

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Návrh rámu pro měření statické tuhosti

2018

Daniel Vítek

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vítek** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **395206**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh rámu pro měření statické tuhosti

Název bakalářské práce anglicky:

Static Stiffness Measurement Frame Design

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Návrh silově nezávislého rámu pro měření statické tuhosti. Rám musí být modulární a po smontování dostatečně tuhý. Konstrukce rámu musí zajišťovat snadný transport osobním vozidlem, jednoduchou a časově nenáročnou montáž, demontáž a snadné ustavení do pracovní polohy.; Osnova práce:

- 1) Rešerše podobných zařízení a ustavovacích prvků
- 2) Návrh dvou až tří variant klíčových uzlů
- 3) Konstrukční dokumentace rámu vítězné varianty
- 4) Výpočet tuhosti rámu, tak aby deformace od direkční síly úchylkoměru nezpůsobila zkreslení více než 3% měřené hodnoty

Rozsah grafické části: 10 stran výkresové dokumentace; Rozsah textové části 40 - 60 stran;

Seznam doporučené literatury:

PIČ, Josef a BRENÍK, Přemysl. Obráběcí stroje: (základy konstrukce a výpočtů). Praha: SNTL, 1970.
CHVÁLA, Břetislav a VOTAVA, Josef. Přípravky. Praha. SNTL, 1988.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. David Burian, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

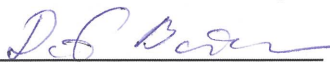
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Jiří Sova, ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání bakalářské práce: **12.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.07.2018**

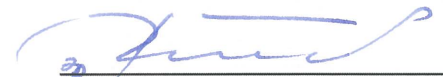
Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2018**



Ing. David Burian, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Petr Kolář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.4.18

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 25.5.2018



.....
podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce, panu Ing. Davidovi Burianovi, Ph.D. za připomínky a rady při tvorbě mé bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během studia.

Anotace

Autor:	Daniel Vítek
Název BP:	Návrh rámu pro měření statické tuhosti
Rozsah práce:	65 str., 68 obr., 4 tab.
Školní rok vyhotovení:	2018
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. David Burian, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Sova Jiří
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Využití:	Měření statické tuhosti obráběcích strojů.
Klíčové slova:	Tuhost, statická tuhost, měření statické tuhosti, rám, výpočet tuhosti, rám pro měření statické tuhosti
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá návrhem rámu pro měření statické tuhosti a výpočtem jeho tuhosti a odchylky měřené hodnoty.

Annotation

Author:	Daniel Vítek
Title of bachelor dissertation:	Static Stiffness Measurement Frame Design
Extent:	65 p., 68 fig., 4 tab.
Academic year:	2018
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. David Burian, Ph.D.
Consultant:	Ing. Sova Jiří
Submitter of the Theme:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Measurement of Machine Tool Static Stiffness.
Key words:	Stiffness, static stiffness, measurement of static stiffness, frame, calculation of stiffness,
Annotation:	The bachelor thesis deals with the design of frame for measuring of static stiffness and calculation of his stiffness and deviations of the measured values.

Obsah

Zadání bakalářské práce.....	2
Prohlášení	3
Anotace	5
Annotation	6
Obsah	7
Přehled použitých veličin a jednotek	8
1 Úvod	11
2 Cíl práce.....	12
3 Měření tuhosti	13
3.1 Relativní měření tuhosti.....	13
3.2 Absolutní měření tuhosti.....	13
3.3 Zařízení potřebná pro měření statické tuhosti.....	16
3.4 Zaznamenávání a vyhodnocování naměřených hodnot	20
4 Konstrukční provedení rámu a podobných zařízení	22
4.1 Provedení I – Silově nezávislý rám	22
4.2 Provedení II – Silově nezávislý rám	23
4.3 Provedení III – Silově nezávislý rám.....	24
4.4 Provedení IV – Rám pro měření teplotních deformací.....	25
4.5 Provedení V – Montážní stojan na kola.....	27
5 Upínací prvky	30
5.1 Utahovací kolečka.....	30
5.2 Regulační prvky.....	30
5.3 Rychloupínače	31
6 Vlastní řešení.....	32
6.1 Návrhy úprav stojanu.....	32
6.2 Návrh sklopných vzpěr	35
6.3 Návrh spojek	37
7 Výpočtová část.....	47
7.1 Postup výpočtu.....	48
7.2 Reakce od zatížení v jednotlivých uloženích.....	49
7.3 Posunutí bodu E.....	52
7.4 Tuhost rámu	56
7.5 Zkreslení měřené hodnoty	57
8 Závěr	58
9 Seznamy	60

Přehled použitých veličin a jednotek

Označení	Jednotka	Název/Popis
a	[m]	vzdálenost bodů \overline{AB}
b	[m]	vzdálenost bodů \overline{BC}
c	[m]	vzdálenost bodů \overline{BD}
CH _V	[%]	chyba měřené hodnoty ve vodorovném směru
CH _B	[%]	chyba měřené hodnoty ve svislém směru
d	[m]	vzdálenost bodů \overline{CD}
d ₁	[m]	vnitřní průměr trubky ramene
D ₁	[m]	vnější průměr trubky ramene
d ₂	[m]	vnitřní průměr trubky stojanu
D ₂	[m]	vnější průměr trubky stojanu
e	[m]	vzdálenost bodů \overline{DE}
E	[Pa]	modul pružnosti v tahu
E ₁	[Pa]	modul pružnosti v tahu ramene
E ₂	[Pa]	modul pružnosti v tahu
F	[N]	zatížení
F _S	[N]	zatížení ve svislém směru
F _V	[N]	zatížení ve vodorovném směru
F _x	[N]	zatížení ve směru osy x
F _y	[N]	zatížení ve směru osy y
h	[1]	počet výpočetních oblastí
i	[1]	počet stupňů volnosti soustavy
J	[m ⁴]	kvadratický moment
J ₁	[m ⁴]	kvadratický moment ramene
J ₂	[m ⁴]	kvadratický moment stojanu
k _n	[N/rad]	tuhost v natočení

k_p	[N/m] [N/μm]	tuhost v posunutí
k_S	[N/m] [N/μm]	tuhost rámu při svislém zatížení
k_V	[N/m] [N/μm]	tuhost rámu při vodorovném zatížení
l_{AB1}	[m]	spodní mez oblasti \overline{AB}
l_{AB2}	[m]	vrchní mez oblasti \overline{AB}
M	[N * m]	moment
M_A	[N * m]	reakční moment v bodě A
M_B	[N * m]	reakční moment k bodu B
M_D	[N * m]	reakční moment k bodu D
M_k	[N * m]	kroučící moment
$M_{O_{AB_S}}$	[N * m]	ohybový moment od svislého zatížení v oblasti \overline{AB}
$m_{O_{AB_S}}$	[N * m]	ohybový moment od svislého jednotkového zatížení v oblasti \overline{AB}
$M_{O_{AB_V}}$	[N * m]	ohybový moment od vodorovného zatížení v oblasti \overline{AB}
$m_{O_{AB_V}}$	[N * m]	ohybový moment od vodorovného jednotkového zatížení v oblasti \overline{AB}
$M_o(x_i)$	[N * m]	ohybový moment od zatížení závislý na souřadnici x_i
$m_o(x_i)$	[N * m]	ohybový moment od jednotkového zatížení závislý na souřadnici x_i
n	[1]	počet těles soustavy včetně rámu
o	[1]	počet obecných kinematických dvojic
p	[1]	počet posuvných kinematických dvojic
R_{ij}	[N]	reakce v bodě i ve směru j
r	[N]	počet rotačních kinematických dvojic

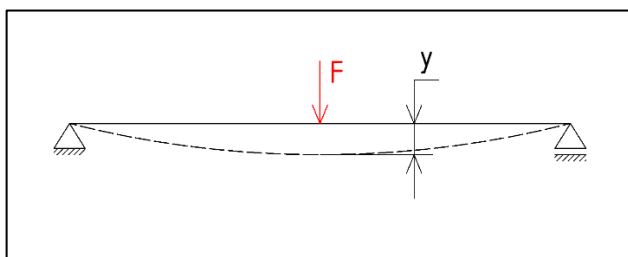
u_s	[m] [μm]	celkové posunutí bodu E od zatížení ve svislém směru
u_{s_x}	[m] [μm]	posunutí bodu E ve směru osy x od svislého zatížení
u_{s_y}	[m] [μm]	posunutí bodu E ve směru y od svislého zatížení
u_v	[m] [μm]	celkové posunutí bodu E od zatížení ve vodorovném směru
u_{v_x}	[m] [μm]	posunutí bodu E ve směru osy x od vodorovného zatížení
u_{v_y}	[m] [μm]	posunutí bodu E ve směru osy y od vodorovného zatížení
v	[1]	počet valivých kinematických dvojic
x_i	[m]	proměnná souřadnice
y	[rad]	posunutí
Z	[m] [μm]	měřená hodnota
α	[rad]	úhel mezi stojanem a vzpěrou
α_1	[rad]	úhel mezi vzpěrou a osou x
β	[rad]	úhel mezi stojanem a ramenem
β_1	[rad]	úhel mezi ramenem a osou x
γ	[rad]	úhel mezi vzpěrou a ramenem
γ_1	[rad]	úhel mezi ramenem a osou x
γ_2	[rad]	úhel mezi vzpěrou a osou y
φ	[rad]	natočení

1 Úvod

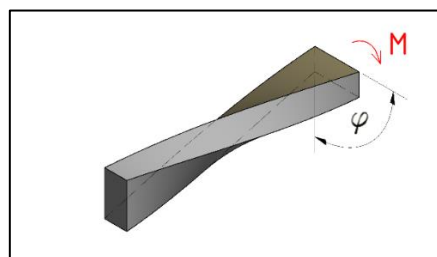
Důležitou výrobní technologií ve strojírenství je obrábění. Používá se pro výrobu složitých součástí s vysokou přesností, pro které nelze použít technologie jako jsou lisování, lití či plošné tváření. Ve srovnání s těmito technologiemi je obrábění jednoznačně nejdražší možností, avšak jím získáme již zmiňovanou vysokou přesnost a jakost povrchů.

Aby obráběcí stroje při obrábění docílily požadované přesnosti, mimo jiné je potřeba při návrhu i výrobě jednotlivých částí zohlednit jejich tuhost, což je vlastně odolnost vůči pružným deformacím [1].

Tuhost je definována jako poměr zatěžující síly a přetvoření v místě zatížení. Můžeme ji rozdělit do dvou základních skupin. Tuhost v posunutí k_p a tuhost v natočení k_n . Dále lze rozlišovat tuhost dílčí a tuhost celkovou. Dílčí tuhostí je myšlena tuhost jednotlivých součástí (rám, ojnice) a za celkovou označujeme tuhost soustavy složených z několika jednotlivých součástí, například tuhost celého obráběcího stroje [1].



Obr. 1.1 – Tuhost v ohybu [1]



Obr. 1.2 – Tuhost v krutu [1]

$$k_p = \frac{F}{y} \quad (1.1)$$

$$k_n = \frac{M}{\varphi} \quad (1.2)$$

Tuhost lze rozdělit do skupin dle druhu zatížení na tuhost v tahu, tlaku, ohybu a krutu [1]. Také lze rozlišovat absolutní a relativní tuhost [1]. Tyto pojmy jsou vysvětleny v kapitolách 3.1 a 3.2.

Pomocí silově nezávislého rámu měříme deformace. Po analýze výsledků měření můžeme říci, na kterých částech stroje je potřeba vyšší tuhost a kde jí naopak můžeme z ekonomických či jiných důvodů snížit (např. pokud je konstrukce naddimenzovaná).

Deformace měříme pomocí úchylkoměrů při postupném zatěžování stroje (viz kapitola 3). Silově nezávislý rám je používán k umístění úchylkoměrů mimo měřicí stroj pro měření absolutní tuhosti. Ve většině případů se skládá ze stojanu, ramene a spojovacího mechanismu těchto částí. Úchylkoměry se umísťují na ramena.

Rám musí být modulární se snadnou možností transportu osobním vozidlem. Montáž, demontáž a ustavení rámu do pracovní polohy musí být jednoduché, časově nenáročné a zvládnutelné jednou osobou.

2 Cíl práce

Cílem této práce je navrhnout silově nezávislý rám pro měření tuhostí dle zadaných parametrů. Postup je popsán níže.

Dílčí cíle:

1. Zpracovat rešerši. Zjistit aktuální stav rámu, jejich částí a vhodných ustavovacích prvků.
2. Dle získaných znalostí navrhnout dvě varianty klíčových uzlů rámu. V návrzích bude zohledněno použití či upravení stojanu, který je fyzicky k dispozici.
3. Porovnání výhod a nevýhod jednotlivých variant.
4. Dle výsledků předchozího bodu vybrat výslednou variantu.
5. Zkonstruovat výslednou variantu.
6. Vytvořit výkresovou dokumentaci.
7. Provést výpočet tuhosti rámu tak, aby deformace od direkční síly úchylkoměru nezpůsobila zkreslení více než 3 % měřené hodnoty.
8. Sepsat závěr.

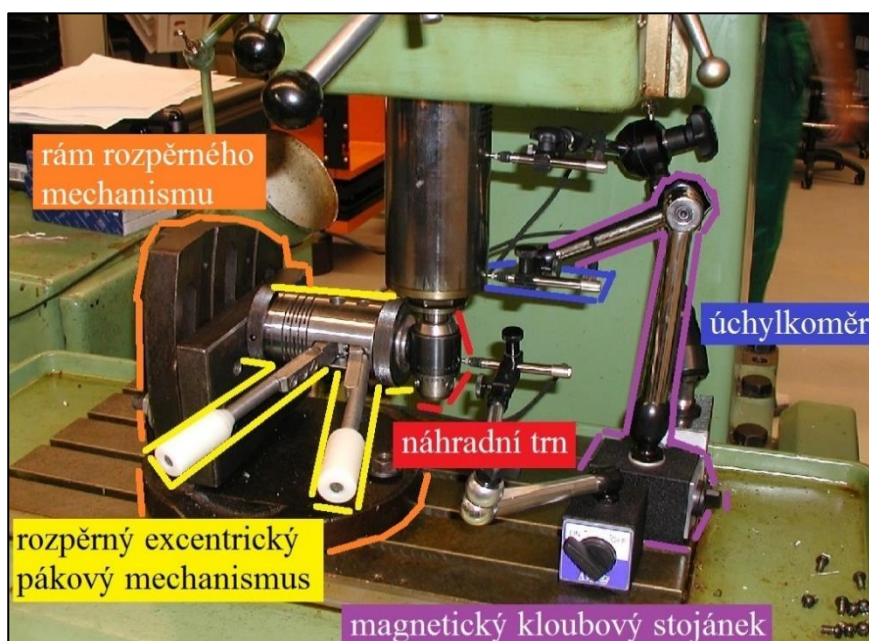
3 Měření tuhosti

Měření probíhá absolutně či relativně. Relativním měřením zjišťujeme polohu jednotlivých částí stroje vzhledem k jeho jiným částem. Absolutním měřením zjišťujeme polohu jednotlivých částí vzhledem k pevnému bodu [2].

Výstupem měření jsou tuhosti v jednotlivých částech měřeného stroje a jejich grafické zpracování ve schématu stroje [3].

3.1 Relativní měření tuhosti

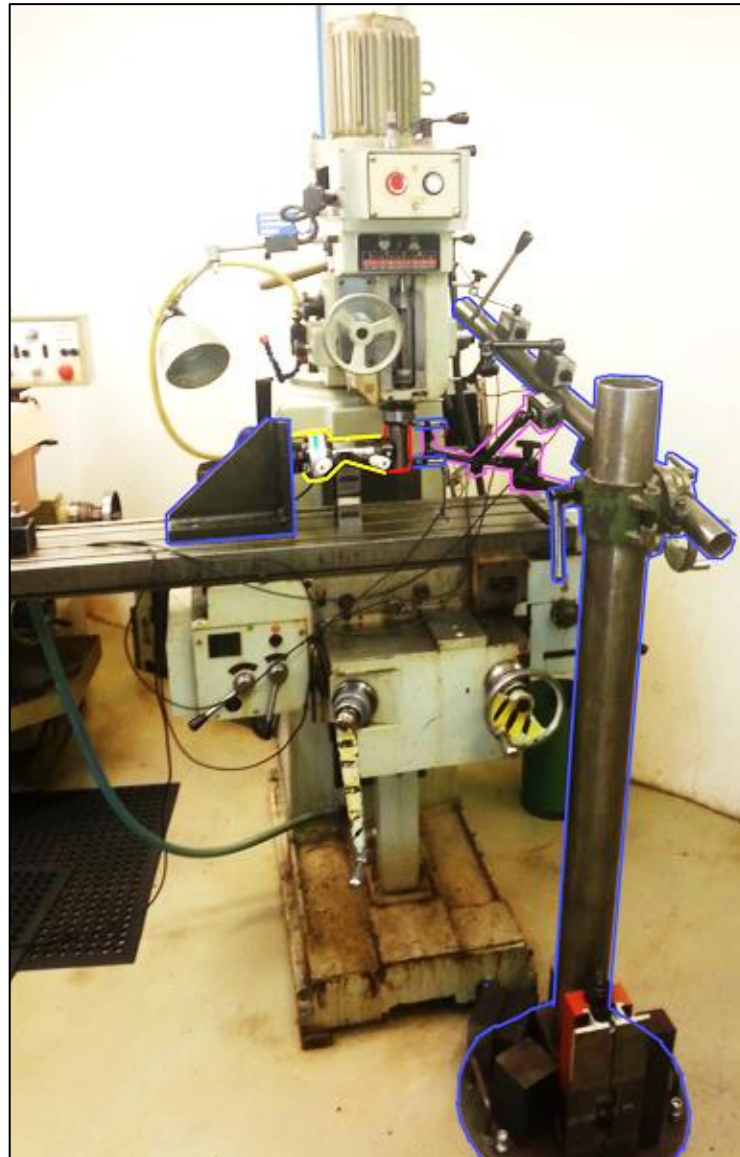
Měření je schematicky zobrazeno na obr. 3.4. Ukázka měření v praxi je vidět na obr. 3.1. Probíhá tak, že vnášíme sílu mezi náhradní trn, který je upnut ve vřetenu místo nástroje a rám rozpěrného mechanismu, který je připnut k pracovnímu stolu. Vlivem této síly v jednotlivých částech stroje vznikají deformace. Tyto deformace měříme pomocí úchylkoměrů, které jsou upnuty k pracovnímu stolu. Deformace od zatěžující síly se prostřednictvím jednotlivých částí stroje dostanou až k pracovnímu stolu, na kterých jsou upnuty úchylkoměry, proto toto měření je relativní [3].



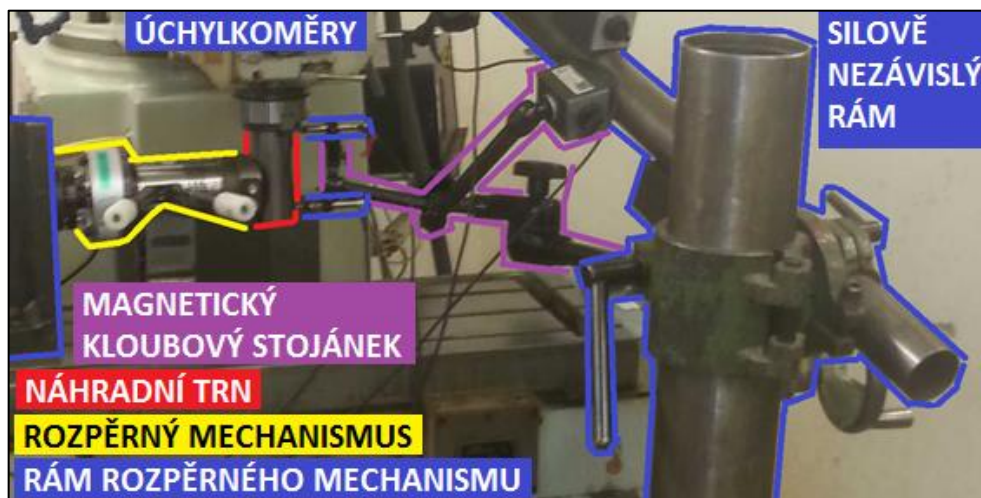
Obr. 3.1 – Ukázka relativního měření tuhosti

3.2 Absolutní měření tuhosti

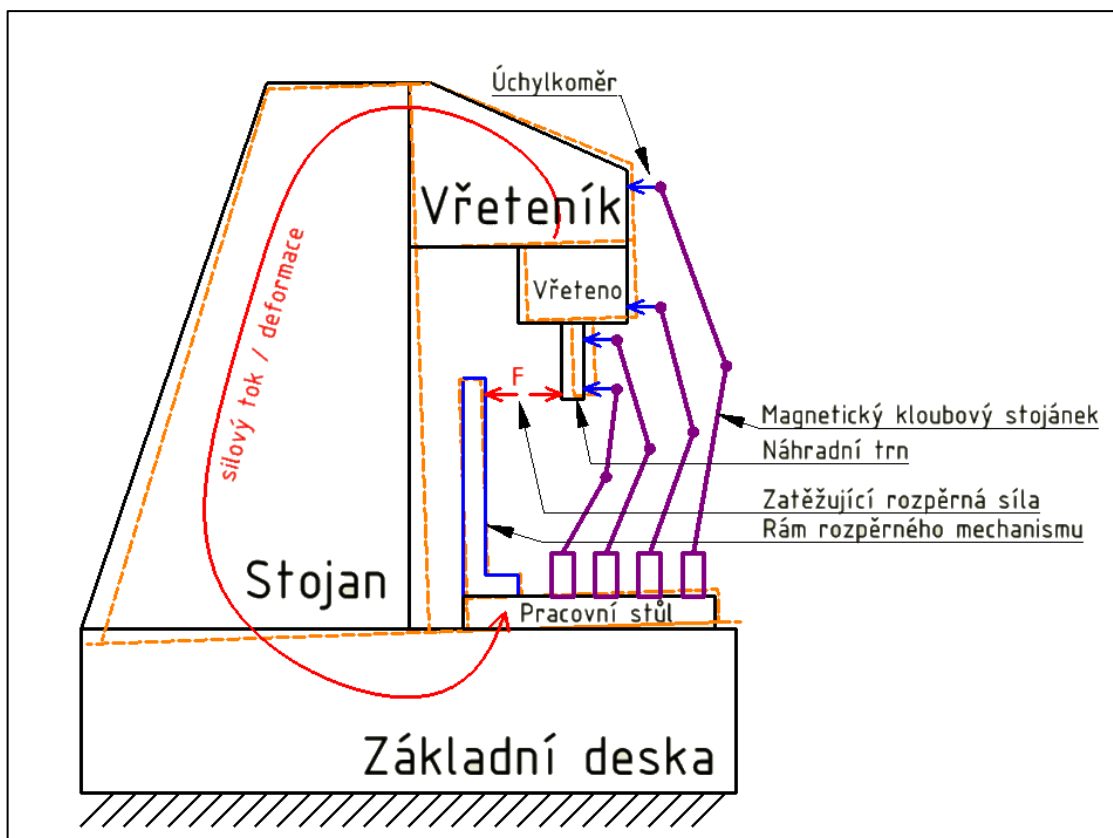
Měření je schematicky zobrazeno na obr. 3.5. Probíhá tak, že vnášíme sílu mezi náhradní trn, který je upnut ve vřetenu místo nástroje a rám rozpěrného mechanismu, který je připevněn k pracovnímu stolu. Vlivem této síly v jednotlivých částech stroje vznikají deformace. Tyto deformace měříme pomocí úchylkoměrů, které jsou na rozdíl od relativního měření upnuty na silově nezávislém rámu. Deformace od zatěžující síly se prostřednictvím jednotlivých částí stroje dostanou až k pracovnímu stolu, ale nijak neovlivní silově nezávislý rám. Jedná se tedy o absolutní měření [3].



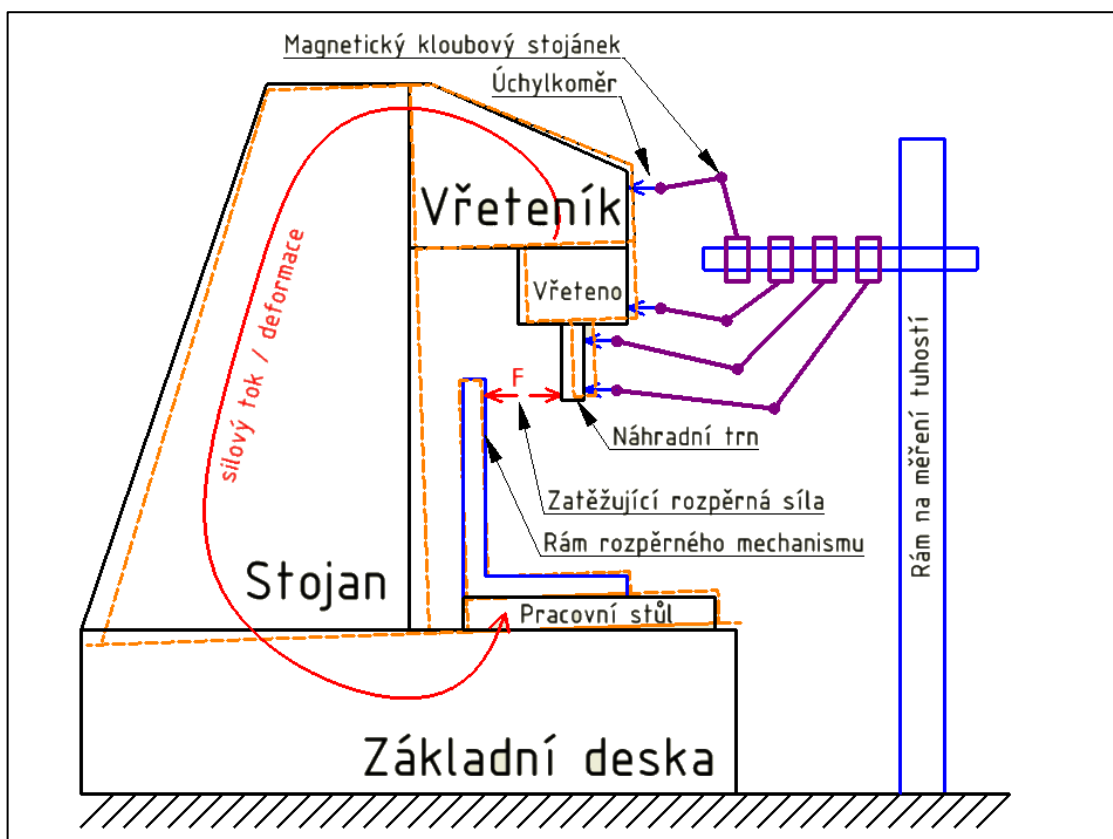
Obr. 3.2 – Ukázka absolutního měření tuhosti



Obr. 3.3 – Detail ukázky absolutního měření tuhosti



Obr. 3.4 – Schéma relativního měření tuhosti



Obr. 3.5 – Schéma absolutního měření tuhosti

3.3 Zařízení potřebná pro měření statické tuhosti

Ukázka s popisem jednotlivých zařízení potřebných k měření statické tuhosti je na obr. 3.1. K měření jsou potřeba úchylkoměry, magnetické stojánky pro úchylkoměry, mechanismus vyvozující sílu, pomocné rámy a náhradní trn.

3.3.1 Rozpěrné mechanismy a siloměry

Rozpěrným mechanismem je myšleno zařízení pro vyvození síly. Ta je vnášena mezi náhradní trn a stůl pracovního stroje, resp. rám rozpěrného mechanismu.

Na obr. 3.6 je uveden příklad rozpěrného mechanismu. Jedná se o pákový mechanismus, kdy proti sobě tlačí dva excentry a vyvozují sílu. Vpravo je k němu připevněn siloměr pro měření zatěžující síly.

Na obr. 3.8 je rozpěrným mechanismem hydraulický válec. Je vyroben na zakázku speciálně pro měření tuhostí. Lze k němu sériově připojit siloměr a upnout ho do rámu, který je také zobrazen na obr. 3.8.

3.3.2 Rámy pro rozpěrné mechanismy

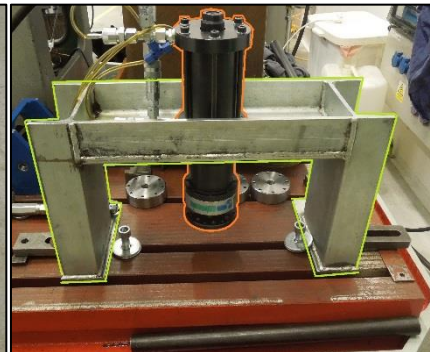
Jedná se o rám, který je upnut k pracovnímu stolu měřeného stroje většinou pomocí T šroubů. Rozpěrný mechanismus k němu může být přimontován (viz obr. 3.8) nebo se o rám může pouze opírat (viz obr. 3.1). V závislosti na směru zatěžující síly mohou být horizontální nebo vertikální. Rámy jsou vyráběny jako svařence.



Obr. 3.6 – Pákový excentrický mechanismus s opěrnou částí a siloměrem



Obr. 3.7 – Rám rozpěrného mechanismu I



Obr. 3.8 – Hydraulický válec se siloměrem (oranžově), Rám rozpěrného mechanismu II (zeleně)

3.3.3 Náhradní trny

Abychom během měření zatížením neničili nástroj, upíná se do vřeteníku místo něj náhradní trn. Náhradním trnem je myšlen starý, již opotřebovaný nástrojový držák, který již nebude použit při samotném obrábění. Během měření je zatěžován na tlak nebo tah a deformován, takže pokud bychom ho znovu použili pro obrábění, jeho přesnost by byla mnohem horší.

3.3.4 Stojánky na úchylkoměry

Existuje několik základních provedení stojánků na úchylkoměry:

1. Magnetické stojánky na úchylkoměry universální (obr. 3.9, obr. 3.10) [4]
2. Magnetické stojánky na úchylkoměry s flexibilním ramenem (obr. 3.11, obr. 3.12) [4]
3. Magnetické stojánky na úchylkoměry s mechanickou aretací (obr. 3.13, obr. 3.14) [4]
4. Magnetické stojánky na úchylkoměry s hydraulickou aretací

Stojánky se skládají z magnetického podstavce a kloubového ramene, na jehož konci je upnut úchylkoměr. Magnetický podstavec má u většiny typů prizmatickou podstavu pro upínání na nerovné povrchy.

Upínání stojánků je díky možnosti vypnutí či zapnutí magnetu jednoduché, rychlé a účinné. Upínací síly podstavců mohou dosahovat až 800 N [4].

Kloubové rameno umožňuje nastavení úchylkoměru do libovolné pozice. Jeho aretace je zajištěna mechanicky či hydraulicky. Závit pro uchycení ramenou do podstavce jsou M8x1,25 nebo M10x1 [5].

Existují i mini provedení magnetických stojánků, u kterých nelze vypínat či zapínat magnet. Magnet je stále aktivní. Je ideální pro páčkové úchylkoměry s upínací stopkou o malých průměrech (6-8 mm) nebo rybinovou drážkou [5].



Obr. 3.9 – Magnetický stojánek na úchylkoměry universální [4]



Obr. 3.10 – Magnetický stojánek na úchylkoměry universální [4]



Obr. 3.11 – Magnetický stojánek na úchylkoměry s flexibilní ramenem [4]



Obr. 3.12 – Magnetický stojánek na úchylkoměry s flexibilním ramenem [4]



Obr. 3.13 – Magnetický stojánek na úchylkoměry s mechanickou aretací [4]



Obr. 3.14 – Magnetický stojánek na úchylkoměry s mechanickou aretací [4]

3.3.5 Snímače polohy

Můžeme je rozdělit na analogové a digitální či dotykové a bezdotykové. Při měření dotykovou metodou se výchylka převádí na mechanický posuv měřidla [7]. Pro měření bezkontaktní metodou existují snímače kapacitní, laserové, konfonální, optické, magneto-indukční a lankové [8].

Typy bez budíků jsou k měření vhodnější kvůli menším rozměrům. Analogový úchylkoměr je zobrazen na obr. 3.16.



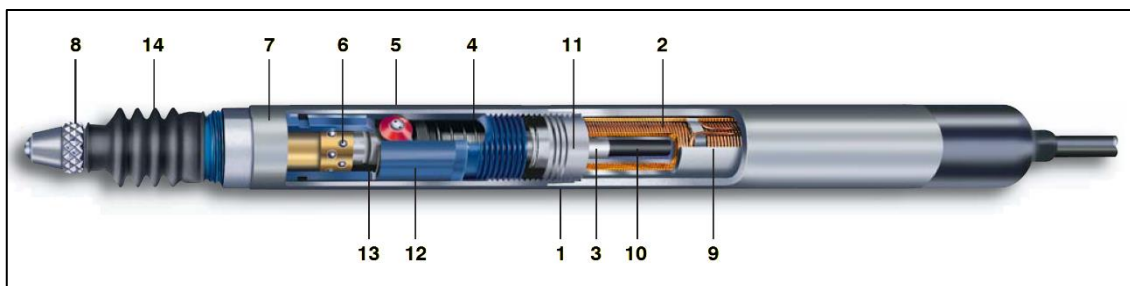
Obr. 3.15 – Příklad použití snímače GT31 [14]



Obr. 3.16 – Analogový úchylkoměr [14]

Předními výrobci snímačů polohy jsou například Švýcarské firmy TESA SA či Peter Hirt. Firmy Aerol, Optosurf a Peter Hirt v České republice zastupuje firma MESING.

Úchylkoměry jsou zařízení, které převádějí na elektrický signál zdvih měřícího dotyku. Používají se k měření úchylek kontrolovaného rozměru, ke kontrole geometrických tolerancí (např. obvodové házení), či k vyrovnávání součástí (např. rovnoběžnost směru pohybu suportu s osou vřetena) [6].



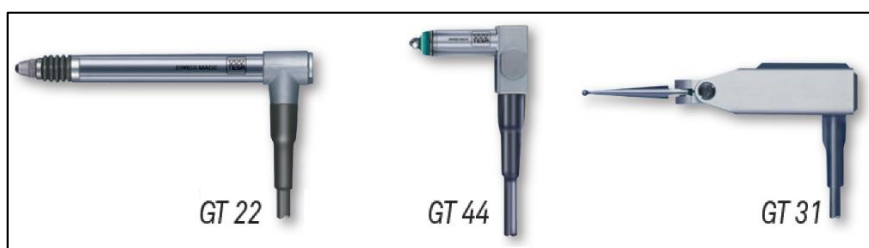
Obr. 3.17 – Řez indukčního snímače [15]

- | | |
|--|----------------------------|
| 1. Pouzdro | 8. Měřící hlavice |
| 2. Cívkový systém | 9. Ochranný obal cívky |
| 3. Element pro korekci koeficientu tepelné roztažnosti | 10. Feromagnetické jádro |
| 4. Silová tlačná pružina | 11. Brzdící pružina |
| 5. Antirotací vodící systém | 12. Vodící pouzdro ložiska |
| 6. Klec | 13. Měřící šroub |
| 7. Element pro nastavovací měřící šroub | 14. Manžeta |

Indukční snímač GT22 je zobrazen na obr. 3.18. Jedná se o teleskopický snímač, který lze pomocí kabelu napojit na měřicí převodníky či analyzátoru. Používá se k měření odchylek. Měřicí rozsah je 4,3 mm [14].

Indukční snímač GT44 je zobrazen na obr. 3.18. Jedná se o teleskopický snímač, který lze pomocí kabelu napojit na měřicí převodníky či analyzátor. Používá se k měření odchylek. Díky menším rozměrům (33x29,5x8 mm) ho lze použít v menších prostorách, např. ke kontrole otvorů. Měřicí rozsah je 2,1 mm [14].

Indukční snímač GT31 je zobrazen na obr. 3.18. Jedná se o ramínkový snímač, který lze pomocí kabelu napojit na měřicí převodníky či analyzátor. Používá se k měření odchylek. Ramínko lze natáčet o 90° z výchozí polohy v obou směrech (rozsah natočení je 180°) a díky tomu lze snímač použít v takových případech, kdy není možné použít snímače teleskopické. Např. ke kontrole malých otvorů. Příklad použití je zobrazen na obr. 3.15 [14].



Obr. 3.18 – Indukční snímače GT22, GT44, GT31 [14]

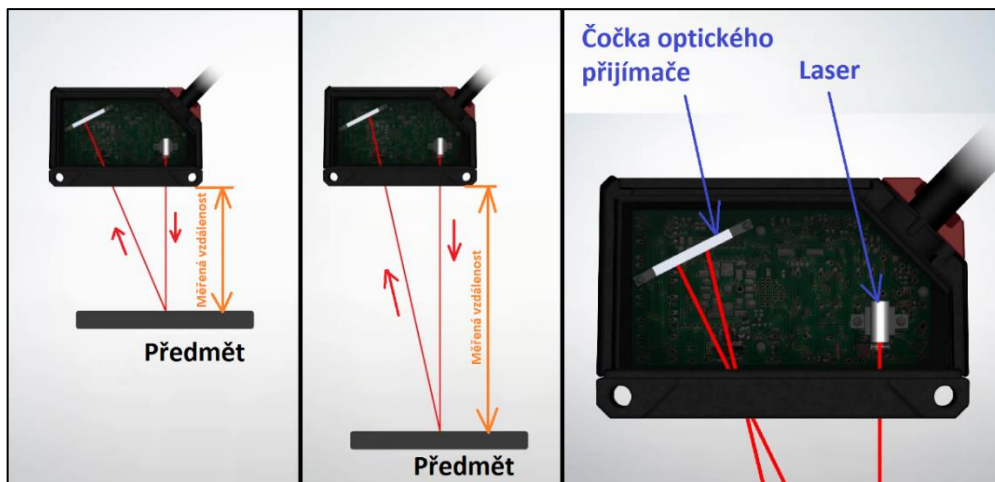
ILD1420 je inteligentní laserový snímač vzdáleností (viz obr. 3.19). Jedná se o bezdotykové měření. Vzdálenosti jsou snímány laserem triangulační metodou (princip této metody je vysvětlen níže) [16].



Obr. 3.19 – Snímač vzdáleností
ILD1420 [18]

Na obr. 3.20 je zobrazen **princip snímání vzdálenostní triangulační metodou**. Snímač vysílá laserový paprsek, který se od měřeného bodu (předmětu) odrazí pod určitým úhlem na čočku optického přijímače. Snímač polohu odraženého paprsku použije k zjištění vzdálenosti mezi čelem snímače a předmětem. Tuto informaci pomocí kabelu pošle ve formě signálu do měřicího převodníku či analyzátoru k dalšímu zpracování [16] [17].

Nevyhodnocujeme tedy intenzitu dopadajícího paprsku, či dobu jeho letu, ale místo na čočce (resp. na snímacím prvku CCD, PSD), kam odražený paprsek dopadl. Měřicí rozsah snímače je limitován velikostí optického snímače [17].



Obr. 3.20 – Princip snímání vzdáleností triangulačním laserem [16]

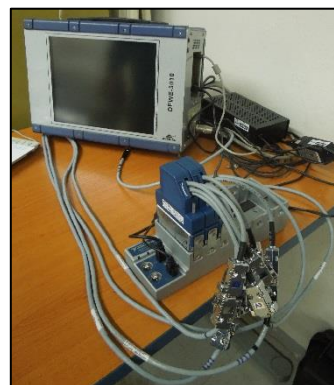
3.4 Zaznamenávání a vyhodnocování naměřených hodnot

Naměřené hodnoty (síla, odchylka) se zaznamenávají pomocí měřících převodníků (viz obr. 3.22). Ty naměřenou hodnotu ve formě signálu pošlou přes rozhraní RS232/RS485, USB nebo Ethernet k dalšímu zpracování do počítače či analyzátoru. Analyzátor se od počítače liší tím, že již obsahuje měřící převodníky. Analyzátor jsou zobrazeny na obr. 3.21 a obr. 3.22.

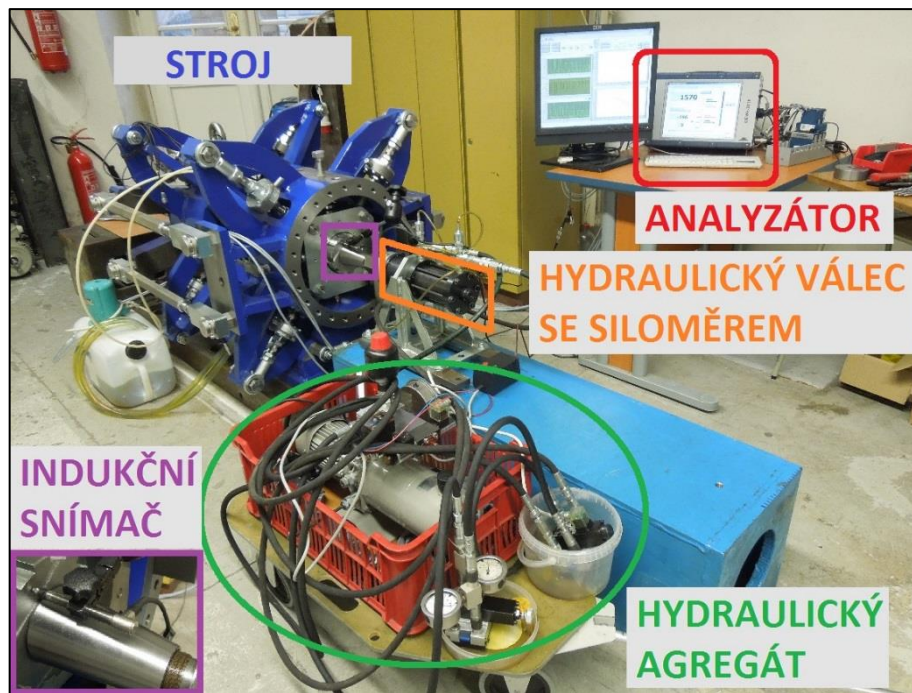
Na obr. 3.23 (viz také obr. 3.1, obr. 3.2 a obr. 3.3) je zobrazeno měření úchylek v praxi. Měřený díl zatěžujeme rostoucí silou až do předem určeného maxima. Pomocí snímače výchylky (na obr. 3.23 je použit indukční) měříme jeho posunutí v závislosti na zatěžující síle. Měření se provádí opakovaně, aby se dosáhlo co nejpřesnějších výsledků. Do analyzátoru jsou ve formě signálů posílány informace ze siloměru a snímače výchylky. Tam jsou tyto signály zpracovány a výsledkem je graf závislosti rostoucího zatížení na posunutí (viz obr. 3.24).



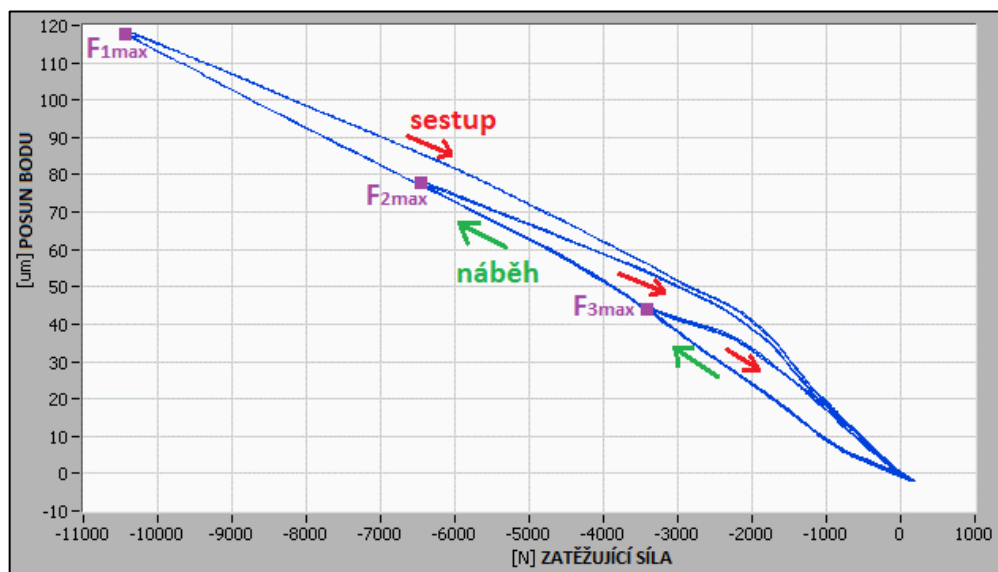
Obr. 3.21 – Analyzátor NX-3062



Obr. 3.22 – Analyzátor DEWE-3010 a měřící převodníky National Instruments NI 9205



Obr. 3.23 – Měření úchylek v praxi



Obr. 3.24 – graf závislosti zatěžující síly na posunu bodu

Na obr. 3.24 je zobrazen příklad výsledku měření. Ke zpracování byl použit program Labview. V tomto případě byly provedeny tři série měření při použití různých zatěžovacích sil. Zatěžováno bylo maximálními silami:

$$F_{1\max} = 10400 \text{ N} \quad F_{2\max} = 6500 \text{ N} \quad F_{3\max} = 3400 \text{ N}.$$

V grafu je vidět, že náběžné křivky, tj. křivky při rostoucím zatěžování, se překrývají při všech měřeních, zatímco při odlehčování se vlivem hystereze křivky liší. Sestupná křivka je závislá na maximální hodnotě zatížení, od níž se odvíjí. Proto se vyhodnocují pouze náběžové křivky, nikoli sestupné. Cílem tohoto měření bylo dokázat, že tomu tak je.

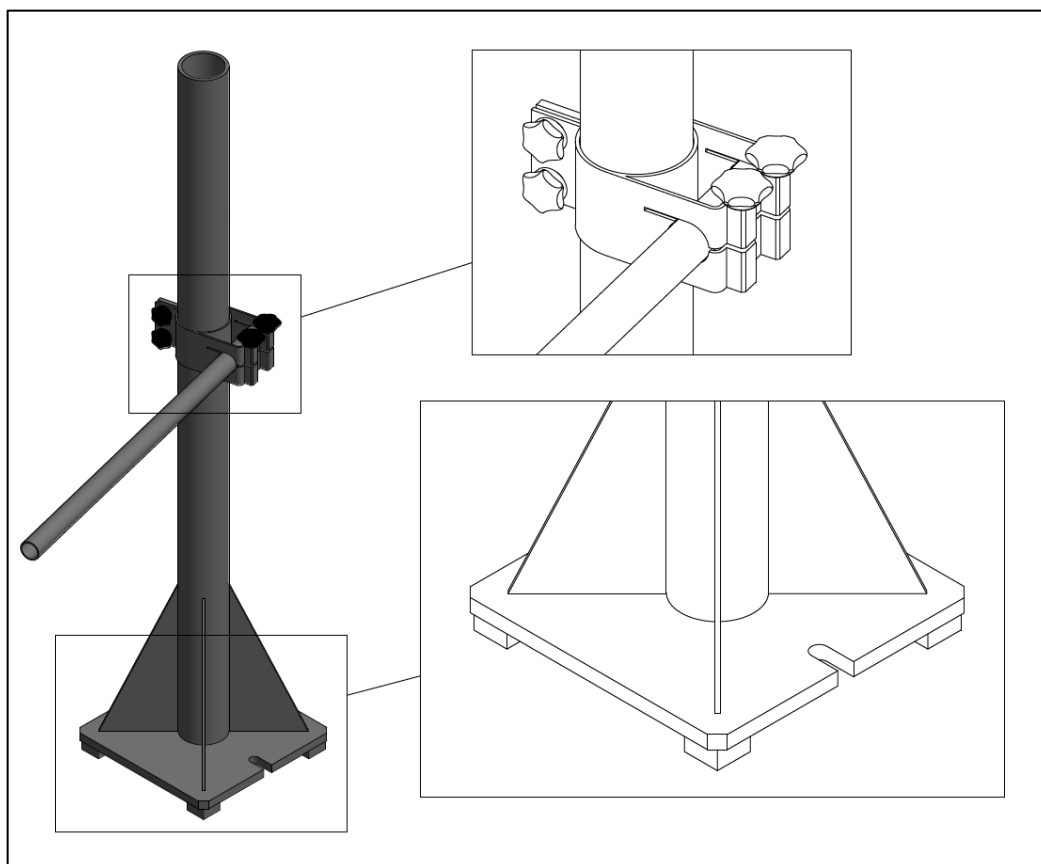
4 Konstrukční provedení rámu a podobných zařízení

V této kapitole jsou popsány stávající rámy používané pro měření tuhostí a konstrukčně podobná zařízení. Rámy pro měření tuhostí nejsou vyráběné sériově.

4.1 Provedení I – Silově nezávislý rám

Na obr. 4.1 je zobrazen aktuální stav stojanu s ramenem dostupného na Ú12135, ČVUT-FSI. Tuto sestavu je v souladu se zadáním potřeba upravit a použít v návrzích. Stojan je vysoký přibližně 2,6m, má čtvercovou podstavu a váží přibližně 61 kg. Jeho hmotnost lze ocenit při samotném měření, kdy potřebujeme, aby rám zůstal v klidu a byl stabilní i v situacích, kdy by nebylo možné podstavu přišroubovat k podkladu. Bohužel vysoká hmotnost je nevýhodná z hlediska přesouvání. Pokud bychom chtěli přesouvat samotný stojan v tomto stavu jednou osobou, bylo by to možné sunutím či překlápěním po samotné podlaze, což by vedlo k její poškození. Výška není vhodná k převozu osobním automobilem.

Rameno je ke stojanu připevněno svěrným mechanismem (viz detail na obr. 4.1). Pomocí tohoto mechanismu lze po povolení utahovacích šroubů nastavit výšku ramena, natočení v horizontální rovině, avšak nikoli natočení ve svislé rovině.



Obr. 4.1 – Aktuální provedení rámu na měření tuhostí I

4.2 Provedení II – Silově nezávislý rám

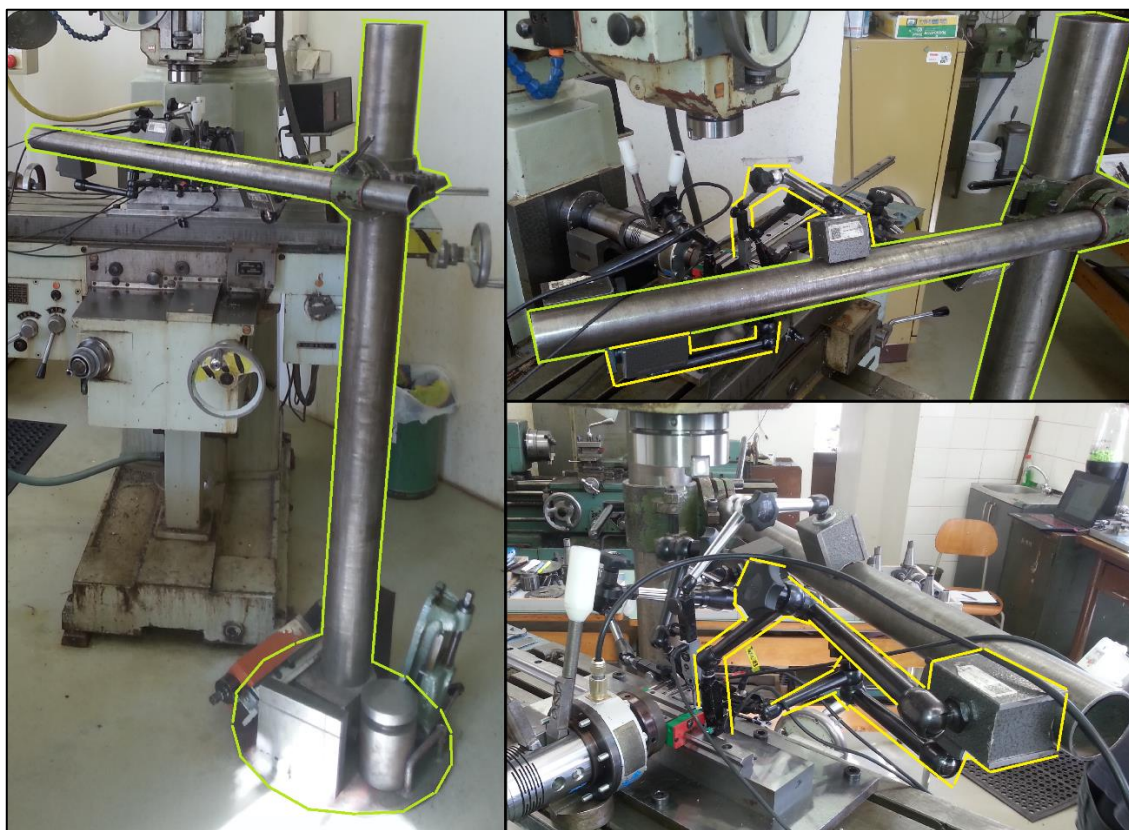
Na obr. 4.2 je vidět jedno z dalších provedení silově nezávislého rámu. Rám se opět skládá ze stojanu a ramena. Stojan má kruhovou podstavu a je vysoký přibližně 1,5m. Co se týče hmotnosti tak je podobná jako u provedení I. V tomto případě je ale možné k přesunu využít kruhovou podstavu a stojan po podlaze pohodlně odvalovat, tak aby nedocházelo k její ničení. Během měření se na podstavu pokládají těžké předměty pro menší ovlivnění měření okolními vlivy.

Mechanismus spojující rameno a stojan se skládá ze dvou svěrných spojů. Jedna část svírá stojan a druhá rameno. Oba svěrné spoje jsou zajištěné šrouby.

Po povolení šroubů u spoje svírající rameno nastavujeme jeho natočení a po povolení šroubů svírající stojan jeho výšku. Tím lze přizpůsobit polohu ramene dle aktuálních požadavků.

Rameno i stojan jsou sevřeny objímkami. Ty jsou spojeny na jedné straně čepem a na druhé šroubovým spojením, které je snadno ovladatelné pomocí páky s vnějším závitem. K oběma sestavám jsou přivařeny kotouče se zkosením o stejných rozměrech, které pomocí dalších objímků a dvou šroubových spojů drží pohromadě. Kotoučové svěrné spojení umožňuje naklání ramene vzhledem k stojanu dle potřeby.

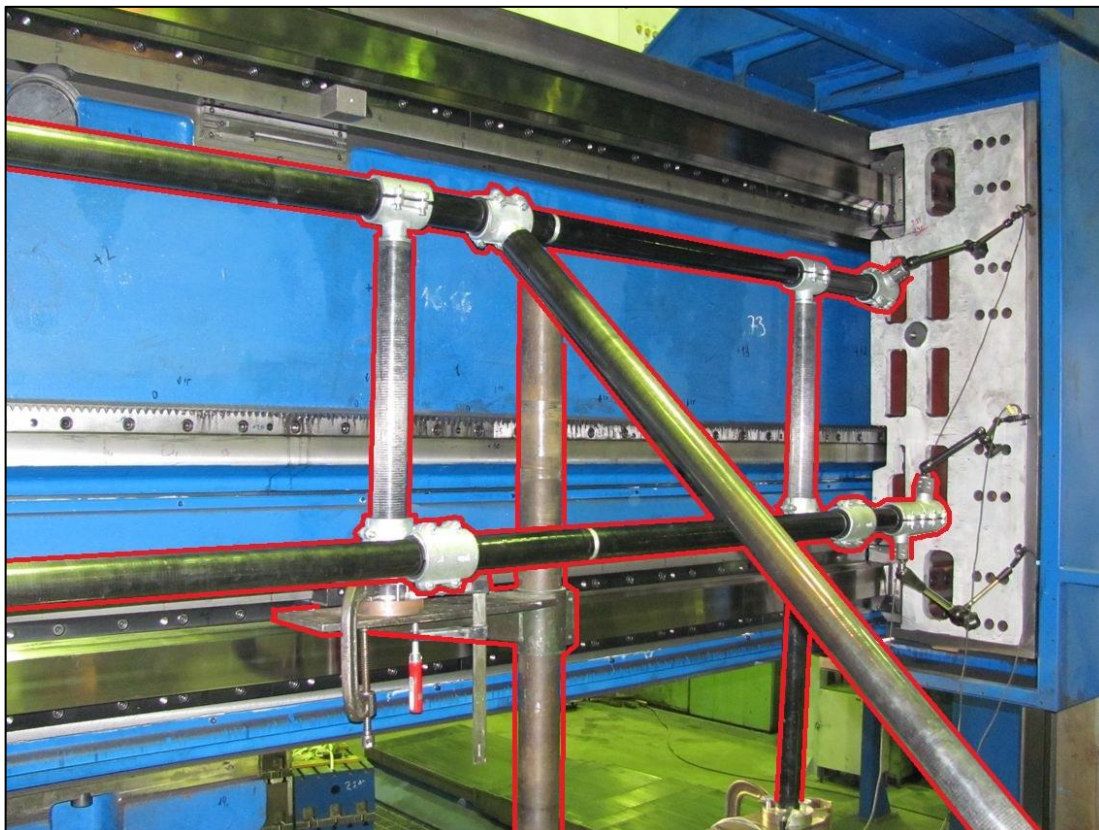
Na rameni jsou umístěny stojánky s LVDT sondami pro měření výchylek.



Obr. 4.2 – Fotky aktuálního provedení rámu II

4.3 Provedení III – Silově nezávislý rám

Na obr. 4.3 je vidět další provedení silově nezávislého rámu pro měření tuhosti. Rám je sestaven z kompozitních trubek, na jejichž koncích jsou přivařeny nátrubky s vnitřním závitem. Pomocí těchto závitů lze trubky spojovat dle potřeby stavěcími šrouby. Pro nesouosé spojení trubek jsou použity třmeny vyráběné firmou Gebo.



Obr. 4.3 - Ukázka aktuálního provedení rámu III

Kompozitní trubky jsou lehké, což je velice výhodné při transportu či přesunu. Tepelně se nedeformují, což oceníme při samotném měření, které je díky tomu méně ovlivněno okolními vlivy.

Třmeny (viz obr. 4.5 a obr. 4.6) jsou určeny k opravě trhlin, otvorů a poréznicích míst ocelového potrubí [8]. V tomto případě jsou však použity jako spojky pro sestavení kompozitních trubek dle měřicích požadavků. Třmeny svírají trubky a jsou spojeny čtyřmi šrouby. Proto je sestavení rámu časově náročnější než u předešlých provedení. Veliká výhoda je možnost sestavení rámu na míru dle aktuálních požadavků na měření.

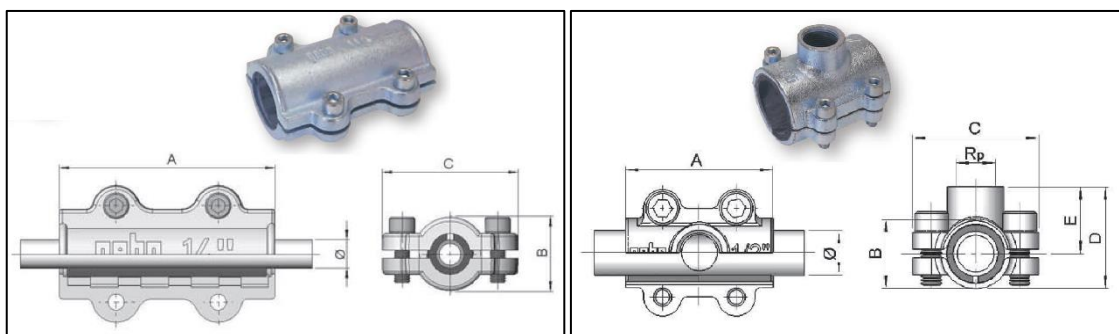
V tomto provedení se používají stojánky na úchylkoměry bez magnetického podstavce. Tedy jen kloubové rameno, které je pomocí redukce (obr. 4.4) přišroubované přímo do spojky Gebo.

Redukce zobrazená na obr. 4.4 je vyrobená na zakázku. Šroubuje se rovnou do spojek Gebo a pro našroubování stojánek je zde 12 otvorů se závitem. Má tvar šestihranu a na každé ploše je otvor se závitem M8x1,25 a otvor se závitem M10x1.



Obr. 4.4 - Redukce

Celá konstrukce složená z trubek a spojek je přišroubována ke konzolím na stojanech. Konzola na stojanu drží pomocí svěrného spojení, zajištěné dvěma šrouby. Konzoli lze po povolení šroubů posouvat ve svislém směru.



Obr. 4.5 – Třmen [8]

Obr. 4.6 – Třmen s navrtávkou [8]

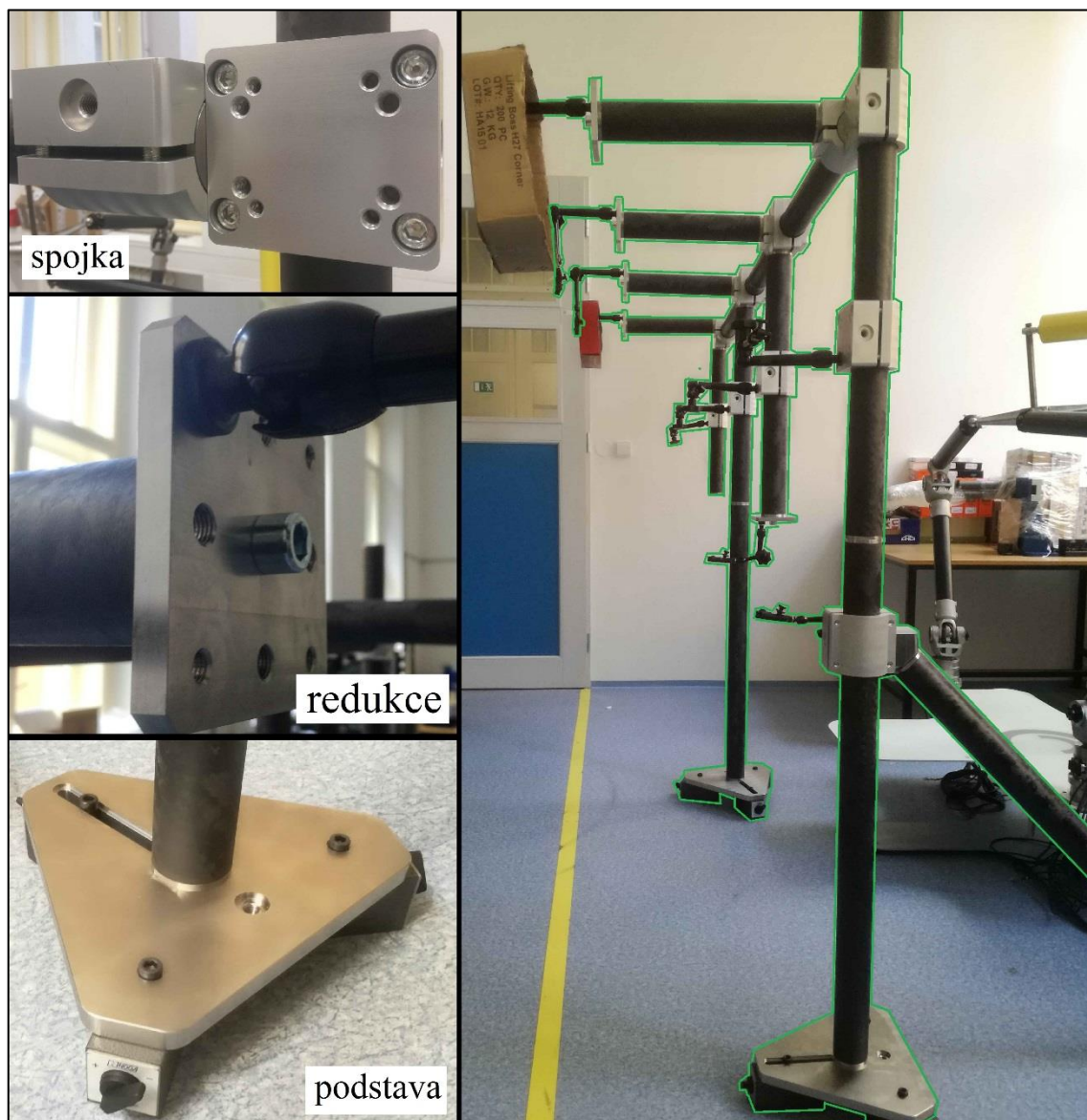
4.4 Provedení IV – Rám pro měření teplotních deformací

Rám tohoto provedení je momentálně používán k měření teplotních deformací. Je sestaven z kompozitních trubek, na jejichž koncích jsou přivařeny nátrubky s vnitřním závitem. Pomocí těchto závitů lze trubky spojovat dle potřeby stavěcími šrouby. Celou konstrukci dohromady drží na zakázku vyrobené spojky (viz obr. 4.8).

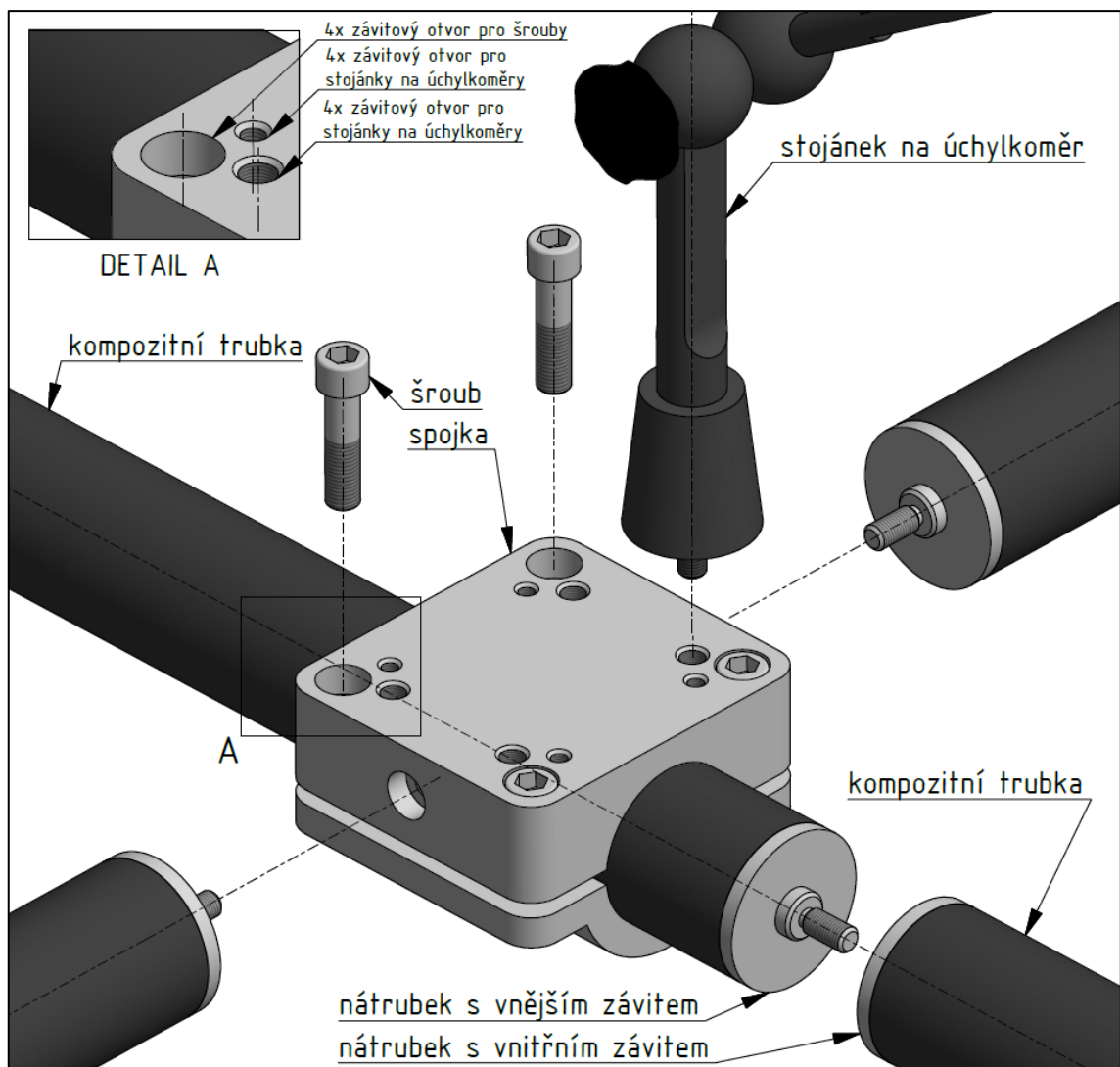
Spojka je připevněná na trubce pomocí svěrného spojení, které je zajištěno čtyřmi šrouby. Otvory s vnitřním závitem na stranách (viz obr. 4.8) jsou kompatibilní s vnějším závitem nátrubků a umožňují našroubování dalších dvou trubek k svírané trubce v kolmém směru. Na spojce jsou vedle otvorů na šrouby vyrobeny další otvory se závity pro stojánky na úchylkoměry. Kvůli kompatibilitě s větším množstvím stojánek jsou na ní vyvrtány dva rozměry závitových spojení M8x1,25 a M10x1. Tyto otvory jsou vyvrtané i v redukci (viz obr. 4.8), kterou lze přišroubovat na konec trubky.

Podstavu tvoří plech trojúhelníkového tvaru, ke kterému jsou přišroubovány magnetické podstavce. Díky nim lze rám připnout k pracovnímu stolu stroje (Lze pouze u velkých strojů, kde se předpokládá jeho velká tuhost, jinak by se jednalo o relativní měření.). Trubka je k podstavě přišroubovaná.

Díky tomu, že stojan není vcelku jako u předchozích variant, je možné jednotlivé části přenášet bez jakýchkoli větších problémů. Problém je jeho složitá a časově náročná sestavování.



Obr. 4.7 – Foto aktuálního provedení rámu IV



Obr. 4.8 – Detail použití spojky

4.5 Provedení V – Montážní stojan na kola

Stojan má za úkol držet kolo ve vzduchu a díky lepší přístupnosti zjednodušit jeho opravu/údržbu. Avšak po vyřešení problému s upnutím úchylkoměrů by mohl být použitelný pro měření tuhostí. Provedení těchto stojanů je celá řada.

4.5.1 Montážní Stojan FEEDBACK

Stojan je vyroben z hliníkové slitiny. Díky nízké hmotnosti 4,8 kg a kompaktním rozměrům je vhodný k přepravování. Jeho maximální nosnost je 38,5 kg [11].

Hlavní rozměry stojanu v rozloženém stavu jsou 1372x1372x1486 mm. Pracovní výška stojanu je v rozmezí 1067 – 1659 mm [11].

Čelisti jsou otočné o 360° a je možné do nich chytit trubku o průměru 19 – 48,25 mm. Posuvný upínací zámek umožňuje rychlé a bezpečné sevření. Svěrací čelist je pokrytá polypropylenem [11].

Hlavní stojan je složen ze dvou hliníkových tyčí, přičemž vrchní tyč lze zasunout do tyče spodní. Tímto je možné nastavovat výšku ramene dle potřeby. K jejich vzájemné aretaci je použita objímka s rychloupínací páčkou. Ta samá objímka je použita i k aretaci hlavního stojanu s třemi nohy (viz obr. 4.9 detail B). Páčka funguje na principu excentru, což umožňuje rychlé a snadné polohování.

Rameno je k hlavnímu stojanu připevněno pomocí svěrného spojení dvou objímek. Jedna z nich je ovládána utahovacím kolečkem s vnějším závitem (viz obr. 4.9 detail C).



Obr. 4.9 – Montážní Stojan FEEDBACK [11]

4.5.2 Montážní stojan Force

Skládá se z hlavního stojanu, ramene a dvounožky. Tyče jsou vyrobeny z hliníku. Hmotnost je 7,3 kg a jeho výška ve složeném stavu 1000 mm. Díky své hmotnosti a rozměrům je snadno přenositelný a skladný [12].

Horní čelist je vhodná k upnutí tyčí maximálního průměru 45 mm [12]. Upnutí je rychlé a jednoduché, zajištěno pákou s excentrem. Rozsah čelistí lze regulovat pomocí závitového spojení pod pákou.

Rameno je k hlavnímu stojanu připnuto pomocí objímek, které jsou přišroubovány upínacím kolečkem s vnějším závitem.

Výška ramene je regulovatelná pomocí objímky s rychloupínací páčkou. Ta funguje na principu excentru, proto je polohování výšky snadné a rychlé. Při polohování se vrchní tyč zasouvá do tyče spodní. Stejným mechanismem je k hlavnímu stojanu připevněna dvounožka. Provedení objímky s excentrickou páčkou je uzpůsobené pro přišroubování dvounožky.



Obr. 4.10 – Montážní stojan FORCE [12]

5 Upínací prvky

5.1 Utahovací kolečka

Dle závitu je lze rozdělit do dvou skupin na kolečka s vnějším závitem a kolečka s vnitřním závitem. Dle provedení krytek je lze rozdělit na **kolečka trojramenná, hvězdicová, tříhranná, vroubkovaná, rýhovaná, křídlové šrouby a křídlové matice** [13].

Ruční kolečka hvězdicová regulovatelná jsou vhodná pro aplikace, kdy je potřeba aby se zamezilo dotažení kolečka a aby se při nechtěném dotažení či povolení protáčelo [13].

Ruční kolečka hvězdicová bezpečnostní jsou kolečka, k jejichž povolení je potřeba speciální klíč. To zamezí neautorizovaným osobám s neoprávněnou manipulací. K utažení klíč není potřeba [13].

Ruční kolečka hvězdicová rychloupínací se čtvercovou dírou se vyrábí v provedení 20 (vytahovací síla 20 N) a 100 (vytahovací síla 100 N) a umožňují snadnou montáž na čtyřhranné hřídele [13].



Obr. 5.1 – Utahovací kolečka [13]

5.2 Regulační prvky

Tyto prvky jsou používány v případech, kdy je potřeba nastavení určité polohy (např. posuv pracovního stolu u obráběcích strojů). Jejich provedení může být ve formě koleček či pák [13].

Regulační kolečka existují v různých provedení: **s vroubkovaným okrajem a stupnicí, hvězdicová s ukazatelem, s rukojetí, s drážkovým okrajem, hvězdicová s rukojetí** atd [13].

Regulační kolečka s definovaným nastavením a aretací lze použít v případech, kdy je potřeba po ustavení do určené polohy tuto pozici zajistit [13].

Také existují **polohovací páky**, které díky drážkám lze ustavit v několika předem určených polohách [13].



Obr. 5.2 – Regulační prvky [13]

5.3 Rychloupínače

Jedná se o pákové mechanismy, používané k pevnému spojení dvou součástí. K součástem se standardně montují pomocí šroubů. Základními provedeními jsou **rychloupínače svislé/vodorovné s horizontálním/vertikálním upevněním**. Jedná se o jednoduché rychloupínače. Ty se montují k součástem pomocí šroubů. V závislosti na provedení a velikosti dosahují přídržné síly až 4600 N [13].

Těžké provedení svislého rychloupínače se používá v případech, kdy je požadována vysoká přídržná síla (až 30000 N). Obě části se montují přivařením [13].

Přímé rychloupínače pro tlačně-tažné upínání se skládají pouze z jednoho kusu, který se montuje k jedné součásti. V případě tlačného upínání tlačné těleso působí silou na jinou součást, kterou je potřeba v dané poloze zajistit. Při tažném upínání je tažná součást k tělesu přišroubována. Přídržná síla dosahuje až 45000 N [13].

Hákový rychloupínač s tažným upínáním je jednoduchý. K jedné součásti je přišroubován a druhou přitahuje pomocí háku. Přídržná síla dosahuje až 4000 N [13].

Třmenový rychloupínač se skládá ze dvou dílů. Oba jsou přišroubované k součástem a přitahují se pomocí třmenu. Na koncích třmenů je vyroben závit, díky kterému lze nastavovat upínací sílu dle potřeby. Při těžkém provedení dosahují přídržné síly až 40000 N [13].

Pneumatické rychloupínače jsou ovládány pneumaticky. Dosahují přídržných sil až 3000 N, v případě těžkého provedení 20000 N [13].



Obr. 5.3 – Rychloupínače [13]

6 Vlastní řešení

6.1 Návrhy úprav stojanu

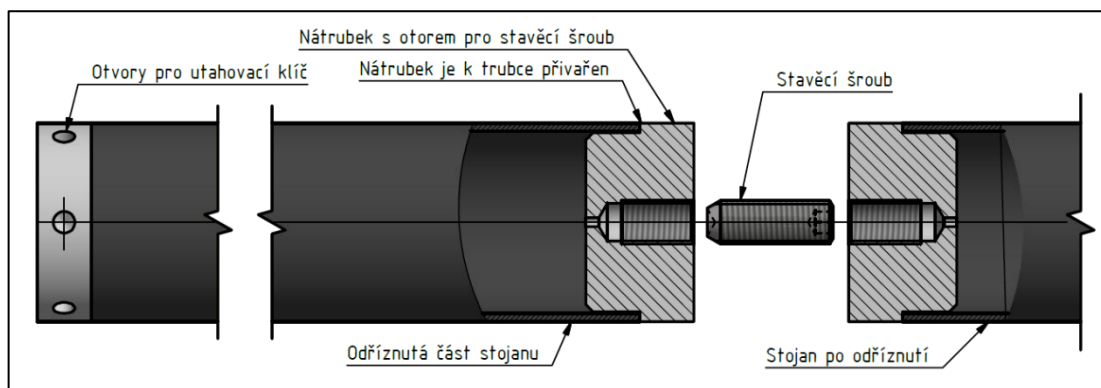
V této práci je pro navrhovaný rám využít stojan z provedení I (viz obr. 4.1). Jak je již zmíněno výše, stojan je vysoký přibližně 2,6 m, váží přibližně 61 kg a průměr upínací tyče pro spojky je 110 mm.

Také je potřeba navrhované součásti přizpůsobit ramenům o průměru 60 mm, které jsou také k dispozici na Ú12135, ČVUT-FSI. Délka ramen je 1,3 m a jsou vyrobeny z kompozitu. Na jejich koncích jsou přilepeny nátrubky s vnitřním závitem a spojují se pomocí stavěcích šroubů.

6.1.1 Zkrácení stojanu a využití jeho odříznuté části

Jednou z prvních úprav stojanu je jeho zkrácení na výšku 1,3 m. Pro měření je tato výška dostačující a bude možné stojan převážet ve většině osobních automobilech. Tato výška bude vhodná i pro jeho přemísťování jednou osobou.

Využití odříznuté části stojanu je zobrazeno na obr. 6.1. Tato část má tvar trubky o délce přibližně 1,3 m. Na oba konce této trubky je přivařen nátrubek se závitovým otvorem pro stavěcí šroub. V nátrubku je vyvrtáno šest otvorů pro utahovací klíč, díky kterým je možné přídavnou trubku ke stojanu utáhnout. V nátrubku je vyvrtán průchozí otvor, díky kterému po svaření (ev. po lepení) uvnitř trubky nedojde k přetlaku.



Obr. 6.1 – Využití odříznuté části stojanu

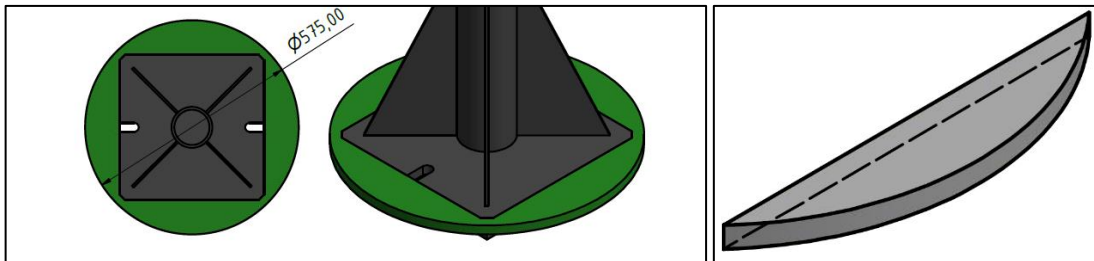
Nátrubek je přivařen také na vrchní konec stojanu po odříznutí.

6.1.2 Úpravy podstavy stojanu

Podstava by po úpravě měla být přibližně kruhového průřezu kvůli jednoduššímu přesouvání jednou osobou. Obsluha pak bude moci stojan přepravovat koulením po podlaze bez její poškození.

Jedním z návrhů je nechat z plechu o tloušťce 15 mm vypálit kruhovou podstavu s otvorem o průřezu aktuální podstavy (na obr. 6.2. zobrazen zeleně). Vypálený plech je

přivařen ke stojanu. Nevýhoda tohoto provedení je nestabilní poloha při jeho přepravě v horizontální poloze. Kdyby byl takto položen v kufru automobilu, při pohybu do zatáček by se stojan díky kruhové neudržel na jednom místě.



Obr. 6.2 – Výpalek s otvorem o průřezu aktuální podstavy

Obr. 6.3 – Přídavný plechový segment

Další z možností je nechat vypálit čtyři plechy ve tvaru kruhové úseče (viz obr. 6.3). Přivaření všech čtyř plechů způsobí problém při převážení v kufru automobilu jako při použití výpalku s otvorem (viz předchozí odstavec). Proto jsou k podstavě přivařeny pouze tři a jeden je ponechán jako další součást. Stojan je možné pokládat na stranu bez plechu, čímž se zamezí jeho nechtěnému přetočení (viz obr. 6.3). Zbylý plech je dále označován jako přídavný plech.



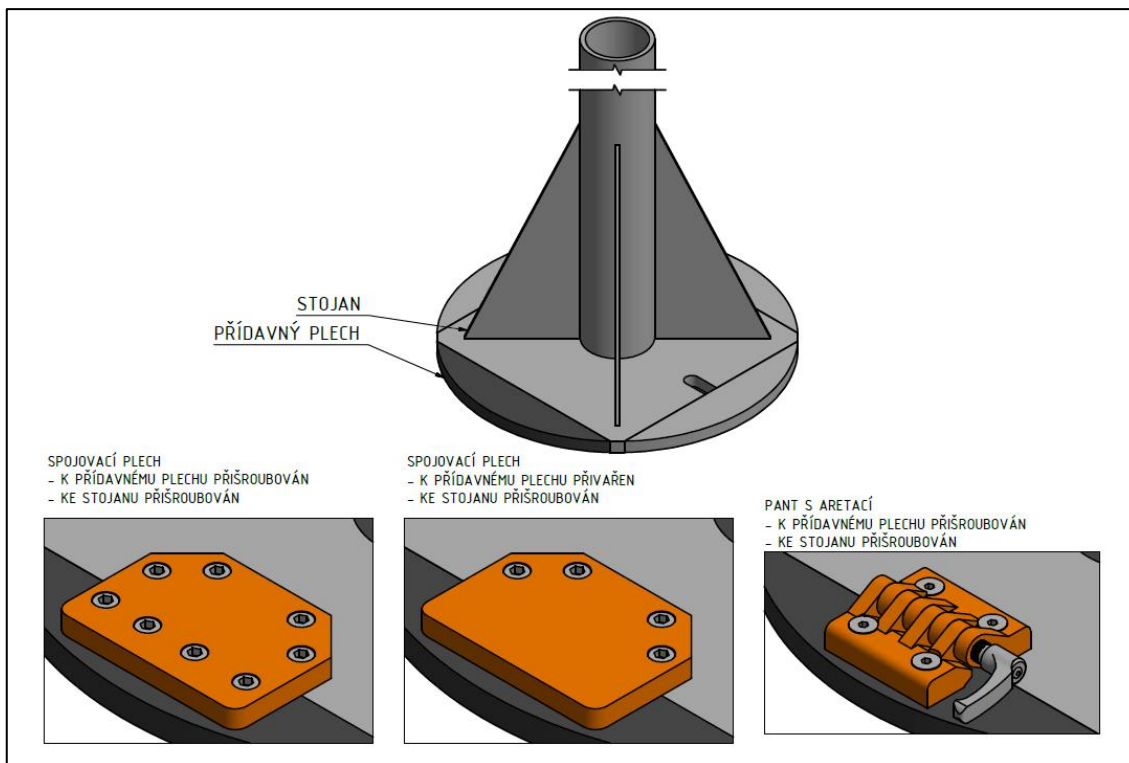
Obr. 6.4 – Znáznornění stojanu v položeném stavu

Jedna z možností připevnění přídavného plechu je pomocí pantu s aretací (viz obr. 6.5). Ten umožňuje jeho naklápění a zajištění v požadované poloze. Změna polohy je rychlá a snadná. Nevýhoda této varianty je zaplněný prostor navrchu podstavy pantem a utahovací páčkou s nemožností položit na ni případnou zátěž pro získání větší stability rámu. (Příklad přidané zátěže je zobrazena při měření na obr. 3.2).

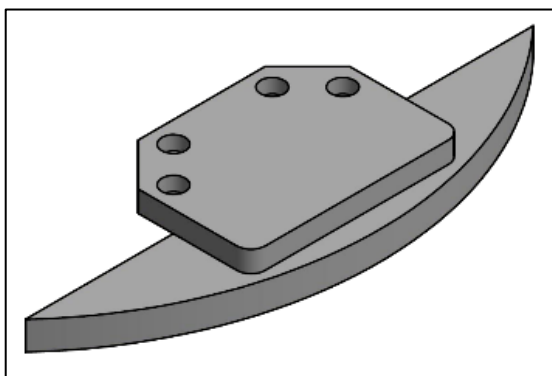
Další variantou připevnění přídavného plechu ke stojanu je použití spojovacích plechů (viz obr. 6.5). Spojovací plech nezabírá prostor do výšky a umožňuje pokládání případné zátěže pro získání větší stability rámu.

Spojovací plech k přídavnému plechu může být přišroubován či přivařen (viz obr. 6.5), jelikož ho ale nebude potřeba odpojovat, výslednou variantou je trvalé spojení svařením spojovacího a přídavného plechu.

Přídavný plech je po této úpravě zobrazen na obr. 6.6. V podstavě stojanu jsou vyvrtány závitové otvory pro tento přídavný plech a jejich spojení zajišťují dva šrouby s kuželovou hlavou M12.



Obr. 6.5 – Možnosti upevnění přídatného plechu

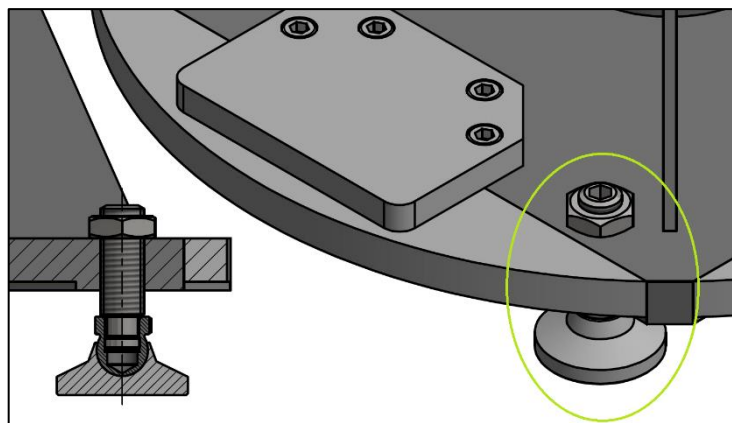


Obr. 6.6 – Přídatný plechový segment po úpravě

6.1.3 Výroba otvorů pro polohovací nohy

Do podstavy stojanu jsou vyvrtány čtyři otvory se závitem pro polohovací nohy s opěrkou. Jejich provedení je zobrazeno na obr. 6.7.

Základem polohovacích noh je šroub M20, na jehož konci je vyroben závit M16. Závit M16 je pro opěrku, která je zajištěna maticí. Celek je pak zašroubován do stojanu za pomoci většího závitu M20 a zajištěn maticí. Detail provedení včetně popisu je zobrazen v řezu na obr. 6.10.



Obr. 6.7 – Provedení polohovací nohy ve stojanu

6.1.4 Přizpůsobení stojanu sklopným vzpěrám

Popis využití a jednotlivé návrhy sklopných vzpěr jsou popsány v kapitole 6.2 níže. Vybraná varianta je zobrazena na obr. 6.10 a pro její upevnění ke stojanu je potřeba do výztuh rámu vyvrtat otvory pro šroubová spojení (viz obr. 6.10).

6.2 Návrh sklopných vzpěr

Při některých měřeních je potřeba větší stabilita rámu, které nemusíme dosáhnout ani přidáním závaží na podstavu. Vyšší stability lze dosáhnout přidáním sklopných vzpěr. K upnutí těchto vzpěr jsou využity výztuhy na podstavě stojanu.

6.2.1 Provedení sklopných vzpěr a jejich porovnání

Na obr. 6.8 jsou zobrazeny čtyři různá provedení sklopných vzpěr. Jejich délky se pohybují okolo 0,55 m od osy stojanu. Ve všech těchto variantách je použita polohovací noha se závitem M16 od firmy elesa+GANTER [13], jehož zajištění je řešeno šroubem M8, který po dotažení sevře dva plechy ve směru osy šroubu a zamezí otáčení polohovací nohy. Princip tohoto mechanismu je zobrazen na obr. 6.9.

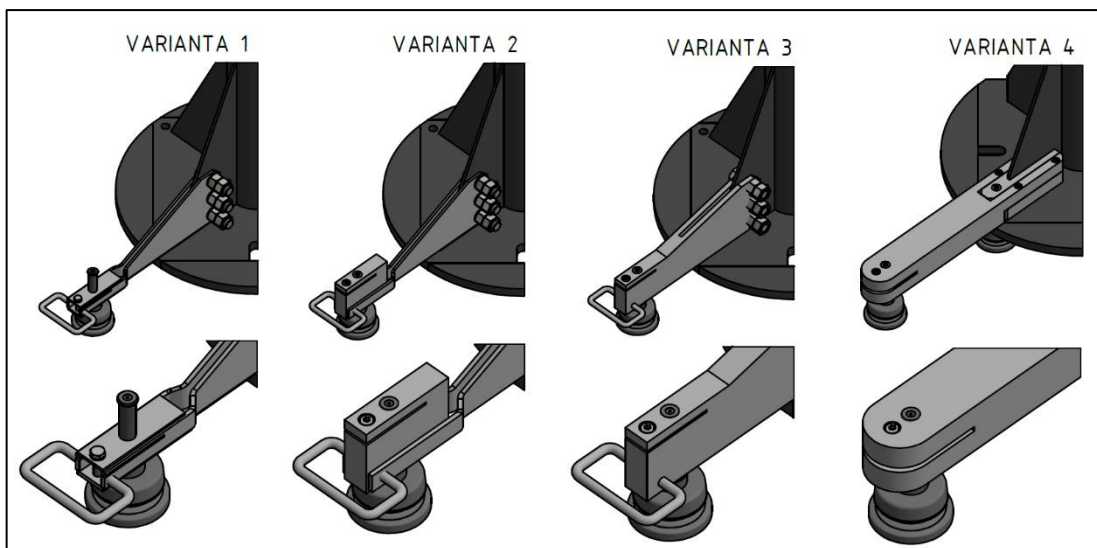
Základem varianty 1 jsou dva boční ohnuté plechy, které jsou na jednom konci přivařeny ke dvěma menším spojovacím plechům, ve kterých jsou vyrobeny závitové otvory pro nohu a zajišťovací šroub. Výřez potřebný k ohnutí vrchní části a následnému zajištění nohy je na bočních plechách.

Jelikož jsou závitové otvory vyrobeny v plechových dílech, a ne v plném materiálu, činná část závitů je poměrně velice malá a mohlo by docházet k jejich rychlému opotřebení.

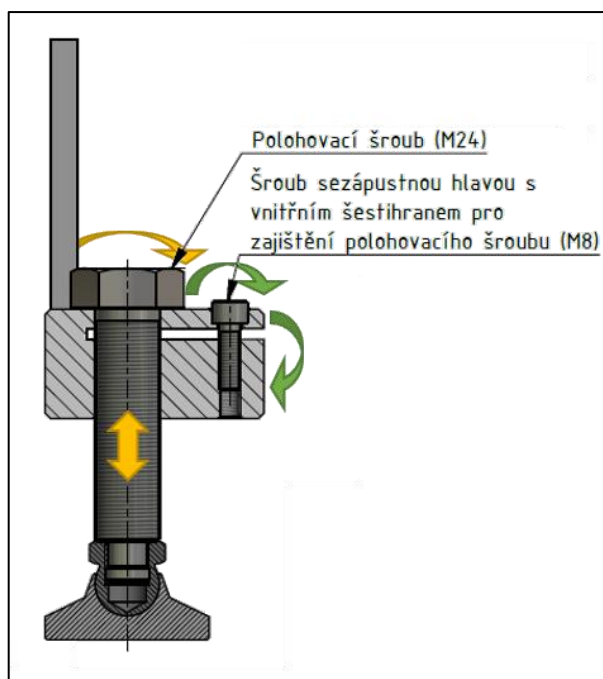
Varianty 2 a 3 jsou koncepčně stejné jako varianta 1. U varianty 2 jsou boční plechy spojeny blokem plného materiálu, ve kterém jsou vyrobeny závitové otvory pro nohu a zajišťovací šroub. Varianta 3 je vyrobena celá z jednoho silnějšího plechu.

Na konci nohy u variant 1-3 je přivařena ohnutá tyč, která zakrývá ostré hrany a zabraňuje možnosti nechtěného zranění obsluhy při procházení kolem rámu.

Varianta 4 je složena ze dvou obrobků. Jedna část je přivařena ke stojanu a druhá část, jejíž konec je protikus první části, je k první připevněna pomocí šroubů.



Obr. 6.8 – Návrhy sklopných vzpěr č. 1-4

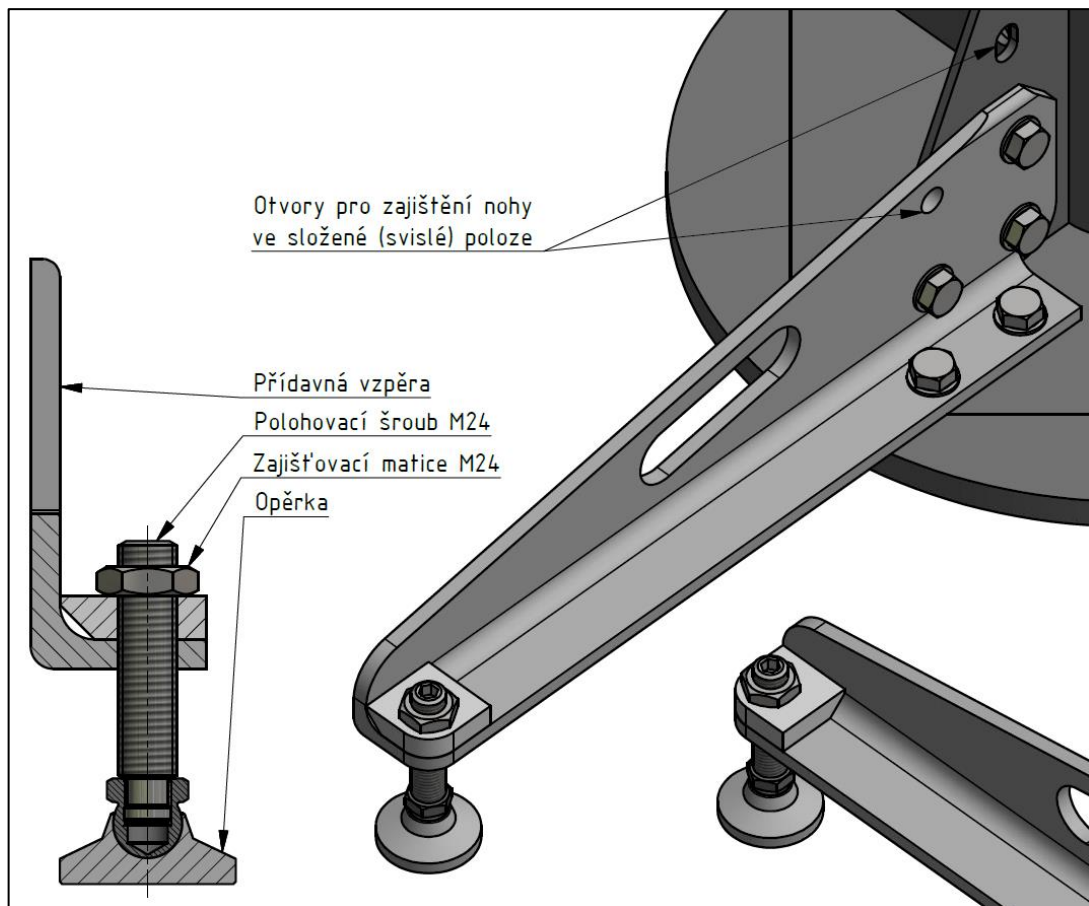


Obr. 6.9 – Princip zajištění polohovací nohy

Na Obr. 6.10 je zobrazena varianta č. 5. Konstrukce polohovací nohy je stejná jako u stojanu a popsána v kapitole 6.1.3.

Základem této varianty je válcovaný L profil, na jejímž konci je přivařen blok plného materiálu. Po svaření těchto součástí je v bloku a L profilu vyroben závit M20 pro polohovací nohu.

Vzpěry jsou ke stojanu připevněny pěti šrouby se závitem M16 a zajištěny pěti nylstop maticemi. Vzpěra je navržena tak, aby ji po uvolnění čtyř šroubových spojení bylo možné sklopit podél stojanu.



Obr. 6.10 – Návrh sklopné vzpěry č. 5

Varianta 5 je díky svému provedení nejlehčí z variant, tudíž umožňuje nejjednodušší manipulaci s dostačující tuhostí. Varianta 4 je jasně nejlepší z hlediska tuhosti, ale zároveň se jedná o nejtěžší variantu a tím pádem je nejhorší co se týče manipulace. Varianta 5 má díky ohnutému plechu tuhost dostačující. Z hlediska estetiky jsou lepší varianty 4 a 5.

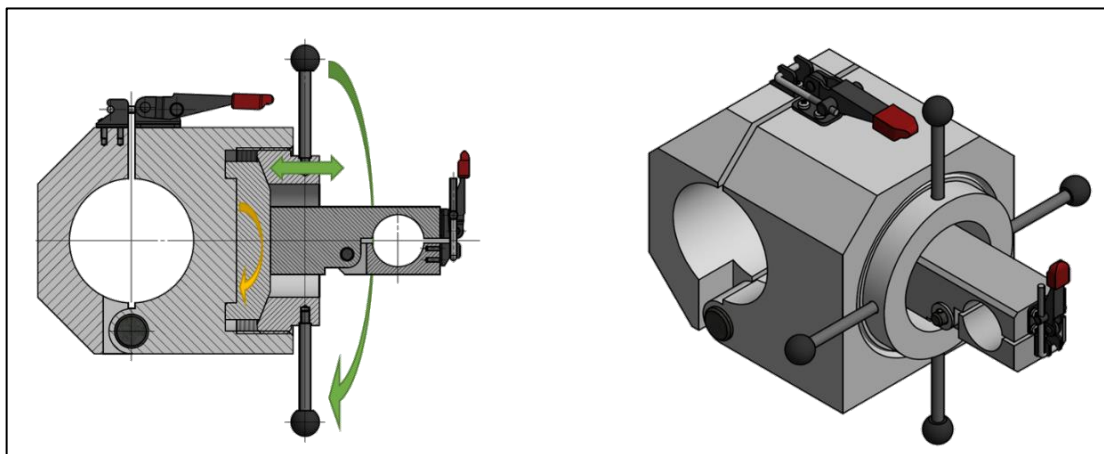
Jako výsledná je vybrána varianta č. 5. Z manipulačního hlediska je díky své nízké hmotnosti nejlepší a díky L profilu má dostačující tuhost.

6.3 Návrh spojek

Spojka určená pro spojení stojanu a ramene je označena jako velká a spojka pro spojení ramen je označena jako malá. Průměr stojanu, kterému je potřeba spojku přizpůsobit činí 110 mm. Průměr ramen je 60 mm.

6.3.1 Spojka velká – varianta A – Rychloupínače

Spojka je na stojanu a rameni přichycena pomocí svěrného spojení dvou objímek, zajištěných třmenovými upínači firmy elesa+GANTER [13]. Kloubová část je řešena čepem. Ten je proti vypadnutí zajištěn kolíkem. Velká objímka je opatřena vnitřním závitem pro matici s pákovými rukojetí. Na dně otvoru je vyroben vodící výstupek pro kotouč, na kterém je přivařena objímka pro rameno. Po povolení matice je možné nastavovat úhel ramene vzhledem k podlaze.



Obr. 6.11 – Spojka velká – varianta A

Díky tomuto provedení má vysokou tuhost, avšak nevýhodou jsou celková hmotnost a velikost. Hmotnost spojky je 49 kg a dosahuje rozměrů 200x200x355 mm bez pákových rukojetí. Proto by se s ní hůře manipulovalo. Další nevýhodou je nutnost vyrobení závitu M165, což není dobré z finančního hlediska.

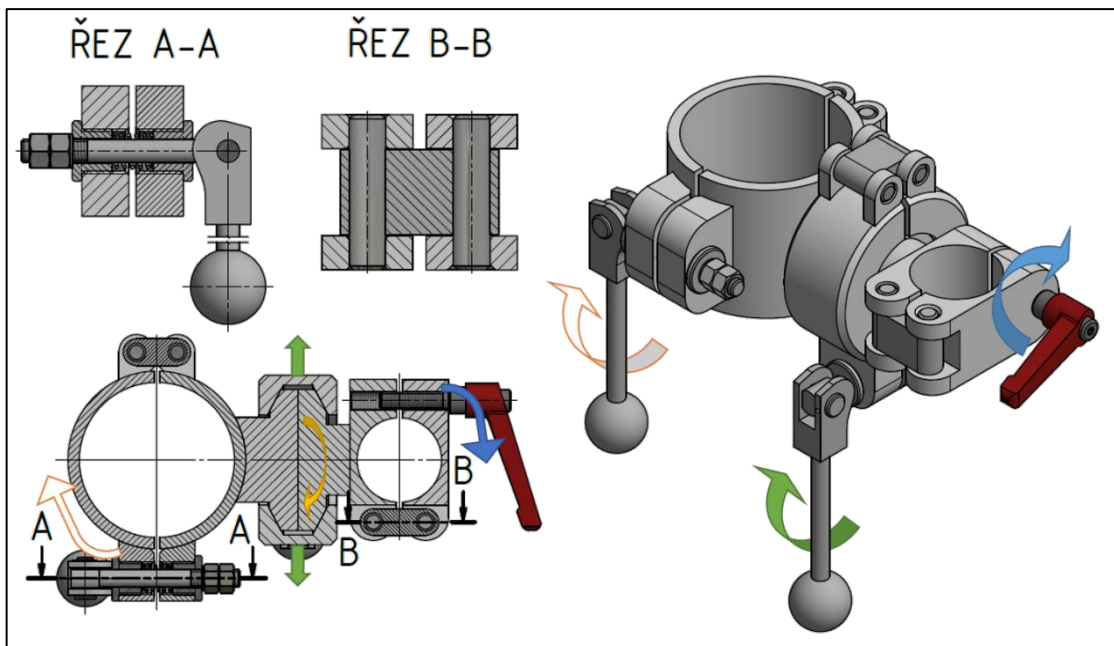
Rychloupínače umožňují rychlé a jednoduché povolení, ale v případě, kdy je potřeba posunout rameno, na kterém už jsou měřidla, či změnit jeho výšku, je přenastavení velice obtížné. Rychloupínač nelze povolit jen částečně, lze ho pouze utáhnout, či úplně povolit. Nemá žádný mezistav potřebný pro jemnější seřízení.

6.3.2 Spojka velká – varianta B – Excentrické páky

U této varianty jsou objímky navrženy jako svařence. Objímky držící na stojanu a rameni zde nejsou spojeny závitovým spojením jako u předchozí varianty, ale třecím spojením. Kotouče jsou přivařené ke krajním objímkám sevřené dalšími objímkami. Spojení těmito kotouči umožňuje natočení ramene. Po jeho ustavení do požadované polohy se pákou sevřou objímky k sobě a díky tření se zamezí dalšímu pootáčení kotouče.

Objímky jsou ve všech případech na jedné straně spojeny pomocí kolíků (viz řez B-B na obr. 6.12). Čepy jsou zajištěny pojistným kroužkem a šroub dvěma maticemi. Po povolení těchto matic lze nastavovat vzdálenost objímek.

Objímky na stojanu a objímky používané k natočení ramene jsou zajištěny excentrickými pákami, které umožňují kromě utážení a povolení i částečné povolení pro jemné nastavování.



Obr. 6.12 – Spojka velká – varianta B

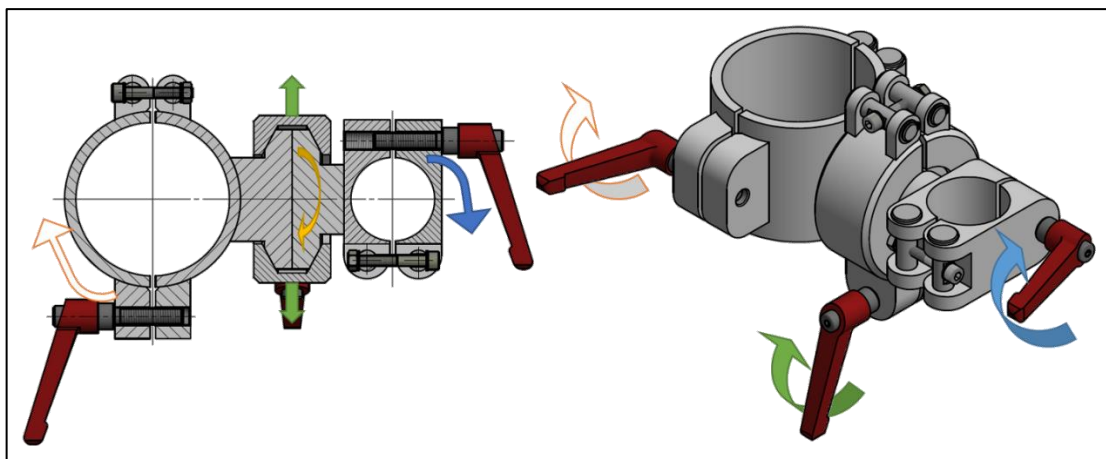
Detail spojení objímek excentrickou pákou je zobrazen v řezu A-A na obr. 6.12. V objímkách jsou vyrobeny závitové otvory pro pouzdra. Pouzdra je vedeno táhlo excentrické páky. Táhlo je zajištěno dvěma maticemi. Mezi pouzdra je vložena pružina, která zajišťuje rozevření spojení po povolení excentrické páky.

Objímky svírající rameno jsou zajištěny závitovým spojením. Použita je závitová páka od firmy elesa+GANTER [13]. Nastavování není tak rychlé jako u excentrické páky, ale je umožněno jemné nastavování. Excentrickou páku zde není vhodné využít kvůli menší velikosti objímek, která svírají ramena.

6.3.3 Spojka velká – varianta C – Závitové páky

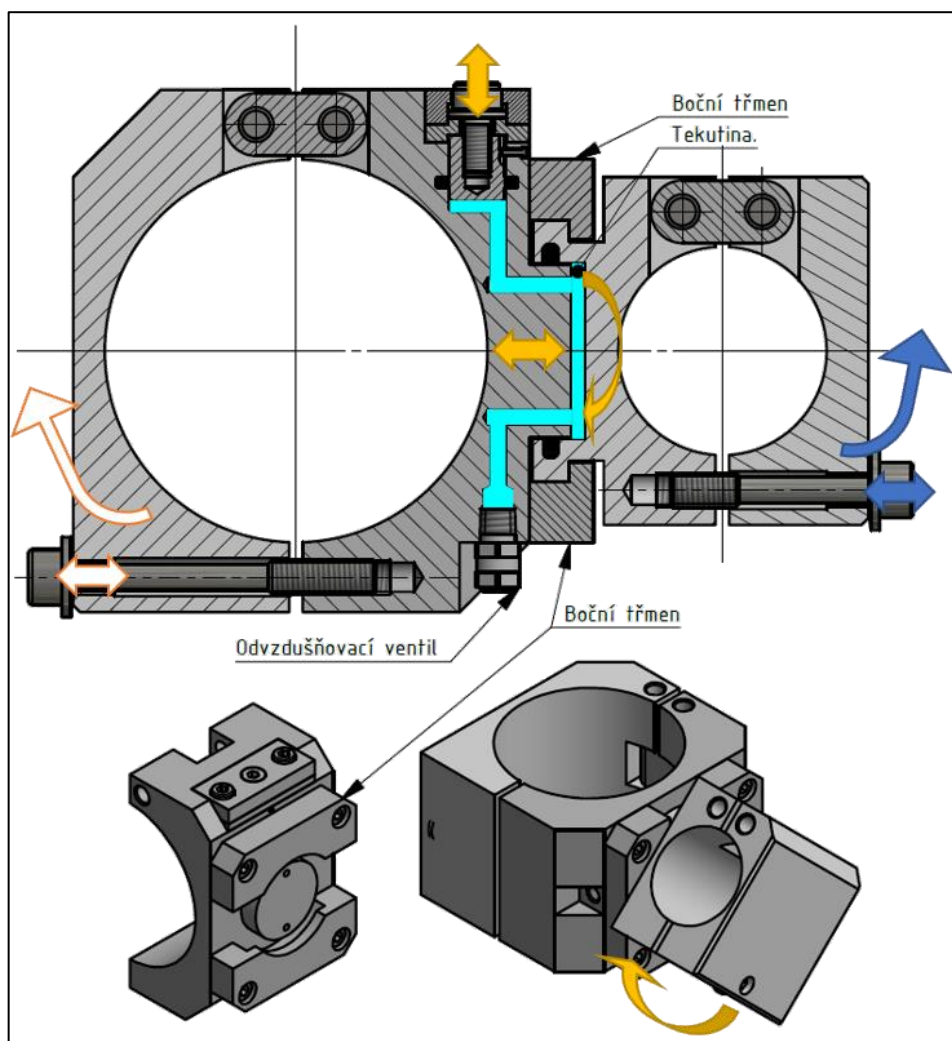
Tato varianta se z větší části shoduje z předchozí. Skládá se ze tří objímkových spojů. Objímky jsou navrženy jako svařence. Natáčení ramene je možné díky kotoučovému třecímu spoji. Objímky jsou na spojeny šroubem, který prochází otvorem v čepech (viz řez B-B na obr. 6.12), což umožňuje seřizování jejich vzdáleností.

V této variantě jsou excentrické páky u objímek svírající stojan a kotouče nahrazeny závitovými páky. Jak je zmíněno výše, nastavování je oproti excentrickým pákám pomalejší, ale toto provedení je jednodušší z hlediska sestavení (Ke spojení objímek je potřeba méně součástí.) a je výrobně levnější. Není zde potřeba vyrábět pouzdra a není zde použita žádná pružina. Stačí v jedné objímce vyrobit závit pro páku a v druhé vyvrtat průchozí otvor (V předchozí variantě je zapotřebí vyrobit závit pro pouzdra v obou objímkách).



Obr. 6.13 – Spojka velká – varianta C

6.3.4 Spojka velká – varianta D – Hydraulická



Obr. 6.14 – Spojka velká – varianta D

Jedná se o spojku složenou ze čtyř objímek. Krajní objímky jsou na jedné straně spojeny pomocí kolíků a na druhé straně zajištěny šroubem. Pod šroubem je kulová podložka, která po sevření objímek kompenzuje nemožnost nastavení vzdálenosti objímek.

Vnitřní objímky jsou spojeny pomocí hydraulického mechanismu (viz obr. 6.14). Levá objímka je zakončena výstupkem o kruhovém průřezu. Objímka je tímto výstupkem zasunuta do objímky s vnitřním vybráním a zajištěna třmeny.

Při stlačení pístu šroubem se objímka s vybráním opře o třmeny a vytvoří pevné spojení. Po jeho povolení lze spojky vůči sobě natáčet dle potřeby.

6.3.5 Porovnání a výběr velké spojky

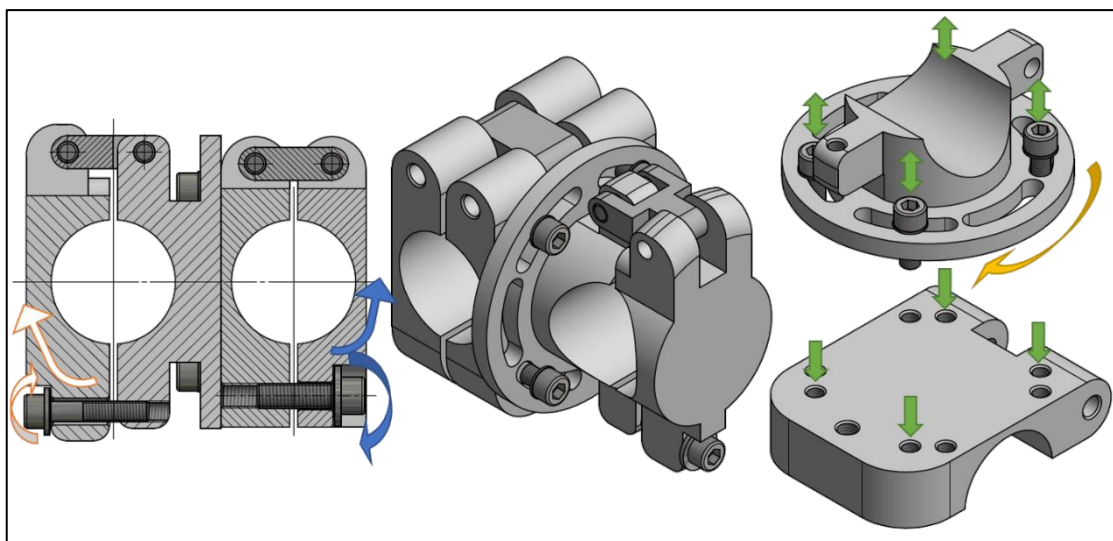
Jak je popsáno výše u varianty A (rychloupínače), pro jednoduché a jemné nastavování není vhodné použití rychloupínačů, proto tato varianta není vybrána.

Ostatní varianty (Hydraulická, excentrické a závitové páky) umožňují jednoduché a jemné nastavování. Z hlediska rychlosti nastavitelnosti je vhodnější varianta B s excentrickými pákami.

Hydraulická varianta obsahuje méně částí a má nejmenší osovou upínací vzdálenost (Oproti ostatním je kratší o 20 mm). Umožňuje jednoduché a jemné nastavování polohy. Proto je tato varianta vybrána jako výsledná.

6.3.6 Spojka malá – varianta A – Kotoučová

Spojka je zobrazena na obr. 6.15. Je složena ze čtyř objímek. Krajní objímky jsou na jedné straně spojeny pomocí kolíků a na druhé straně zajištěny šroubem. Pod šroubem je kulová podložka, která po sevření objímek kompenzuje nemožnost nastavení vzdálenosti objímek.



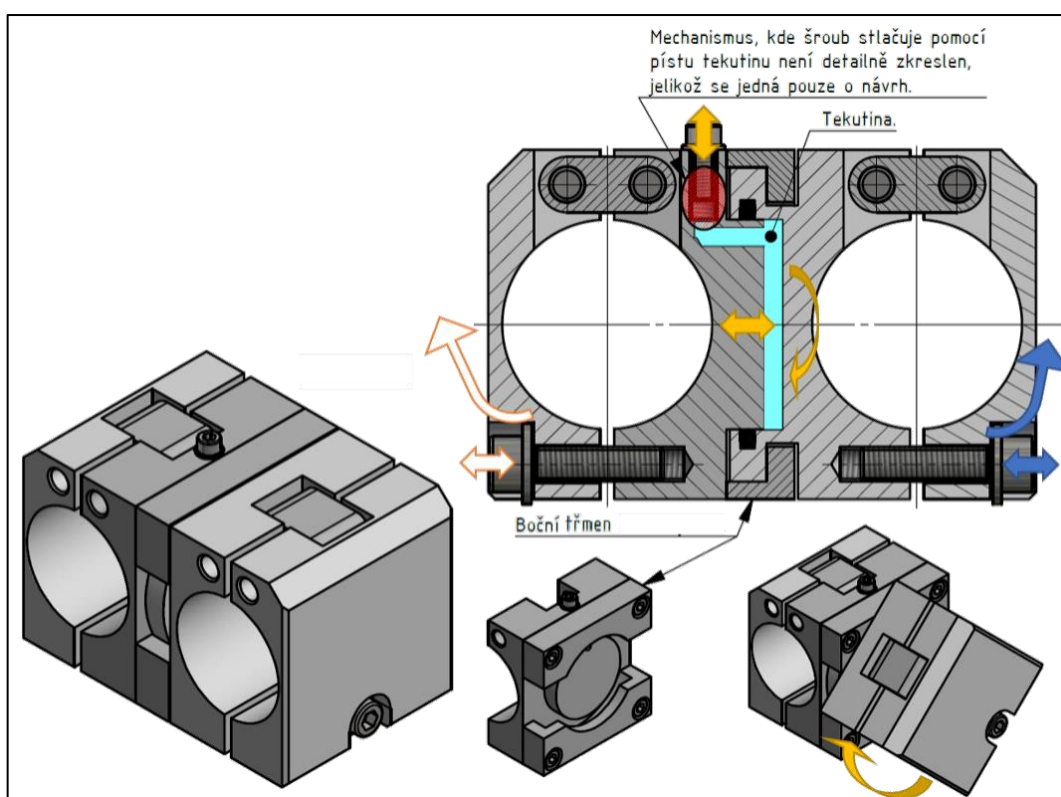
Obr. 6.15 – Spojka malá – varianta A

Vnitřní objímky jsou spojeny pomocí šroubů. Spojovací konec jedné objímky má tvar disku. V tomto disku je vyrobeno šest kruhových drážek pro šrouby. V druhé objímce je vyrobeno osm závitových otvorů, jejichž osy jsou na stejné kružnici jako kruhové drážky na první objímce.

Na obr. 6.15 vpravo je vidět detail tohoto spojení. Po povolení šroubů lze objímkami otáčet dle potřeby a spojit i různoběžná ramena.

Objímka s kotoučem je dle obr. 6.15 navržena jako jedna součást. Kvůli složitosti obrábění by stálo za zvážení její rozdělení na dvě součásti, které by byly spojeny šrouby. Nicméně se zatím jedná pouze o návrh provedení, proto je toto téma odloženo do doby, kdy tato varianta bude vybrána jako výsledná.

6.3.7 Spojka malá – varianta B – Hydraulická



Obr. 6.16 – Spojka malá – varianta B

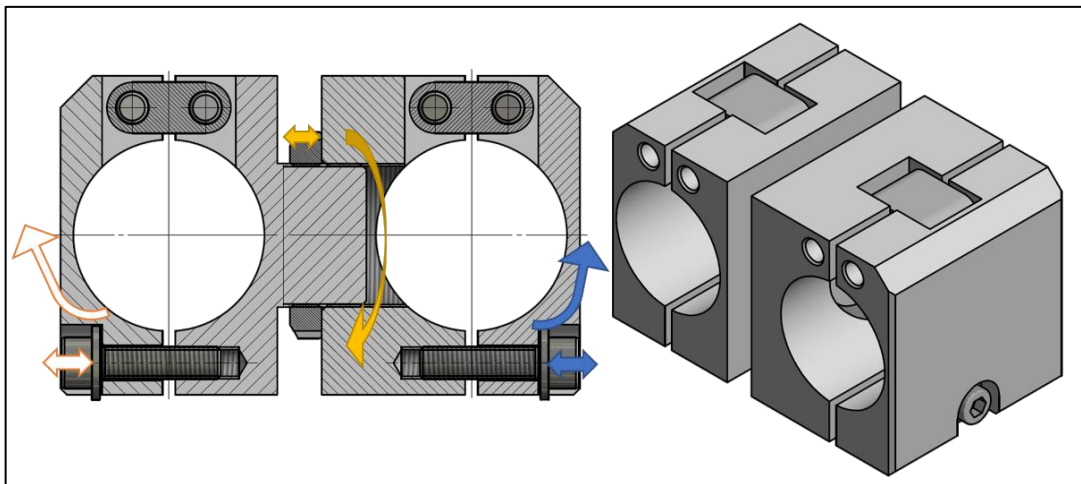
Jedná se o spojku složenou ze čtyř objímek. Krajní objímky jsou na jedné straně spojeny pomocí kolíků a na druhé straně zajištěny šroubem. Pod šroubem je kulová podložka, která po sevření objímek kompenzuje náklonnost šroubu.

Vnitřní objímky jsou spojeny pomocí hydraulického mechanismu (viz obr. 6.16). Levá objímka je zakončena výstupkem o kruhovém průřezu. Objímka je tímto výstupkem zasunuta do objímky s vnitřním vybráním a zajištěna třmeny.

Při stlačení pístu šroubem se objímka s vybráním opře o třmeny a vytvoří pevné spojení. Po jeho povolení lze spojky vůči sobě natáčet dle potřeby.

Při výběru této varianty je potřeba konstrukčně dořešit část u pístu a popřípadě zvážit přidání odvzdušňovacího ventilu jako u velké hydraulické varianty (obr. 6.14).

6.3.8 Spojka malá – varianta C – KM matice



Obr. 6.17 – Spojka malá – varianta C

Opět se jedná o spojku složenou ze čtyř objímek. Krajní objímky jsou na jedné straně spojeny pomocí kolíků a na druhé straně zajištěny šroubem. Pod šroubem je kulová podložka, která po sevření objímek kompenzuje náklonnost šroubu.

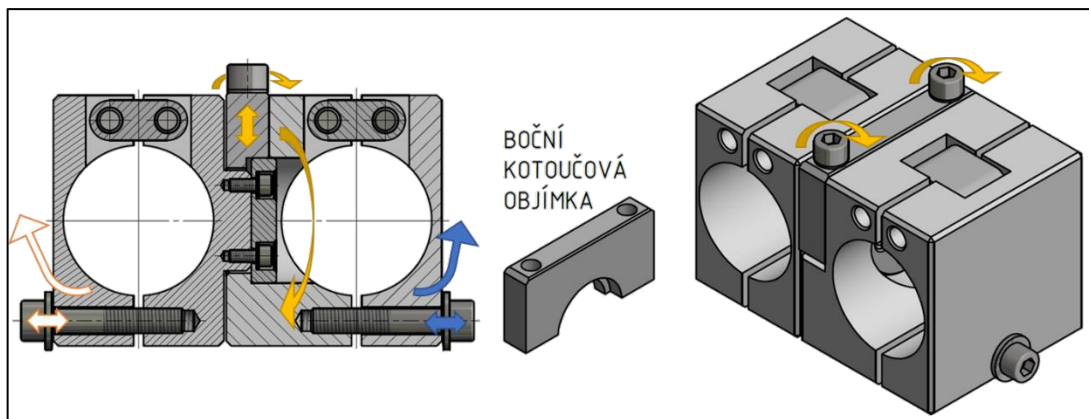
Vnitřní objímky jsou spojeny pomocí KM matice (viz obr. 6.17). V pravé objímce je vyroben otvor s vnitřním závitem M45. Levá objímka je zakončena vnějším závitem M45. Na levou objímku je nejdříve našroubována KM matice, až poté se na ní našroubuje pravá objímka. Po nastavení potřebného umístění spojky/netočení ramen se matice přitáhne k pravé objímce a tím znemožní možnost dalšího natáčení.

Nevýhodou tohoto provedení je potřeba použití f klíče.

6.3.9 Spojka malá – varianta D – Použití třmenu

Opět se jedná o spojku složenou ze čtyř objímek. Krajní objímky jsou na jedné straně spojeny pomocí kolíků a na druhé straně zajištěny šroubem. Pod šroubem je kulová podložka, která po sevření objímek kompenzuje náklonnost šroubu.

Vnitřní objímky jsou spojeny pomocí třmenu (boční objímky, viz obr. 6.18). Levá objímka je zakončena výstupkem kruhového tvaru. V něm jsou vyrobeny čtyři závitové otvory. Po vložení do pravé objímky je zevnitř přišroubován disk, který fixuje objímky pohromadě. Boční objímka je přišroubována k levé objímce a po úplném dotažení se opře o disk a zamezí dalšímu otáčení.



Obr. 6.18 – Spojka malá – varianta D

6.3.10 Porovnání a výběr malé spojky

Varianta s boční objímkou je výrobně jednodušší oproti kotoučové a hydraulické. Nevýhoda kotoučové spojky je, že při určitých natočeních ji lze dotáhnout pouze dvěma šrouby, jelikož další otvory jsou zakryté druhou objímkou. U hydraulické spojky je navíc potřeba údržba hydraulické části, výměna těsnění apod. (U velké spojky je potřeba dosáhnout větších svíracích sil, jelikož spojka musí udržet tíhu celého ramene včetně spojek na něm umístěných. Proto ji v předchozím případě bylo vhodné použít i za cenu údržby hydraulické části.). U varianty s KM maticí je nevýhodou potřeba použití f klíče, což při nastavování ramen není úplně ideální. Proto je vybrána jako vítězná varianta D se třmenem.

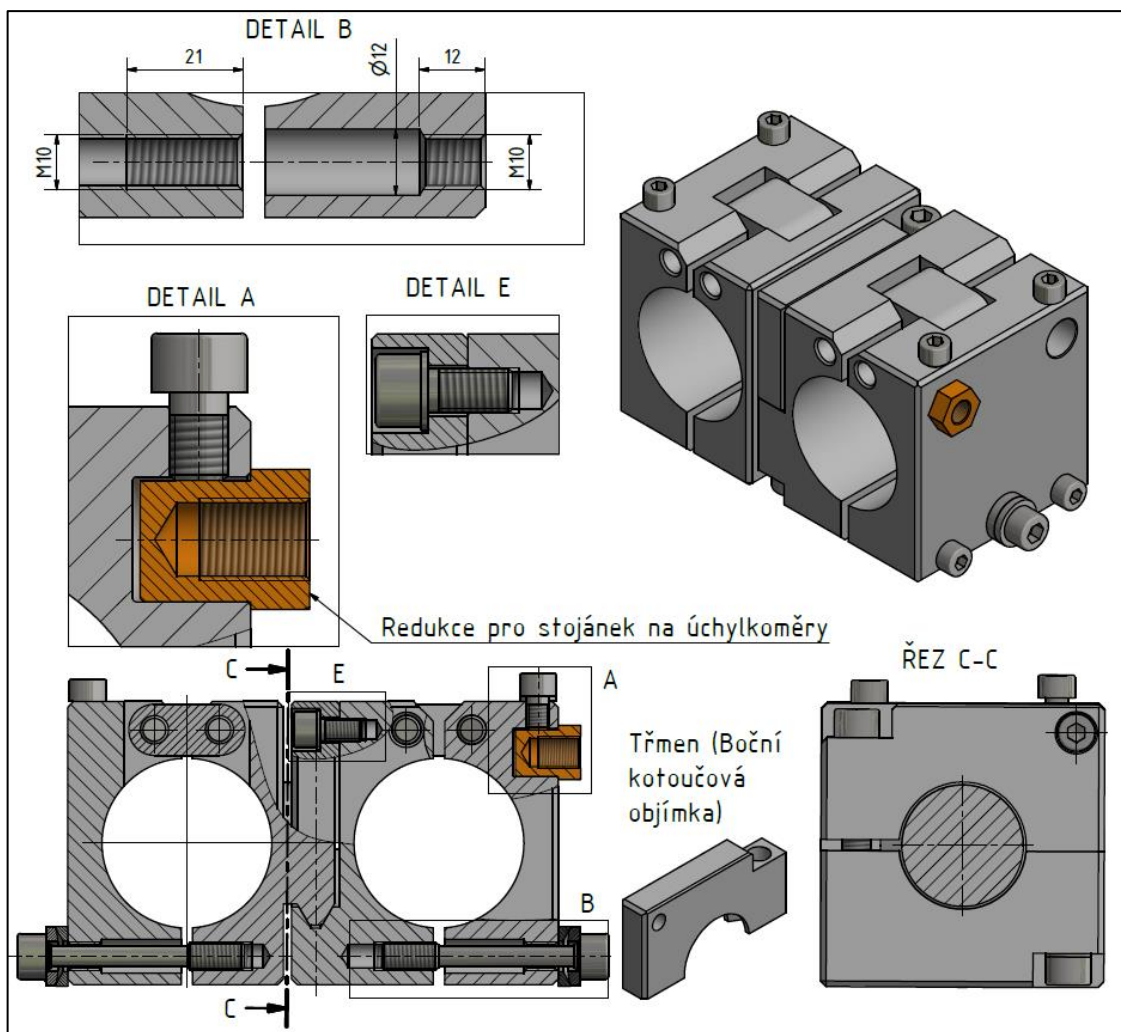
6.3.11 Úpravy malé spojky

Přišroubovaný disk, který drží obě části spojky pohromadě je nahrazen kotoučem, který je součástí jedné spojky. V druhé spojce je drážka, do které je disk vložen a zajištěn třmenem. Tímto provedením je dosaženo stejné tuhosti spojení při použití menšího počtu součástí. Provedení je zobrazeno na obr. 6.19.

V krajních objímkách je také upraven otvor pro šroub, zajišťující sevření ramen. Otvor začíná závitem M10 o délce 12 mm a dále pokračuje otvorem o průměru 11 mm vyvrtaným z druhé strany (viz obr. 6.19 detail B). Závít M10 o délce 12 mm zajišťuje šroub proti vypadnutí po jeho vyšroubování z druhé objímky.

Dále je upraven třmen (viz řez C-C na obr. 6.19). Levý šroub byl zahloben do dílu, protože ho při měření není nutno rozebírat, ale pouze povolovat či utahovat. Pravá část třmenu je upravena tak, že při smontování spodní plochou dosedá až k objímce a je k ní přišroubována příčně (viz detail E na obr. 6.19).

Poslední úpravou malé spojky je její přizpůsobení možnosti připevnění stojánku na úchylkoměry pomocí redukce (viz detail A na obr. 6.19). Jejich účel a provedení je popsán v kapitole 6.3.12 níže.



Obr. 6.19 – Spojka malá – varianta D po úpravách

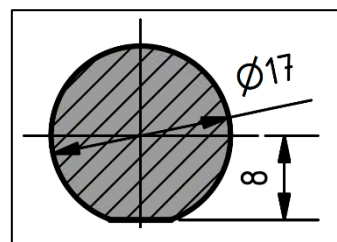
6.3.12 Možnost připevnění stojánků na úchylkoměry

Pro jednoduchou manipulaci s úchylkoměry je na obr. 6.22 navržena redukce, která se pomocí šestihranu jednoduše našroubuje na stojánek namísto magnetické části a pak už se jen upne k rámu. Navrženy jsou dva typy redukce pro dva nejpoužívanější závitové konce stojánků na úchylkoměry M10x1 a M8x1,25.

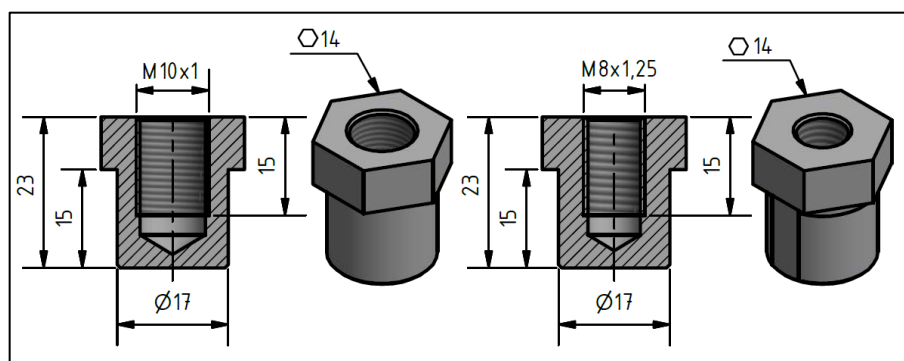
Těmito redukcím je malá spojka přizpůsobena. V krajních objímkách jsou vyvrtány otvory pro redukce z bočních stran a otvory pro šrouby z vrchní strany (viz obr. 6.19 detail A). Redukce jsou po zasunutí do spojky zajištěny šroubem s vnitřním šestihranem. Na redukcích je u průměru 17 zfrézována plocha, o kterou se opírá čelo šroubu (viz obr. 6.21).



Obr. 6.20 – Stojánek na úchylkoměry bez přídržného magnetu



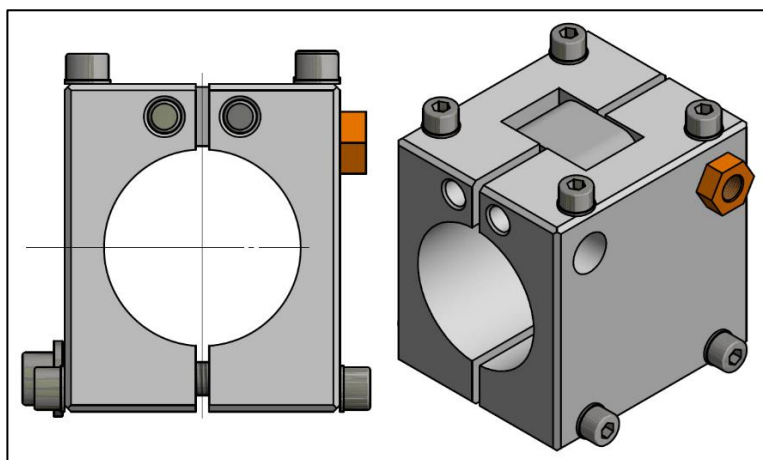
Obr. 6.21 – Průřez upínací části redukce



Obr. 6.22 – Redukce pro úchylkoměry

Po spojení krajních objímek malé spojky, přičemž v jedné je místo průchozího otvoru pro šroub vyroben závit, je získána spojka pro úchylkoměry. Ten je možné připnout kamkoli na rameno. Není tedy určen ke spojení více ramen, ale pouze k upnutí úchylkoměrů.

Na tuto spojku lze upnout až osm kloubových stojáneků současně. Na stojánek je našroubována redukce, ta se spolu se stojánkem vloží do spojky a zajistí šroubem. Poté se na stojánek upne úchylkoměr a vše je připraveno k měření.



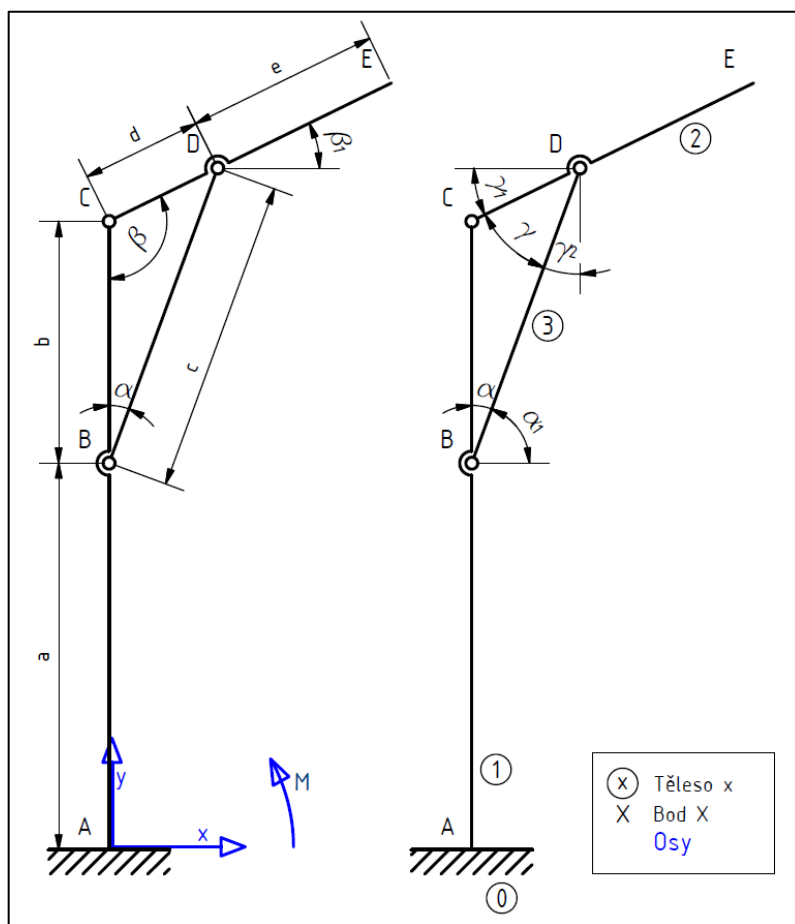
Obr. 6.23 – Spojka pro stojánky

7 Výpočtová část

V této části práce je potřeba porovnat deformaci rámu od direkční síly úchylkoměru s měřícím zdvihem úchylkoměru.

Při výpočtu jsou použity údaje snímače typu T072P od výrobce Mesing, kde jeho měřící síla je 1 N a měřící zdvih je 2 mm [19]. To znamená, že při stlačení měřícího hrotu o 2 mm, tedy měřené deformaci 2 mm, úchylkoměr na rám působí silou 1 N. Zvolená výpočetní geometrie rámu je zobrazena na obr. 7.1. a rozměry jsou vypsány v tab. 7.1.

$$Z = 2 \text{ mm} \quad (7.1)$$



Obr. 7.1 – Geometrie rámu

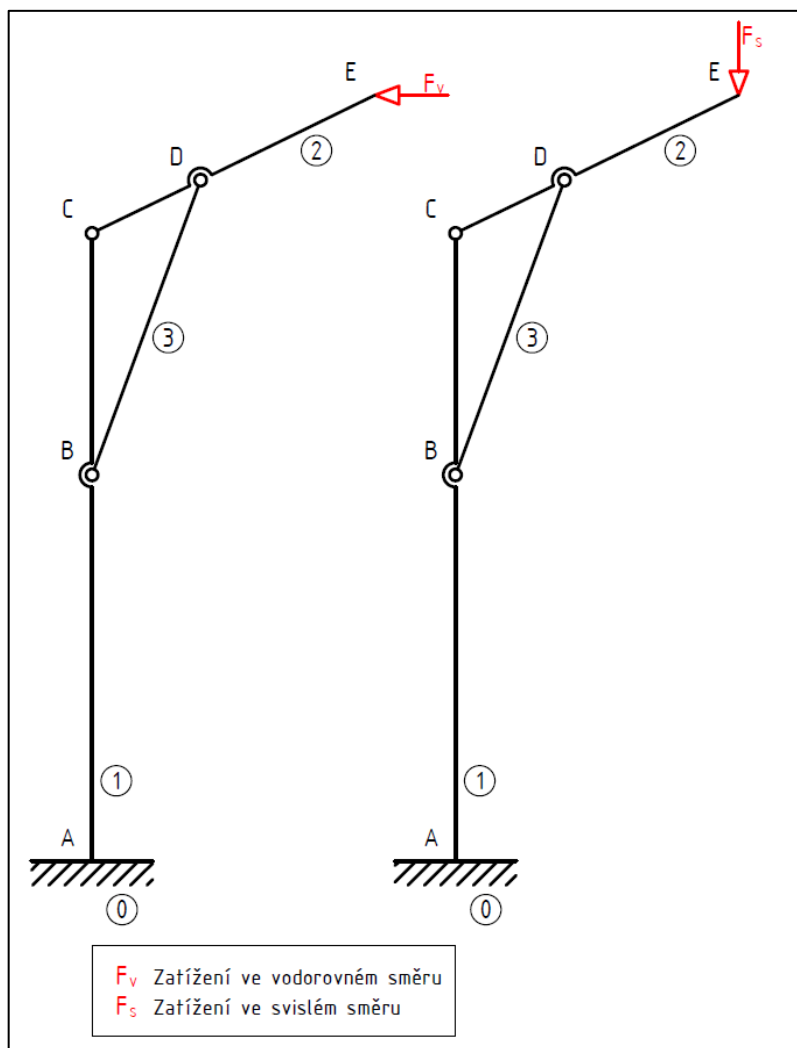
a	[m]	1,6	β	[°]	116,1
b	[m]	1,0	γ	[°]	43,7
c	[m]	1,3	α₁	[°]	69,8
d	[m]	0,5	β₁	[°]	26,1
e	[m]	0,8	γ₁	[°]	26,1
α	[°]	20,2	γ₂	[°]	20,2

Tab. 7.1 – Výpočtové rozměry

Rám je v praxi zatížen několika úchytkoměry, které jsou na rameni. Kvůli zjednodušení úlohy je uvažováno zatěžování v bodě E, který se vyskytuje na konci ramene. Z hlediska zatěžování rámu je tento bod nejhorší možnou volbou umístění zatížení, proto byl pro výpočet tento bod zvolen. Výpočet bude proveden pro případ zatížení ve vodorovném i svislém směru (viz obr. 7.2).

Dále je uvažován extrémní případ použití 5 úchytkoměrů. Proto je bod E zatížen pětinasobnou hodnotou měřící síly.

$$F_V = F_S = 5 N \quad (7.2)$$



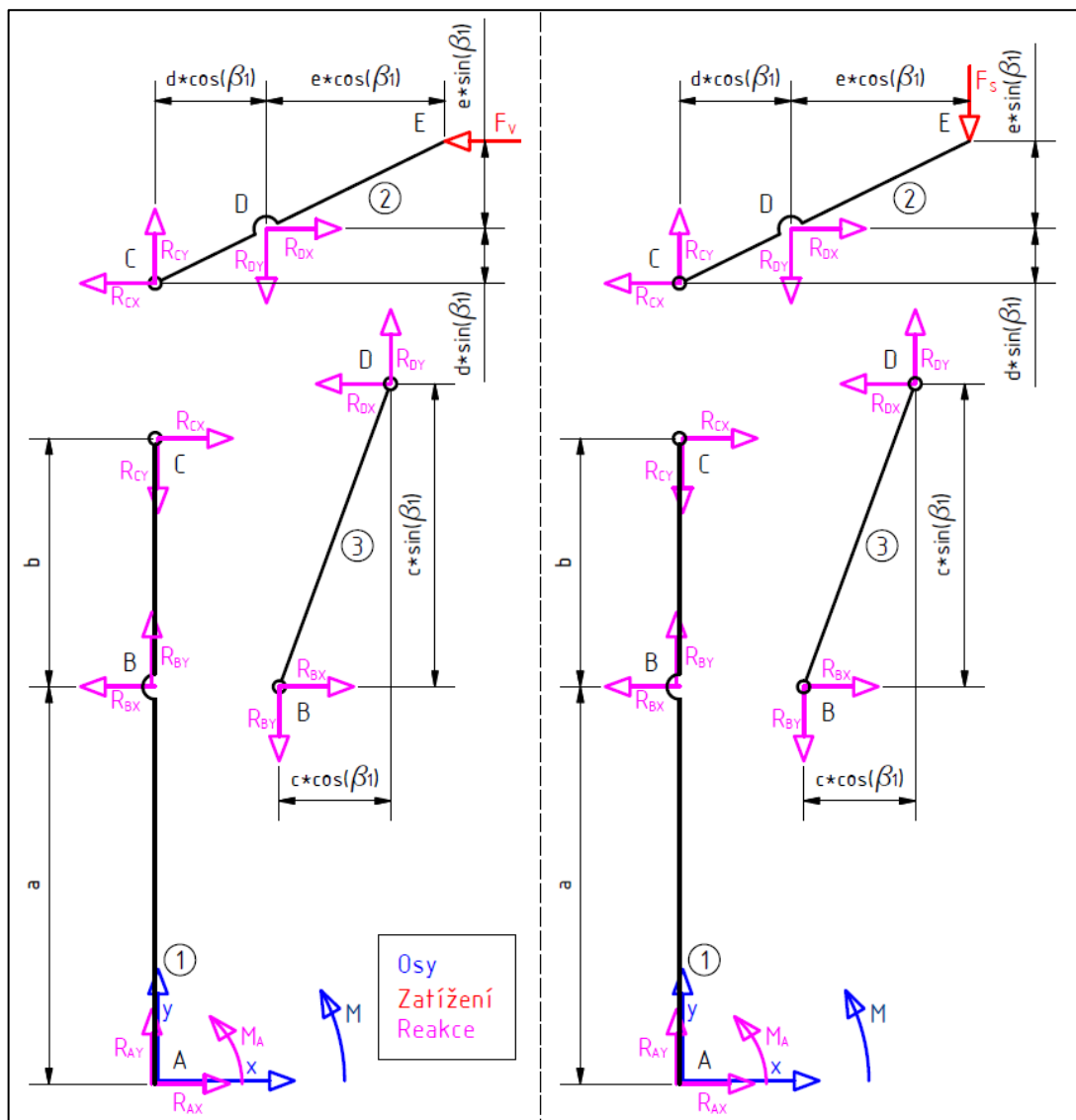
Obr. 7.2 – Zatížení rámu

7.1 Postup výpočtu

Nejprve jsou vypočteny reakce od zatížení v jednotlivých uloženíh, poté je těleso č. 3 nahrazeno vypočtenými reakcemi v kloubových spojeníh (body B a D) a pomocí Mohrova integrálu je zjištěno posunutí v bodě E. Nakonec je ze zatěžující síly a posunutí bodu E zjištěna tuhost rámu.

7.2 Reakce od zatížení v jednotlivých uloženíh

Jedná se o soustavu těles, které je potřeba uvolnit. Uvolnění jednotlivých těles je zobrazeno na obr. 7.3.



Obr. 7.3 – Uvolnění těles

Počet stupňů volnosti (Stejně pro vodorovné i svislé zatížení)

$$\begin{aligned}
 i &= 3 * (n - 1) - 2 * (r + p + v) - o \\
 &= 3 * (4 - 1) - 2 * (3 + 0 + 0) - 3 = 0
 \end{aligned}
 \tag{7.3}$$

Soustava nemá žádný stupeň volnosti, jedná se tedy o soustavu nepohyblivou a staticky určitou. Pro každé těleso jsou níže sepsány statické rovnice rovnováhy.

Statické rovnice rovnováhy pro těleso 1 – stejné pro vodorovné i svislé zatížení

$$\sum F_x = R_{AX} - R_{BX} + R_{CX} = 0 \quad (7.4)$$

$$\sum F_y = R_{AY} + R_{BY} - R_{CY} = 0 \quad (7.5)$$

$$\sum M_B = M_A + R_{AX} * a - R_{CX} * b = 0 \quad (7.6)$$

Statické rovnice rovnováhy pro těleso 2 – vodorovné zatížení

$$\sum F_x = R_{DX} - R_{CX} - F_V = 0 \quad (7.7)$$

$$\sum F_y = R_{CY} + R_{DY} = 0 \quad (7.8)$$

$$\sum M_D = F_V * e * \sin(\beta_1) - R_{CY} * d * \cos(\beta_1) - R_{CX} * d * \sin(\beta_1) = 0 \quad (7.9)$$

Statické rovnice rovnováhy pro těleso 2 – svislé zatížení

$$\sum F_x = R_{DX} - R_{CX} = 0 \quad (7.10)$$

$$\sum F_y = R_{CY} - R_{DY} - F_S = 0 \quad (7.11)$$

$$\sum M_D = -F_S * e * \cos(\beta_1) - R_{CY} * d * \cos(\beta_1) - R_{CX} * d * \sin(\beta_1) = 0 \quad (7.12)$$

Statické rovnice rovnováhy pro těleso 3 – stejné pro vodorovné i svislé zatížení

$$\sum F_x = R_{BX} - R_{DX} = 0 \quad (7.13)$$

$$\sum F_y = R_{DY} - R_{BY} = 0 \quad (7.14)$$

$$\sum M_D = R_{BX} * c * \sin(\alpha_1) + R_{BY} * c * \cos(\alpha_1) = 0 \quad (7.15)$$

Ze soustavy devíti rovnic o devíti neznámých jsou níže obecně vyjádřeny jednotlivé reakce. Číselné výsledky jsou zobrazeny v tab. 7.2. Výpočty jsou provedeny dle uvedených vzorců ve výpočetním programu Microsoft Excel (viz elektronická příloha EP1). Číselné dosazení vyjádřených vzorců je v příloze TP1.

Vyjádření reakcí pro vodorovné zatížení

$$R_{CY} = \frac{F_V * e * \sin(\beta_1) + F_V * d * \sin(\beta_1)}{d * \cos(\beta_1) - \frac{c * \cos(\alpha_1) * d * \sin(\beta_1)}{c * \sin(\alpha_1)}} \quad (7.16)$$

$$R_{DX} = -\frac{R_{CY} * c * \cos(\alpha_1)}{c * \sin(\alpha_1)} \quad (7.17)$$

$$R_{BY} = R_{CY} \quad (7.18)$$

$$R_{DY} = R_{CY} \quad (7.19)$$

$$R_{CX} = R_{DX} - F_V \quad (7.20)$$

$$R_{BX} = -\frac{R_{BY} * c * \cos(\alpha_1)}{c * \sin(\alpha_1)} \quad (7.21)$$

$$M_A = -F_V * a + R_{DX} * b - F_V * b \quad (7.22)$$

$$R_{AX} = F_V \quad (7.23)$$

$$R_{AY} = 0 \quad (7.24)$$

Vyjádření reakcí pro svislé zatížení

$$R_{CY} = \frac{-F_S * e * \cos(\beta_1) - \frac{F_S * c * \cos(\alpha_1) * d * \sin(\beta_1)}{c * \sin(\alpha_1)}}{d * \cos(\beta_1) - \frac{c * \cos(\alpha_1) * d * \sin(\beta_1)}{c * \sin(\alpha_1)}} \quad (7.25)$$

$$R_{DX} = -\frac{(R_{CY} - F_S) * c * \cos(\alpha_1)}{c * \sin(\alpha_1)} \quad (7.26)$$

$$R_{BY} = R_{CY} - F_S \quad (7.27)$$

$$R_{DY} = R_{CY} - F_S \quad (7.28)$$

$$R_{CX} = R_{DX} \quad (7.29)$$

$$R_{BX} = -\frac{R_{BY} * c * \cos(\alpha_1)}{c * \sin(\alpha_1)} \quad (7.30)$$

$$M_A = R_{DX} * b \quad (7.31)$$

$$R_{AX} = 0 \quad (7.32)$$

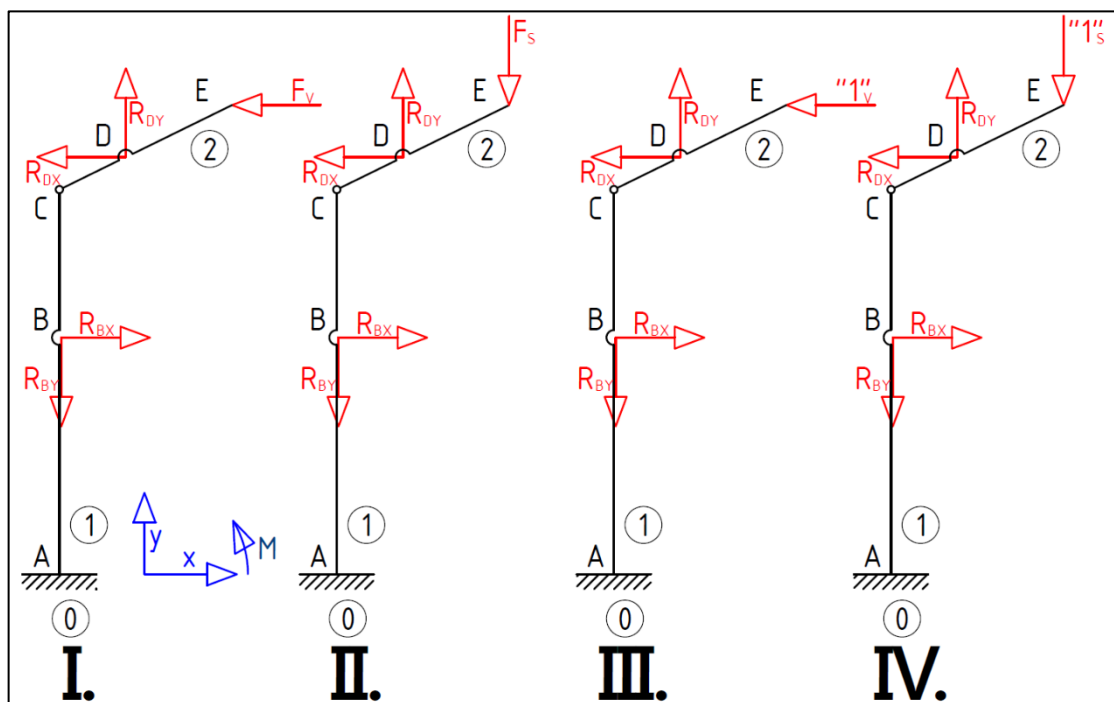
$$R_{AY} = F_S \quad (7.33)$$

Vodorovné zatížení				Svislé zatížení			
Reakce	Vzorec	Jednotka	Hodnota	Reakce	Vzorec	Jednotka	Hodnota
R_{AX}	(7.23)	[N]	5,00	R_{AX}	(7.32)	[N]	0,00
R_{AY}	(7.24)	[N]	0,00	R_{AY}	(7.33)	[N]	5,00
R_{BX}	(7.21)	[N]	-2,86	R_{BX}	(7.30)	[N]	5,84
R_{BY}	(7.18)	[N]	7,77	R_{BY}	(7.27)	[N]	-15,86
R_{CX}	(7.20)	[N]	-7,86	R_{CX}	(7.29)	[N]	5,84
R_{CY}	(7.16)	[N]	7,77	R_{CY}	(7.25)	[N]	-10,86
R_{DX}	(7.17)	[N]	-2,86	R_{DX}	(7.26)	[N]	5,84
R_{DY}	(7.19)	[N]	7,77	R_{DY}	(7.28)	[N]	-15,86
M_A	(7.22)	[N*m]	-15,86	M_A	(7.31)	[N*m]	5,84

Tab. 7.2 – Číselně vyjádřené reakce

7.3 Posunutí bodu E

Na obr. 7.4 je zobrazeno nahrazení tělesa č. 3 vypočtenými reakcemi R_{BX} , R_{BY} , R_{DX} a R_{DY} . Pro výpočet posunutí bodu E je potřeba tento bod zatížit jednotkovými silami ve směru posunutí. Na konci bude vypočteno posunutí ve směrech os x a y od vodorovného i svislého zatížení.



Obr. 7.4 – Rám po nahrazení tělesa 3 vypočtenými reakcemi

I – Rám zatěžován silou ve vodorovném směru

II – Rám zatěžován silou ve svislém směru

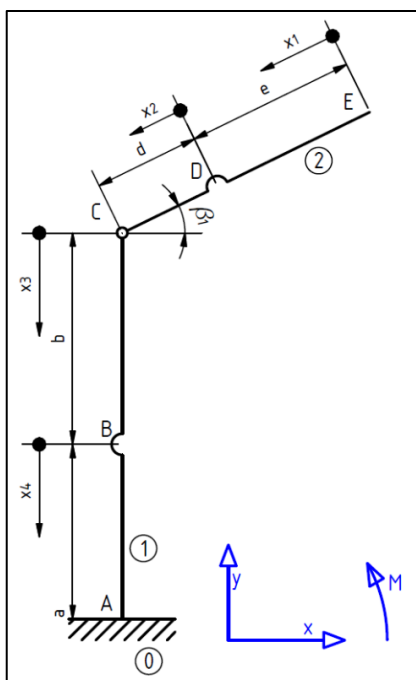
III – Rám zatěžován jednotkovou silou ve vodorovném směru

IV – Rám zatěžován jednotkovou silou ve svislém směru.

Výpočet posunutí pomocí Mohrova integrálu obecně

$$u = \sum_{g=1}^h \frac{1}{EJ} * \int_{(l)} M_o(x_1) * m_o(x_1) * dx_1 \quad (7.34)$$

Na obr. 7.5 je zakótována geometrie rámu použitá ve výpočtu jednotlivých posunutí. Rám je rozdělen na oblasti E-D, D-C, C-B a B-A. V jednotlivých oblastech jsou definovány proměnné souřadnice x_1 , x_2 , x_3 a x_4 .



Obr. 7.5 – Geometrie rámu po nahrazení tělesa 3

Výpočet posunutí bodu E od vodorovného zatížení pomocí Mohrova integrálu:

- Ve směru osy x

$$u_{V_x} = \frac{1}{E_1 J_1} * \left[\int_{l_{ED1}}^{l_{ED2}} M_{o_{EDV}} * m_{o_{EDV}} * dx_1 + \int_{l_{DC1}}^{l_{DC2}} M_{o_{DCV}} * m_{o_{DCV}} * dx_2 \right] + \frac{1}{E_2 J_2} * \left[\int_{l_{CB1}}^{l_{CB2}} M_{o_{CBV}} * m_{o_{CBV}} * dx_3 + \int_{l_{BA1}}^{l_{BA2}} M_{o_{BAV}} * m_{o_{BAV}} * dx_4 \right] \quad (7.35)$$

- Ve směru osy y

$$u_{V_y} = \frac{1}{E_1 J_1} * \left[\int_{l_{ED1}}^{l_{ED2}} M_{o_{EDV}} * m_{o_{EDS}} * dx_1 + \int_{l_{DC1}}^{l_{DC2}} M_{o_{DCV}} * m_{o_{DCS}} * dx_2 \right] + \frac{1}{E_2 J_2} * \left[\int_{l_{CB1}}^{l_{CB2}} M_{o_{CBV}} * m_{o_{CBS}} * dx_3 + \int_{l_{BA1}}^{l_{BA2}} M_{o_{BAV}} * m_{o_{BAS}} * dx_4 \right] \quad (7.36)$$

Výpočet posunutí bodu E od svislého zatížení pomocí Mohrova integrálu:

- **Ve směru osy x**

$$u_{sx} = \frac{1}{E_1 J_1} * \left[\int_{l_{ED1}}^{l_{ED2}} Mo_{EDS} * mo_{EDV} * dx_1 + \int_{l_{DC1}}^{l_{DC2}} Mo_{DCS} * mo_{DCV} * dx_2 \right] + \frac{1}{E_2 J_2} * \left[\int_{l_{CB1}}^{l_{CB2}} Mo_{CBS} * mo_{CBV} * dx_3 + \int_{l_{BA1}}^{l_{BA2}} Mo_{BAS} * mo_{BAV} * dx_4 \right] \quad (7.37)$$

- **Ve směru osy y**

$$u_{sy} = \frac{1}{E_1 J_1} * \left[\int_{l_{ED1}}^{l_{ED2}} Mo_{EDS} * mo_{EDS} * dx_1 + \int_{l_{DC1}}^{l_{DC2}} Mo_{DCS} * mo_{DCS} * dx_2 \right] + \frac{1}{E_2 J_2} * \left[\int_{l_{CB1}}^{l_{CB2}} Mo_{CBS} * mo_{CBS} * dx_3 + \int_{l_{BA1}}^{l_{BA2}} Mo_{BAS} * mo_{BAS} * dx_4 \right] \quad (7.38)$$

Vyjádření jednotlivých členů:

- **Oblast E-D**

$$x_1 \in (l_{ED1}; l_{ED2}) \quad (7.39)$$

$$l_{ED1} = 0 \quad (7.40)$$

$$l_{ED2} = e \quad (7.41)$$

$$Mo_{EDS} = F_S * x_1 * \cos(\beta_1) \quad (7.42)$$

$$Mo_{EDV} = -F_V * x_1 * \sin(\beta_1) \quad (7.43)$$

$$mo_{EDS} = "1"_S * x_1 * \cos(\beta_1) \quad (7.44)$$

$$mo_{EDV} = -"1"_V * x_1 * \cos(\beta_1) \quad (7.45)$$

- **Oblast D-C**

$$x_2 \in (l_{DC1}; l_{DC2}) \quad (7.46)$$

$$l_{DC1} = e \quad (7.47)$$

$$l_{DC2} = e + d \quad (7.48)$$

$$Mo_{DCS} = \begin{pmatrix} F_S * (e + x_2) * \cos(\beta_1) - R_{DY} * x_2 * \cos(\beta_1) \\ -R_{DX} * x_2 * \sin(\beta_1) \end{pmatrix} \quad (7.49)$$

$$M_{O_{DC_V}} = \begin{pmatrix} -F_V * (e + x_2) * \sin(\beta_1) - R_{D_Y} * x_2 * \cos(\beta_1) \\ -R_{D_X} * x_2 * \sin(\beta_1) \end{pmatrix} \quad (7.50)$$

$$m_{O_{DC_S}} = "1"_S * (e + x_2) * \cos(\beta_1) \quad (7.51)$$

$$m_{O_{DC_V}} = -"1"_V * (e + x_2) * \sin(\beta_1) \quad (7.52)$$

- **Oblast C-B**

$$x_3 \in (l_{CB1}; l_{CB2}) \quad (7.53)$$

$$l_{CB1} = (e + d) * \sin(\beta_1) \quad (7.54)$$

$$l_{CB2} = (e + d) * \sin(\beta_1) + b \quad (7.55)$$

$$M_{O_{CB_S}} = \begin{pmatrix} F_S * (e + d) * \cos(\beta_1) - R_{D_Y} * d * \cos(\beta_1) \\ -R_{D_X} * [d * \sin(\beta_1) + x_3] \end{pmatrix} \quad (7.56)$$

$$M_{O_{CB_V}} = \begin{pmatrix} -F_V * [(e + d) * \sin(\beta_1) + x_3] - R_{D_Y} * d * \cos(\beta_1) \\ -R_{D_X} * [d * \sin(\beta_1) + x_3] \end{pmatrix} \quad (7.57)$$

$$m_{O_{CB_S}} = "1"_S * (e + d) * \cos(\beta_1) \quad (7.58)$$

$$m_{O_{CB_V}} = -"1"_V * [(e + d) * \sin(\beta_1) + x_3] \quad (7.59)$$

- **Oblast B-A**

$$x_4 \in (l_{BA1}; l_{BA2}) \quad (7.60)$$

$$l_{BA1} = (e + d) * \sin(\beta_1) + b \quad (7.61)$$

$$l_{BA2} = (e + d) * \sin(\beta_1) + b + a \quad (7.62)$$

$$M_{O_{BA_S}} = \begin{pmatrix} F_S * (e + d) * \cos(\beta_1) - R_{D_Y} * d * \cos(\beta_1) \\ -R_{D_X} * [d * \sin(\beta_1) + b + x_4] + R_{B_Y} * x_4 \end{pmatrix} \quad (7.63)$$

$$M_{O_{BA_V}} = \begin{pmatrix} -F_V * [(e + d) * \sin(\beta_1) + b + x_4] - R_{D_Y} * d * \cos(\beta_1) \\ -R_{D_X} * [d * \sin(\beta_1) + b + x_4] + R_{B_Y} * x_4 \end{pmatrix} \quad (7.64)$$

$$m_{O_{BA_S}} = "1"_S * (e + d) * \cos(\beta_1) \quad (7.65)$$

$$m_{O_{BA_V}} = -"1"_V * [(e + d) * \sin(\beta_1) + b + x_4] \quad (7.66)$$

- **Modul pružnosti v tahu a kvadratický moment stojanu (Oblasti CB a BA)**

Kvadratický moment stojanu J_2 je vypočten z jeho trubkového průřezu o vnějším průměru D_2 a vnitřním průměru d_2 .

$$E_2 = 2,1 \times 10^{11} \text{ Pa} \quad D_2 = 0,11 \text{ m} \quad d_2 = 0,101 \text{ m} \quad (7.67)$$

$$J_2 = \frac{\pi * D_2^4}{64} - \frac{\pi * d_2^4}{64} = \frac{\pi * 0,11^4}{64} - \frac{\pi * 0,101^4}{64} = 2,08 \times 10^{-6} \text{ m}^4 \quad (7.68)$$

- **Modul pružnosti v tahu a kvadratický moment ramene (Oblasti ED a DC)**

Kvadratický moment ramene J_1 je vypočten z jeho trubkového průřezu o vnějším průměru D_1 a vnitřním průměru d_1 .

$$E_1 = 2,1 \times 10^{11} \text{ Pa} \quad D_1 = 0,06 \text{ m} \quad d_1 = 0,055 \text{ m} \quad (7.69)$$

$$J_2 = \frac{\pi * D_1^4}{64} - \frac{\pi * d_1^4}{64} = \frac{\pi * 0,06^4}{64} - \frac{\pi * 0,055^4}{64} = 1,87 \times 10^{-7} \text{ m}^4 \quad (7.70)$$

Obecné dosazení do vzorců a jejich integrace je v příloze TP2. Výpočty jednotlivých posunutí bodu E jsou provedeny pomocí výpočetního programu Microsoft Excel (viz elektronická příloha EP1) a výsledky včetně čísel rovnic, do kterých bylo dosazováno jsou uvedeny v tab. 7.3.

Posunutí	Vzorec	Hodnota [μm]
u_{V_x}	(7.35)	4,2
u_{V_y}	(7.36)	-8,6
u_{S_x}	(7.37)	-9,6
u_{S_y}	(7.38)	17,5

Tab. 7.3 – Číselně vyjádřená posunutí ve směrech os x a y

- **Celkové posunutí bodu E**

Ze svislého a vodorovného posunutí bodu E je pomocí Pythagorovy věty vypočteno celkové posunutí.

$$u_V = \sqrt{u_{V_x}^2 + u_{V_y}^2} = \sqrt{4,2^2 + (-8,6)^2} = 9,6 \mu\text{m} \quad (7.71)$$

$$u_S = \sqrt{u_{S_x}^2 + u_{S_y}^2} = \sqrt{(-9,6)^2 + 17,5^2} = 19,5 \mu\text{m} \quad (7.72)$$

7.4 Tuhost rámu

- **Tuhost rámu při vodorovném zatížení**

$$k_V = \frac{F_V}{u_V} = \frac{5}{9,56} = 0,52 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} \quad (7.73)$$

- **Tuhost rámu při svislém zatížení**

$$k_S = \frac{F_S}{u_S} = \frac{5}{19,5} = 0,26 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} \quad (7.74)$$

Z celkového posunutí bodu E a jeho zatížení je vypočtena celková tuhost rámu. Tuhost rámu při zatížení ve vodorovném směru je 0,52 N/μm a při zatížení ve svislém směru je 0,26 N/μm.

7.5 Zkreslení měřené hodnoty

Vodorovné posunutí bodu zatíženého vodorovnou silou 5 N je 4,2 μm. Měřená hodnota je 2 mm. Podle vzorce níže je spočtena chyba měření 0,21 %.

$$CH_V = \frac{u_{V_x}}{Z} * 100 = \frac{0,0042}{2} * 100 = 0,21 \% \quad (7.75)$$

Svislé posunutí bodu zatíženého svislou silou 5 N je 17,5 μm. Měřená hodnota je 2 mm. Podle vzorce níže je spočtena chyba měření 1,75 %.

$$CH_B = \frac{u_{S_y}}{Z} * 100 = \frac{0,0175}{2} * 100 = 0,88 \% \quad (7.76)$$

Počet použitých úchylkoměrů	Chyba měření	
	Ve svislém směru	Ve vodorovném směru
10	1,75 %	0,42 %
5	0,88 %	0,21 %
1	0,18 %	0,04 %

Tab. 7.4 – Chyby měření při různém použití úchylkoměrů

8 Závěr

Rám pro měření statické tuhosti byl navržen dle požadavků.

Velká spojka je kvůli přenosu větších sil navržena jako hydraulická, malá spojka je navržena jako třmenová. Obě spojky jsou rozebíratelné pomocí jednoho šroubu a umožňují jemné časově nenáročné nastavování. Pro získání větší stability rámu byla navržena sklopná vzpěra. Základem vzpěry je válcovaný L profil, díky kterému je vzpěra lehká a zároveň dostatečně tuhá. Na konci vzpěry je navržena polohovatelná opěrka se zajištěním proti nechtěnému polohování.

Stojan je upraven dle požadavků. Jeho výška je zredukována na 1,3 m, aby byl možný transport osobním vozidlem. Jeho podstava je upravena tak, aby umožňovala snadný přesun jednou osobou odvalováním a zároveň, aby nedocházelo k jeho nechtěnému odvalování v kufru automobilu při transportu. Do podstavy jsou vyvrtány otvory pro čtyři polohovací nohy, jako jsou u sklopných vzpěr. V podstavě jsou také vyrobeny otvory pro připojení sklopných vzpěr.

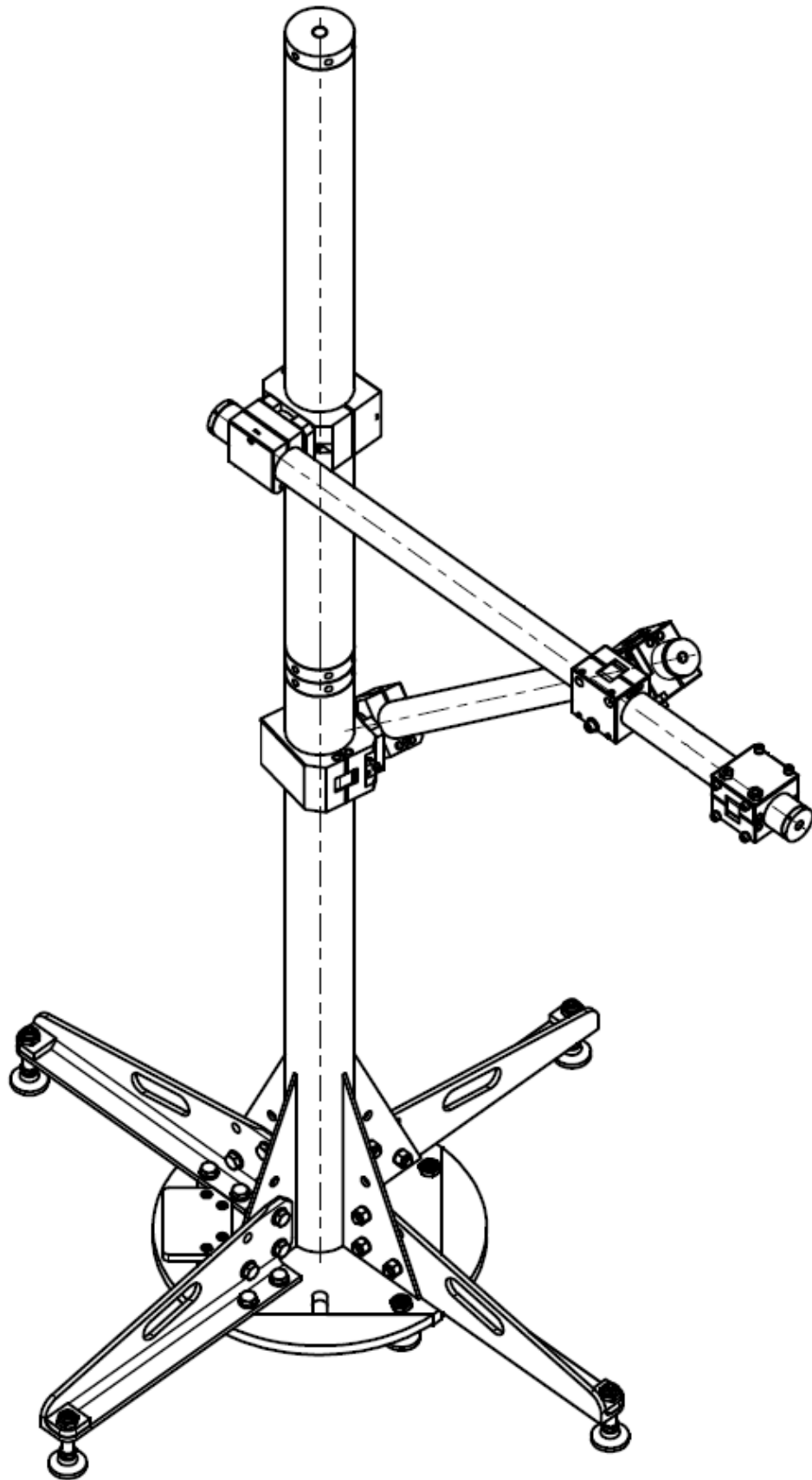
Odříznutá část stojanu je upravena tak, aby umožňovala jeho prodloužení. Spojení je umožněno stavěcím šroubem a upevnění pomocí f klíče a otvorů v obou připojovaných dílech.

Pro snadnou manipulaci se stojánky na úchylkoměry je navržena redukce, která se na stojánek šroubuje namísto jeho magnetické části a který stačí vložit do malé spojky a zajistit šroubem. Také byla navržena malá spojka, která je určena pouze pro připojení stojánek na úchylkoměry. Na jednu tuto spojku lze připojit až osm kloubových stojánek.

Kompletně navržený rám pro měření statické tuhosti je zobrazen na obr. 8.1.

Dále byl proveden výpočet tuhosti rámu. Tuhost rámu je při vodorovném zatížení koncového bodu je 0,52 N/ μm a při svislém zatížení koncového bodu 0,26 N/ μm . Chyba měření při svislém zatížení je 0,21 % a při vodorovném zatížení 0,88 %. Dle zadání je nutné nepřesáhnout 3 %, což je splněno. Ve výpočtu není uvažována poddajnost spojek, v těchto místech je předpokládáno dokonalé kloubové spojení. Také je předpokládáno vetknutí rámu a neuvažuje se poddajnost ramene stojánku na úchylkoměry. Výsledná chyba tudíž bude v praxi vyšší, ale vzhledem k tomu, že bylo počítáno s extrémním případem použití pěti úchylkoměrů a skutečností, že do povolené chyby měření zbývá v horším případě 2,12 % rezervy, lze předpokládat že měřená chyba s velikou pravděpodobností nepřesáhne požadovanou hodnotu 3 %.

K této práci jsou přiloženy výkresy malé spojky, redukcí, sestavy stojanu a hlavního sestavení rámu. Vzhledem k rozsahu této práce jsou ostatní části rámu pouze vymodelované a přiložené na cd v elektronické podobě.



Obr. 8.1 – Rám pro měření statické tuhosti se všemi navrženými částmi

9 Seznamy

Použitá literatura

- [1] RUDOLF, Bedřich a Miloslav KOPECKÝ. Tvářecí stroje: základy stavby a využití. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985. Technický průvodce (SNTL).
- [2] Snímače. Odbor termomechaniky a techniky prostředí [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně [cit. 2017-12-02]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka06-02.htm>
- [3] Měření statické tuhosti obráběcích strojů. Ústav výrobních strojů a zařízení | Ú12135 [online]. Praha: Ústav výrobních strojů a zařízení [cit. 2017-10-08]. Dostupné z: <http://www.rcmt.cvut.cz/zkuslab/cz/text/7>
- [4] Metrology catalogue 2017/2018. 05/17 EN. Gammertingen: HELLIOS-PREISSER, Gammertingen, 2017.
- [5] Katalog měřicích přístrojů 2014/2015. CZ-19001. Mitutoyo, 2014.
- [6] FOJTEK, Oldřich, Lenka POMYKALOVÁ a Dominik BUDÍNSKÝ. Strojírenství: Kontrola a měření [online]. MŠMT, 2015 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2588>
- [7] Indukční snímače pro bezdotykové měření vzdálenosti. Elektro [online]. 2002, (08) [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-snimace-pro-bezdotykove-mereni-vzdalenosti--14749>
- [8] Senzory, snímače. Micro-Epsilon Czech Republic [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz>
- [9] AD4ETH: Katalogový list [online]. 26.5.2017 10:20. Praha: Papouch, 2007 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: https://www.papouch.com/cz/shop/product/ad4eth-merici-prevodnik-s-ethernetem/ad4eth.pdf/_downloadFile.php
- [10] Gebo special: katalog 2011. 07/2011. Budapest, 2011.
- [11] Montážní stojan FEEDBACK SPORTS - PRO ULTRALIGHT. Kupkolo [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: https://www.kupkolo.cz/montazni-stojan-feedback-sports-pro-ultralight_z90453/
- [12] Montážní stojan FORCE skládací Al/ Fe, černý - OLD. Kupkolo [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: https://www.kupkolo.cz/montazni-stojan-force-skladaci-al-fe-cerny-old_z5841/
- [13] Hlavní katalog 38. Praha: elesa+GANTER.
- [14] Katalog TESA: Technology. TESA, 2014.
- [15] Tutorial TESA General Catalogue 2010: Technology. TESA, 2010.

- [16] Inteligentní laserový triangulační snímač vzdálenosti ILD1420. Micro-Epsilon Czech Republic [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/laser-sensor/optoNCDT_1420_basic/
- [17] VOJÁČEK, Antonín. Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření. Automatizace.hw [online]. 2015 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [18] OptoNCDT ILD 1420 CL1 Lazer Deplasman Sensörü, 10 - 50mm. In: SIMtekno [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: http://www.simtekno.com.tr/optoncdt-ild-1420-cl1/e_g_quickcatalogue_en_2012_web.pdf
- [19] Katalog snímačů [online]. Mesing [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: http://mesing.cz/download/mesing/katalog_snimacu.pdf
- [20] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. Části strojů. Vyd. 5., přeprac. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Technický průvodce. ISBN 80-03-00046-7.
- [21] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. Části strojů. 5. přeprac. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. Technický průvodce. ISBN 80-03-00426-8.
- [22] JULIŠ, K., BREPTA, R. a kol: Mechanika I. Díl, 1986, Státní technické nakladatelství, Praha, s.477. ISBN 04-224-86
- [23] CHVÁLA, J.; VOTAVA, J. Přípravky. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p. 1988, ISBN 04-240-88.
- [24] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-7.361-033-7.

Obrázky

Obr. 1.1 – Tuhost v ohybu [1]	11
Obr. 1.2 – Tuhost v krutu [1]	11
Obr. 3.1 – Ukázka relativního měření tuhosti.....	13
Obr. 3.2 – Ukázka absolutního měření tuhosti	14
Obr. 3.3 – Detail ukázky absolutního měření tuhosti	14
Obr. 3.4 – Schéma relativního měření tuhosti	15
Obr. 3.5 – Schéma absolutního měření tuhosti	15
Obr. 3.6 – Pákový excentrický mechanismus s opěrnou částí a siloměrem	16
Obr. 3.7 – Rám rozpěrného mechanismu I	16
Obr. 3.8 – Hydraulický válec se siloměrem, Rám rozpěrného mechanismu II	16

Obr. 3.9 – Magnetický stojánek na úchylkoměry universální [4]	17
Obr. 3.10 – Magnetický stojánek na úchylkoměry universální [4]	17
Obr. 3.11 – Magnetický stojánek na úchylkoměry s flexibilní ramenem [4]	17
Obr. 3.12 – Magnetický stojánek na úchylkoměry s flexibilním ramenem [4]	17
Obr. 3.13 – Magnetický stojánek na úchylkoměry s mechanickou aretací [4].....	17
Obr. 3.14 – Magnetický stojánek na úchylkoměry s mechanickou aretací [4].....	17
Obr. 3.15 – Příklad použití snímače GT31 [14]	18
Obr. 3.16 – Analogový úchylkoměr [14].....	18
Obr. 3.17 – Řez indukčního snímače [15]	18
Obr. 3.18 – Indukční snímače GT22, GT44, GT31 [14]	19
Obr. 3.19 – Snímač vzdáleností ILD1420 [18].....	19
Obr. 3.20 – Princip snímání vzdáleností triangulačním laserem [16]	20
Obr. 3.21 – Analyzátor NX-3062	20
Obr. 3.22 – Analyzátor DEWE-3010 a měřicí převodníky National Instruments NI 9205	20
Obr. 3.23 – Měření úchylek v praxi.....	21
Obr. 3.24 – graf závislosti zatěžující síly na posunu bodu	21
Obr. 4.1 – Aktuální provedení rámu na měření tuhostí I.....	22
Obr. 4.2 – Fotky aktuálního provedení rámu II	23
Obr. 4.3 - Ukázka aktuálního provedení rámu III.....	24
Obr. 4.4 - Redukce	25
Obr. 4.5 – Třmen [8].....	25
Obr. 4.6 – Třmen s navrtávkou [8]	25
Obr. 4.7 – Foto aktuálního provedení rámu IV.....	26
Obr. 4.8 – Detail použití spojky.....	27
Obr. 4.9 – Montážní Stojan FEEDBACK – PRO ULTRALIGHT [11].....	28
Obr. 4.10 – Montážní stojan FORCE [12].....	29
Obr. 5.1 – Utahovací kolečka [13].....	30
Obr. 5.2 – Regulační prvky [13]	31
Obr. 5.3 – Rychloupínače [13].....	31
Obr. 6.1 – Využití odříznuté části stojanu	32

Obr. 6.2 – Výpalek s otvorem o průřezu aktuální podstavky	33
Obr. 6.3 – Přídavný plechový segment	33
Obr. 6.4 – Znázornění stojanu v položeném stavu	33
Obr. 6.5 – Možnosti upevnění přídavného plechu	34
Obr. 6.6 – Přídavný plechový segment po úpravě	34
Obr. 6.7 – Provedení polohovací nohy ve stojanu	35
Obr. 6.8 – Návrhy sklopných vzpěr č. 1-4	36
Obr. 6.9 – Princip zajištění polohovací nohy	36
Obr. 6.10 – Návrh sklopné vzpěry č. 5	37
Obr. 6.11 – Spojka velká – varianta A	38
Obr. 6.12 – Spojka velká – varianta B	39
Obr. 6.13 – Spojka velká – varianta C	40
Obr. 6.14 – Spojka velká – varianta D	40
Obr. 6.15 – Spojka malá – varianta A	41
Obr. 6.16 – Spojka malá – varianta B	42
Obr. 6.17 – Spojka malá – varianta C	43
Obr. 6.18 – Spojka malá – varianta D	44
Obr. 6.19 – Spojka malá – varianta D po úpravách	45
Obr. 6.20 – Stojánek na úchylkoměry bez přídržného magnetu	46
Obr. 6.21 – Průřez upínací části redukce	46
Obr. 6.22 – Redukce pro úchylkoměry	46
Obr. 6.23 – Spojka pro stojánky	46
Obr. 7.1 – Geometrie rámu	47
Obr. 7.2 – Zatížení rámu	48
Obr. 7.3 – Uvolnění těles	49
Obr. 7.4 – Rám po nahrazení tělesa 3 vypočtenými reakcemi	52
Obr. 7.5 – Geometrie rámu po nahrazení tělesa 3	53
Obr. 8.1 – Rám pro měření statické tuhosti se všemi navrženými částmi	59

Tabulky

Tab. 7.1 – Výpočtové rozměry	47
------------------------------------	----

Tab. 7.2 – Číselně vyjádřené reakce	52
Tab. 7.3 – Číselně vyjádřená posunutí ve směrech os x a y	56
Tab. 7.4 – Chyby měření při různém použití úchylkoměrů	57

Použitý software

- S1 Autodesk Inventor Professional 2018
- S2 Microsoft Excel 2016

Textové přílohy

- TP1 Výpočet reakcí
- TP2 Výpočet posunutí

Elektronické přílohy (CD)

- EP1 Bakalářská práce.pdf
- EP2 Bakalářská práce včetně textových příloh.doc
- EP3 Textová příloha TP1.pdf
- EP4 Textová příloha TP2.pdf
- EP5 Výpočet.xlsx
- EP6 BP 0000.pdf
- EP7 BP 0001.pdf
- EP8 BP 0004.pdf
- EP9 BP 0005.pdf
- EP10 BP 0006.pdf
- EP11 BP 0007.pdf
- EP12 BP 1011.pdf
- EP13 BP 1012.pdf
- EP14 BP 1013.pdf
- EP15 BP 1014.pdf
- EP16 BP 1015.pdf
- EP17 BP 1016.pdf
- EP18 BP 1017.pdf
- EP19 BP 1025.pdf
- EP20 BP 0001 - Stojan.stp

- EP21 BP 0002 - Přídavná vzpěra.stp
- EP22 BP 0003 - Spojka velká.stp
- EP23 BP 0004 - Spojka malá.stp
- EP24 BP 0005 - Spojka pro stojánky.stp
- EP25 BP 0006 - Redukce M8.stp
- EP26 BP 0007 - Redukce M10.stp
- EP27 Zadání bakalářské práce (skenovaný originál)

Výkresová dokumentace

- BP 0000 Silově nezávislý rám pro měření tuhostí
- BP 0001 Stojan
- BP 0004 Spojka malá
- BP 0005 Spojka pro stojánky
- BP 0006 Redukce M8
- BP 0007 Redukce M10
- BP 1011 Objímka malá krajní
- BP 1012 Objímka malá pro třmen
- BP 1013 Objímka malá s kotoučem
- BP 1014 Spojka
- BP 1015 Třmen
- BP 1016 Upravený šroub kratší
- BP 1017 Objímka malá kratší se závitem
- BP 1025 Upravený šroub kratší