

Návrh odpružení rotačních orgánů zemědělských strojů

Bc. Miroslav Mrňák

Vedoucí práce: Ing. Pavel Syrovátka

Cílem této práce je navrhnout odpružení rotačních orgánů zemědělských strojů. Konstrukční návrh by měl být jednoduchý, aby navržené řešení nebylo finančně nákladné. Zároveň musí být konstrukční celek pevný a stabilní, aby nedošlo po krátké době k porušení. Práce obsahuje analýzu zatížení současného řešení včetně experimentálního měření v terénu, návrh nového řešení a MKP analýzu nově navrženého uložení.

Klíčová slova

Odpružení, Pryž, Guma, Silentblok, Tenzometrické měření, Analýza dat, MKP, Abaqus

1. Úvod

Úkolem je navrhnout odpružení rotačních orgánů zemědělských strojů s cílem zvýšení životnosti ložisek v uložení. V zemědělství se jedná o velmi namáhané díly, které musí vydržet bez poruchy celou sezónu. Zemědělec potřebuje v relativně krátké době zasít nebo naopak sklízet úrodu. Vše závisí na mnoha faktorech, jako je např. počasí. Pokud je zrovna ten vhodný čas sklízet úrodu a zároveň nám to dovoluje i počasí, není možné ztrácet čas opravou potřebného stroje. Právě proto je kladen velký důraz na kvalitu a bezporuchovost strojů.

Abychom mohli postoupit k navrhování konstrukčního řešení odpružení stroje, bylo nejprve potřeba zjistit velikosti sil a rázů, které nám vstupují do ložisek. A na tyto hodnoty celý konstrukční prvek dimenzovat. Proto proběhla dvě tenzometrická měření přímo v terénu. Cílem bylo zjistit radiální a axiální síly vstupující do ložisek. Jelikož dosavadní konstrukční řešení neobsahuje žádné tlumící či pružící prvky, všechny rázy nám vstupují přímo do ložisek. Na tyto rázy nejsou ložiskové jednotky samozřejmě dimenzovány a tak se stává, že po poměrně krátké době se ložisko porouchá a je nutná výměna.

2. Přiblížení problému

Všechna měření byla provedena pomocí strojů zpracovávající půdu od firmy STROM. Na obr. 1 je vidět jeden ze strojů, konkrétně zde STROM ATLAS EO a šipka znázorňuje problematické místo.



obr. 1 – Znázornění problematického místa

Následující *obr. 2* ukazuje stroj v rozebraném stavu, aby bylo možné vidět současné ložisko. Jedná se o standartní kuličkové naklápěcí ložisko od firmy PEER. Sériové číslo je UCF210-50MM-MFTRL.



obr. 2 – Stroj v rozebraném stavu

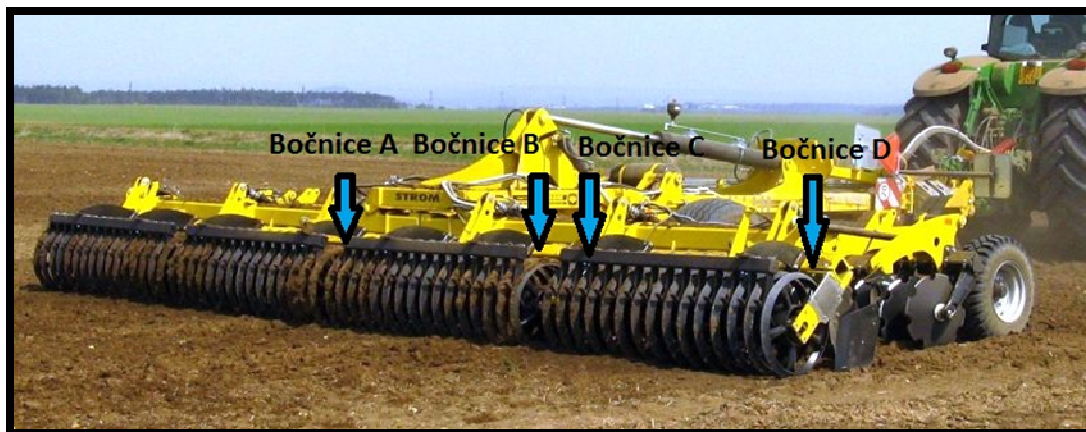
3. Příprava měření

3.1 Postup měření

Pro získání potřebných dat byly k měření použity stroje SWIFTERDISC a ATLAS. Síly se měřily na čtyřech bočnicích (žluté prvky držící ložiskové domky na *obr. 3*), které byly oblepeny tenzometry. Bočnice byly pro názornost pojmenovány A, B, C a D. Na každé bočnici A a D byly instalovány dva páry tenzometrů pro měření radiálních i axiálních reakcí. Na bočnicích B a C pak už jen jeden pár pro měření pouze radiálních reakcí. Uspořádání jednotlivých bočnic na strojích je vidět na *obr. 3* a 4.

Jelikož stroj ATLAS je menší a obsahuje pouze dva válce, byly zde k měření použity pouze dvě bočnice a to A a D. Viz. *obr. 4*.

Obecně pro získání radiální a axiální síly bylo potřeba čtyř tenzometrů. Dva tenzometry axL a axP (axiální pravý, axiální levý) pro získávání axiálních sil a dva tenzometry radH a radD (radiální horní, radiální dolní) pro získávání radiálních sil. Takto byly oblepeny bočnice A a D. Z důvodu omezení počtem signálů nebyly na bočnicích B a C lepeny tenzometry pro získání axiálních sil.



obr. 3 – Uspořádání bočnic na stroji SWIFTERDISC

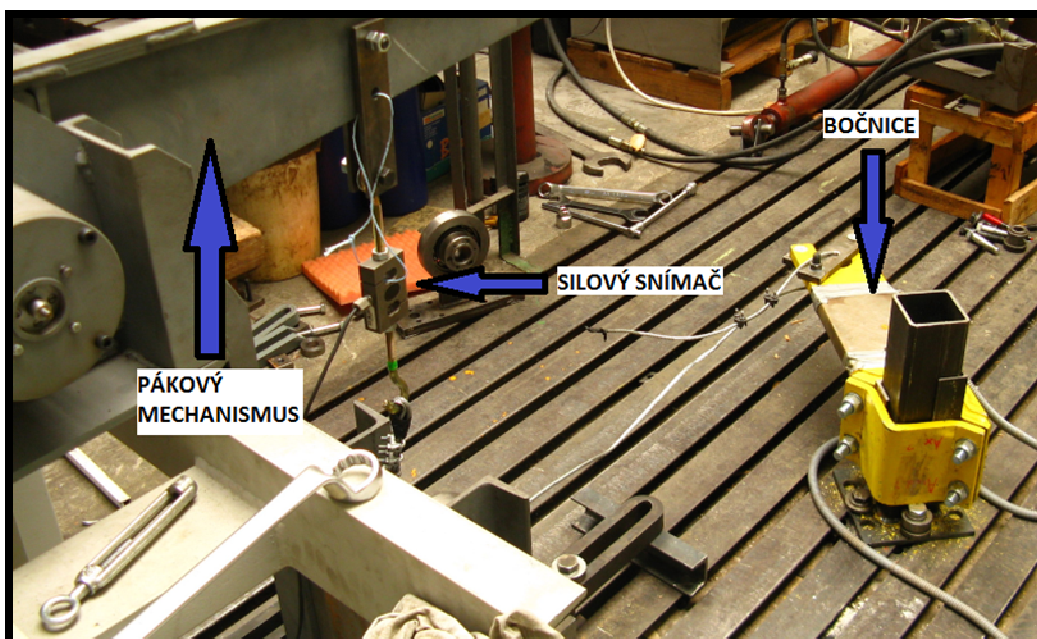


obr. 4 – Uspořádání bočnic na stroji ATLAS

3.2 Cejchování bočnic

Po oblepení bočnic bylo nutné tenzometry ocejchovat. Cejchování probíhalo v laboratoři ČVUT, ústavu konstruování a části strojů. Bočnice byly napínány přes pákový mechanismus pod různými úhly a zjišťovala se odezva na zátěž vždy do 800 kg. Získávané závislosti byly lineární a tak nebylo potřeba bočnice zatěžovat více, navíc by to neumožňoval ani silový snímač, který není dimenzován na zátěž větší než 1000 kg. Cejchovací stand je znázorněn na obr. 5.

Pomocí pákového mechanismu a kladky se bočnice zatěžovaly různými způsoby a pod různými úhly pro zjištění cejchovací konstanty. Přesnou sílu, kterou jsme zatěžovali, jsme zjišťovali silovým snímačem.



obr. 5 – Cejchování bočnic v laboratoři

Odezvou tenzometru na zatížení bočnice je napětí v mV. Převod tohoto napětí na sílu popisuje lineární závislost:

$$y = k \cdot x + q \quad (1)$$

kde k... cejchovací konstanta v závislosti na úhlu zatěžování

q... offset tenzometru

x... hodnota v mV

y... síla v N

4. Měření v terénu

První měření se konalo 20. dubna 2012 v Račiněvsi, okr. Litoměřice. Druhé pak 9. října 2012 v obci Černuc, okr. Kladno. V Račiněvsi byl použit diskový podmítač STROM SWIFTERDISC XE se čtyřmi měřícími bočnicemi. V Černuci pak pouze stroj se dvěma měřícími bočnicemi a to STROM ATLAS AO.

Tenzometry byly nalepené na bočnicích válců a měřilo se jak radiální, tak i axiální zatížení vstupujících do ložisek. Měření probíhalo pouze na pravé půlce (ve směru jízdy) stroje, tzn. na čtyřech bočnicích u SWIFTERDISCU, resp. na dvou bočnicích u ATLASU.

Po prvním měření se ukázalo, že byla zvolena velmi malá vzorkovací frekvence a tak byl signál zaznamenáván zhruba každých 20cm jízdy, což nebylo dostačující. Z tohoto důvodu se uskutečnilo měření v Černuci, kde byla vzorkovací frekvence již 2000 vzorků / vteřinu. To umožnilo zaznamenávat i ty nejjemnější rázy vstupující do bočnic.



4.1 Měření Račiněves

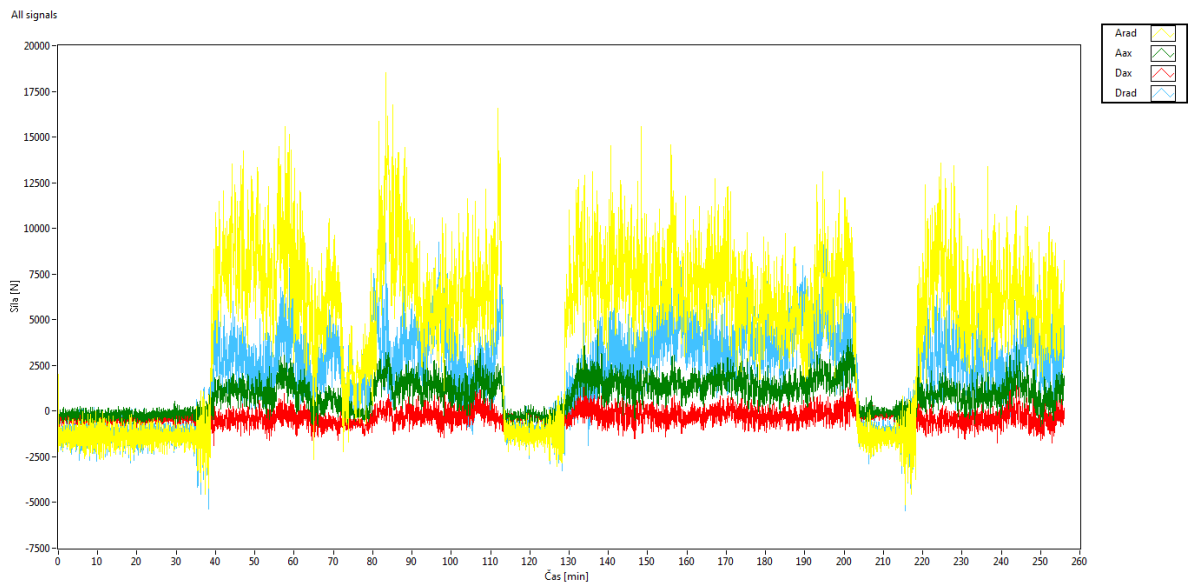
Měření probíhalo 20. dubna 2012 v obci Račiněves. Nejprve bylo potřeba namontovat bočnice olepené tenzometry, zapojit a vyzkoušet měřící ústřednu cRio viz obr. 13. Tyto přípravy byly provedeny v areálu firmy Tipagro v Roudnici nad Labem. Po úspěšném zapojení byl uskutečněn přejezd na pole do Račiněvse. Tam se již provedlo několik přejezdů přes ornou půdu s různým nastavením stroje.

4.2 Měření Černuc

Měření se uskutečnilo 9. října 2012 v obci Černuc. Zde probíhalo také instalování, ale pouze dvou bočnic A a D, které měří jak radiální tak i axiální síly. Byl použit komplexní 4-kanálový sběrač dat NI USB – 9237 od firmy National Instruments. Výhodou tohoto zařízení je jeho velikost a jednoduché zapojení.

Nejprve se provedlo opět zkušební měření, poté následoval přejezd z areálu na pole a následně proběhlo několik pracovních cyklů stroje, opět s různým nastavením výšky válců a různými pojezdovými rychlostmi.

Následující *obr. 6* znázorňuje data z měření. Žlutá a modrá křivka představuje radiální reakce, červená a zelená axiální. V určitých místech je vidět odlehčení stroje, kdy byly válce zvednuty. Stroj se v tuto chvíli zrovna otáčel na okraji pole.

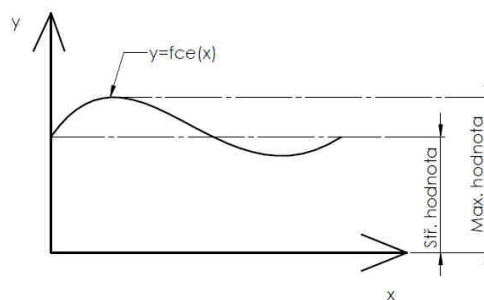


obr. 6 – Znáznornění naměřených dat z terénu

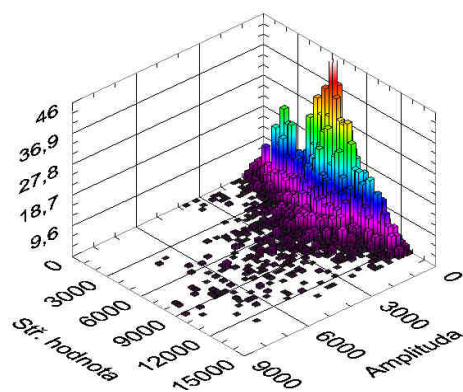
5. Vyhodnocení naměřených dat

5.1 Analýza signálu

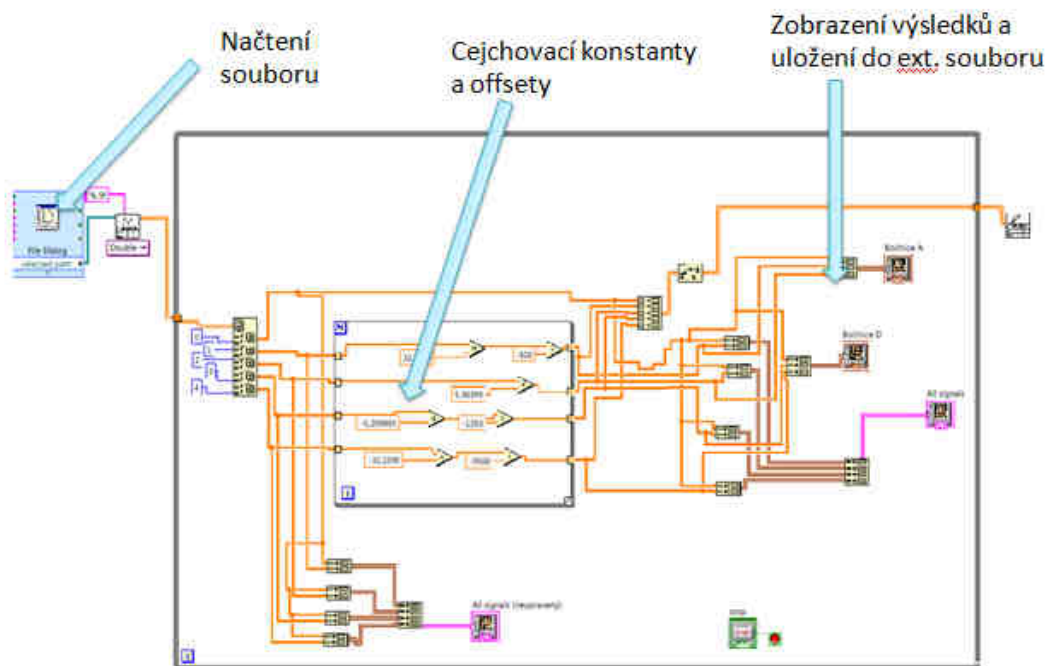
Po zpracování bylo potřeba ještě signál vyhodnotit. Především nás zajímala střední a maximální hodnota v různých provozních režimech.



Za další bylo vhodné podrobit naměřená data Rainflow analýze, která nám řekne jaké střední hodnoty s danou amplitudou a v jakém počtu se v konkrétním provozním režimu vyskytují. To nám následně umožní spočítat kumulativní poškození ložisek dle vybrané hypotézy a odhadnout jak dlouho by při tomto zatížení ložiska vydržela, popř. navrhnout ložiska větší a pevnější.



Kompletní zpracování signálu a analýza dat byla prováděna v programu LabView od National Instrument ve školní licenci. Následující *obr. 7* dokumentuje postup a princip zpracování signálu v Labview.



obr. 7 – Zpracování signálu v LabView

K metodě Rainflow jsem použil již napsaný program, též od National Instrument, který se jen doinstaluje jako přídatný modul do LabView. Je potřeba jen upravit drobnosti tak, aby program vyhovoval konkrétní aplikaci. Schéma programu je obdobné, nicméně je složitější a celý program se skládá z mnoha podprogramů a tak zde schéma není zobrazeno.

K samotné prezentaci grafů a výsledků metody RainFlow, byl již použit MS Excel. RainFlow výpočtu byla podrobena pouze data z Černuce, neboť jsou přesnější díky vyšší záznamové frekvenci.

5.2 Provozní režimy

Během měření se měnila pojezdová rychlost stroje a také nastavení výšky válců aby bylo možné sledovat různé provozní režimy a vlivy na velikosti reakcí v ložiskách. Souhrn provozních režimů je uveden níže.

- Optimální nastavení výšky válců (poloha 9), „normální“ pojezdová rychlost
 - Snížená poloha válců (poloha 6), „normální“ pojezdová rychlost
 - Snížená poloha válců (poloha 3), „normální“ pojezdová rychlost
- } Měření Račiněves

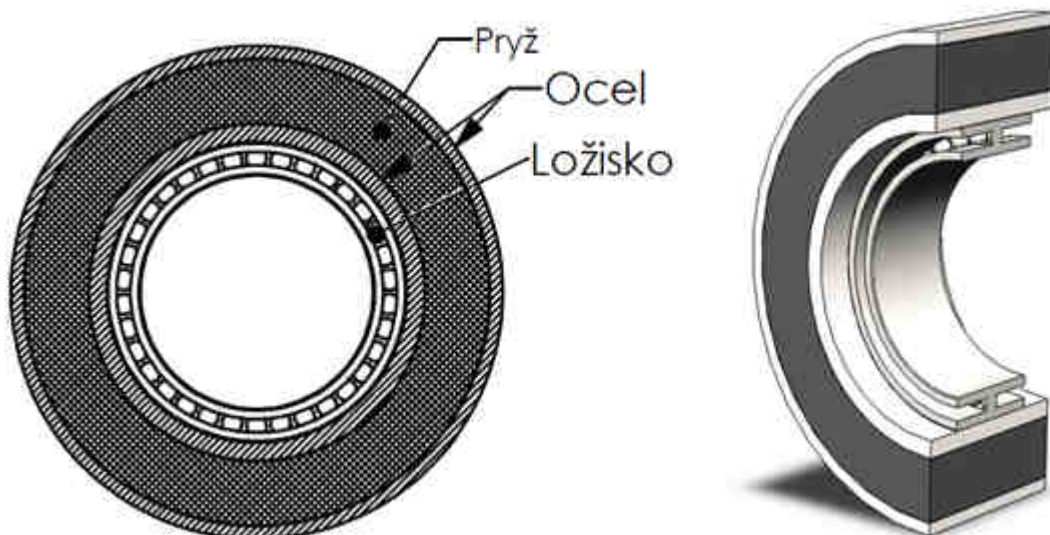
- Normální nastavení stroje, pojezd 12 km / hod
- Normální nastavení stroje, pojezd 13 km / hod
- Normální nastavení stroje, pojezd 14 km / hod
- Válce položeny nízko, pojezd 19 km / hod
- Přejezd z pole do areálu ZD

Měření
Černuc

6. Návrh odpružení

6.1 Konstrukční návrh

S cílem snížit amplitudy sil vstupujících do ložiska byl navrhnout jednoduchý konstrukční návrh, který je znázorněn na *obr. 8*. Na samotné ložisko bude nalisován „domek“, který je tvořen dvěma ocelovými kroužky, mezi nimiž se nachází pryž. Ta by měla zaručit dostatečné tlumení všech rázů. Celá tato sestava bude ještě nalisována do náboje zemědělského stroje. Pozn.: Ložisko na obrázku neodpovídá skutečnosti, je zde jen pro kompletnost sestavy.



obr. 8 – Konstrukční návrh odpružení

6.2 MKP analýza

Cílem této kapitoly bylo navrhnout rozměry pryže pomocí metody konečných prvků. Model byl zatěžován 20kN radiálně a na toto zatížení je pryžový mezičlen dimenzován. Nebyly prováděny dynamické simulace, neboť se jedná o vysoce nelineární materiál a tyto výpočty by přesahovaly rozsah této práce. Navíc by bylo potřeba podrobit materiál rázovým zkouškám za účelem zjištění tlumících konstant materiálu, což nebylo z časových důvodů možné.

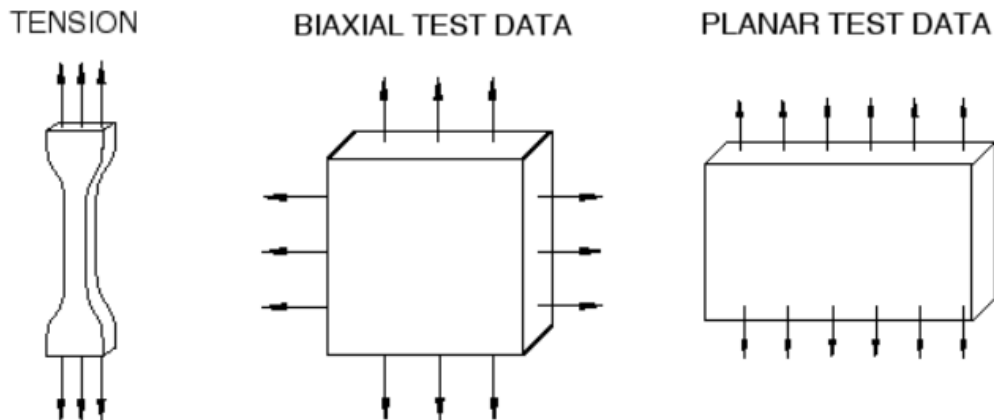
I tak bylo ale potřeba učinit několik laboratorních zkoušek daného materiálu, jelikož byla nutnost znát materiálové konstanty a charakteristiky pro matematický model.

Abychom z MKP analýzy obdrželi co nejpřesnější výsledky, je zapotřebí správně zadat charakteristiku pryžového materiálu. Jde o vysoce nelineární materiál a tak je zde výpočet značně rozdílný od statických MKP výpočtů, kde se pracuje pouze s ocelí.

Pro získání materiálových konstant pryže je zapotřebí podrobit pryž různým tahovým zkouškám a následně vybrat vhodný matematický model pryže.

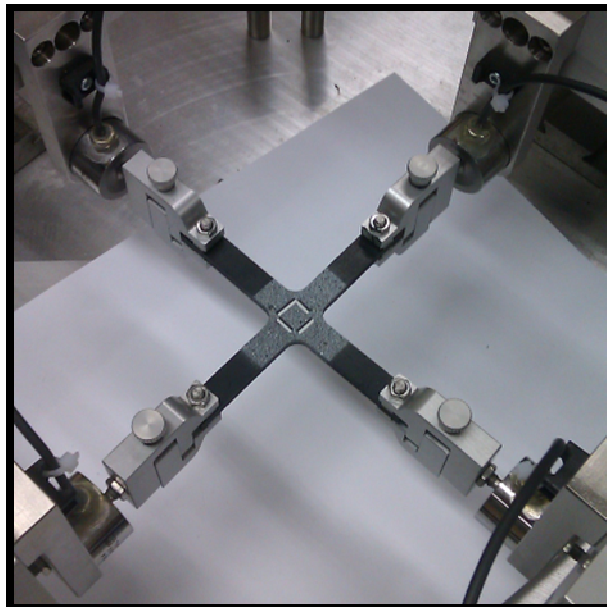
Těch existuje celá řada (Arruda-Boyce, Marlow, Mooney-Rivlin, Ogden...) a pro každou aplikaci se hodí ten či onen.

Základ všeho jsou tedy tahové zkoušky, které jsou znázorněny na následujícím obrázku. Jedná se o klasickou tahovou zkoušku, kde je vzorek velmi podobný vzorkům pro tahovou zkoušku ocele. Dále jde o biaxiální tahovou zkoušku, kde je vzorek zatěžován dvěma a více směry, avšak vždy pouze v rovině. Třetí tahovou zkouškou je vzorek opět natahován v rovině, avšak vzorek musí být mnohem širší, než je jeho délka.



obr. 9 – Tahové zkoušky pryže

Tyto tahové zkoušky, až na planar test, byly provedeny na ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky v laboratořích kardiovaskulární biomechaniky. Planar test nemohl být proveden, neboť laboratoře ČVUT nedisponují příslušným měřícím standem pro tento typ zkoušky. Nicméně kombinací výsledků z uniaxiální a biaxiální zkoušky lze dosáhnout uspokojivých výsledků z metody MKP.



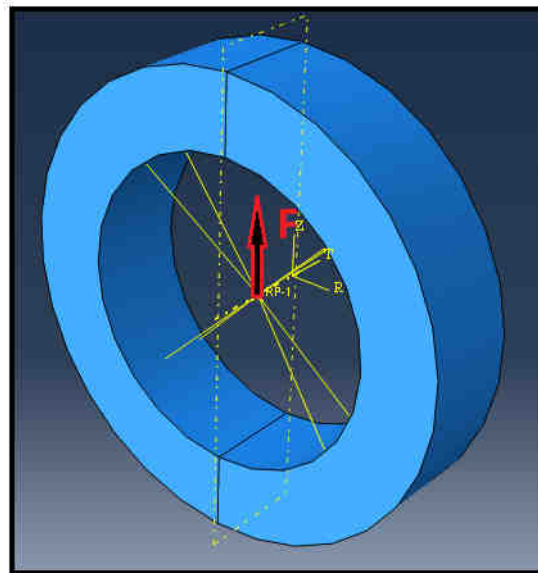
obr. 10 – Ukázka biaxiální tahové zkoušky

MKP výpočet probíhal v programu Abaqus 6.12 ve školní licenci. Při výpočtu jsem se zaměřil pouze na pryžový mezičlen, tzn., že v MKP modelu nejsou ocelové kroužky. Ty mají oproti pryži daleko větší tuhost a lze je tak považovat za absolutně tuhé.

Pro matematický popis pryže byl vybrán model Mooney-Rivlin, který v tomto případě nejvíce odpovídá skutečnosti.

Gumový mezičlen je zatěžován radiálně a axiálně v bodě, který leží uprostřed. Tento bod je navázaný na vnitřní plochu metodou coupling. Zatěžuje se 20 kN a sleduje se napětí a také posuv bodu, který je působištěm síly.

Okrajové podmínky jsou nastaveny tak, že vnější plocha gumy je pevně vetknutá. Ve skutečnosti je navulkanizovaná na vnější ocelový kroužek, který má daleko větší tuhost. Toto uložení se přibližuje skutečnosti.

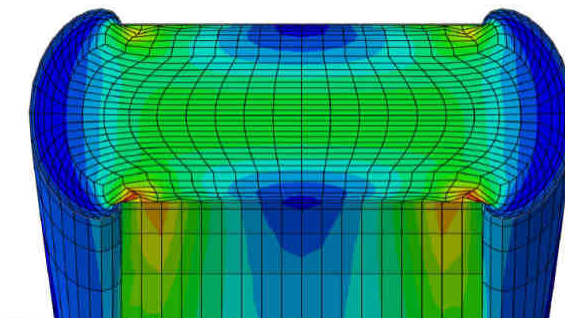


obr. 11 – MKP – Zatížení

Velká pozornost se kladla také síťování. Aby se dosáhlo co nejpřesnějších výsledků, bylo potřeba model „nameshovat“ ručně. Kvůli velkým deformacím se model řezal takovým způsobem, že v nedeformovaném stavu byla síť méně přesná a se zvětšující se deformací se její kvalita naopak zlepšovala. Tato metoda vyžaduje do určité míry předpoklad chování modelu. Je potřeba odhadnout jak a jakým směrem se bude materiál deformovat a tomu přizpůsobovat síť.

Existují i další metody síťování pro případy velkých deformací, např. adaptivní meshování apod.

Za další bylo potřeba zvolit správnou hustotu sítě tak, aby byl výsledek relativně přesný, ale zároveň abychom nepřekračovali únosný výpočetní čas. Proto bylo vytvořeno několik modelů s různou hustotou sítě a sledovala se rozmanitost výsledků. Na základě těchto údajů se vybrala dostatečná hustota sítě o cca 30 000 elementech. Viz. obr. 12.



obr. 12 – MKP - Síť

Po nastavení všech okrajových podmínek, zatížení, materiálu a sítě se mohlo přistoupit k výpočtu. Výsledkem MKP analýzy měly být navržené rozměry silentbloku pro dané zatížení.

Všechny výsledky byly zpracovány do grafů, tzn., že bylo vidět do jaké míry má smysl daný silentblok rozšiřovat, popř. hýbat s vnějším průměrem (vnitřní průměr je daný ložiskem). Z výsledků tedy byl vidět jasně patrný vliv rozměrů silentbloku na špičkové napětí uvnitř materiálu.

7. Závěr

V této práci se mi podařilo za podpory zaměstnanců ústavu konstruování a části strojů, zvláště pak za podpory Ing. Pavla Syrovátky stanovit reálné zatížení ložisek v provozu. Naměřený signál se podařilo zpracovat a analyzovat. Určili jsme střední a maximální hodnoty zatížení v závislosti na jezdové rychlosti a nastavení stroje.

Zároveň jsme navrhli konstrukční řešení, které obsahuje již tlumící prvek pro ložiska. Byl navržen tedy tlumící prvek, ale bylo také potřeba stanovit rozměry.

Rozměry silentbloku byly výsledkem MKP analýzy, v které se počítalo hlavně s pryžovým materiálem, který vyžadoval experimentální zkoušky ke stanovení materiálových parametru. Tyto zkoušky proběhly na ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky.

Podařilo se nám tedy navrhnout odpružení stroje a v neposlední řadě byl cenným výsledkem i MKP model pryžového materiálu se všemi parametry, který je univerzální a může tak být použit i pro jiné aplikace.

Seznam použité literatury

- [1] HARRIS, M. Cyril.: Shock and vibrafon Handbook. Charles Batchelor Professor Emeritus of Electrical Engineering, Columbia University, New York 2002
- [2] Abaqus 6.12 Documentation
- [3] HORNÝ, Lukáš.: Experimenty pro určení konstitutivního modelu pryže při velkých deformacích. Výzkumná zpráva, FS ČVUT v Praze, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Praha 2012, (15 str.)

<http://www.rubena.cz/default.asp?CatID=1967&TYPTREE=1>

http://www.gumex.cz/files/catalog/PRY%C5%BDE_PLASTY.pdf

http://www.proinex.cz/technicky_list/Shore_A_durometr_CV-HS100_CV-SH.pdf