce 1.

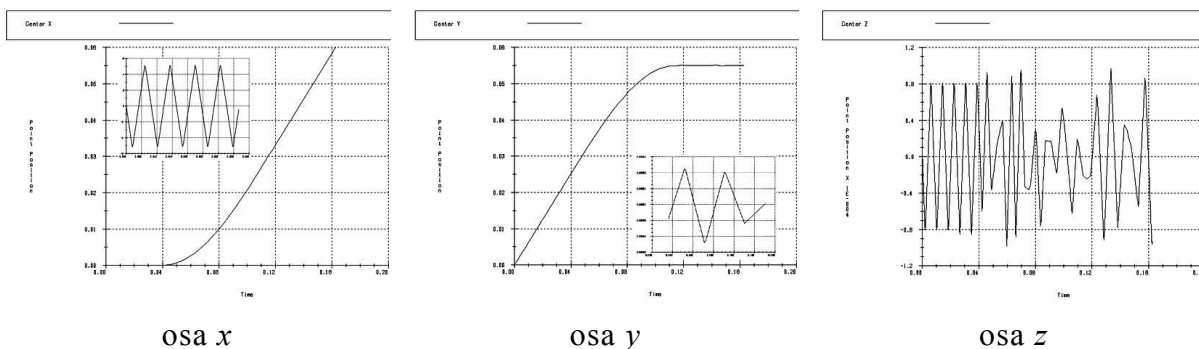
Tabulka1 Doby trvání průběhu kuličky převaděčem

Vnitřní průměr převaděče [mm]	V1	V2	V3
	čas [s]	čas [s]	čas [s]
10,5	0,1626	0,2838*	0,2928*
11,0	0,1632	0,1925	0,1924
11,5	0,1642	0,1873	0,1872

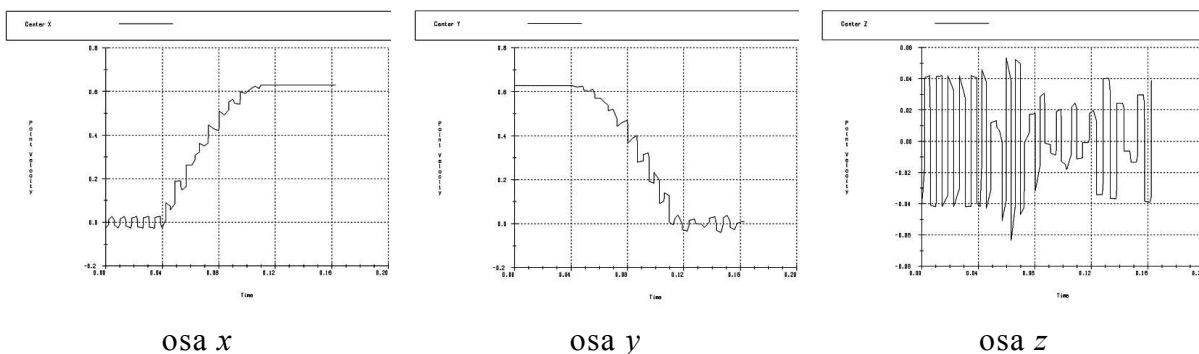
* kulička nedospěla do referenčního místa ve směru osy x a zastavila se ve vzdálenosti 54.31 mm pro variantu V1 a 54,40 mm pro variantu V2 od počátku souřadného systému.

Na obrázku 4 je zobrazen průběh polohy v osách x , y , z středu kuličky v závislosti na čase pro průměr trubky 10,5 mm. Detaily na obrázcích jsou zvětšené části (s časovou osou rovnoběžné) neznatelné v grafech. Například ve směru osy x můžeme vysledovat v úvodní válcové části „oscilace“ okolo střední polohy a následný rychlý nárůst polohy způsobený zakřivováním převaděče. Obdobné avšak opačně orientované chování je možné sledovat ve směru osy y , v ose z se kulička pohybuje okolo střední polohy po celé délce trubky. Obrázek 5 zobrazuje rychlosti středu kuličky a poslední obrázek 6 zobrazuje průběh zrychlení středu kuličky v osách x , y , z . Časový krok výpočtů byl volen 0,01 až 0,0001 sekundy. Za těchto

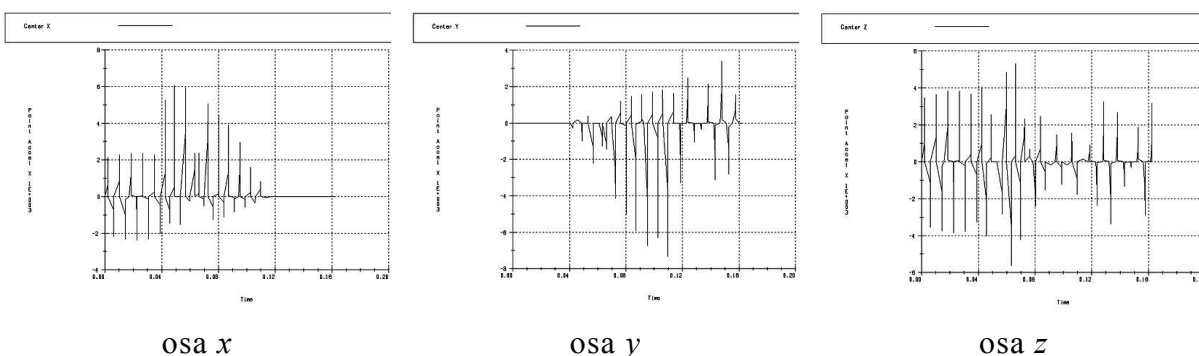
parametrů byly zachyceny i píky zrychlení, hrubší časový krok způsobil znatelné vyhlazení křivek zrychlení. Tento výpočet chování kuličky naráží na softwarové omezení dnes již starší verze programu Pro/MECHANICA 2000. Modelu se nedalo využít pro libovolnou rychlost kuličky (resp. libovolného vztahu rychlost kuličky a geometrie, součinitele tření...). Výpočet neproběhl v případě kontaktu plocha–hrana, ale minimální změna vstupních parametrů kuličky vedla k získání konečných výsledků.



Obrázek4 Grafy polohy středu kuličky



Obrázek5 Grafy rychlosti středu kuličky v závislosti na čase



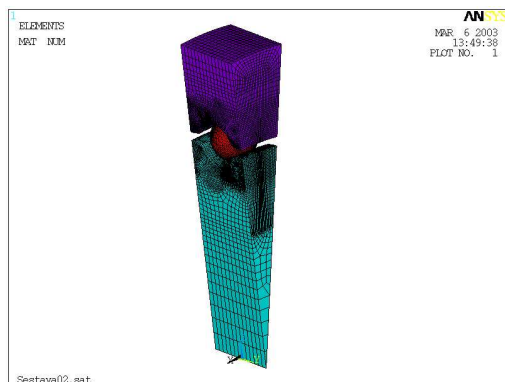
Obrázek6 Grafy zrychlení středu kuličky v závislosti na čase

4. FEM výpočty kuličkových šroubů – statika

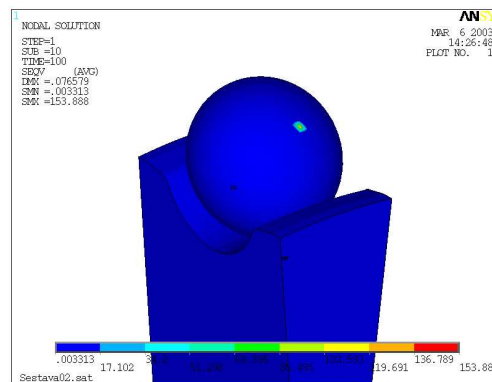
Výpočty kuličkového šroubu lze zaměřit na:

- 1) výpočet pro dosažení maximální účinnosti,
- 2) výpočet pro dosažení maximální únosnosti.

Výpočty metodou konečných prvků mají, na rozdíl od výše uvedeného přehledu analytických výpočtů, schopnost postihnout reálné chování kuličky při zatížení. Profil závitů kuličkového šroubu může mít kruhový nebo gotický profil. Modelování je komplikováno samotným šroubovým tvarem ploch, protože kontakt probíhá v rovině kolmé ke stoupání, v přímce obecně skloněné k ose šroubu. Metoda konečných prvků je nástrojem pro výpočty za účelem dosažení maximální (optimální) únosnosti.



Obrázek7 FEM model výseče kuličkového šroubu



Obrázek8 Redukované napětí v okolí kontaktu kulička-matice

Model byl vytvořen z elementů SOLID45 a kontaktní plochy mezi tělesy jsou tvořeny elementy TARGE170 a CONTA174. Model výseče kuličkového je tvořen pouze mapovanou sítí. Okrajové podmínky byly aplikovány v lokálních souřadných systémech, ztotožněnými s bočními plochami výseče. Šroubu byl navíc zamezen posuv ve směru jeho osy. Deformační zatížení bylo aplikováno na matici.

6. Závěr

Příspěvek zabývající se chováním kuliček v převaděči a v závitě kuličkového šroubu ukazuje možnosti, jakých způsobů modelování se dá pro tento mechanismus využít a zjednodušení, která lze nebo jsou potřebná učinit. Z výše uvedených výsledků závislosti doby průchodu kuliček na čase je patrné, že poměr mezi vnitřním průměrem převaděče a kuličkou ovlivňuje více než velikosti pasivních odporů. FEM výpočet sestavy kuličkového šroubu a matice ukazuje mimo napětí a kontaktních tlaků změnu kontaktního úhlu při zatížení šroubu.

7. Literatura

ANSYS 6.1 (2002) Documentation
 Pro/MECHANICA 2000 (2000) Documentation
 Korta (2002) Ball screws Technical Catalogue