



**FAKULTA
ŠROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Experimentální stanoviště pro měření
transportní účinnosti spirálových
dopravníků**

**Experimental workplace for measuring of
spiral conveyors transport efficiency**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2023

Josef GRILL

Studijní program: NDTT Dopravní a transportní technika

Studijní obor: N071TTTE transportní technika

Vedoucí práce: Ing. František Lopot PhD.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Grill** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **483239**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Experimentální stanoviště pro měření transportní účinnosti spirálových dopravníků

Název diplomové práce anglicky:

Experimental workplace for measuring of spiral conveyors transport efficiency

Pokyny pro vypracování:

Úprava a realizace konstrukce experimentálního šnekového dopravníku, který byl vytvořen v rámci BP. Vypracování aktualizovaného 3D modelu dopravníku. Výroba komponent dopravníku a jeho sestavení za účelem přípravy na následné experimenty. Ověření funkčnosti zařízení.

Seznam doporučené literatury:

CEMA, VDI, internet dle potřeb práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. František Lopot, Ph.D. ústav konstruování a částí strojů FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **24.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **12.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. František Lopot, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. František Lopot, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „experimentální stanoviště pro měření transportní účinnosti spirálových dopravníků“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Františka Lopota Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 12.08.2023

Josef Grill

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce panu Ing. Fratiškovi Lopotovi Ph.D. Za jeho odborné rady a vedení při psaní práce, dále všem svým blízkým za podporu a paní Mgr. Martině Suché za slovní korekturu.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora: Josef Grill

Název DP: experimentální stanoviště pro měření transportní účinnosti spirálových dopravníků

Anglický název: Experimental workplace for measuring of spiral conveyors transport efficiency

Rok: 2023

Studijní program: NDTT Dopravní a transportní technika

Obor studia: N071TTTE transportní technika

Ústav: Ústav konstruování a částí strojů

Vedoucí BP: Ing. František Lopot Ph.D.

Konzultant: Ing. Ondřej Štoček

Bibliografické údaje:	počet stran	144
	počet obrázků	152
	počet tabulek	0
	počet příloh	3

Klíčová slova: šnekový dopravník, experimentální, bezosý, spirála, účinnost

Keywords: srew conveyor, experimental, shaftless, spiral, efficiency

Anotace:

Tato práce se zabývá úpravou a realizací konstrukčního návrhu experimentálního šnekového stanoviště určeného pro měření transportní účinnosti spirálových dopravníků a navazuje na bakalářskou práci „experimentální spirálový dopravník“. Práce obsahuje návrh konstrukce stanoviště, včetně senzorů zvolených pro měření a kontrolní výpočty pomocí metody konečných prvků. Model stanoviště je představen pomocí sestavného výkresu a 3D modelu v aplikaci Autodesk Inventor.

Abstract:

This thesis deals with the modification and realization of the structural design of an experimental screw station intended for the measurement of the transport efficiency of spiral conveyors and is a continuation of the bachelor thesis "experimental spiral conveyor". The thesis includes the design of the workplace structure, including the sensors chosen for measurements and control calculations using the finite element method. The workplace model is presented using an assembly drawing and a 3D model in Autodesk Inventor.

OBSAH

Obsah

Prohlášení	3
Poděkování	4
Anotační list	5
Obsah.....	6
1. Úvod.....	1
1.1. Šnek	2
1.2. Žlab	3
1.3. Pohon.....	4
2. Cíle práce	7
2.1. Výchozí stav.....	8
3. Teoretická východiska	9
3.1. Teorie pohybu materiálu	11
3.1.1. Rychlostní rozklad pohybu.....	11
3.1.2. Silový rozklad	13
3.1.3. Dílčí závěr	15
3.2. Instrumentace	16
3.2.1. Shannon-Kotělníkův teorém	16
3.2.2. Snímače otáček	17
3.2.2.1. Mechanické otáčkoměry	17
3.2.2.2. Elektromagnetické otáčkoměry	17
3.2.3. Tachodynamo	19
3.2.3.1. Tachoalternátor	20
3.2.3.2. Impulsní snímače otáček	21
3.2.3.3. Snímač rychlosti s fotoelektrickým čidlem.....	21
3.2.3.3.1. Snímač rychlosti s indukčním čidlem	22
3.2.3.3.1. Snímač s Hallovou sondou	22
3.2.3.4. Stroboskopické měření otáček.....	24
3.2.4. Snímače krouticího momentu	24
3.2.4.1. Měření pomocí reakčního ramene	24
3.2.4.2. Tenzometrický snímač momentu	25
3.2.4.3. Kapacitní snímače momentu.....	26
3.3. Odporová tenzometrie	27
3.3.1. Rozdělení odporových tenzometrů	29
3.3.1.1. Kovové tenzometry	29
3.3.1.2. Drátkové tenzometry	29
3.3.1.2.1. Fóliové tenzometry.....	30
3.3.1.2.1. Vrstvové.....	31
3.3.1.3. Polovodičové tenzometry	31
3.3.2. Druhy odporových tenzometrů	32
3.3.3. Délka měřicí mřížky	32

3.3.4.	Homogenní pole napětí	32
3.3.5.	Nehomogenní pole napětí	32
3.3.6.	Vícenásobné tenzometry	33
3.3.6.1.	Tenzometrické řetězce	33
3.3.6.2.	Tenzometrické kříže a růžice.....	33
3.3.6.3.	Tenzometrické růžice pro měření zbytkového napětí.....	34
3.3.7.	Můstková metoda zapojení tenzometrů.....	35
3.3.7.1.	Napájení konstantním napětím	36
3.3.7.2.	Napájení konstantním proudem	38
3.3.8.	Čtvrtmost.....	39
3.3.9.	Půlmost	40
3.3.10.	Plný most.....	41
3.3.11.	Dílčí závěr	41
3.3.12.	Vlastnosti a jevy tenzometrů	42
3.3.12.1.	Elektrický odpor	42
3.3.12.2.	Napájecí napětí	42
3.3.12.3.	Použitelný teplotní rozsah.....	42
3.3.12.4.	Příčná citlivost	43
3.3.12.5.	Odezva tenzometru na změnu teploty.....	43
3.3.12.5.1.	Zdánlivá deformace	43
3.3.12.5.2.	Částečný závěr	44
3.3.12.5.3.	Teplotně samokompensované tenzometry	44
3.3.12.5.4.	Teplotní drift	45
3.3.12.6.	Hystereze	45
3.3.12.7.	Creep	46
3.3.12.8.	Mezní podmínky.....	46
3.3.12.8.1.	Při statické deformaci	46
3.3.12.8.2.	Při dynamickém namáhání	47
3.3.12.9.	Mezní frekvence	47
3.3.12.10.	Únava	48
3.3.13.	Metody měření odporových změn tenzometrů	48
3.3.14.	Instalace odporových tenzometrů.....	49
3.3.14.1.	Příprava kovové plochy k lepení.....	49
3.3.14.2.	Příprava nekovové plochy k lepení	50
3.3.14.3.	Lepení tenzometru	50
3.4.	Rešerše souvisejících studií	50
3.4.1.	Výzkumy související se šnekovými dopravníky (s reálnou osou šnekovnice)	50
3.4.2.	Výzkumy související se spirálovými dopravníky (bez reálné osy šnekovnice)	52
3.5.	Související standardizace.....	53
3.5.1.	České a ISO standardy	53
3.5.2.	ČSN 26 2602	53
3.5.2.1.	ČSN ISO 1050	53
3.5.2.2.	ČSN ISO/TR 9172	53

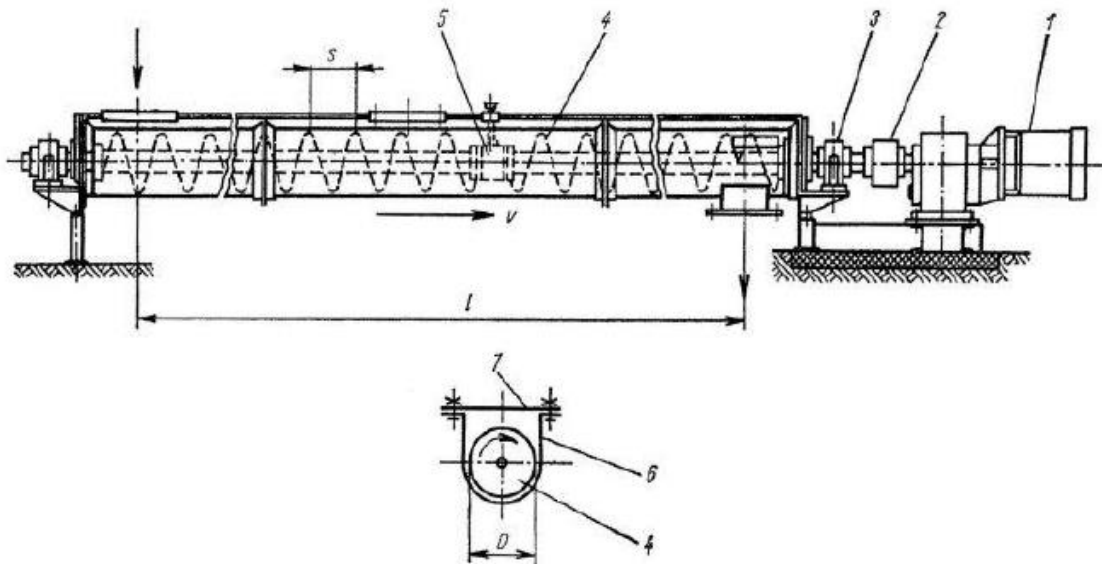
3.5.2.3.	ISO 1819	53
3.5.2.4.	ISO 7149	54
3.5.2.5.	ČSN 26 0003	54
3.5.3.	CEMA standard	54
3.5.3.1.	ANSI/CEMA Standard No. 300-2021, Screw Conveyor Dimensional Standards [38]	54
3.5.3.2.	ANSI/CEMA Standard No. 350-2021, Screw Conveyors for Bulk Materials [39]	54
3.5.3.3.	CEMA 352-2018, Screw Conveyor Safety Operation/Maintenance Manual [40].....	54
3.5.3.4.	CEMA 353-2018, Shaftless Screw Conveyor O&M Manual [41].....	54
4.	Konstrukce	55
4.1.	Celkový model	55
4.2.	Rám.....	57
4.3.	Nosná konstrukce dopravníku	60
4.3.1.	Nosné žebro	62
4.3.2.	Žebra pro uchycení ložiskových domků	64
4.3.3.	Žebro pro uchycení sensoru otáček.....	66
4.3.4.	Ložiskové tělesa pro zvedací mechanismus	67
4.3.5.	Rotační čepy	69
4.3.6.	Spodní rameno pro záchyt reakčního momentu	70
4.4.	Dopravník.....	72
4.4.1.	Hřídel se spirálou	74
4.4.2.	Trubice a koncové části	78
4.4.3.	Uložení a zajištění pohonné jednotky s převodovkou	84
4.4.4.	Umístění snímače otáček.....	90
4.5.	Systém naklápění a aretace dopravníku.....	92
4.6.	Senzorika.....	100
4.6.1.	Otáčky	100
4.6.2.	Krouticí moment	102
5.	Kontrola metodou konečných prvků	105
5.1.	Nastavení mechanických vlastností	105
5.2.	Okrajové podmínky.....	107
5.3.	Výpočet s ramenem, pro záchyt reakčního momentu, z jeklu	110
5.3.1.	Nastavení sítě	110
5.3.2.	Výsledky	112
5.4.	Výpočet s ramenem, pro záchyt reakčního momentu, z šestihranné tyče.....	117
5.4.1.	Nastavení sítě	117
5.4.2.	Výsledky	120
5.5.	Výpočet s ramenem, pro záchyt reakčního momentu, z šestihranné tyče se zjemněnou sítí.....	124
	Závěr.....	130
	Seznam obrázků	131
	Použitá literatura.....	134

1. Úvod

Práce plynule navazuje na bakalářskou práci: experimentální šnekový dopravník. Stavba dopravníku, který bude vytvořený v rámci této práce, je financována z běžícího projektu SGS.

Práce vychází z výpočtů, konstrukce bakalářské práce a nových poznatků po půlročních konzultacích s firmou RATAJ. s.r.o. S ohledem na rozpočet a cílem zjednodušit konstrukci, byly v konstrukci provedeny rozsáhlé změny, které jsou předmětem řešení této diplomové práce. Konstrukce byla upravena dle spirály, kterou na výzkum daroval RATAJ.

Konstrukce šnekového dopravníku je složena ze tří hlavních částí: žlab, šnek a pohon. Šnekový dopravník využívá rotačního pohybu šneku/spirály k přesunu materiálu.



Obrázek 1 šnekový dopravník; 1 - hnací převodový elektromotor, 2 - spojka, 3 – ložisko, 4 – šnek, 5 – vodící ložisko, 6 – žlab, 7 – víko žlabu [2]

Směr dopravy může být:

- Vodorovný
- Šikmý
- Svislý

1.1. Šnek

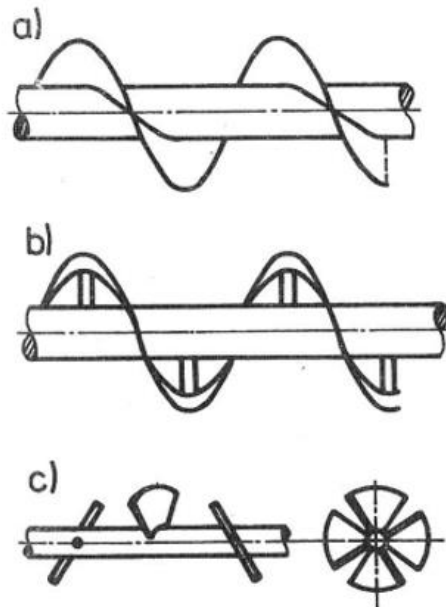
Šnek může být levo i pravotočivý a je možné ho použít samostatně nebo v poli (obr. 2)



Obrázek 2 šnekové pole [16]

Jeho podoba do velké míry určuje vlastnosti dopravníku. Z hlediska jeho realizace lze identifikovat dvě provedení, která se liší přítomností reálné osy. Pro dopravníky se šnekem (šnekovnicí) s reálnou osou vyrobenou nejčastěji z trubky nebo tyče kruhového průřezu se v oboru vžil označení šnekové dopravníky. Pro dopravníky bez reálné osy, se používají označení bezosý šnekový nebo také spirálový dopravník. Samotná šnekovnice bez reálné osy je nazývána tzv. spirálou.

Konce šnekovnic jsou uloženy v ložiskách, ale u spirály je ložisko pouze na horní straně spirály. Spodní strana je zasypaná materiálem, ve kterém je spirála při chodu dopravníku středěna. Tvar listů u šnekovnice může být různý, podle zamýšleného použití dopravníku (obr. 3).

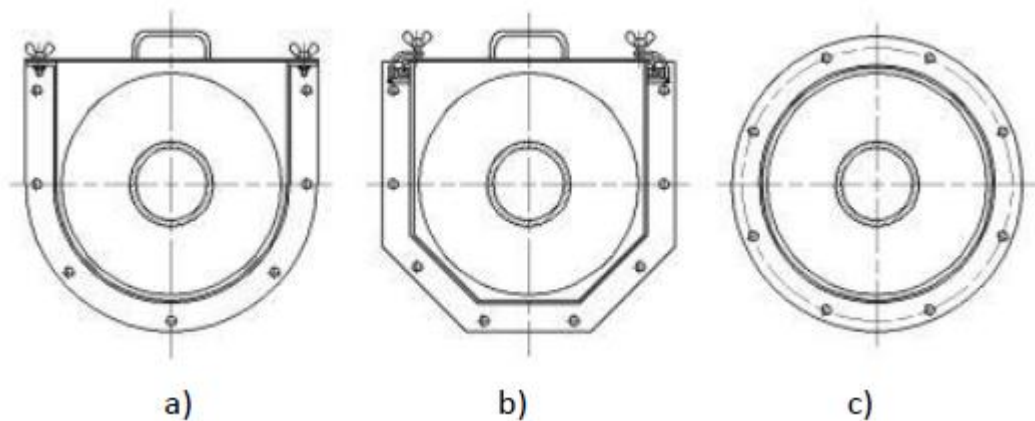


Obrázek 3 osová provedení listů šnekovnice [2]

V některých případech je možné využít proměnného stoupání i průměru za účelem pýchování nebo rozmělnění materiálu.

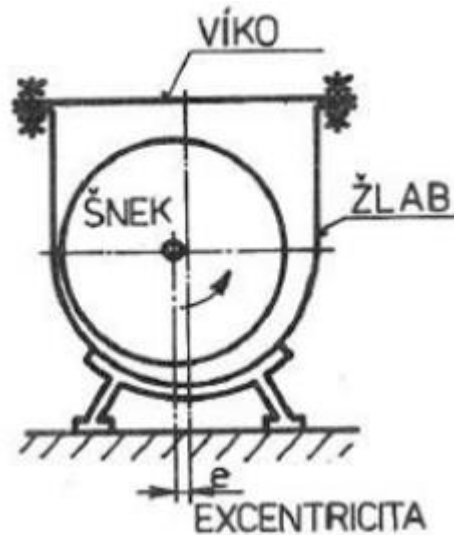
1.2. Žlab

Žlab slouží jako nosná a krycí část. Vyrábí se ve žlabovém provedení z plechu (a, b) často s lemem na horní hraně nebo trubkovém z bezešvé trubky (c).



Obrázek 4 možnosti provedení žlabu dopravníku

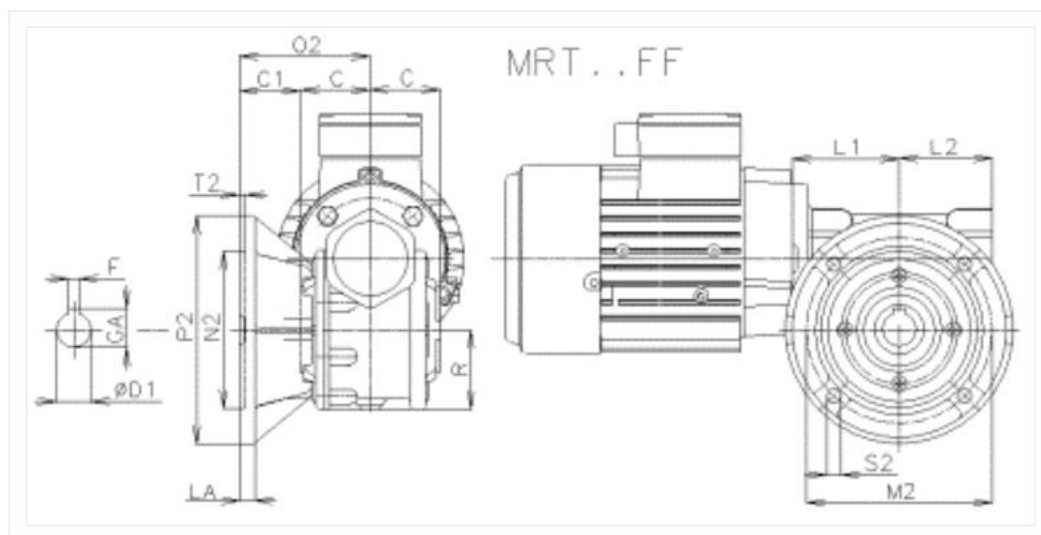
Aby se co nejvíce zamezilo drčení zrnitých materiálů, využívá se většinou excentrického uložení šnekovnice do žlabu. (obr. 5)



Obrázek 5 excentrické uložení šnekovnice ve žlabu [2]

1.3. Pohon

Pohonem je nejčastěji elektromotor s převodovkou a frekvenčním měničem a bývá umístěn na čele žlabu spojen pomocí konzole nebo příruby. Větší pohonné jednotky mívají vlastní samostatný základ. Přenos krouticího momentu bývá zajištěn perem, pružnou spojkou nebo svěrným pouzdem. Převodovka slouží k redukci otáček. Hřídel motoru je nasunuta do převodovky na vstupu a hřídel dopravníku je nasunuta na výstupní část.



Obrázek 6 Spojení motoru s převodovkou

Pohonná jednotka se umísťuje nejčastěji na horní část dopravníku k výsypce (obr. 7), ale existují konstrukce, kde se pohonná jednotka nachází pod násypkou, zejména u komerčně dostupných zemědělských dopravníků (obr. 8)

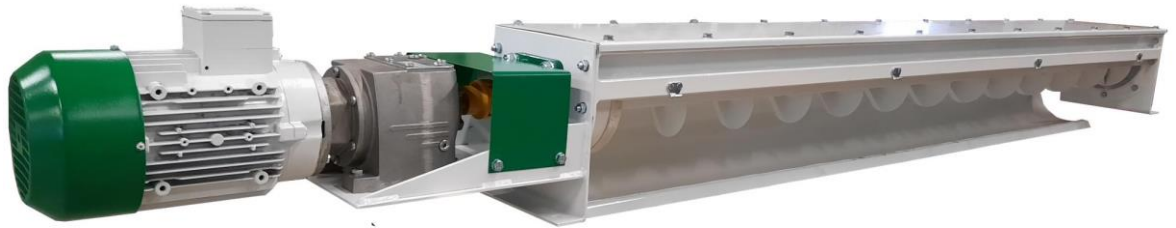


Obrázek 7 šnekový dopravník s pohonnou jednotkou u výsypky



Obrázek 8 šnekový dopravník s pohonnou jednotkou pod výsypkou

Konstrukčního řešení s pohonnou jednotkou u výsypky se pohonná jednotka může montovat s elektromotorem v přímém směru (obr. 9) nebo kolmém (obr. 7). Způsob se liší podle použité převodovky.



Obrázek 9 Šnekový dopravník s elektromotorem v přímém směru

2. Cíle práce

Hlavním cílem práce je dokončit a realizovat návrh konstrukce experimentálního dopravníku, který jsem představil v bakalářské práci, a který umožní provádění systematického výzkumu vlastností spirálového dopravníku a jejich dopadu na jeho výslednou transportní účinnost.

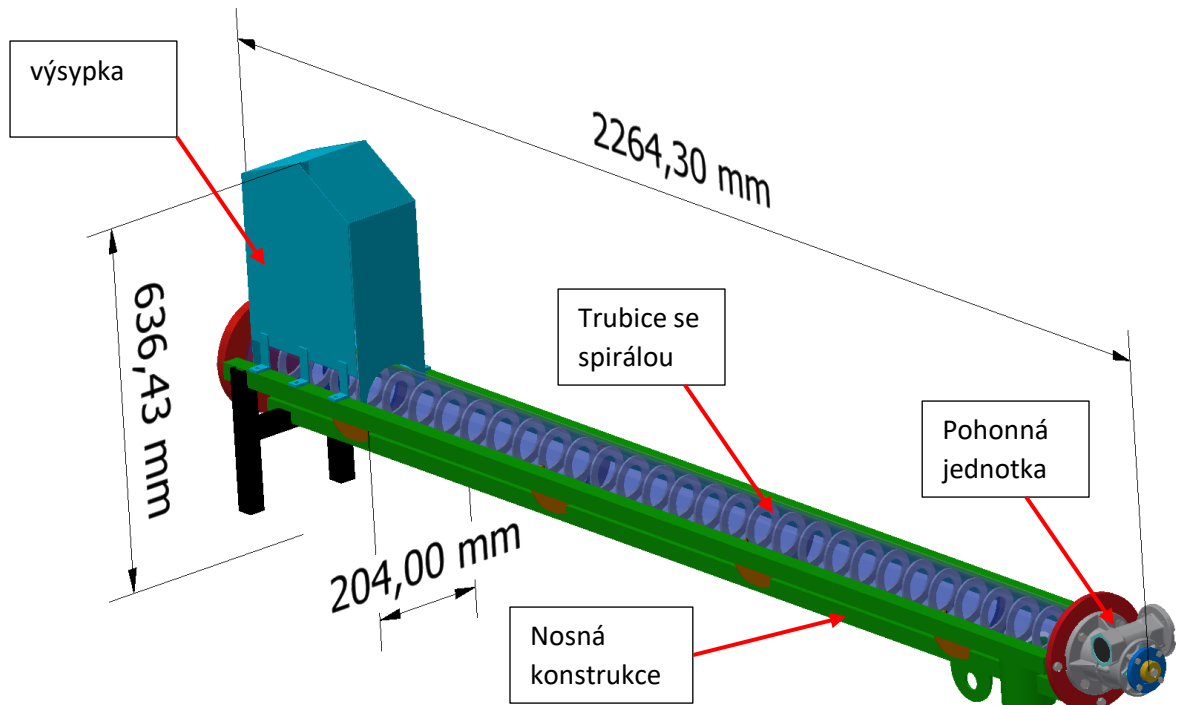
V přímé souvislosti se stanoveným cílem jsou za účelem jeho dosažení definovány následující dílčí úkoly:

1. Shromáždit související teoretická východiska a identifikovat parametry, které mají vazbu ke sledované transportní účinnosti, a které jsou současně ovlivnitelné technickým řešením dopravníku
2. Na základě výstupů předcházejícího úkolu provést nezbytné úpravy konstrukčního návrhu z bakalářské práce
3. Navrhnout senzorku dopravníku vč. výběru jednotlivých čidel z běžně komerčně dostupné nabídky, případně z portfolia laboratoří ústavu
4. Finalizovat 3D CAD model a vygenerovat na jeho základě dokumentaci pro výrobu jednotlivých komponent dopravníku
5. Provést orientační kontroly diskutabilních částí konstrukce pomocí MKP
6. Zajistit realizaci dodávek a výrob komponent a následné montáže dopravníku (tento bod dle časových možností svých, dodavatelů a technického zázemí ústavu)
7. Kontrolovat průběžně finanční udržitelnost konstrukčního návrhu i jeho realizace dle možností příslušného projektu SGS

Splněním uvedených úkolů bude současně vytvořena základna pro navazující doktorské studium dané problematiky.

2.1. Výchozí stav

Obr. 10 prezentuje konstrukční návrh dopravníku představený v bakalářské práci, na základě kterého je v rámci této diplomové práce vytvářena finální verze experimentálního dopravníku.



Obrázek 10 Výchozí stav konstrukce

Uvedený konstrukční návrh bude v rámci této práce na základě výstupů důkladného studia souvisejících teoretických východisek podstatně inovován a doplněn tak, aby umožnil provádění výše zmíněného systematického výzkumu této technologie dopravy materiálu.

3. Teoretická východiska

Teorie a rozdělení částí šnekových dopravníků byla podrobně představena v rozsahu bakalářské práce.

Na experimentálním stanovišti bude měřena transportní účinnost spirálových dopravníků. Velikost účinnosti je ovlivněna mnoha parametry. Mezi tyto vstupní veličiny patří parametry vycházející z literatury [1] a [2], které je uvádí z normy ČSN 26 2802 pro výpočet šnekového dopravníku.

$$Q_V = 3600 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} n \cdot s \cdot \psi \cdot C_H \quad 3.1$$

$$P_M = \frac{Q_V \cdot \rho_V \cdot g}{3600} (l_v \cdot w \pm h) \quad 3.2$$

- stoupaní spirály: změnou stoupáním můžeme ovlivnit výslednou rychlost posuvu materiálu v dopravním traktu a množství materiálu v jedné otáčce dopravníku. Pro větší stoupání pak může dojít k sesouvání materiálu s nízkým vnitřním třením. Je možné využít proměnného stoupání kdy dochází buď k pěchování nebo rozmělnění materiálu.
- otáčky: měnitelný vstupní parametr, kterým je možné ovládat rychlost dopravy materiálu. Nevýhodou šnekových dopravníků je, že větší změna otáček způsobí jen menší zvýšení dopravní rychlosti
- Náklon: šnekovými dopravníky je možné dopravovat materiál do jiné výšky. Norma však počítá pouze s náklonem do cca 25°. U spirálového dopravníku bude pak docházet k propadu materiálu kvůli absenci hřídele.
- Průměr: s větším průměrem roste schopnost přenášet hrubší materiál, nebo jemnější materiál ve větším množství. S tím ale roste potřebný moment pro pohon dopravníku.
- Součinitel plnění: Dopravníky mají určený součinitel plnění podle hrubosti materiálu, aby nedošlo k zaseknutí dopravníku.
- Globální součinitel odporu: pro výpočet příkonu motoru je potřeba znát řadu dílčích odporů, z nichž některé ale nejde určit matematicky s dostatečnou přesností [2, str. 209]. Z tohoto důvodu se využívá globálního součinitele odporu, který je určen experimentálně podle hrubozrnnosti a abrazivnosti

Materiál	γ [kg.m ⁻³]	w [--]	Materiál	γ [kg.m ⁻³]	w [--]
Cement	1200	3,0	Piliny dřevěné jemné	250 až 600	1,8
Cukr	750	3,5	Sédra mletá	850	2,8
Grafit práškový	350	2,0	Štěrka suchý	1500	5,0
Chmel	560	2,3	Štěrka mokrý	2000	5,0
Mléko sušené	500	2,3	Uhlí suché ořech	900	3,0
Oves	500	2,0	Uhelný prach	800	2,3
Pšenice	750	2,3	Vápno hydrát	640	2,5

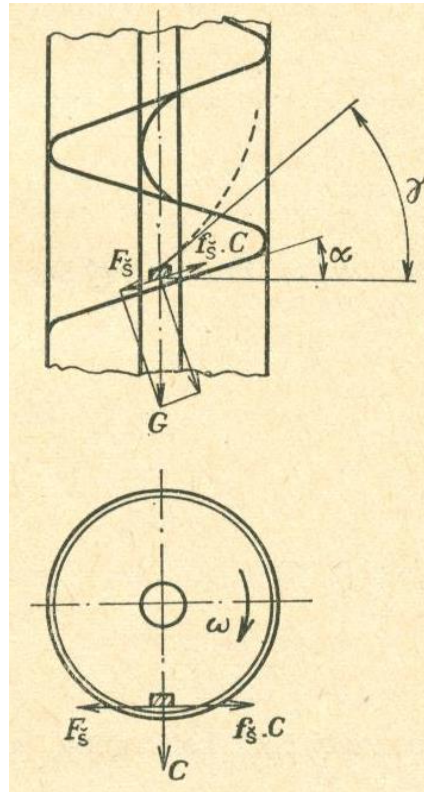
Obrázek 11 tabulka vlastností a hodnot materiálů [2]

- Vnitřní tření materiálu: velké tření materiálu způsobuje, že se materiál drží lépe pohromadě a jeho sypný úhel je vyšší. Zároveň však narůstá potřeba vyššího krouticího momentu.
- Tření materiálu o trubici: tření materiálu o trubici zajišťuje pohyb materiálu traktem dopravníku. Při jeho zvýšení roste potřebný krouticí moment, a naopak při jeho snížení klesá. Snížíme-li však tření materiálu s trubicí (konkrétně volbou materiálu trubice či její povrchovou úpravou), dojde k prokluzu dopravovaného materiálu.
- Korekční součinitel: tento součinitel snižuje dopravované množství materiál vzhledem k náklonu dopravníku při dopravě vzhůru. Využití součinitele při výpočtu snižuje velikost vypočteného výkonu potřebného k chodu dopravníku. Součinitel je určen experimentálně a je uveden pouze do 25° [2]. Pro spirálové dopravníky se očekávají úplně odlišné hodnoty, jelikož materiál bude propadávat středem dopravníku zpět.

3.1. Teorie pohybu materiálu

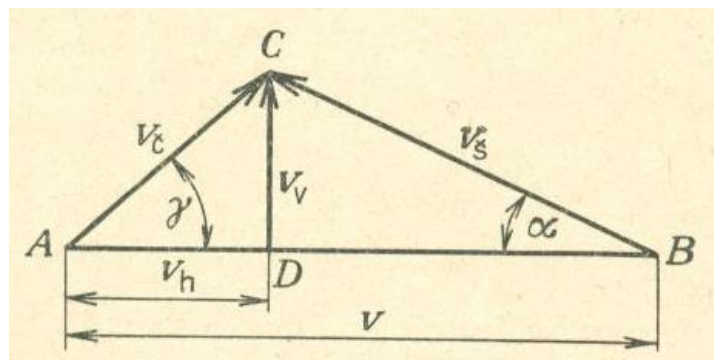
3.1.1. Rychlostní rozklad pohybu

Pohyb materiálu v dopravníku je teoreticky popsán rozbořem pohybu jedné částice ve svislém dopravníku uvedeným v [3]. Jak znázorňuje obrázek 8, je vidět, že částice se pohybuje po stěně žlabu dopravníku složeným a celkem složitým pohybem. Ten jde popsat jako šroubový o velikosti stoupání pod úhlem γ . Úhel γ je viditelně odlišný od úhlu stoupání šnekovnice α .



Obrázek 12 Silové účinky působící mezi částicí a šnekovnicí [1]

Vektorové rozložení pohybu lze popsat podle obrázku 9.



Obrázek 13 Rychlostní rozklad částice při dopravě svislým šnekem [1]

Výchozí parametr je vektor obvodové rychlosti šnekovnice v . Dalšími složkami jsou:

- rychlost ve směru stoupání šnekovnice v_s , která je skloněna o úhel α
- rychlost částice v_c jež je také skloněna, ale o úhel γ .
- Horizontální složka absolutní rychlosti částice materiálu v_h

Výslednou rychlostí, která vznikne složením vektorů je dopravní rychlost v_v

Pro jednotlivé složky platí vzorce:

$$v = \overline{AB} = \pi \cdot D \cdot n \quad 3.3$$

$$v_s = \frac{v \cdot \sin \gamma}{\sin(\alpha + \gamma)} \quad 3.4$$

$$v_s = \frac{v \cdot \sin \gamma}{\sin(\alpha + \gamma)} \quad 3.5$$

$$v_c = \frac{v \cdot \sin \alpha}{\sin(\alpha + \gamma)} \quad 3.6$$

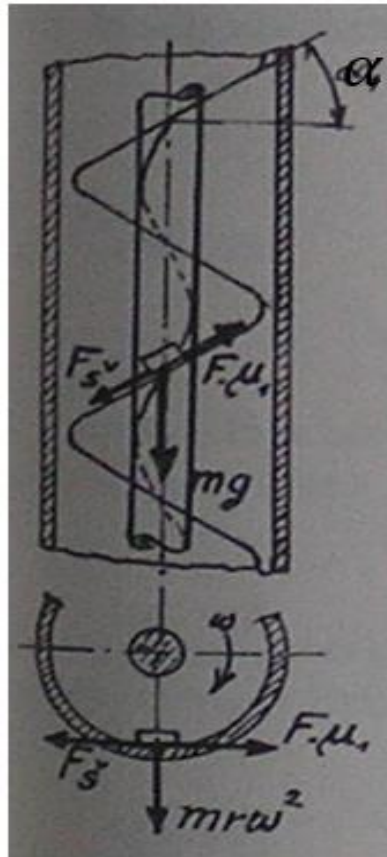
$$v_h = \overline{AD} = \sqrt{\frac{D \cdot g \cdot (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha)}{2 \cdot \mu}} \quad 3.7$$

$$v_v = \overline{DC} = \left[\frac{\pi \cdot r \cdot n}{30} - \sqrt{\frac{D \cdot g \cdot (\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha)}{2 \cdot \mu}} \right] \cdot \tan \alpha \quad 3.8$$

Kde:

- α ... úhel stoupání šnekovnice
- μ_1 ... součinitel tření mezi šnekem a materiálem
- γ ... střední úhel stoupání šroubovice, po které se pohybuje částice při plášti

3.1.2. Silový rozklad



Obrázek 14 schéma svislé šneku se silovými účinky [3]

Na obrázku 8 jsou vidět silové účinky, které působí mezi částicí materiálu a šnekovnicí. Do obrázku 10 jsou navíc doplněné další silové účinky působící na částici. Podle těchto rozkladů je možné definovat působící silové účinky, a to způsobem:

1. Síla na šnekovnici F_s , která odpovídá součtu tření mezi částicí materiálu, šnekovnicí a vlastní hmotnosti částice

$$F_s = m \cdot g \cdot (\sin \alpha + \mu_1 \cdot \cos \alpha) \quad 3.9$$

Kde:

- m ... hmotnost částičky materiálu
- α ... úhel stoupání šnekovnice
- μ_1 ... součinitel tření mezi šnekem a materiálem

2. Odstředivá síla, která přitlačuje částici na stěnu žlabu

$$F = m \cdot \frac{v_{\dot{c}}^{\dot{s}}}{\rho} \quad 3.10$$

Kde:

- $v_{\dot{c}}$... absolutní rychlost částice
- ρ ... příslušný poloměr křivosti šroubovice pro který platí:

$$\rho = \frac{r}{\cos^2 \gamma} \quad 3.11$$

Příčemž odstředivá síla vyvolává na plášti tření:

$$F_p = F \cdot \mu_2 = \frac{v_{\dot{c}}^2 \cdot \cos^2 \gamma}{r} \cdot \mu_2 \quad 3.12$$

Kde: μ_2 je součinitel tření mezi materiálem a pláštěm válce a v případě kdy je šnek i plášť ocelový, je možné psát: $\mu_1 = \mu_2 = \mu$.

V ustáleném stavu musí platit rovnice:

$$F_p = F_{\dot{s}} \quad 3.13$$

Ze které je možné vyjádřit odstředivou sílu jako:

$$F = \frac{F_{\dot{s}}}{\mu} = m \cdot \frac{v_{\dot{c}}^2 \cdot \cos^2 \gamma}{r} \cdot \mu_2 \quad 3.14$$

Z uvedených definic jednotlivých složek je patrné že pohyb materiálu ovlivňují parametry:

- úhel stoupání šnekovnice α – tento parametr je totožný jakou stoupání šnekovnice a je dán vlastnostmi šneku.
- součinitele tření μ_1, μ_2 – oba parametry tření jsou neměnné v případě, že se nemění jednotlivé materiály.
- příslušný poloměr křivosti šroubovice ρ – opět parametr, který zůstává konstantní v případě použití stejné spirály.
- hmotnost částičky materiálu m – za předpokladu, že se použije stejný materiál s konstantní vlhkostí, zůstane jeho hmotnost stejná
- střední úhel stoupání šroubovice, po které se pohybuje částice při plášti γ – vychází z konstrukčních vlastností šnekovnice a nelze ho měnit
- otáčky šnekovnice n – otáčky se mohou podle potřeby měnit pomocí frekvenčního měniče u pohonné jednotky.

3.1.3. Dílčí závěr

Experiment se bude provádět v laboratoři s konstantní pokojovou teplotou a vlhkostí, na navrhovaném stanovišti. Většina parametrů bude konstantní nebo pro tento experiment neměnitelná. Pro experiment je určena jedna spirála s danou délkou, stoupáním a průměrem. Bude použita trubice z průhledného plexiskla bez povrchové úpravy, z toho důvodu bude tření materiálu o trubici neměnitelné. Pro změnu těchto parametrů je nutné vyměnit celou část dopravníku (trubice, spirála). To samé platí pro globální součinitel odporu. Korekční součinitel není pro bezosé dopravníky znám, a rovněž u šnekových dopravníků počítá s náklonem pouze do 25°.

V případě bezosého dopravníku, který bude ve spodní části plně zasypán z důvodu středění, se zaplnění bude určovat podle schopnosti spirály pobrat materiál v závislosti na naklonění.

Výsledkem je, že parametry související s konstrukčními vlastnostmi částí dopravníku a použitých materiálech v experimentu jsou konstantní a jediné ovladatelné parametry jsou otáčky a náklon dopravníku.

3.2. Instrumentace

V aktuální konstrukci dopravníku jsou použita tři čidla:

1. Čidlo pro detekci krouticího momentu na spirále dopravníku,
2. Otáčkoměr pro snímání otáček spirály dopravníku,
3. Inklinoměr pro usnadnění nastavení sklonu dopravníku.

Kromě této instrumentace bude při výzkumu toku materiálu dopravníkem využito následující přístrojové vybavení:

- Kamera pro snímání pohybu částic materiálu při jejich průchodu dopravní cestou
- Teploměry a termokamera pro snímání oteplení komponent dopravníku a materiálu a určení pracovní teploty v okolí dopravníku
- Frekvenční měnič pro řízení elektromotoru pohonné jednotky
- Vlhkoměr pro určování vlhkosti přepravovaného materiálu.

Veškeré tyto přístroje jsou součástí vybavení laboratoří ústavu a jejich vlastnosti a způsob použití jsou tím dané. Následující text je proto věnován především výše uvedeným čidlům, která budou dokoupeny, nebo u kterých je třeba provést vyhodnocení jejich vlastností s ohledem na jejich plánované použití v navrhovaném dopravníku jako podklad pro jejich výběr.

3.2.1. Shannon-Kotělníkův teorém

ohledem na přenositelnost získávaných experimentálních dat a jejich zpracování s využitím výpočetní techniky budou veškeré signály z čidel digitální. Pro zajištění validity těchto dat je třeba respektovat dynamiku sledovaných dějů a s tím související dynamiku změn příslušných měřených fyzikálních veličin. Prakticky se tento požadavek projevuje nutností adekvátní snímací frekvence pro jejich záznam.

Teoretickým východiskem pro její určení je tzv. Shannon-Kotělníkův teorém, který konstatuje, že Každou funkci času s omezeným frekvenčním spektrem můžeme nahradit posloupností diskrétních vzorků odebíraných s periodou T_{vz} , která je rovna nejvýše polovině převrácené hodnoty nejvyšší frekvence f_{max} obsažené ve vzorkovaném signálu. Pak platí:

$$f_{vz} = \frac{1}{T_{vz}} \geq 2 \cdot f_{max} \quad 3.15$$

Kde f_{vz} je vzorkovací frekvence, s níž vzorkování provádíme. [9]

Uvedený vztah, tzv. **Nyquistova podmínka**, definuje nejnižší přijatelnou vzorkovací frekvenci.

V případě, že je tato podmínka dodržena (dodržení minimální hodnoty vzorkovací frekvence při vzorkování), nevznikne zkreslení typu aliasing. Aliasing způsobuje neodstranitelné rušení s velkým dopadem ve výsledném signálu.

3.2.2. Snímače otáček

Snímače je možné rozdělit podle použitého principu:

1. Mechanické, využívající odstředivé síly
2. Využívající elektromagnetickou indukci (tachodynamy, asynchronní a střídavé tachogenerátory)
3. Založené na optoelektronickém principu nebo s Hallovy sondou
4. Založené na změně kapacity, indukčnosti apod.

Další možné dělení je na:

- Analogové
- Číslicové
- Absolutní nebo přírůstkové

3.2.2.1. Mechanické otáčkoměry

Nejvíce běžně používaným je odstředivý otáčkoměr. Ten funguje na principu, že odstředivá síla je úměrná okamžité rychlosti a výchylka je vzhledem k setrvačné hmotě systému úměrná střední hodnotě rychlosti. Rozsah snímače je možný měnit pomocí změny převodů. Pokud mají otáčkoměry dobré provedení, dokáží měřit s přesností $\pm 1\%$ až $\pm 0,5\%$.

Další druh mechanických otáčkoměrů měří počet otáček za danou dobu. Díky tomu je možné mít na stupnici přímo otáčky. Princip těchto otáčkoměrů je, že měří střední hodnotu otáček v daném časovém intervalu a mohou tak měřit ustálené otáčky podstatně přesněji než jiné otáčkoměry. Přesnost je $\pm 0,01\%$ až $\pm 0,03\%$ ale je notně závislá na správném spojení otáčkoměru se strojem.

3.2.2.2. Elektromagnetické otáčkoměry

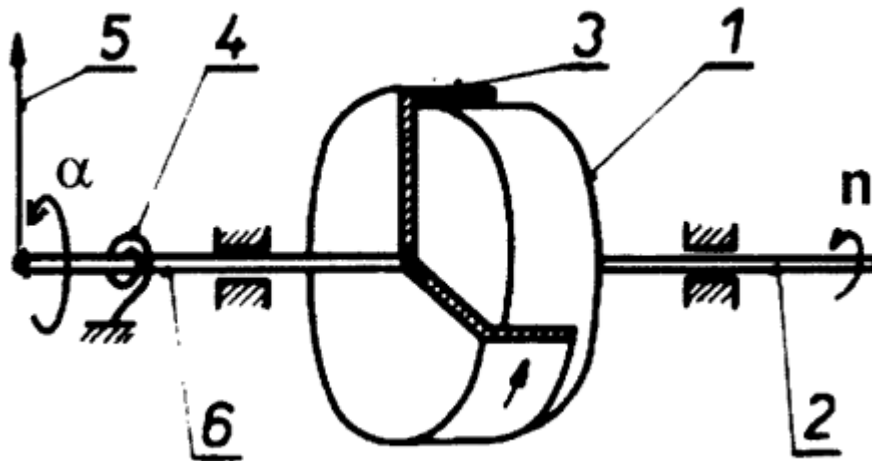
Jedná se o nejdůležitější skupinu snímačů otáček, které pracují na principu indukčního zákona:

$$U = B \cdot I \cdot v \quad 3.16$$

Generují napětí přímo úměrné otáčivé rychlosti ω .

Dělí se na:

- Tachodynamy
- Tachoalternátory



Obrázek 15 Schéma elektromagnetického otáčkoměru

Permanentní magnet (1) je uložen na hřídeli (2), který je spojen s mechanickou soustavou. Permanentní magnet rotuje v kovovém válcovém pouzdře (3), běžně vyrobeném z hliníku, které je spojené s ukazovací ručičkou (5). V pouzdře se indukují vířivé proudy, ty vytváří moment, který natáčí pouzdro. Ukazovací ručička se pak ustálí v takové poloze, kdy platí, že moment systému je v rovnováze s direktivním momentem spirálové pružiny (4), která je spojena s pouzdrém. [8]

Úhel α vychýlení je určen vztahem:

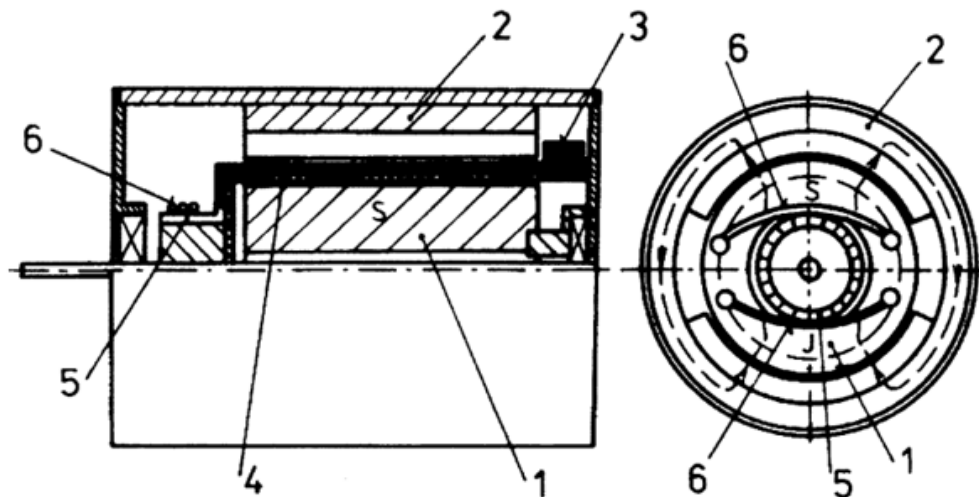
$$\alpha = \frac{1}{5\pi} \cdot \frac{l \cdot H}{b \cdot h^3 \cdot E} \cdot \frac{p_m^2 \cdot \phi_m^2}{\rho_e} \cdot n \quad 3.17$$

Příčemž:

- l ... délka pružiny
- b ... šířka pružiny
- h ... tloušťka pružiny
- E ... modul pružnosti materiálu pružiny
- H ... tloušťka kotouče
- ρ_e ... rezistivita kotouče
- p_m ... počet pólových dvojic perm. magnetu
- ϕ_m ... mag. tok, procházející kotoučem
- n ... otáčky

Ze vztahu plyne, že úhlová výchylka je úměrná otáčkám a je to lineární závislost. Přesnost je $\pm 1\%$ až $\pm 2\%$. Je vhodný pro vysoké otáčky a používá se jako tachometr v automobilovém průmyslu.

3.2.3. Tachodynamo



1-permanentní magnet, 2-feromagnetický prstenec s póly, 3-vinutí, 4-elektricky a magneticky nevodivý hrníček, 5-komutátor, 6-drátkové sběrací ústrojí

Obrázek 16 Schéma tachodynamu [8]

Jedná se o stejnosměrný stroj, který využívá generování stejnosměrného či střídavého napětí k indukci. Magnetický obvod je konstrukčně vytvořen tak, aby ve vzduchové mezeře bylo dosaženo homogenního magnetického toku ϕ . Kotva je vyrobena jako samonosná bez feromagnetika z důvodů vyloučení hystereze a minimálního momentu setrvačnosti. Jedním z důvodů tohoto provedení kotvy je její indukčnost, protože při rychlých změnách otáček by se projevil výrazněji indukčnost kotvy a způsobovala by zpoždění v narůstání napětí se změnou otáček. [8, str. 182]

Výstupní napětí je dáno:

$$U_0 = C_{SS} \cdot \phi \cdot \Omega \quad 3.18$$

Kde:

- C_{SS} ... konstanta stroje
- ϕ ... magnetický tok
- Ω ... úhlová rychlost

Odebíraný proud způsobuje úbytky napětí na odporu kotvy a zatěžovací odpor ovlivňuje velikost výstupního napětí. Další vlivy, které výstupní napětí ovlivňují jsou proměnlivý odpor kartáčů a reakce kotvy podle vztahu:

$$U = U_0 - R_a \cdot I_a - \Delta U_k \quad 3.19$$

Kde:

- R_a ... odpor kotvy tachodynamu
- I_a ... odebíraný proud z tachodynamu
- ΔU_k ... úbytek na kartáčích

Komutátor je kvůli těmto důvodům pokryt stříbrnou vrstvou a uhlíkové kartáčky jsou nahrazeny stříbrnými drátky. Díky této úpravě se sníží úbytek z 2000 mV na 10 – 50 mV. Vliv má i zvlnění výstupního napětí, které je způsobené vlastní konstrukcí tachodynamu a materiálem, který byl použit na výrobu magnetického obvodu. Způsob, jak tyto vlivy odstranit jsou konstrukční úprava a filtrace.

Protože je výstup tachodynamu napěťový, je potřeba pohlížet na vstupní odpor měřicího přístroje, kterým tachodynamo zatěžíme. Polarita vstupního napětí udává směr otáčení. Tachodynamo se řadí mezi nejpoužívanější analogové snímače otáček.[8]

Při optimální konstrukci může mít tachodynamo citlivost $10 V/(rad \cdot min^{-1})$, nelinearity 0,07%.

3.2.3.1. Tachoalternátor

Tachoalternátor je střídavý stroj, z toho plyne že má střídavé výstupní napětí. Konstrukce tachoalternátor neobsahuje komutátor. Stator je složen z vícepólového vinutí a rotor několika pólovými dvojicemi permanentních magnetů. V případě měření malé úhlové rychlosti běžně bývá až dvanáct pólových dvojic.

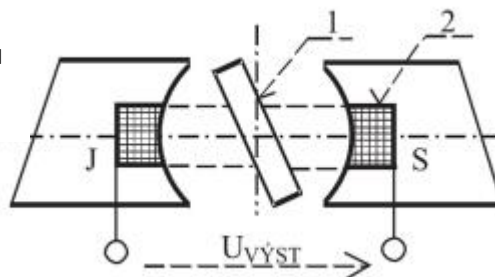
Stator se skládá z plechů s drážkami pro vinutí a vzduchová mezera je dostatečně velká, aby se při zkratu nezeslabil magnet rotoru. Výstupní napětí bývá v intervalu 10V až 100V a dovolené zatížení je běžně řádově 10^{-3} až 1 W Pokles napětí při zatížení způsobuje hlavně indukční složka impedance statoru. Závislost vstupního napětí s úhlovou rychlostí je lineární pouze v nezatíženém stavu.[8]

Tvar výstupního napětí je zkreslený a obsahuje 10 až 30 % vyšších harmonických. [8. str. 183] Zkreslení je možné snížit vhodnou volbou tvaru pólových nastavců. Snažíme se dosáhnout průběhu magnetického pole, který se blíží sinusovému průběhu.

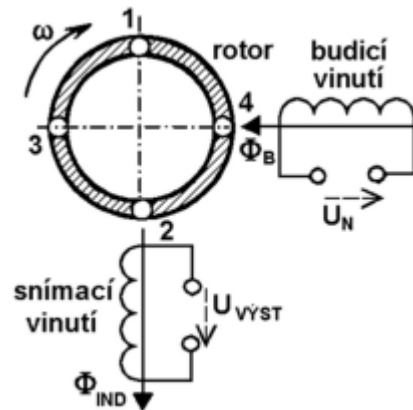
Standardní citlivost tachoalternátorů je v řádu $1 mV/(rad \cdot min^{-1})$. Při vysokých otáčkách ($10000 min^{-1}$ a více) dochází k ohřátí statoru vířivými proudy. Nastane zahřátí magnetu, a to způsobuje teplotní chybu. U měření nízkých otáček bývají potíže s filtrací usměrněného signálu.

Mezi výhody tachoalternátorů patří delší životnost a vyloučení rušivých vlivů kartáčků a kroužků. Nevýhodou jsou nelinearity vlivem saturace při vysokých rychlostech.

1. Feromagnetické tyč
2. Nepohyblivá cívka na rotoru



Obrázek 17 Tachoalternátor s permanentním magnetem na statoru [36]



Obrázek 18 Tachoalternátor s klecovým rotorem [36]

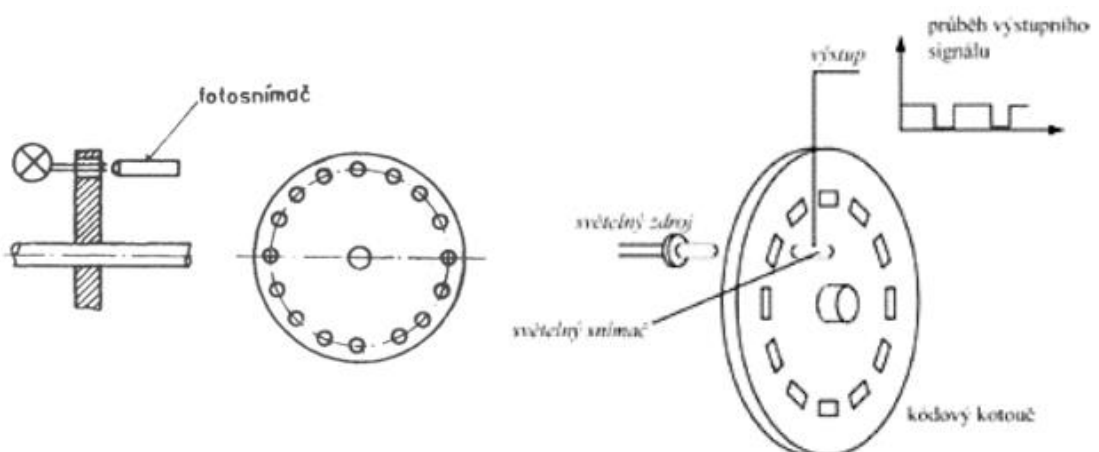
3.2.3.2. Impulsní snímače otáček

Impulsní snímače otáček fungují tak, že udávají počet impulsů a tím úhlové natočení měřeného hřídele. Při stanovení počtu impulsů za jednotku času získáme střední hodnotu úhlové rychlosti.

Snímače jsou konstrukčně složeny ze:

- Snímacího kotouče s dělením (to mohou být otvory, tuby atd.)
- Vlastního snímacího prvku. Ten snímá značky na kotouči a ty pak převádí na elektrický signál
- Vyhodnocovacího zařízení, které dál impulsy tvaruje a zpracovává na výstupní signál (může být jak analogový, tak digitální)

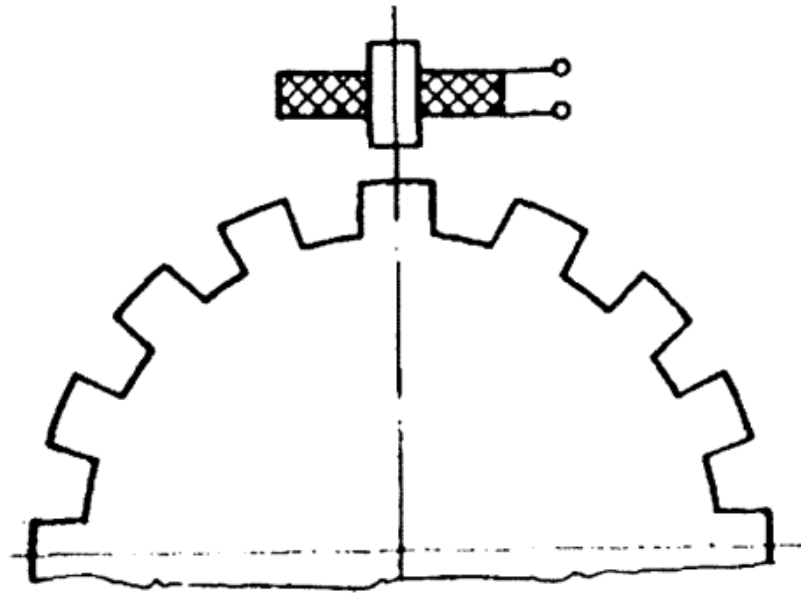
3.2.3.3. Snímač rychlosti s fotoelektrickým čidlem



Obrázek 19 Snímač rychlosti s fotoelektrickým čidlem [8]

Snímací kotouč má otvory, které periodicky propouštějí světlo ze světelného zdroje na fotodetektor (fotodioda, fototranzistor). Elektrické impulsy, které takto vzniknou, jsou zesíleny a po tvarování počítány čítačem [8]. Při náležitém počtu otvorů je možné získat přímo počet otáček za minutu. Všechny kruhové inkrementální snímače lze použít jako tyto snímače. Je možné sledovat frekvence až do 10^4 s^{-1} . Maximální počet snímaných otáček je určen mezní frekvencí optoelektrického snímacího prvku při daném počtu otvorů. [8]

3.2.3.3.1. Snímač rychlosti s induktačním čidlem



Obrázek 20 Snímač rychlosti s induktačním čidlem [8]

Snímací kotouč je opatřen zuby po obvodu (obr XX), proti kterým je umístěn bezkontaktní induktační snímač. Změnou magnetického toku se indukuje v cívkách střídavé napětí s frekvencí přímo úměrnému počtu sepnutí. Impulsy jsou počítány čítačem. Maximální počet snímaných otáček je opět určený mezní snímací frekvencí induktačního snímacího prvku při daném počtu zubů. [8]

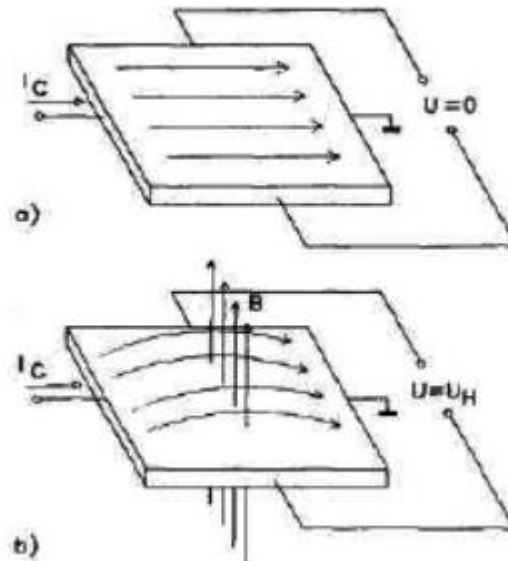
3.2.3.3.1. Snímač s Hallovou sondou

V případě že se zuby snímacího kotouče nahradí permanentními magnety je možné využít Hallovu sondu s dvoustavovým vstupem jako snímače. V Hallově sondě vzniká při otáčení permanentních magnetů pulsující napětí.

Zpracování impulsů je stejné jako u induktačního snímače. Jejich nejširší použití je v současnosti jako tachometr jízdních kol.

Hallův jev

Teče-li vodičem umístěným v magnetickém poli elektrický proud, vzniká působením magnetického pole příčná síla, působící na pohybující se elektrické náboje, která je vytlačuje na boční stěnu vodiče. [15]



Obrázek 21 Princip Hallova jevu a) proudová vlákna bez magnetického pole b) vychýlení proudových vláken v magnetickém poli [15]

Tento jev působí nejsilněji u tenkého plochého vodiče. Ve chvíli, kdy v tenké polovodičové destičce prochází proud, vytvoří se v ní rovnoměrně rozložená proudová vlákna. Pokud přiložíme vnější magnetické pole, bude na tato vlákna působit Lorentzova síla F_L .

$$F_L = Q \cdot v \cdot B \quad 3.20$$

Kde:

- Q ... přenášený elektrický náboj
- v ... rychlost pohybu náboje
- B ... magnetická indukce

Generované napětí je dáno vztahem:

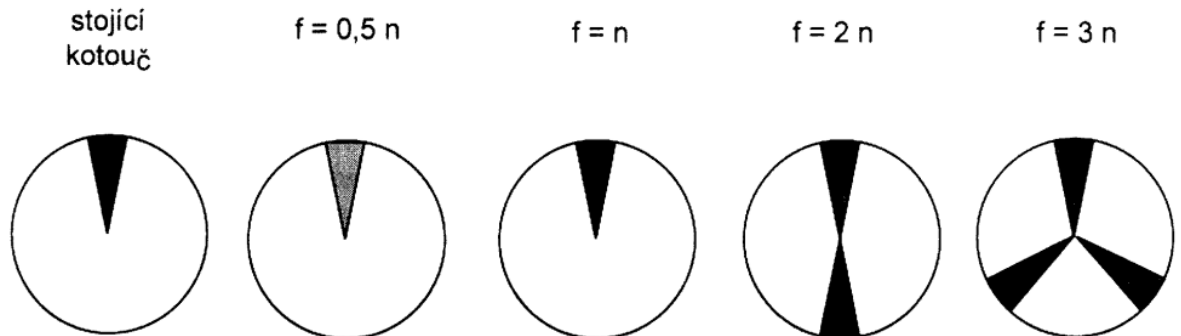
$$U_H = \frac{I \cdot B}{e \cdot N \cdot d} \quad 3.21$$

Kde:

- I ... proud procházející plechem
- B ... kolmá složka magnetické indukce
- e ... elementární náboj
- N ... koncentrace nosičů náboje
- d ... tloušťka plechu

3.2.3.4. Stroboskopické měření otáček

Využívají stroboskop. Ten umožňuje vytvářet záblesky stroboskopickou lampou s nastavitelným kmitočtem. Princip měření funguje na osvětlování točící se části měřeného stroje s umístěnou značkou krátkými světelnými záblesky.



Obrázek 22 Značka na hřídeli při osvětlení záblesky o frekvenci f [8]

Pokud je počet záblesků stejný jako otáčky, tak je značka osvětlována na stejném místě a jeví se, že stojí. Při polovičním počtu záblesků je taktéž vidět jedna stojící značka. Je-li počet záblesků dvojnásobný je značka osvětlována s potočením části o každou půlotáčku a je vidět na obvodu dvakrát. Z těchto důvodů je nutné měřit od vyšších počtů záblesků, než je počet otáček.

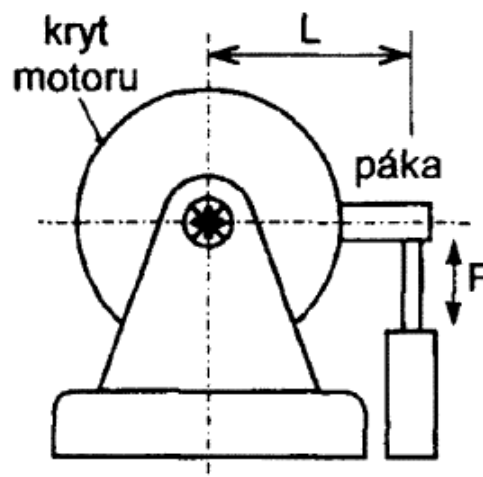
3.2.4. Snímače krouticího momentu

Princip těchto snímačů funguje na převodu momentu na deformaci. Snímače krouticího momentu mají několik provedení. Moment mohou měřit:

- Přímo
- Pomocí tahových čidel

3.2.4.1. Měření pomocí reakčního ramene

Tyto snímače využívají Newtonův zákon o akci a reakci. Používají se pro měření krouticího momentu rotačních strojů. [6]



Obrázek 23 Snímač momentu na principu Newtonova zákona akce a reakce [6]

Princip měření znázorněný na obrázku XX se používá u stacionárních dynamometrů. Skříň měřeného stroje je uložena v ložiscích na stojanu a propojena pákou se snímačem síly, který je ukotven a měří reakční sílu. Reakční síla odpovídá momentu reakce statoru podle vztahu:

$$M = F \cdot L \quad 3.22$$

Kde:

- F ... reakční síla
- M ... měřený moment
- L ... délka páky

V praxi při provozních měření se využívá častěji rotačních snímačů momentu, které se montují mezi poháněnou a poháněcí soustavu na společnou hřídel.

3.2.4.2. Tenzometrický snímač momentu

Pro měření krouticího momentu M_k se na měřicí část speciálně upravené hřídele nalepí čtveřice tenzometrů, které jsou zapojené do můstku a nalepeny pod úhlem 45° vzhledem k ose hřídele. V takovém případě se v měření nebude projevovat vliv tahu, ohybu a teploty (více viz kapitola odporová tenzometrie). Vztah mezi relativním prodloužením ε jednoho tenzometru a krouticím momentem M_k je dán:

$$M_k = \pm \varepsilon \cdot \frac{2 \cdot G \cdot J_p}{r} \quad 3.23$$

Kde:

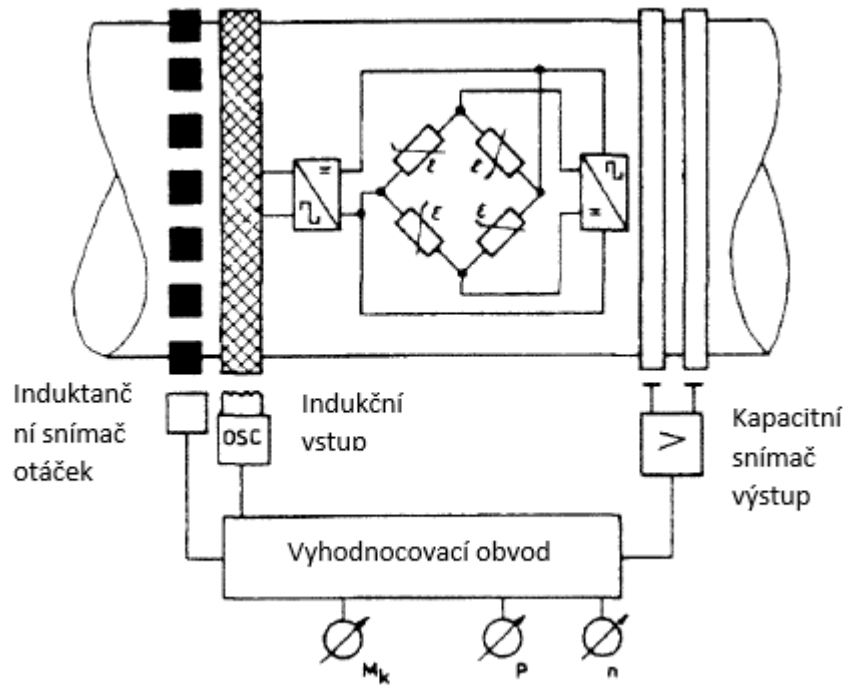
- M_k ... krouticí moment
- G ... modul pružnosti ve smyku
- J_p ... polární moment setrvačnosti
- r ... poloměr hřídele

Pro přenesený výkon pak platí vztah:

$$P = M_k \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \quad 3.24$$

Kde:

- n ... otáčky

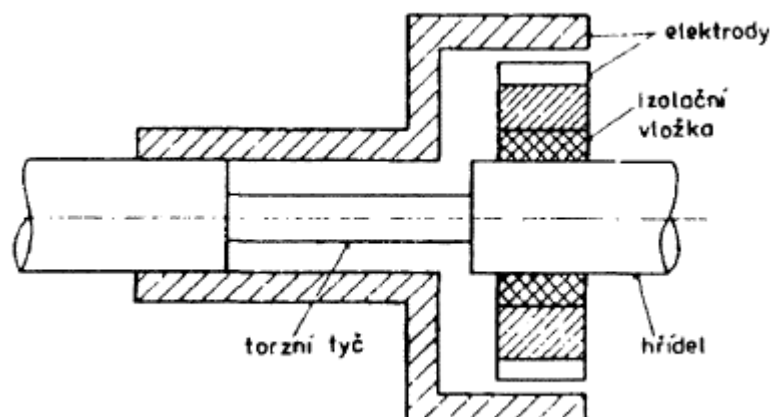


Obrázek 24 Tenzometrický snímač momentu [6]

Jelikož hřídel, na které jsou tenzometry, rotuje, musí se vyřešit vyvedení signálu a napájení. Nejjednodušší způsob řešení je bezkontaktní způsob na principu transformátoru se vzduchovou mezerou a převodníkem f/U na stejnosměrné napětí.

Postup měření je, že se výstupní napětí z měřicí diagonály tenzometrického můstku převede na převodníku U/f na impulsní signál, který je z hřídele snímán kapacitním snímačem.

3.2.4.3. Kapacitní snímače momentu

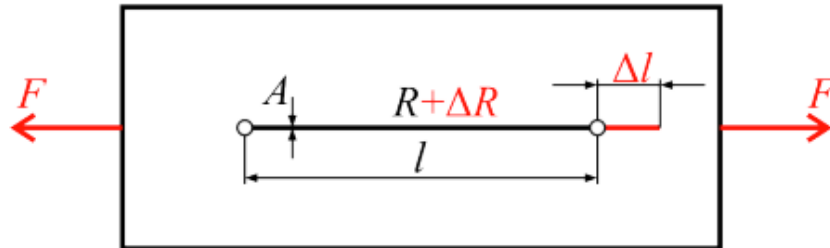


Obrázek 25 Kapacitní snímač momentu [6]

3.3. Odporová tenzometrie

Jedná se o nepřímou metodu měření. Poměrné prodloužení je určeno dle poměrné změny elektrického odporu $\Delta R/R$ tenzometru vlivem jeho deformace. Platí vztah:

$$\frac{\Delta R}{R} = f(\varepsilon)$$



Obrázek 26 Teorie fungování tenzometru [5]

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad 3.25$$

Kde l je původní délka vodiče, A plocha průřezu vodiče a ρ je měrný odpor vodiče

Také ale platí vztah $\rho = \rho(T)$ kde T je teplota a tedy: $\frac{\partial \rho}{\partial T} \neq 0$

Dále je uveden Poissonův zákon:

$$\varepsilon_{př} = -\mu \cdot \varepsilon_{pod} \quad 3.26$$

Kde: $\varepsilon_{př}$ je příčná deformace, ε_{pod} je podélná deformace a μ je Poissonovo číslo.

A tedy můžeme napsat, že: $\Delta l = \varepsilon_{pod} \cdot l$, a zavedeme-li si že,

$$A = a \cdot b \quad 3.27$$

můžeme pak dále rozepsat jako:

$$a = \varepsilon_{př} \cdot a \quad 3.28$$

$$a = \varepsilon_{pod} \cdot a \quad 3.29$$

$$b = \varepsilon_{př} \cdot b \quad 3.30$$

$$b = \varepsilon_{pod} \cdot b \quad 3.31$$

Jestliže bude vodič zatížen v podélném směru, dojde v tomto směru k jeho prodloužení a v příčném směru naopak k jeho zkrácení. Tím pádem se změní jeho výstupní odpor. To můžeme popsat rovnicí:

$$dR = d \cdot \frac{l}{A} = d\rho \cdot \frac{l}{A} + \rho \cdot d\left(\frac{l}{A}\right) = d\rho \cdot \frac{l}{A} + \rho \cdot \frac{dl \cdot A - l \cdot \Delta A}{A^2} \quad 3.32$$

Jestliže budeme předpokládat nezávislost ρ na zatížení a uvažovat konstantní teplotu T , pak bude $d\rho = 0$ a můžeme napsat:

$$\Delta R = \rho \cdot \frac{\Delta l \cdot A - l \cdot \Delta A}{A^2} \quad 3.33$$

Se zavedeným $A = a \cdot b$ dosadíme z rovnic 3.28-3.31 do vztahu 3.27 z čehož vyjde:

$$\Delta A = \Delta a \cdot b + a \cdot \Delta b + \Delta a \cdot \Delta b \quad 3.34$$

A po zanedbání diferencí vyšších řádu zůstane:

$$\Delta A = \Delta a \cdot b + a \cdot \Delta b \quad 3.35$$

Do rovnice 3.35 se nyní použije Poissonovu konstantu:

$$\Delta A = -\mu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot a \cdot b + a \cdot (-\mu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot b) = -2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot A \quad 3.36$$

Vše zpět dosadíme do rovnice 3.33:

$$\Delta R = \rho \cdot \frac{\varepsilon_{pod} \cdot l \cdot A - l \cdot (-2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot A)}{A^2} = \rho \cdot \frac{l}{A} \cdot \varepsilon_{pod} \cdot (1 + 2 \cdot \mu) \quad 3.37$$

V tuto chvíli můžeme zavést poměrnou změnu odporu jako poměr změny odporu ΔR ku původní hodnotě R :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\rho \cdot \frac{l}{A} \cdot \varepsilon_{pod} \cdot (1 + 2 \cdot \mu)}{\rho \cdot \frac{l}{A}} = \varepsilon_{pod} \cdot (1 + 2 \cdot \mu) \quad 3.38$$

Z toho můžeme napsat konečný vztah:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon_{pod} \quad 3.39$$

Kde k je k-faktor tenzometru a jeho přesnou hodnotu udává každý výrobce. Hodnota se uvádí pro jednotlivá balení nejlépe.

3.3.1. Rozdělení odporových tenzometrů

3.3.1.1. Kovové tenzometry

Provedení kovové mřížky tenzometrů jsou:

- Drátkové (starší, dnes už jen pro vybrané speciální účely např.: vysoké teploty, velké deformace)
- Fóliové (umožňující tvary mřížek nejrozmanitějších tvarů)
- Vrstvové (bývají vakuově nanosené nebo naprašované, používají se převážně pro snímače tlaku)

3.3.1.2. Drátkové tenzometry

Název materiálu	Přibližné složení	Průměrná hodnota K
konstantan	57 % Cu, 43 % Ni	2.05
karma	73 % Ni, 20 % Cr (příp. Fe+Al)	2.1
nichrome V	80 % Ni, 20 % Cr	2.2
platina-wolfram	92 % Pt, 8 % W	4.0

Obrázek 27 Parametry slitin, které se používají pro kovové tenzometry [4]

Lepené s podložkou

Nejstarší typ tenzometru. Mřížka pro měření je vyrobena z drátku a připevněna na podložku lepidlem. Používají se k zjišťování jedno i víceosé napjatosti, zbytkového napětí, k vyšetřování koncentrátorů a gradientů napětí v oblastech pružných i plastických deformací. Některé speciální typy umožňují měření v extrémních teplotách a měření při dlouhodobě vysokém dynamickém namáhání [6, str. 60].

Drátkové tenzometry mají zaručen malý rozptyl odporu, k-faktoru a teplotních součinitelů (důležité pro vyloučení rušivých vlivů při současném měření více tenzometry). Mají širokou nabídku tenzometrů s odpovídajícím sortimentem lepidel a akceptovatelnou cenu. Jejich hlavní nevýhodou je malý k-faktor

Bez podložky

Taktéž bývají označovány jako „tenzometry s volnou mřížkou“. Jejich použití je převážně jako vysokoteplotní tenzometry připevňované keramickým tmelem.

S volnou mřížkou, nelepené

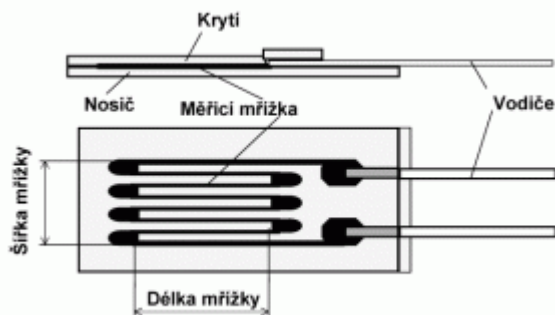
Tyto tenzometry mají uchycené odporové drátky mezi soustavu držáků (izolačních kolíčků) tak, že pokud působí měřená veličina, dojde tím ke změně délky a důsledně i ke změně odporu. Jelikož nejsou aktivní články přilepeny, nejsou zde problémy s přenosem deformace na celém povrchu odporového článku.

Mezi jejich výhody patří malá hystereze, malý posun nulového bodu a možnost použití při vyšších teplotách a to až 310 °C. Naopak nevýhodou je celkem nízká rezonanční frekvence, znatelně dlouhá doba, která je potřeba, aby se dosáhlo tepelné rovnováhy a v neposlední řadě velmi náročná výroba (na mechanické provedení).

Uplatňují se jako příložné odporové tenzometry, snímače pro měření tlaků, tlakových sil, zrychlení atd.

3.3.1.2.1. Fóliové tenzometry

V současnosti se jedná o nejvíce používané kovové tenzometry. Celý tenzometr bývá většinou skryt v zapouzdřených tenzometrických průmyslových snímačích. Mřížka tenzometrů je vyrobena z fólie (standartně o tloušťce 3 – 6 μm) a přilepena na ohybnou podložku (tlusté 20 – 50 μm) pomocí lepidla. Tvar měřicí mřížky se běžně tvoří leptáním. Materiál podložky bývá nejčastěji polyamid nebo sklem vyztužený fenolový film. Fóliové tenzometry disponují lepšími podmínkami pro převod deformace ze základního materiálu na fólii a pro přenos tepla z fólie na základní materiál a naopak, díky čemuž mají dispozice pro získání lepších metrologických vlastností [6].



Obrázek 28 Základní provedení fóliového tenzometru [4]

Běžně se používají odpory o hodnotách 120 Ω a 350 Ω . Životnost tenzometru bývá obvykle 10⁷ cyklů a pro připojení jsou vyvedeny pájecí plošky nebo drátové vývody. Tenzometr měří prodloužení vždy ve směru meandru a při měření působící síly je nutné tenzometr správně natočit do daného směru působení. Příčná citlivost na deformaci v bočním směru je nežádoucí při víceosých použití ale je možné ji snížit speciálním provedením meandru. V případě nutnosti měřit deformaci či působící sílu ve více směrech se využívají tenzometry s více meandry, které jsou natočeny do různých směrů.

Praktické provedení:

- Jednoosé
- Dvousé
- Růžice

Pro fóliové tenzometry je možné relativně snadno vytvořit libovolnou konfiguraci měřicí mřížky a je možné použít vyšší napájecí napětí. U konstrukce velmi malých snímačů má nalepení fóliových tenzometrů na tenkostěnný kovový pružný prvek za efekt negativní hodnoty charakteristik jako je creep (tečení) a hystereze. Vrstvové tenzometry tyto nedostatky nemají.

3.3.1.2.1. Vrstvové

Vyrábějí se:

- **katodovým rozprašováním** (katodové rozprašování, vypařování jsou procesy, které vedou k uvolňování částic ze zdroje)
- **Vypařováním (napařováním) ve vakuu** (napařování, katodové napařování jsou procesy, které vytváří vrstvy na podložce některou z používaných metod)

U obou metod se využívá vakuové metodiky.

Vrstvové tenzometry se téměř výhradně používají jako přesné snímače tlaku. Mají vysokou variabilitu. Stabilitu, a z toho důvodu i vysokou cenu.

Vrstvové tenzometry se připravují nanesením nejprve dielektrické keramické vrstvy a následně kovové vrstvy na pružinový materiál. Touto metodou se dá dosáhnout vysokého odporu, libovolné konfigurace mřížky, dobrého přenosu deformace, dlouhodobé stability a opakovatelnosti měření. Tenzometry jsou vytvořeny přímo na zadní straně měřicí membrány a elektronika je umístěna na pružné destičce plošných spojů, která je přímo přichycená na snímací prvky. Díky tomu není nutné připojení drátků pájením (silně citlivé na vibrace a tlakové rázy)

3.3.1.3. Polovodičové tenzometry

Vlastnost	tenzometr Si, typ P	tenzometr drátek nebo fólie Karma
součinitel K	125	2
$\alpha_R [1/K]$	$12 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_K [1/K]$	$16 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
převodní charakteristika	nelineární	lineární

Obrázek 29 Porovnání vlastností kovových a polovodičových tenzometrů [4]

Přestože teorie polovodičových tenzometrů je z podstatné části propracovaná, jejich úroveň a rozšíření není na úrovni kovových tenzometrů, protože se potýkají s řadou problémů ve vztahu k citlivosti, chování vůči změnám teploty atd.

Přednostmi polovodičových tenzometrů jsou:

- Vysoký součinitel citlivosti (umožňují měření velmi malých přetvoření)
- Velmi vysoká únavová životnost (100x větší než u kovových tenzometrů)
- Výborná stabilita (neprojevuje se hystereze, drift ani creep v širokém teplotním rozsahu)
- Malé konstrukční rozměry
- Vysoký odpor

3.3.2. Druhy odporových tenzometrů

Odporové tenzometry se vyrábějí v odlišných velikostech a typech. Kromě délky a tvaru mřížky, tak hrají roli parametry jako jsou různé druhy uložení mřížky, pájecích kontaktů a také poloha a počet měřicích mřížek.

3.3.3. Délka měřicí mřížky

Běžně vyrobený tenzometr má délku měřicí základny v rozmezí 0,6 mm až 150 mm. Pro správnou volbu délky je nejdůležitější parametr homogenita (nebo nehomogenita) pole napětí. Délka tenzometru neovlivňuje jeho citlivost (citlivost je na délce nezávislá). Citlivost je závislá na relativním prodloužení.

3.3.4. Homogenní pole napětí

Hlavní podmínkou pro zvolení délky měřicí základny je volné místo na měřeném objektu. Pro velké objekty je vhodné použít tenzometry s délkou od 3 mm do 6 mm a to z hlediska přesnosti i jednoduchosti aplikace.

3.3.5. Nehomogenní pole napětí

Tenzometry fungují podle integračního principu. To znamená, že výsledkem měření je střední hodnota přetvoření pod měřicí základnou. Pokud je pole napětí nehomogenní je nutné učinit rozhodnutí, zda se bude měřit střední hodnota napětí v určeném místě, nebo lokální špičky napětí. Obecně platí, že s větší delší základnou naměříme menší hodnoty a tím větší bude výsledná chyba.

Využití měření středního napětí je zejména u zrnitých materiálů (vyskytují se místa s odlišnými hodnotami deformace z důvodů příměsků, různé velikosti zrna a různé moduly pružnosti). Je doporučeno volit délku měřicí základny alespoň pětkrát delší v poměru k největšímu zrnu v měřeném materiálu. [6, str. 63]

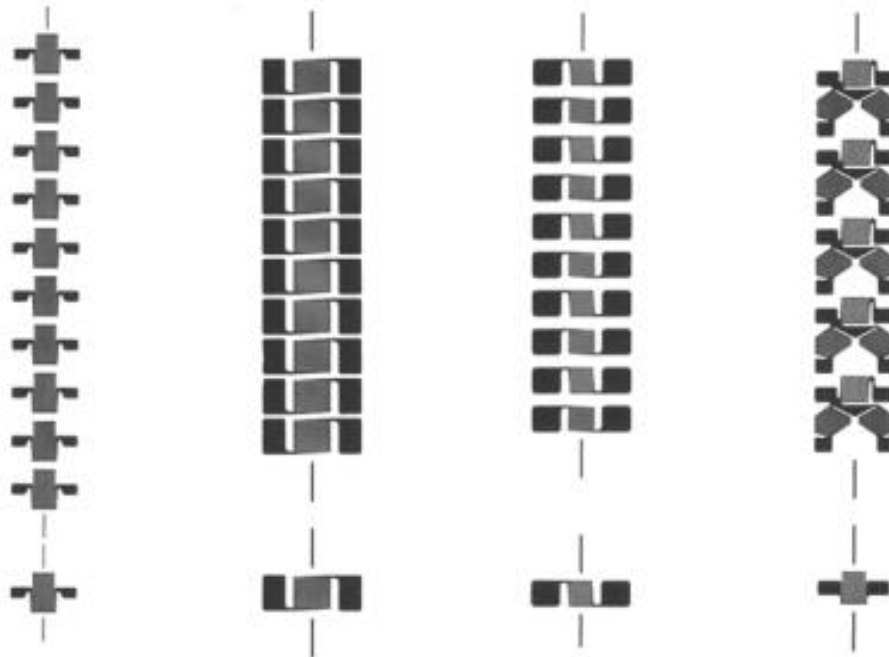
Měření špiček napětí se využije například pro maximální hodnoty v kořeni vrubu. Vhodná je co nejmenší základna (nulová je z technického hlediska nereálná a nejmenší vyrobitelná má délku 0,2 mm)

3.3.6. Vícenásobné tenzometry

Skládají se z několika jednotlivých měřicích mřížek na jedné podložce. Běžnou aplikací jsou tenzometrické kříže, růžice nebo řetězce. Měřicí základny jsou na společné podložce situovány v přesně dané orientaci s danou roztečí. Instalují se rychleji než srovnatelný počet samostatných tenzometrů.

3.3.6.1. Tenzometrické řetězce

Řetězec tvoří kombinace měřicích mřížek stejného typu na společné podložce v pravidelných intervalech. Obvyklé provedení řetězce (platí i u růžic) je z deseti měřicích mřížek nebo pěti skupin se třemi měřicími mřížkami. Řetězec je ukončen jednou samostatnou mřížkou stejného typu, jejíž účel je kompenzační nebo má doplňující funkci. Řetězce se využívají hlavně pro zjištění gradientu napětí.

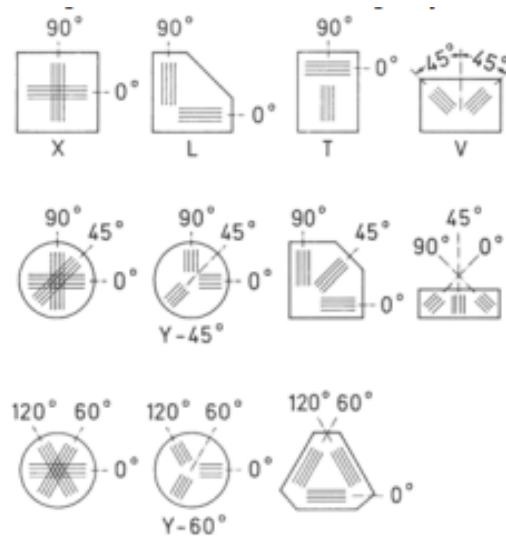


Obrázek 30 Tenzometrické řetězce [6]

3.3.6.2. Tenzometrické kříže a růžice

V případě zkoumání rovinné deformace se musí měřit deformace ve více směrech. V případě, že jsou známy směry hlavních napětí, se využijí kříže se dvěma nezávislými vinutími, které jsou pod úhlem 90° . Nejznámější typy tenzometrických křížů, které se vyrábí jsou: X, L, T a V (pojmenování je podle tvaru křížení měřicích základen).

Nastane-li případ, kdy není znám směr hlavních napětí pro zkoumání rovinné napjatosti, je nutné měřit deformaci alespoň ve třech nezávislých směrech. V takových případech se používají tenzometrické růžice, které se vyrábí ve dvou základních provedeních odlišných natočením jednotlivých měřicích základen $0^\circ; 45^\circ; 90^\circ$ a $0^\circ; 60^\circ; 120^\circ$, a opět jako u tenzometrických křížů existuje několik variant umístění měřicích mřížek na podložku.

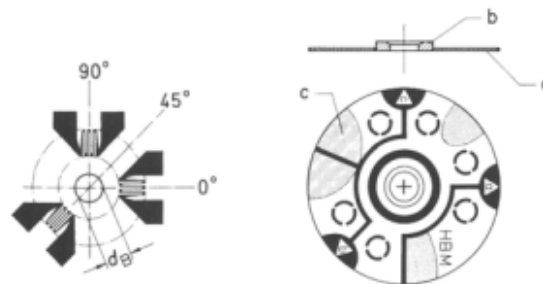


Obrázek 31 Způsoby umístění vynutí [6]

3.3.6.3. Tenzometrické růžice pro měření zbytkového napětí

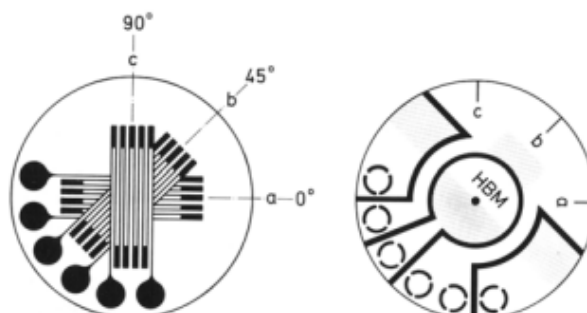
V současnosti jsou dostupné dvě metody, jak měřit zbytkové napětí pomocí tenzometrických růžic. Obě využívají princip odstraňování materiálu z měřeného objektu v okolí nalepené tenzometrické růžice [6].

Historicky starší je odvrtávací metoda, která funguje na principu přerozdělení pole napjatosti a deformace tím, že se do středu tenzometrické růžice vyvrtá otvor. Pro měření se využije růžice s natočením vynutí 0° ; 45° ; 90° . viz obrázek XX



Obrázek 32 Růžice s třemi vynutími [6]

Druhý způsob je metoda sloupku, která stejně jako první metoda používá růžici se třemi vynutími se stejným natočením. Rozdíl oproti prvnímu způsobu je, kde odvrtá materiál. V tomto případě se pomocí prstencového vrtáku uvolní sloupek materiálu po obvodu tenzometru (obrázek YY). [6]



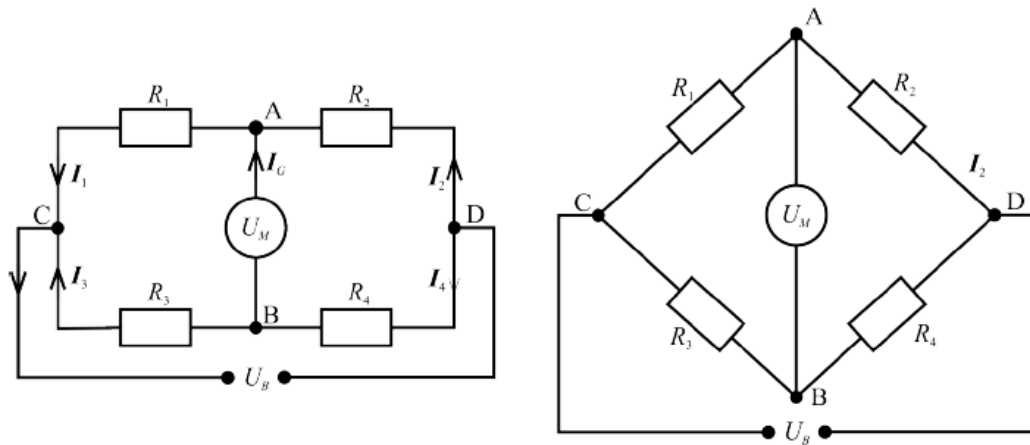
Obrázek 33 Tenzometrické růžice s vyvrtanými sloupci materiálu po obvodu [6]

3.3.7. Můstková metoda zapojení tenzometrů

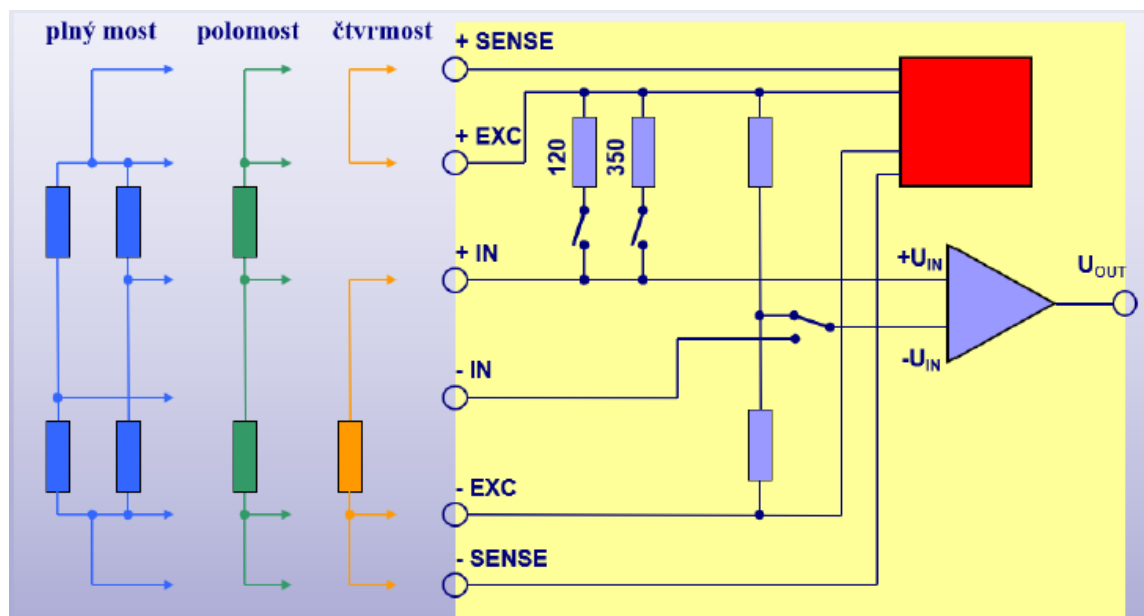
Změny odporu tenzometrů ΔR vlivem jejich deformace se pohybují ve velmi malých hodnotách (změna odporu pro $R = 120 \Omega$ je $\Delta R = (2,4 \cdot 10^{-1}; 2,4 \cdot 10^{-4})$ [5])

Měření takto malých odporových změn je nejčastěji prováděno pomocí Wheatstonova můstku, kde jsou závislosti mezi proudy, napětími a odpory dány Kirchhoffovými zákony při napájení můstku stejnosměrným proudem s konstantním napájecím napětím U_B . Napájení konstantním proudem zvyšuje citlivost a snižuje nelinearitu Wheatstonova můstku.

Aby byl můstek vyvážený ($I_g = 0$) musí platit: $R_1 R_4 = R_2 R_3$. Je prakticky výhodné aby $R_1 = R_2$ a $R_3 = R_4$ nebo aby byly všechny odpory ve větvích můstku stejné. Pokud jsou tenzometry v průběhu zatěžování deformovány, nazývají se aktivní. Tenzometry, které se nedeformují jsou kompenzační.

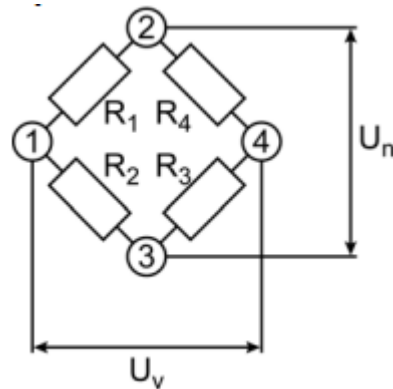


Obrázek 34 Wheatstonův můstek [5]



Obrázek 35 Typická zapojení tenzometrů [37]

3.3.7.1. Napájení konstantním napětím



Obrázek 36 Wheatstonům můstek s napájením konstantním napětím [6]

V můstku jsou zapojeny čtyři odpory R_1, R_2, R_3, R_4 . Mezi uzly 2 a 3 je napájecí diagonála, která je připojena ke konstantnímu napájecímu napětí U_n . Mezi uzly 1 a 4 je výstupní napětí můstku U_v , které je připojeno k přístrojovému zesilovači s teoreticky nekonečným odporem. Výstupní napětí U_v je dáno:

$$U_v = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad 3.40$$

Za předpokladu, že $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ nebo $R_1 = R_3 = R_2 = R_4$, tak bude $U_v = 0$ a můstek bude ve vyváženém stavu. Změny hodnot odporů způsobí malé napěťové změny, které jsou pak vztaženy ke klidovému stavu a jsou pak zesilovány, aby mohly být dále zpracovány.

Změna odporů R_1, R_3, R_2, R_4 o hodnotu $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ způsobí změnu výstupního napětí ΔU_v . Změna odporů vznikne délkovým přetvořením a teplotní změnou. Změnu výstupního napětí ΔU_v v závislosti na změnách odporu můžeme zapsat:

$$\frac{\Delta U_v}{U_n} = \frac{r}{(1+r)^2} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot (1 - \eta) \quad 3.41$$

Kde $r = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}$ a η je nelineární člen

$$\eta = \frac{1}{1+r} \cdot \frac{1}{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} + r \cdot \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)} \quad 3.42$$

V případě, že jsou všechny odpory v můstku stejné, (tedy $r = 1$) vztah XYZ se zredukuje na:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{\Delta R_i}{R_i}}{\left(\sum_{i=1}^4 \frac{\Delta R_i}{R_i} \right) + 2} \quad 3.43$$

Z rovnic 3.42 a 3.43 můžeme konstatovat, že pro $r = 1$ bude nelinearita nulová, pokud bude platit, že $\Delta R_1 = -\Delta R_2$ při $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$, nebo $\Delta R_3 = -\Delta R_4$ při $\Delta R_1 = \Delta R_2 = 0$. případně pokud $\Delta R_1 = -\Delta R_2$ a zároveň $\Delta R_3 = \Delta R_4$ [6, str 89]

V praxi je tento výsledek důležitý, protože značí, že se můstek chová lineárně, pokud se jako aktivní tenzometry zapojí na místech odporů R_1 a R_2 nebo R_3 a R_4 (půlmostové zapojení) a v dané dvojici dojde ke stejné změně s opačným znaménkem. K vymizení nelinearity dojde i tehdy, pokud se zapojí aktivní tenzometry stejného odporu na místech všech čtyř odporů (plný most). Při použití jednoho aktivního tenzometru se můstek chová mírně nelineárně. V případě, že relativní změna odporu aktivního tenzometru $\frac{\Delta R}{R} < 0.02$, nepřekročí nelinearita v celém rozsahu hodnotu 1%

Pro praxi se využívá zjednodušená rovnice 3.41 ve zjednodušeném tvaru (3.44) z důvodu nepodstatného vlivu nelinearity. Rovnice ZZ popisuje chování můstkového zapojení dostatečně přesně.

$$\frac{\Delta U_v}{U_n} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad 3.44$$

Do vztahu 3.44 se dosadí délkové přetvoření tenzometrů, které jsou zapojeny do jednotlivých větví můstku.

$$\frac{\Delta U_v}{U_n} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad 3.45$$

Kde k je deformační součinitel tenzometru (k-faktor)

Zavedeme výsledné přetvoření $\varepsilon_v = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4$

$$\frac{\Delta U_v}{U_n} = \frac{k}{4} \cdot \varepsilon_v \quad 3.46$$

A také platí:

$$\frac{\Delta U_v}{U_n} = \frac{k_z}{4} \cdot \varepsilon_i \quad 3.47$$

Kde ε_i je indikované přetvoření [$\mu m/m$]

Z toho vyjádříme ε_i :

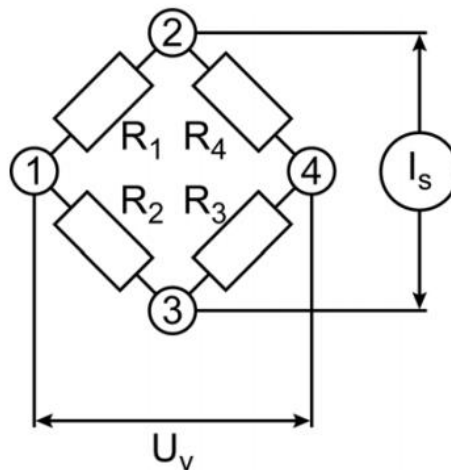
$$\varepsilon_i = \frac{4}{k_z} \cdot \frac{\Delta U_v}{U_n} \quad 3.48$$

V praktickém využití je nejčastěji $k_z = 2$

Z úvahy, že změny odporů v sousedních ramenech můstku se promítnou na výstupu můstku rozdílem jejich hodnot a opačně změny odporů v protilehlých ramenech se promítnou na výstupu v součtu, můžeme využít těchto skutečností:

- Pro kompenzaci vlivu teploty pomocí zapojení stejně ohříváných tenzometrů do sousedních ramen můstku
- Pro kompenzaci délkových přetvoření od vnitřních sil umístěním dvou tenzometrů orientovaných proti sobě podél osy a zapojením do protilehlých ramen můstku
- ke zvýšení vstupního napětí můstku použitím většího počtu aktivních tenzometrů
- pro odstranění vlivu odporů přívodních vodičů, parazitních odporů konektorů atd.

3.3.7.2. Napájení konstantním proudem



Obrázek 37 Wheatstonův můstek s napájením konstantním proudem [6]

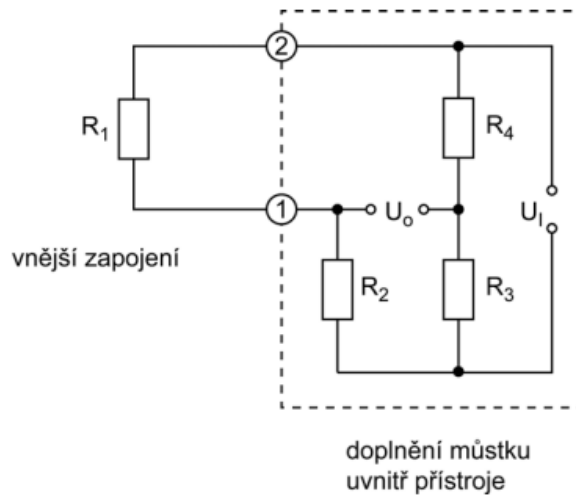
Napájení konstantním proudem zvyšuje citlivost a snižuje nelinearitu Wheatstonova můstku. Vstupní napětí je rovno:

$$U_v = \frac{i_s}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} \cdot (R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4) \quad 3.49$$

Aby byl můstek v rovnováze platí opět stejné pravidlo jako u napájení konstantním napětím: $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$ nebo $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$. Důležitou vlastností tohoto zapojení je, že jeho nelinearita je poloviční oproti můstku s napájením konstantním napětím.

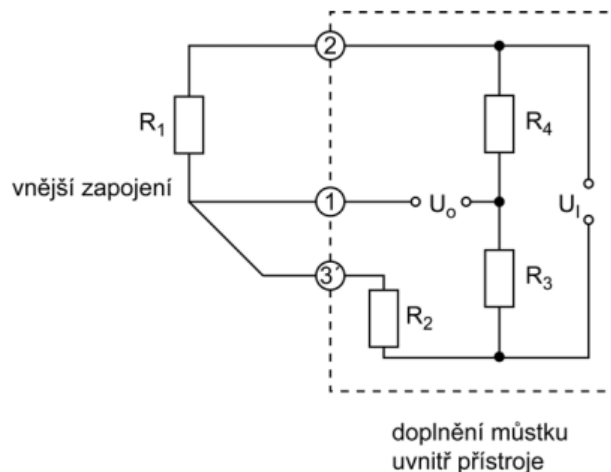
3.3.8. Čtvrtmost

Toto zapojení má jeden aktivní tenzometr a zbytek můstku je složen z náhradních odporů umístěných uvnitř zesilovače. Hlavní nevýhodou čtvrtmostového zapojení je nelinearita a teplotní nestabilita (teplotní změny odporu aktivního tenzometru nejsou kompenzovány, nebo jsou kompenzovány při použití samokompenzačního tenzometru jen do určité míry) [6]. I přes tyto nežádoucí vlastnosti se čtvrtmostové zapojení používá u zatěžovacích zkoušek konstrukcí, které používají desítky tenzometrů na různých měřicích místech.



Obrázek 38 čtvrtmostové zapojení ve Wheatstonově mostě [6]

Čtvrt most je možné použít ve třívodičovém zapojení, které kompenzuje teplotní závislost odporu přívodů k tenzometru. K vysoko ohmovému vstupu měřicího zesilovače je přiváděno napětí z vrcholu můstku třetím přidaným vodičem. Nežádoucí vlivy, které tvoří dva zbývající vodiče se vyruší kvůli jejich zapojení ve dvou sousedních ramenech můstku. [6]

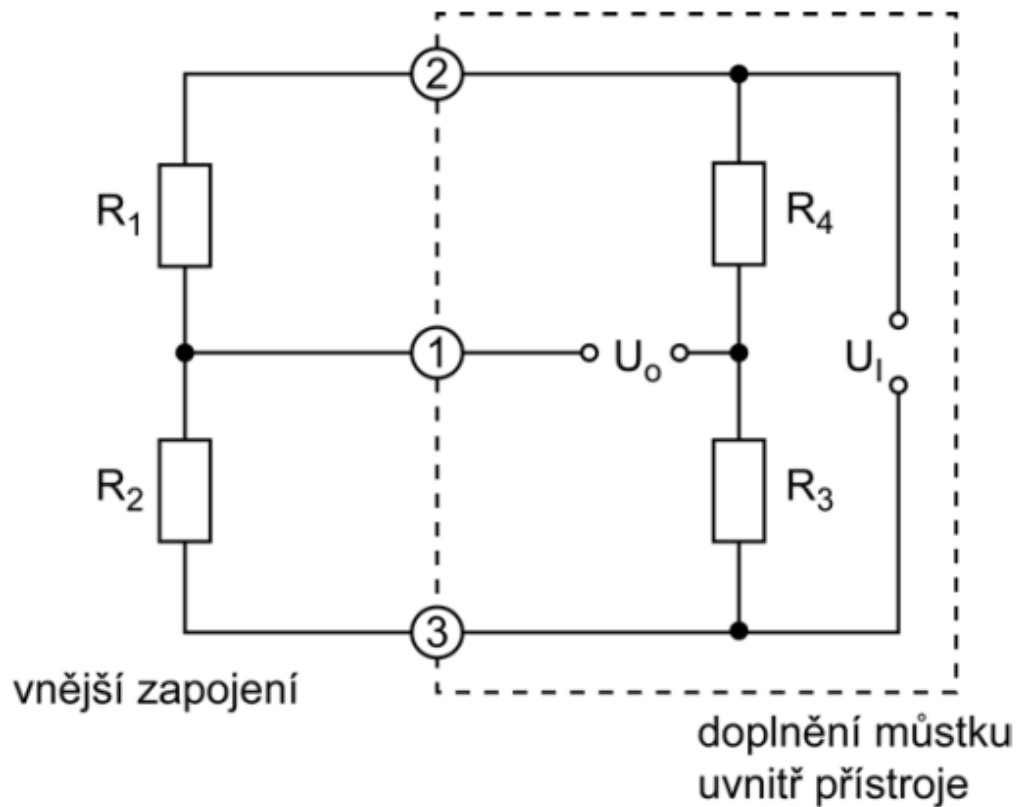


Obrázek 39 čtvrtmostové zapojení tenzometrů ve Wheatstonově mostě – třívodičové zapojení [6]

Výstupní signál ze čtvrtmostu je:

$$U_M = \frac{U_B}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_{1,0}} = \frac{U_B}{4} \cdot k \cdot \varepsilon_1 \quad 3.50$$

3.3.9. Půlmost

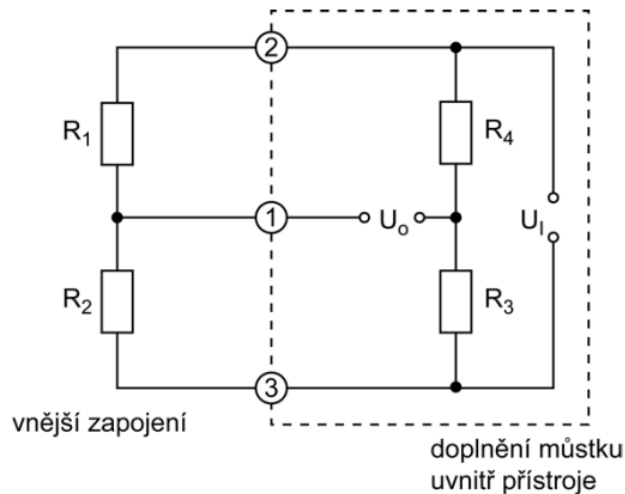


Obrázek 40 Půlmostové zapojení ve Wheatstonově mostě [6]

Půlmost je složen ze dvou aktivních tenzometrů na místě dvou sousedících odporů, které mají společný uzel na výstupní diagonále můstku a které jsou doplněné do plného můstku náhradními odpory [6]. Platí pravidlo, že pokud zajistíme na obou tenzometrech s totožným odporem stejné délkové přetvoření s opačnými znaménky, odstraníme tak nelinearitu. Teplotní změny odporů aktivních tenzometrů, které jsou stejné se vyruší.

$$U_M = \frac{U_B}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_{1.0}} = \frac{U_B}{2} \cdot k \cdot \varepsilon_1 \quad 3.50$$

3.3.10. Plný most



Obrázek 41 Plnomostové zapojení ve Wheatstonové mostě

V tomto zapojení jsou všechna ramena osazena tenzometry se stejným odporem. Vstupní napětí je maximální dosažitelné a teplotní závislost tenzometrů je zcela kompenzována.

Plnomostové zapojení se nejčastěji používá pro experimentální měření s velmi vysokými požadavky na dlouhodobou stabilitu a v konstrukci tenzometrických snímačů.

Plný most se dá modifikovat: jako aktivní tenzometr je použita pouze jedna z dvojice tenzometrů v protilehlých ramenech a druhá je použita jako kompenzační.

$$U_M = U_B \cdot \frac{\Delta R_1}{R_{1.0}} = U_B \cdot k \cdot \varepsilon_1 \quad 3.51$$

3.3.11. Dílčí závěr

Jestliže dojde ke změně odporu v jedné větvi můstku, je proud indikátoru neboli napětí mezi svorkami úměrný této změně

Podle znaménka U ve větvích můstku můžeme říct:

- V případě změn odporu v sousedních (protilehlých) větvích můstku, bude výsledný signál úměrný rozdílu (součtu) těchto odporových změn.

Jelikož mohou být odporové změny stejného i opačného znaménka, můžeme upravit předchozí tvrzení:

- Pokud je změna odporů souhlasná/nesouhlasná, bude výsledný signál úměrný rozdílu/součtu těchto odporových změn
- Za předpokladu že je změna ve dvou sousedních větvích můstku souhlasná a stejně velká, je výsledný signál nulový a můstek zůstane vyvážený. Pokud bude změna nesouhlasná a stejně velká je výsledný signál dvojnásobný
- Bude-li změna odporů ve dvou protilehlých větvích můstku souhlasná/nesouhlasná, je výsledný signál úměrný součtu/rozdílu těchto odporových změn.
- Bude-li změna odporů ve dvou protilehlých větvích můstku stejně velká a souhlasná/nesouhlasná, je výsledný signál dvojnásobný/nulový. [6]

3.3.12. Vlastnosti a jevy tenzometrů

3.3.12.1. Elektrický odpor

Tenzometry se vyrábí s různými jmenovitými odpory. V současnosti se nejčastěji používají tenzometry s jmenovitým odporem 120Ω . Aby byl můstek vyvážený, je nutné, aby tenzometry měly stejný odpor. Tedy aby platilo:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \text{ nebo } R_1 = R_3 = R_2 = R_4.$$

Zpravidla bývá tolerance 0,5% rozdílu jmenovité hodnoty a tenzometry z jednoho balení obvykle tuto toleranci splňují. Například tenzometr o odporu 120Ω má napětí $5V$ a jeho proudové zatížení bude $20 mA$, v takovém případě relativně malá změna napětí může u velice malých příčných průřezů tenzometrů způsobit velkou proudovou zátěž.

3.3.12.2. Napájecí napětí

Výrobce udává maximální možnou napěťovou zátěž tenzometru z důvodu, aby nedošlo příliš velkou proudovou zátěží k ohřátí a následnému přehřátí tenzometru. Přehřátí měřicí mřížky by mohlo mít za následek ohnutí podložky, hysterezi, creep nebo nestabilitu nulového bodu.

3.3.12.3. Použitelný teplotní rozsah

Zásadní dva aspekty, které se musí brát v potaz:

- Výše teploty, při které je možné s vybraným tenzometrem ještě měřit
- Kolísání teploty během měření

Tenzometry je možné měřit v rozsahu -270°C až 1000°C v závislosti na jejich provedení. Teplotní stability se dosahuje mechanickou, elektrickou a chemickou stálostí jednotlivých složek. U tenzometrů z konstantanu dojde už při teplotě 260°C k teplotnímu driftu (více kapitola 4.5.4.1) a z toho důvodu se využívají jiné materiály, které ale zase naopak negativně ovlivňují některé jiné vlastnosti. Nad 600°C má smysl provádět už je dynamická měření.

3.3.12.4. Příčná citlivost

V ideálním případě při měření mělo docházet u tenzometrů ke změně odporu a v důsledku i přetvoření pouze v aktivní délce. Závislost těchto dvou veličin je dána deformačním součinitelem tenzometru. V praxi ale ovšem dochází někdy k deformaci v příčném směru na aktivní délku. Příčná citlivost je důležitá pro měření a je dána vztahem:

$$q = \frac{k_t}{k_l} \quad 3.52$$

Příčemž k_l je deformační součinitel tenzometru ve směru aktivní délky

$$k_l = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_l} \quad 3.53$$

A k_t je deformační součinitel tenzometru v příčném směru.

$$k_t = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_t} \quad 3.54$$

Pro vyrušení tohoto vlivu se zesilují jednotlivé konce smyčky měřicí mřížky.

3.3.12.5. Odezva tenzometru na změnu teploty

3.3.12.5.1. Zdánlivá deformace

Teplota ovlivňuje hodnotu k-faktoru tenzometru. Výrobce provádí pouze statická měření za pokojové teploty, ale udává teplotní koeficient, kterým je možné přepočítat hodnotu k-faktoru na teplotu měřeného místa [5]. Tato závislost mezi k-faktorem a teplotou není plně lineární, ale lineární aproximace je dostatečně přesná.

Při kolísání teploty po nainstalování tenzometru budou kolísat i hodnoty měřených deformací [5]. S tímto jevem souvisí 3 faktory

- Teplotní součinitel délkové roztažnosti α_S zkoumaného materiálu
- Teplotní součinitel délkové roztažnosti α_G materiálu mřížky
- Teplotní součinitel elektrického odporu β_G materiálu mřížky

Poměrnou změnu odporu tenzometru vyvolanou změnou teploty můžeme zapsat jako:

$$\frac{\Delta R}{R} = (\alpha_S - \alpha_G) \cdot \Delta T + \beta_G \cdot \Delta T = k \cdot \varepsilon_z \quad 3.55$$

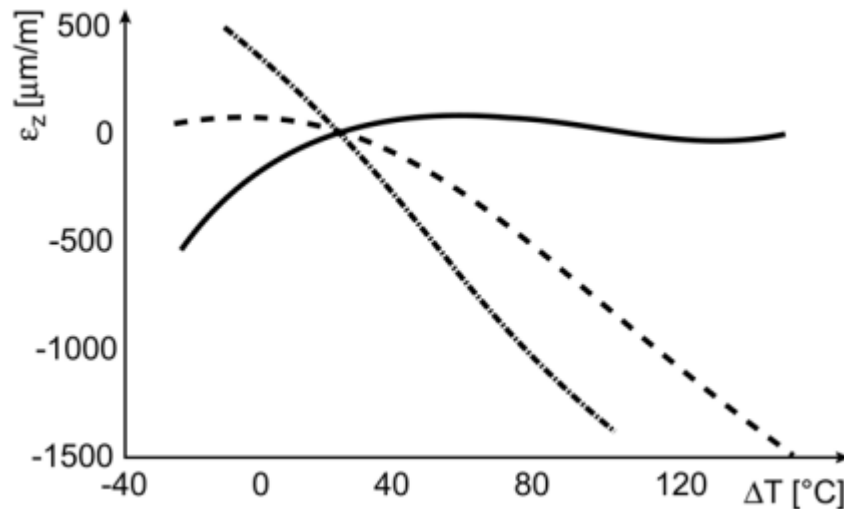
Kde ε_z je zdánlivá deformace vyvolaná změnou teploty. A můžeme ji vyjádřit:

$$\varepsilon_z = \left[(\alpha_S - \alpha_G) + \frac{\beta_G}{k} \right] \cdot \Delta T \quad 3.56$$

Zavedeme pojem „teplotní součinitel měřeného místa“ $\alpha_M = (\alpha_S - \alpha_G) + \frac{\beta_G}{k}$ a vyjde nám:

$$\varepsilon_z = \alpha_M \cdot \Delta T \quad 3.57$$

Někdy výrobci uvádí závislost zdánlivé deformace na teplotě jako polynom což je výhodné pro početní korekci jejího vlivu.



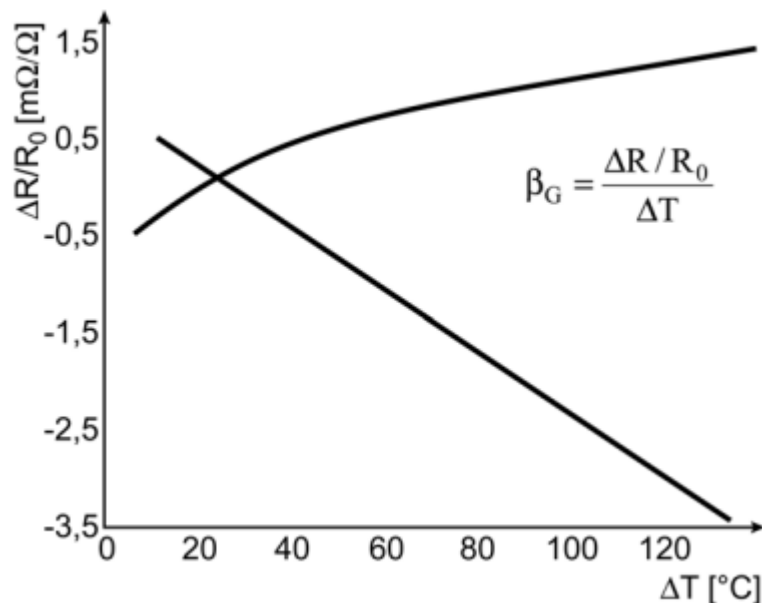
Obrázek 42 Příklad údajů zdánlivé deformace téhož tenzometru nalepeného na hliníku (čerchovaná čára), oceli (přerušovaná čára) a křemíku (plná čára) [6]

3.3.12.5.2. Částečný závěr

Vliv teploty je potřeba eliminovat. Toho můžeme dosáhnout použitím samokompenzačních tenzometrů nebo zapojením kompenzačních tenzometrů do můstku (v něm dochází pouze ke změně odporu vlivem teploty). Pokud zapojíme aktivní a kompenzační tenzometr do sousedních větví můstku, tak bude výsledný signál způsobený změnou teploty nulový [6]

3.3.12.5.3. Teplotně samokompenzované tenzometry

Pro docílení minimalizace zdánlivé deformace v určitém teplotním intervalu se využívají různé způsoby výroby a zpracování mřížky. Hlavně se využívá změny teplotního součinitele elektrického odporu materiálu mřížky. Tuto veličinu je možné usměrnit změnou chemického složení materiálu mřížky a tepelným a mechanickým zpracováním.

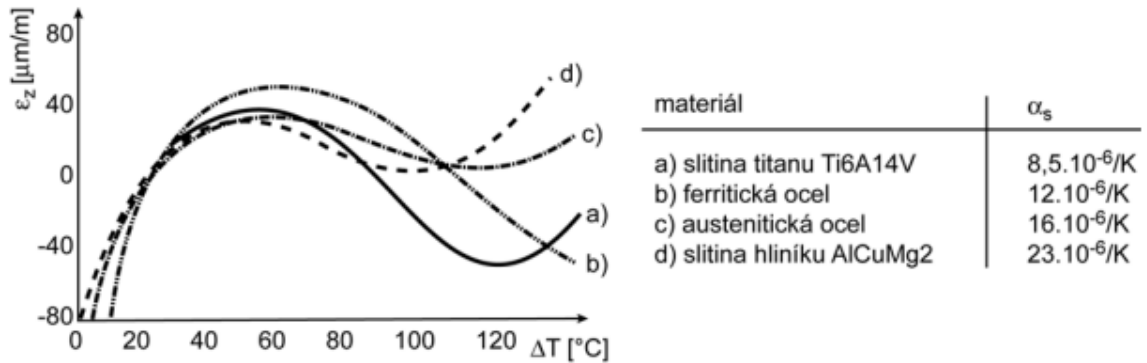


Obrázek 43 Míra ovlivnitelnosti součinitele elektrického odporu materiálu mřížky [6]

Cílem je mít takovou hodnotu β_G aby byla splněna podmínka:

$$\beta_G = (\alpha_G - \alpha_S) \cdot k \quad 3.58$$

Členy nejsou lineárně závislé na teplotě, a proto je nemožné dosáhnout dokonalé teplotní samokompensace. Obrázek ukazuje, v jaké míře je možné kompenzace dosáhnout



Obrázek 44 Míra samokompensace tenzometru různých materiálů [6]

3.3.12.5.4. Teplotní drift

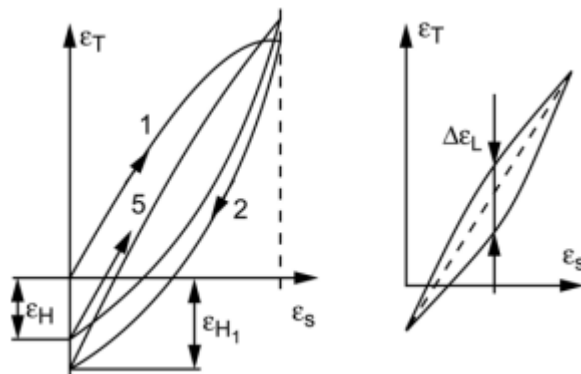
Vzniká hlavně mikrostrukturálními změnami, oxidací nebo korozí mřížky. Mezi další důvody patří relaxace napětí vznikající v měřicí mřížce nebo v lepidle kvůli teplotním změnám, které následně ovlivní mřížku nebo lepidlo. Tyto děje jsou závislé jak na teplotě, tak na čase.

Teplotní drift je nevratná změna a v důsledku znemožňuje dosažení původního výchozího nulového bodu a ovlivňují ho nejvíce složení materiálu mřížky a její mechanické a tepelné zpracování. Vhodným můstkovým zapojením (plný most nebo půlmost) je možné odstranit chyby způsobené teplotním driftem.

3.3.12.6. Hystereze

Hystereze u tenzometrů je rozdíl v hodnotě naměřené změně odporu při vzrůstu a následném poklesu přetvoření na stejné úrovni přetvoření. [6]

Hystereze je závislá na více parametrech měřeného místa (přípevnění, podložka apod.) Experimentálně bylo dokázáno, že hystereze se s počtem zatěžovacích cyklů snižuje, dokud se neustálí na konstantní hodnotě. Při precizním nalepení tenzometru je obvykle hystereze v rozmezí (0,25 – 0,5%) měřené deformace (obr. 45). [6]



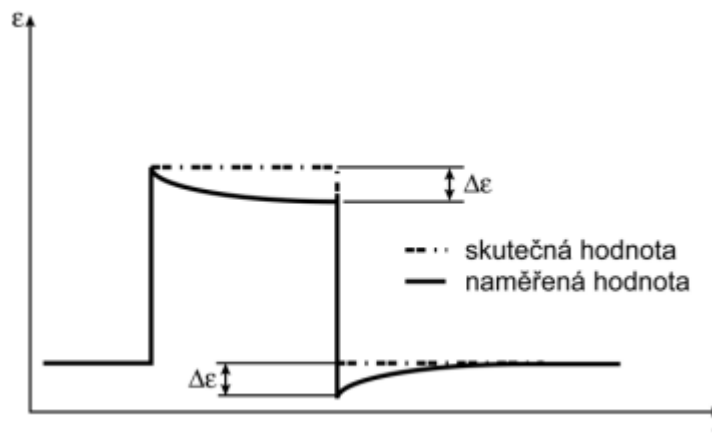
Obrázek 45 Hystereze tenzometru [6]

3.3.12.7. Creep

Při instalaci tenzometru se efekt creepu projevuje, když při konstantním statickém zatěžování dojde v průběhu času k snížení měřené veličiny (je vidět na obrázku XX). Creep je způsoben materiálovými vlastnostmi jednotlivých vrstev, pomocí kterých je přetvoření přenášeno k měřicí mřížce a na jeho velikost má vliv i použité lepidlo [6].

Efekt creepu je výraznější u tenzometrů s krátkou aktivní měřicí délkou a prakticky existují dva způsoby, jak ho kompenzovat:

- Použití tenzometrů konstrukčně uspořádaných tak aby se u nich nevyskytoval creep
- Využití elastického „after“ efektu, který má totožný průběh jako creep ale je přesně opačný (v praxi velice obtížné využít)



Obrázek 46 Pokles měřené veličiny v čase [6]

3.3.12.8. Mezní podmínky

3.3.12.8.1. Při statické deformaci

Tenzometry pro běžné použití jsou omezeny v intervalu $\varepsilon = \pm 3000 \mu m/m$. Pro případy, kdy je nutné měřit ve větším rozsahu, existují speciální tenzometry schopné měřit přetvoření až $20 cm/m$. Maximální měřitelné přetvoření je závislé na konstrukci tenzometru a na jeho materiálu. [6]

V oblasti plastické deformace ztrácí měřicí mřížka svoje vlastnosti a z toho důvodu se nedá provádět opakované měření. V případech měření velkých přetvoření dojde ke zvýšení nelinearity tenzometru i Wheatstonova můstku a nejde je už zanedbat. Nelinearita Wheatstonova můstku prošla rozsáhlým výzkumem, ale nelinearita tenzometru není příliš prozkoumaná a není o ní moc dostupných informací.

Tenzometry pro velké přetvoření je nemožné vyrábět jako teplotně samokompenzační, protože při plastické deformaci dojde v měřicí mřížce k mikrostrukturálním změnám materiálu a v důsledku toho se změní teplotní koeficient odporu.

3.3.12.8.2. Při dynamickém namáhání

Tenzometry se běžně používají pro dynamické měření. Jelikož mají malé rozměry a zanedbatelnou hmotnost, neovlivní měřené místo.

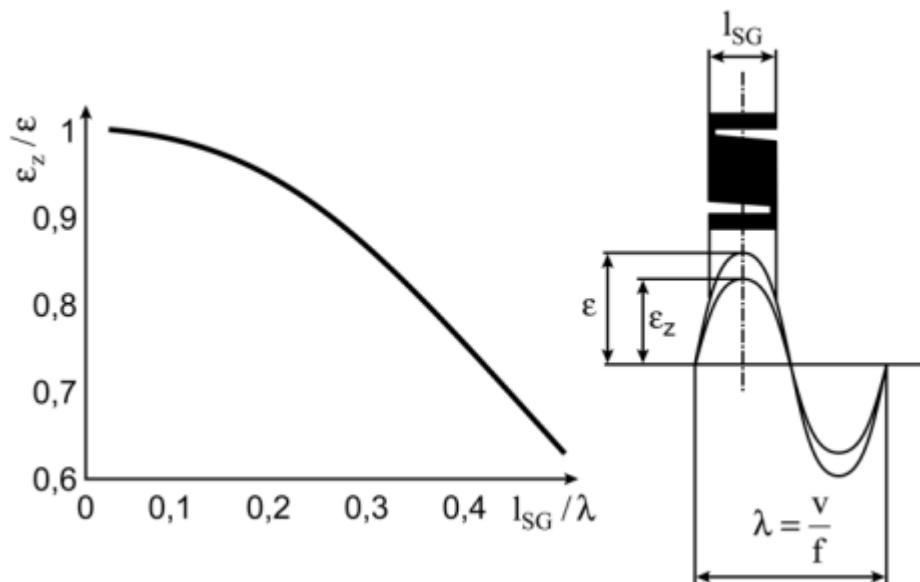
Dynamické měření omezují dvě podmínky:

- Horní hranice frekvence, kde je ještě možné měřit s dostatečnou spolehlivostí
- Únavové a lomové frekvence tenzometru

3.3.12.9. Mezní frekvence

Při zatěžování, které vyvolá v materiálu podélné vlny (např. rázy) se může vyskytnout stav, kdy má přetvoření, které vznikne pod tenzometrem, příliš malou vlnovou délku. Tenzometr, který funguje na integračním způsobu zprůměruje vznikající špičky a změří pouze střední hodnotu přetvoření.

Aby měření dalo správné výsledky, musí být poměr aktivní délky tenzometru a vlnové délky podélné vlny co nejmenší. Pouze za tohoto předpokladu je možné změřit špičku napětí. V případě měření rázů a rychlých dynamických dějů je doporučeno použití tenzometrů s délkou mřížky 3 – 6 mm [6].



Obrázek 47 Poměr vlnové délky a aktivní délky tenzometru [6]

3.3.12.10. Únava

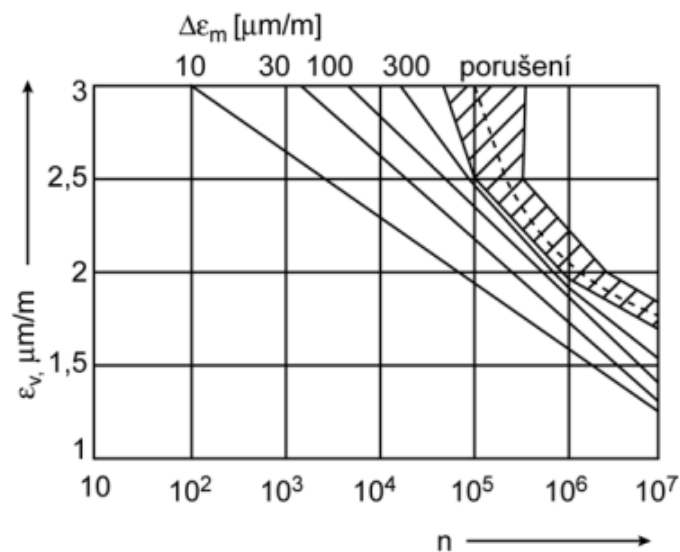
Pokud je tenzometr zatěžován konstantní amplitudou, může někdy dojít k nerovnoměrnosti v indikaci amplitudy zatěžující síly anebo tvarovému zkreslení. Tento problém vzniká v měřicí mřížce a připevňovacích kontaktech. Tuhost podložky a adheziva je příliš velká, a proto se nepředpokládá jejich poškození. [6, str. 73]

U tenzometrů s kovovou měřicí mřížkou se poškození může projevit jako:

- Přírůstek odporu vlivem amplitudy a kolísáním zatížení (důvodem je drift dynamické nuly)
- Přibývajícím porušováním materiálu a mikroskopickými trhlinami na hranicích zrn v měřicí mřížce. Je to trvalé poškození, které se tvoří pomalu.

Provedením mnoha experimentů se dokázalo, že tenzometry s dlouhou měřicí mřížkou mají lehce lepší únavové vlastnosti než ty s krátkou.

Obrázek XX ukazuje závislost posuvu nulového bodu ve vztahu k amplitudě přetvoření u střídavého cyklu na počtu cyklů [6]. Tuto závislost vždy uvádí výrobce.



Obrázek 48 Závislost posuvu nulového bodu ve vztahu k amplitudě přetvoření u střídavého cyklu na počtu cyklů [6]

3.3.13. Metody měření odporových změn tenzometrů

Nulová metoda

- Používá se při statickém zatěžování. Můstek se musí před a po zatížení vyvážit, proto je metoda časově náročnější.
- Při statickém zatížení dojde ke změně odporu v aktivních tenzometrech a pro opětovné vyvážení se musí změnit odpor v některé zbývající větvi můstku. Např.: dojde ke změně u tenzometru R_1 . Pro vyvážení změníme odpor na odporu R_2 . Zapišeme rovnici: $(R_1 + \Delta R_1) \cdot R_4 = (R_2 + \Delta R_2) \cdot R_3$. Pokud změříme změnu ΔR_2 , pak můžeme vypočítat změnu odporu u aktivního tenzometru ΔR_1 ze vztahu: $\Delta R_1 = \Delta R_2 \frac{R_1}{R_2}$
- Přesnost měření není závislá na kolísání napájecího napětí U_B

Výchytková metoda

- Využití při dynamických měření
- Změna odporu aktivního tenzometru se odvozuje od změny proudu I_g (I_g je proud protékající galvanometrem v měřicí úhlopříčce můstku, když se můstek rozváží)
- Měřené veličiny jsou: proud I_g nebo napětí mezi body AB (obrázek XX), čemuž se říká napěťový výstup
- Změna odporu aktivního tenzometru je přímo úměrná změně měřeného proudu, který měří galvanometr v měřicí úhlopříčce můstku
- U měření je nutné, aby nedocházelo ke kolísání napájecího napětí U_B
- Výstupní signál je velmi slabý a je potřeba použít zesilovače pro další zpracování signálu

3.3.14. Instalace odporových tenzometrů

3.3.14.1. Příprava kovové plochy k lepení

Pro dobré spojení je nezbytná drsná přilnavá plocha, a proto je potřeba místo, kde bude tenzometr aplikován připravit několika kroky (ne všechny kroky jsou nutné, záleží na stavu měřeného)

Hrubé čištění

- Je nezbytně nutné odstranit hrubá znečištění jakou jsou rez, okuje, nátěry v dostatečně velké oblasti kolem místa měření.

Zarovnání

- Dalším krokem je odstranění nerovností zapilováním nebo jiným vhodným způsobem.

Odmaštění

- Pro odmaštění se využije vhodného prostředku podle druhu znečištění. Podmínkou použití rozpouštědel a ředidel je, že po nich nesmí zůstat žádná rezidua a musí být chemicky čistá. Samotná technická čistota není dostatečná.

Zdrsnění

- Povrch se lehce zdrsňuje, aby mělo lepidlo co nejlepší přilnavost. Zdrsnění se dosahuje naleptáním nebo opískováním ostrým brusným materiálem. V případě, že nejde využít ani jednu ze zmiňovaných metod, se využije smirkový papír

Dočištění

- Před nalepením se musí opět odstranit veškeré nečistoty, které vznikly při zdrsňování povrchu. Opět se využije rozpouštědla na netkané látky. Pinzetou uchopený kus látky se použije pouze na jeden tah a pak se vymění. Po dočištění se na povrch už nesmí sahat prsty.

3.3.14.2. Příprava nekovové plochy k lepení

Nekovové povrchy se připravují téměř stejně jako kovové. Lepené povrchy je nutné zbavit nečistot a mastnoty.

3.3.14.3. Lepení tenzometru

Lepená strana tenzometru se taktéž pečlivě očistí (látkou napuštěnou freonem). Kontaktní plochy se v případě nutnosti mohou přilepit lepicí páskou, která zakryje také integrované pájecí body. Tenzometry z fenolové pryskyřice je potřeba v případě silného zakřivení plochy zformovat horkým vzduchem nebo vyhřátým modelem na 150°C. Tenzometr se přilepí po vyrovnání lepicí páskou na jedné straně, aby se dal odklápět.

Tenzometr se odklopí a na jeho lepenou plochu se nanese dostatečné množství lepidla. Poté se překryje teflonovou fólií a palcem se vytlačí přebytečné množství lepidla. Tenzometr se nesmí pohnout a musí být přidržen po určitou dobu a podle teploty okolí se nechá přirozeně vytvrdit nebo je dále přidržen silou.

3.4. Rešerše souvisejících studií

V krátkém přehledu pro udržení srozumitelnosti jsou zde uvedeny související studie, které byly provedeny na téma šnekových dopravníků a bezosých šnekových dopravníků.

3.4.1. Výzkumy související se šnekovými dopravníky (s reálnou osou šnekovnice)

Konig a Riemann, publikováno 1960 [17]

- Výzkum byl proveden na vliv průměru šneku na jeho kapacitu. Závěr výzkumu je že závislost zvýšení kapacity se zvětšením průměru roste skoro lineárně až do maximálního bodu. Po dosažení bodu se kapacita snižuje ale potřebný výkon se s rostoucím průměrem dále zvyšuje.

Stevens, publikováno 1960 [18]

- Cílem jeho výzkumu bylo zkoušení výkonnosti několika šnekových dopravníků. Zjistil, že pro pohyb zrna v dopravníku je využito méně než 50% výkonu. Velká část výkonu je spotřebována na vstupu, kde pozoroval výraznou cirkulaci zrna.

O'Callaghan, publikováno 1962 [19]

- Zabýval se vlivem délky sání na výkonné požadavky vertikálních šnekových dopravníků pracujících za různých rychlostí.

Burkhardt, publikováno 1967 [20]

- Zkoumání vlivu stoupání šneku, radiální vůle, vystavení a úrovně násypky na výkon šnekových podavačů.

Peart a kol., publikováno 1967 [21]

- Vytvoření postupu pro zkoušení výkonnosti šnekových dopravníků.

Carleton a kol., publikováno 1969 [22]

- Jeho výzkum se zabýval výkonností šnekových dopravníků a podavačů ve vztahu ke geometrii spirály, otáčkám, úrovně zaplnění a vlastností materiálu

Bates a kol., publikováno 1969 [23]

- Provedl podrobnou analýzu mechaniky a vtažených vzorků šnekových podavačů (hlavně těch v kombinaci s násypkami)

Bloome a kol., publikováno 1976 [24]

- Závěrem jeho výzkumu bylo, že objemová kapacita šnekového dopravníku závisí jak na průměru, tak na délce sání, přepravním úhlu, otáčkách a vlhkosti materiálu. Upozornili na to, že požadavky na výkon rostou s úhlem náklonu do 45° a pak se snižují do úhlu 90°.

Degirmencioglu a Srivastava, publikováno 1996 [25]

- Pomocí rozměrové analýzy zavedli obecné predikční rovnice pro objemovou kapacitu a požadavky na výkon šnekového dopravníku pro dopravu zrna.

Chang a Steele, publikováno 1997 [26]

- Jejich výzkum popsal typy pohybu částí materiálu v šnekovém dopravníku, typy přepravního úhlu, délky nasávání, otáček a jejich účinky na poškození zrna. Pro dopravu kukuřice popsali požadavky na výkon, objemový tok a energetickou účinnost

Nicolai a kol., publikováno 2004 [27]

- Analýza výkonové charakteristiky šnekových dopravníků. Stanovili kapacitu, objemovou účinnost a požadavky na výkon pro dopravníky s 20 cm a 35 cm

Nicolai a kol., publikováno 2006 [28]

- Zkoumali požadavky na propustnost a požadavky na výkon velkých přenosných šnekových dopravníků (průměry 20, 25,30 a 35 cm).

Zareiforousch a kol., publikováno 2010 [29]

- Hodnotili výkonnost šnekových dopravníků během manipulačního procesu (zvláště pro obiloviny a sypké materiály). Cílem bylo stanovení parametrů jako jsou rozměry šneku, otáčky, vůle šneku, délka sání, a dopravní úhel pro horizontální, šikmé a vertikální šnekové dopravníky.

Roberts [30]

- Jeho výzkum byl zaměřený hlavně na plně uzavřené šnekové dopravníky. Průchodnost, točivý moment a výkon jsou výrazně ovlivněny vířivým pohybem dopravovaného sypkého materiálu. Vířivý pohyb spolu s úrovní zaplnění určují objemovou účinnost, a tím pádem i průchodnost. To zase ovlivňuje točivý moment, výkon a účinnost dopravy. Roberts předložil teorii, která umožňuje předpovídat výkonnost šnekových dopravníků s libovolnou geometrií.

3.4.2. Výzkumy související se spirálovými dopravníky (bez reálné osy šnekovnice)

F. Krause, A. Minkin, publikováno 2005 [31]

- Provedli výzkum bezosých šnekových dopravníků. Studie ukazuje, že pro horizontální bezosé šnekové dopravníky převažuje přímočará složka pohybu materiálu nad rotační složkou.

F. Krause, A. Minkin, publikováno 2005 [32], [33]

- Publikovali dvoudílnou experimentální studii, která se zabývá horizontálními a lehce nakloněnými spirálovými dopravníky. Popisuje některé nezbytné poznatky pro konstrukci a použití bezosého šnekového dopravníku.

3.5. Související standardizace

Pro šnekové dopravníky existuje zavedená standardizace a rozsáhlé výzkumy, které rozebírají jejich vlastnosti, chování, bezpečnost provozu a potřebné návrhové výpočty pro plynulý chod. Naopak pro bezosé dopravníky neexistuje v současnosti zatím téměř nic. Pro potřeby výpočtů v bakalářské práci se vycházelo z podobnosti šnekového a spirálového dopravníku.

3.5.1. České a ISO standardy

3.5.2. ČSN 26 2602

Dopravné zariadenie, zavítovkovo vodorovné dopravníky, základy výpočtů

Popisuje dopravní zařízení, šnekové vodorovné dopravníky a obsahuje základy výpočtu šnekových dopravníků. Na tuto normu se odkazují literatury [1] a [2], které již zrušenou normu citují a využívají pro představení výpočtu šnekového dopravníku.

- Zrušena 01.06.1984

3.5.2.1. ČSN ISO 1050

Zařízení pro plynulou dopravu nákladů. Šnekové dopravníky

- Norma obsahuje doporučení hlavních rozměrů částí šnekových dopravníků.[10]
- Vydána 10/1993 – doposud platná

3.5.2.2. ČSN ISO/TR 9172

Zařízení pro plynulou dopravu nákladů. Bezpečnostní předpisy pro šnekové dopravníky. Příklady ochrany v místech zachycení a stříhu

- Jedná se o doplňující normu, která doplňuje ostatní bezpečnostní předpisy pro dopravníky na sypké hmoty. Předmětem normy je uvedení příkladů rizik na nebezpečných místech šnekových dopravníků. [11]
- Vydána 11/1993 – doposud platná

3.5.2.3. ISO 1819

Zařízení pro plynulou dopravu nákladů. Bezpečnostní předpisy. Všeobecná ustanovení

- Obsahuje bezpečnostní ustanovení, které se vztahuje na zařízení pro plynulou dopravu nákladů, jejich konstrukci, montáž, používání a údržbu, dále pro zajištění jejich nejvýhodnějších použití a pokud je to možné, tak pro zabránění nehod a úrazů, vznikajících nesprávnou manipulací. [12]
- Vydána 04/1993 – doposud platná

3.5.2.4. ISO 7149

Zařízení pro plynulou dopravu nákladů. Bezpečnostní předpisy. Zvláštní ustanovení

- Navazuje na všeobecné předpisy uvedené v ISO 1819 a stanovuje v návaznosti s ní zvláštní bezpečnostní ustanovení pro různé typy dopravníků. [13]
- Vydaná 05/1993 – doposud platná

3.5.2.5. ČSN 26 0003

Zařízení pro plynulou dopravu nákladu. Všeobecná ustanovení a zkoušení

- společně s ČSN ISO 1819 a ČSN ISO 7149 stanovuje základní technické požadavky pro navrhování, výrobu, montáž, zkoušení, provoz a údržbu zařízení pro plynulou dopravu sypkých hmot a kusových břemen (dále dopravní zařízení). [14]
- Doplnuje všeobecná i zvláštní ustanovení bezpečnostních předpisů ČSN ISO 1819 a ČSN ISO 7149 v souladu s mezinárodními předpisy pro tato zařízení.
- Vydaná 12/1993 – zrušena 12/2005 bez náhrady

3.5.3. CEMA standard

3.5.3.1. ANSI/CEMA Standard No. 300-2021, Screw Conveyor Dimensional Standards [38]

- Obsahuje řadu doporučených rozměrových norem pro hlavní součásti šnekových dopravníků. Obsahuje tabulky pro žlaby, konce a kryty žlabů a šneky
- Vydaná 01/2021 – doposud platná

3.5.3.2. ANSI/CEMA Standard No. 350-2021, Screw Conveyors for Bulk Materials [39]

- V normě jsou uvedeny přijaté technické a aplikační postupy sestavené inženýry předních společností vyrábějících šnekové dopravníky.
- Vydaná 01/2021 – doposud platná

3.5.3.3. CEMA 352-2018, Screw Conveyor Safety Operation/Maintenance Manual [40]

- Poskytuje společný základ a pokyny pro bezpečnost, provoz a údržbu šnekových dopravníků
- Vydaná 2018 – doposud platná

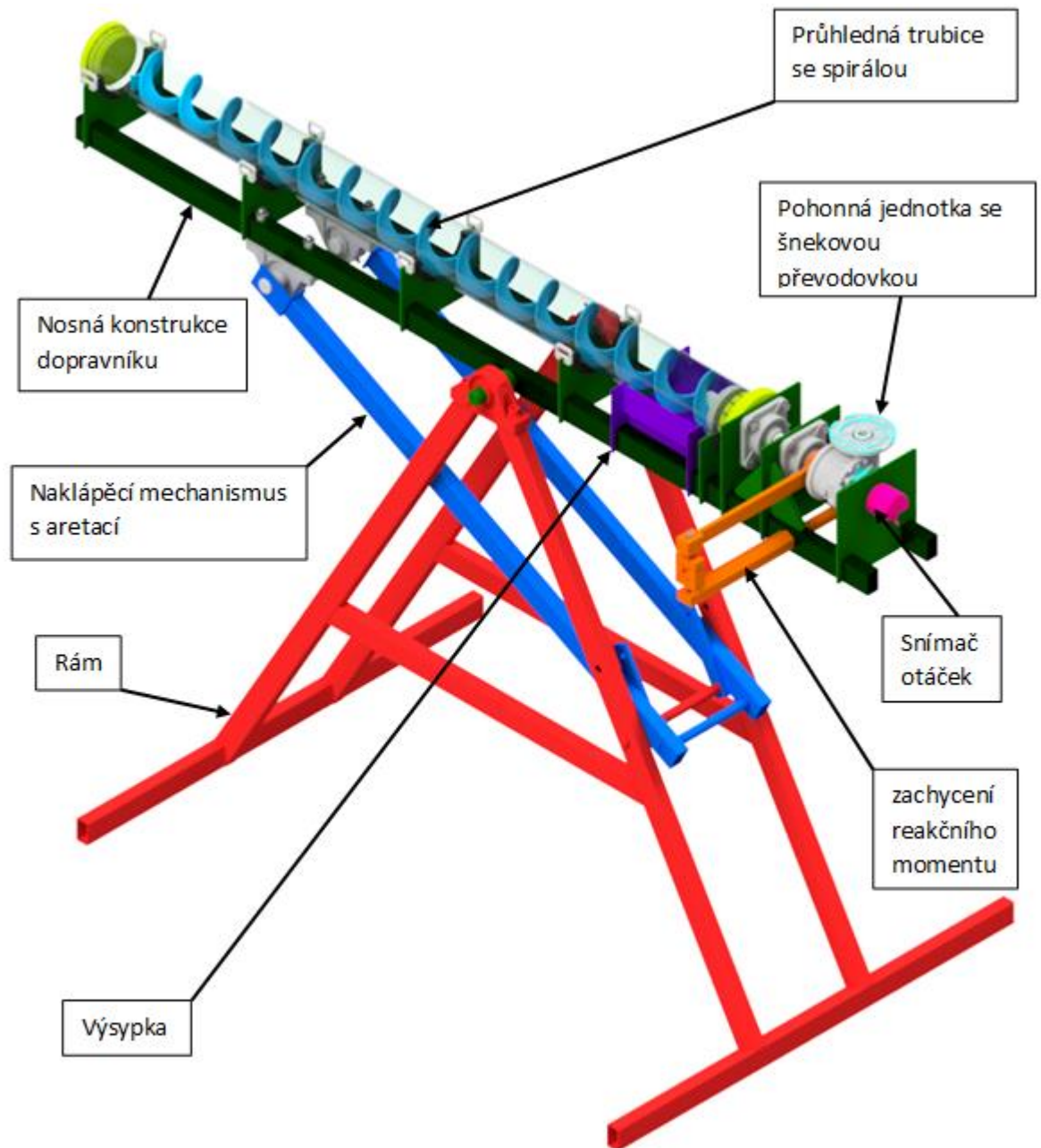
3.5.3.4. CEMA 353-2018, Shaftless Screw Conveyor O&M Manual [41]

- Příručka obsahuje pokyny pro bezpečnost, provoz a údržbu a bezpečnou instalaci šnekových dopravníků.
- Vydaná 03/2018 – doposud platná

4. Konstrukce

4.1. Celkový model

Na základě výše stručně představeného studia souvisejících informačních pramenů byla výchozí konstrukce (kap. 2.1) modifikována do nové podoby splňující upřesněné a rozšířené požadavky s ohledem na uvažovaný záměr, pro který je dopravník konstruován (obr. 49).

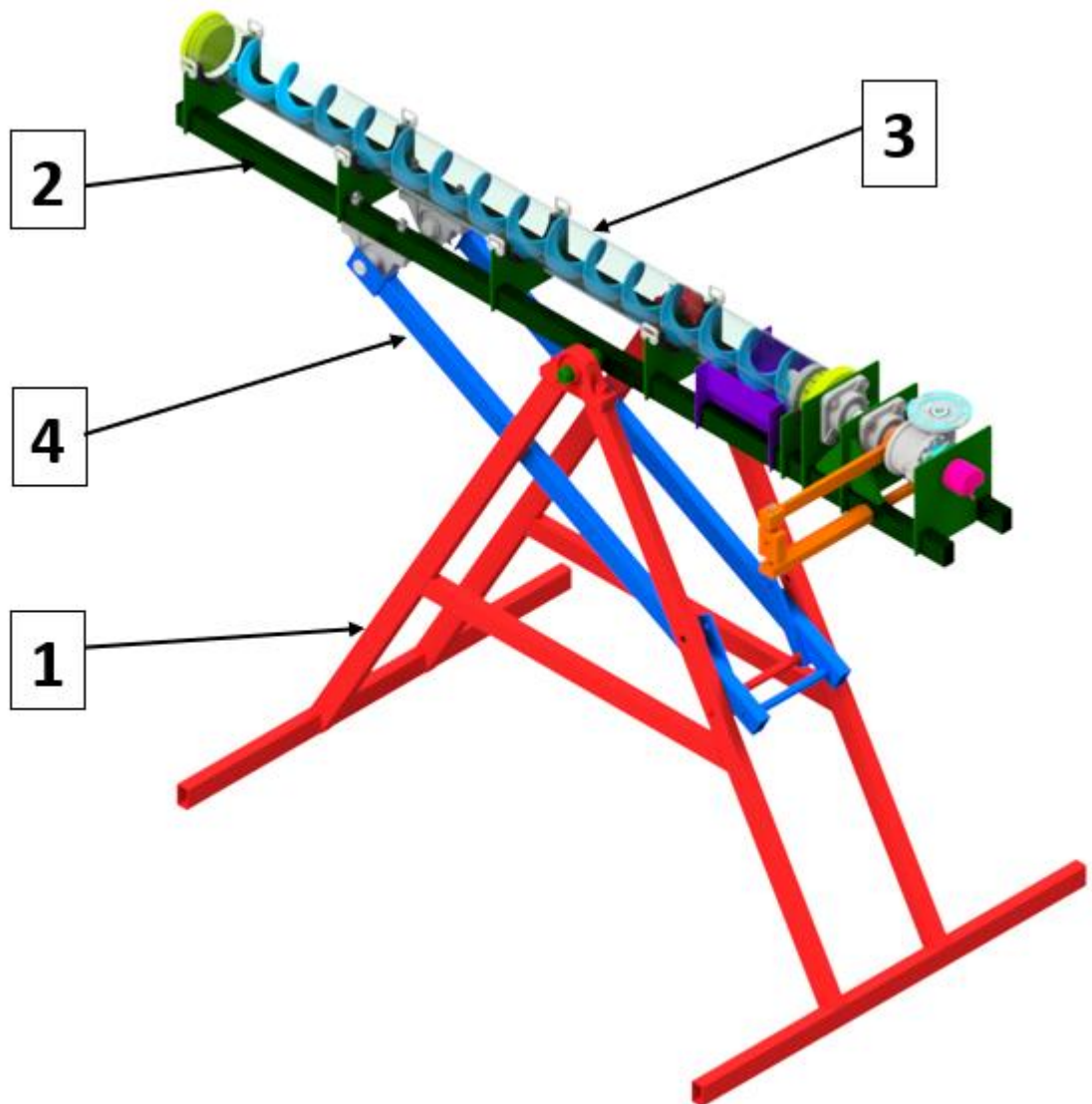


Obrázek 49 Celkový model

Dále byly oproti bakalářské práci navíc předmětem řešení rám, způsob naklánění dopravníků a senzory pro krut a otáčky.

Konstrukci je možné rozdělit do několika hlavních celků podle obrázku 50:

1. Rám
2. Nosná konstrukce dopravníku
3. Samotný spirálový dopravník
4. Systém naklánění a aretace dopravníku



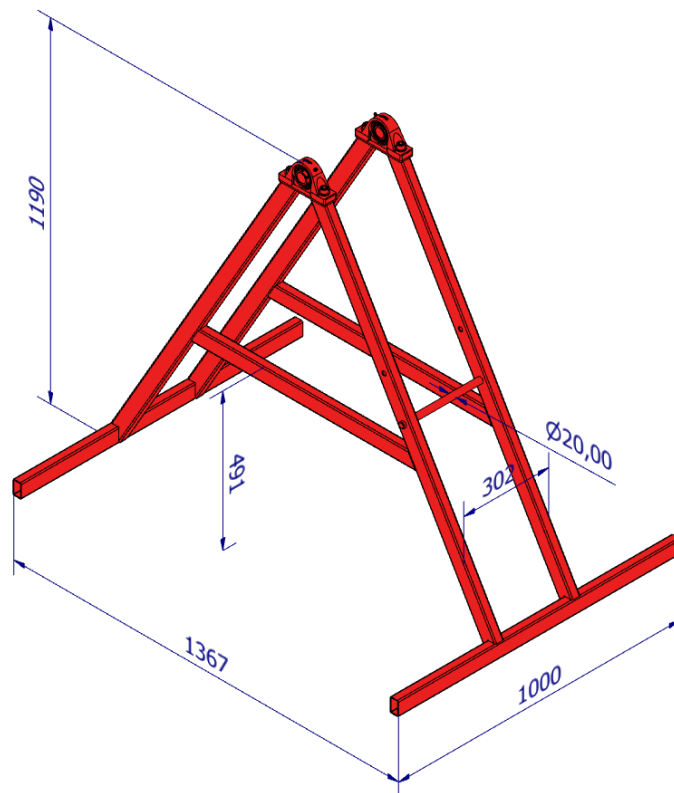
Obrázek 50 Celkový model s hlavními konstrukčními celky

V celé konstrukci je využíván pouze jeden rozměr jeklu, z důvodů zachování jednoduchosti konstrukce a sestavování. Pro konstrukci byl zvolen jekl o rozměrech 50x30x3, který vyhovoval všem požadavkům konstrukce.

Pro stavbu stanoviště se nakoupí formátové délky jeklů a nařežou se podle potřeby při sestavování konkrétních dílů.

Jelikož je v celé konstrukci pouze jeden rozměr, jakékoliv odkazy na jekl vždy odkazují na rozměr 50x30x3, pouze s jinou délkou.

4.2. Rám

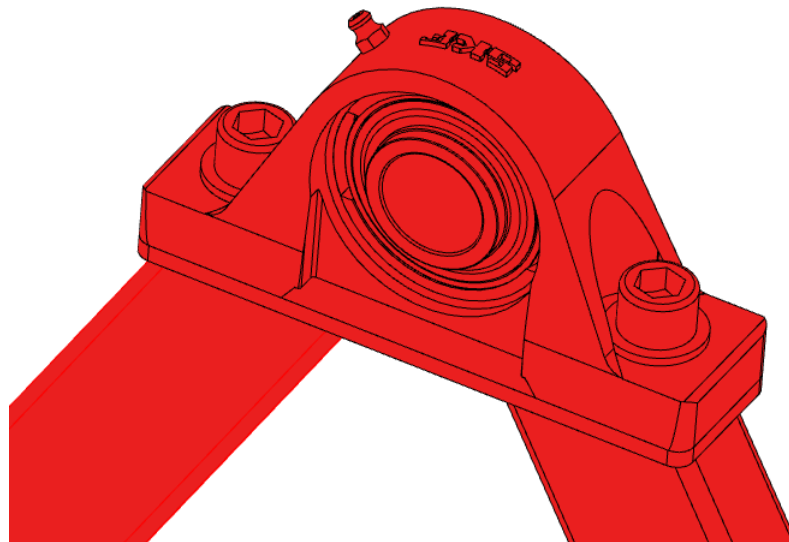


Obrázek 51 konstrukce rámu

Rám je sestaven svařením dvou konstrukčních částí ze tří jeklů do tvaru písmene A.

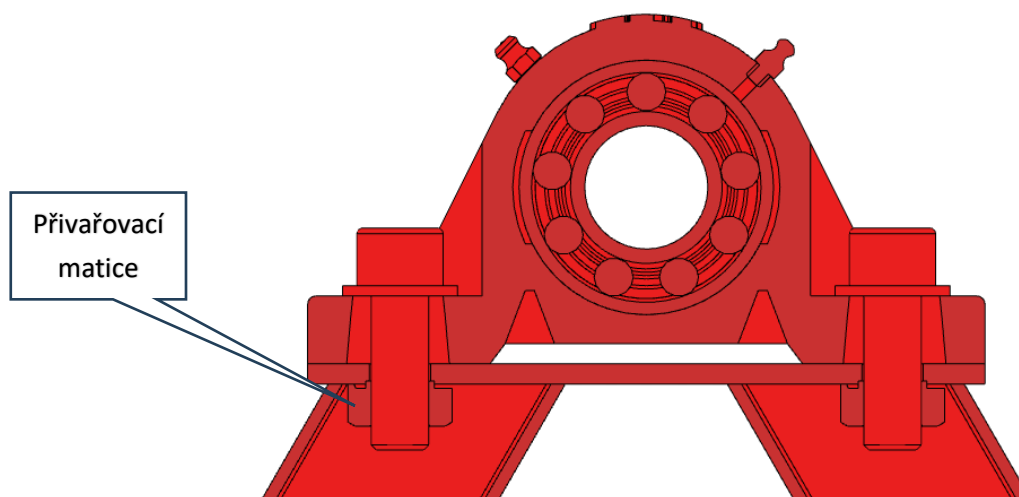
Obě „áčka“ jsou pak přivařena k příčným jeklům, které slouží ke zvětšení stability, protože konstrukce má vysoké těžiště a šikmé nohy rámu jsou od sebe vzdálené pouze 302 mm.

Na vrchu jsou jekly přivařeny k plechu, který slouží k přimontování ložiskových domků.



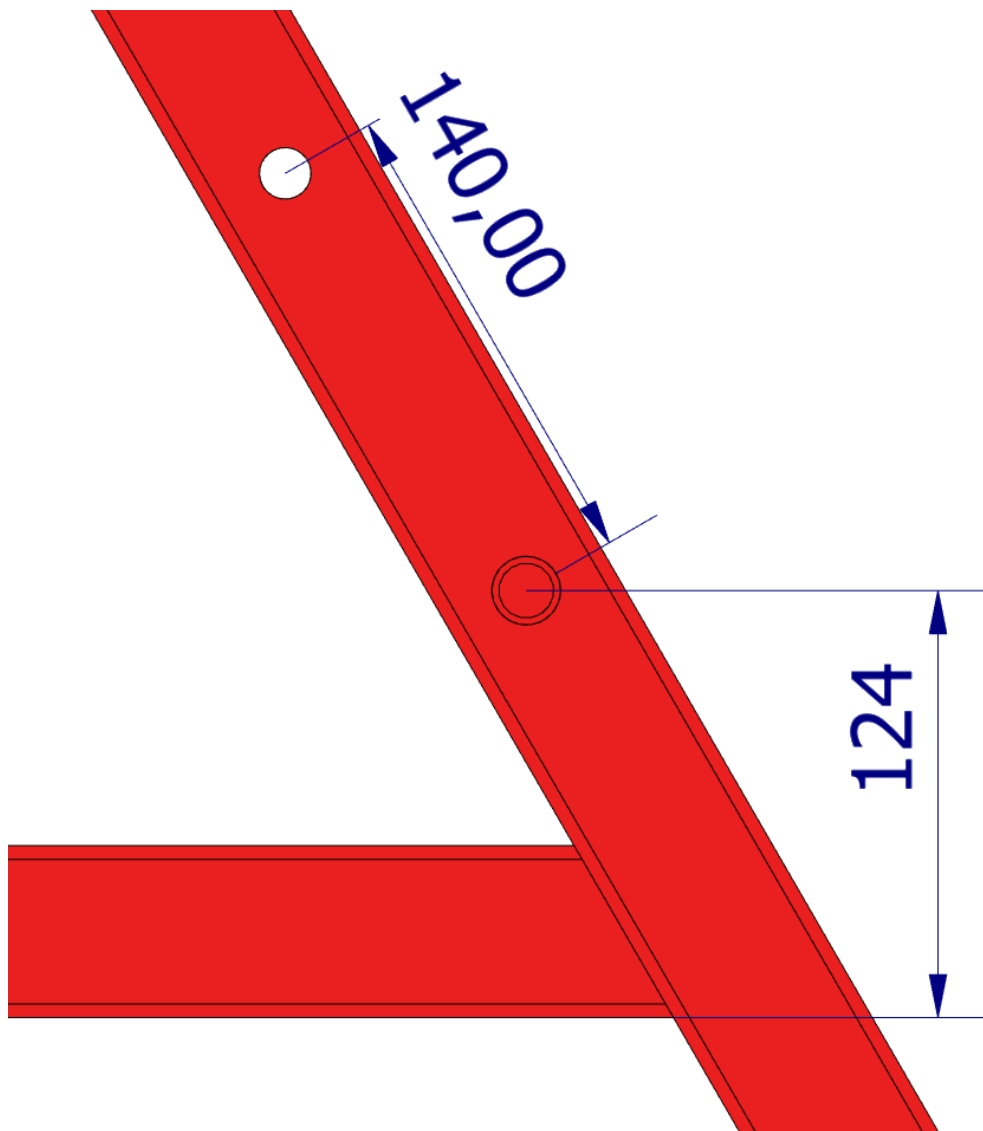
Obrázek 52 pohled na usazení ložiska

Ložiskový těleso SKF UCP 206 je k plechu přišroubován pomocí dvou šroubů, které jdou do závitů přivařovací matice. Ta je na spodní straně plechu schovaná uvnitř jeklu. Z důvodů proveditelnosti montáže jsou zvoleny šrouby s vnitřním šestihranem. Pod hlavu šroubu bylo nutné dát podložku. Aby byla dostatečně velká plocha kontaktu s ložiskovým domkem.



Obrázek 53 řez spojením ložiskových domků

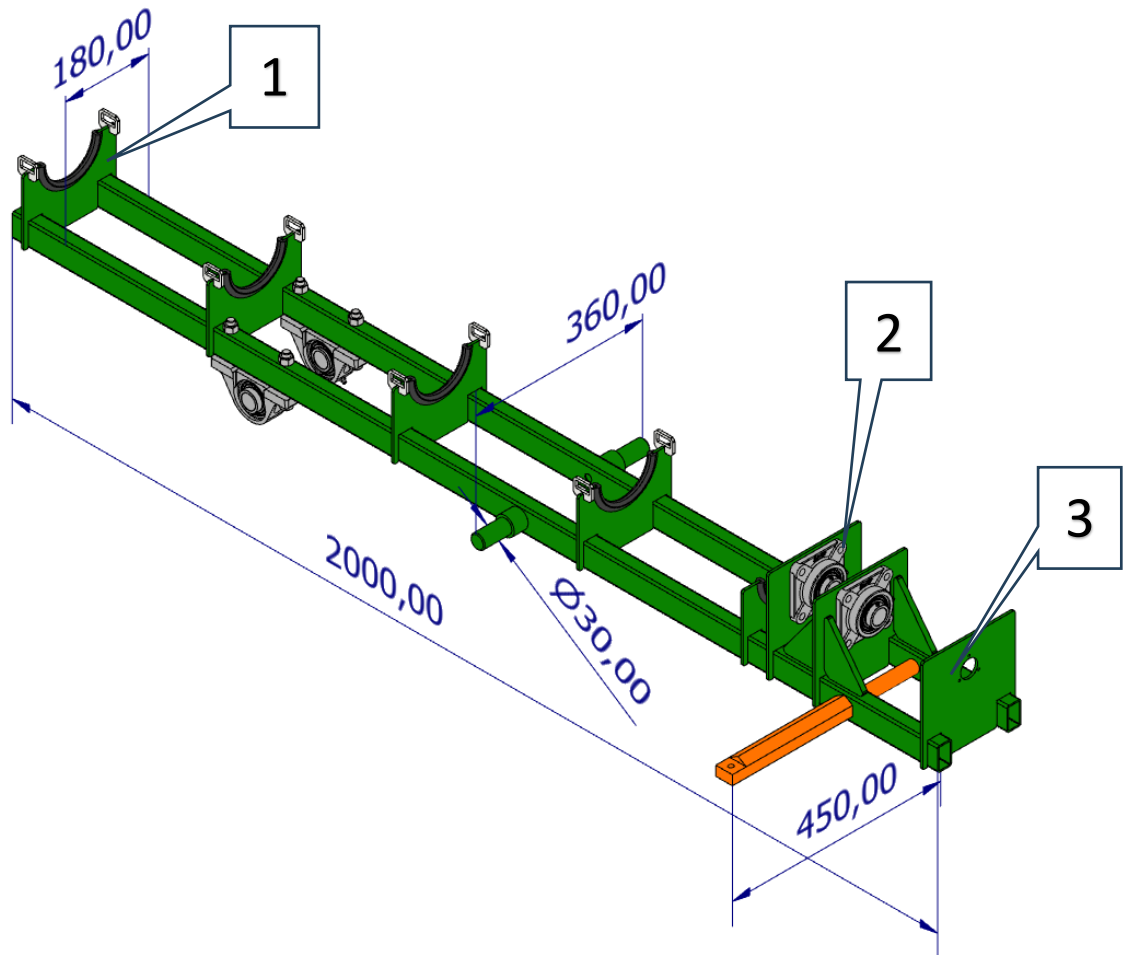
Na jedné straně jsou proti sobě šikmé nohy provrtány a spodními dírami je protažena a zavařena ocelová tyč o průměru 20 mm. Důvodem je umístění svěrného mechanismu pro aretaci polohy.



Obrázek 54 detail místa pro aretaci náklonu

4.3. Nosná konstrukce dopravníku

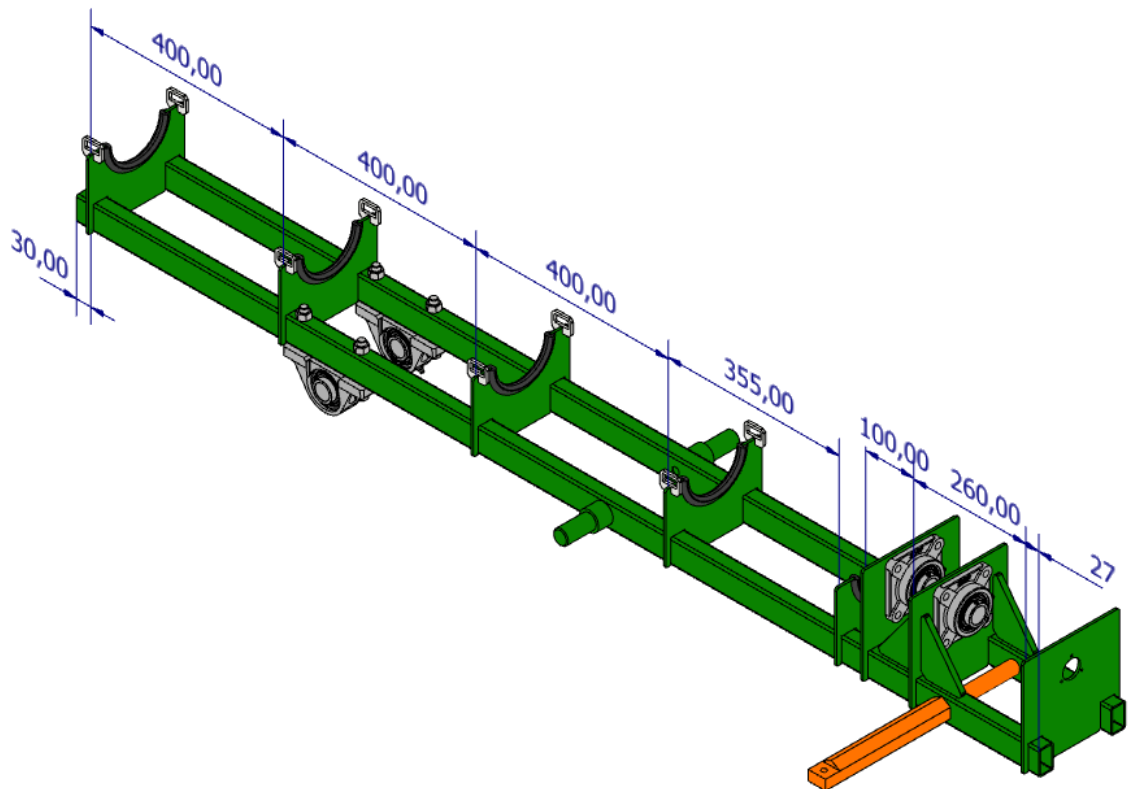
Nosná konstrukce je primárně složená ze dvou jeklů spojených s žebry z plechu.



Obrázek 55 Nosná konstrukce šnekového dopravníku

Žebra jsou od sebe v intervalech nasazena na jekly a spojena koutovým svarem ze tří stran jeklu. V konstrukci bylo použito několik různých druhů žeber podle jejich účelu.

1. Nosné žebro
2. Žebro s úchytem ložiskových těles
3. Žebro pro uchycení senzoru otáček

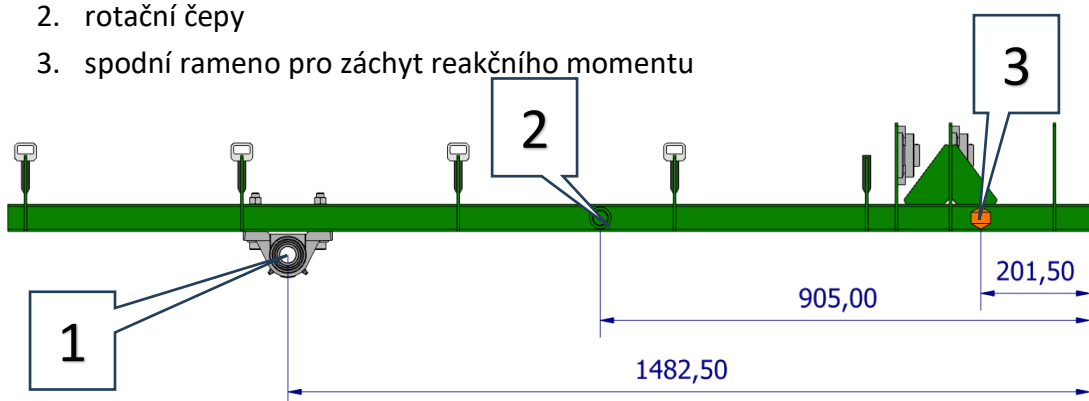


Obrázek 56 Pohled na nosnou konstrukci s vyznačenými vzdálenostmi žeber

Všechna žebra jsou navržena z 5 mm tlustého plechu a jsou svařena stejným způsobem. Jejich společnou vlastností je funkce jako zpevňující člen konstrukce.

Další důležité prvky jsou:

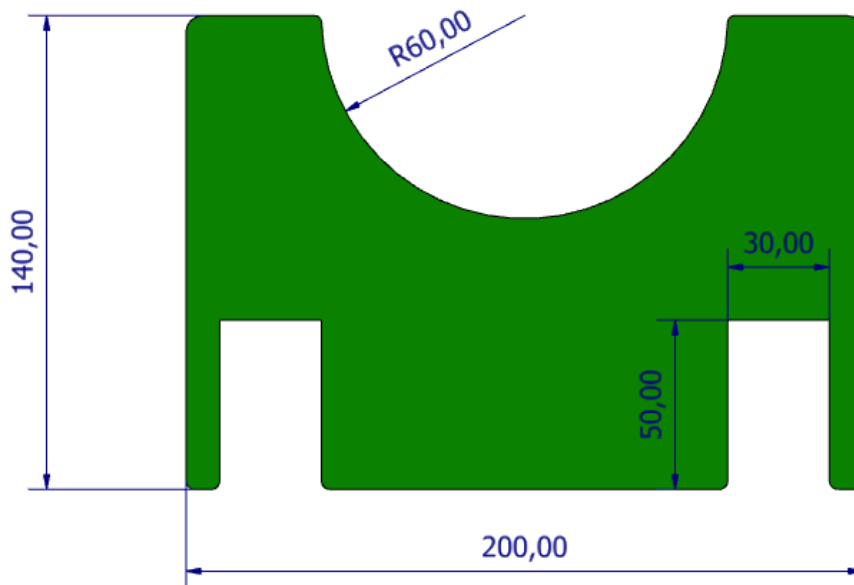
1. ložisková tělesa UCP pro zvedací mechanismus
2. rotační čepy
3. spodní rameno pro záchyt reakčního momentu



Obrázek 57 Vyznačení dalších důležitých konstrukčních prvků

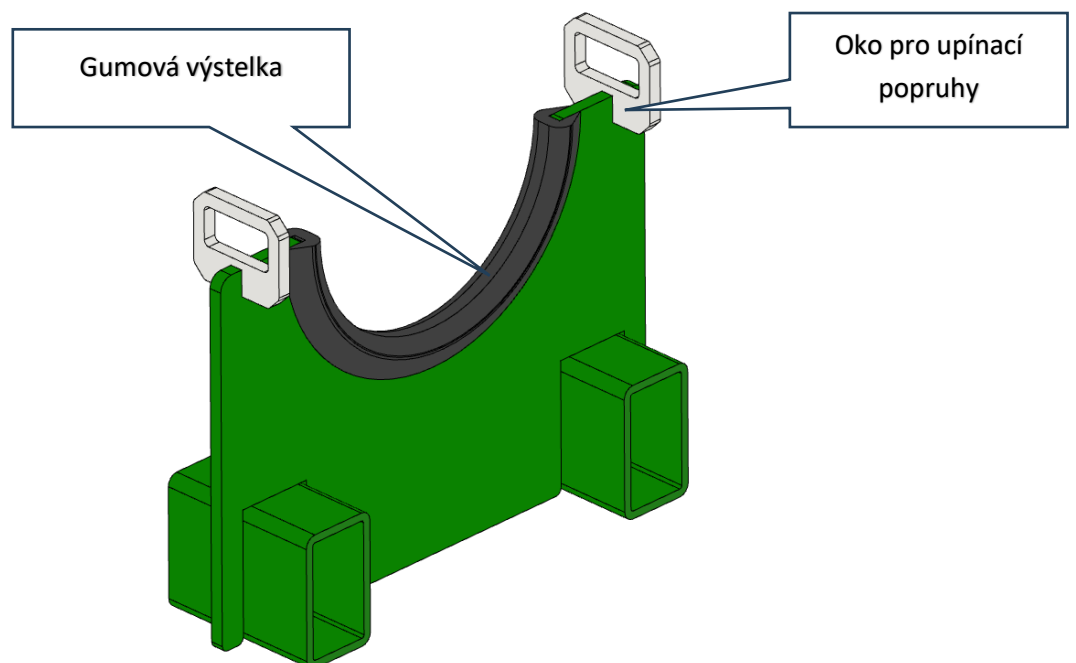
4.3.1. Nosné žebro

Nosné žebro funguje jako uložení trubice dopravníku a zároveň plní funkci jištění trubice proti prokluzu.



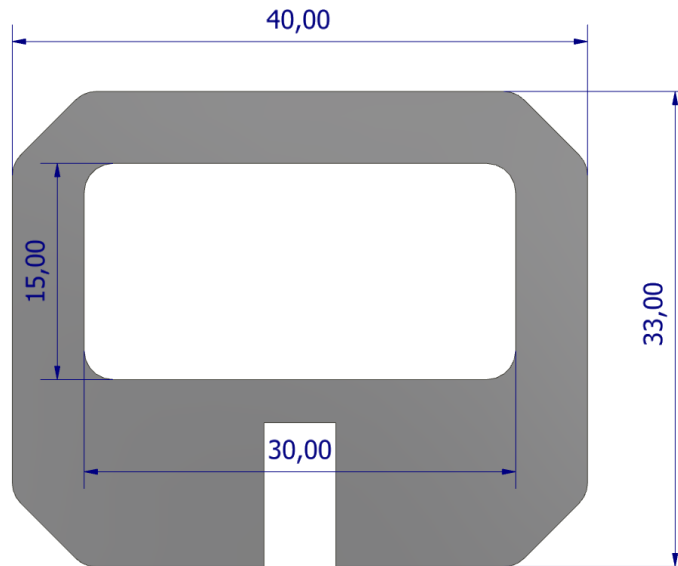
Obrázek 58 Geometrie nosného žebra

Trubice s dopravníkem je položena do vytvořeného půlkruhového výřezu. Výřez má větší průměr, než je vnější rozměr trubice, aby bylo možné na jeho hranu přilepit gumovou výstelku. Ta chrání trubici před mechanickým poškozením a zároveň vytváří tření, které zabraňuje trubici se protáčet.



Obrázek 59 Pohled na nosné žebro s gumovou výstelkou a okem pro přidržení dopravníku

Pro zabezpečení proti protočení je využito ještě ok, která jsou přivařena k žebrou. Skrz ně budou provlečeny upínací popruhy.

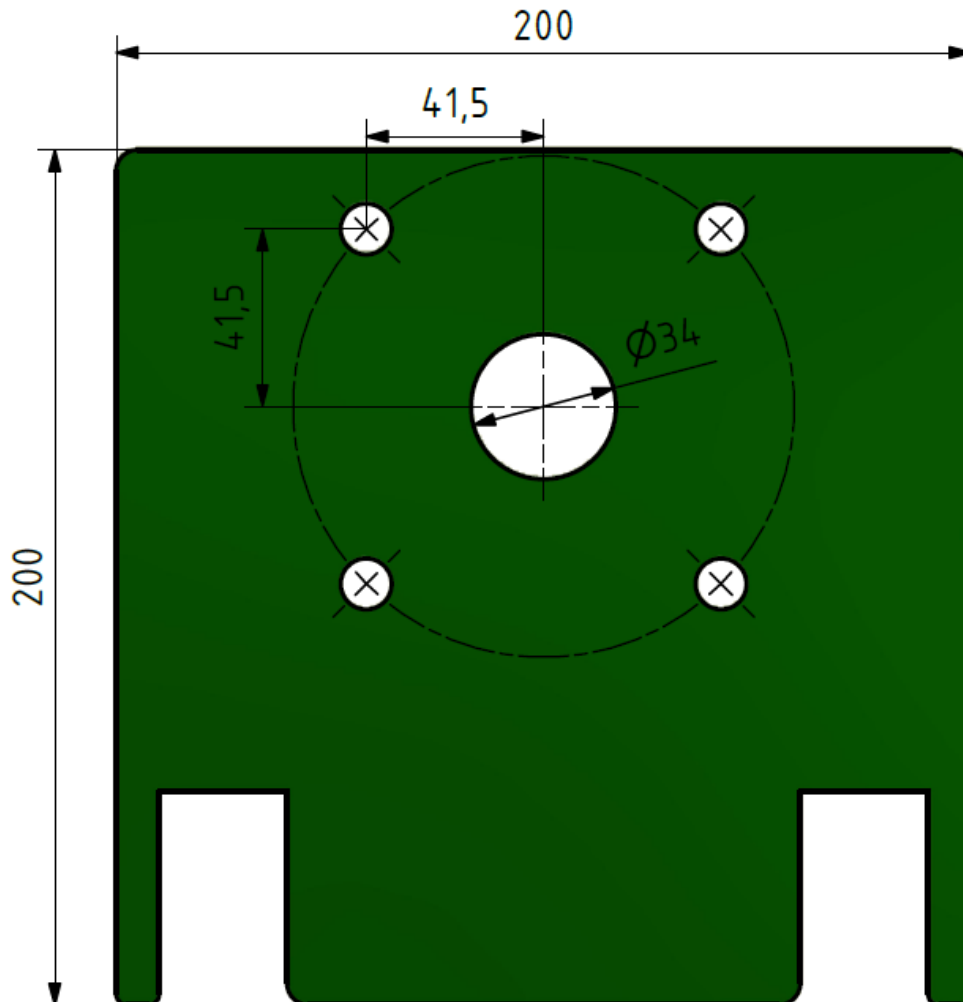


Obrázek 60 Oko pro upínací popruhy

Předpokladem tohoto řešení je, že potřebný moment pro protočení spirály bude několikanásobně větší než krouticí moment působící v traktu dopravníku.

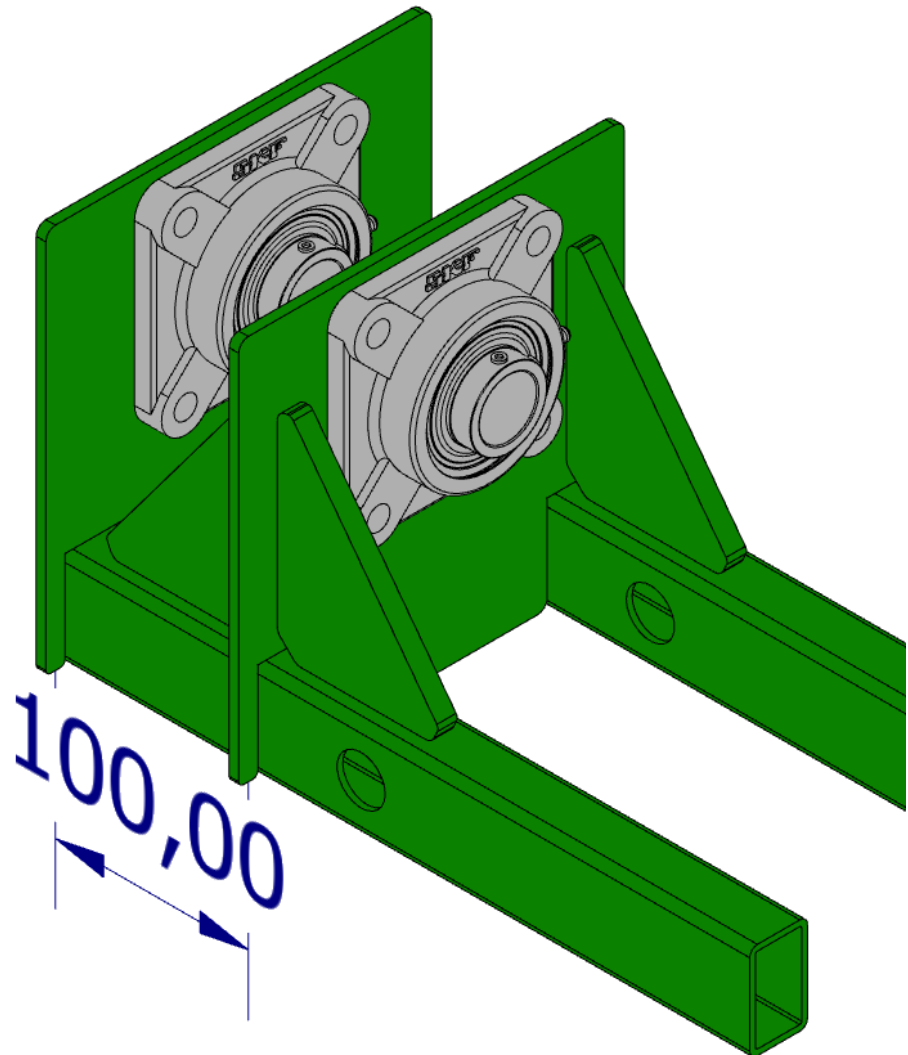
4.3.2. Žebra pro uchycení ložiskových domků

Na jeklech jsou v horní části nasazena a přivařena dvě žebra s navrtanými dírami, která jsou připravená pro montáž ložiskových těles SKF UCF 206. Díra ve středu slouží jako průchozí pro hřídel a čtyři menší jsou vyvrtány podle zvoleného domku, aby jej bylo možné pomocí šroubu a matice připevnit.



Obrázek 61 Žebro pro uchycení ložiskových domků

Použití dvou ložiskových domků má za účel zabránit ohnutí hřídele a rozložení váhy pohonné jednotky. Žebro blíže k hornímu konci konstrukce je svarem spojeno se dvěma ocelovými trojúhelníky. Ty jsou zde umístěny z důvodů zachycení axiálních sil a slouží jako výztuha, aby se plech neohnul.

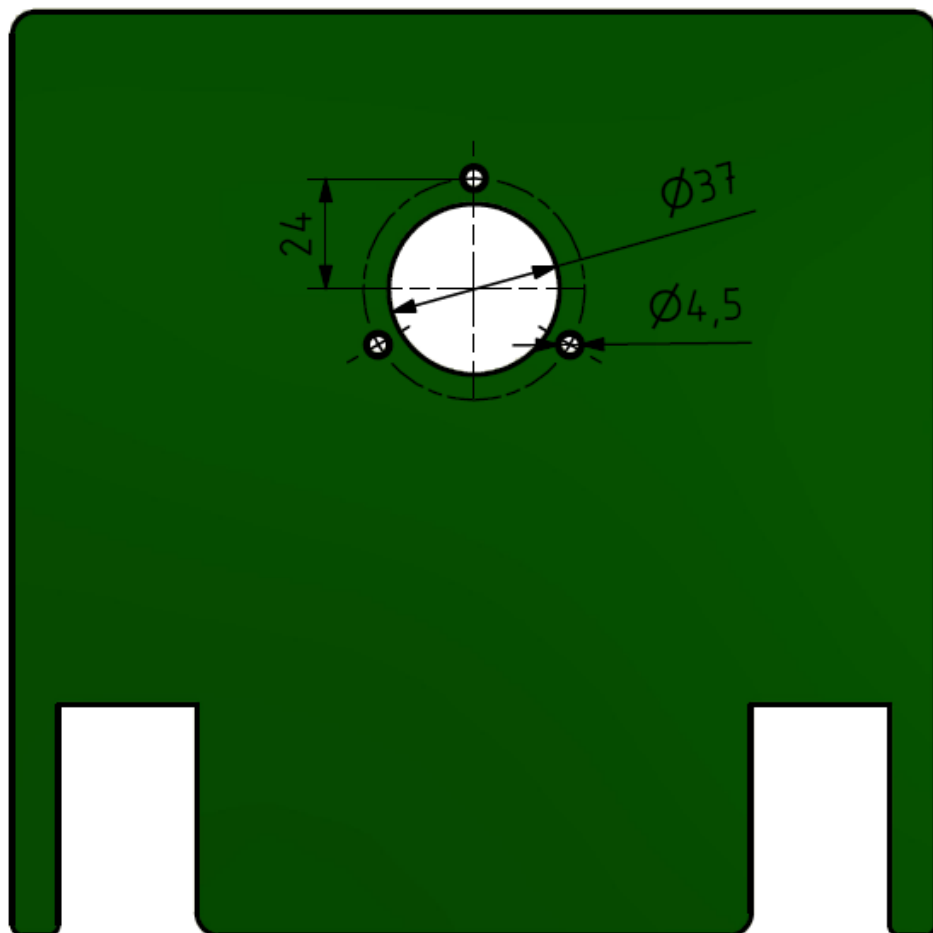


Obrázek 62 Umístění UCF na konstrukci

UCF těleso je s žebrem s trojúhelníkovými výztuhami spojen šroubem a maticí. Druhé UCF těleso je spojeno šrouby, které ale končí v horním víku trubice (více v kapitole 10.4.2)

4.3.3. Žebro pro uchycení sensoru otáček

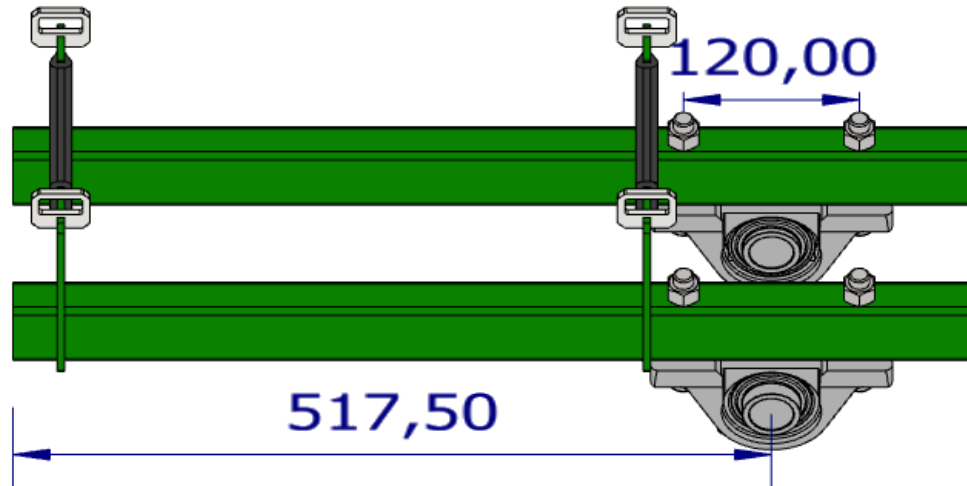
Žebro pro uchycení sensoru otáček je vytvořeno z plechu o stejných rozměrech jako žebro pro uchycení ložiskových domků (200x200x5), jen s jinak navrtanými dírami. Středová díra opět slouží jen jako průchozí a zbylé tři jsou navrtány podle potřeby v závislosti na zvoleném čidle otáček.



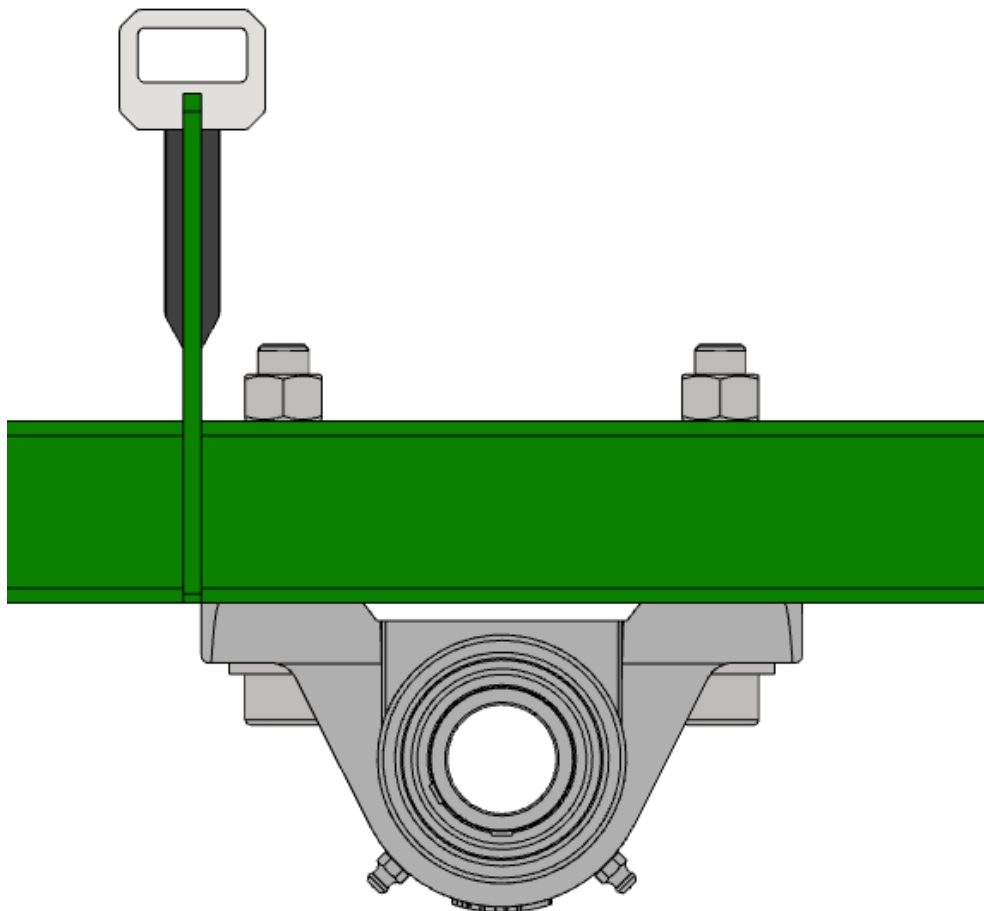
Obrázek 63 Žebro pro uchycení snímače otáček

4.3.4. Ložiskové tělesa pro zvedací mechanismus

Na spodní stranu obou jeleků jsou pomocí šroubů přišroubována ložisková tělesa SKF UCP 206, která jsou součástí zvedacího a aretovacího mechanismu.

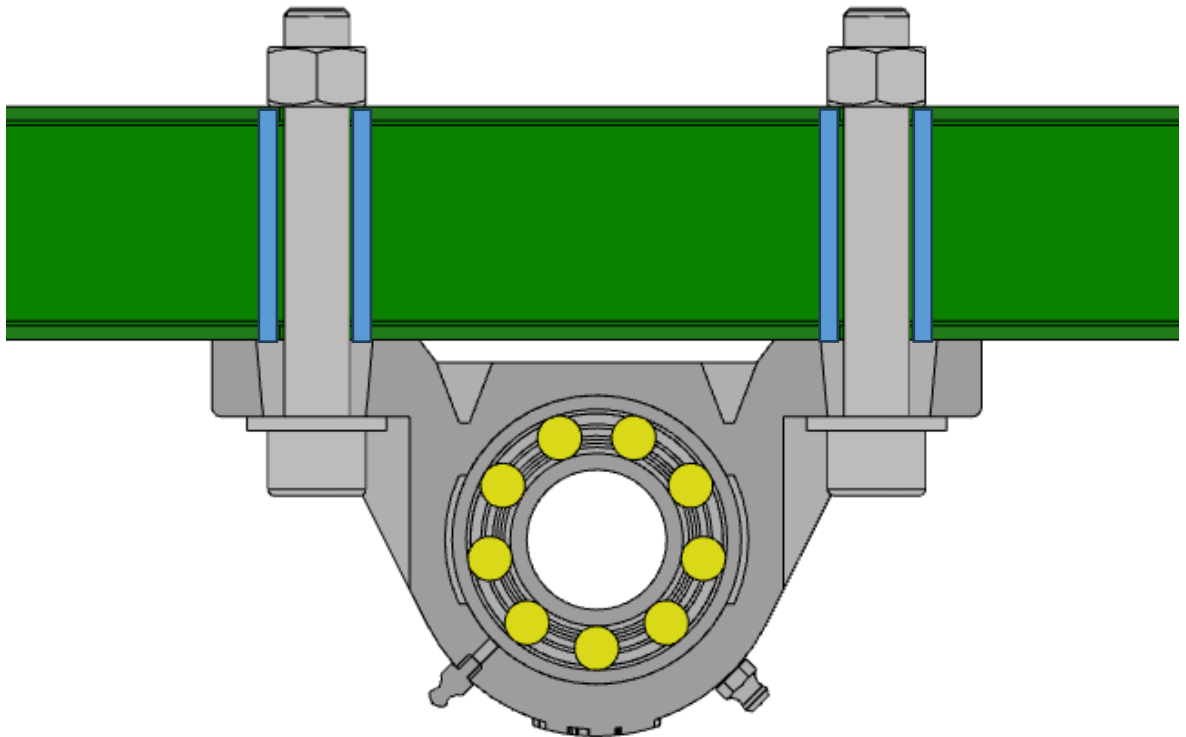


Obrázek 64 Umístění ložiskových domků



Obrázek 65 Boční pohled na ložiskové těleso

Do jeklů jsou v jeho středové ose vyvrtány díry o průměru 16 mm vzdálené od sebe 120 mm. Pod šroubem je jako u rámu podložka, aby byla zaručena dostatečně velká kontaktní plocha.

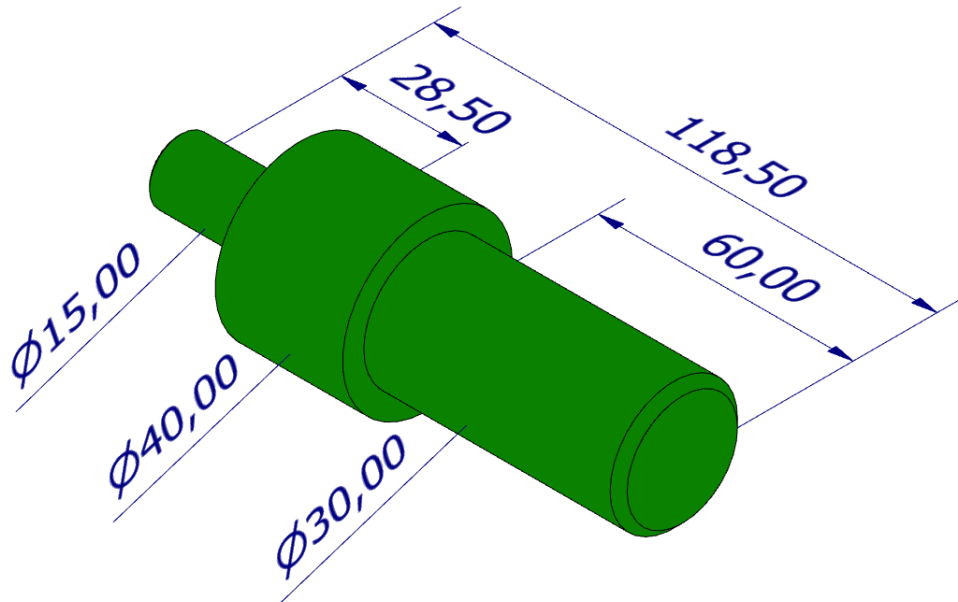


Obrázek 66 Pohled v řezu na spojení ložiskových domků s jekly

V obrázku 66 jsou modrou barvou naznačeny v řezu trubky, které jsou svarem spojeny s jekly. Důvod jejich použití je zpevnění šroubového spoje, proti deformaci.

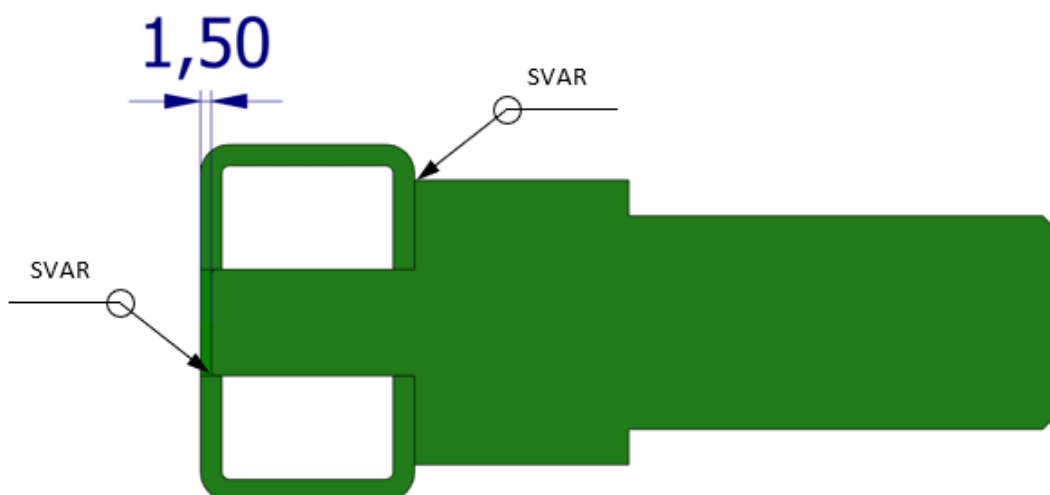
4.3.5. Rotační čepy

Pro umožnění otáčení dopravníku jsou v nosné konstrukci umístěny rotační čepy, které jsou pak vsazeny do ložisek na rámu a svařeny s rámem.



Obrázek 67 Rotační čep

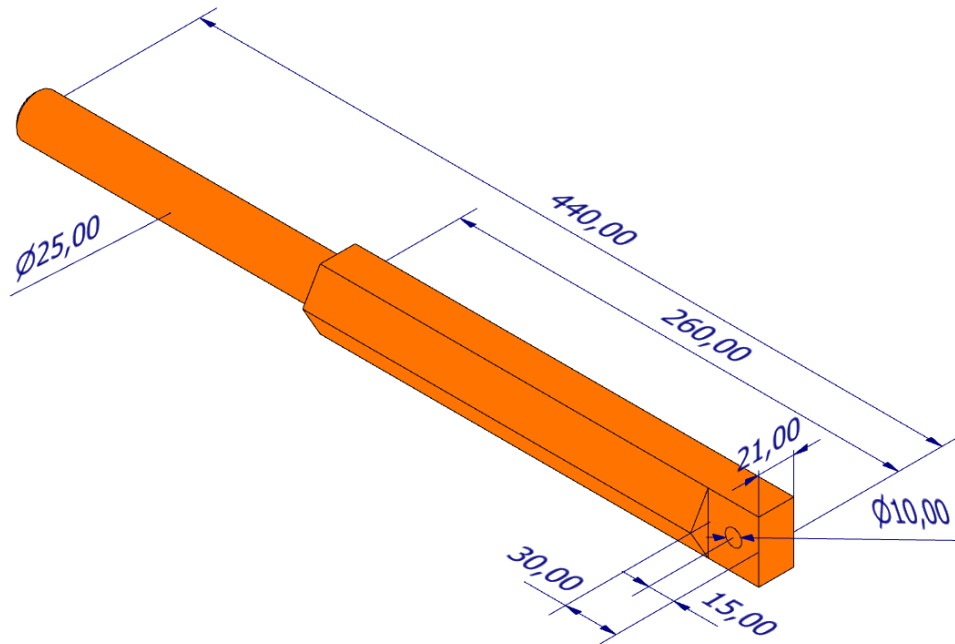
Čepy jsou vsazeny slabší částí o průměru 15 mm do děr, vyvrtaných do obou jeklů. Konec čepu je navržen tak aby čelo nebylo zároveň s boční hranou jeklu, ale bylo lehce zapuštěno dovnitř. Důvodem bylo, aby se vytvořilo kvalitní spojení.



Obrázek 68 řez osou čepu

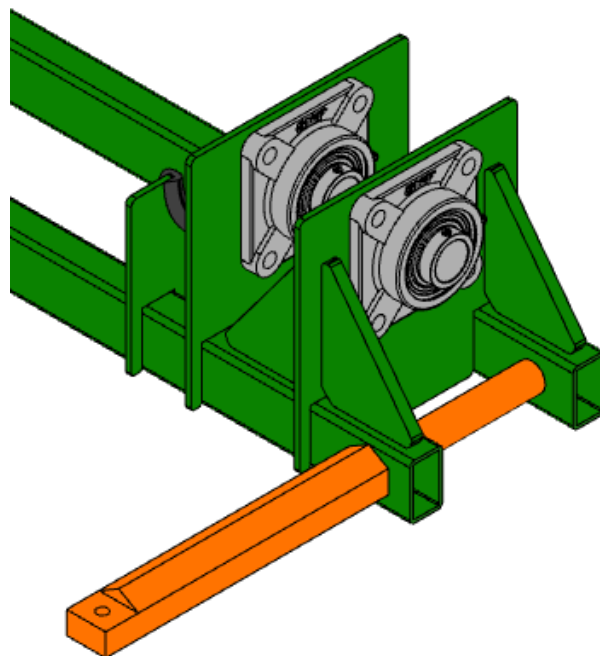
4.3.6. Spodní rameno pro záchyt reakčního momentu

Spodní rameno pro záchyt reakčního momentu je vytvořeno z polotovaru šestihřanné tyče tažené za studena EN 10278 [34] a následně upraveno pomocí obrábění, frézování a vrtání.



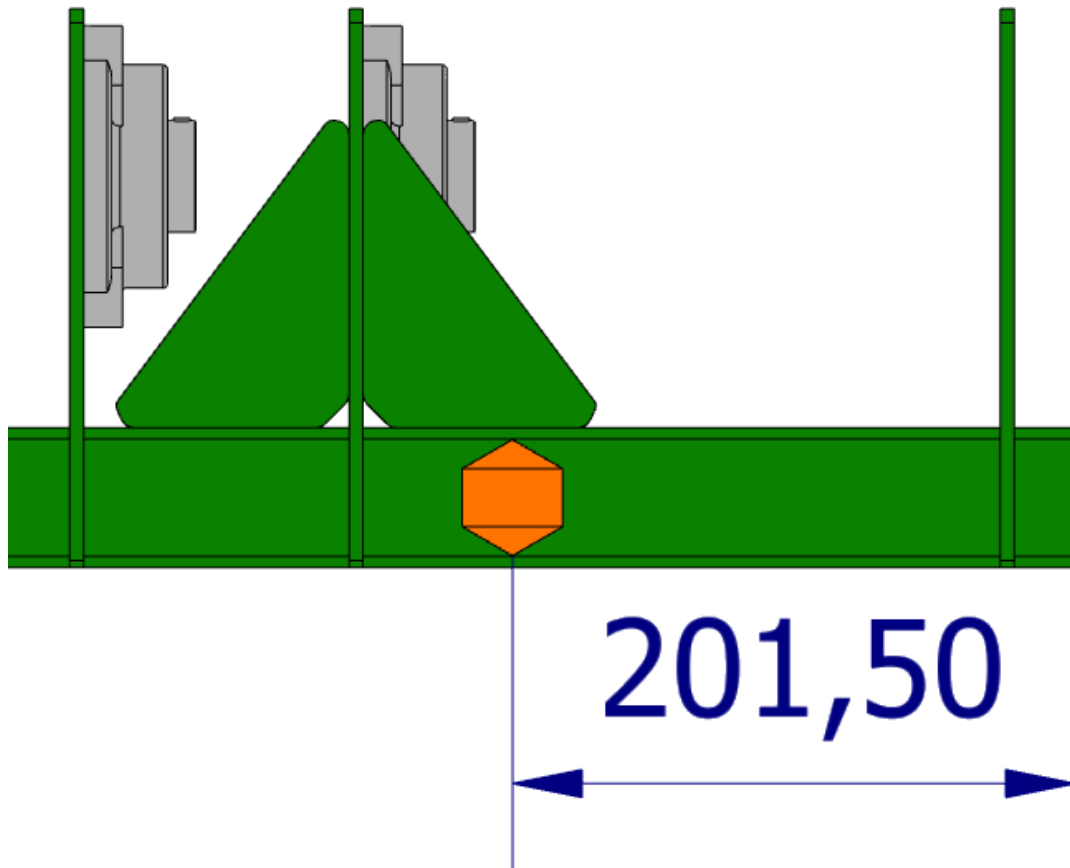
Obrázek 69 Spodní rameno pro záchyt reakčního momentu

Část ramene, která vyčnívá kolmo k nosné konstrukci je ponechána ve tvaru polotovaru a až na konci je sražena frézováním souměrně z obou stran na danou tloušťku. Ve vzniklé ploše je vyvrtaná díra o průměru 10 mm. Kulatá část je vysoustružena na průměr 25 mm.



Obrázek 70 Umístění ramene v konstrukci

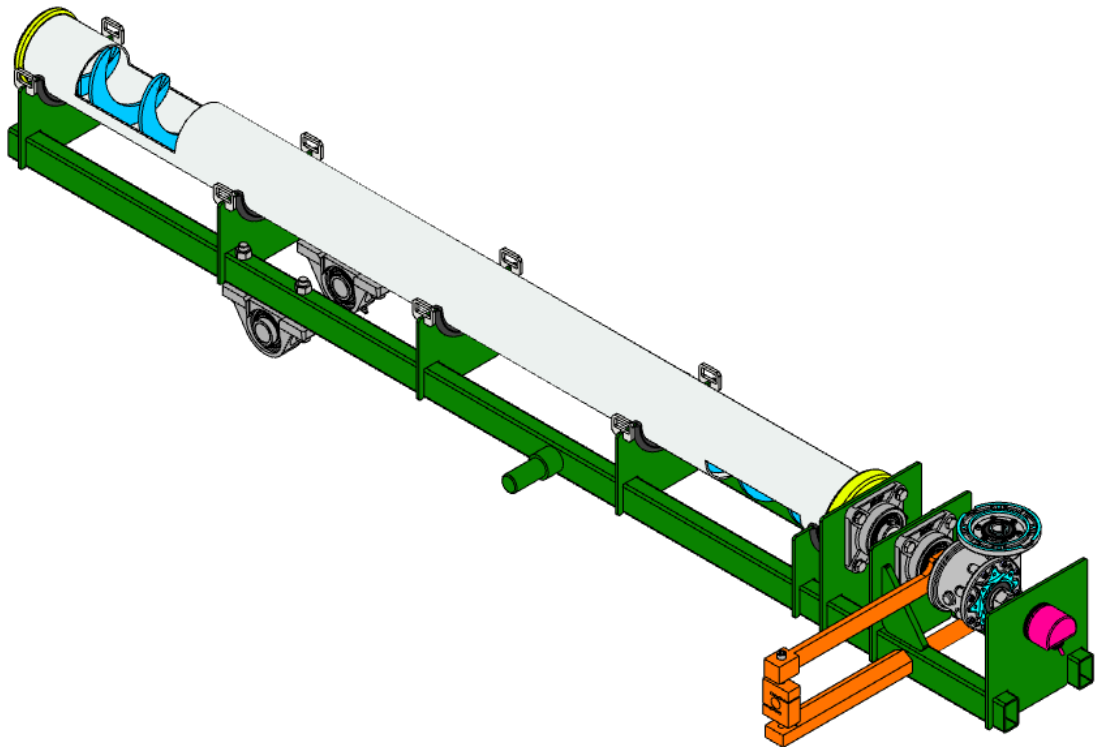
Rameno je zasunuto do děr v jeklech a natočeno tak, aby plocha na konci ramene byla vodorovně s horní stranou jeklu. Kruhový konec ramene je opět ukončen tak, aby byl mírně zanořen v stěně jeklu. Rameno je s jekly svařeno.



Obrázek 71 Pozice děr pro rameno

4.4. Dopravník

Samotný dopravník je konstrukčně provázaný s nosnou konstrukcí a tvoří spolu jeden větší celek.

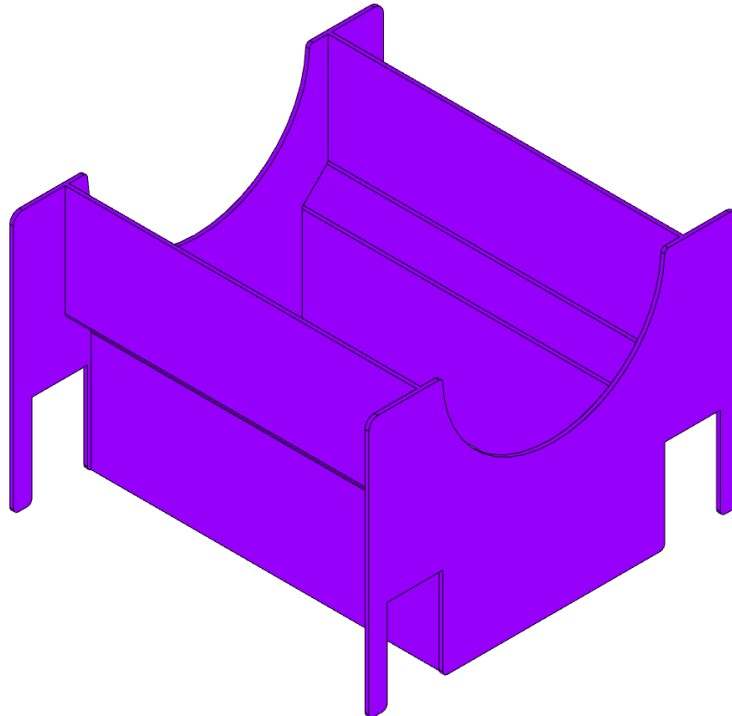


Obrázek 72 Dopravník uložený v nosném rámu

Sestavu můžeme rozdělit na několik hlavních celků:

1. Hřídel se spirálou
2. Trubice s koncovými částmi
3. Uložení a zajištění pohonné jednotky s převodovkou
4. Umístění senzoru otáček

Způsob vysypávání a nasypávání materiálu není řešen v rozsahu diplomové práce. Po dohodě s vedoucím práce panem Ing Lopotem Ph.D. bylo rozhodnuto, že toto téma je nad rámec práce a podrobněji se bude řešit v disertační práci. Cílem konstrukce je zajistit plynulý tok materiálu a možnost automatizovat proces tak, aby nebylo potřeba materiál ručně doplňovat a dopravník mohl běžet v cyklu bez lidské asistence. Pro ilustraci je v konstrukci vytvořena možná výsyпка.



Obrázek 73 Ilustrační řešení výsycky

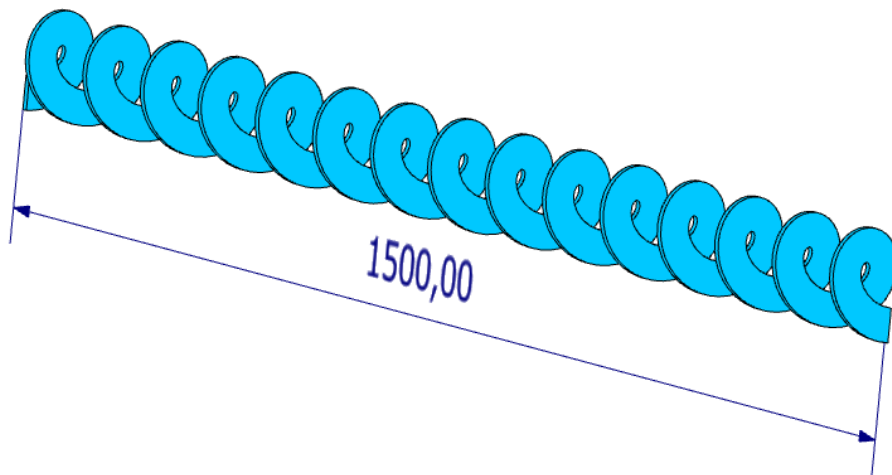
Násypka se v bakalářské práci řešila, aby ji bylo možné použít ve všech stupních náklonu. To se projevilo jako nepraktické a zbytečně složité. Z toho důvodu bude nutné pro větší náklony dopravníku využít násypku s jinou geometrií nebo využít tkaninový rukáv zavěšený od stropu laboratoře.

4.4.1. Hřídel se spirálou

V přecházejícím návrhu vytvořeném v bakalářské práci byla spirála volena ze sortimentu firmy RATAJ podle zadání práce. Firma RATAJ projevila zájem o výzkum a po domluvě poskytla spirálu vhodnou pro zamýšlený výzkum. Darovaná spirála má odlišné parametry od původní navržené, a proto bylo potřeba upravit celkové rozměry dopravníku.

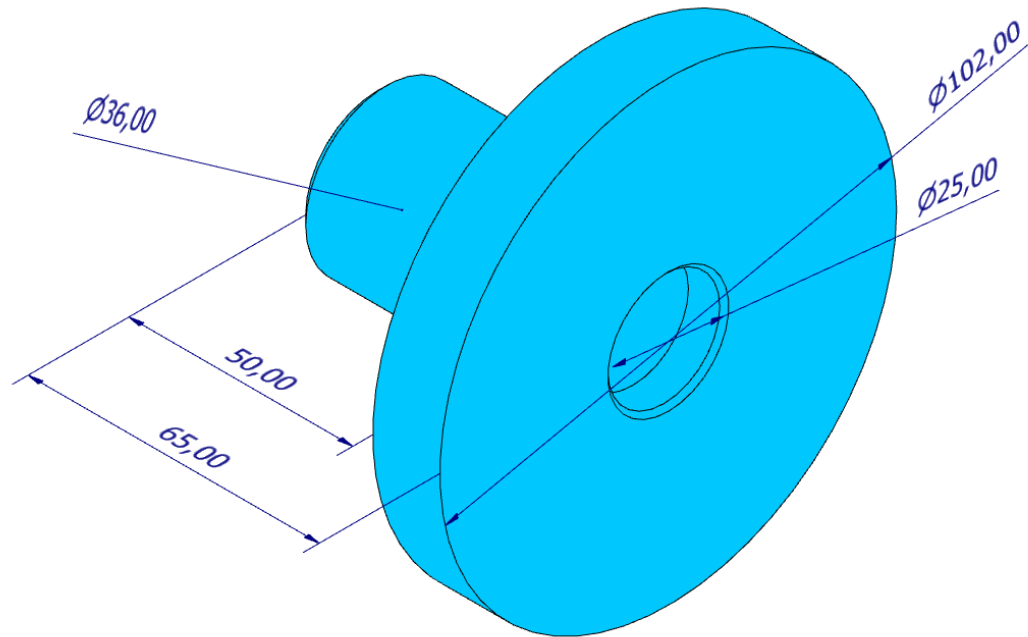
Rozměry nové spirály byly odměřeny:

- $d_{ex} = 102 \text{ mm}$
- $d_{in} = 36 \text{ mm}$
- $s = 100 \text{ mm}$
- $L = 1500 \text{ mm}$
- $t_{\text{spirály}} = 6 \text{ mm}$



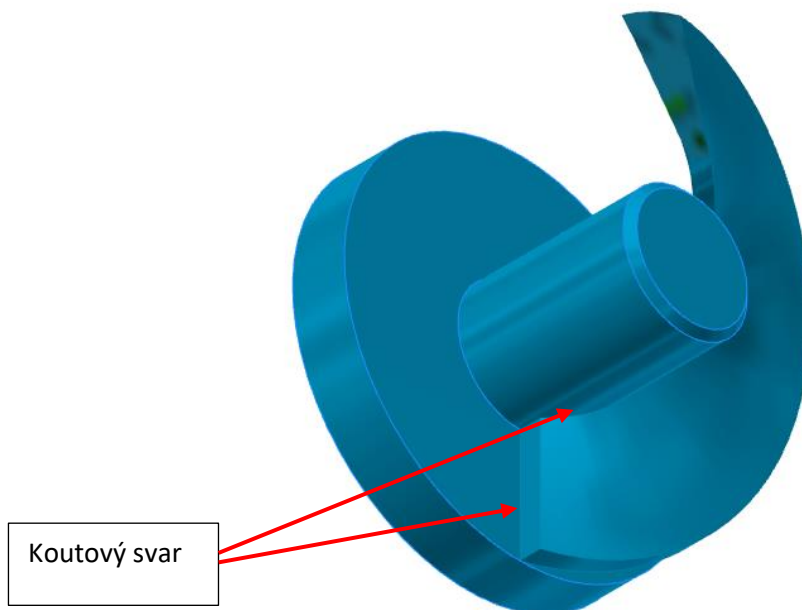
Obrázek 74 Spirála dopravníku

Spirála je na jednom konci přivařená k patce. Ta má průměr vnitřního rozměru spirály a rozšiřuje se až do průměru 102 mm. Toto rozšíření funguje jako zábrana, aby se materiál nedostal za výsypku a potencionálně k hřídeli nebo víku, které je průchozí.



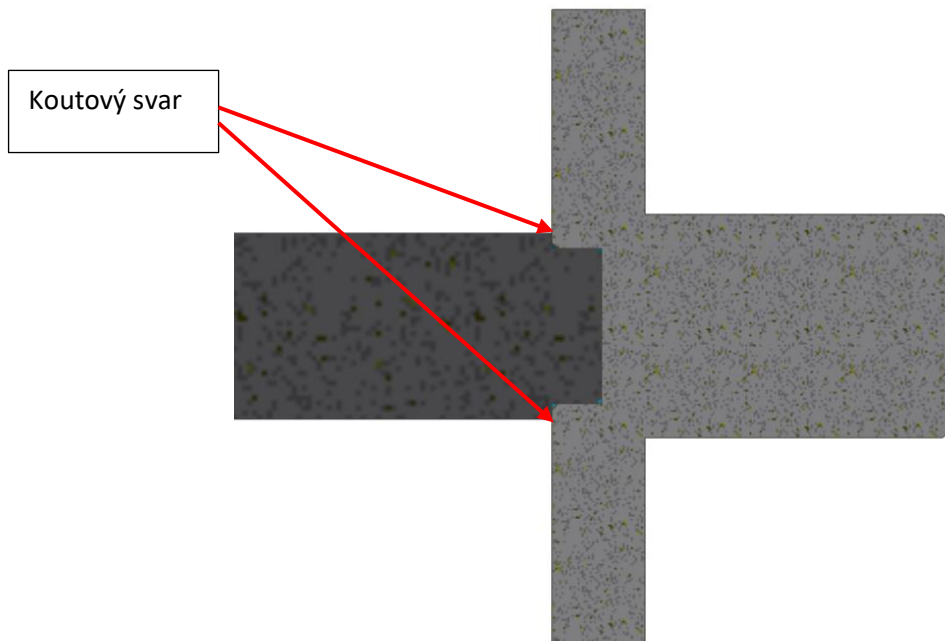
Obrázek 75 Patka spirály

Koutový svar je veden z obou stran podél hrany spirály u patky přes půl otáčky.

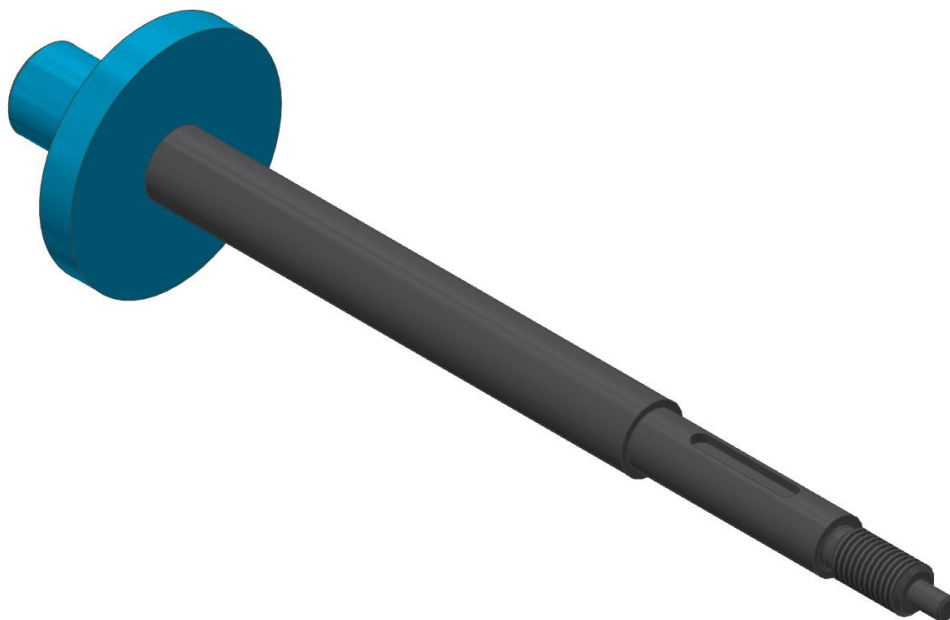


Obrázek 76 Spojení patky se spirálou

Patka je pak dále spojena s hřídelí, která je přes osazení vložena do díry na čele patky a svařena pomocí koutového svaru.

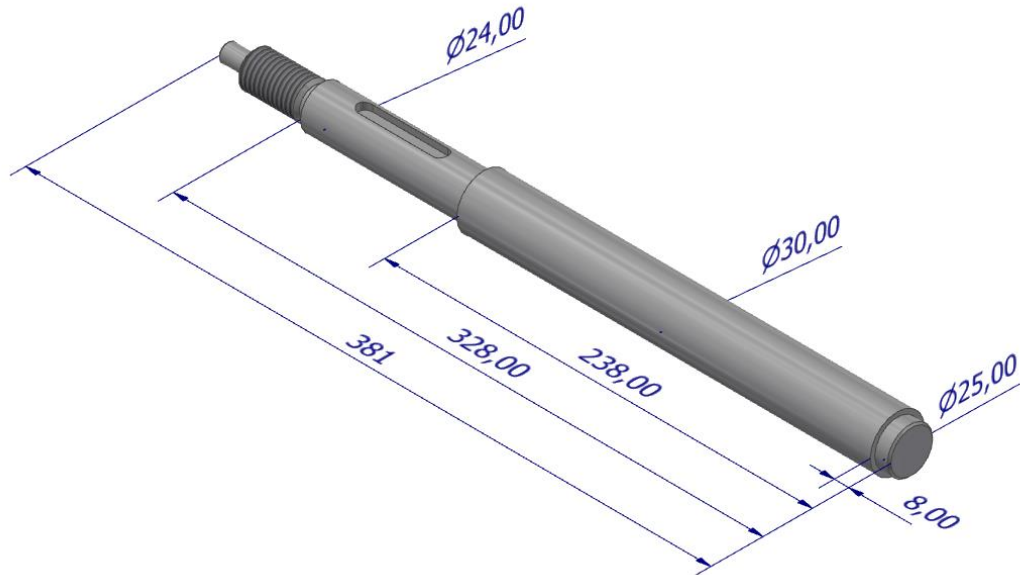


Obrázek 77 Řez místa spojení patky s hřídelí



Obrázek 78 Spojená hřídel s patkou

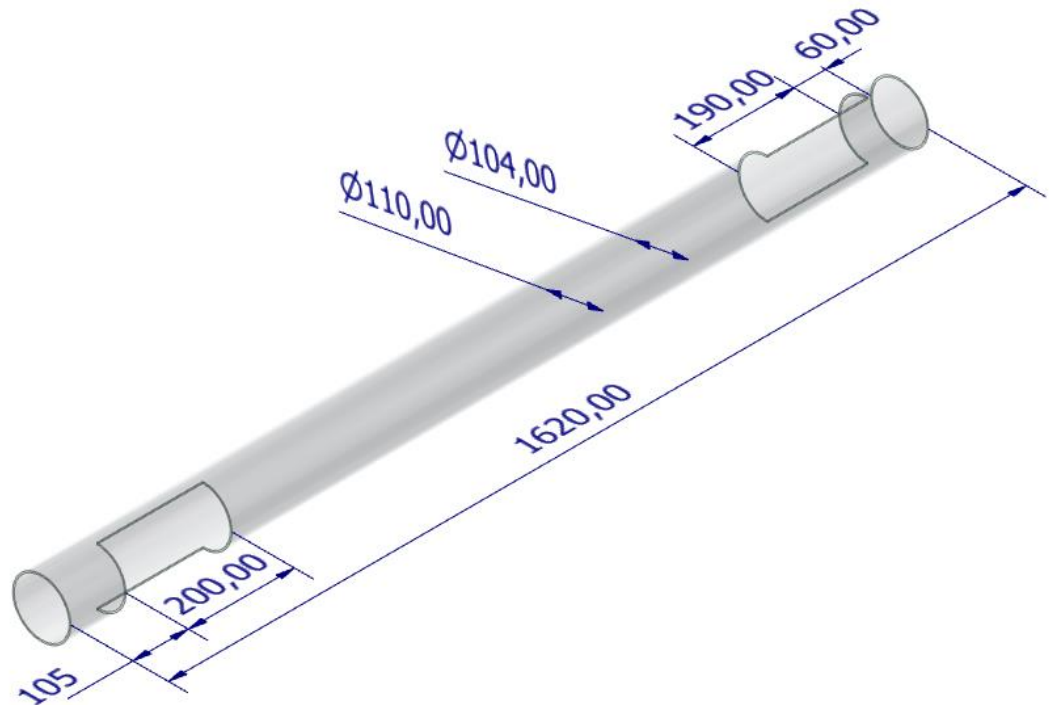
Hřídel je vyrobena podle vzniklých požadavků z dopravníku a nosné konstrukce. Část hřídele s průměrem 30 mm prochází skrz dvě ložiska připevněné k žebřům. Další část hřídele o průměru 24 mm vede do šnekové převodovky pohonné jednotky a je v ní udělaná drážka pro pero pro přenos krouticího momentu. Na konci je opatřena drážkou a vnějším závitem pro axiální zajištění motoru.



Obrázek 79 Hřídel spirálového dopravníku

4.4.2. Trubice a koncové části

Trubice bude z průhledného plexiskla a bude koupena například od výrobce zenit.cz [35] a délkově upravena, aby vyhovovala rozměry. Průhledný materiál je použitý proto, aby bylo možné sledovat tok materiálu v traktu dopravníku. V průběhu experimentu se budou do materiálu přisypávat barevná zrna a sledovat, jak se pohybují.



Obrázek 80 Trubice spirálového dopravníku

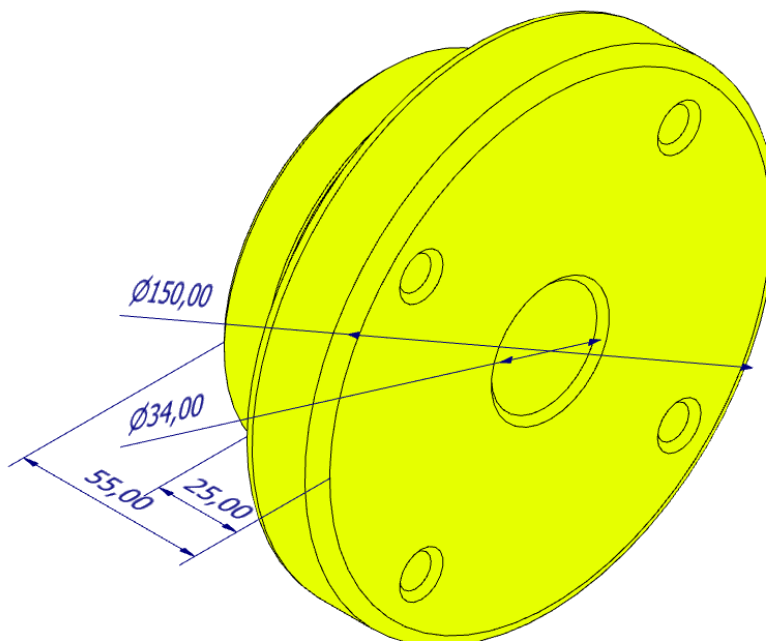
Do trubice budou vyřezány dva otvory: pro násyp materiálu a výsyp. Jejich rozměr a poloha se může ještě změnit podle potřeby nasyvky a výsypky. Způsob plnění a vysypávání dopravníku bude řešen v dizertační práci.

Na obou koncích jsou víka, která uzavírají trubici, aby nevypadával materiál. Víka jsou odnímatelná, aby bylo možné dopravník sestavit a rozebrat podle potřeby



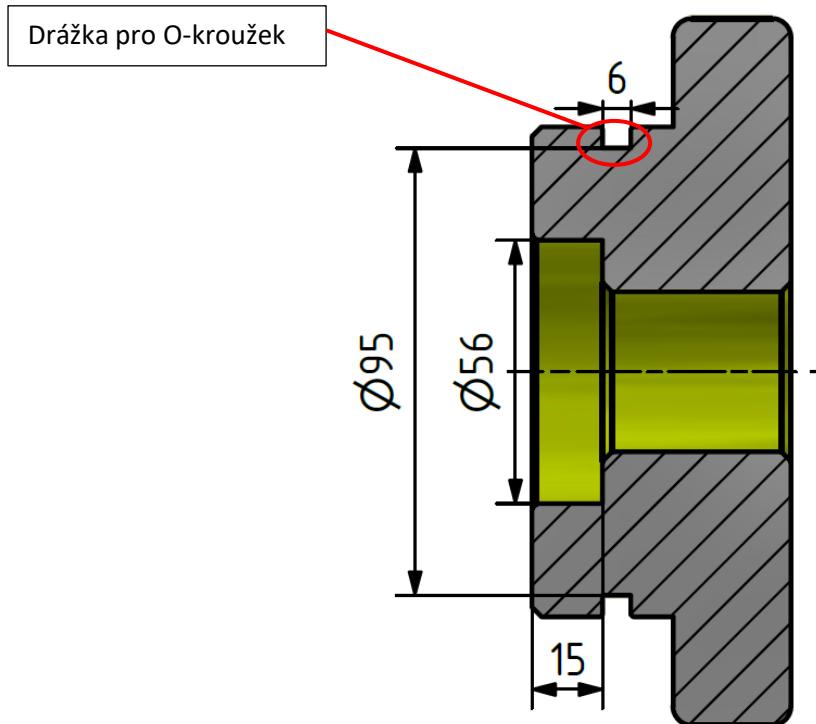
Obrázek 81 Trubice s víky

Horní víko je průchozí a je skrz něj vedena hřídel. Víko v trubici drží pomocí O-kroužku, který je nasazený v drážce víka.



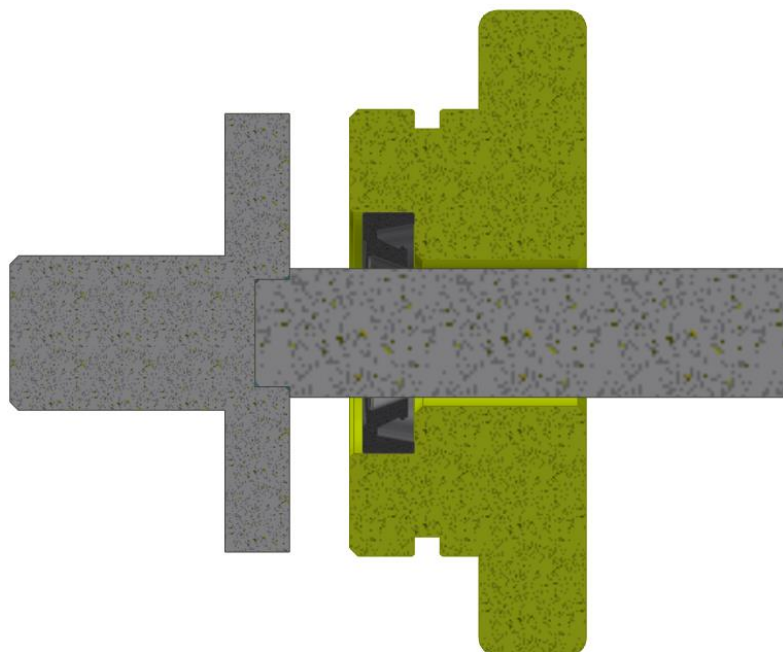
Obrázek 82 Horní víko trubice

O-kroužek se deformuje, protože má větší rozměry než průměr nasazované hrany víka, vytváří tření, a tím drží víko na místě. Průchozí díra je na vnitřní straně rozšířená do otvoru o průměru 56 mm a hloubce 15 mm.



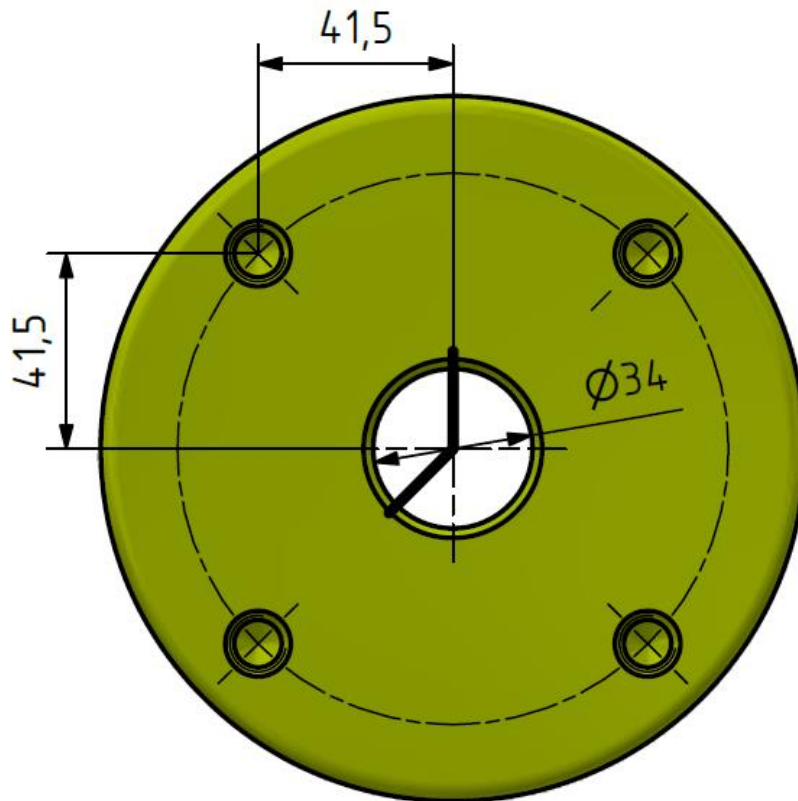
Obrázek 83 Řez horním víkem

Do vzniklého rozšíření je umístěno gufero sloužící jako zábrana proti průniku maziva z ložisek do vnitřního prostoru dopravního traktu.

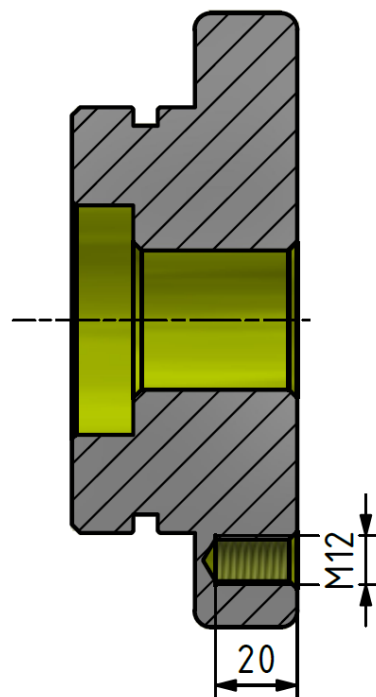


Obrázek 84 Řez sestavou víka a patky s hřídelí s nasazeným guferem

Na předním čele víka jsou vyvrtané díry se závitem M12, do kterých budou zašroubovány šrouby držící ložiskové těleso UCF. Rozměry a pozice vychází ze zvolených Ložiskových těles UCF SKF.

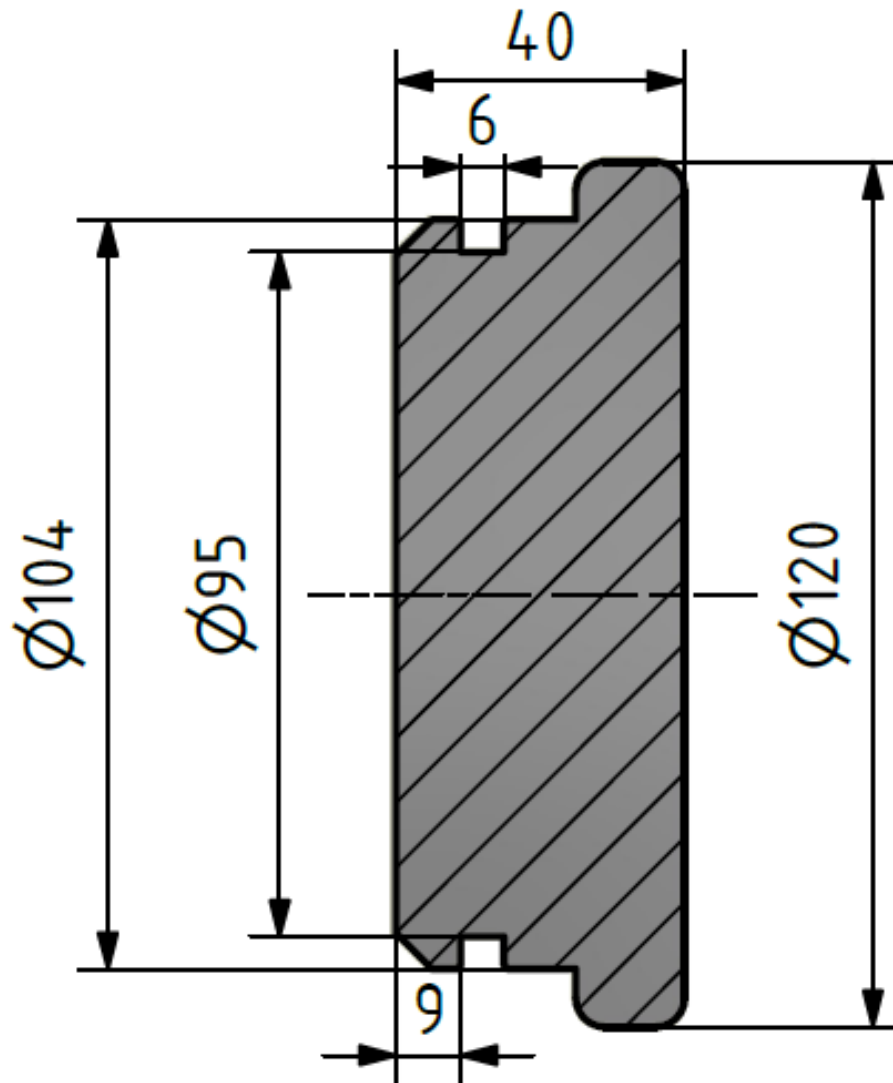


Obrázek 85 Horní víko zepředu



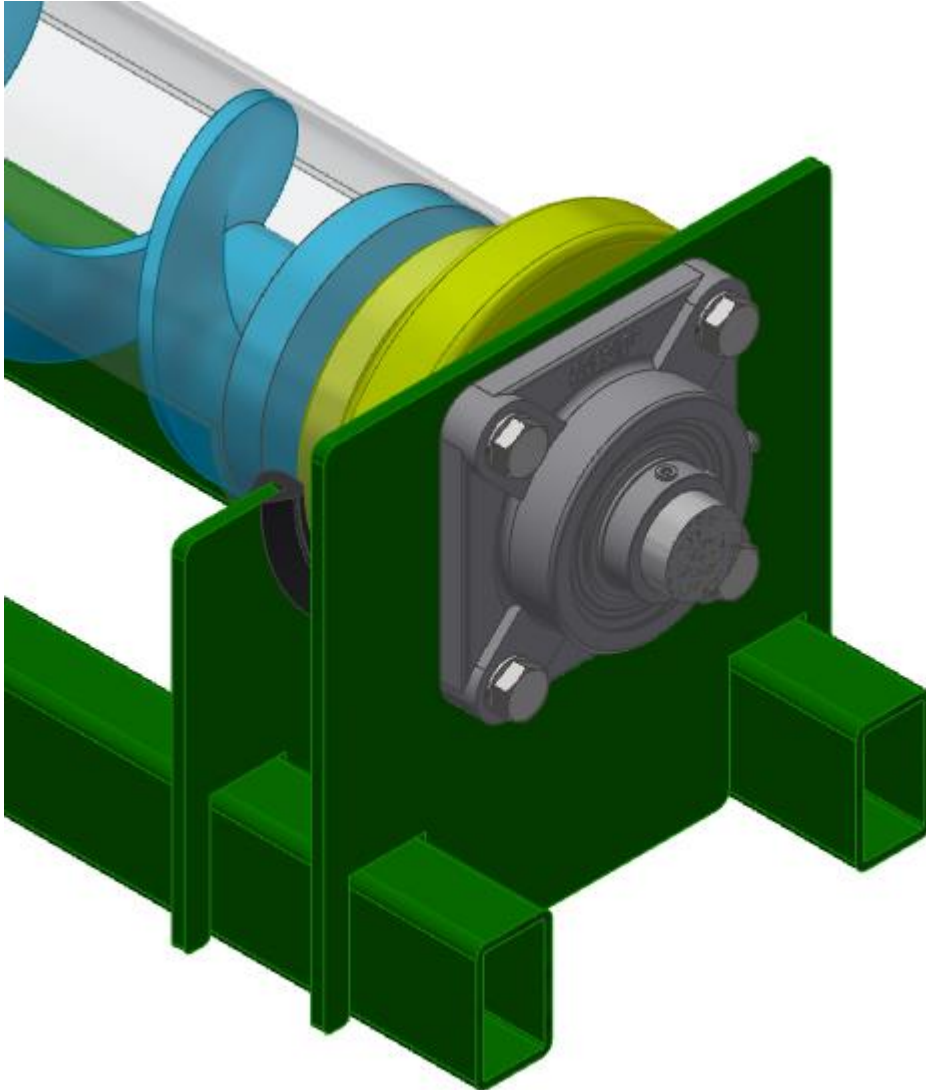
Obrázek 86 Řez víkem a závitem

Spodní víko je řešeno obdobně jako horní. Do trubice je nasazeno a drženo deformovaným O-kroužkem skrze tření.



Obrázek 87 Řez spodním víkem

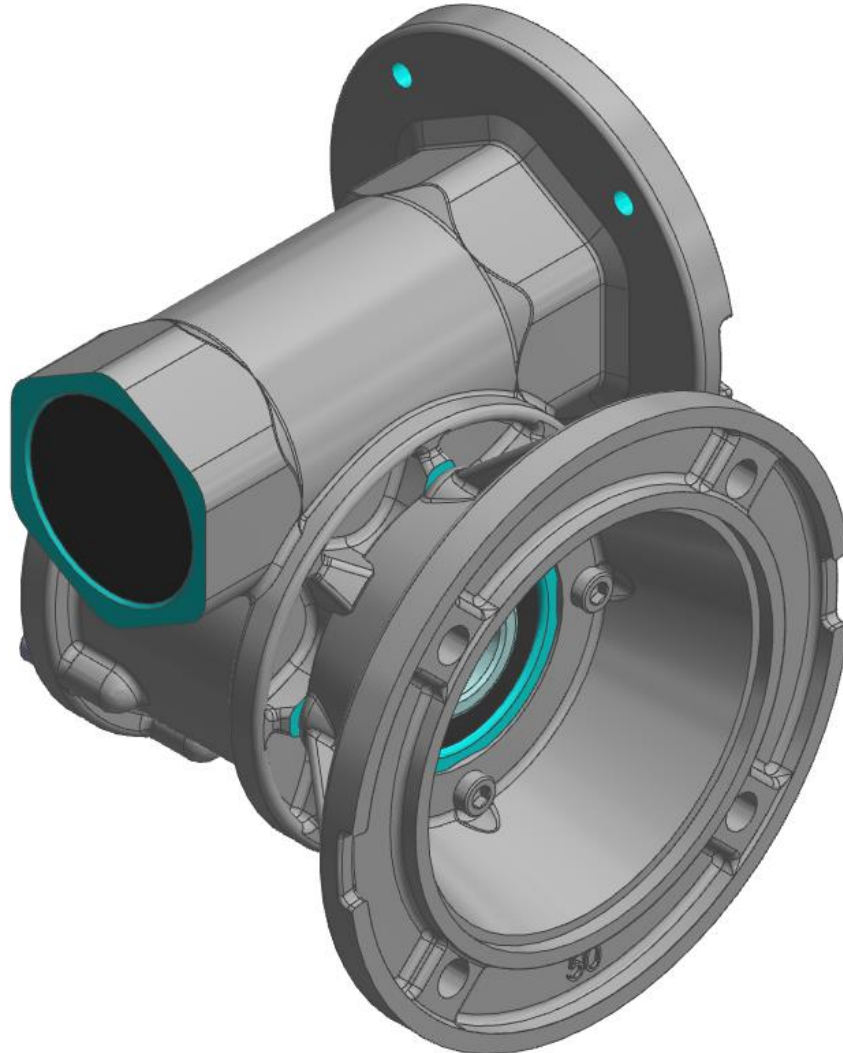
Horní víko je šrouby spojeno s žebrem a ložiskovým domkem. Spojení napomáhá k zabezpečení trubice proti protočení. Šrouby drží víko s guferem středěné vůči hřídeli, která víkem prochází, a zamezují tak případnému opření hřídele o hranu víka nebo jednostranně zvýšenému vytlačování gufera.



Obrázek 88 Pohled na ložiskové těleso spojené s žebrem a horním víkem

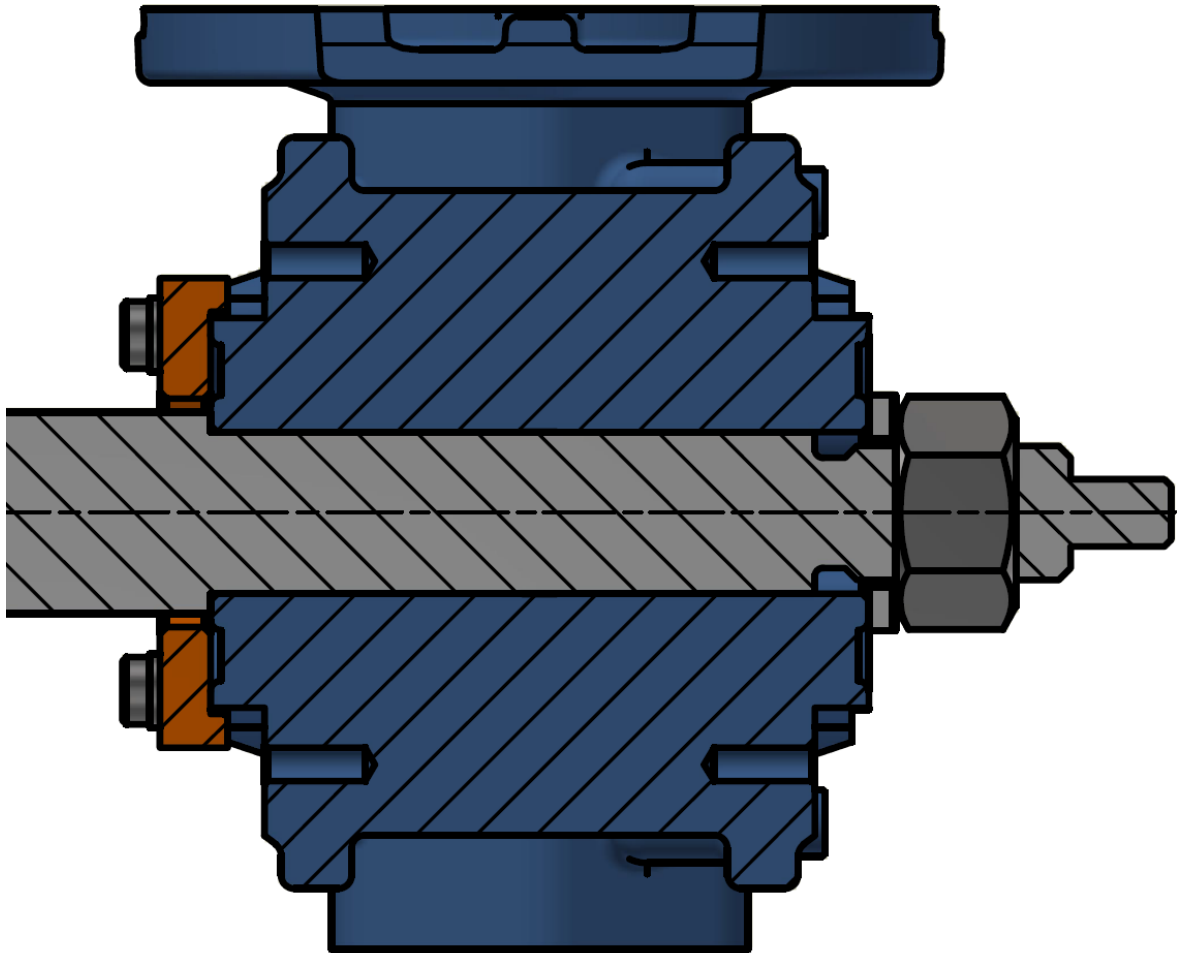
4.4.3. Uložení a zajištění pohonné jednotky s převodovkou

V původním návrhu byla zvolena šneková převodovka s pohonnou jednotkou TOS Znojmo MRT 40E o výkonu 0,37 kW. Po konzultaci s firmou RATAJ byla v rámci SGS na doporučení poptána a koupena šneková převodovka, opět od prodejce TOS Znojmo MRT50A-40-FF-L/B5/1-80-100 a změněna pohonná jednotka na výkon 0,55 kW.



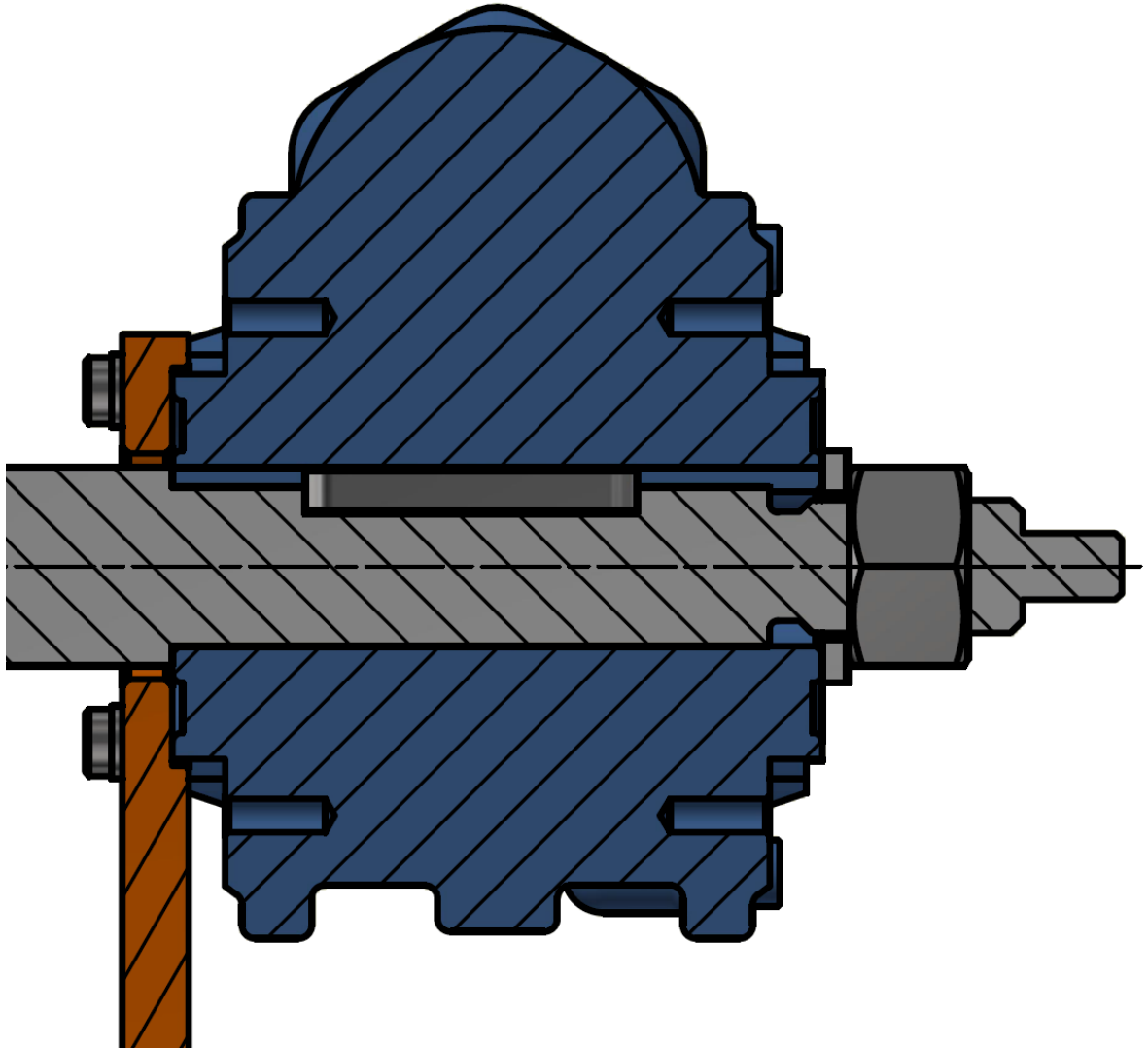
Obrázek 89 Šneková převodovka MRT-40-FF-L/B5/1-80-100

Převodovka byla dodána s přírubou na výstupní straně z převodovky na přidělení pohonné jednotky ke konstrukci. Pro potřeby návrhu experimentálního stanoviště byla příruba sundána a šneková převodovka je volně vložena na hřídel s perem.



Obrázek 90 Řez šnekovou převodovkou

Převodovka je nasazena až k rozšíření na hřídeli a opřena o vnitřní kroužek ložiska převodky. Z druhé strany převodovky je na vnitřní kroužek ložiska položena pojistná deska a zajištěna maticí, která je našroubovaná na závitovou hlavu na konci hřídele.

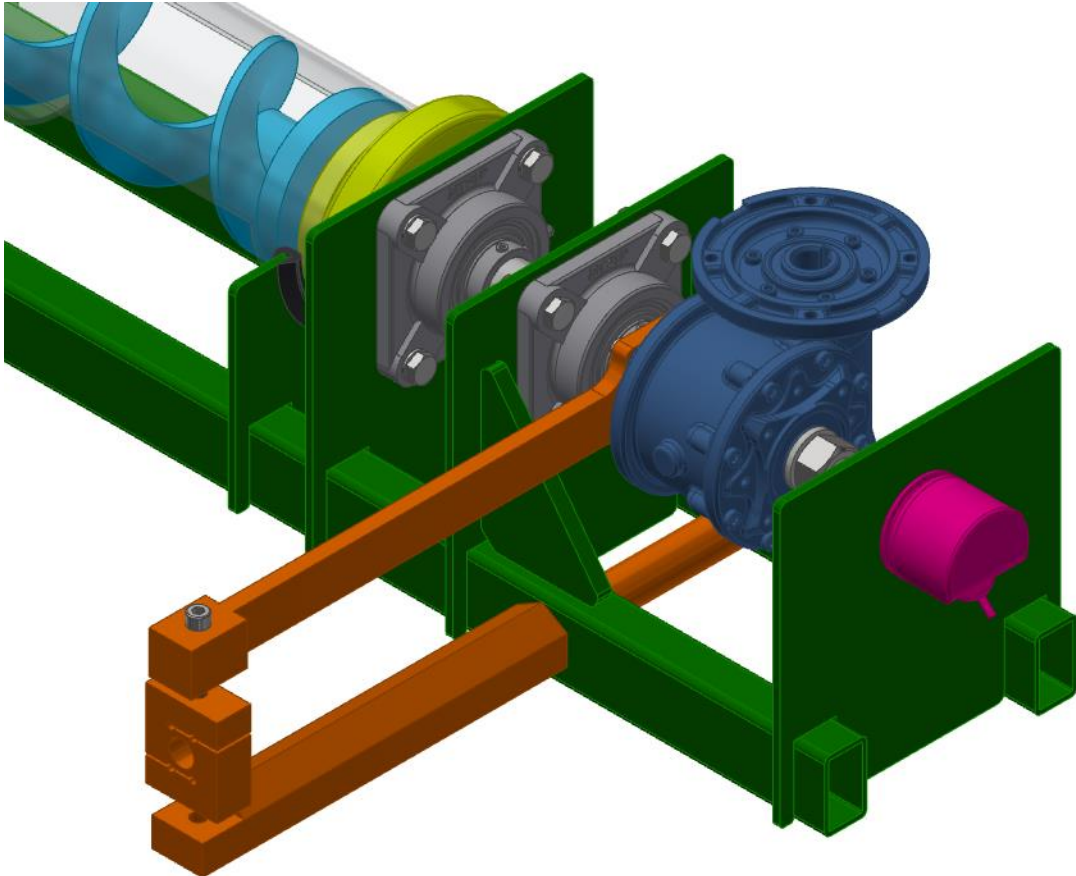


Obrázek 91 Řez Šnekovou převodovkou v rovině pera

Pro přenos bylo zvoleno těsné pero podle normy ČSN 02 2562 o rozměrech $8 \times 7 \times 50$. Zvolené pero je vybrané s dostatečnou bezpečností, kdyby bylo potřeba při provádění experimentu zvýšit krouticí moment.

Šneková převodovka je na hřídel nasazena volně, kvůli způsobu měření krouticího momentu. Na spodním čele převodovky je vyrobené rameno, které má za úkol zachytávat reakční moment z převodovky a zabraňovat jejímu volnému otáčení. Horní a spodní rameno je pomocí dvou šroubů spojeno s čidlem tahu. To měří sílu, která na něj působí, a jelikož délka ramene je dána, můžeme sílu přepočítat na moment.

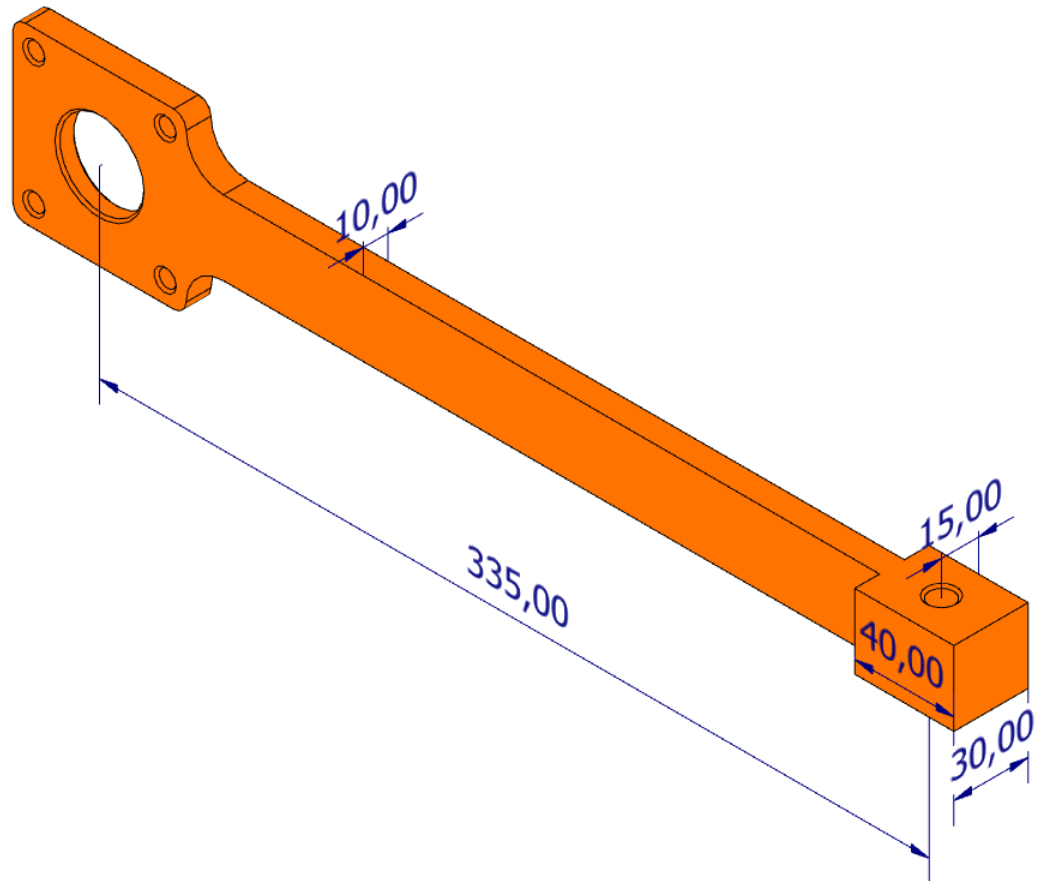
$$M = F \cdot L$$



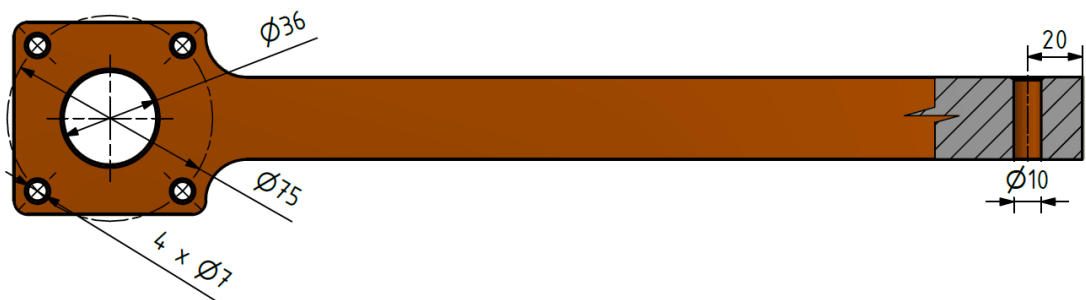
Obrázek 92 Rameno pro záchyt reakčního momentu umístěné v konstrukci

Alternativní možností bylo použít snímač přímo určený pro měření momentu a zapojit ho přes spojku mezi hřídel spirály a motoru. Metoda měření pomocí ramene zachycujícího reakční moment byla zvolená z důvodu dostupnosti senzoru. Ústav disponuje snímači tahu ve tvaru S („zetka“).

Délka ramene je zvolená podle potřeby snímače síly, pomocí kterého je ve výsledku měřený krouticí moment (viz kapitola čidla).

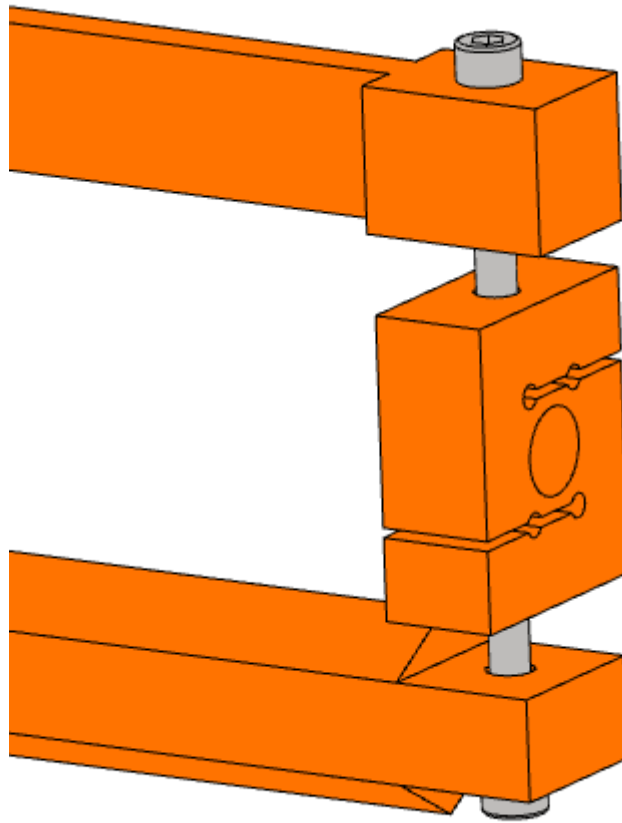


Obrázek 93 Rameno pro záchyt reakčního momentu



Obrázek 94 Rameno pro záchyt reakčního momentu z předního pohledu

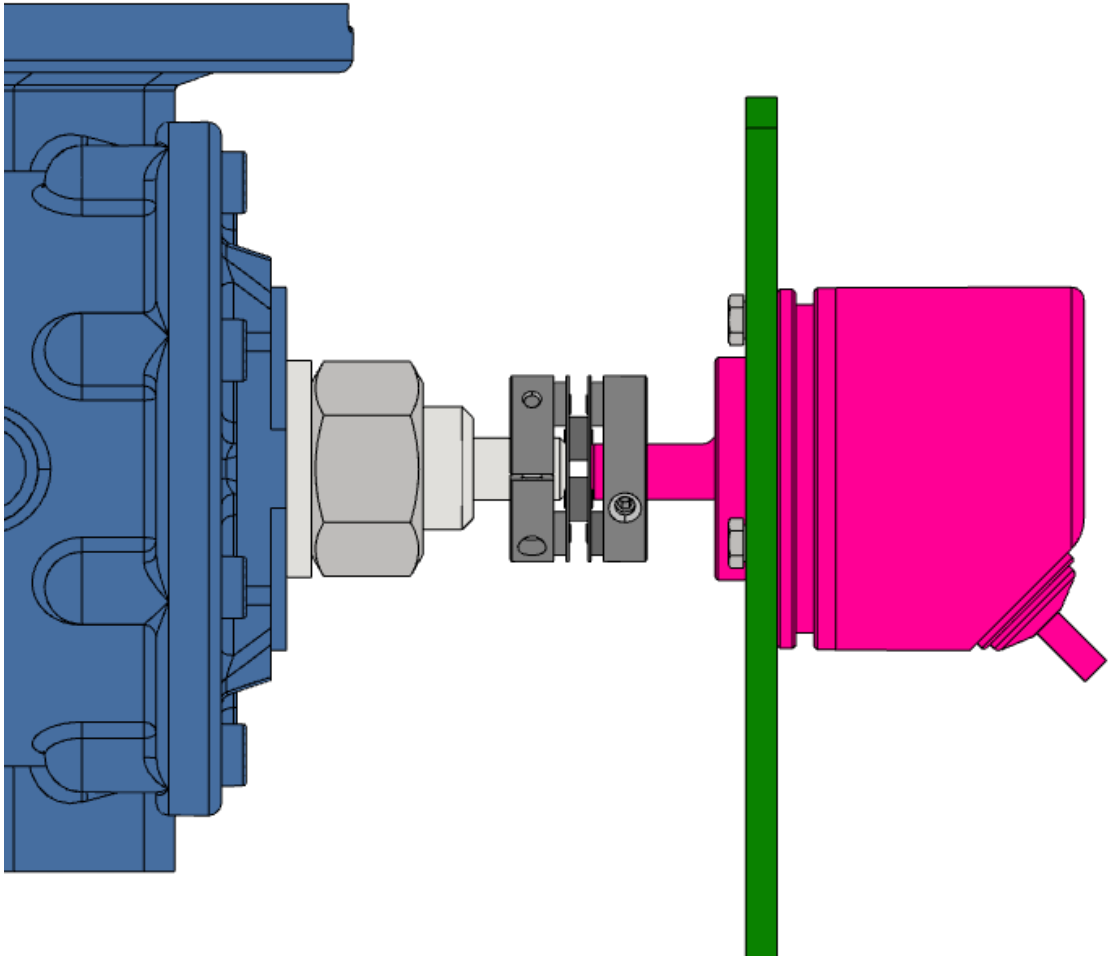
Senzor tahu je spojen pomocí dvou šroubů pevnostní třídy 12.9. Šrouby budou hlavně namáhány na tah, jelikož se předpokládá, že namáhání vzniklé ohybem bude zanedbatelné.



Obrázek 95 Senzor tahu spojený šrouby s rameny

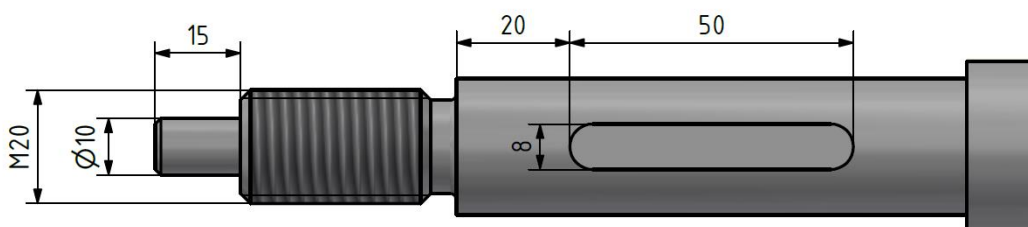
4.4.4. Umístění snímače otáček

Na horním konci nosné konstrukce je umístěn snímač otáček, který je pružnou spojkou spojený s vyčnívajícím koncem hřídele dopravníku.

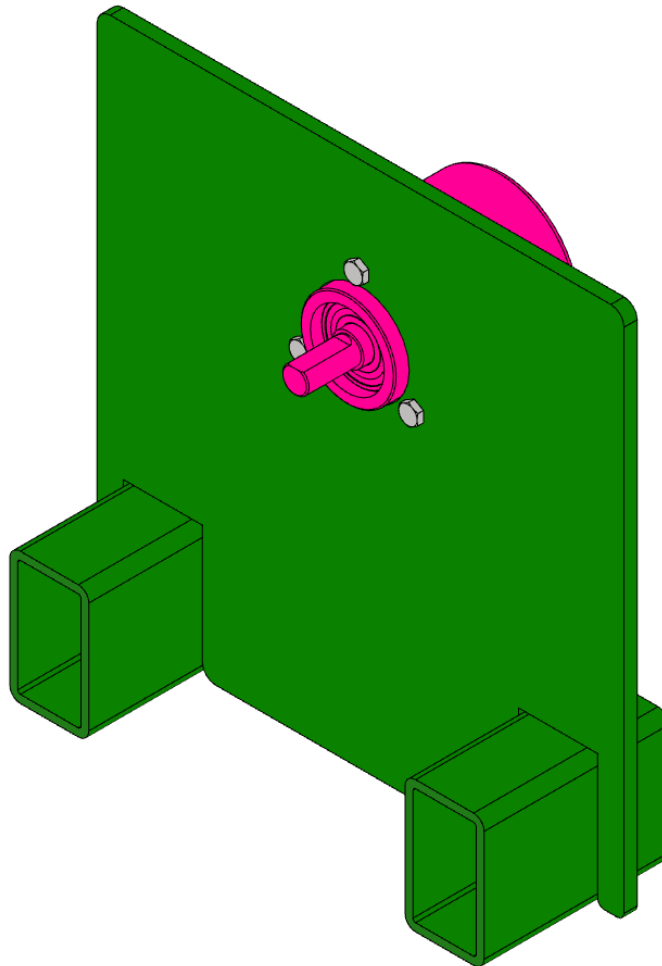


Obrázek 96 Pohled z boku na spojení hřídele se senzorem otáček

Hřídel je za závitovou hlavou zakončena úzkou částí s průměrem 10 mm a délce 15 mm. Tato úzká část je napojena spojkou spojující hřídel se senzorem.



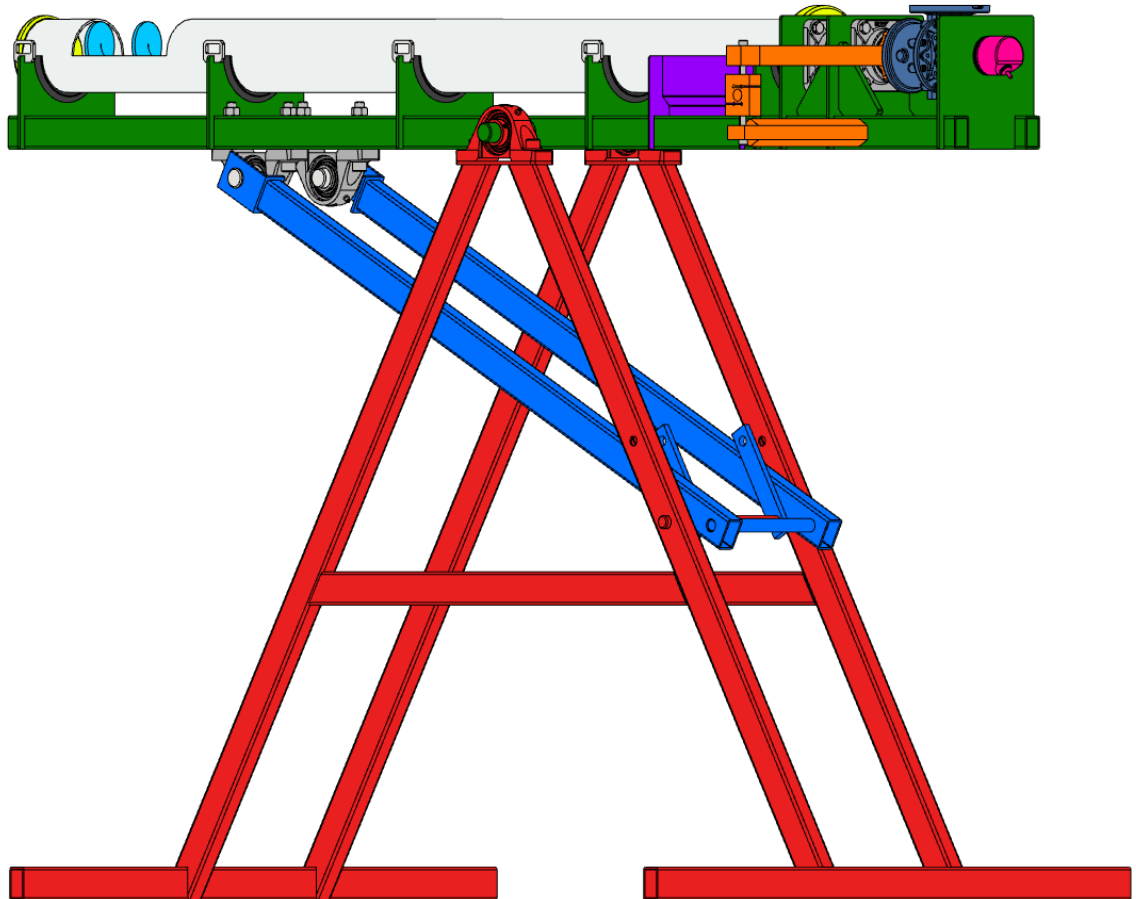
Na nosné konstrukci je na konci navařen plech s dírami pro nasazení senzoru. Pozice děr je dána požadavky vybraného senzoru. Sensory otáček se nejčastěji montují třemi šrouby po 120°.



Obrázek 97 Pohled na uložení snímače

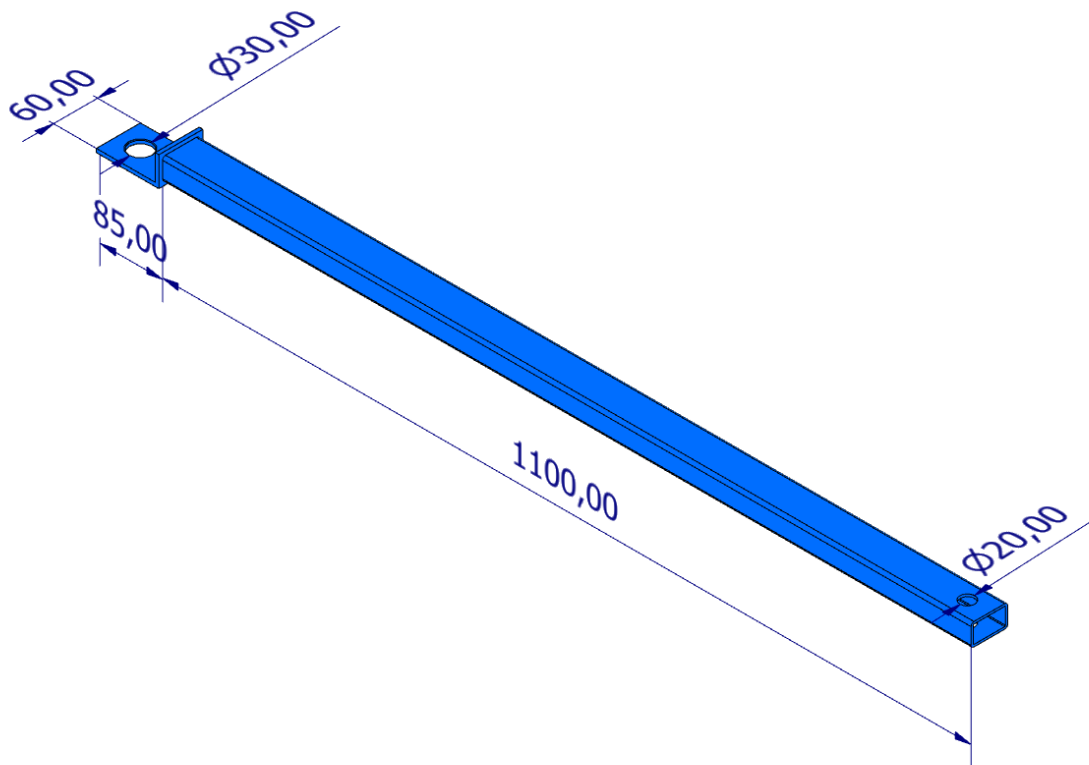
4.5. Systém naklápění a aretace dopravníku

Pro naklápění dopravníku byl navržený systém na svěrném principu. Do ložiskových těles ve spodní části nosné konstrukce jsou umístěny dva jekly, které mají na čelo přivařené 5 mm tlusté plechy ve tvaru „L“. V plechu jsou díry pro nasazení čepů, které jsou k plechům přivařeny.

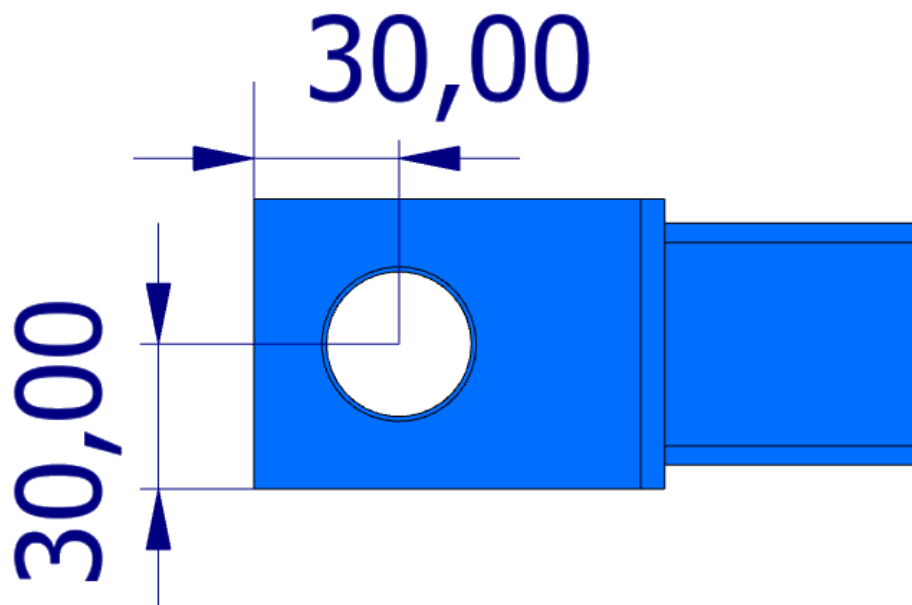


Obrázek 98 Dopravník na rámu se systémem pro aretaci

Mechanismus je funkčně spojen s rámem, protože je součástí systému aretace.

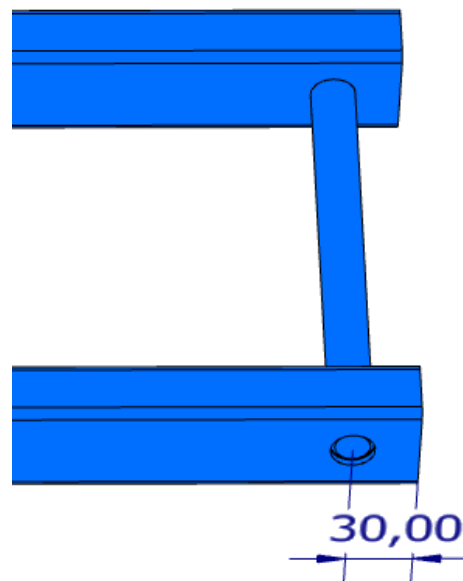


Obrázek 99 Noha aretačního systému

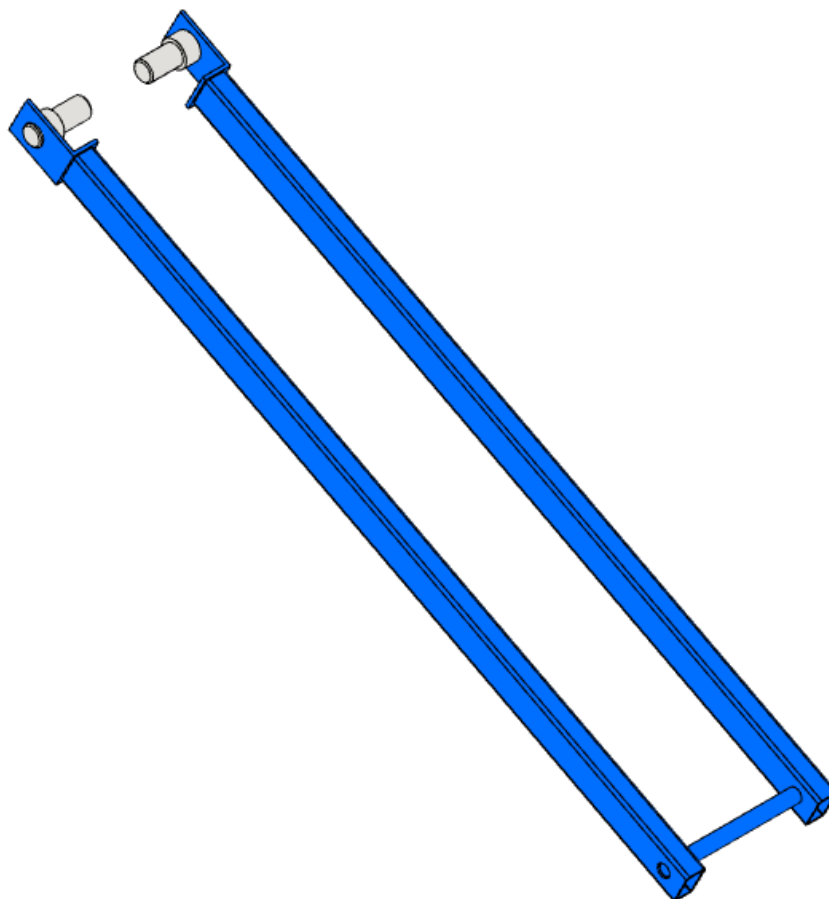


Obrázek 100 Detail plechu s dírou pro čep

Na spodní straně obou jeklů je vyvrtaná díra a oba jeклы jsou propojeny kruhovou tyčí o průměru 20 mm.

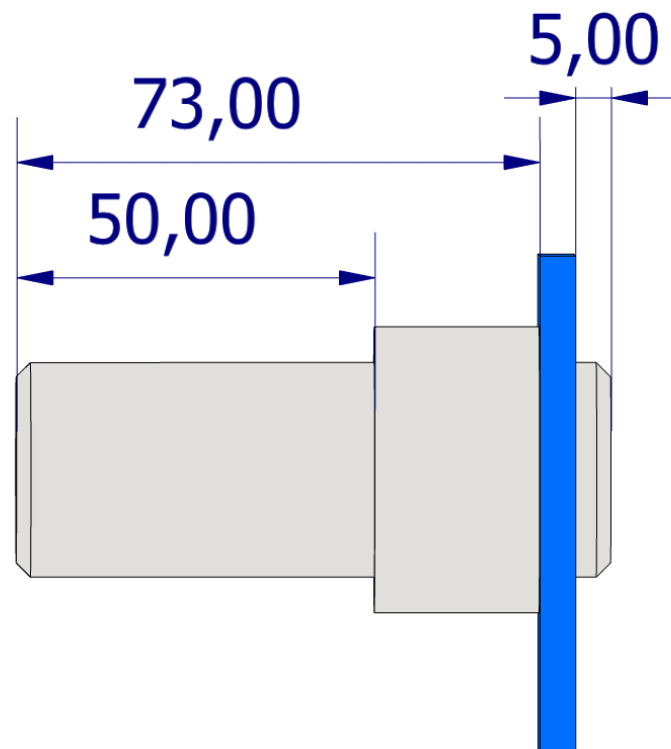


Obrázek 101 Detail spojení jeklů tyčí

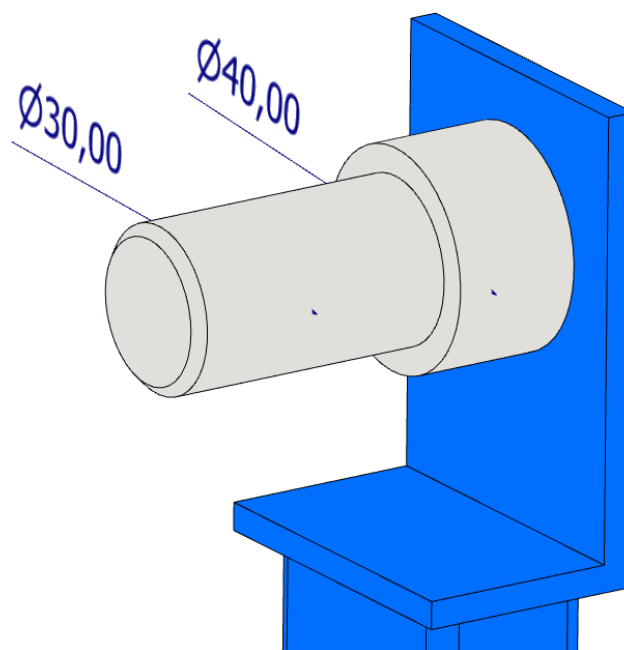


Obrázek 102 Pohled na spojené nohy aretačního systému

Čep má přečnivající konec, aby ho bylo možné pomocí koutového svaru svažit.

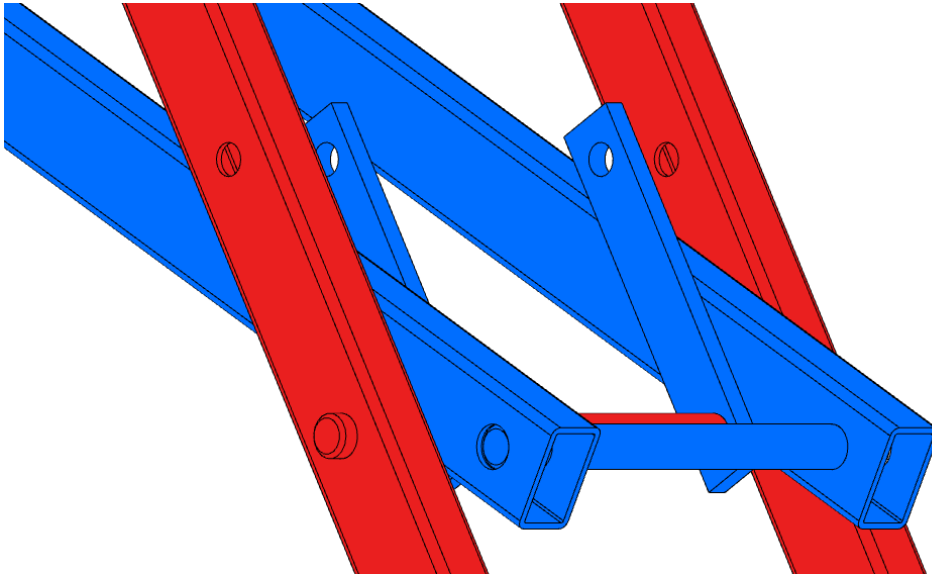


Obrázek 103 Délkové rozměry čepu



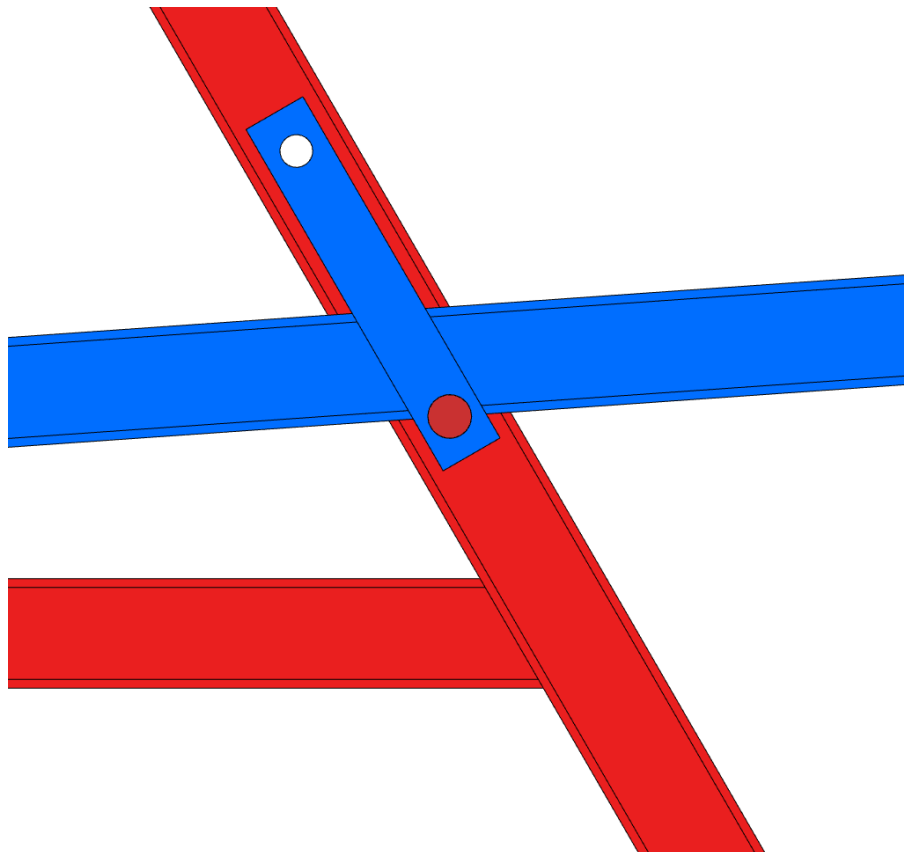
Obrázek 104 Čep nasazený do plechu s průměry

Pro zaaretování dopravníku v konkrétní pozici je využitý svěrný mechanismus. Na tyč rámu jsou nasunuty před svařením dva pruhy 10 mm tlustého plechu s dírami na obou koncích. Druhá díra je vyvrtána tak by byla souosá s dírou v rámu. Touto druhou dírou se protáhne šroub, který se stáhne maticí nebo se použije cyklistický „rychloupínák“.

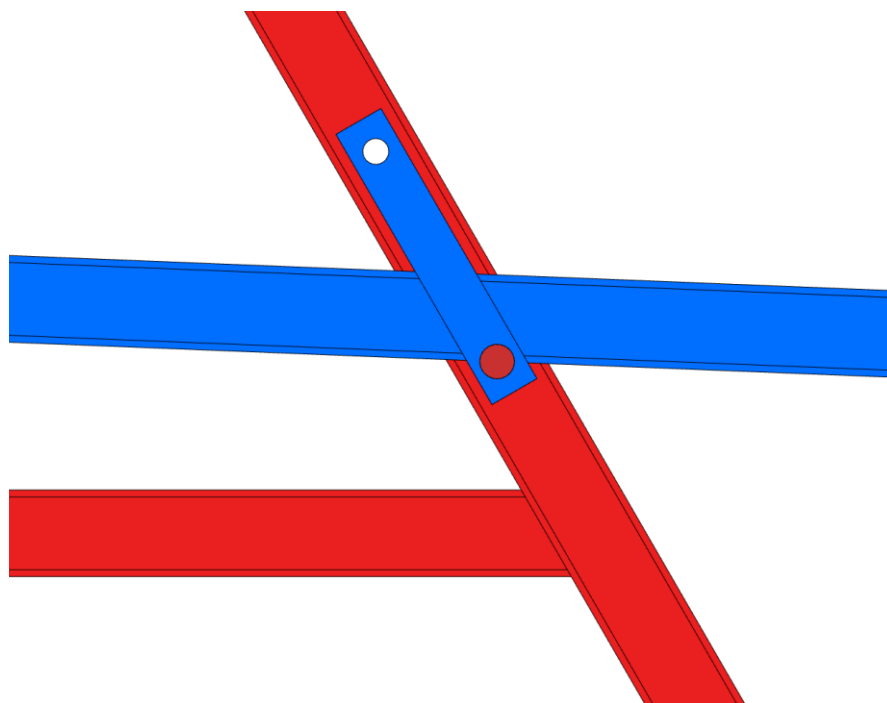


Obrázek 105 svěrný mechanismus

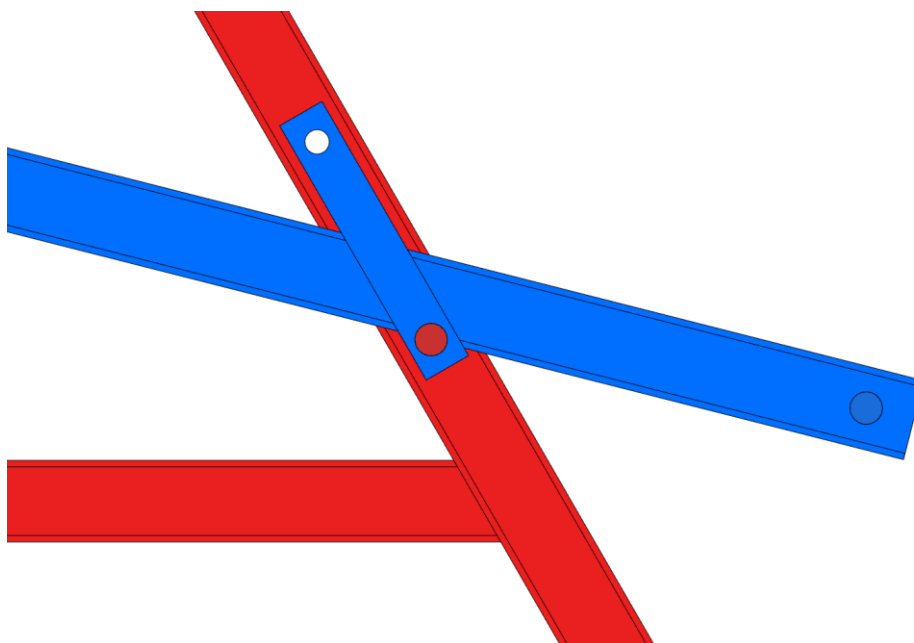
Pozice díry pro šroub je volená podle geometrie rámu a pohybu aretačních noh. Dopravník se musí nechat zajistit v jakémkoliv náklonu v rozmezí $0^\circ - 90^\circ$. Aretační jekly se volně pohybují po tyči v rámu.



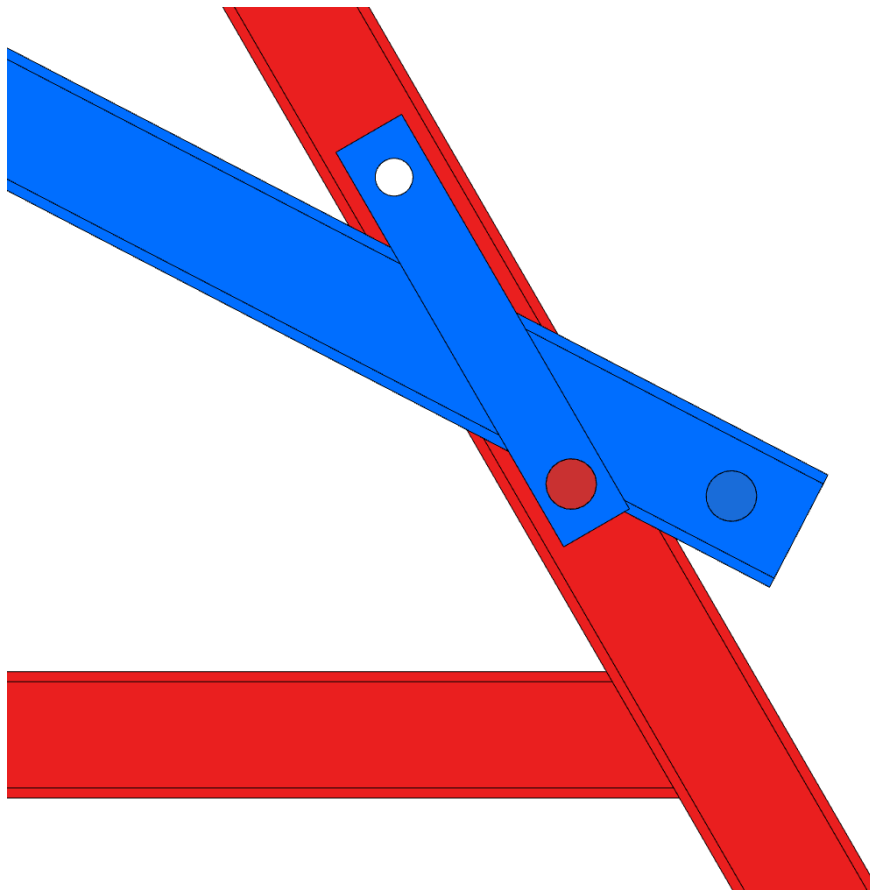
Obrázek 106 pozice jeklů při náklonu 90°



Obrázek 107 pozice jechlů při náklonu 60°



Obrázek 108 Pozice jechlů při náklonu 30°



Obrázek 109 Pozice jeklů při náklonu 0°

Jak je patrné ze série obrázků **XX-XX**, při vodorovné poloze dopravníku jsou jekly nejvýše a jedná se tak o krajní polohu, podle které se určí poloha díry v rámu.

Dílčí závěr

Konstrukce vyšla z přechozího návrhu představeného v bakalářské práci a zohledňuje v návrhu nové konstrukční prvky jako jsou: rám, systém aretace a montáž senzorů. Předběžně byly vybrány senzory vyhovující nebo již zakoupené pro měření. Podle potřeby se tyto senzory mohou změnit a nahradit novými koupenými nebo ústavními. V závislosti na změnu senzorů je možno změnit i rozměry související s jejich montáží.

4.6. Senzorika

4.6.1. Otáčky

Pro měření otáček byl v rámci SGS koupen senzor IRC305/1024PB od firmy larm.cz, který má 1024 impulsů za otáčku. V případě, že by tento enkodér nevyhovoval pro účely měření, se použije jiný enkodér podle potřeby z vlastnictví ústavu.

	IRC 3x0	IRC 3x1	IRC 3x2	IRC 3x3	IRC 3x4	IRC 3x5
Napájecí napětí UN [V]	X.30	X.30	X.30	5±5%	5±5%	5±5%
Napájecí napětí OC UO [V]	–	V.30	UN	V.30	UN	–
Max. vlastní spotřeba IN [mA]	50/30V	50/30V	50/30V	100	100	100
Max. výstupní frekvence FO[kHz]	150	100	100	100	100	200
Max. zatížení výst. kanálů IO[mA]	±25	25	-25	25	-25	±20
Výstupní úrovně elektrických signálů						
UOH [V] UN=30V, ION=10mA	UN-3	–	>UN-1	–	>UN-1	>2.5
UOL [V] UN=U0=30V, IOL=-10mA	<1,2	<1	–	<1	–	<0,4
IOH [μA] UN=U0=30V	–	<-6	–	<-6	–	–
IOL [μA] UN=U0=30V	–	–	<6	–	<6	–
Max. délka připojovacího kabelu [m]	100	20	20	20	20	50

Obrázek 110 tabulka elektrických vlastností senzorů



IRC300 – 305

x

Obrázek 111 IRC Snímač řady 300-305 od firmy Larm

Vibrace dle FCČSN345791		10 gn (10 ÷ 2000 Hz)
Rázový impulz		50 gn (100 ms)
Pracovní teplota	– standardní	0° ÷ +60°C
	– <i>provedení M</i>	-25° ÷ +60°C
Vlhkost	– relativní	95 % max.
	– absolutní	40 g.m-3 max.
Atmosféra bez agresivních látek.		

Obrázek 112 Tabulka provozních podmínek

Pin konektoru	Barva výst. kabelu	Význam	
		IRC3x0 až 3x2	IRC3x3 až 3x5
1	šedá	Signál 2 non	
2	růžová	Senzor +10 ÷ +30 V	Senzor +5 V
3	modrá	Signál 3	
4	fialová	Signál 3 non	
5	žlutá	Signál 1	
6	bílá	Signál 1 non	
7	–	NC	
8	zelená	Signál 2	
9	stínění	Stínění	
10	černá	GND	
11	hnědá	Senzor 0 V	
12	červená	UN +10 ÷ +30 V	Vcc +5 V

Obrázek 113 Tabulka zapojení připojovacích prvků IRC300-IRC325

4.6.2. Krouticí moment

Krouticí moment se bude měřit pomocí tahového čidla S9M od výrobce hbm.cz s rozsahem 1 kN. Princip měření momentu funguje podle vzorce

$$M = F \cdot L$$

Délka ramene je známá a senzor měří sílu. Jelikož délka ramene je konstantní veličina a velikost síly bude průběžně měřena a zaznamenávána počítačem, je jednoduché nechat počítač sílu přepočítat na moment a ukládat hodnoty momentu nebo z nich dělat graf závislosti.

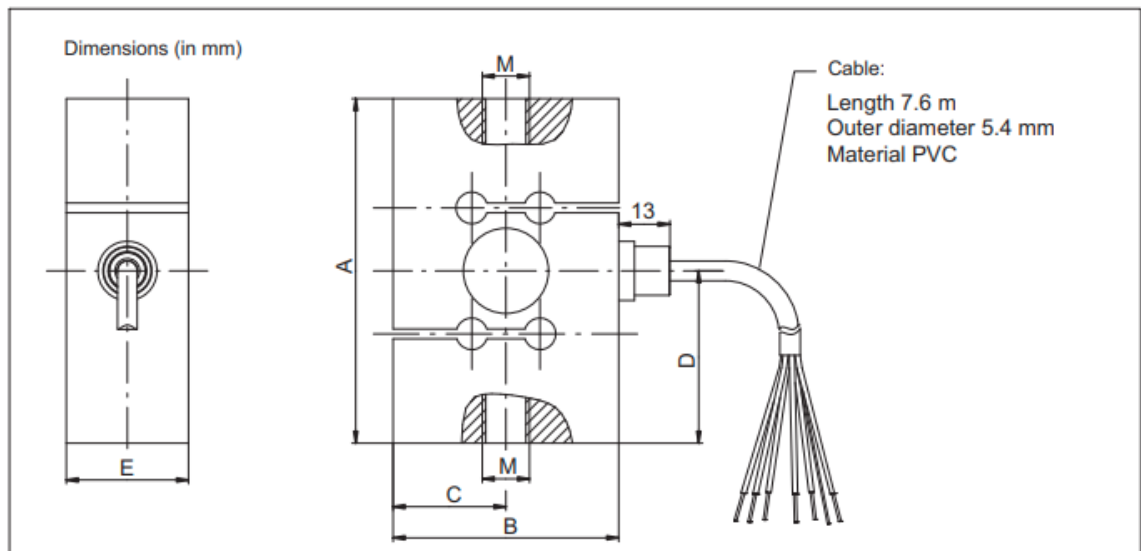
Type			S9M							
Nominal (rated) force:	F_{nom}	kN	0.5	1	2	5	10	20	50	
Accuracy										
Accuracy class			0.02							
Relative reproducibility and repeatability errors without rotation	b_{rg}	%	0.02							
Rel. reversibility error	v		0.02							
Non-linearity	d_{lin}		0.02							
Relative creep	d_{crf+E}		0.02							
Temperature effect on sensitivity	TC_S	%/10K	0.02							
Temperature effect on zero signal	TC_0		0.02							
Electrical characteristics										
Nominal (rated) sensitivity	C_{nom}	mV/V	2							
Relative zero signal error	$d_{s,0}$	%	5							
Sensitivity error	d_c		0.25							
Tensile/compressive sensitivity variation	d_{zd}		0.1							
Input resistance	R_i	Ω	389 ±15							
Output resistance	R_o		350 ±1.5							
Insulation resistance	R_{is}	Giga Ω	>2							
Operating range of the excitation voltage	$B_{u,gt}$	V	0.5...12							
Reference excitation voltage	U_{ref}		5							
Connection			6-wire circuit							
Temperature										
Reference temperature	T_{ref}	°C	+23							
Nominal temperature range	$B_{t,nom}$		-10...+70							
Operating temperature range	$B_{t,g}$		-30...+85							
Storage temperature range	$B_{t,s}$		-30...+85							
Characteristic mechanical quantities										
Maximum operating force	F_G	% of F_{nom}	150							
Force limit	F_L		150							
Breaking force	F_B		200		300			200		
Limit torque	$M_{G,perm}$	Nm	25	50	90	150				
Static lateral limit force	F_q	% of F_{nom}	10							
Nominal (rated) displacement	s_{nom}	mm	0.35	0.4	0.35	0.1	0.2	0.2	0.4	
Fundamental frequency	f_G	kHz	0.6	0.9	1	1.7	2.1	2.3	2.5	
Relative permissible oscillatory stress	F_{rb}	% of F_{nom}	100						70	
General information										
Degree of protection per EN 60529			IP68 (test condition 1 m water column / 100 hours)							
Spring element material			Stainless steel in accordance with EN 10088-1							
Measuring point protection			Hermetically welded enclosure							

Obrázek 114 Technické údaje snímače



Obrázek 115 Snímač S9M od hbm

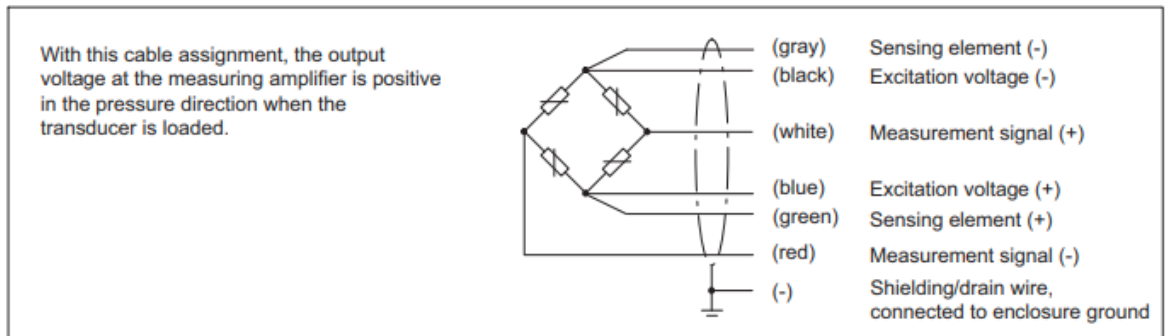
Rozměry snímače jsou dány podle jeho rozsahu. Pro rozsah 1kN platí vyznačené rozměry v obrázku



Type	A	B	C	D	E	M
S9M/500 N	62	50.8	25.4	31	24	M8
S9M/1 kN	62	50.8	25.4	31	24	M8
S9M/2 kN	87.3	57.2	28.6	43.7	24	M12
S9M/5 kN	87.3	57.2	28.6	43.7	31	M12
S9M/10 kN	87.3	57.2	28.6	43.7	31	M12
S9M/20 kN	100	69.8	34.9	50	31	M24x2
S9M/50 kN	100	76.2	38.1	50	36.5	M24x2

Obrázek 116 tabulka rozměrů snímače

Nominal (rated) force:	F_{nom}	kN	0.5	1	2	5	10	20	50
Cable	6-wire cable, PVC insulation								
Cable length	m		7.6 m (standard), also available: 1.5 m; 3 m and 6 m						



Obrázek 117 Schéma s popsanými drátky

Laboratoř tenzometrie ústavu konstruování a částí strojů disponuje podobnými senzory a v rámci ušetření financí, by bylo možné tyto senzory použít za předpokladu, že budou vyhovovat jejich vlastnosti.

5. Kontrola metodou konečných prvků

Na konstrukci byla provedena kontrola pomocí metody konečných prvků (MKP). Pro kontrolu byl využitý výpočetní program ANSYS static structural. Model byl do programu importován jako objemové těleso ve formátu .step.

MKP výpočet bylo nutné provést vícekrát, protože maximální napětí vycházelo větší, než je mez kluzu. Byly provedeny tři varianty výpočtu

1. výpočet s ramenem, pro záchyt reakčního momentu, z jeklu
2. výpočet s ramenem, pro záchyt reakčního momentu, z šestihranné tyče
3. výpočet s ramenem, pro záchyt reakčního momentu, z šestihranné tyče se zjemněnou sítí.

Kontrola MKP je pouze orientační a nejedná se o plnou analýzu. Ve výpočtu nejsou zahrnuty svary a model byl pro účely jednoduššího výpočtu zjednodušen. Výpočet obsahuje pouze nosnou konstrukci.

5.1. Nastavení mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti konstrukce byly nastaveny pro všechny výpočty stejně. Pro účely nastavení síly byl model nařezán v prostředí ANSYS Discovery. Součásti jsou v modelu spojeny pomocí vazby BONDED, což znamená že se chovají jako jedno spojené těleso.

Jediná vazba pod hlavou šroubu v rameni je nastavena jako Frictional (třecí). Koeficient tření je nastaven na 0,1.

☐ Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	3 Faces
Target	3 Faces
Contact Bodies	SYS\ISO 4762 - M8 x 60
Target Bodies	SYS\rameno_spodni1
Protected	No
☐ Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0,1
Scope Mode	Automatic
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Trim Tolerance	5,1741 mm
Suppressed	No

Obrázek 118 Nastavení vazby šroubu s ramenem

V experimentu jsou nastaveny tři druhy materiálu, které jsou přiřazeny ke korespondujícím částím konstrukce. Pro každý materiál je přiřazena: hustota, Youngův modul pružnosti v tahu, Poissonovo číslo, mez kluzu a mez pevnosti.

Materiál všech částí, kromě šroubu v rameni a ramene ze šestihranné tyče, je ocel S235JR. Šroub je z oceli pro šrouby pevnostní třídy 12.9 a rameno ze šestihranné tyče je z oceli C45E.

1. Ocel S235JR

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	8000	kg m ⁻³ ▼
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Mod... ▼	
6	Young's Modulus	2,1E+05	MPa ▼
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa
9	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa
10	Tensile Yield Strength	235	MPa ▼
11	Tensile Ultimate Strength	360	MPa ▼

Obrázek 119 Nastavené vlastnosti pro ocel S235JR
2. Ocel C45E

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	8000	kg m ⁻³ ▼
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Mod... ▼	
6	Young's Modulus	2,1E+05	MPa ▼
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa
9	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa
10	Tensile Yield Strength	430	MPa ▼
11	Tensile Ultimate Strength	650	MPa ▼

Obrázek 120 Nastavené vlastnosti pro ocel C45E
3. Ocel pro šrouby pevnostní třídy 12.9

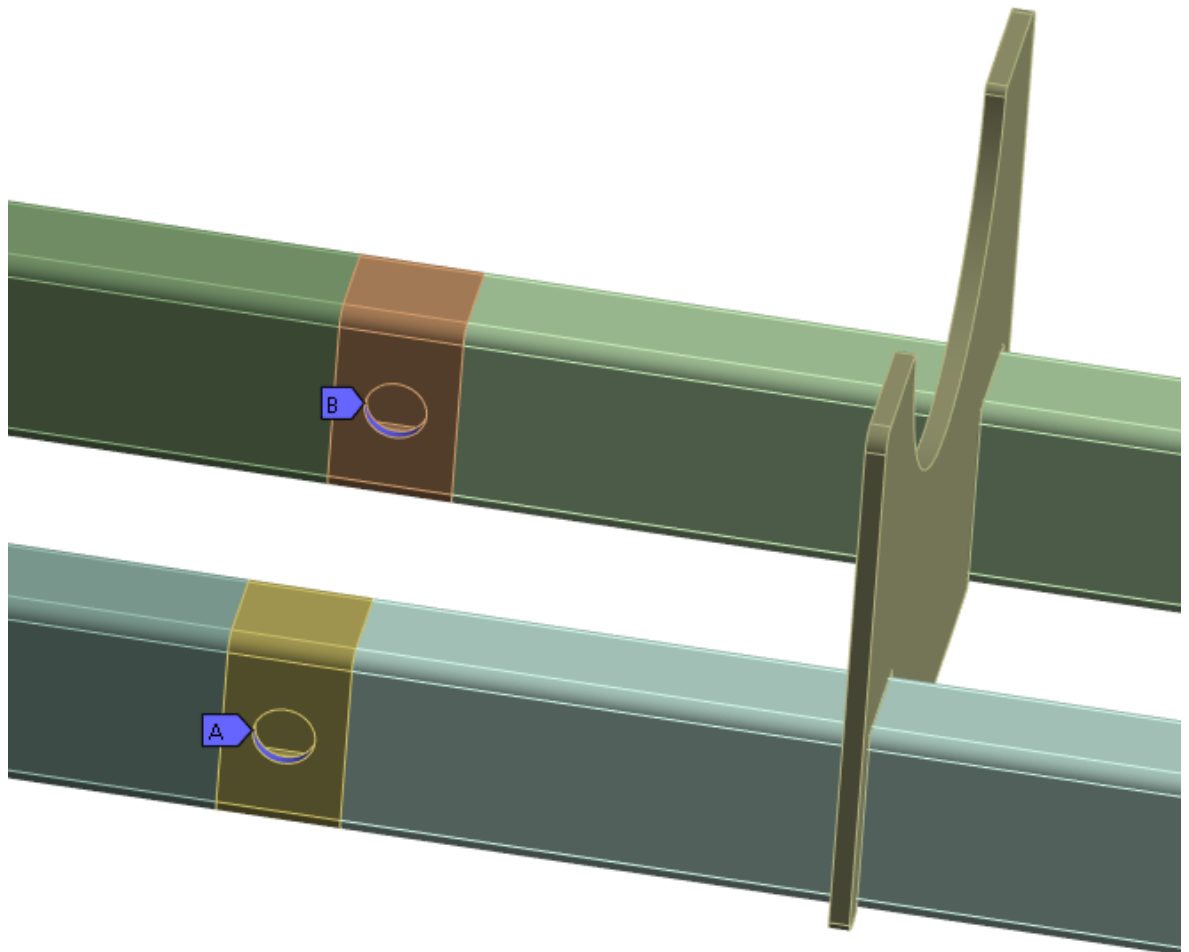
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	8000	kg m ⁻³ ▼
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Mod... ▼	
6	Young's Modulus	2,1E+05	MPa ▼
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa
9	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa
10	Tensile Yield Strength	1080	MPa ▼
11	Tensile Ultimate Strength	1200	MPa ▼

Obrázek 121 Nastavené vlastnosti pro ocel šroubů pevnostní třídy 12.9

5.2. Okrajové podmínky

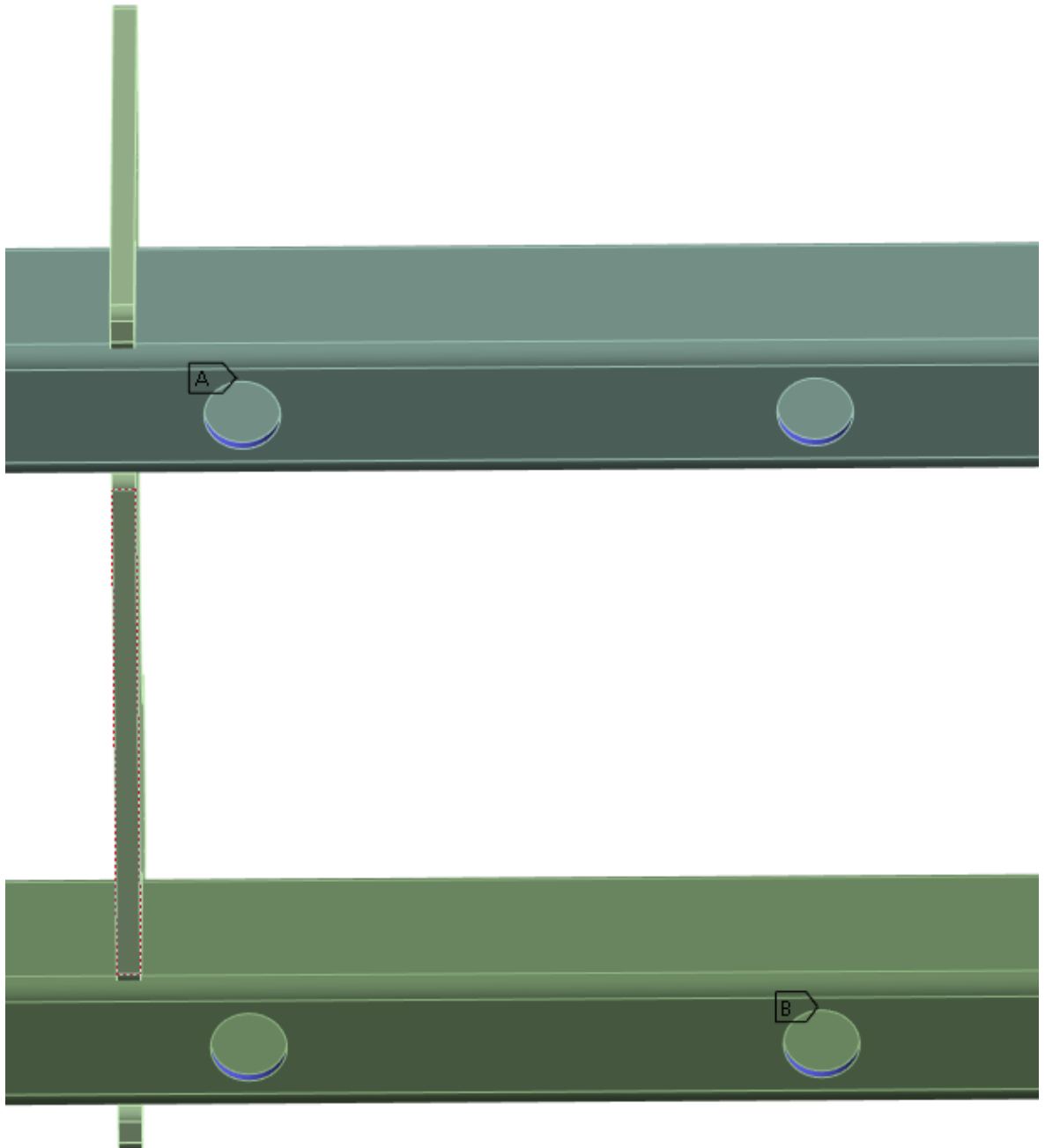
Okrajové podmínky jsou ve všech výpočtech totožné a jsou nastaveny následovně:

- V místech pro rotační čep jsou umístěny cylindrické vazby, vazby navzájem nejsou provázané



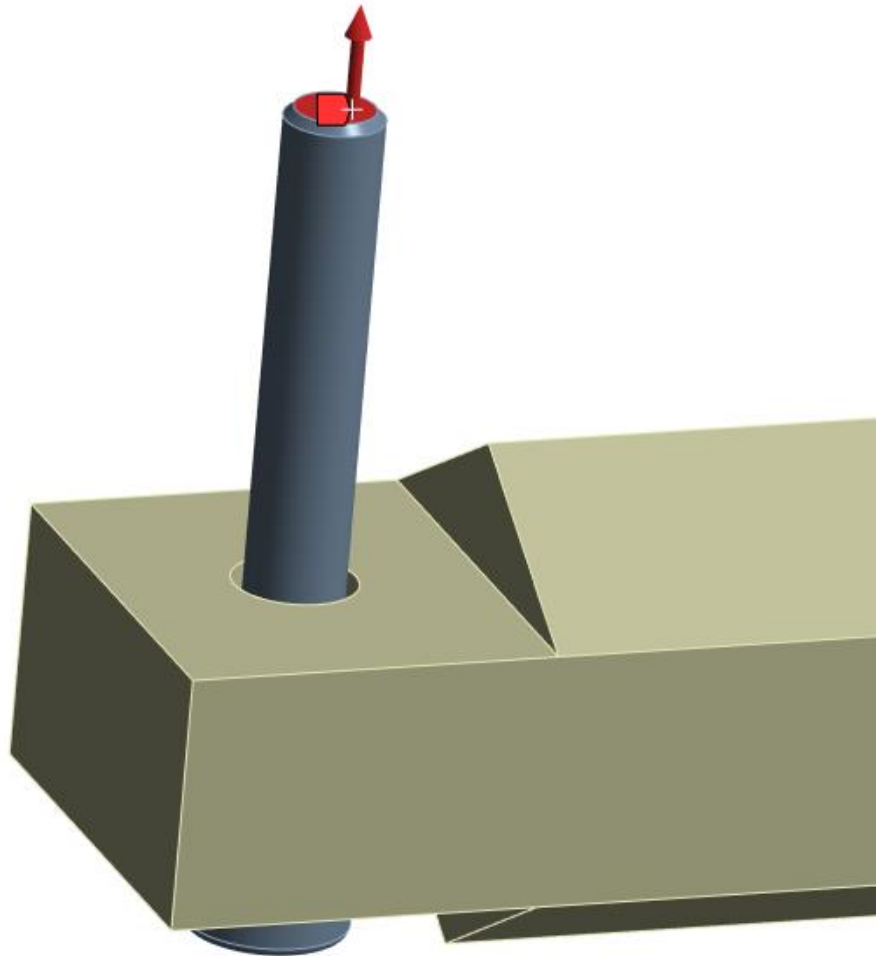
Obrázek 122 Cylindrické vazby

- Ložisková tělesa zvedacího mechanismu jsou nahrazena pevnou vazbou.



Obrázek 123 Pevné vazby

- Působící síla je aplikována na spodní čelo šroubu, který je v rameni. Velikost síly je nastavena pomocí složek na 500N v ose Y.



Obrázek 124 Aplikovaná síla pro zatížení modelu

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Force
Define By	Components
Applied By	Surface Effect
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	500, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, N (ramped)
Suppressed	No

Obrázek 125 Nastavení aplikované síly

5.3. Výpočet s ramenem, pro záchyt reakčního momentu, z jeklu

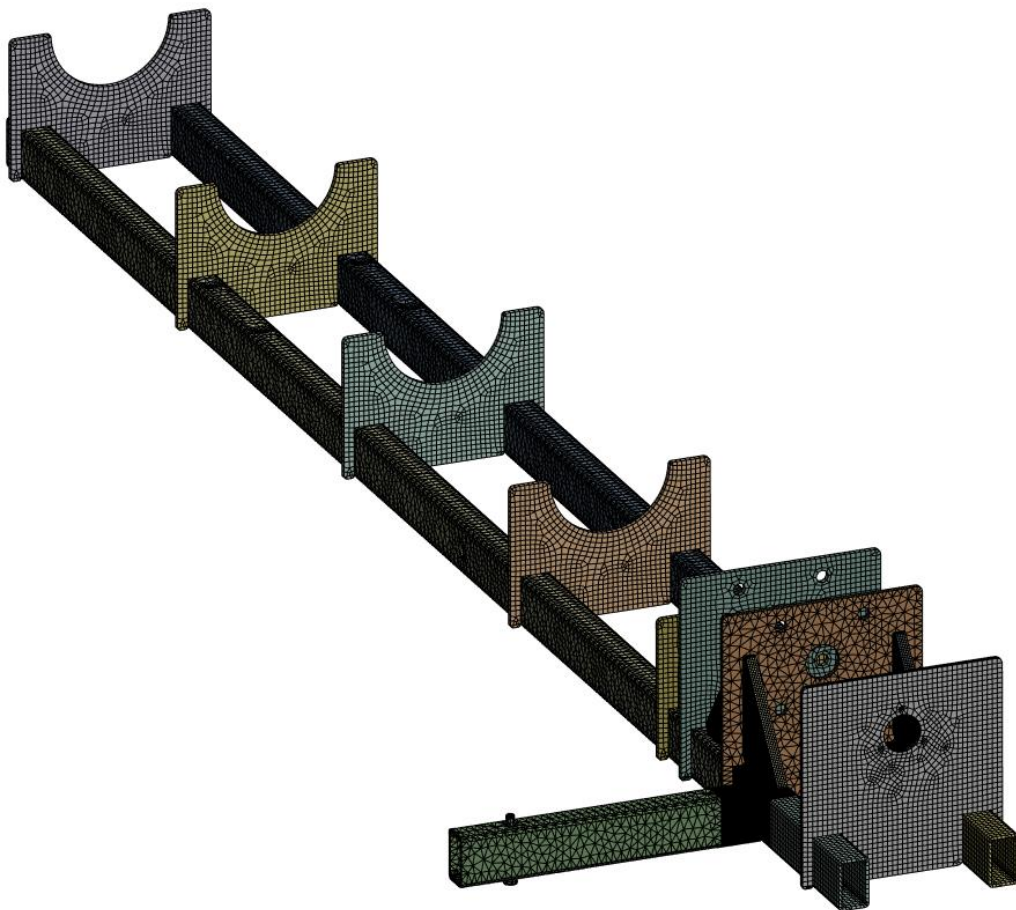
Původní konstrukční návrh měl spodní rameno vyrobené ze stejného jeklu jako zbylá konstrukce. Návrh byl ale změněn na základě výpočtu MKP.

5.3.1. Nastavení sítě

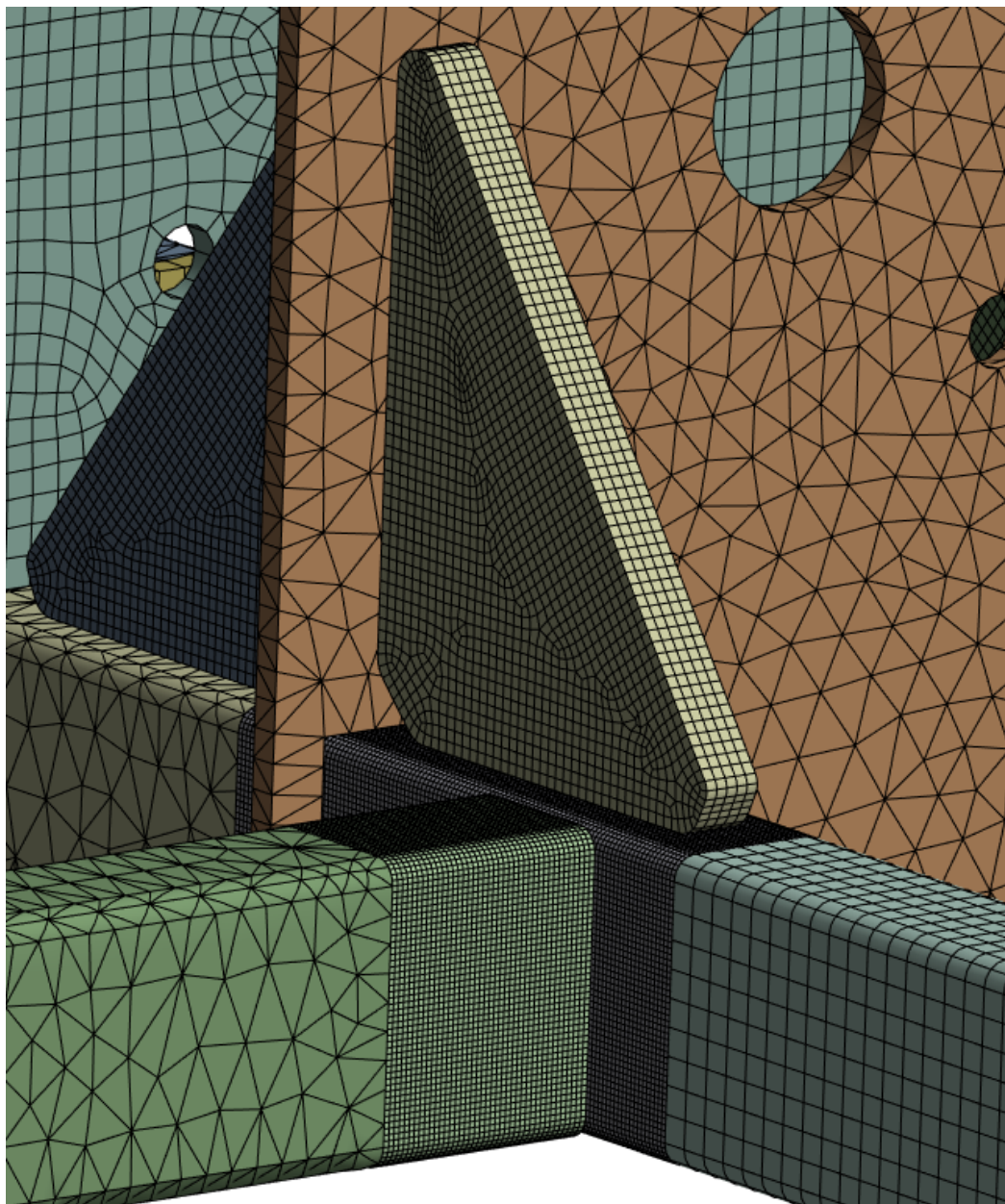
Hlavní velikost elementu sítě je nastavená na 5 mm. Sít' je zjemněná na místech, kde se očekává vznik vysokého napětí. Sít' musela být zjemněna jen v kritických místech, z důvodu náročnosti výpočtu.

Hlavní kritická místa jsou:

- Bod spojení ramene s nosnou kontrakcí - sít' zjemněna na 1 mm
- Trojúhelníky přivařené k žebru – sít' nastavena na 2 mm

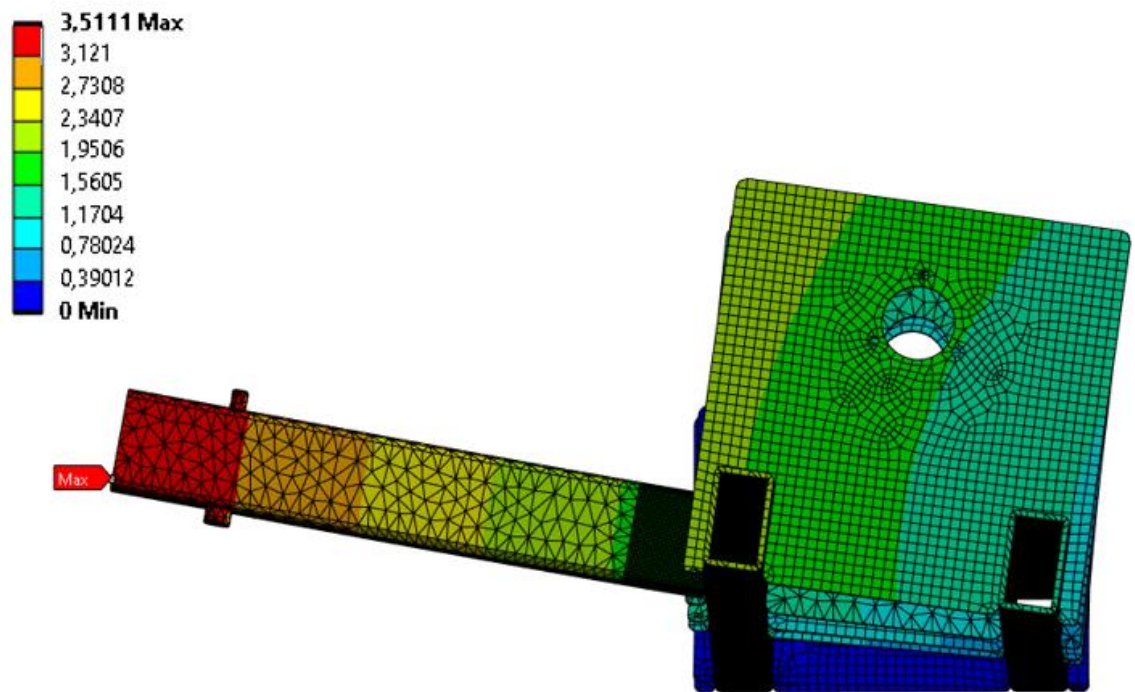


Obrázek 126 Vysíťovaný celý model

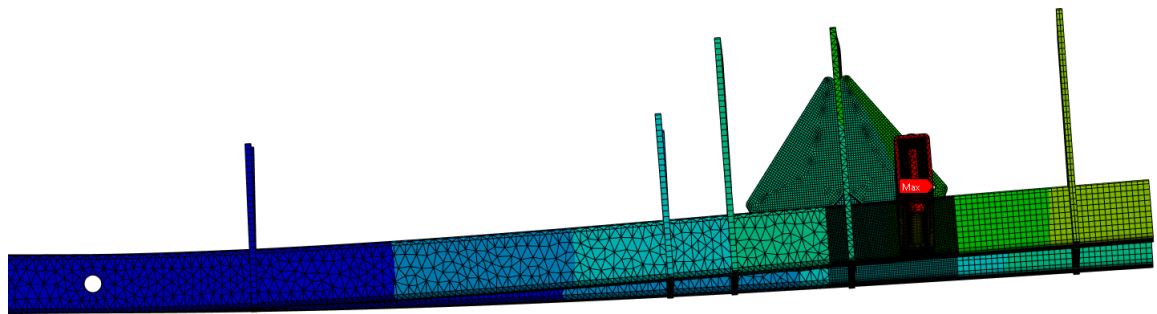


Obrázek 127 Detail zjemněné síť

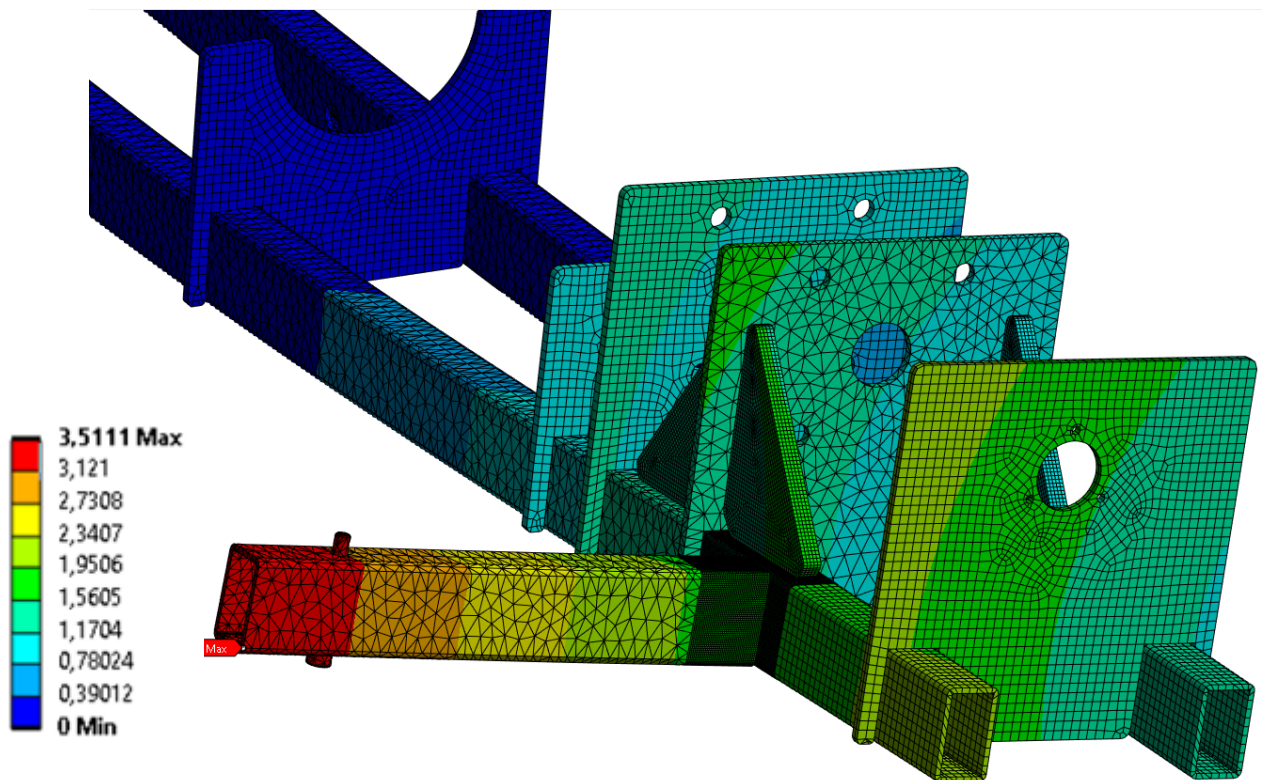
5.3.2. Výsledky



Obrázek 128 Čelní pohled deformace

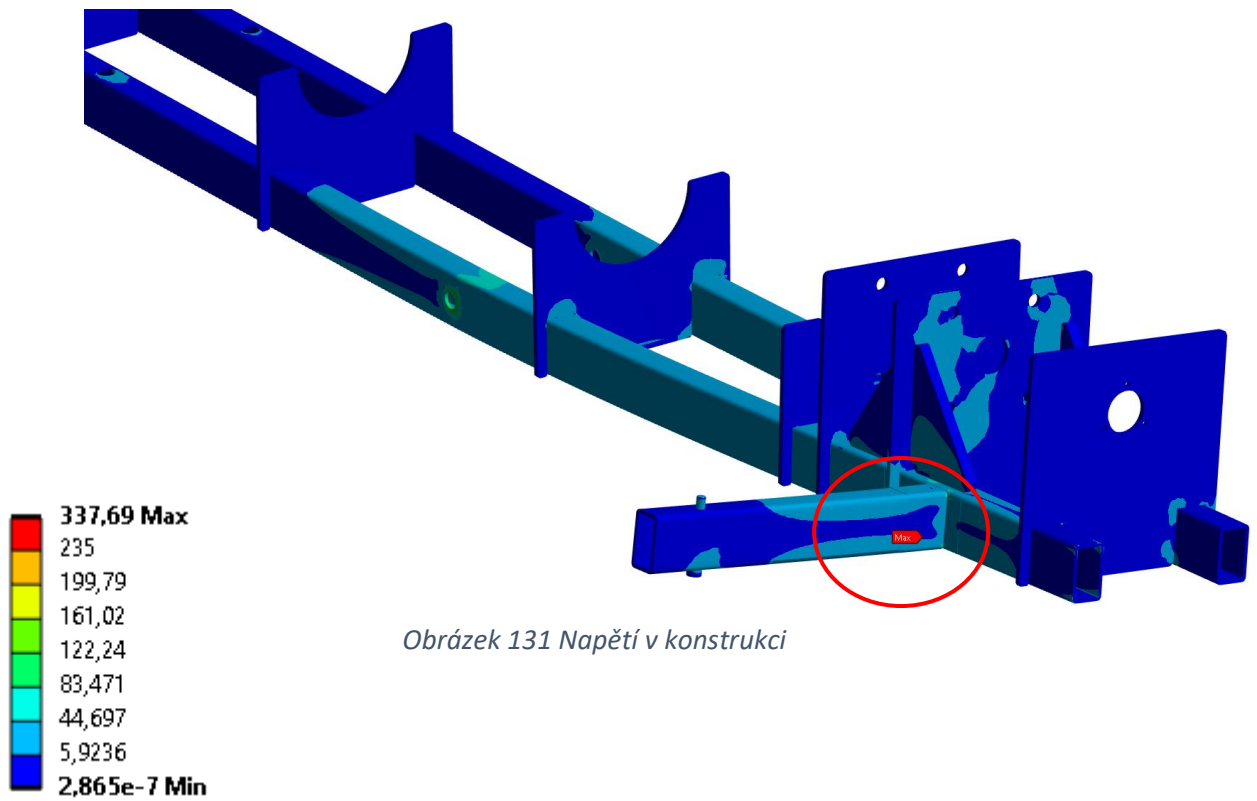


Obrázek 129 Boční pohled deformace

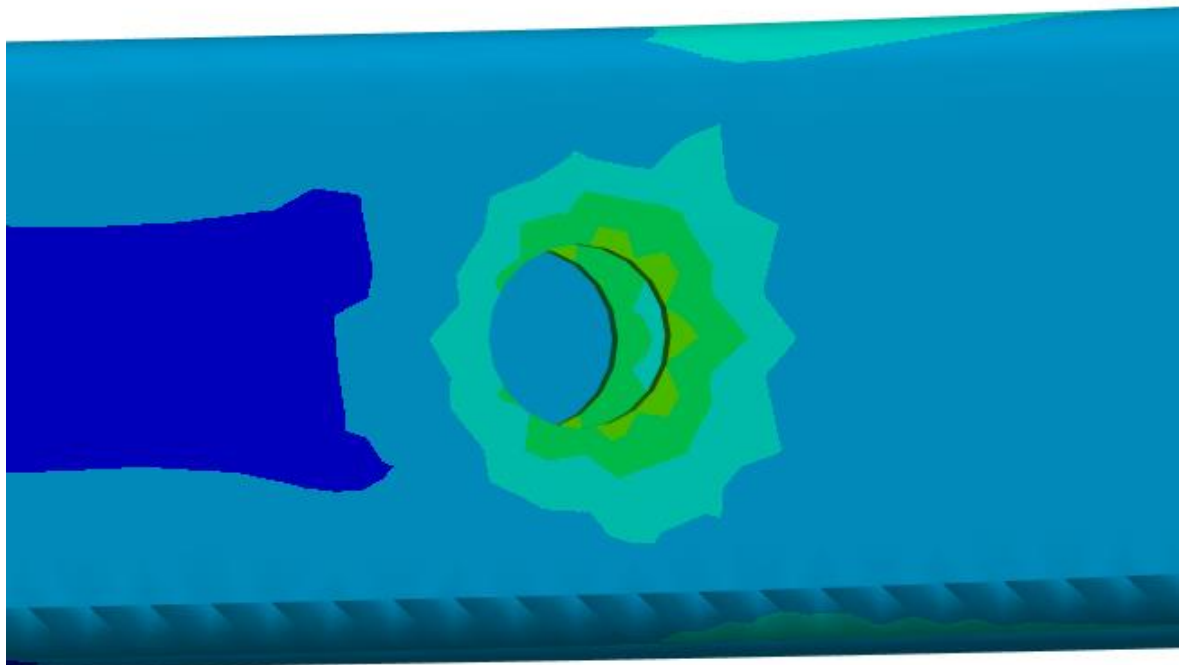


Obrázek 130 Deformace nosné konstrukce

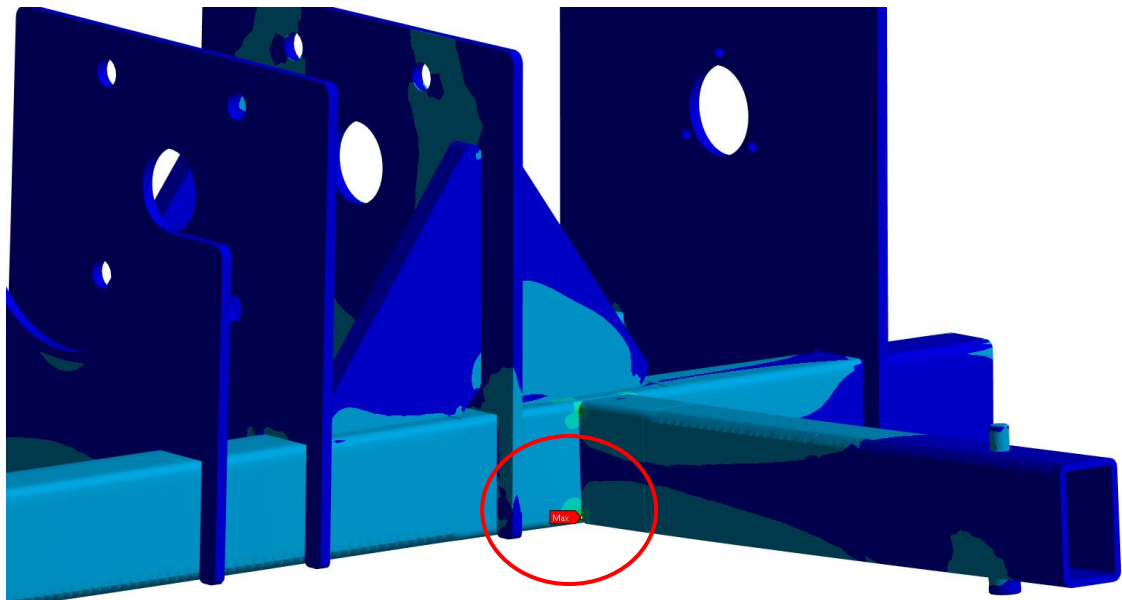
Maximální deformace je podle očekávání na konci ramene o hodnotě 3,5 mm. Reálná deformace bude menší, protože v MKP není zohledněné horní rameno záchytu reakčního momentu.



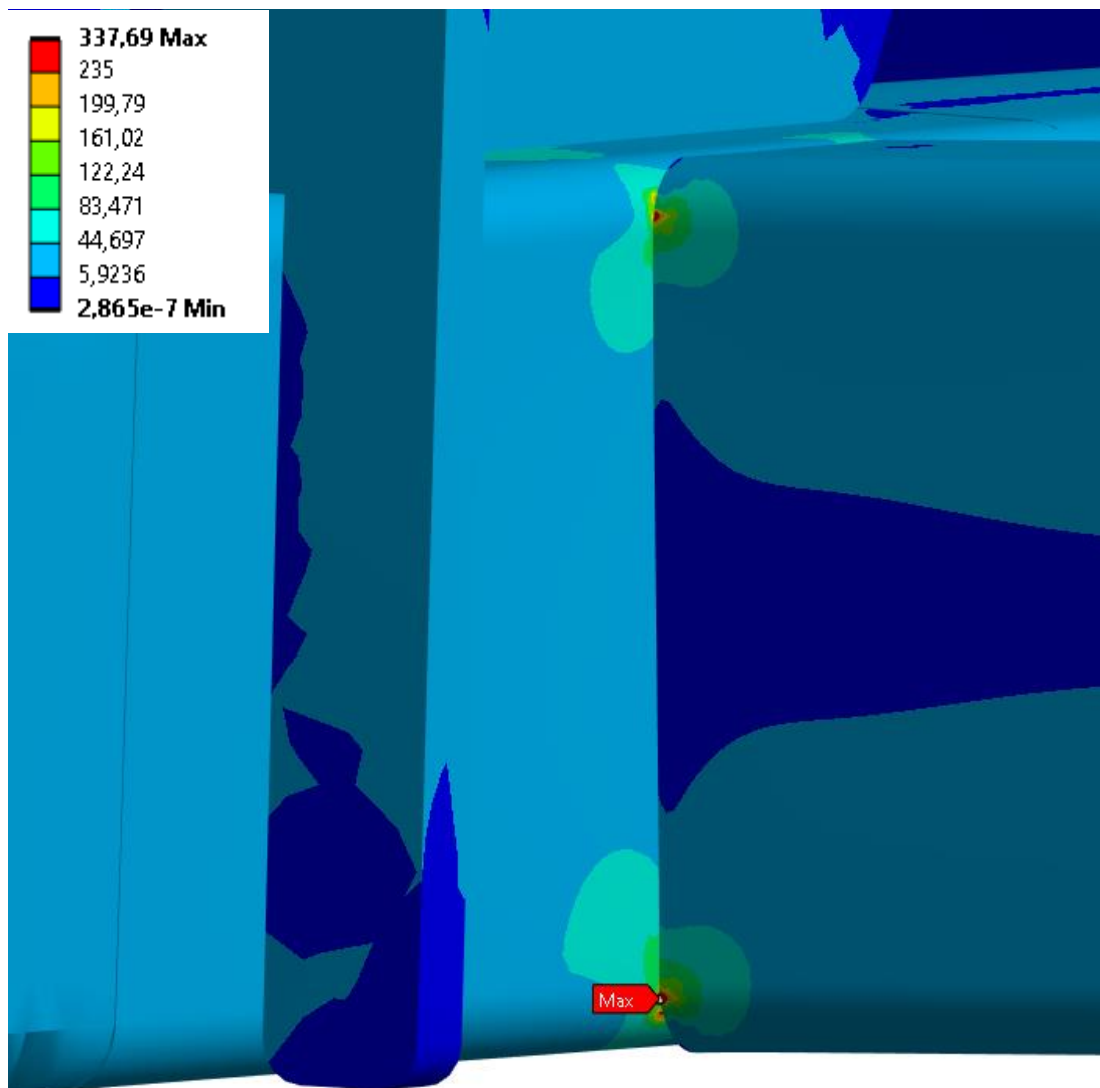
Obrázek 131 Napětí v konstrukci



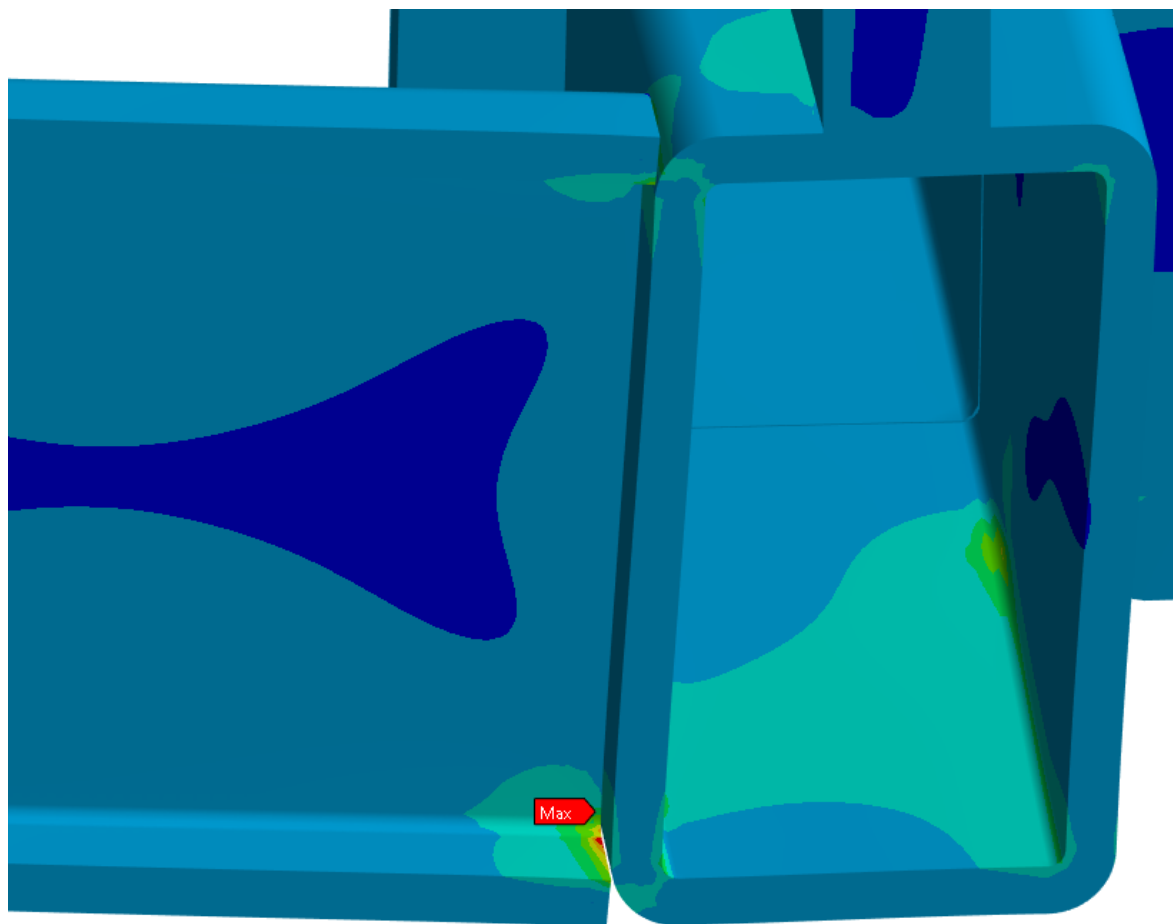
Obrázek 132 Detail napětí v místě rotačního čepu



Obrázek Napětí v rameni



Obrázek 133 Detail maxima napětí vzniklého v místě spojení ramene s nosnou konstrukcí

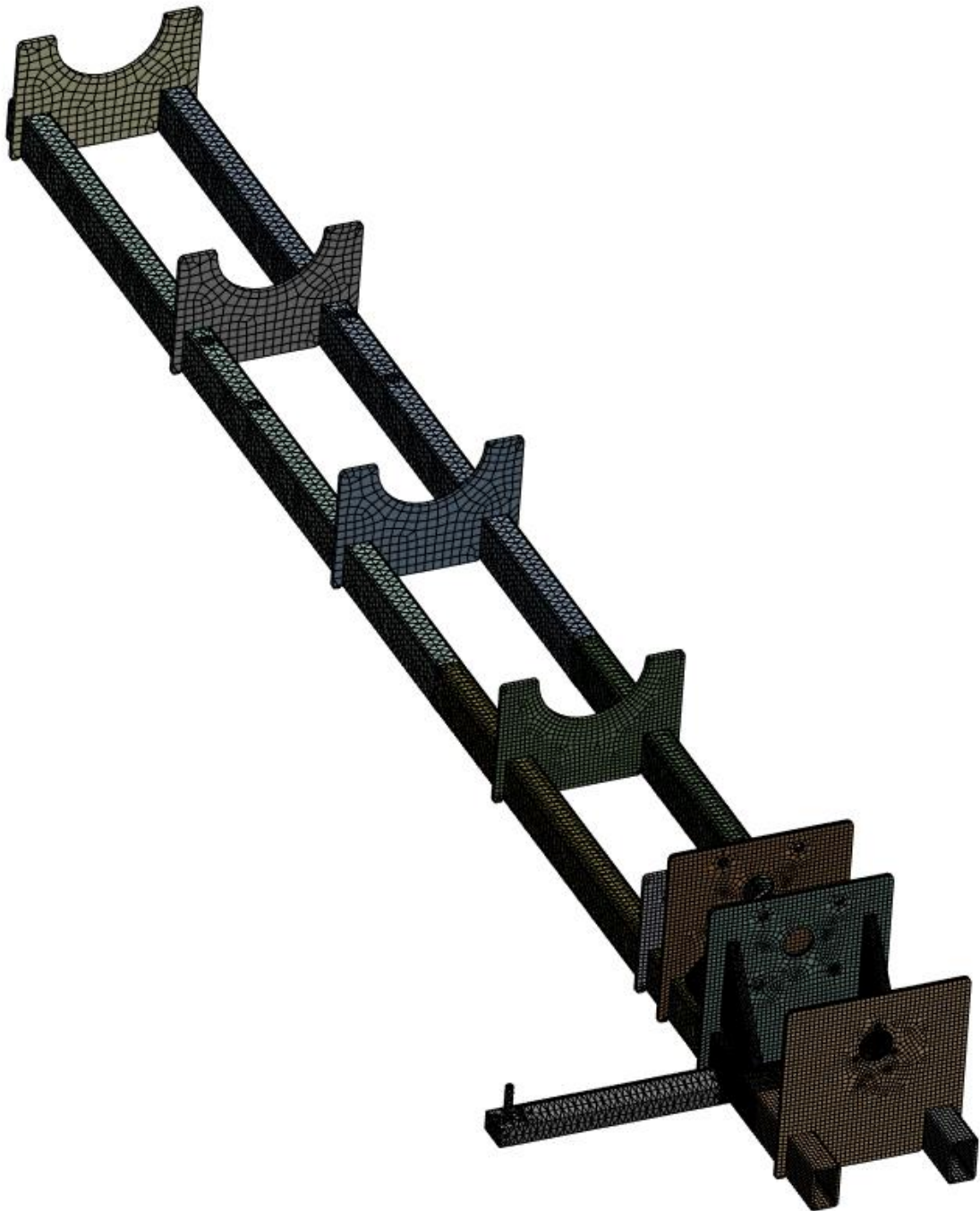


Obrázek 134 Řez ramenem

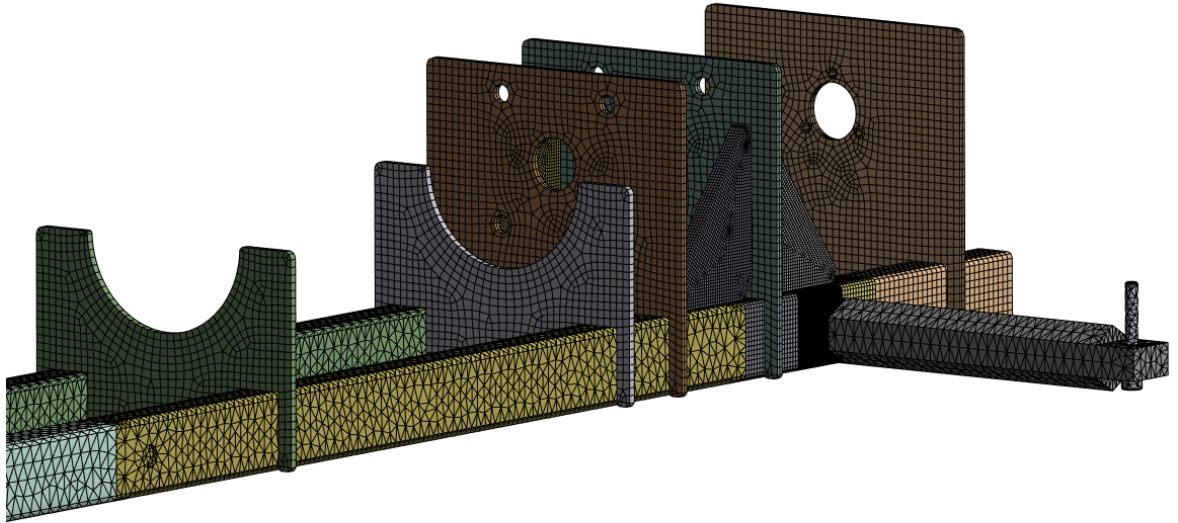
5.4. Výpočet s ramenem, pro záchyt reakčního momentu, z šestihrané tyče

druhý výpočet měl změněný model, kde bylo rameno z jeklu nahrazeno za současné řešení ze šesti hrané tyče.

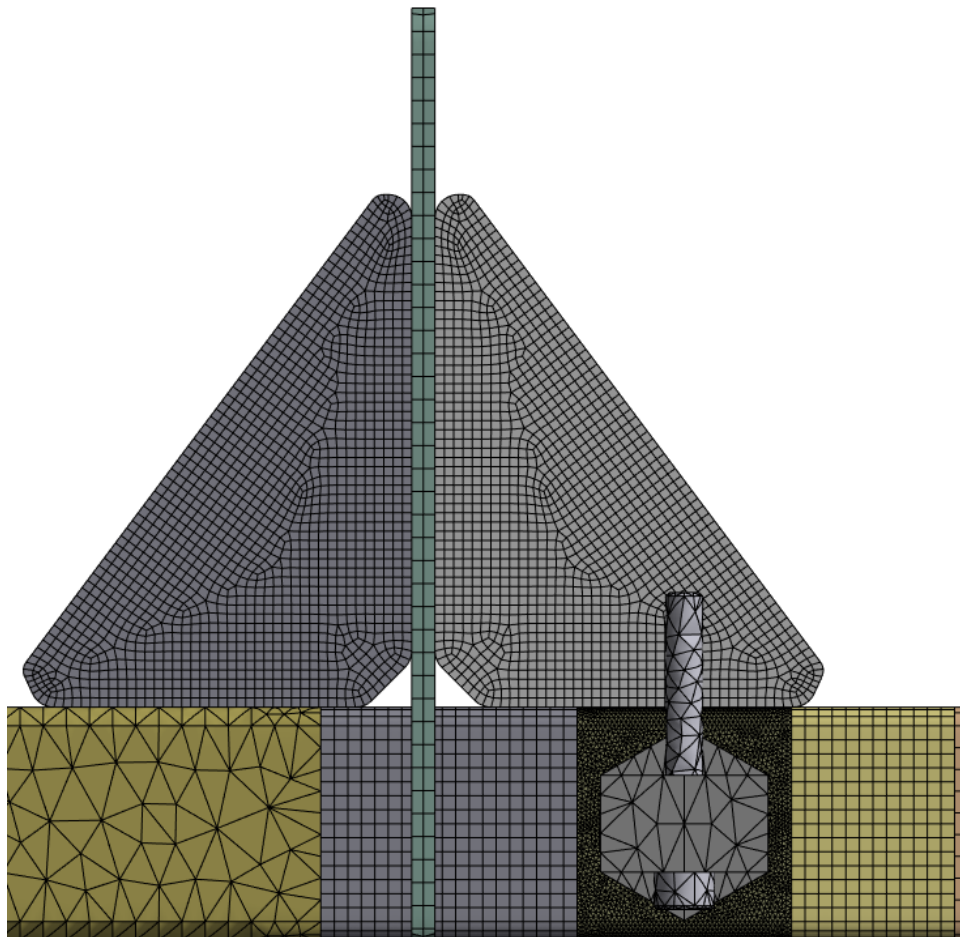
5.4.1. Nastavení sítě



Obrázek 135 Zobrazení celkové sítě druhého výpočtu

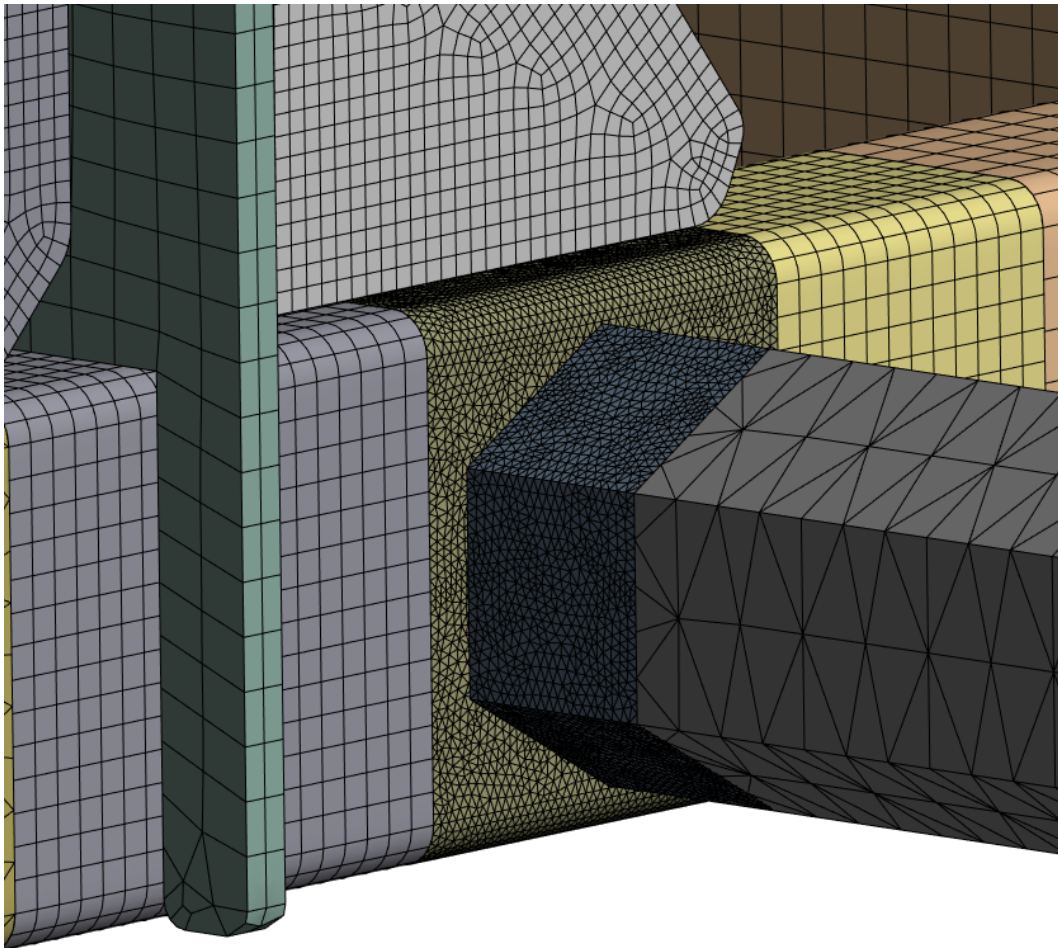


Obrázek 136 Síť v okolí ramene



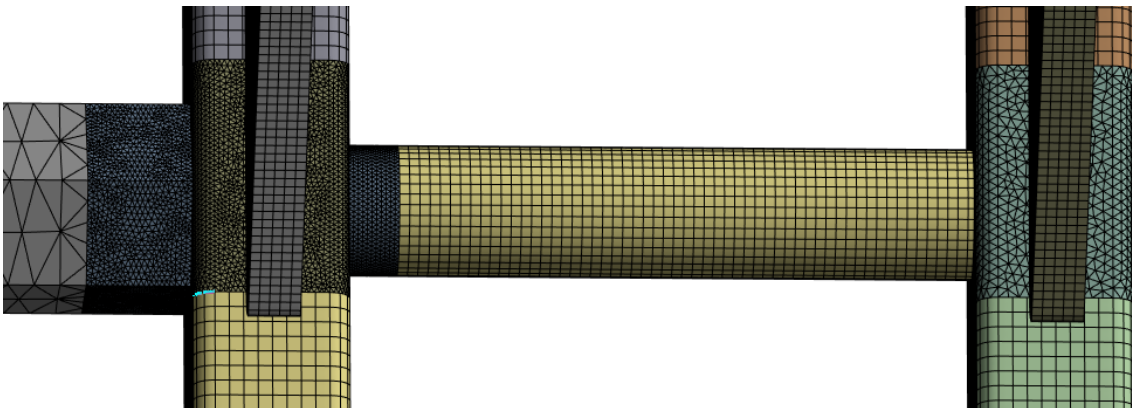
Obrázek 137 Boční pohled na síť u ramene

V místě spojení ramene s jeklem je velikost elementu nastavena na 1 mm



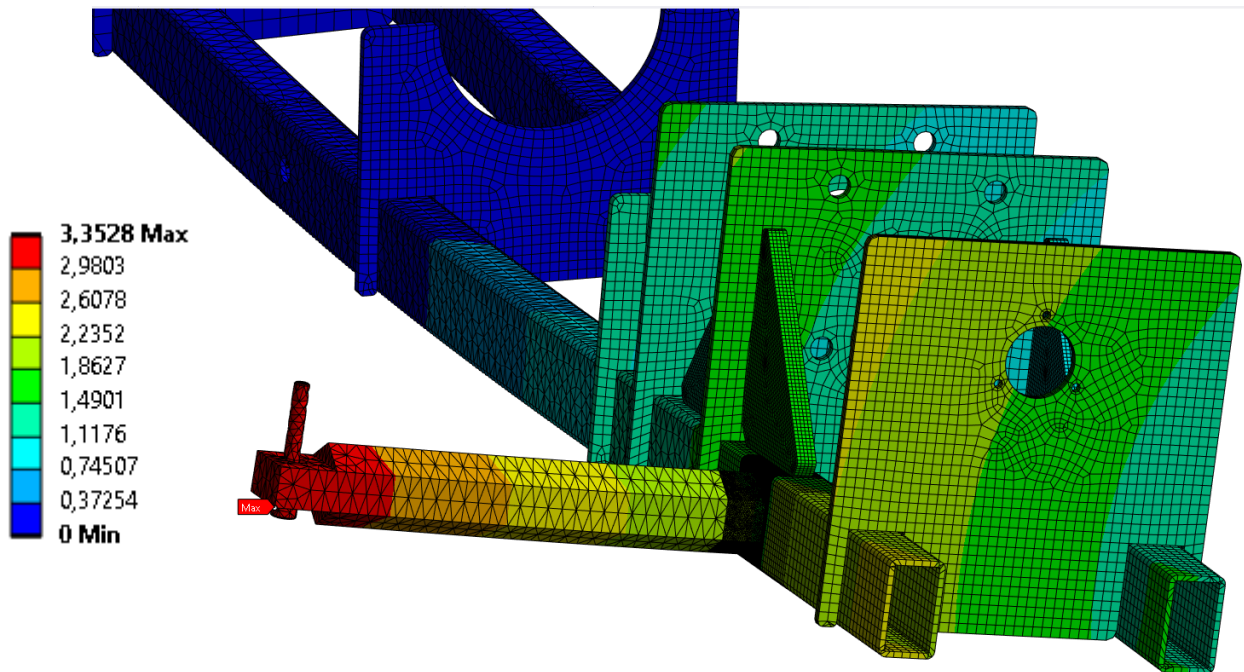
Obrázek 138 Detail kritického místa ramene

Zbylá část ramene vedoucí do vzdálenějšího jeklu má síť nastavenou na 2 mm. Důvodem je, že se nepředpokládá velké napětí a není nutné tam mít příliš jemnou síť. Druhým důvodem je náročnost výpočtu, kdy při příliš jemné síti nejde výpočet provést na dostupném počítači.



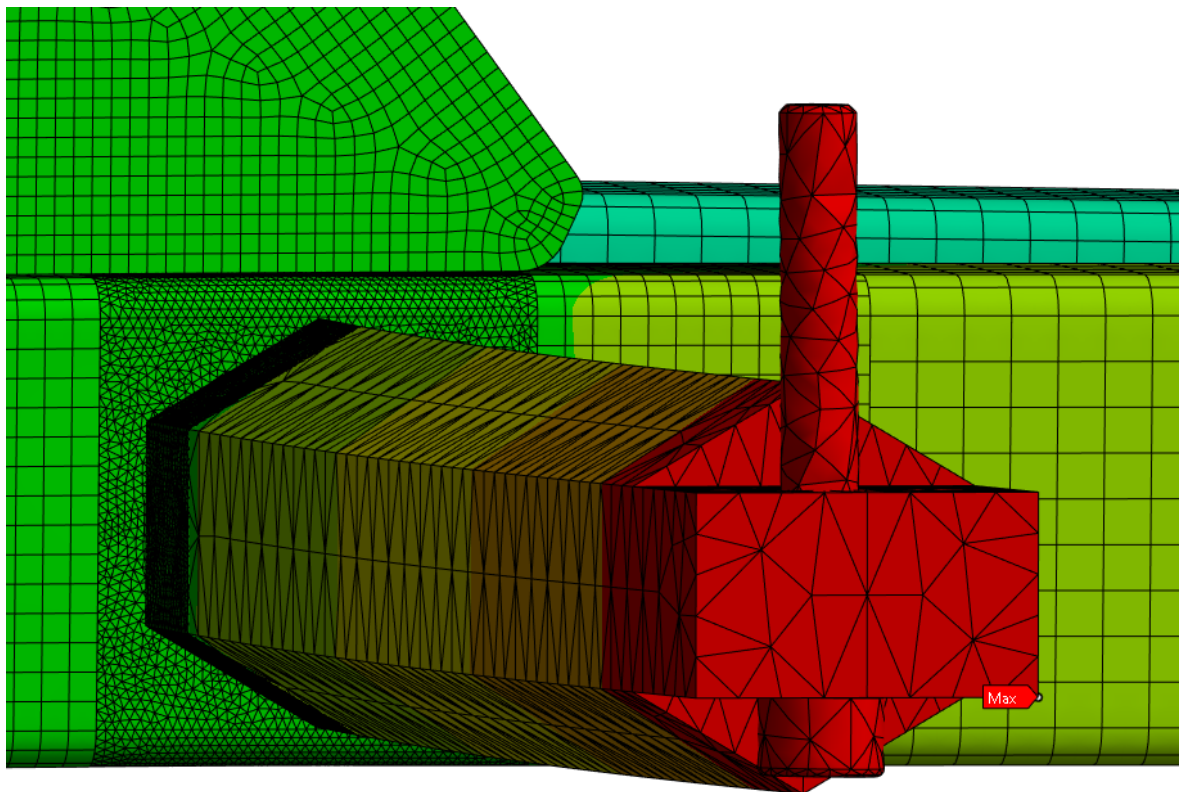
Obrázek 139 Pohled shora na síť spojení ramene

5.4.2. Výsledky



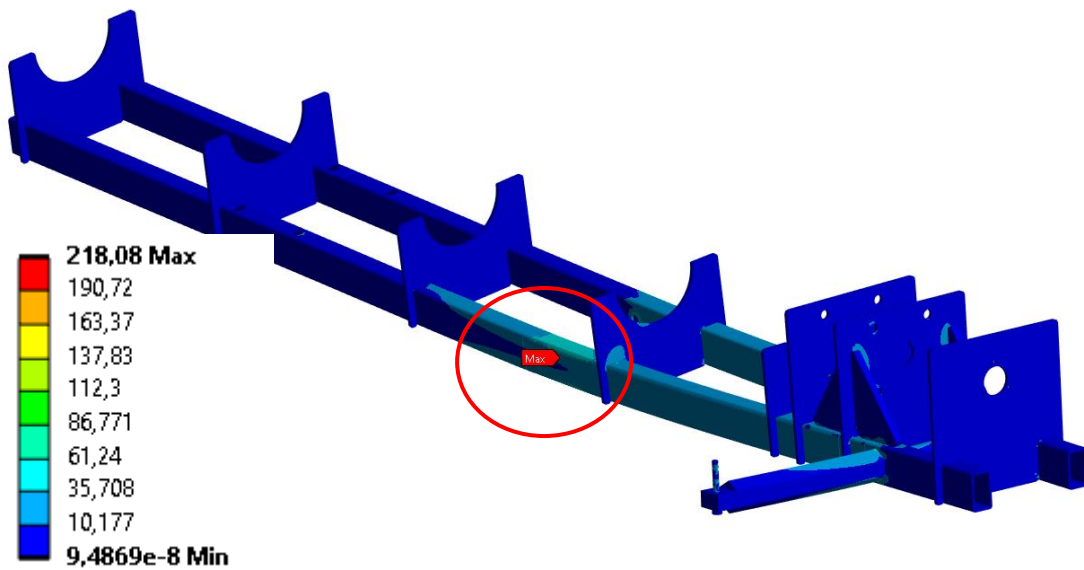
Obrázek 140 Deformace druhého měření

Maximální deformace o hodnotě 3,353 mm je opět dle očekávání na konci ramene. Hodnota se liší od prvního výpočtu pouze v desetinných místech.

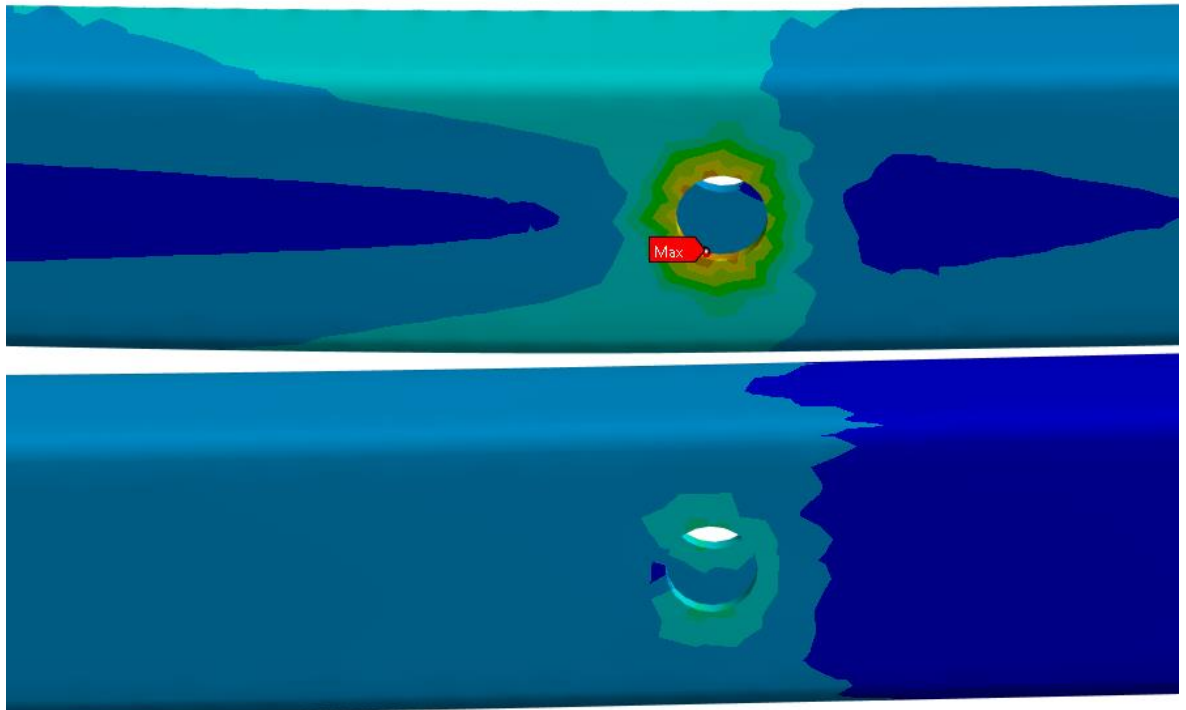


Obrázek 141 Detail deformovaného ramene

Maximální napětí se nově přesunulo do vnitřní díry pro rotační čep na pravém jeklu. Nové napětí má hodnotu 218 MPa

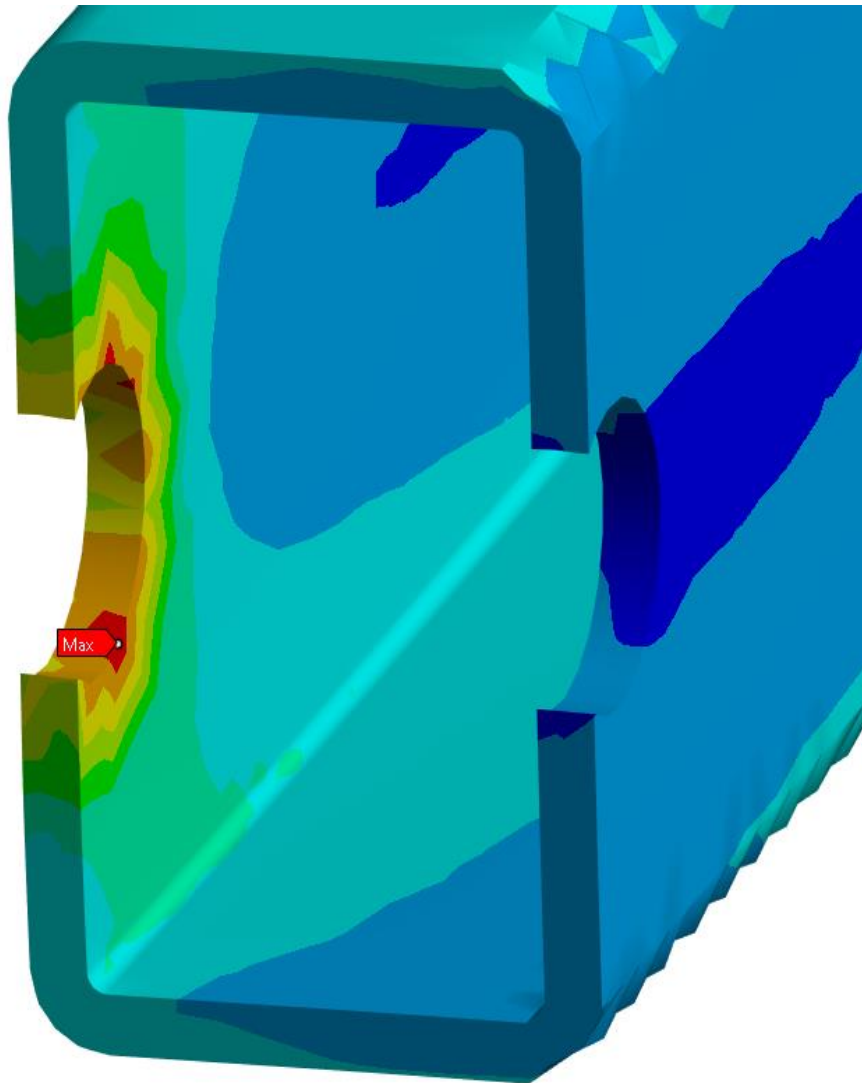


Obrázek 142 Vzniklé napětí v konstrukci



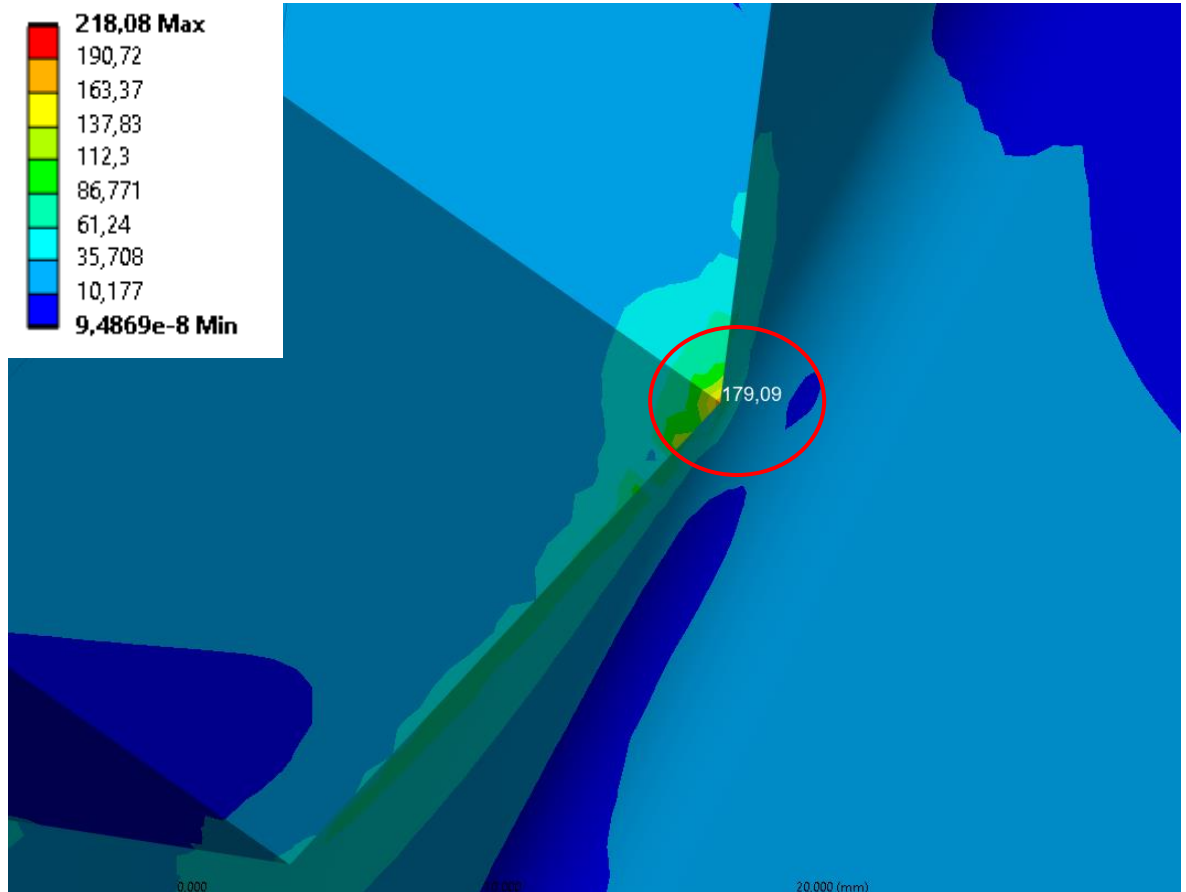
Obrázek 143 Maximum napětí v pravém jeklu u díry pro rotační čep

Hodnota maximálního napětí je bodově koncentrována na spodní straně díry. Při nastavování sítě nebyla zohledněna síť kolem díry pro čep, protože v prvním výpočtu se kolem ní netvořilo žádné napětí a pro zachování jednoduchosti výpočtu byla ponechána hrubá síť. Bodová koncentrace napětí může být právě následkem nevhodného nastavení sítě.



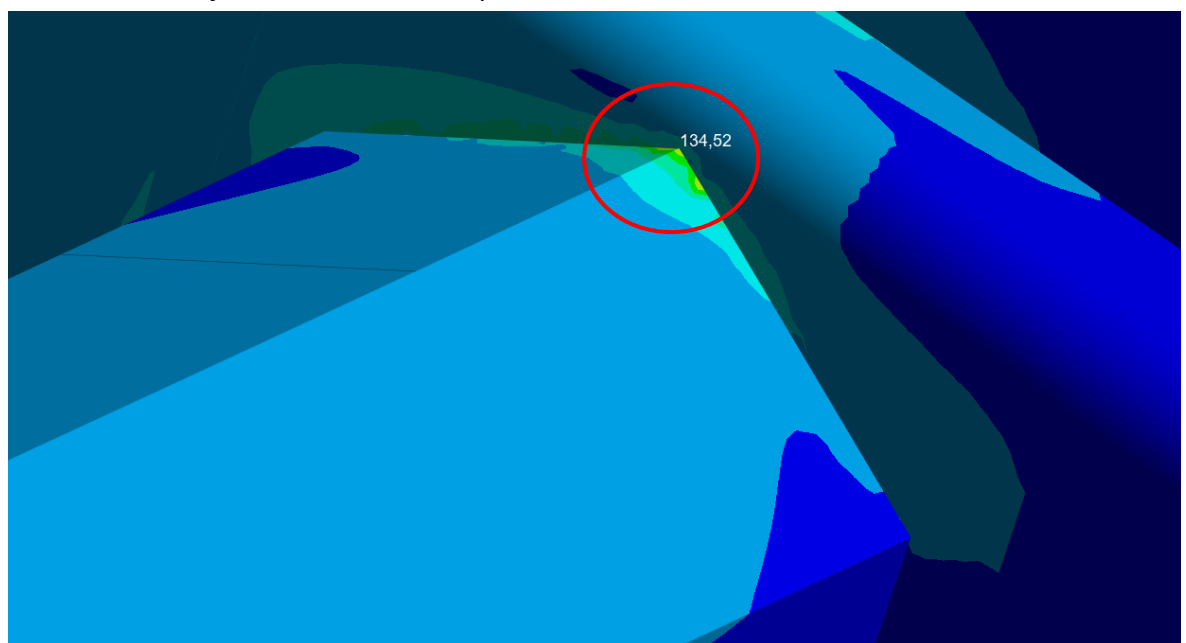
Obrázek 144 Řez dírou pro čep

Na spodní a horní straně ramene u spoje s nosnou konstrukcí se koncentruje napětí.
Na spodní straně se koncentruje napětí o velikosti 179 MPa



Obrázek 145 Koncentrace napětí na spodní straně ramene

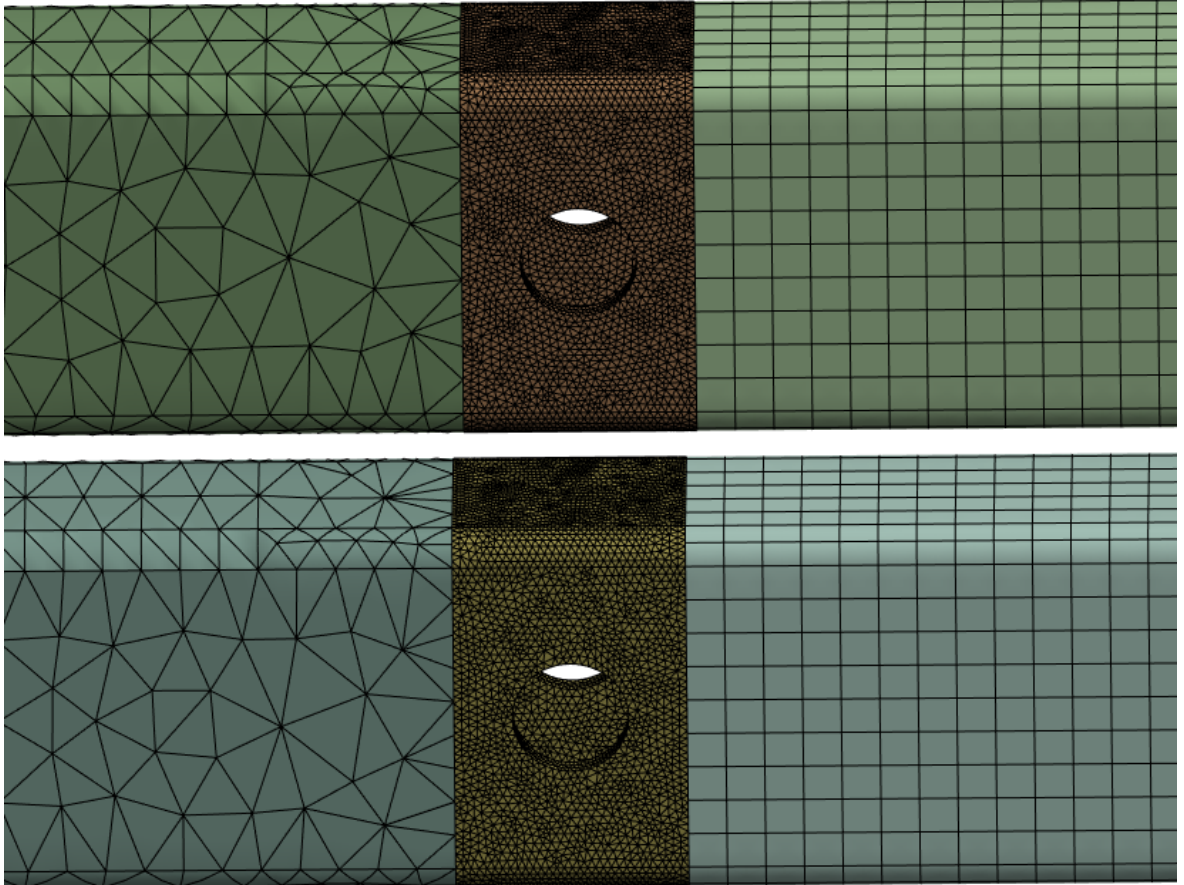
Na horní hraně je možné naměřit napětí s hodnotou 134 MPa



Obrázek 146 Koncentrace napětí na horní straně ramene

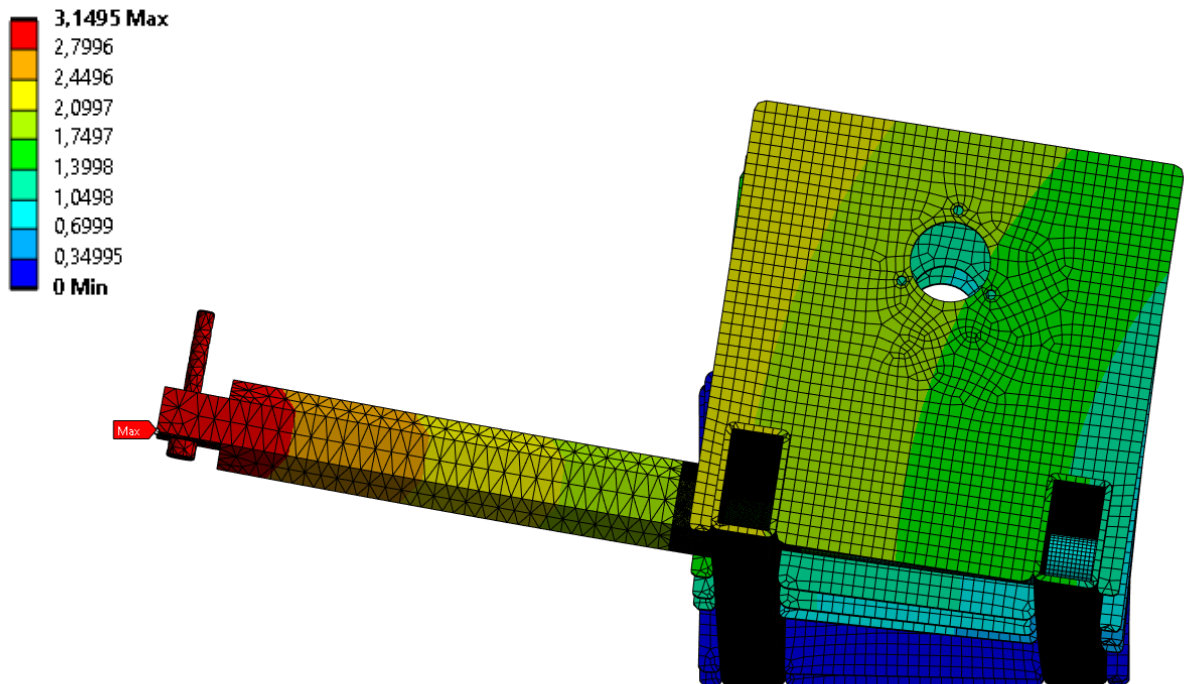
5.5. Výpočet s ramenem, pro záchyt reakčního momentu, z šestihranné tyče se zjemněnou sítí.

Třetí a poslední výpočet byl provedený se stejnou sítí jako předchozí výpočet. Jediným rozdílem bylo změnění sítě v okolí díry pro rotační čep. Sítí je v tomto místě nastavená na velikost elementu 1 mm.



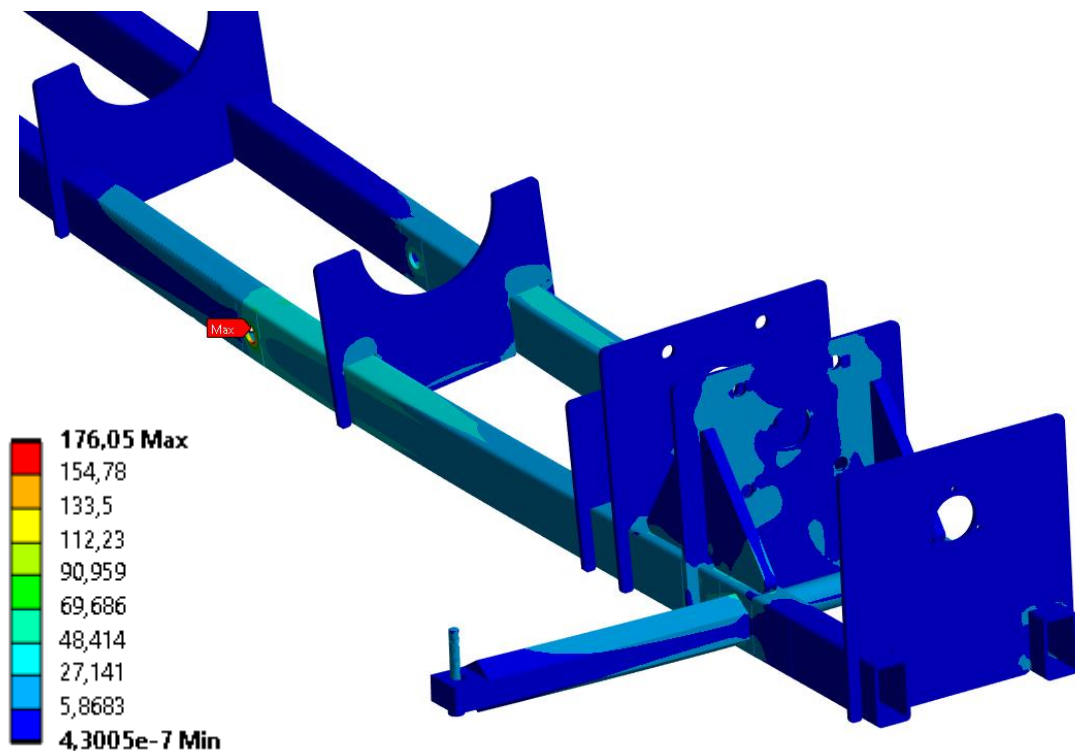
Obrázek 147 Zobrazení sítě v místě díry pro rotační čep

Maximální deformace je 3,15 mm a vznikla na stejné pozici jako v předchozím výpočtu.

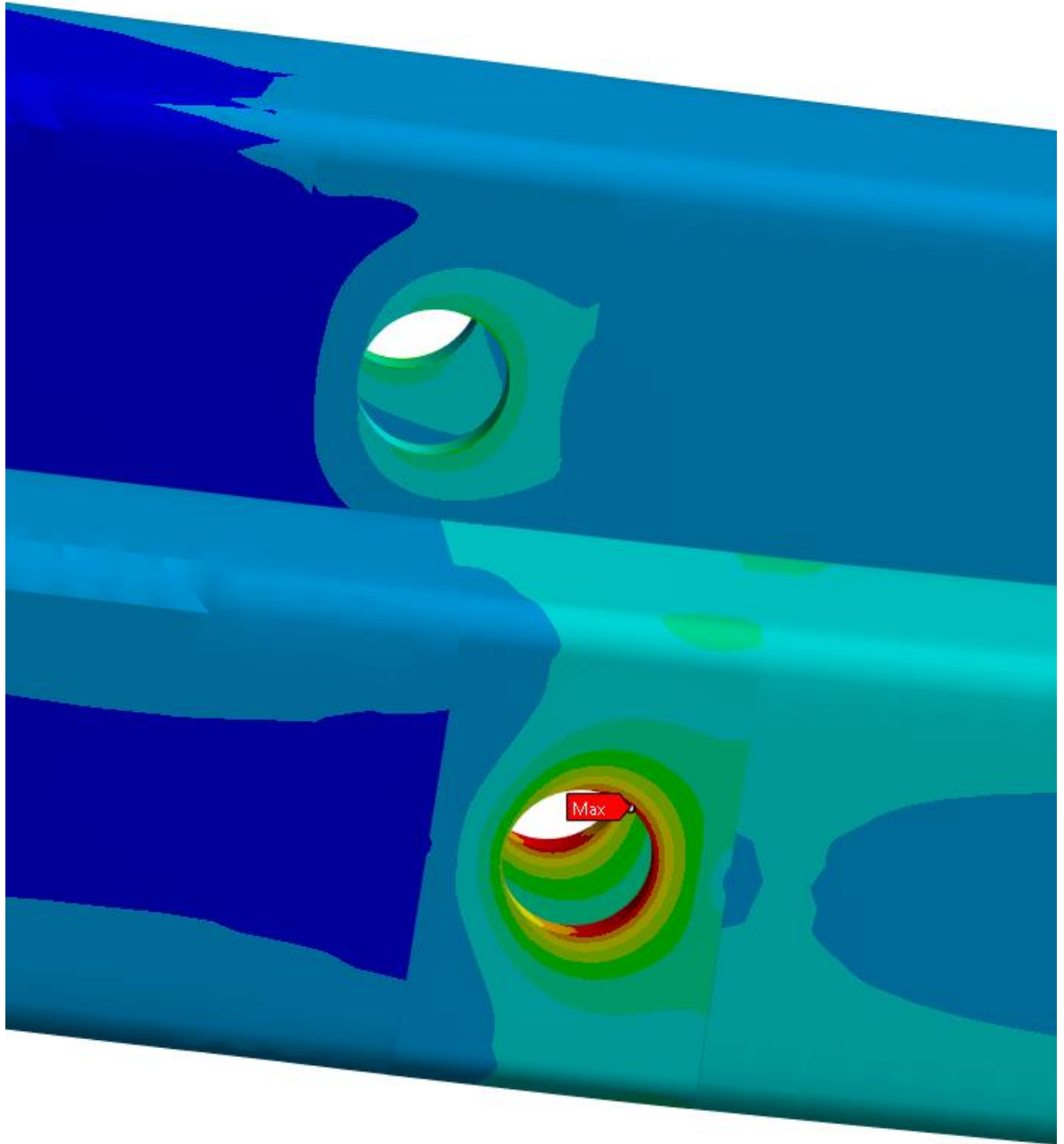


Obrázek 148 Deformace dopravníku v třetím výpočtu

Nejvyšší hodnota napětí zůstala v díře pro rotační čep a změnila se pouze její hodnota na 176 MPa.

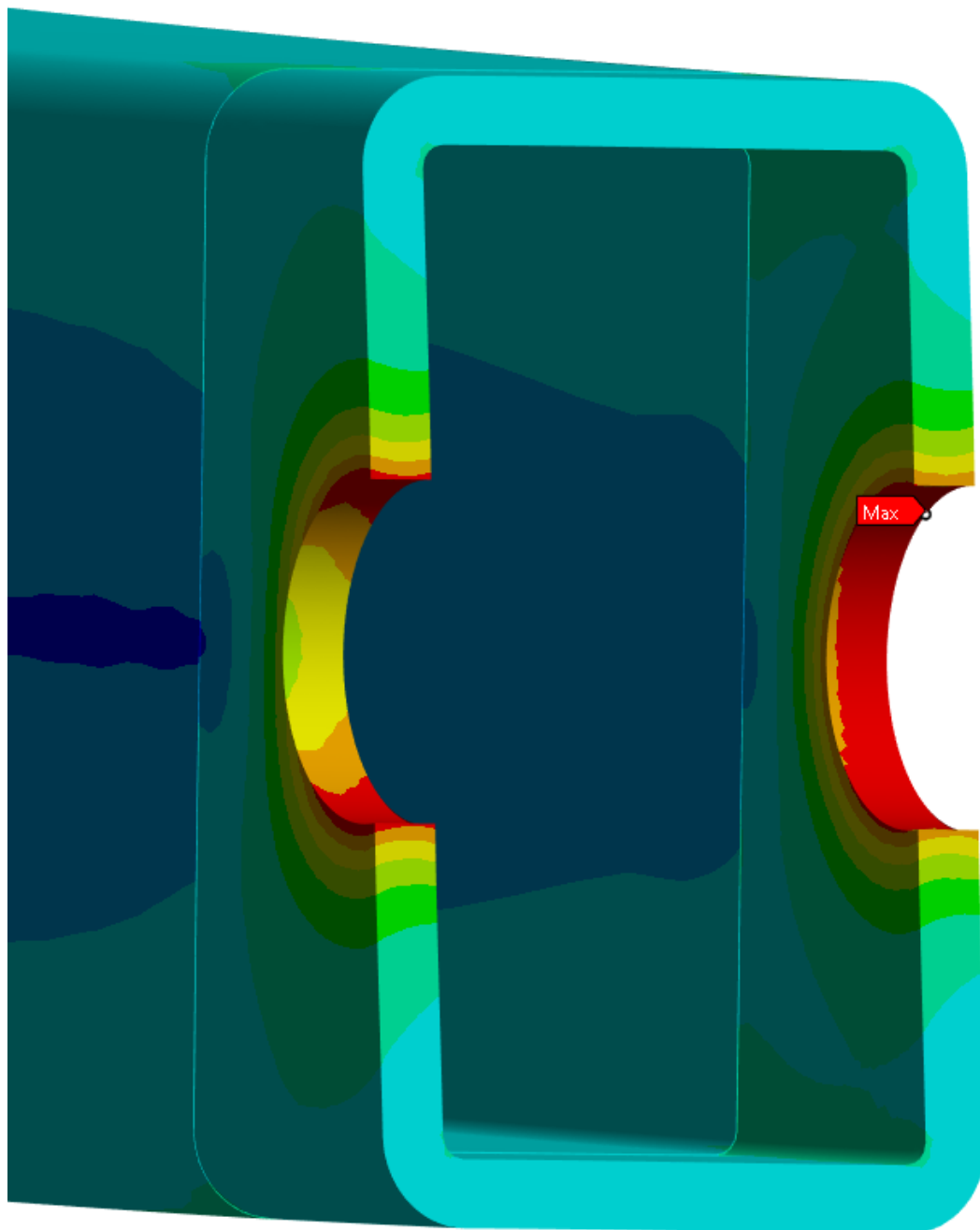


Obrázek 149 Vzniklé napětí v konstrukci



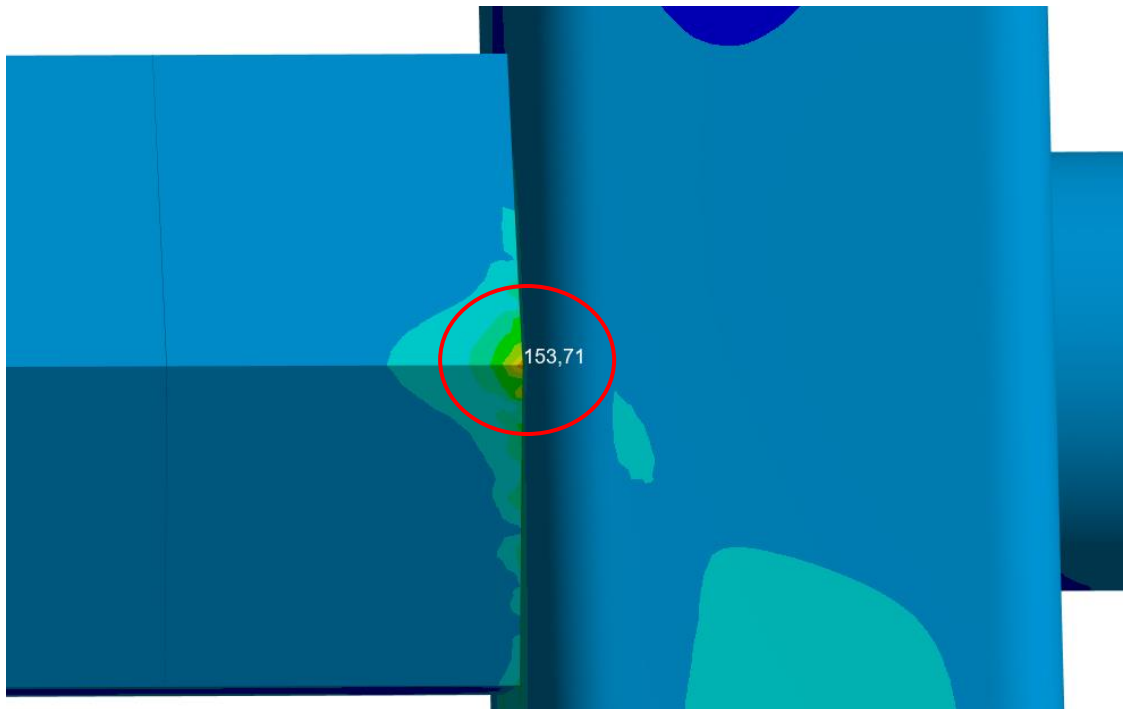
Obrázek 150 Detail maximálního napětí

Z řezu je vidět, že hodnota napětí je lépe rozprostřena a není bodově koncentrována. Síť byla zvolena s velikostí elementu 1 mm, aby byl dostatečný počet elementů kolem hrany díry a v objemu jeklu.



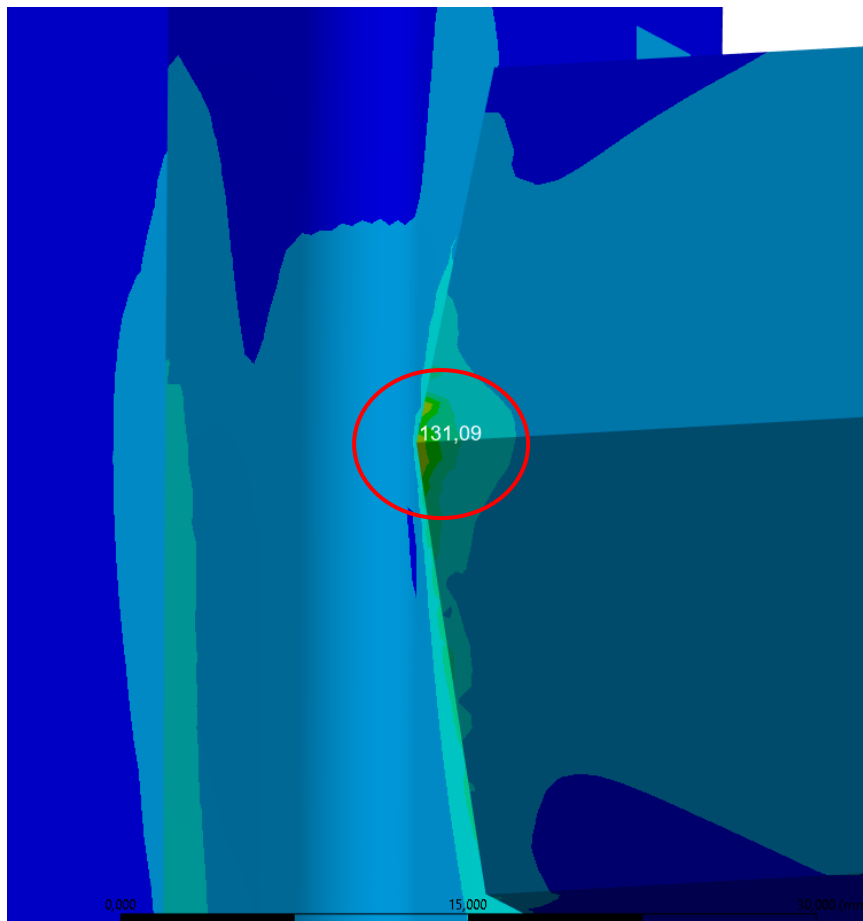
Obrázek Řez dírou pro čep

Na spodní i horní hraně ramene se opět koncentruje napětí. Na spodní o hodnotě 153,7 MPa.



Obrázek 151 Pohled na spodní hranu ramene

A na horní hraně vzniká napětí o hodnotě 131 MPa.



Obrázek 152 pohled na horní hranu ramene

Dílčí závěr

Maximální napětí v prvním výpočtu vyšlo 337,69 MPa, tato hodnota je vysoko nad hodnotou meze kluzu. Maximální hodnota je ve spodní části na boku ramene blíže k žeburu pro uchycení ložiskového tělesa. Tento výsledek byl důvodem ke konstrukční změně, jelikož nepřípustná hodnota napětí vycházela opakovaně i při ladění výpočtu.

Druhé měření vyšlo přijatelně. Maximální hodnota napětí byla pod mezí kluzu. V místě maxima byla ovšem hrubá síť, protože se neočekávaně přesunula do díry pro rotační čep, z toho důvodu nemusí výsledek odpovídat skutečnosti a je to podnět pro provedení dalšího výpočtu s upraveným nastavením sítě.

Ve třetím výpočtu MKP byla zjemněna síť v okolí díry pro čep a vyšlo nejmenší maximální napětí s hodnotou 176 MPa. Hodnota maximálního napětí je dostatečně nižší než mez kluzu, aby konstrukce byla funkční a bezpečná i v případě zvýšení krouticího momentu pro potřeby experimentu. MKP výpočty byly orientační a pro jednoduchost výpočtů byly zanedbány svary a byl zjednodušen model. Jak bylo konstatováno, reálné napětí a deformace vyjde menší, jelikož se nepočítá s horním ramenem pro zachycení reakčního momentu, které se bude taky deformovat.

Závěr

Předložená diplomová práce ve své první části sumarizovala autorovy dosavadní teoretické znalosti, které naplno využil pro vytvoření konstrukčního návrhu experimentálního spirálového dopravníku dle zadání, který je představen ve druhé části práce.

Autor je přesvědčen, že se mu s výjimkou úkolu č. 6 („Zajistit realizaci dodávek a výrobu komponent a následné montáže dopravníku“, kap. 2) podařilo kompletně splnit zadání. Pouze částečné splnění úkolu č. 6 v době obhajoby práce není závadou, protože již v zadání bylo s možností nesplnění tohoto úkolu uvažováno.

Ke stavbě dopravníku dle představeného návrhu dojde, protože bude zásadním experimentálním stanovištěm pro projekt navazující disertační práce v rámci posílení systematického dlouhodobého výzkumu spirálových dopravníků na ústavu.

Seznam obrázků

Obrázek 1 šnekový dopravník; 1 - hnací převodový elektromotor, 2 - spojka, 3 – ložisko, 4 – šnek, 5 – vodící ložisko, 6 – žlab, 7 – víko žlabu [2].....	1
Obrázek 2 šnekové pole [16].....	2
Obrázek 3 osová provedení listů šnekovnice [2].....	3
Obrázek 4 možnosti provedení žlabu dopravníku.....	3
Obrázek 5 excentrické uložení šnekovnice ve žlabu [2].....	4
Obrázek 6 Spojení motoru s převodovkou.....	4
Obrázek 7 šnekový dopravník s pohonnou jednotkou u výsypky.....	5
Obrázek 8 šnekový dopravník s pohonnou jednotkou pod výsypkou.....	5
Obrázek 9 Šnekový dopravník s elektromotorem v přímém směru.....	6
Obrázek 10 Výchozí stav konstrukce.....	8
Obrázek 11 tabulka vlastností a hodnot materiálů [2].....	10
Obrázek 12 Silové účinky působící mezi částicí a šnekovnicí [1].....	11
Obrázek 13 Rychlostní rozklad částice při dopravě svislým šnekem [1].....	11
Obrázek 14 schéma svislé šneku se silovými účinky [3].....	13
Obrázek 15 Schéma elektromagnetického otáčkoměru.....	18
Obrázek 16 Schéma tachodynamu [8].....	19
Obrázek 17 Tachoalternátor s permanentním magnetem na statoru [36].....	20
Obrázek 18 Tachoalternátor s klecovým rotorem [36].....	21
Obrázek 19 Snímač rychlosti s fotoelektrickým čidlem [8].....	21
Obrázek 20 Snímač rychlosti s indukčním čidlem [8].....	22
Obrázek 21 Princip Hallova jevu a) proudová vlákna bez magnetického pole b) vychýlení proudových vláken v magnetickém poli [15].....	23
Obrázek 22 Značka na hřídeli při osvětlení záblesky o frekvenci f [8].....	24
Obrázek 23 Snímač momentu na principu Newtonova zákona akce a reakce [6].....	24
Obrázek 24 Tenzometrický snímač momentu [6].....	26
Obrázek 25 Kapacitní snímač momentu [6].....	26
Obrázek 26 Teorie fungování tenzometru [5].....	27
Obrázek 27 Parametry slitin, které se používají pro kovové tenzometry [4].....	29
Obrázek 28 Základní provedení foliového tenzometru [4].....	30
Obrázek 29 Porovnání vlastností kovových a polovodičových tenzometrů [4].....	31
Obrázek 30 Tenzometrické řetězce [6].....	33
Obrázek 31 Způsoby umístění vynutí [6].....	34
Obrázek 32 Růžice s třemi vynutími [6].....	34
Obrázek 33 Tenzometrické růžice s vyvrtanými sloupci materiálu po obvodu [6].....	34
Obrázek 34 Wheatstonův můstek [5].....	35
Obrázek 35 Typická zapojení tenzometrů [37].....	35
Obrázek 36 Wheatstonův můstek s napájením konstantním napětím [6].....	36
Obrázek 37 Wheatstonův můstek s napájením konstantním proudem [6].....	38
Obrázek 38 čtvrtmostové zapojení ve Wheatstonově mostě [6].....	39
Obrázek 39 čtvrtmostové zapojení tenzometrů ve Wheatstonově mostě – třívodičové zapojení [6].....	39
Obrázek 40 Půlmostové zapojení ve Wheatstonově mostě [6].....	40
Obrázek 41 Plnomostové zapojení ve Wheatstonově mostě.....	41
Obrázek 42 Příklad údajů zdánlivé deformace téhož tenzometru nalepeného na hliníku (čerchovaná čára), oceli (přerušovaná čára) a křemíku (plná čára) [6].....	44
Obrázek 43 Míra ovlivnitelnosti součinitele elektrického odporu materiálu mřížky [6].....	44
Obrázek 44 Míra samokompensace tenzometru různých materiálů [6].....	45
Obrázek 45 Hystereze tenzometru [6].....	45
Obrázek 46 Pokles měřené veličiny v čase [6].....	46
Obrázek 47 Poměr vlnové délky a aktivní délky tenzometru [6].....	47
Obrázek 48 Závislost posuvu nulového bodu ve vztahu k amplitudě přetvoření u střídavého cyklu na počtu cyklů [6].....	48



Obrázek 49 Celkový model	55
Obrázek 50 Celkový model s hlavními konstrukčními icelky	56
Obrázek 51 konstrukce rámu	57
Obrázek 52 pohled na usazení ložiska	58
Obrázek 53 řez spojením ložiskových domků	58
Obrázek 54 detail místa pro aretaci náklonu	59
Obrázek 55 Nosná konstrukce šnekového dopravníku	60
Obrázek 56 Pohled na nosnou konstrukci s vyznačenými vzdálenostmi žeber	61
Obrázek 57 Vyznačení dalších důležitých konstrukčních prvků	61
Obrázek 58 Geometrie nosného žebra	62
Obrázek 59 Pohled na nosné žebro s gumovou výstelkou a okem pro přidržení dopravníku	62
Obrázek 60 Oko pro upínací popruhy	63
Obrázek 61 Žebro pro uchycení ložiskových domků	64
Obrázek 62 Umístění UCF na konstrukci	65
Obrázek 63 Žebro pro uchycení snímače otáček	66
Obrázek 64 Umístění ložiskových domků	67
Obrázek 65 Boční pohled na ložiskové těleso	67
Obrázek 66 Pohled v řezu na spojení ložiskových domků s jekly	68
Obrázek 67 Rotační čep	69
Obrázek 68 řez osou čepu	69
Obrázek 69 Spodní rameno pro záchyt reakčního momentu	70
Obrázek 70 Umístění ramene v konstrukci	70
Obrázek 71 Pozice děr pro rameno	71
Obrázek 72 Dopravník uložený v nosném rámu	72
Obrázek 73 Ilustrační řešení výsyvky	73
Obrázek 74 Spirála dopravníku	74
Obrázek 75 Patka spirály	75
Obrázek 76 Spojení patky se spirálou	75
Obrázek 77 Řez místa spojení patky s hřídelí	76
Obrázek 78 Spojená hřídel s patkou	76
Obrázek 79 Hřídel spirálového dopravníku	77
Obrázek 80 Trubice spirálového dopravníku	78
Obrázek 81 Trubice s víky	79
Obrázek 82 Horní víko trubice	79
Obrázek 83 Řez horním víkem	80
Obrázek 84 Řez sestavou víka a patky s hřídelí s nasazeným guferem	80
Obrázek 85 Horní víko zepředu	81
Obrázek 86 Řez víkem a závitem	81
Obrázek 87 Řez spodním víkem	82
Obrázek 88 Pohled na ložiskové těleso spojené s žebrem a horním víkem	83
Obrázek 89 Šneková převodovka MRT-40-FF-L/B5/1-80-100	84
Obrázek 90 Řez šnekovou převodovkou	85
Obrázek 91 Řez šnekovou převodovkou v rovině pera	86
Obrázek 92 Rameno pro záchyt reakčního momentu umístěné v konstrukci	87
Obrázek 93 Rameno pro záchyt reakčního momentu	88
Obrázek 94 Rameno pro záchyt reakčního momentu z předního pohledu	88
Obrázek 95 Senzor tahu spojený šrouby s rameny	89
Obrázek 96 Pohled z boku na spojení hřídele se senzorem otáček	90
Obrázek 97 Pohled na uložení snímače	91
Obrázek 98 Dopravník na rámu se systémem pro aretaci	92
Obrázek 99 Noha aretačního systému	93
Obrázek 100 Detail plechu s dírou pro čep	93
Obrázek 101 Detail spojení jeklů tyčí	94



Obrázek 102 Pohled na spojené nohy aretačního systému.....	94
Obrázek 103 Délkové rozměry čepu.....	95
Obrázek 104 Čep nasazený do plechu s průměry	95
Obrázek 105 svěrný mechanismus	96
Obrázek 106 pozice jechlů při náklonu 90°	96
Obrázek 107 pozice jechlů při náklonu 60°	97
Obrázek 108 Pozice jechlů při náklonu 30°	97
Obrázek 109 Pozice jechlů při náklonu 0°	98
Obrázek 110 tabulka elektrických vlastností senzorů	100
Obrázek 111 IRC Snímač řady 300-305 od firmy Larm	100
Obrázek 112 Tabulka provozních podmínek.....	101
Obrázek 113 Tabulka zapojení připojovacích prvků IRC300-IRC325	101
Obrázek 114 Technické údaje snímače.....	102
Obrázek 115 Snímač S9M od hbm.....	103
Obrázek 116 tabulka rozměrů snímače	103
Obrázek 117 Schéma s popsányými drátky	104
Obrázek 118 Nastavení vazby šroubu s ramenem	105
Obrázek 119 Nastavené vlastnosti pro ocel S235JR	106
Obrázek 120 Nastavené vlastnosti pro ocel C45E	106
Obrázek 121 Nastavené vlastnosti pro ocel šroubů pevnostní třídy 12.9.....	106
Obrázek 122 Cylindrické vazby.....	107
Obrázek 123 Pevné vazby	108
Obrázek 124 Aplikovaná síla pro zatížení modelu.....	109
Obrázek 125 Nastavení aplikované síly.....	109
Obrázek 126 Vysítovaný celý model	110
Obrázek 127 Detail zjemněné sítě.....	111
Obrázek 128 Čelní pohled deformace	112
Obrázek 129 Boční pohled deformace.....	112
Obrázek 130 Deformace nosné konstrukce	113
Obrázek 131 Napětí v konstrukci.....	114
Obrázek 132 Detail napětí v místě rotačního čepu	114
Obrázek 133 Detail maxima napětí vzniklého v místě spojení ramene s nosnou konstrukcí.....	115
Obrázek 134 Řez ramenem	116
Obrázek 135 Zobrazení celkové sítě druhého výpočtu.....	117
Obrázek 136 Sít v okolí ramene.....	118
Obrázek 137 Boční pohled na sít u ramene	118
Obrázek 138 Detail kritického místa ramene.....	119
Obrázek 139 Pohled shora na sít spojení ramene	119
Obrázek 140 Deformace druhého měření	120
Obrázek 141 Detail deformovaného ramene.....	120
Obrázek 142 Vzniklé napětí v konstrukci	121
Obrázek 143 Maximum napětí v pravém jecklu u díry pro rotační čep	121
Obrázek 144 Řez dírou pro čep	122
Obrázek 145 Koncentrace napětí na spodní straně ramene	123
Obrázek 146 Koncentrace napětí na horní straně ramene.....	123
Obrázek 147 Zobrazení sítě v místě díry pro rotační čep	124
Obrázek 148 Deformace dopravníku v třetím výpočtu	125
Obrázek 149 Vzniklé napětí v konstrukci	125
Obrázek 150 Detail maximálního napětí.....	126
Obrázek 151 Pohled na spodní hranu ramene.....	128
Obrázek 152 pohled na horní hranu ramene	128

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DRAŽAN, František a Karel JEŘÁBEK. Manipulace s materiálem. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1979. Česká matice technická.
- [2] GAJDŮŠEK, Jaroslav; ŠKOPÁN, Miroslav. Teorie dopravních a manipulačních zařízení. 1. vyd. Brno: rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1988
- [3] DRAŽAN, František. Teorie a stavba dopravníků. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1983
- [4] Odporové tenzometry – princip, provedení, použití, historie. Automatizace.hw.cz [online]. [cit. 2023-08-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [5] KRYSTEL, Jan. Odporová tenzometrie. Kme.zcu.cz [online]. [cit. 2023-08-12]. Dostupné z: https://www.kme.zcu.cz/krystek/vyuka/exm1/soubory/EXM_odporov_a_tenzometrie.pdf
- [6] VLK, Miloš. Experimentální mechanika [online]. Brno, 2003 [cit. 2023-08-12]. Dostupné z: http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf
- [7] ŘEZNÍČEK, Jan. Pružnost a pevnost II Komentované přednášky [online]. Praha, 2009 [cit. 2023-08-12]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/~simunale/PP_II_600\(2\).pdf](http://users.fs.cvut.cz/~simunale/PP_II_600(2).pdf)
- [8] Technická mereni_CVUT
- [9] REICHL, Jaroslav. Encyklopedie fyziky. Fyzika.jreichl.com [online]. [cit. 2023-08-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1356-vzorkovani-signalu>
- [10] ČSN. ČSN ISO-1050. 1993. Dostupné také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-iso-1050-262808-172841.html>
- [11] ČSN. ČSN ISO/TR 9172. 1993. Dostupné také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-iso-tr-9172-262801-172840.html#>
- [12] ČSN. ČSN ISO 1819. 1993. Dostupné také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-iso-1819-260005-172704.html#>
- [13] ČSN. ČSN-ISO-7149. 1993. Dostupné také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-iso-7149-260006-172705.html>
- [14] ČSN. ČSN-26-0003. 1993. Dostupné také z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-26-0003-260003-172703.html>
- [15] TMT spol. s.r.o. Chrudim. Šnekové dopravníky. TMT. [Online] <http://www.tmt.cz/cz/snekove-dopravniky>
- [16] Konig A, Riemann U. Investigation on Vertical Auger Conveyors. NIAE Translation. Landtechnische Forschung 1990;10(2):45–51.
- [17] Stevens GN. Performance Tests on Experimental Auger Conveyors. Journal of Agricultural Engineering Research 1962;7(1):47–60.
- [18] O'Callaghan JR. Some Experiments on the Intake Process in a Vertical Screw Conveyor. Journal of Agricultural Engineering Research 1962;7(4):282–287.
- [19] Burkhardt GJ. Effect of Pitch Radial Clearance, Hopper Exposure and Head on Performance of Screw Feeders. Transactions of the ASAE 1967;10(1):685–690.
- [20] Peart RM, McKenzie BA, Herum FL. Dimensional Standards and Performance-Test Procedures for Screw Conveyors. Transactions of the ASAE 1967;10(5):667–669.

- [21] Carleton A, Miles J, Valentin, F. A Study of Factors Affecting the Performance of Screw Conveyors and Feeders. Transactions of the ASME 1969;91:329–334.
- [22] L. Bates, Transactions of the ASME, Volume 91, Page 295, 1969.
- [23] Bloome P, Harp S, Bruswitz G. Auger conveyors. In: Cooperative Extension Service, Oklahoma State Univ. USA: OSU Extension Facts No. 1105. Stillwater, Okla. 1976.
- [24] A. Degirmencioglu, and A. K. Srivastava, Transactions of the ASAE, Volume 39(5), Page 1757, 1996
- [25] Chang CS, Steele JL. Performance Characteristics of the Inlet Section of a Screw Auger. Applied Engineering in Agriculture 1997;13(5):627–630.
- [26] R. Nicolai, J. Ollerich, and J. Kelley, ASAE/CSAE Annual International Meeting, Ottawa, Ontario, Canada, Paper Number 046134, 2004
- [27] Nicolai R, Dittbenner A, Pasikanti S. Large Portable Auger Throughput Analysis. ASABE Annual International Meeting, Portland, Oregon. 2006: Paper NO: 066043.
- [28] Zareiforoush, Hemad & Komarizadeh, Mohammad & Alizadeh, Mohammadreza. (2010). A Review on Screw Conveyors Performance Evaluation During Handling Process. Journal of Scientific Review. 2.
- [29] Alan W. Roberts. DESIGN CONSIDERATIONS AND PERFORMANCE EVALUATION OF SCREW CONVEYORS. In: saimh.co.za [online]. The University of Newcastle, Australia. [vid. 2. 10. 2020]. Dostupné z: <https://login.totalweblite.com/Clients/doublearrow/beltcon%202001/14.design%20considerations%20and%20performance%20evaluation%20of%20screw%20conveyors.pdf>
- [30] Krause, F. & Minkin, A. (2005). Research on shaftless screw conveyors. 25. 92-100.
- [31] Krause, F. & Minkin, A. (2005). Theoretical and experimental study of horizontal and slightly inclined shaftless screw conveyors - Part 1. 25. 172-178.
- [32] Krause, F. & Minkin, A. (2005). Theoretical and experimental study of horizontal and slightly inclined shaftless screw conveyors - Part 2. 25. 226-233.
- [33] Šestihránná tyč tažená za studena. Feron.cz [online]. [cit. 2023-08-12]. Dostupné z: <https://online.feron.cz/detail/30879/tyc-sestihranna-tazena-za-studena-en-10278-uchylka-h11-rozmer-36>
- [34] Trubka-plexiglas-xt. Eshop.zenit.cz [online]. [cit. 2023-08-12]. Dostupné z: <https://eshop.zenit.cz/trubka-plexiglas-xt/variant/110-3-cira-0a070-2000-2-398-ano/>
- [35] SNÍMAČE OTÁČEK [online]. [cit. 2023-08-12]. Dostupné z: <http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory/Snimace%20otacek.pdf>
- [36] Tenzometry. Elearning.tul.cz [online]. [cit. 2023-08-12]. Dostupné z: https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/593046/mod_resource/content/1/p8_tenzometry.pdf?forcedownload=1
- [37] CEMA. CEMA/ANSI Standard No.300.2021 Screw Conveyor Dimensional Standards. 5th ed. 2021. Dostupné také z: <https://cemastore.com/product/cema-standard-300-2019-pdf-screw-conveyor-dimensional-standards/>



- [38] CEMA. ANSI/CEMA Standard No. 350-2021, Screw Conveyors for Bulk Materials + Stds 300/352. 6th ed. 2021. Dostupné také z: <https://cemastore.com/product/cema-standard-no-350-pdf-screw-conveyors-for-bulk-materials-stds-300-352/>
- [39] CEMA. CEMA #352-2018, Screw Conveyor Safety Operation/Maintenance Manual. 2018. Dostupné také z: <https://cemastore.com/product/cema-352-2018-pdf-screw-conveyor-safety-operation-maintenance-manual/>
- [40] CEMA. CEMA #353-2018, Shaftless Screw Conveyor O&M Manual. 2018. Dostupné také z: <https://cemastore.com/product/cema-353-2018-pdf-shaftless-screw-conveyor-om-manual/>