



Zkušební zařízení pro převodovky vrtulníku Skyspotter 150

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Jan Bělík

Vedoucí práce:

Ing. Jan Novák, Ph.D.

Katedra vozidel a motorů





Zadání diplomové práce

Zkušební zařízení pro převodovky vrtulníku Skyspotter 150

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Bělík**
Osobní číslo: S19000249
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce strojů a zařízení
Zadávací katedra: Katedra vozidel a motorů
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor typů zkušebních zařízení převodovek
2. Definujte měřené veličiny a jejich rozsah
3. Navrhněte konstrukci zkušebního zařízení
4. Vybrané díly tuhostně analyzujte s použitím MKP
5. Vytvořte výrobní dokumentaci k vybraným částem zkušebního zařízení

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

vybraná výkresová dokumentace
50 stran + CD
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. PEŠÍK, L.: Části strojů. 1. díl. Liberec, TU 2005. ISBN 80-7083-938-4.
2. PEŠÍK, L.: Části strojů 2. díl. Liberec, TU 2005. ISBN 80-7083-939-2.
3. VLK, F.: Převody motorových vozidel. Brno: nakladatelství a vydavatelství VLK, 2006. ISBN 80-239-6463-1

Vedoucí práce:

Ing. Jan Novák, Ph.D.
Katedra vozidel a motorů

Datum zadání práce:

15. listopadu 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

15. května 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

25. května 2021

Bc. Jan Bělík

Poděkování

Za podporu, pomoc, rady a připomínky při tvorbě diplomové práce bych rád tímto poděkoval panu Ing. Robertu Voženílkovi. Také svému vedoucímu práce Ing. Janu Novákovi. Dále bych rád poděkoval za všechnu pomoc rodině a kolegům z VÚTS, a.s.

Abstrakt

Cílem práce je navrhnout zkušební pracoviště pro převodovky do vrtulníku Skyspotter 150. V úvodu jsou popsány základní části zkušebních laboratoří pro měření převodovek. Další část práce se zabývá popisem funkce jednotlivých snímačů, které se používají při testování převodovek.

Dále je v práci navržena koncepce měřicího zařízení pro konkrétní převodovky z vrtulníku a zhotoven návrh konstrukce zkušebního pracoviště, na kterém je možné převodovku provozovat ve všech jejích režimech. Součástí tohoto zařízení je také axiální zatěžování na výstupním hřídeli, který bude simulovat zatížení tahem/tlakem od hlavního rotoru. Celé zařízení je navrženo modulárně, aby bylo možné snadno pracoviště přestavět na testování dalších zařízení.

V poslední části byly provedeny simulace pro ověření tuhosti rámu zkušebního zařízení. Nakonec byla provedena částečná výkresová dokumentace a rozbor výrobních přesností.

Klíčová slova: převodovka, zkušební pracoviště, vibrace, měření

Summary

The aim of the work is to design a test stand for the Skyspotter 150 helicopter gearboxes. In the introduction, the main parts of testing laboratories for gearboxes testing were described. The individual sensors used for testing of the gearboxes were also described.

Furthermore, the work proposes the concept of measuring equipment for specific gearboxes from the helicopter and a design of the construction of the test workplace was made, on which it is possible to operate the gearbox in all its modes. This device also includes device for an axial loading of the output shaft, which can simulate the push/pull load from the main rotor. The entire device is designed modularly, so that it is possible to easily convert the workplace for testing of other devices.

The last part performs simulations for verifying the rigidity of the frame. Finally, a partial drawing documentation and analysis of production accuracies were performed.

Keywords: gearbox, test station, vibration, measurement

Obsah

1	Úvod	10
2	Testovací zkušební převodovky.....	11
2.1	Upínací deska.....	11
2.2	Pohonná jednotka.....	12
2.3	Dynamometry	12
2.3.1	Hydrodynamické.....	13
2.3.2	Elektrické	14
2.3.3	Třecí	16
2.4	Hluk	16
2.5	Teploty.....	17
2.6	Zrychlení.....	19
2.7	Točivý moment.....	23
2.8	Úhlová rychlost.....	24
2.9	Další příslušenství.....	25
3	Návrh měřicího pracoviště.....	27
3.1	Rozbor kinematiky převodovek.....	28
3.1.1	Významné poruchové frekvence.....	29
3.2	Návrh koncepce měřicího zařízení	31
4	Konstrukční návrh	33
4.1	Jednoúčelové pracoviště	33
4.1.1	Pohon a dynamometry	35
4.1.2	Zajištění variability konstrukce.....	35
4.1.3	Spojení rámu	36

4.2	Univerzální pracoviště	36
5	Detaily konstrukce	38
5.1	Pohon a dynamometry	38
5.2	Ložiska.....	40
5.2.1	Namáhání ložisek.....	41
5.3	Hřídele	42
5.3.1	Hřídel pohonu	42
5.3.2	Hřídel velkého dynamometru	43
5.3.3	Hřídel malého dynamometru	44
5.4	Spojky.....	44
5.5	Krytování	51
5.6	Upínání převodovky	51
5.7	Axiální zatěžování	52
6	Simulace	56
6.1	Výpočty šroubových spojů	56
6.2	Okrajové podmínky	57
6.3	Zatížení 1 – axiální tlaková síla	60
6.4	Zatížení 2 – axiální tahová síla	63
6.5	Zlepšení.....	66
6.6	Tuhostní analýza.....	68
7	Závěr.....	69

Seznam zkratek

P	[MPa]	tlak
F_m	[N]	přítlačná síla
F_Q	[N]	síla ve šroubu
Re	[MPa]	mez kluzu
σ_t	[MPa]	napětí v tahu ve šroubu
K	[-]	bezpečnost
F_t	[N]	třecí síla
F_Q	[N]	normálová síla
f	[-]	koeficient tření
k	[-]	počet šroubů
S	[m ²]	plocha
d_3	[mm]	vnitřní průměr závitu šroubu
ϕ_z	[°]	třecí úhel
f_z	[°]	součinitel smykového tření
α	[°]	úhel profilu šroubovice
γ	[°]	úhel stoupání šroubovice
p	[mm]	stoupání závitu
d	[mm]	jmenovitý průměr závitu
D_p	[mm]	střední průměr podložky
D_k	[mm]	vnitřní průměr podložky
D_o	[mm]	vnější průměr podložky
Mu	[Nm]	utahovací moment
d_2	[mm]	střední průměr závitu
f_p	[-]	koeficient tření mezi podložkou a součástí
τ_D	[MPa]	dovolené napětí v krutu
M_k	[Nm]	točivý moment
W_k	[mm ³]	průřezový modul v krutu
d_{min}	[mm]	minimální průměr
f_m	[Hz]	motorová frekvence
f_{vr}	[Hz]	frekvence vyrovnávacího rotoru
f_h	[Hz]	frekvence vložené hřídele
f_{hr}	[Hz]	frekvence hlavního rotoru

1 Úvod

Firma Modelárna LIAZ se zabývá vývojem bezpilotního vrtulníku SkySpotter 150, který je vidět na Obr. 1. Klíčovou součástí vrtulníku je pohonná jednotka. Na pohonné jednotce je připojena hlavní převodovka. Tato převodovka má dva výstupy. Jeden pro zadní vyrovnávací rotor a druhý pro hlavní rotor. Zadní rotor má ještě malou úhlovou převodovku. Jelikož je vrtulník koncipován jako bezpilotní dron, je jeho celková váha omezena do 150 kg. Je potřeba, aby vrtulník o dostatečném výkonu byl co nejlehčí a tím dosáhl co největší nosnosti. Z toho důvodu je důležité, aby byly převodovky optimalizovány pro dosažení největšího poměru váha/výkon při zachování životnosti a spolehlivosti.

Z potřeb uživatele vyplývá, že potřebuje měřicí a testovací pracoviště pro převodovky. Je potřeba navrhnout zařízení tak, aby se na jednom pracovišti daly testovat všechny převodovky vrtulníku, tj. hlavní převodovka, malá úhlová převodovka ocasního rotoru nebo sestava obou převodovek vrtulníku. Převodovky je třeba na vstupu pohánět a na výstupu brzdít. U hlavní převodovky je testováno i zatížení od axiální síly hlavního rotoru vhodně navrženým zatěžovacím mechanismem. Pro hodnocení stavu převodovky je potřeba také navrhnout měřicí místa a veličiny a vhodné snímače.



Obr. 1 SkySpotter 150 [1]

2 Testovací zkušebny převodovek

Každé zkušební pracoviště se skládá z několika částí. Hlavní rozdělení je na dva oddělené prostory z důvodu bezpečnosti. V jednom se testují převodovky a ve druhém se pohybuje obsluha během testu. Aby bylo vidět vizuálně, co se děje na testovaném zařízení, je mezi těmito prostory pracoviště bezpečností sklo, případně je zde zajištěno snímání obrazu kamerami.

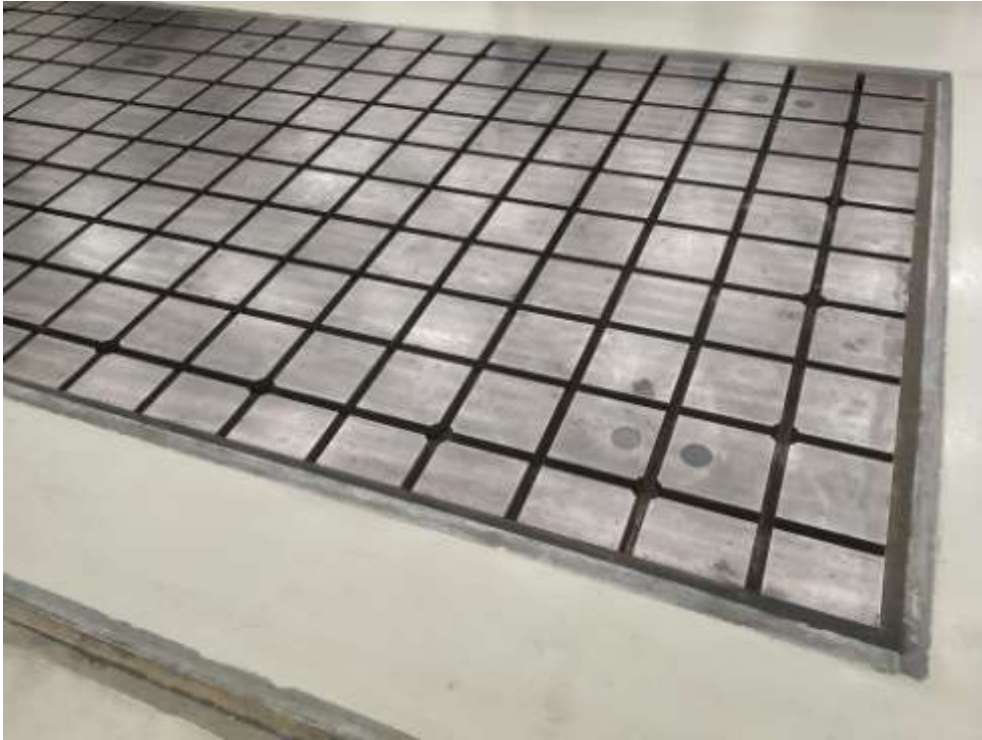
V prostoru, kde se testují převodovky, bývají připraveny panely (Obr. 2) pro připojení snímačů. Pro každý typ snímače jsou připraveny vlastní konektory, které jsou vhodné pro daný typ snímačů. Panely mohou mít také napájecí konektory pro připojení různého příslušenství. Dále mohou mít panely například připravené rychlospojky pro připojení hadic, ve kterých potřebujeme měřit tlak (olej, voda, vzduch). Konkrétní konfigurace takovýchto panelů závisí na předpokládaných testech konkrétního pracoviště.



Obr. 2 Příklad panelů

2.1 Upínací deska

Pokud není zkušební pracoviště čistě jednoúčelové, má většinou základnu tvořenou upínací deskou. Ta je opatřena T drážkami pro snadnou a univerzální montáž přípravků a dalších potřebných zařízení. Díky tomu je možné pracoviště přestavovat na různé typy zkoušek, zaměňovat testované převodovky i přípravky. Upínací deska je obvykle odizolována od zbytku budovy, aby nedocházelo k přenosu vibrací ze zařízení do základů budovy.



Obr. 3 Upínací deska drážková

2.2 Pohonná jednotka

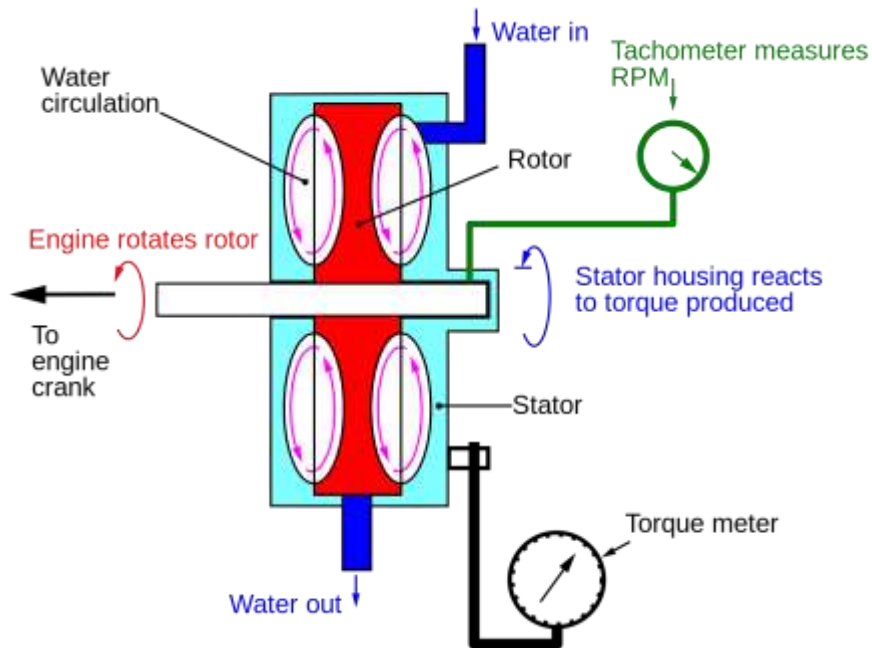
Převodovky je potřeba definovaně pohánět. K tomu slouží pohonná jednotka, obvykle elektrický pohon. Je možné použít různé typy motorů. Dodavatelé dokonce nabízejí také speciální elektrické pohony pro tyto účely. Ty obsahují řízení, které dokáže například simulovat charakteristiky spalovacího pohonu včetně jeho nerovnoměrnosti chodu.

2.3 Dynamometry

Výstupy převodovek je potřeba definovaně zatěžovat. K tomu se využívají dynamometry. Je to stěžejní zařízení při testování převodovek. Existuje několik používaných principů dynamometru. Pro nejjednodušší testy je možné využít setrvačníku o větší hmotnosti, který může zatěžovat převodovku.

2.3.1 Hydrodynamické

Pracovním a chladícím médiem je kapalina. Ta převádí točivý moment a pomocí regulace množství kapaliny je možné regulovat brzdny účinek dynamometru, jak je znázorněno na Obr. 4. Velkou výhodou je nízká cena a velký brzdny výkon. Problém je s nízkou rychlostí regulace a nutností hydraulického okruhu s chlazením.



Obr. 4 Princip hydrodynamických dynamometrů [2]



Obr. 5 Příklad hydrodynamického dynamometru

2.3.2 Elektrické

Existuje několik principů elektrických dynamometrů. První skupina takovýchto dynamometrů využívá běžně vyráběného stejnosměrného, asynchronního nebo synchronního elektromotoru. Pomocí vhodného řízení je možné tyto elektromotory použít v režimu brzdy jako dynamometr.



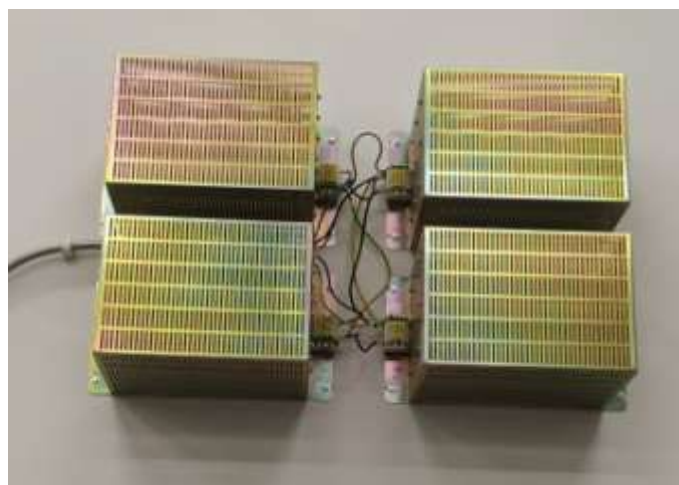
Obr. 6 Příklad asynchronního dynamometru

Další skupinou jsou elektrické dynamometry na principu vířivých proudů. Vířivé proudy vznikají při toku stejnosměrného proudu budícím vinutím. Rotor má tvar ozubeného kola vyrobeného z oceli a stator obsahuje budící vinutí. Při změnách stejnosměrného proudu na budícím vinutí se mění zatížení.



Obr. 7 Příklad dynamometru na vířivé proudy

Při brzdění dynamometrem se maří točivá energie stroje. Podle zákona o zachování energie se tato energie musí někam transformovat. V podstatě se využívají čtyři možnosti. První je brzdu chladit kapalinou, energii převádět na teplo a odvádět mimo místnost například do chladicí věže. Další možností je tuto energii převedenou na teplo mařit do okolního vzduchu, viz Obr. 8. Tato možnost se obvykle využívá pouze pro menší výkony v řádu jednotek kW.



Obr. 8 Topný odpor

Třetí způsob přeměny točivé energie je na elektrickou energii. Při přeměně na elektrickou energii existují dvě možnosti. Buď se přebytečná elektrická energie vrací zpět do sítě, nebo se může využít v rámci rekuperace elektrické energie k napájení pohonu.

2.3.3 Třecí

Točivou energii lze mařit také na principu tření. V jednoduchosti může zařízení fungovat podobně jako kotoučová brzda automobilu. Točivá energie se maří třením do tepla. Tento princip je vhodný zejména na malé brzdné síly a krátkodobé testy. Využívá se spíše pro zastavení.

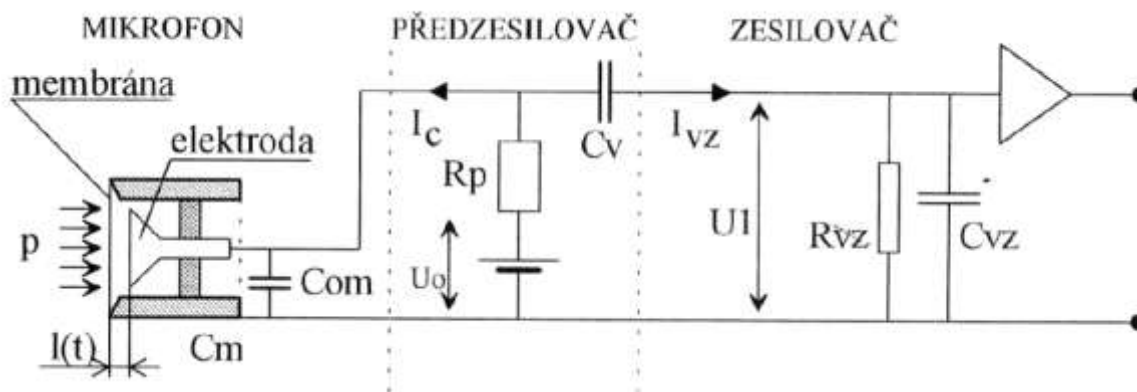
2.4 Hluk

Měření hluku převodovek má dva základní důvody. První důvod je samotná hlučnost převodovky. Velký důraz se na to klade například v automobilovém průmyslu, kde se stále snižuje emisivita hluku vozidel. Druhým důvodem je detekce nebo potvrzení závad v převodovce.

Hlavním zdrojem hluku jsou v převodovkách ozubená kola a ložiska. Dále má vliv i přerazování jednotlivých rychlostních stupňů nebo torzní kmity hřídelů, případně odchylky geometrické polohy hřídelů.

Hluk se měří pomocí mikrofونů. Jedná se v principu o převodníky změny akustického tlaku na změnu elektrické veličiny. Mikrofонů existuje velké množství a fungují na různých principech. Dnes se pro měření typicky používají reciproké měniče (elektrický, dynamický, piezoelektrický). Z toho se používají převážně kondenzátorové mikrofony.

Kondenzátorový mikrofون se používá zejména díky stejné kmitočtové charakteristice v celém slyšitelném rozsahu frekvencí. Dále má stálou citlivost a rozměry snímače jsou malé. Snímač má jednu elektrodu tvořenou velmi lehkou membránou, která kmitá proti druhé pevné elektrodě a tím mění kapacitu, jak je vidět na Obr. 9. Tyto změny kapacity jsou pak převáděny pomocí předzesilovače na změnu elektrického napětí. Tomuto napětí se říká polarizační a je přiváděno přes obvod s extrémně vysokou impedancí. Předzesilovač je proto umístěn co nejbliže samotnému mikrofону. Signál je pak potřeba pomocí zesilovače dále zesílit.



Obr. 9 Princip kondenzátorového mikrofonu [3]

Piezelektrické mikrofony využívají piezelektrického jevu, který je podrobněji popsán v kapitole 2.6. Mikrofony mají buď membránu, která přenáší kmitání na piezelektrický element nebo nemají membránu a akustický tlak působí přímo na element. Zpracování signálu je pak podobné jako u ostatních piezelektrických snímačů viz kapitola 2.6.

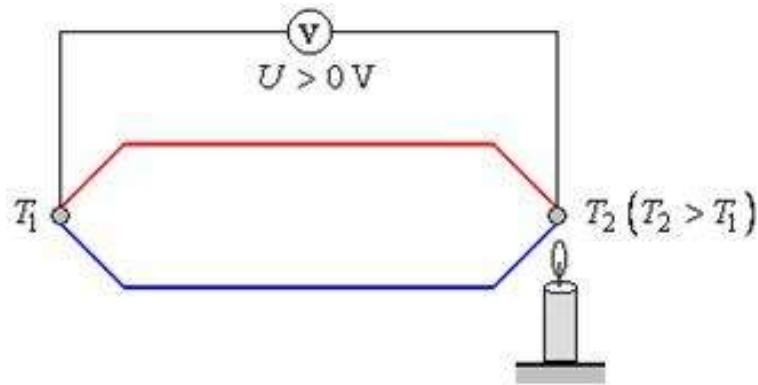
2.5 Teploty

Další důležitou sledovanou veličinou u převodovek je teplota. Zajímá nás hlavně kvůli olejové náplni a ložiskům. Pokud by docházelo k velkému přehřívání olejové náplně, náplň začne ztrácet mazací schopnosti, což dále vede k poškození ložisek a následně celé převodovky.

Pro kontaktní měření teploty je celá řada možností. Nevýhodou je narušení lokálního teplotního pole součásti, výhodou je vysoká přesnost a nízké cenové náklady. Konstrukčními úpravami lze minimalizovat narušení lokálního pole. Snímače teploty pracují na různých principech: kapalinové, plynové, odporové, bimetalové a bimateriálové. V technické praxi se nejčastěji využívá elektrických snímačů (odporové nebo termoelektrické).

Termoelektrické snímače (termočlánky) fungují na principu Seebeckova jevu, viz Obr. 10. Dva vodiče z různých materiálů jsou na obou koncích spojeny. Jeden konec je měřicí a druhý srovnávací. K výrobě termočlánku se musí využívat dvou materiálů s různým Seebeckovým koeficientem. Díky rozdílu teplot mezi měřicím a srovnávacím koncem vodičů z různých materiálů je produkováno měřitelné napětí. Kombinace těchto materiálů udává

závislost termoelektrického napětí na teplotě a měřicí rozsah teplot. Podle zvolené kombinace materiálů rozlišujeme typ termočlánku (J, K, S atd.). Teplotu srovnávacího spoje (druhý konec vodičů) řešíme dvěma možnostmi. První možností je udržování stále teploty. Druhou možností je hardwarová kompenzace. Jedná se o použití kompenzačního zapojení, kdy napětí kompenzuje elektrický obvod.



Obr. 10 Princip termoelektrického snímače [4]

Výhodou termoelektrických snímačů je schopnost měřit ve velkém rozsahu teplot, velmi malé rozměry, rychlá odezva, ohebnost a mechanická odolnost. Při vhodně zvoleném typu termočlánku lze jako jeden z materiálů využít přímo materiál měřeného objektu a na jeho povrch navařit vodič druhého materiálu. Nevýhodou je nelineární převodní charakteristika, potřeba kvalifikované obsluhy, obtížné měření na pohybujiících se předmětech a ovlivňování přesnosti změnami přechodových odporů.

Další velkou skupinou snímačů teplot jsou odporové snímače. Ty se rozdělují na odporové kovové, polovodičové a polovodičové s PN přechodem. Využívají závislosti elektrického odporu na teplotě. U kovových se využívá nejvíce platina (případně nikl, měď nebo molybden). Provedení může být různé, například vinuté stočené v podobě válce nebo vrstvené nanesené na destičku. U platinových teploměrů se standardně vyrábějí provedení Pt100 se jmenovitým odporem 100 Ω a Pt1000 se jmenovitým odporem 1000 Ω . U polovodičových teploměrů je teplotní závislost způsobena koncentrací nosičů náboje. Je zde nutné dodat energii k uvolnění elektronů. Teplotní součinitel může být pětkrát až padesátkrát větší než u kovových snímačů. Termistory se používají pro nízké až střední teploty (cca 4 – 600 K). Monokrystalické snímače z germania jsou vhodné pro měření nízkých teplot (1,5 – 75 K). Polovodičové snímače s PN přechody jsou diody a tranzistory. Používají se v rozsahu (1 – 400 K) a jsou založeny na teplotní závislosti PN přechodu. Výhodou těchto snímačů je široký

teplotní rozsah, odolnost vůči elektrickému rušení, přesnost, dlouhá životnost a dlouhodobá stálost. Nevýhodou je citlivost na magnetické pole a vibrace.

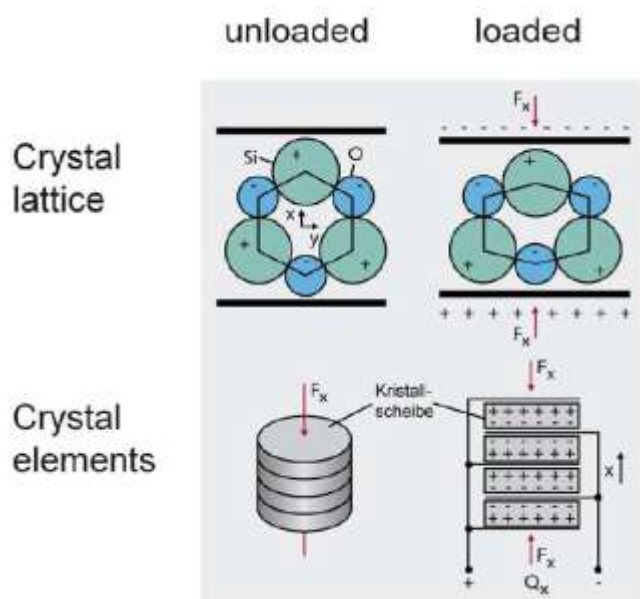


*Obr. 11 Příklad elektrických snímačů teploty
(na horním obrázku odporový snímač Pt100, na spodním obrázku termočlánek typu K)*

2.6 Zrychlení

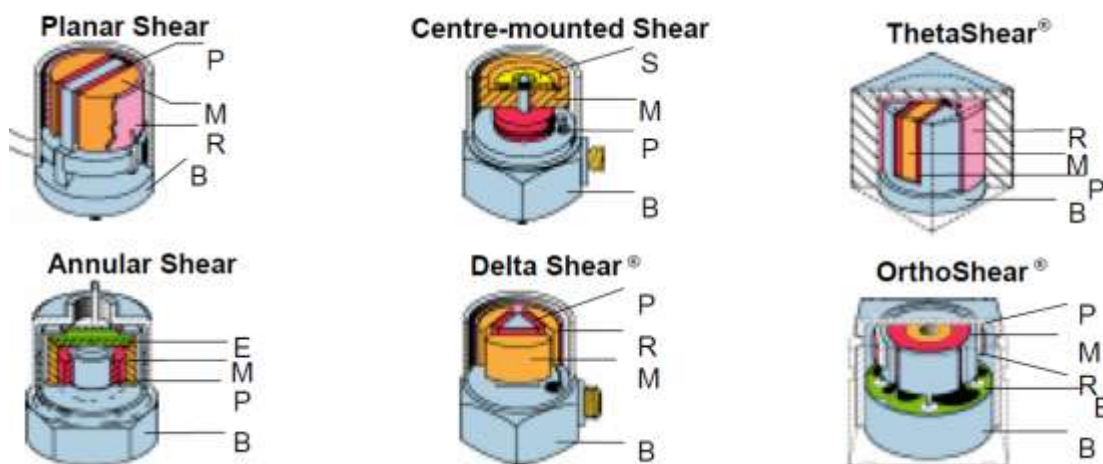
Zrychlení se měří na převodovkách kvůli technické diagnostice. Díky těmto snímačům můžeme odhalit chyby týkající se ložisek, ozubených kol a dalších.

Nejčastěji používanými principy snímačů zrychlení jsou piezoelektrický, piezorezistivní, kapacitní a indukčnostní. Piezoelektrické snímače zrychlení fungují tak, že při působení síly na vhodný řez krystalu piezoelektrického materiálu se produkuje elektrický náboj (znázorněno na Obr. 12). Elektrický náboj je přímo úměrný síle působící na měřicí elementy. Tyto elementy se nejčastěji vyrábějí z krystalu křemene řezem pod vhodným úhlem.



Obr. 12 Princip Piezoelektrického snímače [5]

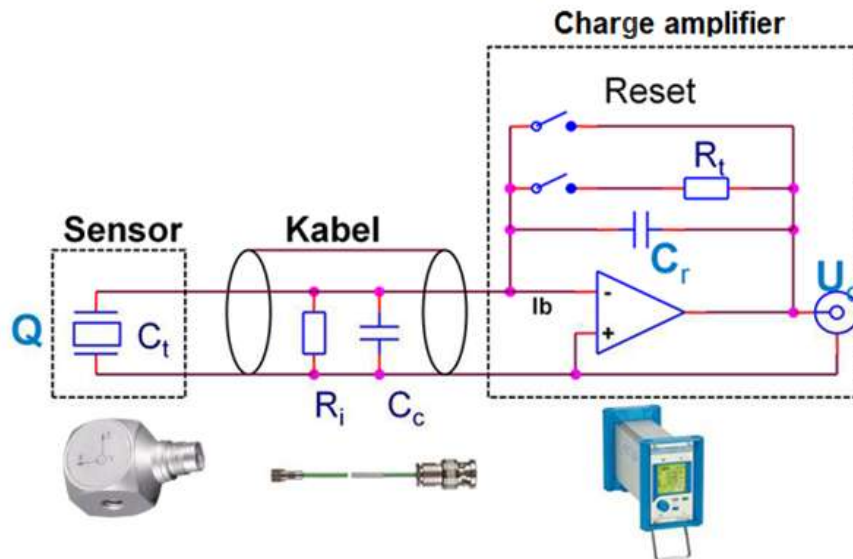
Pro měření vibrací je k piezoelektrickému elementu ve snímači připojena setrvačná hmota (oranžové segmenty na Obr. 13), která při zrychlení v daném směru působí na element silou tahovou či tlakovou v závislosti na smyslu zrychlení. Pro víceosé snímače musí mít každá osa svůj krystal s vlastní hmotou. Proto u tříosého snímače máme 3 elementy, které mají jinou orientaci.



Obr. 13 Různá konstrukční provedení piezoelektrických akcelerometrů [6]
 (P – Piezoelektrický člen, E – elektronika, S – pružina, R – připevňovací kroužek,
 B – základna)

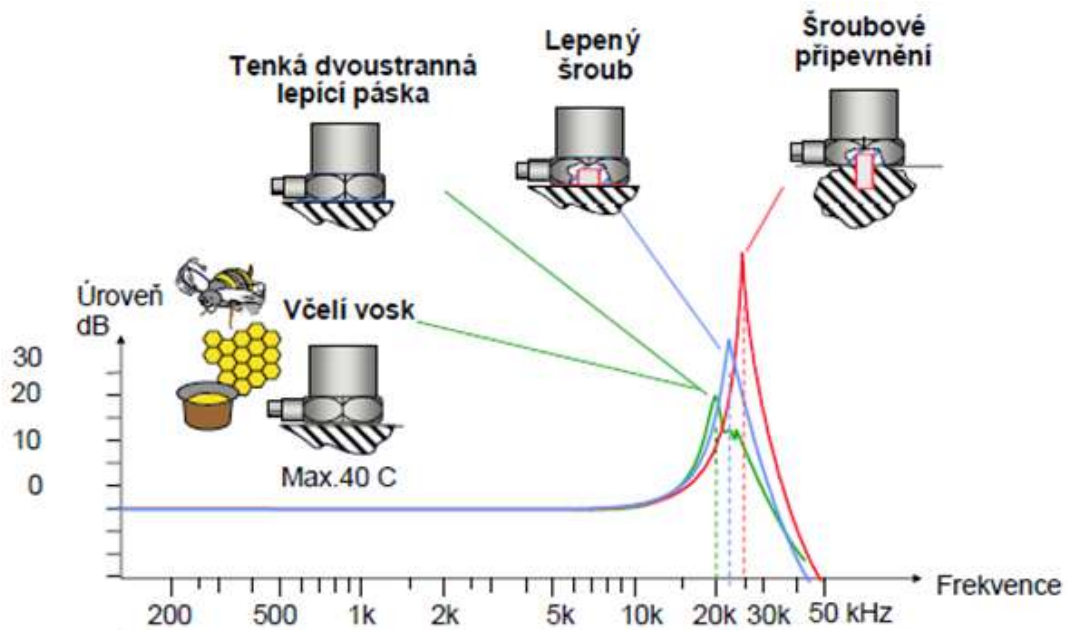
Tyto snímače jsou pak připojeny pomocí kabelu k nábojovému zesilovači. Ten převádí elektrický náboj na napětí, viz Obr. 14. V současnosti se stále častěji uplatňuje také provedení

snímače s vestavěným předzesilovačem (ICP/IEPE), kde se přímo ve snímači převádí náboj na nízkonapěťový signál. Takové snímače mají nižší nároky na připojovací kabel a obvykle větší odolnost proti rušení. Piezoelektrické snímače nejsou vhodné pro statická měření. Díky svodovým odporům konektorů aj. dochází k postupnému odvodu náboje a měřený signál postupně klesá. Proto jsou tyto snímače vhodné pro dynamické děje. Nevýhodou piezoelektrických snímačů je také dlouhodobá stabilita v závislosti na teplotě.



Obr. 14 Schéma zapojení akcelerometru [5]

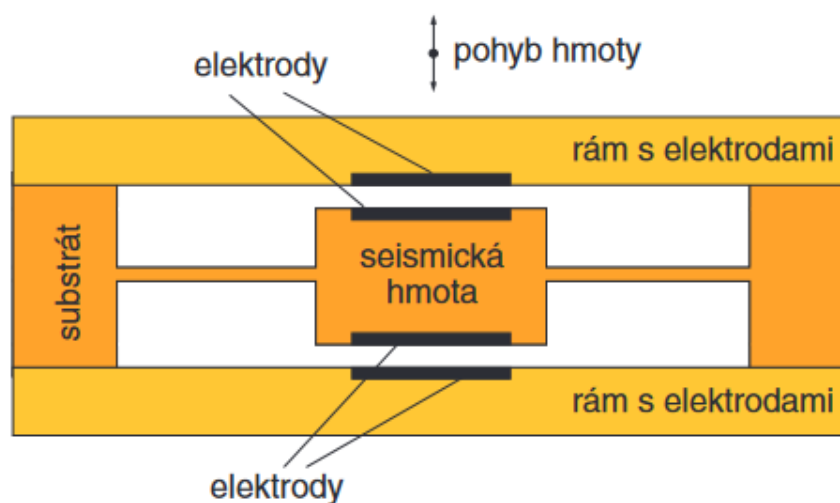
Snímače se dají připevnit na měřený objekt několika způsoby. Ty se liší rychlostí a jednoduchostí montáže a zejména hodnotou maximálních přenášených frekvencí, viz Obr. 15. V principu platí, že rychlá a jednoduchá montáž (včelí vosk) je také nejhorší ve frekvenčním přenosu. Proto je pro každou realizaci potřeba zvážit, které uchycení snímače zvolit.



Obr. 15 Omezení kmitočtu při montáži akcelerometrů [6]

Piezorezistivní snímače zrychlení nepoužívají piezoelektrický krystal, ale piezorezistivní materiál. Ten převádí sílu od setrvačné hmoty na změnu elektrického odporu. Chovají se podobně jako tenzometry podrobněji popsané v kapitole 2.7.

Kapacitní snímače mají seismickou hmotu, která kmitá ve snímači jak je vidět z Obr. 16. K této hmotě jsou připojeny dvojice elektrod. Při změně polohy hmoty způsobené kmitáním se na elektrodách naměří změna kapacity. Tyto snímače jsou díky své konstrukci vhodné pro měření gravitačního zrychlení.



Obr. 16 Princip kapacitního snímače zrychlení [7]

Indukčnostní snímače mají zabudovanou cívku, která kmitá v poli permanentního magnetu. Při tomto pohybu se indukují napětí. Napětí je přímo úměrné rychlosti kmitání. Pro větší frekvence je potřeba přidat tlumící závit, který se umísťuje pod cívku.

2.7 Točivý moment

Dalším důležitým parametrem pro sledování při měření na převodovkách je měření točivého momentu. Ten je důležitý, abychom znali přesný průběh zatížení.

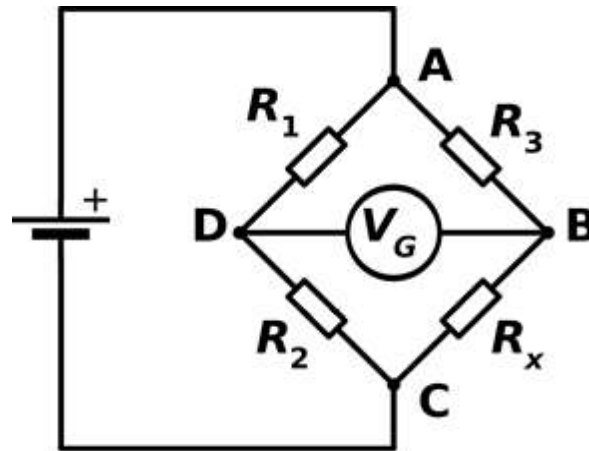
Moment lze měřit několika způsoby. Jeden způsob využívá snímače síly, který je umístěn na páce kyvné části statoru dynamometru. Snímač síly může být například tenzometrický. Další možností je přímé měření pomocí tenzometrů. Buď se mezi hřídele vkládá tenzometrická příruba (může být i piezoelektrická), viz Obr. 17, nebo se dá hřídel dynamometru přímo osadit tenzometry.



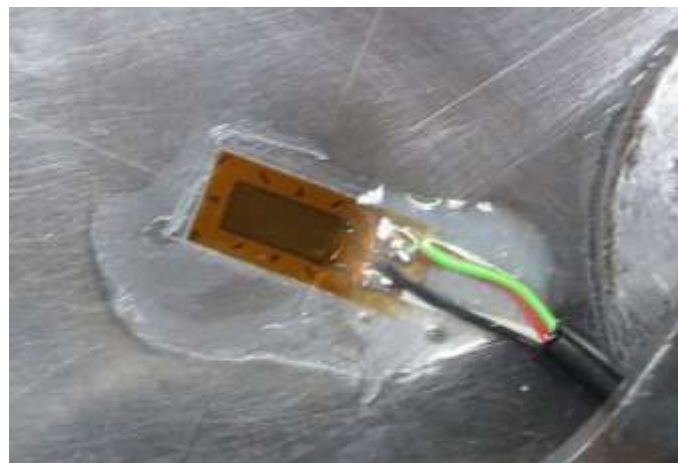
*Obr. 17 Příklady snímačů momentu od firmy Kistler [5]
(na levé straně tenzometrická příruba pro měření točivého momentu a na pravé straně piezoelektrická příruba pro měření kroucího momentu)*

Tenzometry převádějí mechanickou deformaci na elektrické napětí. Měří se proto v oblasti Hookova zákona. Tenzometr lze zjednodušeně uvažovat jako vodič nalepený na deformační člen ve směru největší deformace. V důsledku deformace se mění délka vodiče a tím i velikost odporu vodiče, díky tomu se projeví změna napětí. Pro zapojení tenzometrů se

využívá tzv. Wheatstonova můstku, viz Obr. 18, kdy dochází k zvýšení citlivosti, nejlepší kompenzací vlivu teplot a přívodního vedení apod.



Obr. 18 Zapojení tenzometrů do Wheatstonova můstku [8]



Obr. 19 Příklad nalepeného tenzometru

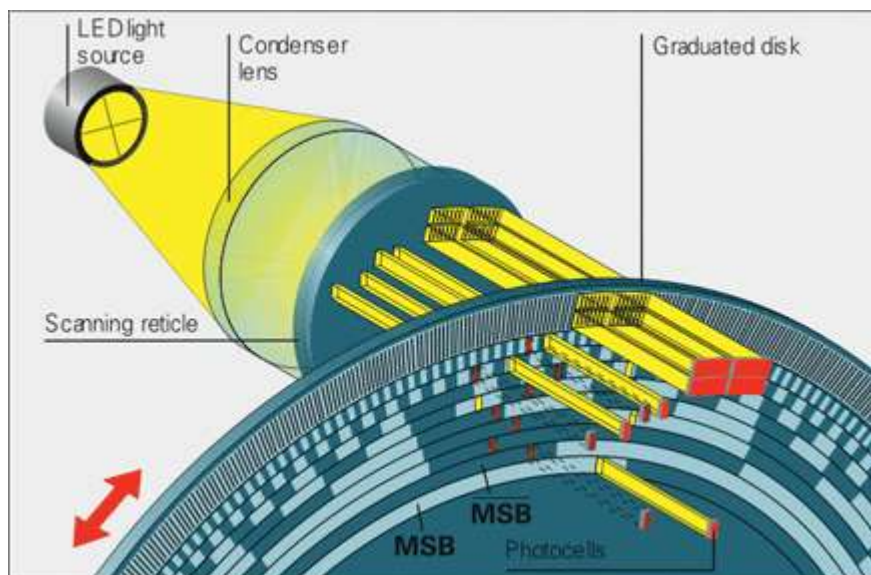
2.8 Úhlová rychlost

Důležitou měřenou veličinou je úhlová rychlost vstupní a výstupní hřídele převodovky.

Existuje řada různých snímačů, které jsou schopné snímat úhlovou rychlost. Snímače s nespojitým signálem jsou: indukční snímače, Hallova sonda, ultrazvukové, laserové nebo kapacitní snímače. Tyto snímače však obvykle zaznamenávají pouze jeden nebo několik málo signálů na otáčku a měří tak spíše průměrnou úhlovou rychlost. Nejsou proto použitelné na

podrobnější analýzu chování převodovek. Snímače se spojitým signálem jsou: potenciometrické, magnetostrikční, indukční, resolvers nebo inkrementální snímače.

Nejčastěji se používají optoelektronické inkrementální snímače. Inkrementální snímače mají LED diodu jako zdroj světla a proti ní je fototranzistor, který detekuje procházející světlo. Mezi vysílačem a přijímačem je jeden statický a jeden rotační disk s vytvořenou mřížkou, která při překrytí průhledných částí světlo propustí, viz Obr. 20. Výstupní signál je tvořen buď digitálními pulsy z dvou signálů vzájemně fázově posunutých o 90° (sousednost hran určuje smysl otáčení) nebo dvojicí analogových napěťových signálů sinus/cosinus. Rozlišení inkrementálních snímačů je určeno počtem pulsů na jednu otáčku. Tento systém je zdvojen a fázově posunut a díky tomu je možné určit smysl otáčení. Měření úhlové rychlosti je dáno frekvencí výstupních pulzů.



Obr. 20 Princip inkrementálního snímače [9]

2.9 Další příslušenství

Na manuální převodovky, které se stále objevují často v automobilech, jsou kladeny velké požadavky. Proto je součástí zkušebního zařízení těchto převodovek mechanismus, který definovaně přerazuje rychlostní stupně při testech. Tím se simulují i různé způsoby řazení, jako je například nedořazování rychlostních stupňů, řazení velkou silou atd. Pro takovéto simulace se nejčastěji využívá pneumatického pohonu, viz Obr. 21.



Obr. 21 Pneumatické řazení a použitý setrvačnick [10]

Dále se na testovacím zařízení pro převodovky může použít setrvačnick. Tím se dají simulovat setrvačné síly automobilu.

Může vzniknout i požadavek na axiální zatěžování u specifických převodovek, jako je tomu třeba ve vrtulníku. Tímto tématem se více zabývá kapitola 4.7.

3 Návrh měřicího pracoviště

Zadáním práce bylo zkonstruovat jedno pracoviště pro měření a testování převodovek. Ve vrtulníku se používají dvě převodovky, které je potřeba testovat ve třech variantách, viz Obr. 22. Tyto převodovky je potřeba v rámci testů zatěžovat stejně, jako je tomu ve vrtulníku.



Obr. 22 Testované převodovky

(A – sestava hlavní převodovky s propojovací hřídelí na zadní převodovku, B – hlavní převodovka, C – zadní převodovka)

Parametry vrtulníku SkySpotter 150

Motor: 6 525/2 800 min⁻¹, 42 kW, 61,5 Nm

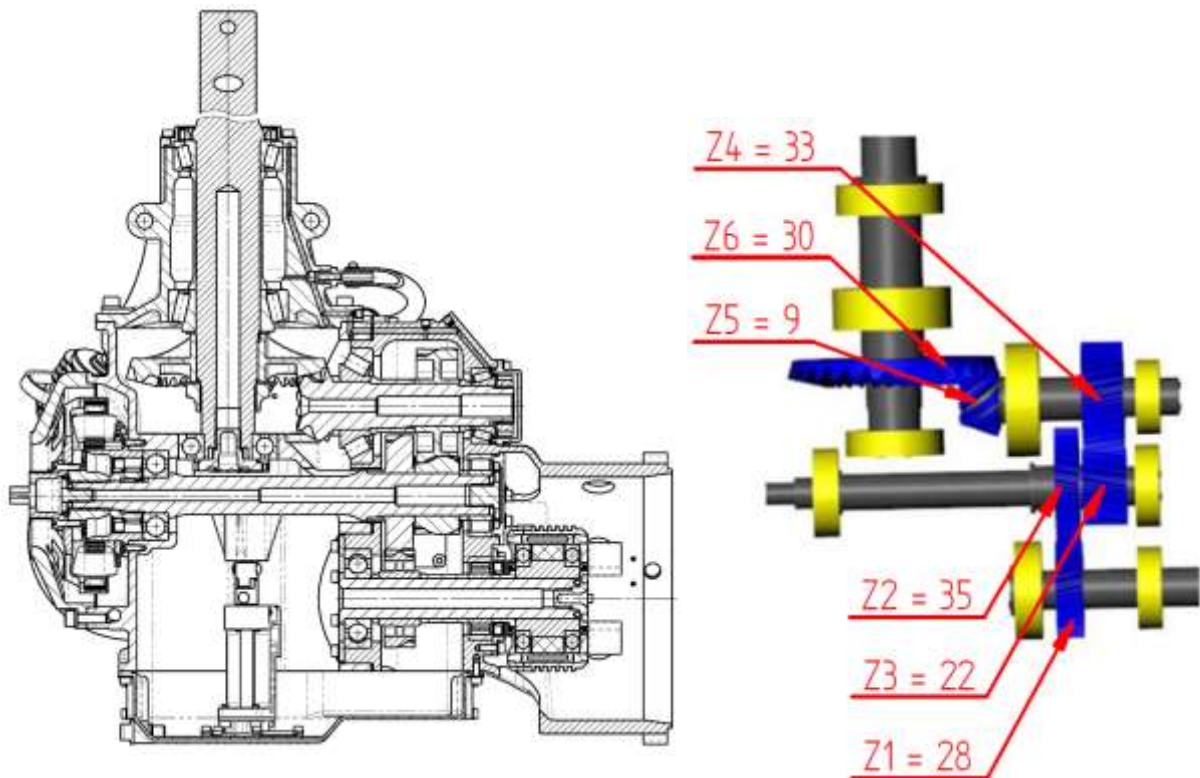
Hlavní rotor: 1 044/448 min⁻¹, 30 kW, 365 Nm

Vyrovnávací rotor: 5 220/2 240 min⁻¹, 3 kW, 5,5 Nm

Tahová síla: max 4 000 N

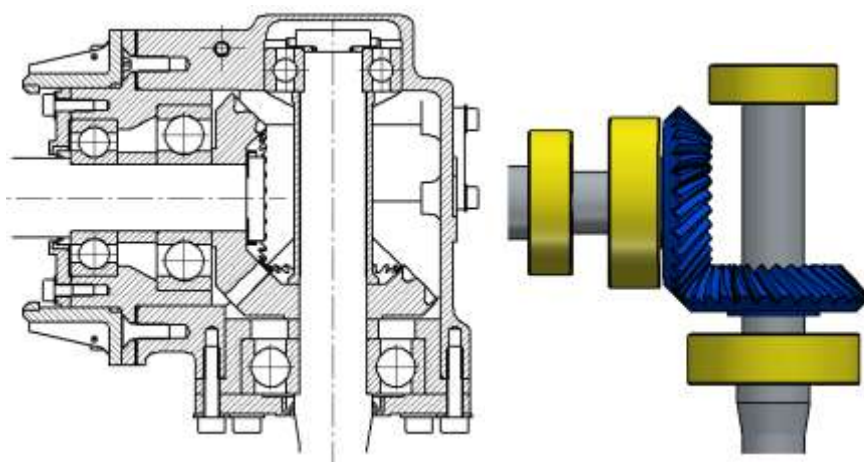
Uváděné otáčky jsou provozní/volnoběžné.

3.1 Rozbor kinematiky převodovek



Obr. 23 Kinematické schéma hlavní převodovky

Vstupem hlavní převodovky (Obr. 23) je hřídel přivádějící točivý moment od motoru. Přes převod přímými ozubenými koly se šikmými zuby je točivá energie převedena na hřídel vedoucí k vyrovnávacímu rotoru. Dále je dalším převodem přímými ozubenými koly se šikmými zuby převedena na vložnou hřídel. Kuželovým převodem se šikmými zuby je pak převedena na hřídel hlavního rotoru, který má dva listy. V převodovce jsou použita valivá ložiska.



Obr. 24 Kinematické schéma zadní převodovky

Zadní převodovka na Obr. 24 se skládá ze vstupního hřídele a výstupního hřídele. Vstupní hřídel je připojen na výstup z velké převodovky a na výstupu úhlové převodovky je připojen vyrovnávací rotor. Hřídele jsou spojeny pomocí kuželových ozubených kol se šikmými zuby s převodovým poměrem 1. Rozměrově se jedná o malou úhlovou převodovku. V převodovce jsou použita valivá ložiska.

3.1.1 Významné poruchové frekvence

Pro převodovky byly spočítány frekvence odpovídající otáčkám jednotlivých hřídelů. Výsledky jsou zapsány v tabulce 1. Dále byly spočítány frekvence jednotlivých ložisek pomocí aplikace na stránkách firmy SKF. Výsledky frekvencí pro malou převodovku jsou vypsány v tabulce 3 a pro hlavní převodovku v tabulce 4. Pokud by se ve spektrech vibrací objevila špička nějaké z těchto frekvencí, jednalo by se o konkrétní závadu.

Výpočet frekvencí

$$f_m = \frac{n}{60} = \frac{2\,800}{60} = 46,7 \text{ Hz}$$

$$f_{vr} = f_m \cdot \frac{z_1}{z_2} = 46,7 \cdot \frac{28}{35} = 37,3 \text{ Hz}$$

$$f_h = f_{vr} \cdot \frac{z_3}{z_4} = 37,3 \cdot \frac{22}{33} = 24,9 \text{ Hz}$$

$$f_{hr} = f_h \cdot \frac{z_5}{z_6} = 24,9 \cdot \frac{9}{30} = 7,5 \text{ Hz}$$

$$f_{r1} = f_{hr} \cdot i = 7,5 \cdot 2 = 15 \text{ Hz}$$

$$f_{r2} = f_{vr} \cdot i = 37,3 \cdot 2 = 74,6 \text{ Hz}$$

Frekvence	volnoběh 2 800 min ⁻¹	let 6 525 min ⁻¹
f _m (motor)	46,7 Hz	108,8 Hz
f _{vr} (hřídel vyrovnávacího rotoru)	37,3 Hz	87,0 Hz
f _h (vložená hřídel)	24,9 Hz	58,0 Hz
f _{hr} (hřídel hlavního rotoru)	7,5 Hz	17,4 Hz
f _{r1} (lopatková frekvence hlavního rotoru)	15 Hz	34,8 Hz
f _{r2} (lopatková frekvence vyrovnávacího rotoru)	74,6 Hz	174 Hz

Tab. 1 Základní frekvence

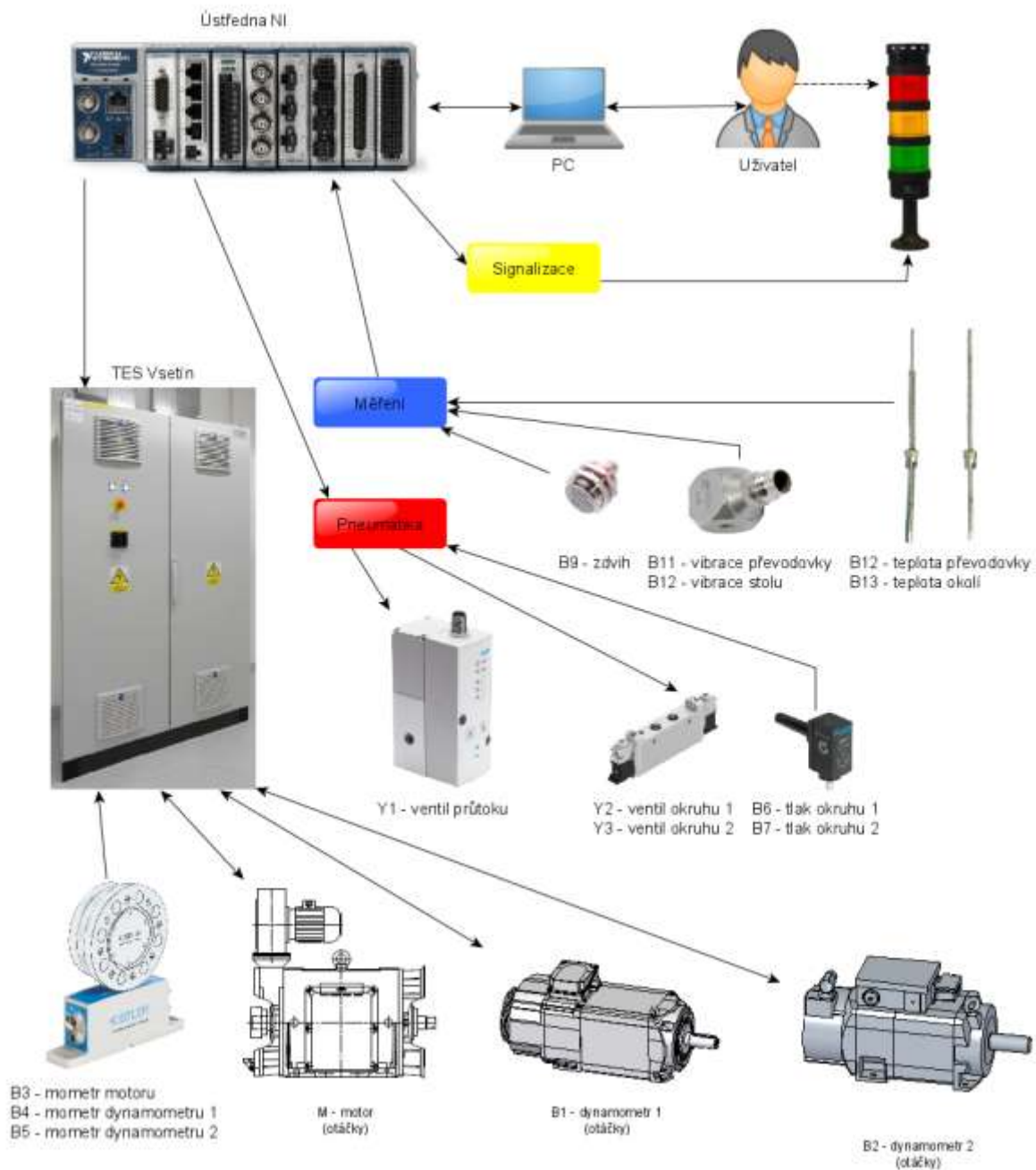
		Klec ložiska	Valivá tělesa podle vlastní osy	Vnitřní kroužek ložiska	Vnější kroužek ložiska	Valivá tělesa ložiska
		f_c	f_r	f_{ip}	f_{ep}	f_{rp}
volnoběh	6303	13.6 Hz	63.3 Hz	166.2 Hz	94.9 Hz	126.5 Hz
	6202	14.2 Hz	74.1 Hz	184.6 Hz	113.8 Hz	148.2 Hz
	6203	14.2 Hz	74.4 Hz	184.5 Hz	113.9 Hz	148.7 Hz
provozní otáčky	6303	31.6 Hz	147.6 Hz	387.6 Hz	221.4 Hz	295.1 Hz
	6202	33.2 Hz	172.8 Hz	430.7 Hz	265.3 Hz	345.6 Hz
	6203	33.2 Hz	173.5 Hz	430.4 Hz	265.6 Hz	346.9 Hz

Tab. 2 Frekvence ložisek malé převodovky

		Klec ložiska	Valivá tělesa podle vlastní osy	Vnitřní kroužek ložiska	Vnější kroužek ložiska	Valivá tělesa ložiska
		f_c	f_r	f_{ip}	f_{ep}	f_{rp}
volnoběh	6305	13,7 Hz	65,6 Hz	165,1 Hz	96,0 Hz	131,2 Hz
	NU 205	15,1 Hz	93,4 Hz	289,1 Hz	195,8 Hz	186,8 Hz
	31306	15,7 Hz	100,3 Hz	345,8 Hz	251,0 Hz	200,5 Hz
	32005	16,2 Hz	133,2 Hz	401,2 Hz	307,5 Hz	266,5 Hz
	63-22	13,7 Hz	65,6 Hz	165,1 Hz	96,0 Hz	131,1 Hz
	33108	15,9 Hz	122,7 Hz	405,7 Hz	303,0 Hz	245,3 Hz
	32008	16,4 Hz	150,2 Hz	79,9 Hz	378,0 Hz	300,4 Hz
	6206	14,8 Hz	86,2 Hz	202,6 Hz	133,1 Hz	172,4 Hz
	608	13,6 Hz	64,0 Hz	165,8 Hz	95,3 Hz	128,1 Hz
provozní otáčky	6305	32,0 Hz	153,0 Hz	385,0 Hz	224,0 Hz	306,1 Hz
	NU 205	35,1 Hz	217,8 Hz	674,3 Hz	456,8 Hz	435,7 Hz
	31306	36,6 Hz	233,9 Hz	806,6 Hz	585,4 Hz	467,8 Hz
	32005	37,7 Hz	310,8 Hz	95,8 Hz	717,2 Hz	621,5 Hz
	63-22	32,0 Hz	152,9 Hz	385,1 Hz	223,9 Hz	305,8 Hz
	33108	37,2 Hz	286,1 Hz	946,2 Hz	706,8 Hz	572,3 Hz
	32008	38,3 Hz	350,4 Hz	1119,2 Hz	881,8 Hz	700,8 Hz
	6206	34,5 Hz	201,1 Hz	472,6 Hz	310,4 Hz	402,1 Hz
	608	31,8 Hz	149,4 Hz	386,7 Hz	222,3 Hz	298,7 Hz

Tab. 3 Frekvence ložisek hlavní převodovky

3.2 Návrh koncepce měřicího zařízení



Obr. 25 Návrh koncepce měřicího zařízení

Uživatel bude zařízení ovládat z počítače. Ten bude připojen k ústředně Compact DAQ od firmy National Instruments. Tato ústředna bude vybavena kartami pro připojení tří základních skupin (signalizace, měření a pneumatika). Dále bude ústředna komunikovat přes TCP/IP s rozvaděčem firmy TES Vsetín. K tomuto rozvaděči budou

připojeny dynamometry, pohon a vestavěné inkrementální snímače úhlové rychlosti. Snímače točivého momentu budou také připojeny do rozvaděče dynamometrů. Pro jednoduchost zástavby byly vybrány tenzometrické přírubové snímače od firmy Kistler. Pro přehlednost je koncepční uspořádání měřicího zařízení zobrazeno na Obr. 25.

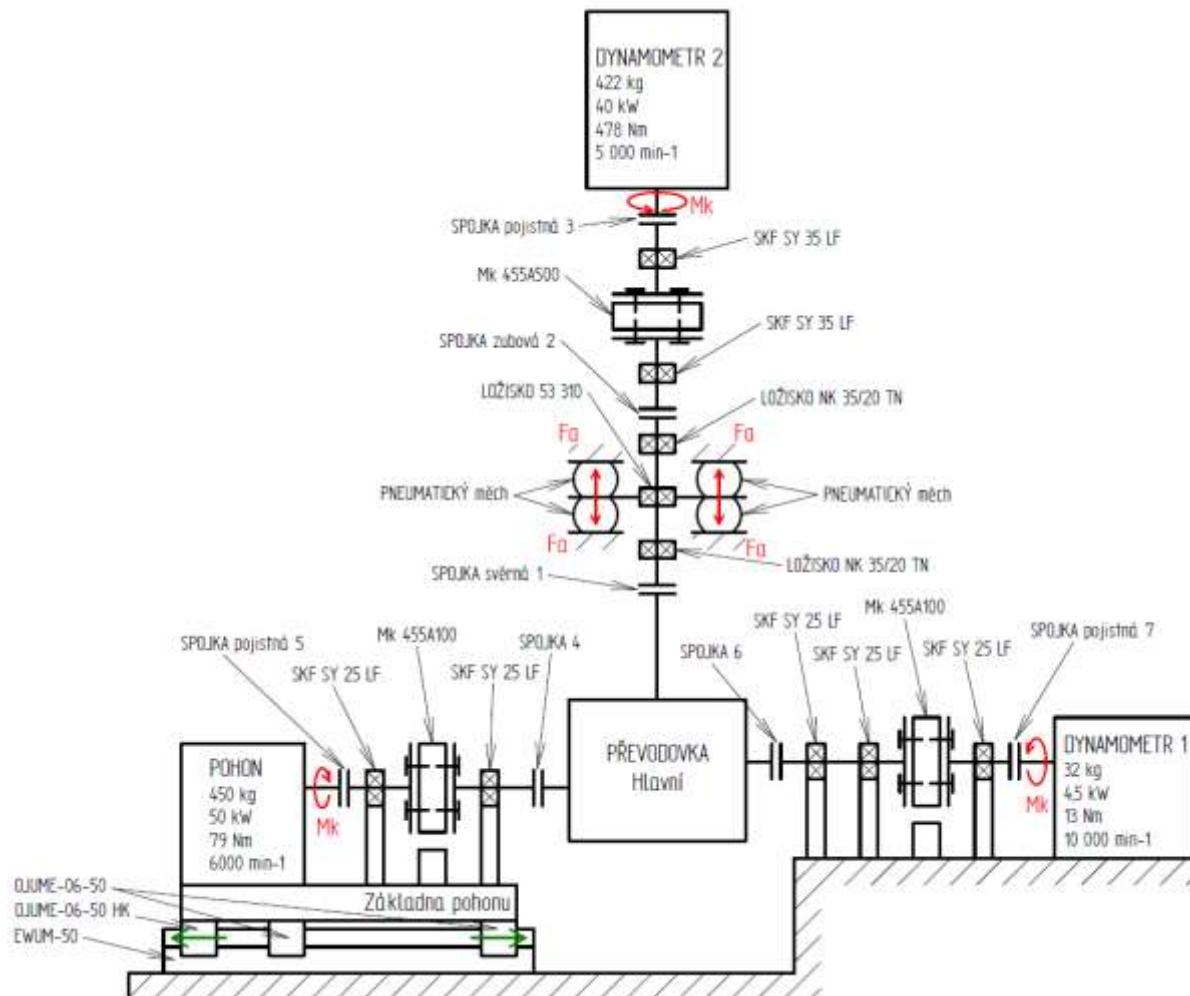
Ve skupině signalizace bude tříbarevný maják se zvukovým modulem. Ten bude signalizovat v jakém stavu se měřící stanoviště nachází (probíhá test, závada, připraveno k měření). V další skupině měření budou jednotlivé snímače. Snímače zrychlení byly vybrány piezoelektrické tříosé. Teploty budou měřeny termočlánky typu K. Pro měření zdvihu byl vybrán snímač indukční. Více informací o vybraných snímačích v příloze.

Poslední součástí budou pneumatické prvky pro vyvozování a řízení axiální síly. Proporcionální ventil bude řídit velikost axiální síly se zpětnou vazbou ze snímače tlaku díky dané charakteristice pneumatických pružin. Dále bude do obvodu zařazen dvojitý ventil pro zapínání a přepínání směru axiální síly.

Všechny snímače ze skupiny měření a řízení axiální síly bude možné libovolně zapínat/vypínat podle toho, jaký typ testů se bude zrovna na zařízení provádět.

4 Konstrukční návrh

4.1 Jednoučelové pracoviště

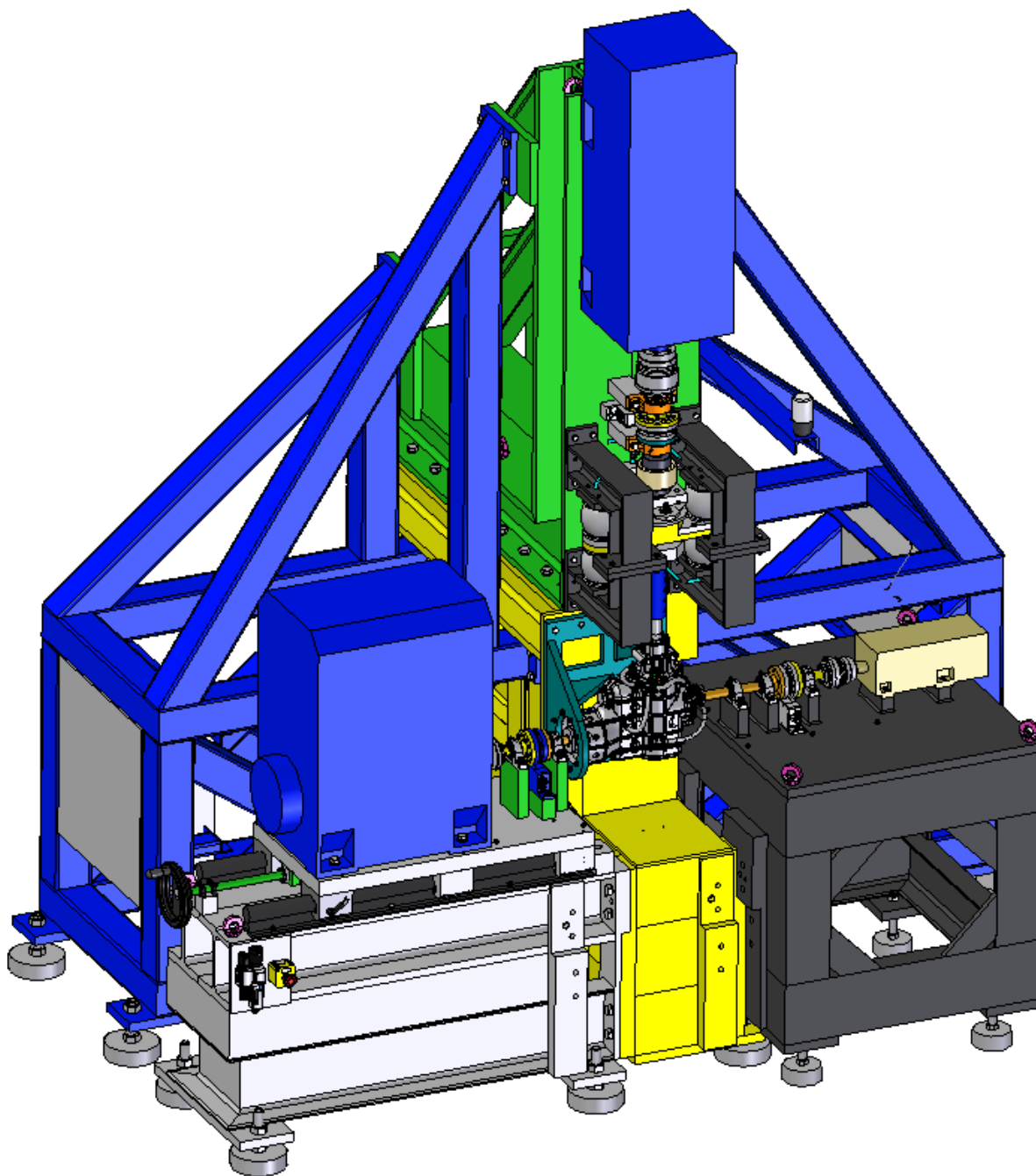


Obr. 26 Schéma zařízení

První možností je vytvoření vlastního svařovaného rámu. Jelikož má pracoviště zajišťovat testování všech tří variant převodovek, musí konstrukce být dostatečně variabilní pro možnost snadné změny uspořádání komponent, viz Obr. 26.

Výhodou takového pracoviště je snadná změna konfigurace podle měřené varianty uspořádání převodovek. Na rámu budou připravené patky, do kterých by se montovaly jednotlivé moduly. Celý svařenec bude potřeba kvůli výrobním možnostem a možnostem transportu a manipulace udělat sešroubovaný z několika částí. Svařenec by měl být o něco levnější, než kdyby se použila univerzální upínací deska s velkým úhelníkem.

Nevýhodou tohoto zařízení je jednoúčelové použití jen pro tyto typy převodovek. Není pak možné na takovémto zařízení testovat jiné převodovky, případně jiná zařízení. Pro modifikaci na jiné úlohy by bylo potřeba navrhnout a vyrobit nové části rámu.



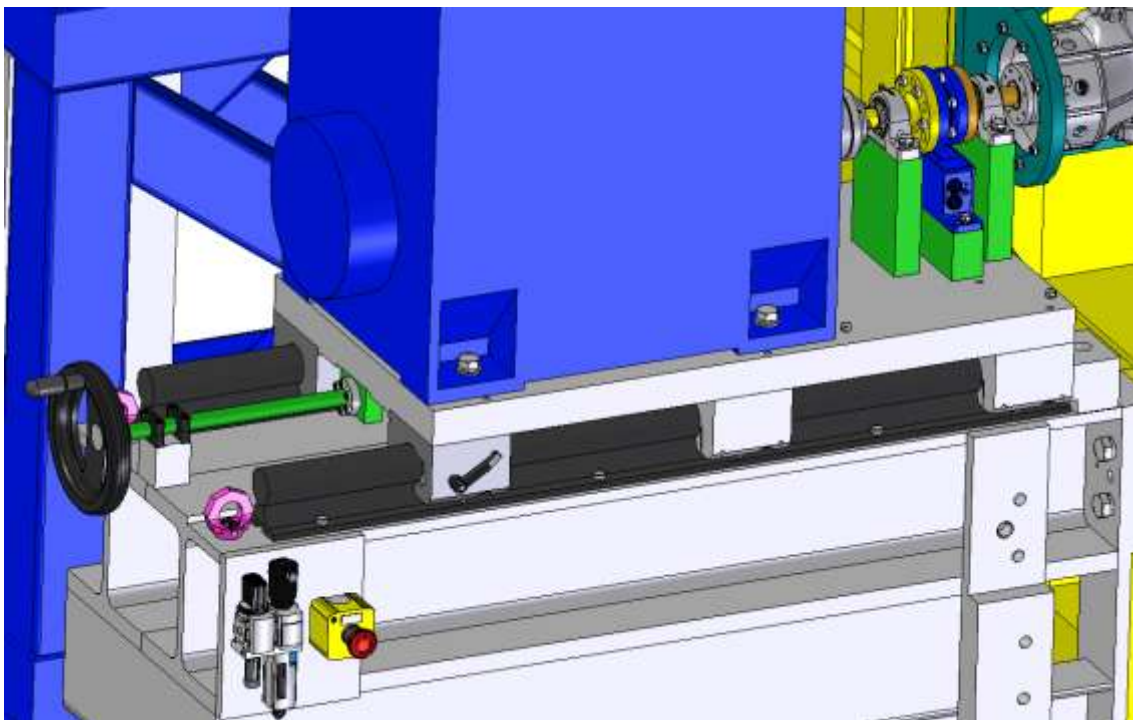
Obr. 27 Jednoúčelové pracoviště

4.1.1 Pohon a dynamometry

Hlavní součástí zařízení je pohon a dva dynamometry. Pro tyto parametry firma MOOG Brno (dříve VUES) navrhla systém s motorem a dvěma dynamometry. Každá z těchto komponent má svůj měnič. Motor a velký dynamometr byly navrženy se vzájemnou rekuperací elektrické energie pro snížení celkového příkonu zařízení. Malý dynamometr užívá topný rezistor na maření energie.

4.1.2 Zajištění variability konstrukce

Kvůli požadované variabilitě zkušebního pracoviště a možnostem instalace a připojování testované převodovky do stolice je třeba umožnit horizontální osový posuv hlavního pohonu. Pro návrh bylo vybráno lineární vedení od firmy IGUS. Kvůli dostatečným tuhostem byl zvolen průměr 50 mm a podepření v celé jeho délce, viz Obr. 28. Dále byl k vedení připevněn pohybový šroub také od firmy IGUS pro snadný posuv pohonu při montáži převodovky. Výběr komponent proběhl pomocí konfigurátoru výrobce, který ukazoval životnosti v řádech tisíců až desetitisíců cyklů. To je pro navrhované řešení víc než dostatečné.

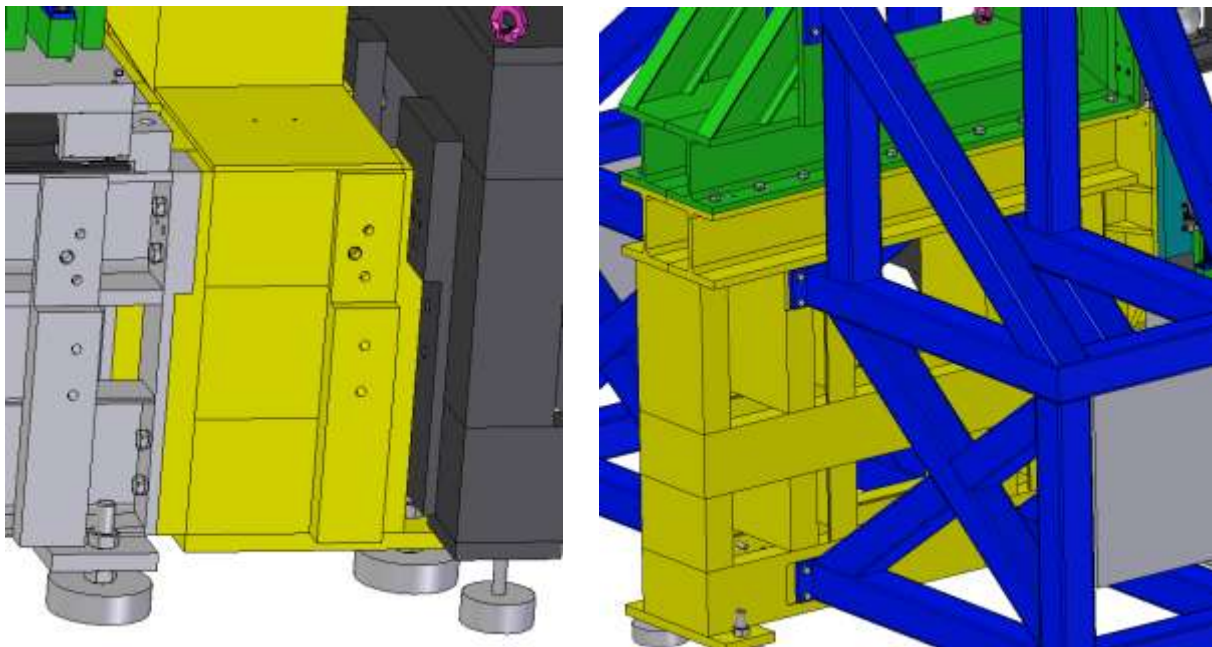


Obr. 28 Lineární vedení

Malý dynamometr je připevněn na vlastním nosném rámu, který je uvažován jako mobilní s pomocí zdvihacího zařízení. Velký dynamometr je pevně ukotven k základnímu rámu a není třeba jeho polohu měnit.

4.1.3 Spojení rámu

Všechny rámy jsou opatřeny plotnami, které tvoří frézované plochy a vodící kolíky pro definování poloh. Rámy jsou tímto spojeny tvarovým stykem, jak je vidět na Obr. 29. Vzájemnou výšku rámu určuje frézované osazení a je možné ji seřídít pomocí stavitelných nohou. Zbylé dva směry definuje naváděcí čep a dosedací plocha. Rámy jsou spojeny šrouby. Modrý rám zajišťuje stabilitu konstrukce, proto není potřeba přesných frézovaných ploch. Zelený rám je definován kolíky na frézované ploše.

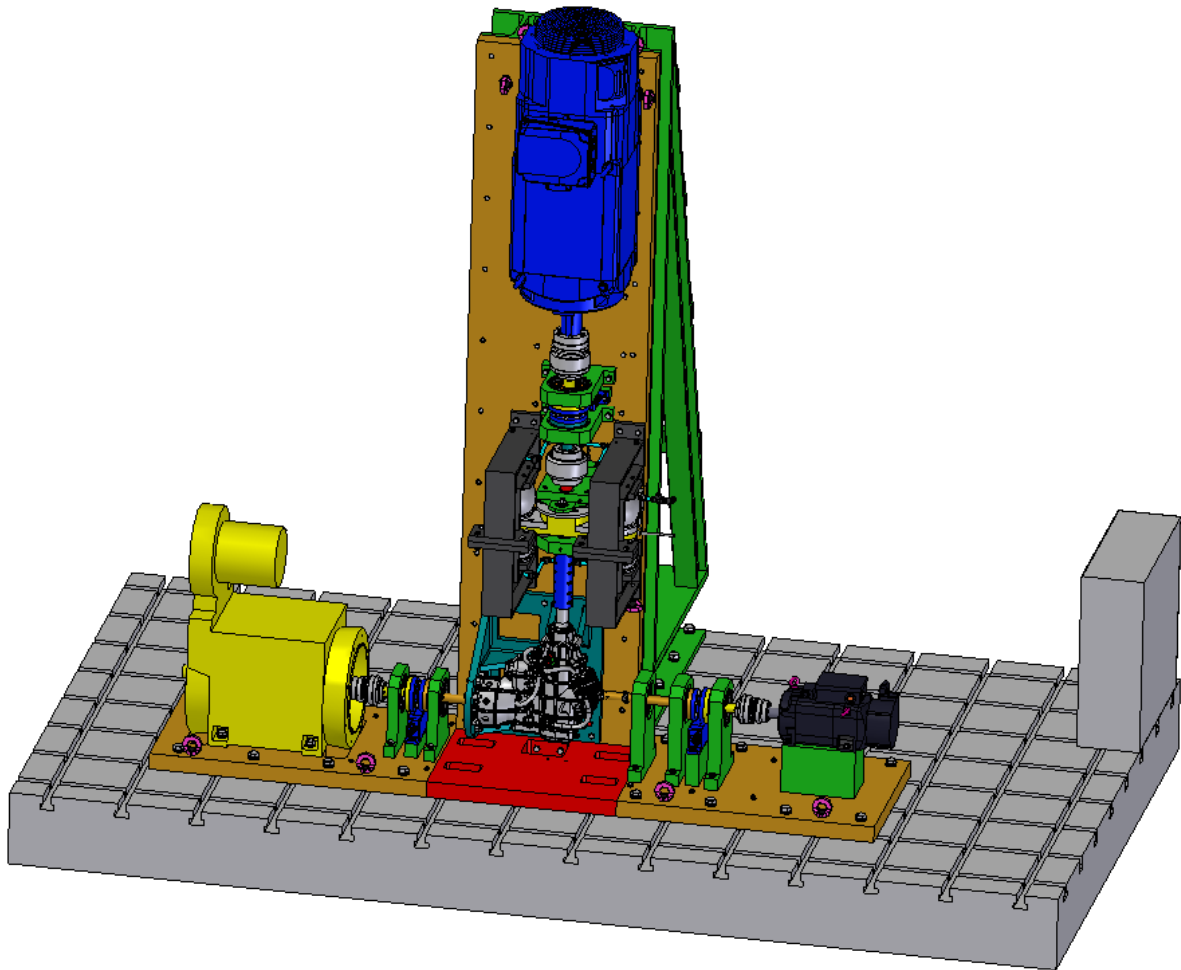


Obr. 29 Spojení rámu

4.2 Univerzální pracoviště

Na základě požadavků potenciálního uživatele zařízení na zvýšení univerzálnosti zkušebního zařízení (případné testování pohonů či dalších typů převodovek) byla navržena druhá konstrukční varianta zkušebního pracoviště. Nové řešení využívá principů standardního pracoviště, jako je tomu ve zkušebnách. Ty jsou většinou tvořeny masivními upínacími deskami. Desky jsou přes izolátory připevněny k podlaze laboratoří, aby nedocházelo k přenosu vibrací do budovy. Všechny jednotlivé části mají T drážky, aby bylo možné zajistit variabilitu pracoviště. Do takto připravené základny bylo zkonstruováno upínání převodovek

a jednotlivé podsestavy. Celé zařízení bude konstruováno jako modulární a všechny komponenty se dají skládat dle potřeby přes T drážky. Nová koncepce je vidět na Obr. 30.



Obr. 30 Nový konstrukční návrh zkušebního zařízení

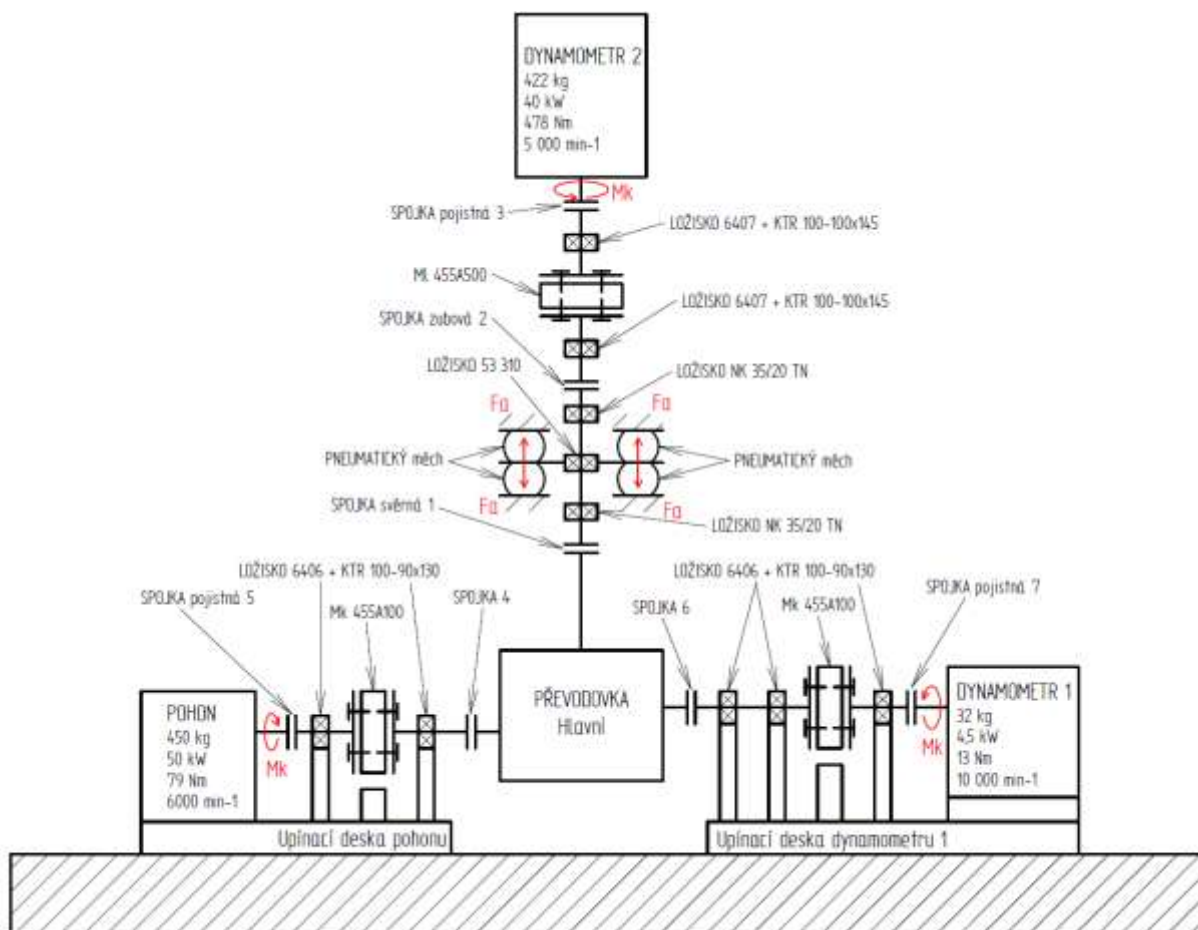
Výhodou je velká tuhost základny. Konstrukce je pak velmi jednoduchá. Celé stanoviště je pak univerzální a není problém provádět i jiné zkoušky.

Nevýhodou je pouze cena a složitost dodatečného přemístování. Dále jsme limitováni rozměry desky, která je nakupovanou komponentou. Drážkové desky lze ale v případě potřeby spojovat do větších celků.

Základ tvoří univerzální drážkový stůl o rozměrech 2 x 3,5 metru od firmy Stolle. Zákazník výhledově plánuje i testování nově vyvíjeného pohonu. Právě zvýšená modularita konstrukce umožní do budoucna jednotlivé části sestavovat v různých variantách a kombinacích.

5 Detaily konstrukce

V této kapitole jsou rozebrány jednotlivé stěžejní části konstrukce. Schéma na Obr. 31 poskytuje přehled vybraných typů komponent tvořících kompletní sestavu zkušebního zařízení.



Obr. 31 Schéma zařízení

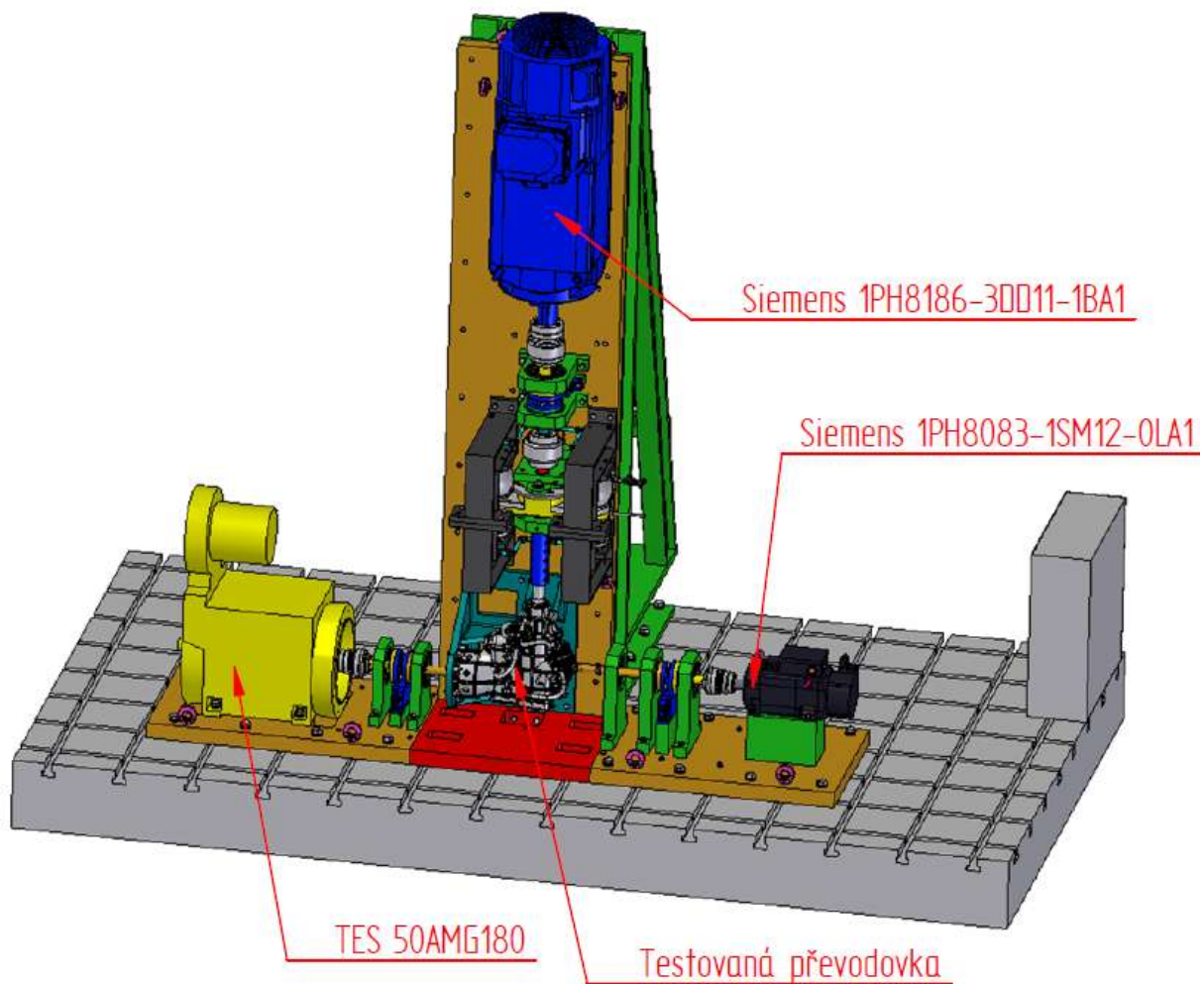
5.1 Pohon a dynamometry

Na základě prodloužení dodacích termínů základních komponent zkušebního zařízení (pohonu a dynamometrů) bylo nutné přistoupit ke změně dodavatele. Pohon s dynamometry dodá firma TES Vsetín. Každá z těchto komponent má svůj měnič. Velký dynamometr umožňuje rekuperaci do sítě, malý dynamometr maří energii pomocí topného rezistoru. V tabulce 4 jsou uvedeny parametry jednotlivých komponent, na

Obr. 32 je vidět jejich umístění na zkušebním zařízení.

	55 ADG 180 P	1PH8186	1PH8083
Maximální otáčky	7 500 min ⁻¹	1 500 min ⁻¹	10 000 min ⁻¹
Provozní otáčky/moment	7 200 min ⁻¹ / 73 Nm 7 500 min ⁻¹ / 70 Nm	1 044 min ⁻¹ / 457 Nm	5 220 min ⁻¹ / 5,5 Nm
Snímač momentu	Kistler 4541A	Kistler 4541A	Kistler 4541A
Měřicí rozsah snímače momentu	100 Nm	500 Nm	50 Nm

Tab. 4 Základní parametry dynamometrů a pohonu



Obr. 32 Hlavní komponenty stanoviště

5.2 Ložiska

Pro navrhované zařízení byla použita ložiska uložená pomocí svěrných pouzder nebo přímo zalisovaná do dílů konstrukce. Hřídel propojující motor s převodovkou je smontován ze dvou částí. Mezi nimi je přišroubovaná tenzometrická příruba snímače momentu měřícího točivý moment na hřídeli. Na každé z částí tohoto hřídele je nalisováno ložisko 6406. Tato ložiska jsou uložena pomocí svěrného pouzdra KTR 100 – 90x130 do domků na desce podsestavy.

Podobně je tomu na hřídeli propojujícím převodovku s dynamometrem 2. Rozdíl je pouze v umístění dvou ložisek na straně u převodovky. Ta jsou zde kvůli vyšší tuhosti při využívání podsestavy pro testy dalších převodovek. Při měření samotné zadní úhlové převodovky by docházelo k většímu namáhání hřídele a snímače momentu.

Poslední dva hřídele propojují převodovku, axiální zatěžovací člen a vertikální dynamometr 1. Hřídel mezi převodovkou a axiálním zatěžovacím členem musí být axiálně posuvný. Proto byla zvolena dvojice ložisek NK 32/20 TN. Jedná se o jehlové ložisko bez vnitřního kroužku. Hřídel je proto v místě ložiska zušlechtěn a dovoluje axiální posuv hřídele. Tato ložiska jsou zalisována do domků na základně podsestavy. Axiální síla je přenášena přes axiální ložisko 53 310. To má vnitřní kroužek zalisován na hřídeli a vnější kroužek na roznášecí desce axiálního zatěžovacího členu. Hřídel od axiálního zatěžovacího členu k dynamometru je složen ze dvou částí stejně jako předchozí hřídele a je zde vložen snímač točivého momentu. Na každé straně hřídelů je umístěno ložisko 6407 se svěrným pouzdem KTR 100 – 100x174.

	6406	6407	53 310	NK 32/20 TN
Základní dynamická únosnost	43 kN	55,2 kN	81,9 kN	27,5 kN
Průměr hřídelů	30 mm	35 mm	35 mm	35 mm
Mezní únavové zatížení	1,077 kN	1,409 kN	6,3 kN	6,55 kN
Mezní otáčky	8 400 min ⁻¹	7 500 min ⁻¹	3 400 min ⁻¹	13 000 min ⁻¹
Otáčky volnoběh	2 800 min ⁻¹	448 min ⁻¹	448 min ⁻¹	448 min ⁻¹
Otáčky provozní	6 525 min ⁻¹	1 044 min ⁻¹	1 044 min ⁻¹	1 044 min ⁻¹

Tab. 5 Základní parametry ložisek

5.2.1 Namáhání ložisek

Všechna radiální ložiska na zkušebním zařízení přenášejí pouze točivý moment. Moment ložiska nezachycují, proto jsou namáhána pouze hmotností hřídelů. Jedná se o tak malé zatížení, že se může zanedbat a není potřeba stanovovat jejich životnost.

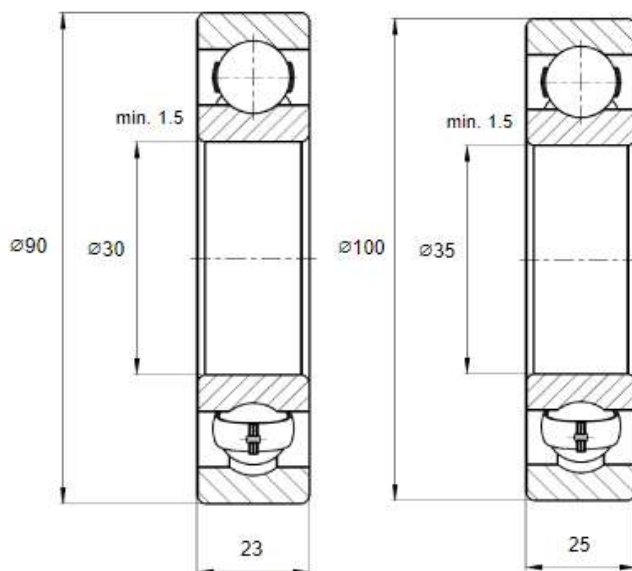
Axiální ložisko je zatíženo axiální silou 4 000 N a hmotností celé sestavy roznášecí desky. Proto byla stanovena pro výpočty axiální síla pro zatížení ložiska 5 kN.

$$P = F_a = 5\,000\text{ N}$$

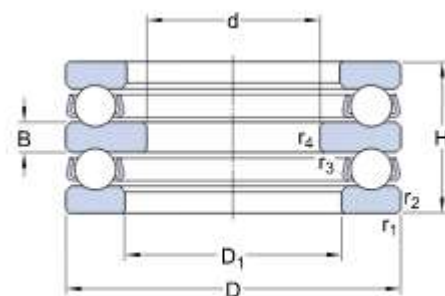
$$L_{h10\ n1} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{n} = \left(\frac{81\,900}{5\,000}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{448} = 9\,809\,880\text{ h}$$

$$L_{h10\ n2} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{n} = \left(\frac{81\,900}{5\,000}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{1\,044} = 9\,396\,436\,422\text{ h}$$

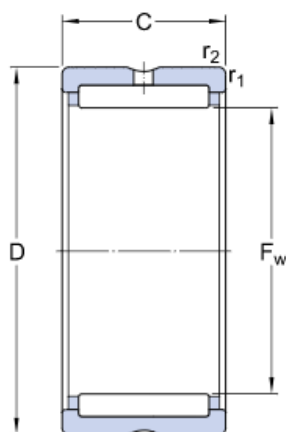
Z výsledků výpočtu je vidět i velmi vysoká životnost axiálního ložiska. Proto není pro zařízení předepsán žádný interval výměny.



Obr. 33 ložiska 6406 a 6407 [11]



Obr. 34 ložisko 52310 [12]

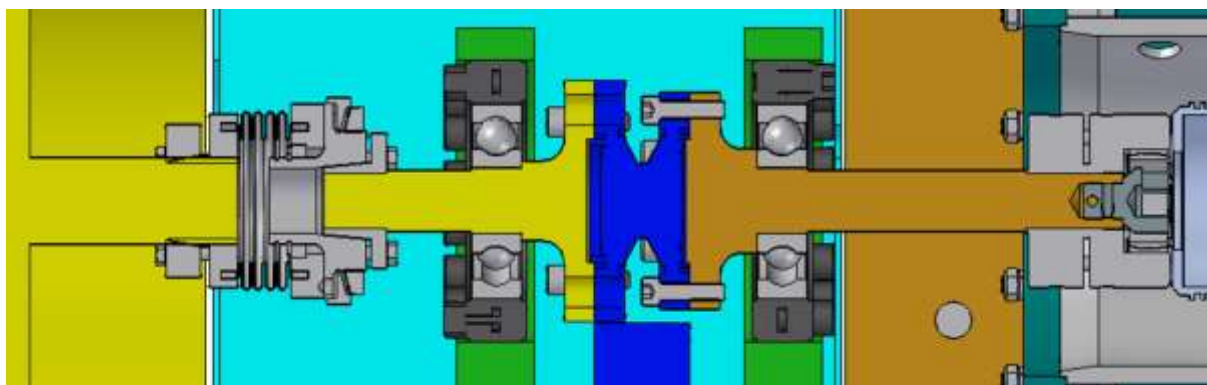


Obr. 35 ložisko SKF NK 35/20 TN [12]

5.3 Hřídele

Pro hřídele, které byly zkonstruovány pro přenášení točivého momentu z pohonu na převodovku a z převodovky na dynamometry, byl proveden jednoduchý kontrolní výpočet. Z přenášeného točivého momentu byly stanoveny minimální průměry hřídelů. Průměry byly pak zvoleny vyšší a většinou stejné jako u připojovaných komponent.

5.3.1 Hřídel pohonu



Obr. 36 Hřídel motoru

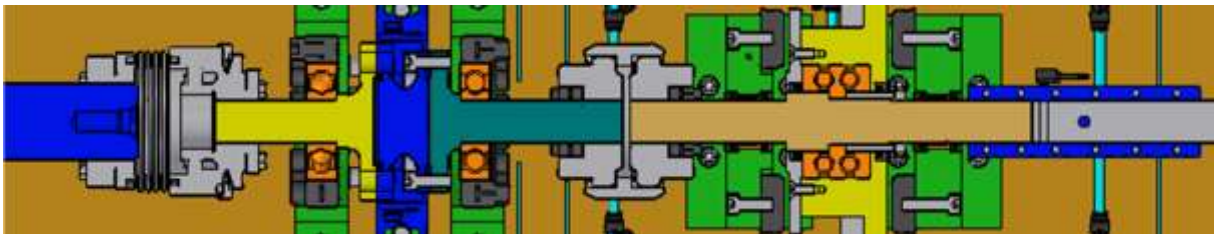
Dělený hřídel se snímačem momentu spojující pohon s převodovkou je vidět na Obr. 36. Přenáší točivý moment 79 Nm a byl zvolen materiál 15 237.7, který má Re 835 MPa. Bezpečnost hřídelů byla zvolena 3 kvůli větší rezervě při mírném zvyšování točivého momentu pohonné jednotky vrtulníku.

$$\tau_D = \frac{R_e}{K} = \frac{835}{3} = 278 \text{ MPa}$$

$$\tau_D = \frac{M_k}{W_k} \rightarrow d_{\min} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot \tau_D}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 79}{\pi \cdot 278\,000\,000}} = \underline{\underline{11,45 \text{ mm}}}$$

Hřídel má nejmenší průměr zvolen 25 mm.

5.3.2 Hřídel velkého dynamometru



Obr. 37 Hřídel velkého dynamometru

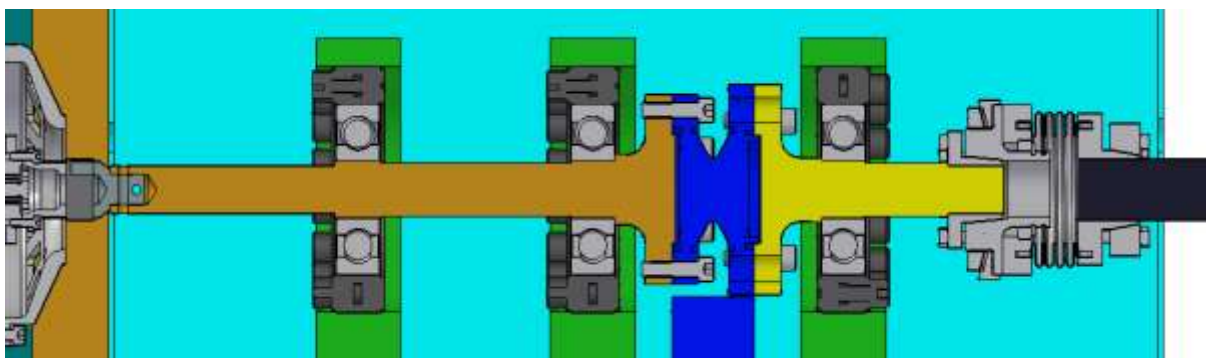
Hřídel, který spojuje převodovku s velkým dynamometrem, je složitější, jak je vidět na Obr. 37. Výstup z převodovky je propojen s hřídelem axiálního zatěžovacího členu. Ten je spojen stejně jako předchozí hřídel s děleným hřídelem se snímačem momentu. Přenáší točivý moment 478 Nm a byl zvolen stejný materiál 15 237.7 jako v předchozím případě, který má R_e 835 MPa. Bezpečnost hřídelů byla zvolena také stejná.

$$\tau_D = \frac{R_e}{K} = \frac{835}{3} = 278 \text{ MPa}$$

$$\tau_D = \frac{M_k}{W_k} \rightarrow d_{\min} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot \tau_D}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 478}{\pi \cdot 278\,000\,000}} = \underline{\underline{20,6 \text{ mm}}}$$

Hřídele mají nejmenší průměr 35 mm.

5.3.3 Hřídel malého dynamometru



Obr. 38 Hřídel malého dynamometru

Tento hřídel je podobný jako hřídel pohonu. Jedná se o dělený hřídel se snímačem momentu spojující pohon s převodovkou, jak je vidět na Obr. 38. Přenáší točivý moment 13 Nm a byl zvolen stejný materiál 15 237.7 jako v předchozím případě, který má R_e 835 MPa. Bezpečnost hřídelů byla zvolena také stejná.

$$\tau_D = \frac{R_e}{K} = \frac{835}{3} = 278 \text{ MPa}$$

$$\tau_D = \frac{M_k}{W_k} \rightarrow d_{\min} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot \tau_D}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 13}{\pi \cdot 278\,000\,000}} = \underline{\underline{6,2 \text{ mm}}}$$

Hřídel má nejmenší průměr zvolen 25 mm.

5.4 Spojky

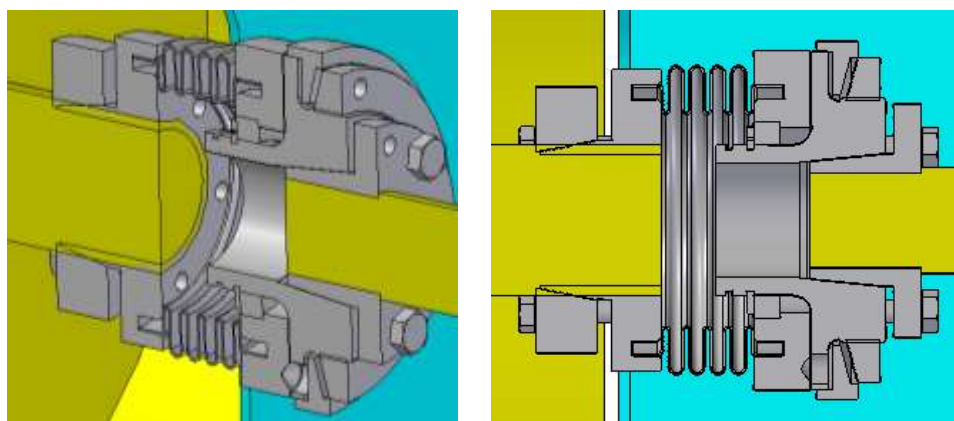
V této kapitole je podrobně popsán výběr spojek. Pro přehled slouží tabulka 6. Všude tam, kde to bylo možné, zůstaly zachovány spojky využívané na vrtulníku. Každý hřídel má také použito pojistnou spojku, aby bylo zaručené rozpojení v případě výskytu nějakého neočekávaného stavu a ochráněny komponenty zkušebního zařízení před přetížením. Spojky byly dimenzovány na zatížení dané hnacím výkonem motoru a brzdým výkonem dynamometrů.

Umístění	Výrobce	Označení
Motor - snímač momentu	UZIMEX	SWK/BK-80-111-35H7-25H7-79Nm-2TKN-SX
Snímač momentu - velká převodovka	KTR	ROTEXGS 38/6.0-25/náboj
Snímač momentu - malá převodovka	Modelárna LIAZ	Standardní z vrtulníku
Velká převodovka - axiální zatěžovací člen		Nově navržená
Axiální zatěžovací člen - snímač momentu	KTR	BoWex 65 C + KTR100
Snímač momentu – velký dynamometr	UZIMEX	SWK/BK-500-161-65H7-35H7-478Nm-2TKN-SX
Velká převodovka - snímač momentu	Modelárna LIAZ	Standardní z vrtulníku
Malá převodovka - snímač momentu		Modifikovaná z vrtulníku
Snímač momentu - malý dynamometr	UZIMEX	SWK/BK-80-111-35H7-32H7-15Nm-2TKN-SX

Tab. 6 Přehled spojek

Motor - snímač momentu

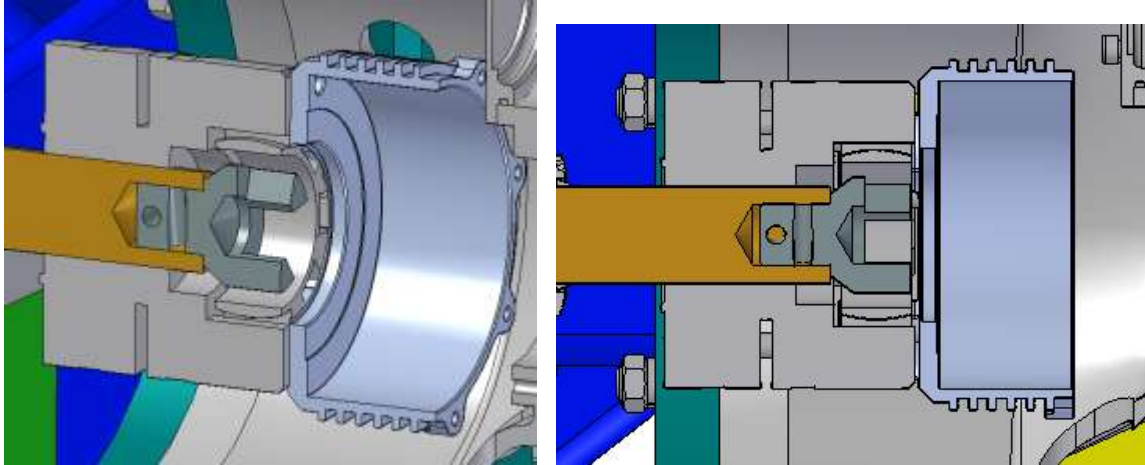
Spojka je vlnovcová pojistná, aby chránila snímač momentu před poškozením. Při přesáhnutí nastaveného momentu dojde k jejímu rozpojení. Spojka se montuje na hladký hřídel utažením kuželového pouzdra. Díky vlnovci spojka eliminuje drobné nepřesnosti v souososti hřídelů.



Obr. 39 Spojka motor - snímač momentu

Snímač momentu - velká převodovka

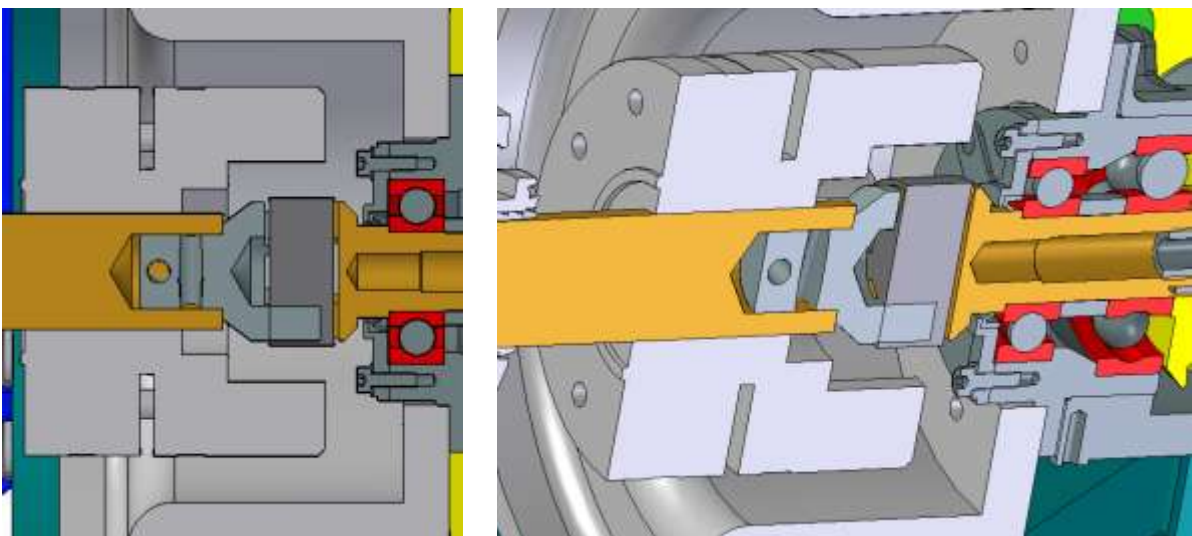
Spojka je pružná zubová. Jedná se o stejný typ spojky, jako se používá ve vrtulníku. Spojka má jediný rozdíl, který spočívá v montáži. Montuje se na hladký hřídel utažením kuželového pouzdra.



Obr. 40 Spojka snímač momentu - velká převodovka

Snímač momentu - malá převodovka

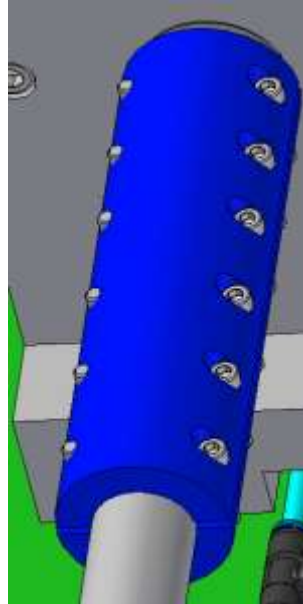
Při testování pouze zadní převodovky namísto hlavní je využita vyráběná spojka standardně používaná ve vrtulníku. Díky výrazně menším rozměrům je spojka trvale aplikována na hřídel pohonu spolu s pružnou zubovou spojkou popsanou v předchozím bodě. Není tedy potřeba spojku vyměňovat při výměně převodovek. Spojka je na hřídel nýtovaná.



Obr. 41 Spojka snímač momentu – malá převodovka

Velká převodovka - axiální zatěžovací člen

Pro toto řešení byla navržena vlastní spojka. Bude se jednat o spojku z hliníkové slitiny, aby nedošlo k poškození převodovky nebo měřicího zařízení. Jedná se o půlenou svěrnou spojku. Je tvořena ze dvou dílů, které jsou společně smontovány šroubovým spojením.



Obr. 42 Velká převodovka - axiální zatěžovací člen

Výpočet

Hřídel je připevněna pomocí 4 šroubů na straně axiálního zatěžovacího členu a 6 šrouby k převodovce. Je to kvůli větší ochraně zkoušené převodovky. Na straně axiálního zatěžovacího členu byl proveden jednoduchý kontrolní výpočet.

Potřebné předpětí ve šroubech

$$p = \frac{2 \cdot M_k \cdot K_s}{d_s^2 \cdot \pi \cdot L \cdot f} = \frac{2 \cdot 478 \cdot 2}{0,035^2 \cdot \pi \cdot 0,055 \cdot 0,47} = 19,2 \text{ MPa}$$

$$F_m = p \cdot l \cdot d = 19\,200\,000 \cdot 0,055 \cdot 0,035 = 36\,960 \text{ N}$$

$$F_Q = \frac{F_m}{n} = \frac{36\,960}{4} = \underline{\underline{9\,240 \text{ N}}}$$

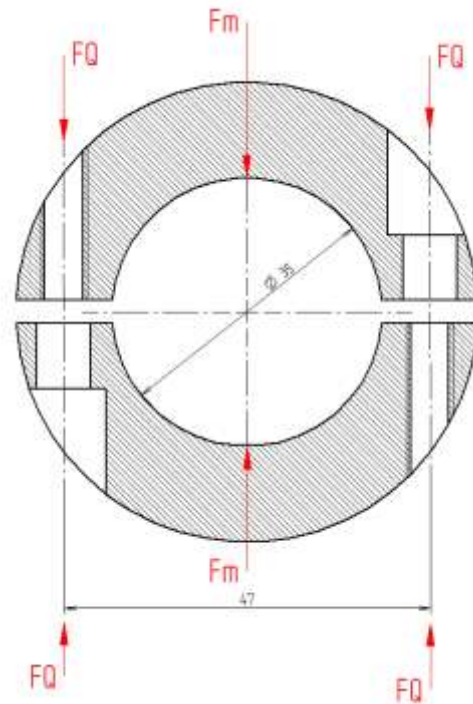
Bezpečnost šroubového spoje

Zvolen šroub M6 10.9 Re 900 MPa

$$\sigma_t = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d_3^2} = \frac{4 \cdot 9\,240}{\pi \cdot 0,00508^2} = 456 \text{ MPa}$$

$$K = \frac{R_e}{\sigma_t} = \frac{900}{456} = \underline{\underline{1,97}}$$

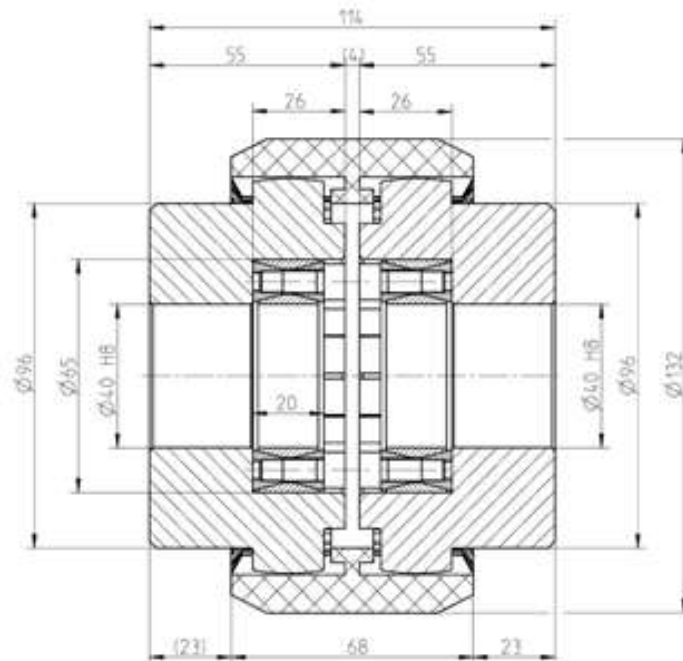
Šroubové spoje vyhovují.



Obr. 43 Schéma výpočtu

Axiální zatěžovací člen - snímač momentu

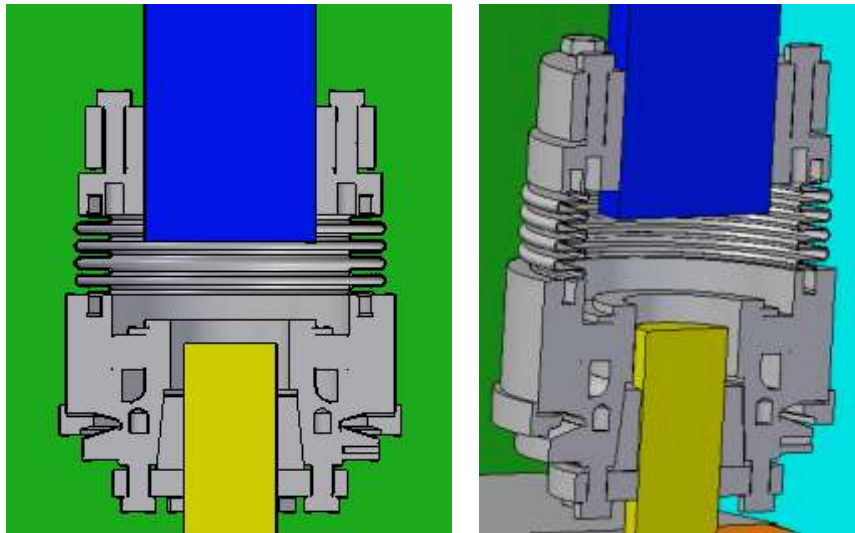
Jedná se o zubovou spojku. Do ní jsou vložena rozpěrná pouzdra, aby se i tato spojka montovala na hladký hřídel. Díky tomuto typu spojky se zamezí přenosu axiální síly na snímač momentu a dále na dynamometr.



Obr. 44 Spojka Axiální zatěžovací člen - snímač momentu [13]

Snímač momentu – velký dynamometr

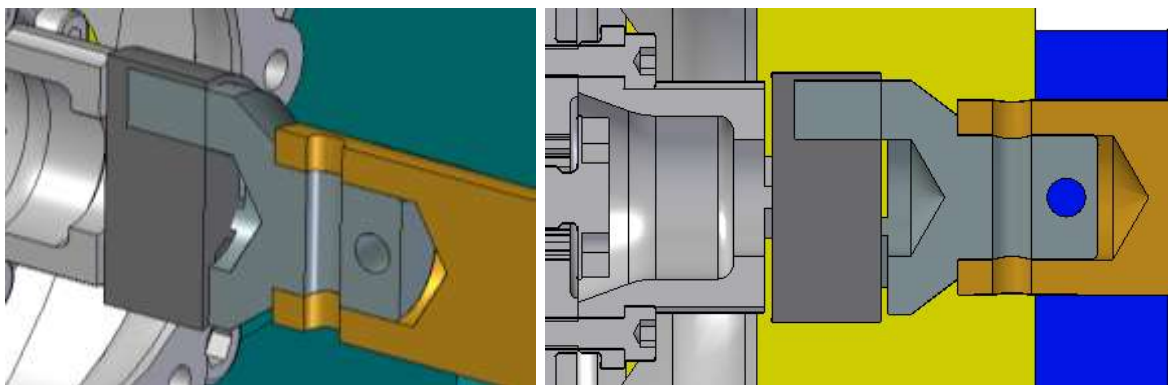
Spojka je vlnovcová pojistná, aby chránila snímač momentu před poškozením. Při přesáhnutí nastaveného momentu dojde k jejímu rozpojení. Spojka se montuje na hladký hřídel utažením kuželového pouzdra. Díky vlnovci spojka eliminuje drobné nepřesnosti souososti hřídelů.



Obr. 45 Spojka Snímač momentu – velký dynamometr

Velká převodovka - snímač momentu

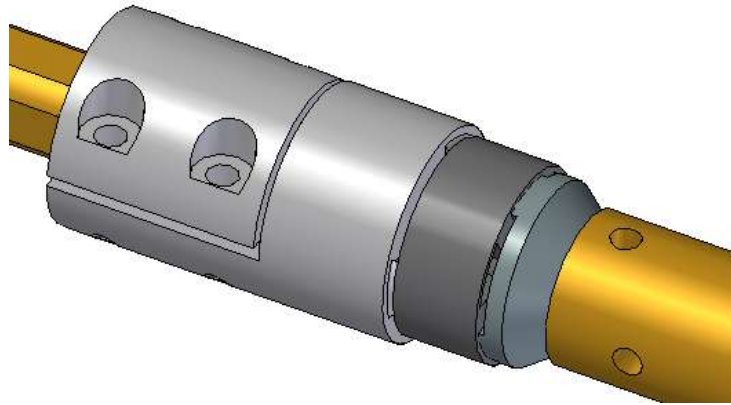
Spojka užívaná standardně ve vrtulníku. Jedná se o stejný typ spojky, jako je spojka používaná pro připojení malé převodovky.



Obr. 46 Spojka Velká převodovka - snímač momentu

Malá převodovka - snímač momentu

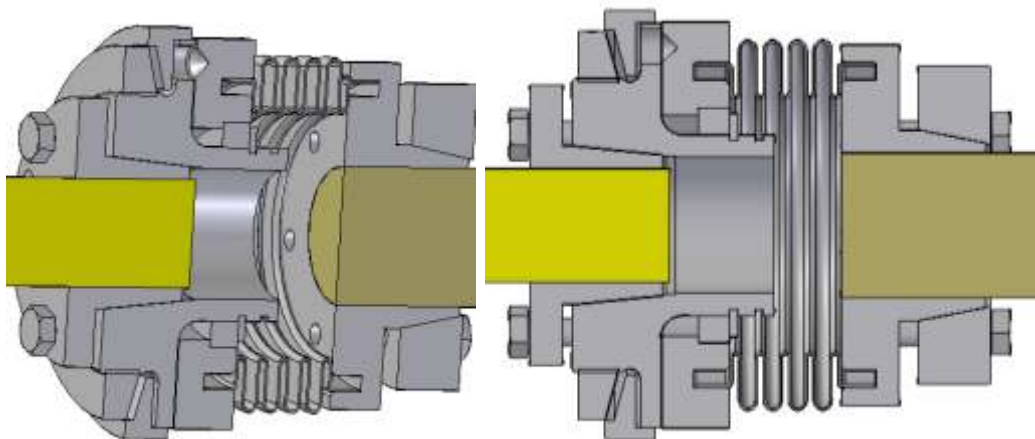
Spojka je podobná používané ve vrtulníku, pouze místo nýtového spoje je navržen svěrný spoj. Hřídel je čtyřhranný, proto svěrný spoj zajišťuje spojku pouze proti posouvání v axiálním směru.



Obr. 47 Spojka Malá převodovka - snímač momentu

Snímač momentu - malý dynamometr

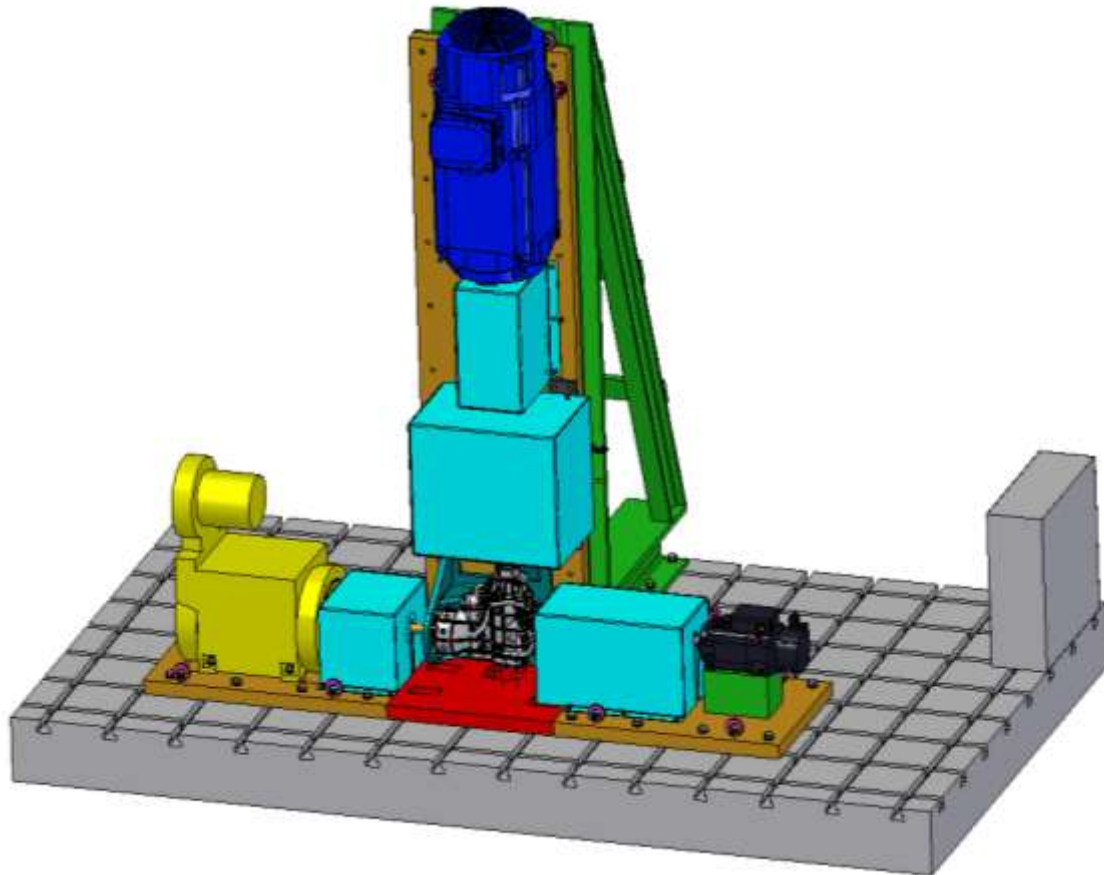
Spojka je vlnovcová pojistná, aby chránila snímač momentu před poškozením. Při přesáhnutí nastaveného momentu dojde k jejímu rozpojení. Spojka se montuje na hladký hřídel utažením kuželového pouzdra. Díky vlnovci spojka eliminuje drobné nepřesnosti souososti hřídelů.



Obr. 48 Spojka Snímač momentu - malý dynamometr

5.5 Krytování

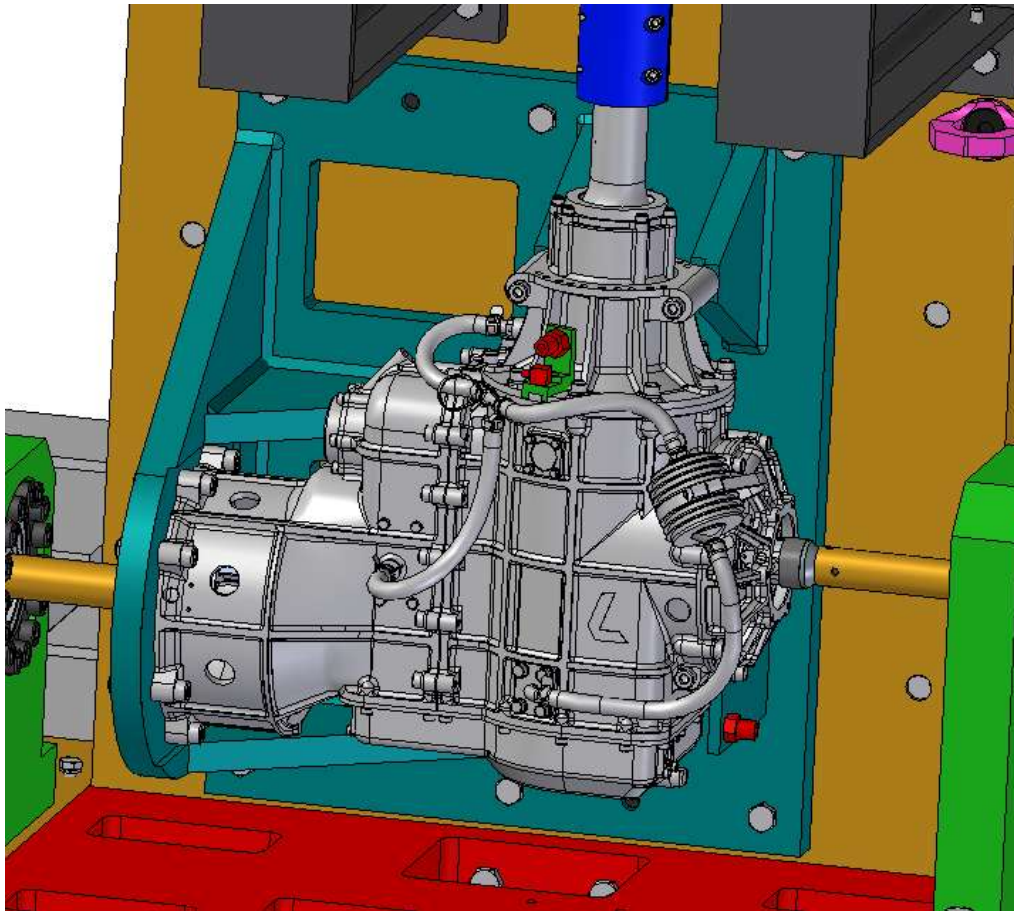
Jednotlivé části zkušebního zařízení jsou vybaveny kryty, viz Obr. 49. Ty slouží k ochraně před kontaktem s rotujícími součástmi. Pro instalaci testované převodovky do zkušebního zařízení je nutné některé kryty sundat pro zajištění přístupu k přípojovacím spojkám, ale vždy před spuštěním testu musí být všechny kryty zpětně namontovány.



Obr. 49 Krytování (světle modrá)

5.6 Upínání převodovky

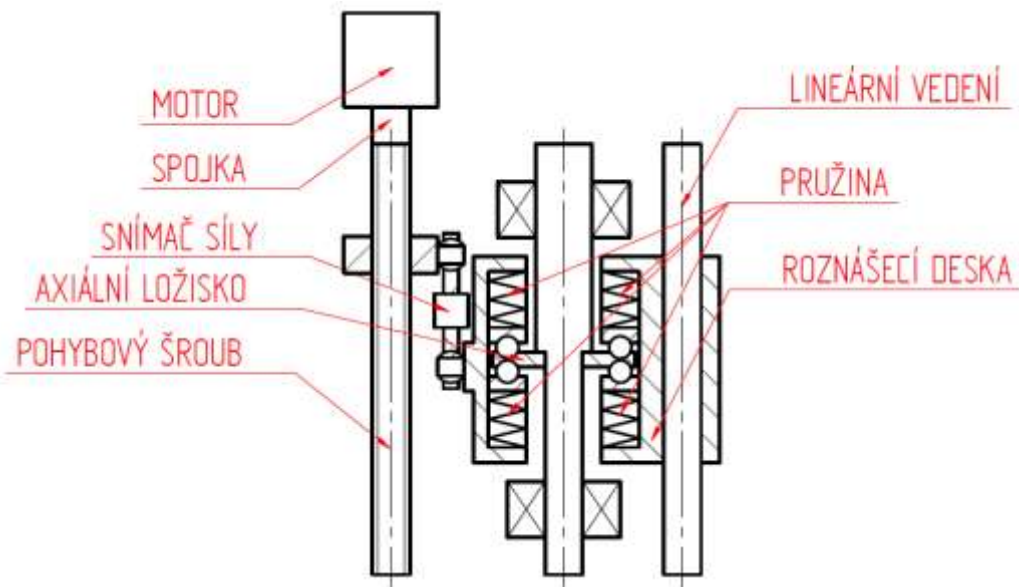
Převodovka je upínána k rámu přes držák. Díky tomu je možné při drobných změnách na převodovce upravit nebo vyrobit pouze nový držák. Pokud nedojde k zásadnějším změnám rozměrů převodovky, není potřeba měnit celý modul velkého dynamometru s axiálním zatěžovacím členem. Držák může také sloužit k lepší manipulaci s převodovkou.



Obr. 50 Upínání převodovky

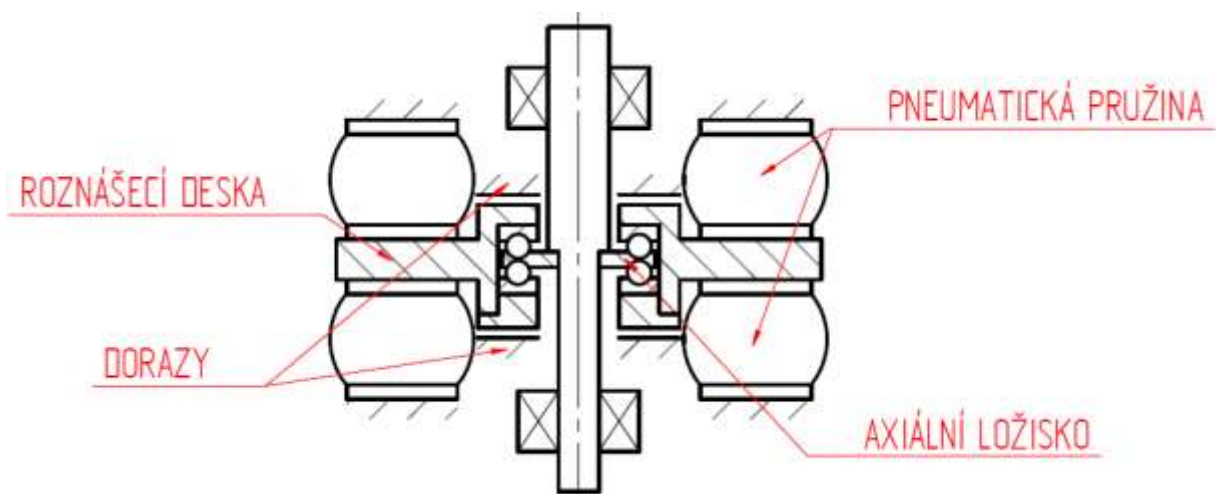
5.7 Axiální zatěžování

První možností pro realizaci axiálního zatěžovacího členu je mechanismus ovládaný elektrickým pohonem, viz Obr. 51. Použitím kuličkové šroubu se transformuje točivý pohyb na pohyb posuvný. Matice by tak působila silou na roznášecí desku. Deska by vyžadovala lineární vedení. V roznášecí desce by byla vhodná pružina, aby pohybový šroub nevykonával nulový pohyb. Nevýhodou by byla cena a složitost konstrukce. Výhodou by byla možnost přímého měření axiální síly pomocí snímače síly mezi maticí a roznášecí deskou.

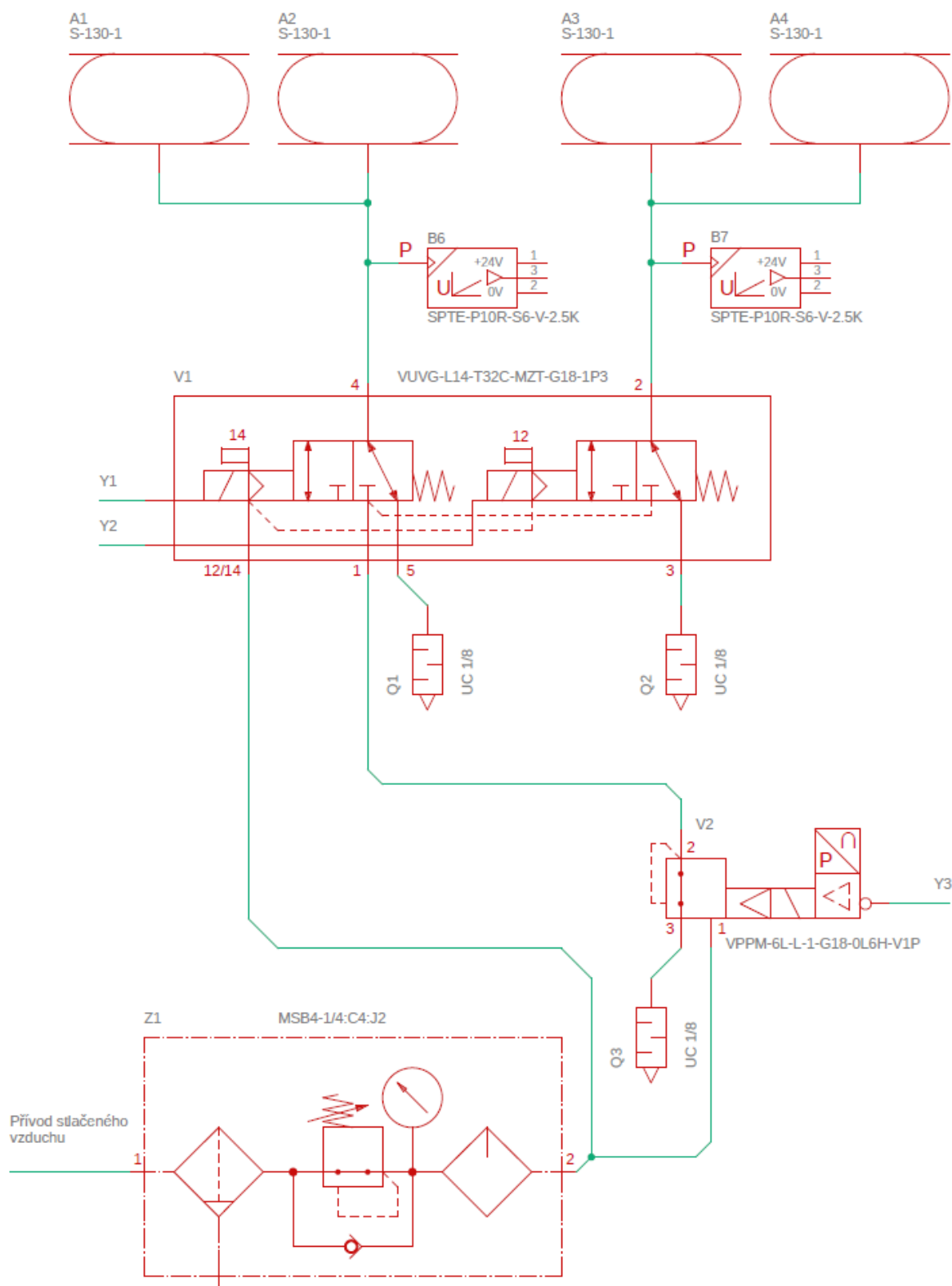


Obr. 51 Elektrické axiální zatěžování

Z důvodu zjednodušení konstrukce a snížení ceny bylo navrženo další řešení, vyvíjet sílu pneumatickou pružinou, jak je vidět z Obr. 52. Síla bude vyvíjena přímo v pneumatických pružinách. Jedinou podmínkou je dostatečná tuhost dílu přenášejícího tuto sílu mezi pneumatickými pružinami a ložiskem na hřídeli. Před přívodem stlačeného vzduchu do spodní a horní dvojce pneumatických pružin budou umístěny snímače tlaku. Pomocí proporcionálního ventilu a zpětné vazby z těchto snímačů bude řízena axiální síla podle známé zdvihové funkce pružiny. Dále bude užit kapacitní snímač zdvihu pro kontrolu aktuální pozice roznášecí desky. Díky použití dvojic pneumatických pružin odpadá potřeba lineárního vedení. Mechanismus je vybaven pevnými mechanickými dorazy roznášecí desky pro stav, kdy budou pneumatické pružiny bez tlaku.

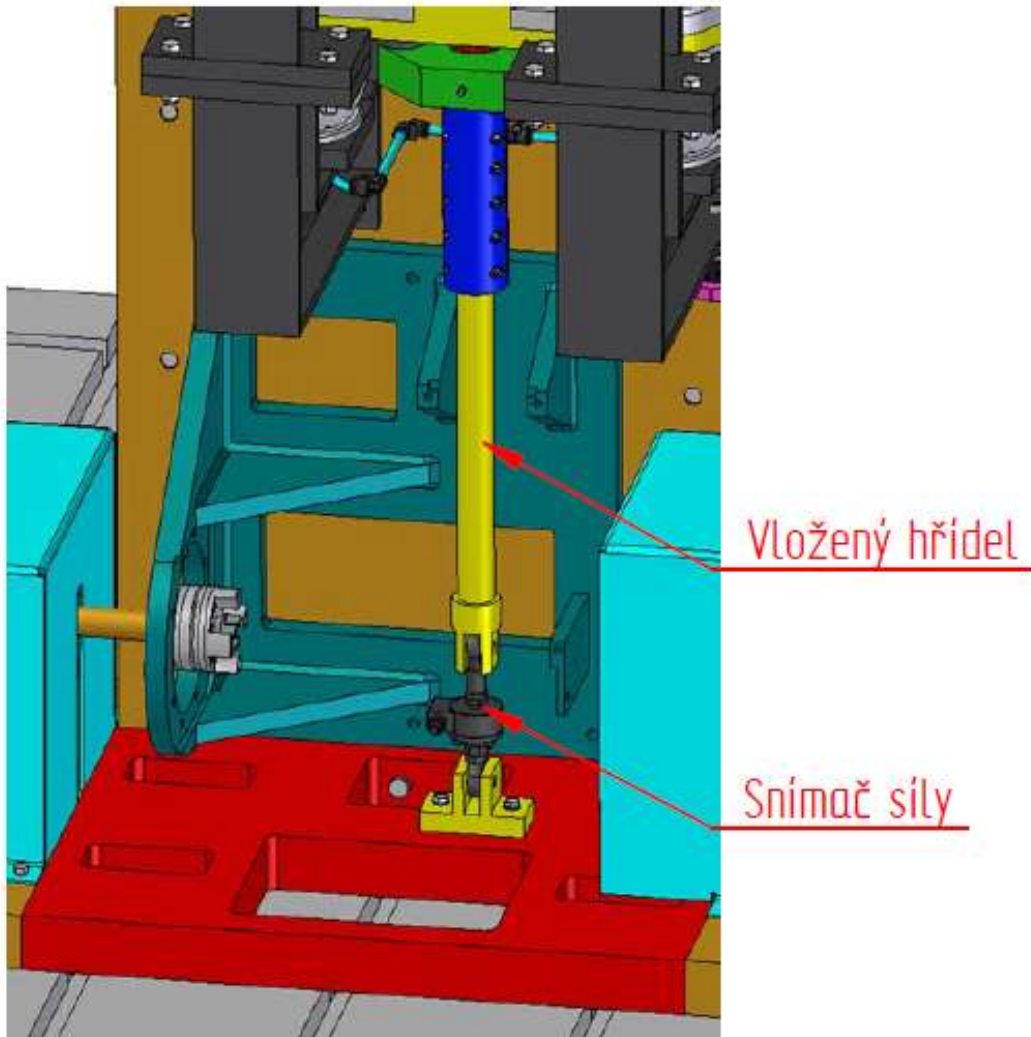


Obr. 52 Pneumatické axiální zatěžování



Obr. 53 Schéma pneumatického axiálního zatěžování

Pro axiální zatěžovací člen je třeba zajistit možnost kalibrace a ověření velikosti axiální síly. To lze řešit přípravkem v podobě vloženého hřídele s vestavěným ověřeným snímačem síly, který se instaluje do zkušebního zařízení namísto převodovky, viz Obr. 54. Porovnáním měřených hodnot z kontrolního a zatěžovacího systému lze axiální zatěžovací člen snadno kalibrovat i ověřovat.



Obr. 54 Kalibrace axiálního zatěžovacího členu

6 Simulace

Pro návrh zařízení je důležité zkontrolovat tuhost rámu. Kdyby zařízení nemělo vyšší tuhost rámu než samotné testované převodovky, výsledky měření by byly ovlivněny deformacemi rámu. Proto byly provedeny simulace, ze kterých je vidět průběh napětí a deformací, aby bylo možné určit tuhost rámu.

6.1 Výpočty šroubových spojů

Pro simulace bylo důležité nejprve určit předpětí šroubových spojů. Výpočet zahrnuje hmotnost jednotlivých dílů a zatížení, které na šroubové spoje působí. První šroubový spoj mezi deskou a svařovaným rámem byl spočítán. Další spoje byly spočítány stejným způsobem jen s jinými vstupními veličinami. Výsledky a vstupní veličiny jsou uvedeny v tabulce 7.

Příklad výpočtu

Potřebné předpětí mezi rámem a deskou

$$F_T = f \cdot F_N \rightarrow F_N = \frac{F_T}{f} = \frac{m \cdot g}{f} = \frac{1\,300 \cdot 9,81}{0,1} = 127\,500 \text{ N}$$

Předpětí ve šroubu s bezpečností

$$F_Q = \frac{k \cdot F_N}{n} = \frac{2 \cdot 127\,500}{20} = 12\,750 \text{ N} = 13 \text{ kN}$$

Napětí ve šroubu

$$\sigma_t = \frac{F_Q}{S} = \frac{4 \cdot F_Q}{\pi \cdot d_3^2} = \frac{4 \cdot 13\,000}{\pi \cdot 16,933^2} = 57,7 \text{ MPa}$$

Utahovací moment

$$\phi_z = \arctan \frac{f_z}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \arctan \frac{0,1}{\cos \frac{60}{2}} = 6,587$$

$$\gamma = \arctan \frac{p}{\pi \cdot d} = \arctan \frac{2,5}{\pi \cdot 20} = 2,279$$

$$D_p = \frac{D_k + D_o}{2} = \frac{21 + 37}{2} = 29$$

$$M_u = \frac{F_Q}{2} [d_2 \cdot \tan(\gamma + \phi_z) + f_p \cdot D_p] =$$

$$= \frac{13\,000}{2} [0,018376 \cdot \tan(2,279 + 6,587) + 0,1 \cdot 29] = 37,5 \text{ Nm}$$

Šrouby je nutné dotáhnout momentem 38 Nm.

Spoj	m	n	F _N	F _q	F _q volené	δ	M _u	M _u volené
[-]	[kg]	[-]	[N]	[N]	[N]	[MPa]	[Nm]	[Nm]
deska - rám	1 300	20	127 530	12 753	13 000	57,73	37,48	38
dynamometr - deska	420	4	41 202	20 601	21 000	275,42	37,22	37
konzola - deska	230	4	22 563	11 282	12 000	229,46	17,60	18
konzola - konzola	400	4	39 240	19 620	20 000	382,44	29,33	10
Držák převodovky - deska	85	6	8 339	2 780	3 000	57,37	4,40	5

Tab. 7 Šroubové spoje

6.2 Okrajové podmínky

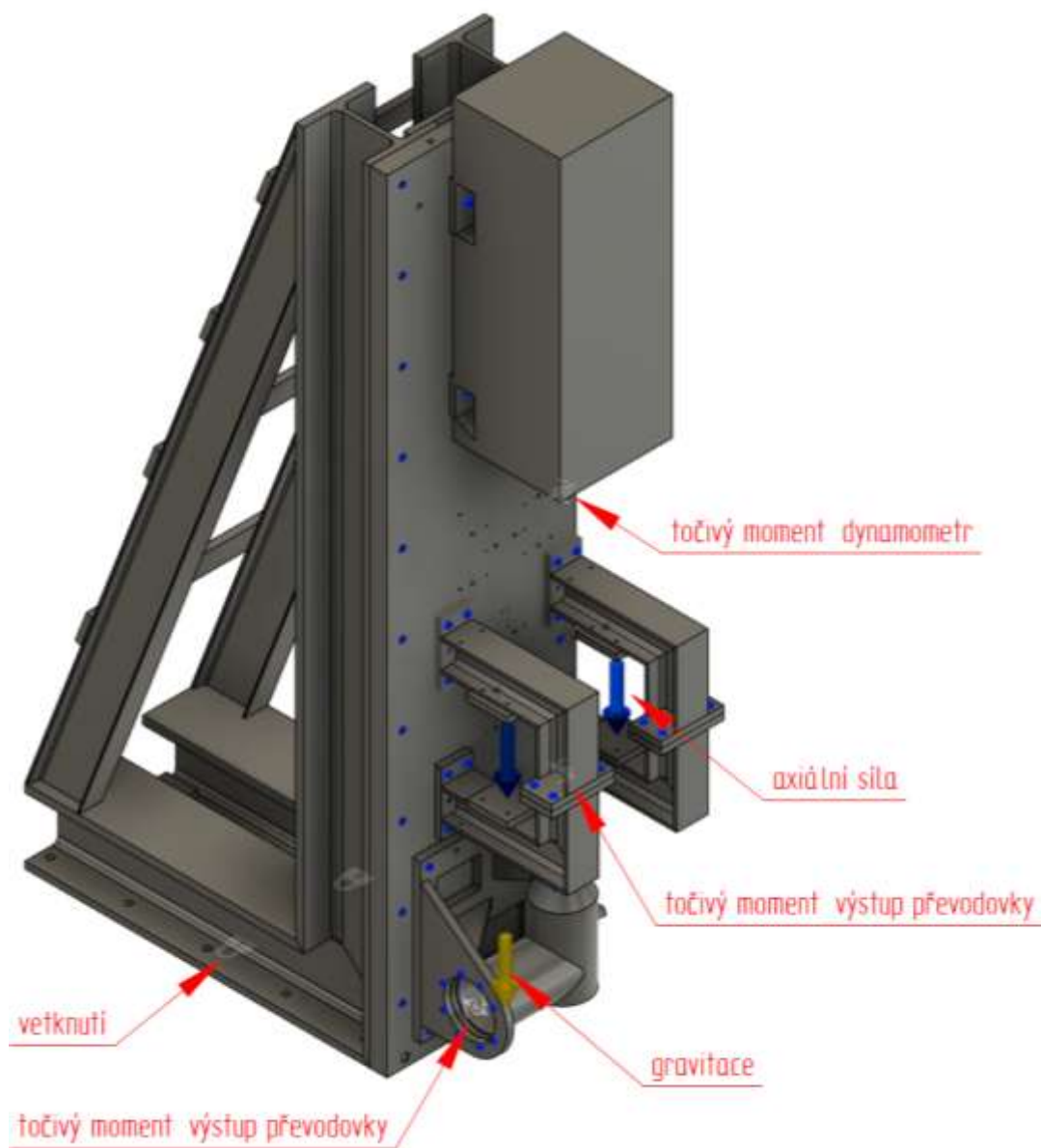
Z dat sestavy zkušebního zařízení byl připraven zjednodušený model pro simulace. Kritickým dílem je hlavně svařený úhelníkový rám a k němu přišroubovaná deska, ke které jsou přimontovány další součásti jako dynamometr, držák převodovky a konzoly pro axiální zatěžovací člen. Dále byl do modelu vložen zjednodušený model převodovky z důvodu definování zatížení působícího na převodovku. Skříň převodovky přenáší zatížení na další části zkušebního zařízení.

V prostředí programu Fusion od firmy Autodesk byl zadán materiál součástí. Byly vloženy šroubové spoje, pomocí kterých jsou díly k sobě spojeny. Do jednotlivých spojů byly zadány hodnoty předpětí, viz tabulka 7. Jednotlivé šrouby jsou vidět jako modré součástky na Obr. 55. Dále byly nastaveny kontakty dílů.

Zatížení bylo zadáno dle tabulky 8. Jako poslední se zadala vazba vetknutí na spodní straně svařovaného úhelníku. Jde o drobné zjednodušení úlohy. Reálně je úhelník přišroubován pomocí několika šroubů do T-drážek stolu.

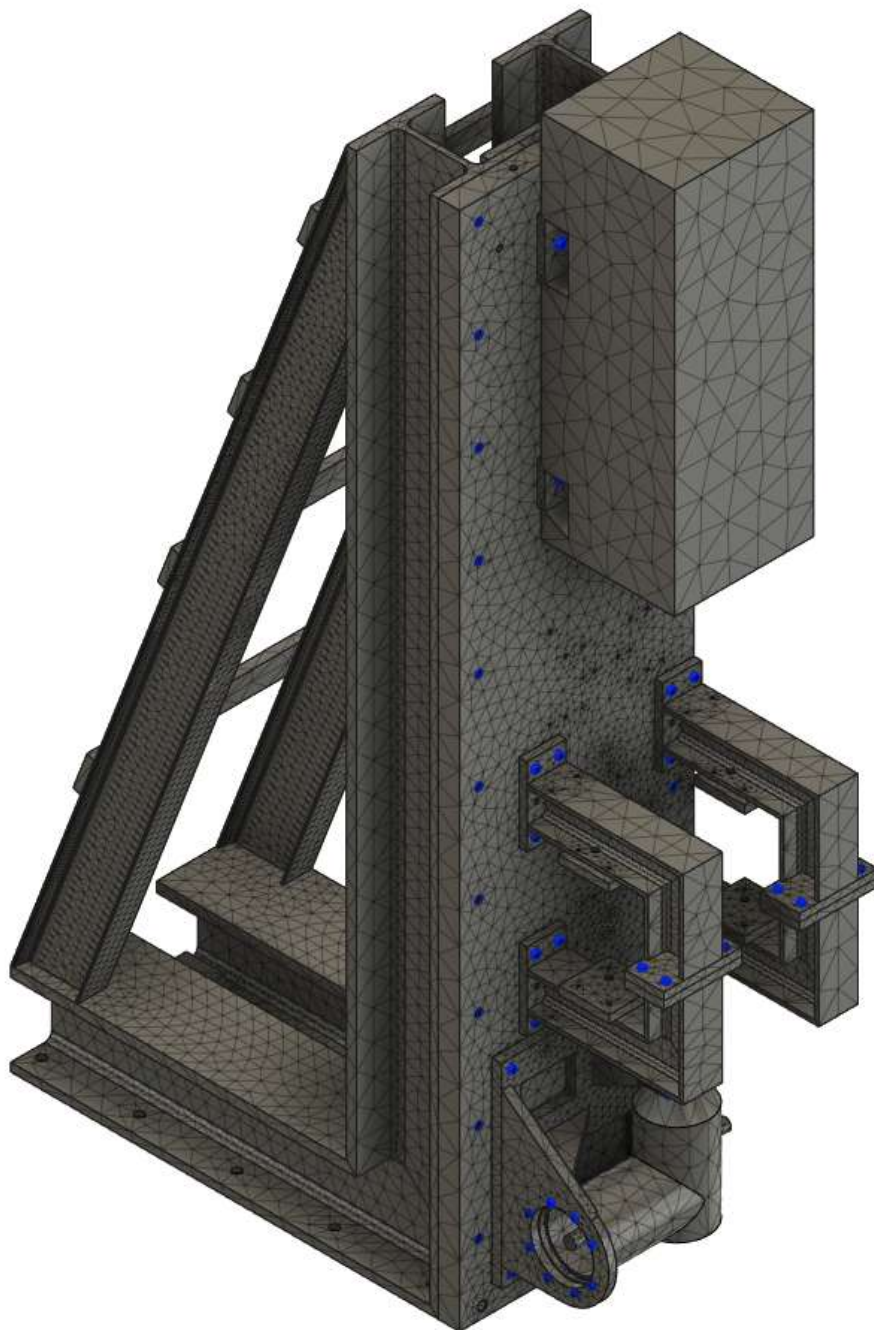
Zatížení	Umístění	Zatížení 1	Zatížení 2
		Hodnota	Hodnota
Gravitace	Vše	$g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$	$g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$
Axiální síla	Konzola	4 000 N	- 4 000 N
Točivý moment	Dynamometr	- 478 Nm	- 478 Nm
	Výstup převodovky	478 Nm	478 Nm
	Vstup převodovky	79 Nm	79 Nm

Tab. 8 Zatížení



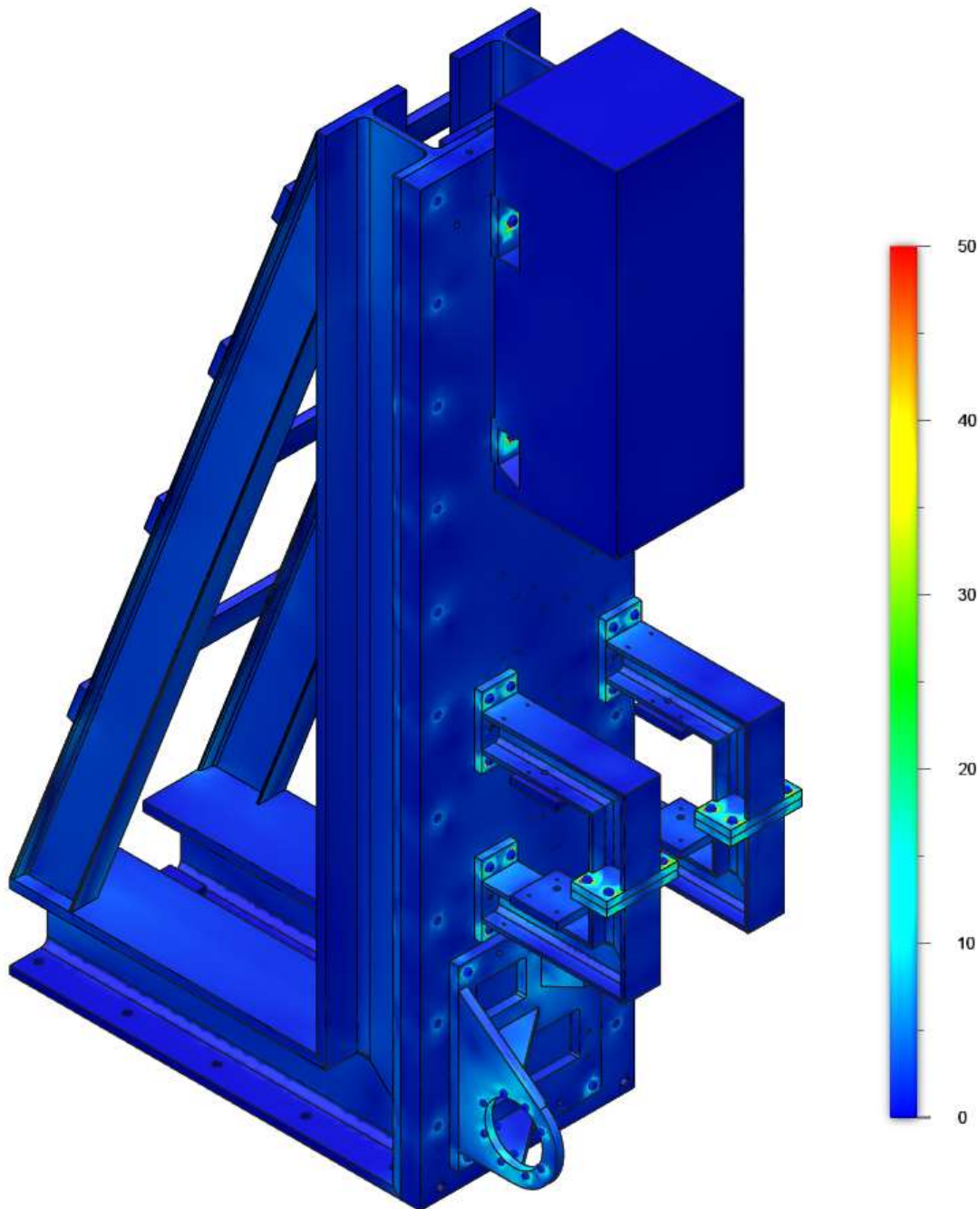
Obr. 55 Okrajové podmínky

Po zadání všech okrajových podmínek (Obr. 55) byla vygenerována síť, viz Obr. 56. Použito bylo automatické generování sítě. Síť nebylo potřeba zahušťovat ručně, protože program automaticky zahustil síť v důležitých místech.



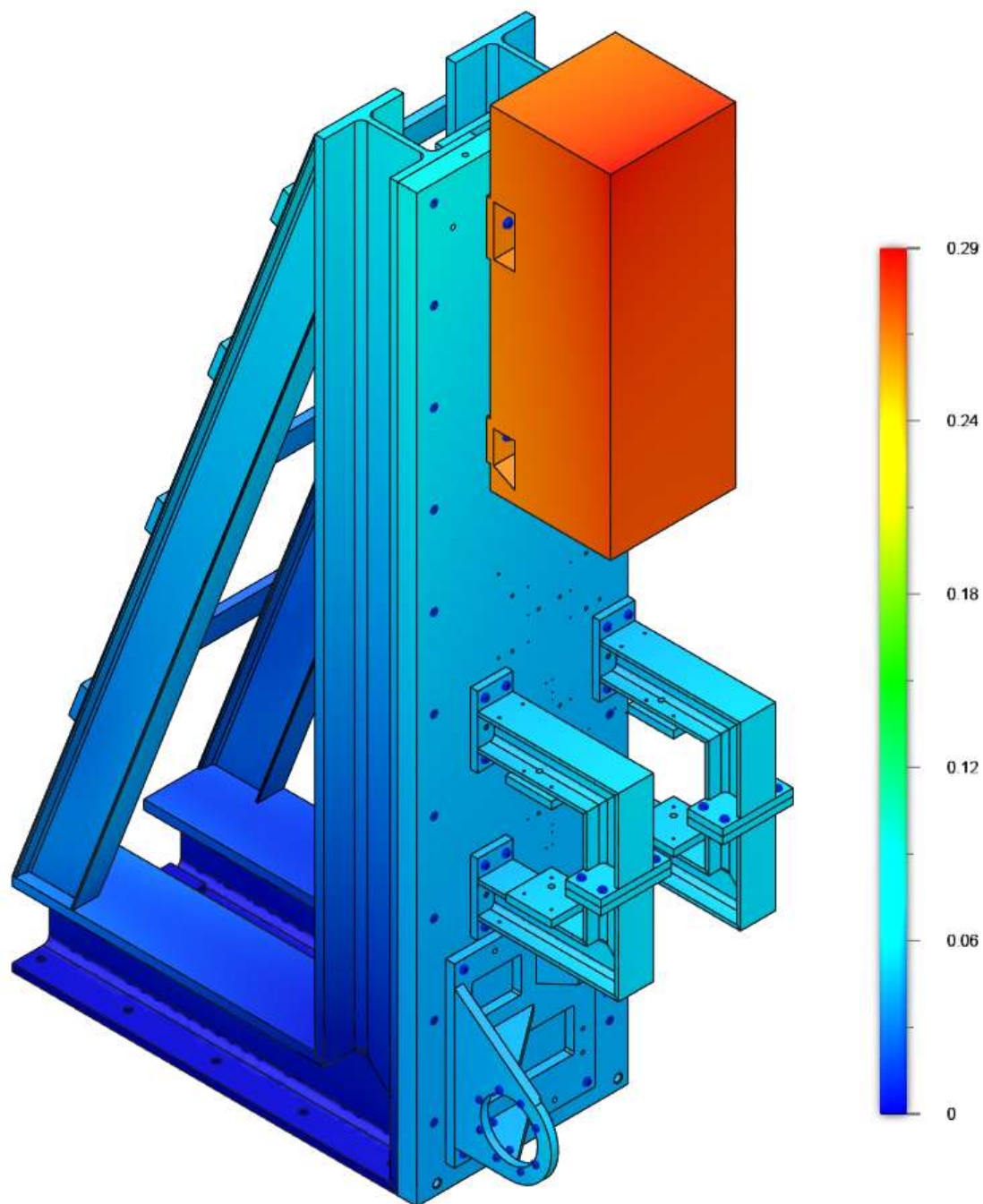
Obr. 56 Síť

6.3 Zatížení 1 – axiální tlaková síla



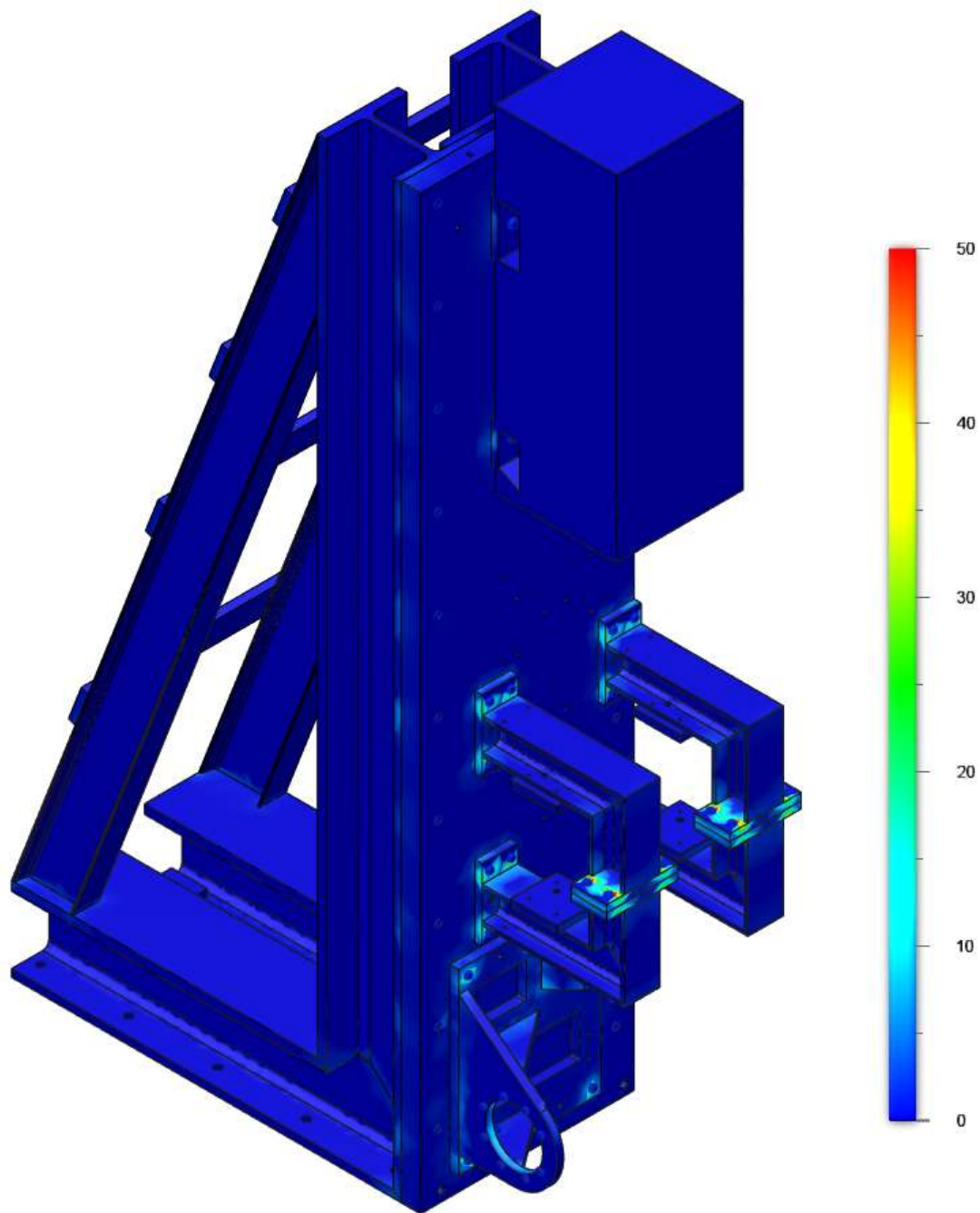
Obr. 57 Zatížení 1 – napětí [MPa]

Z výsledků na Obr. 57 je vidět, že napětí v součásti je převážně způsobeno předpětím šroubů. Samotné namáhání se pohybuje do 20 MPa. Nejvyšší napětí jsou tedy v místech šroubových spojů do 50 MPa. To je dostatečně pod dovoleným napětím.



Obr. 58 Zatížení 1 - deformace [mm]

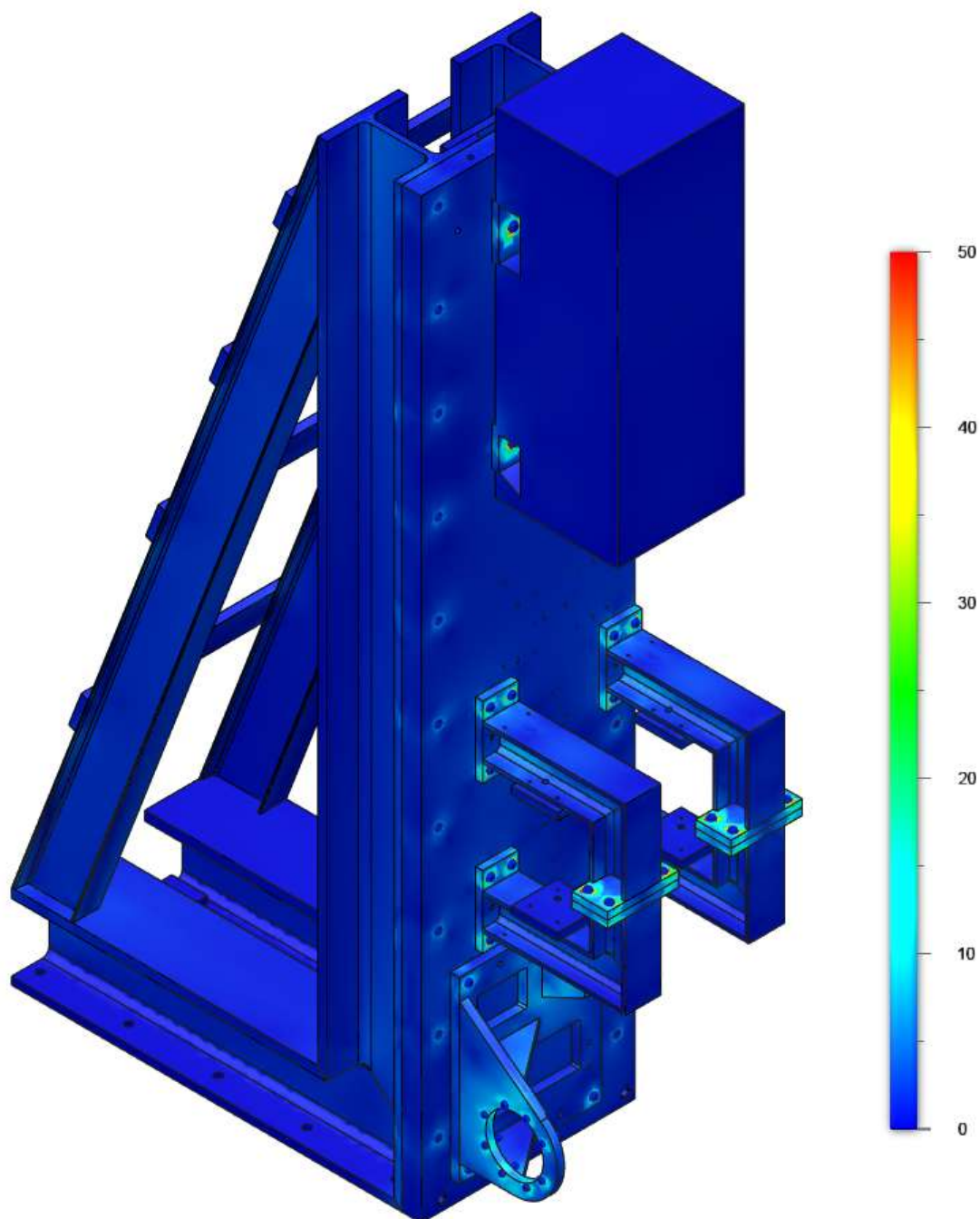
Z výsledků na Obr. 58 je vidět, že na deformace sestavy má vliv pouze její vlastní hmotnost. Zatížení od provozování testů je výrazně nižší než od gravitace. Nejvyšší deformace je na dynamometru, který je připevněn pomocí pouze 4 šroubů. Bohužel provedení dynamometru nám neumožňuje jiné řešení. Ostatní deformace jsou do 0,1 mm.



Obr. 59 Zatížení 1 - kontaktní tlak [MPa]

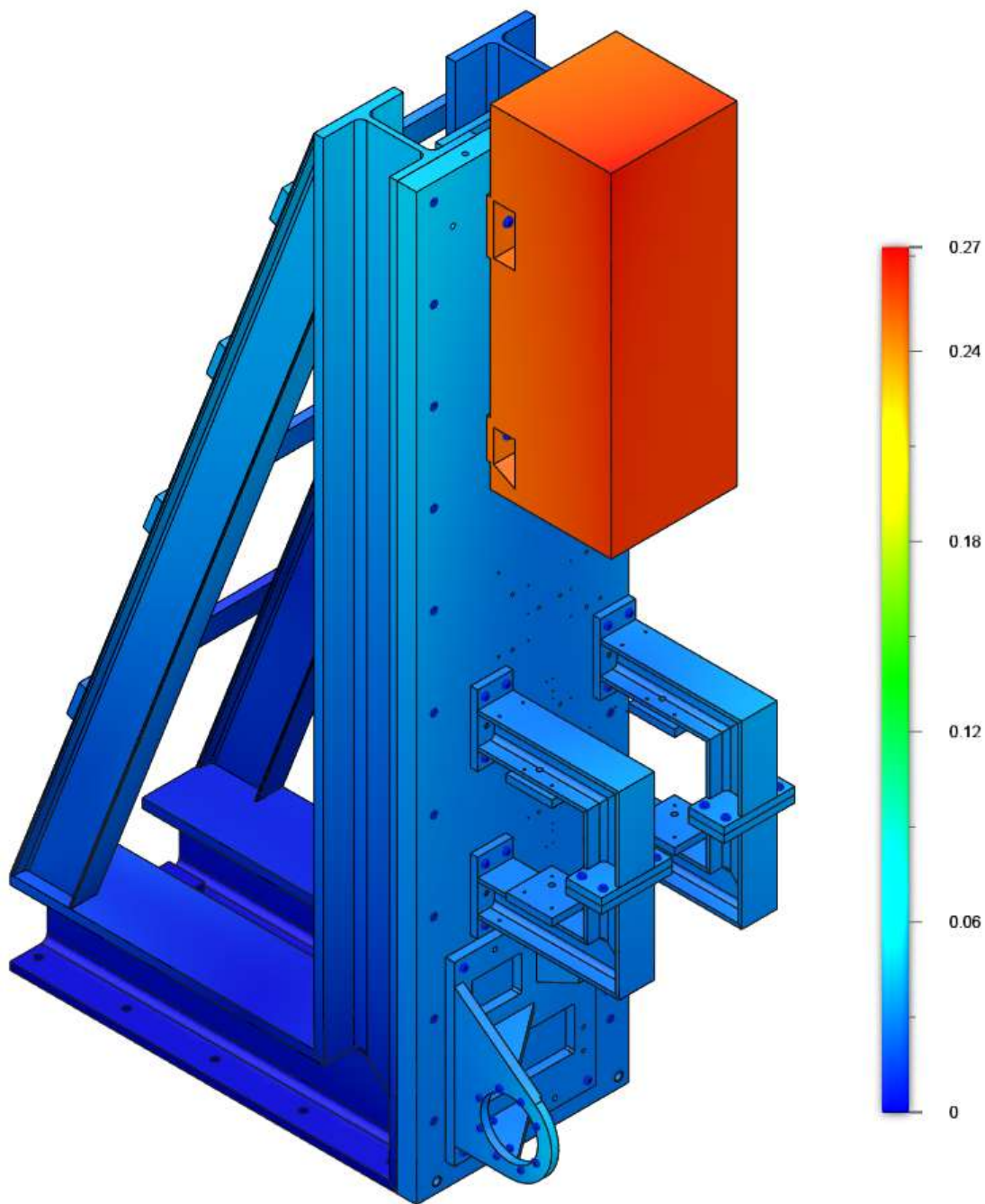
Z výsledků na Obr. 59 je vidět, že předpětí šroubových spojů vytváří tlaky do 50 MPa. To je dostatečně malá hodnota oproti dovolenému tlaku.

6.4 Zatížení 2 – axiální tahová síla



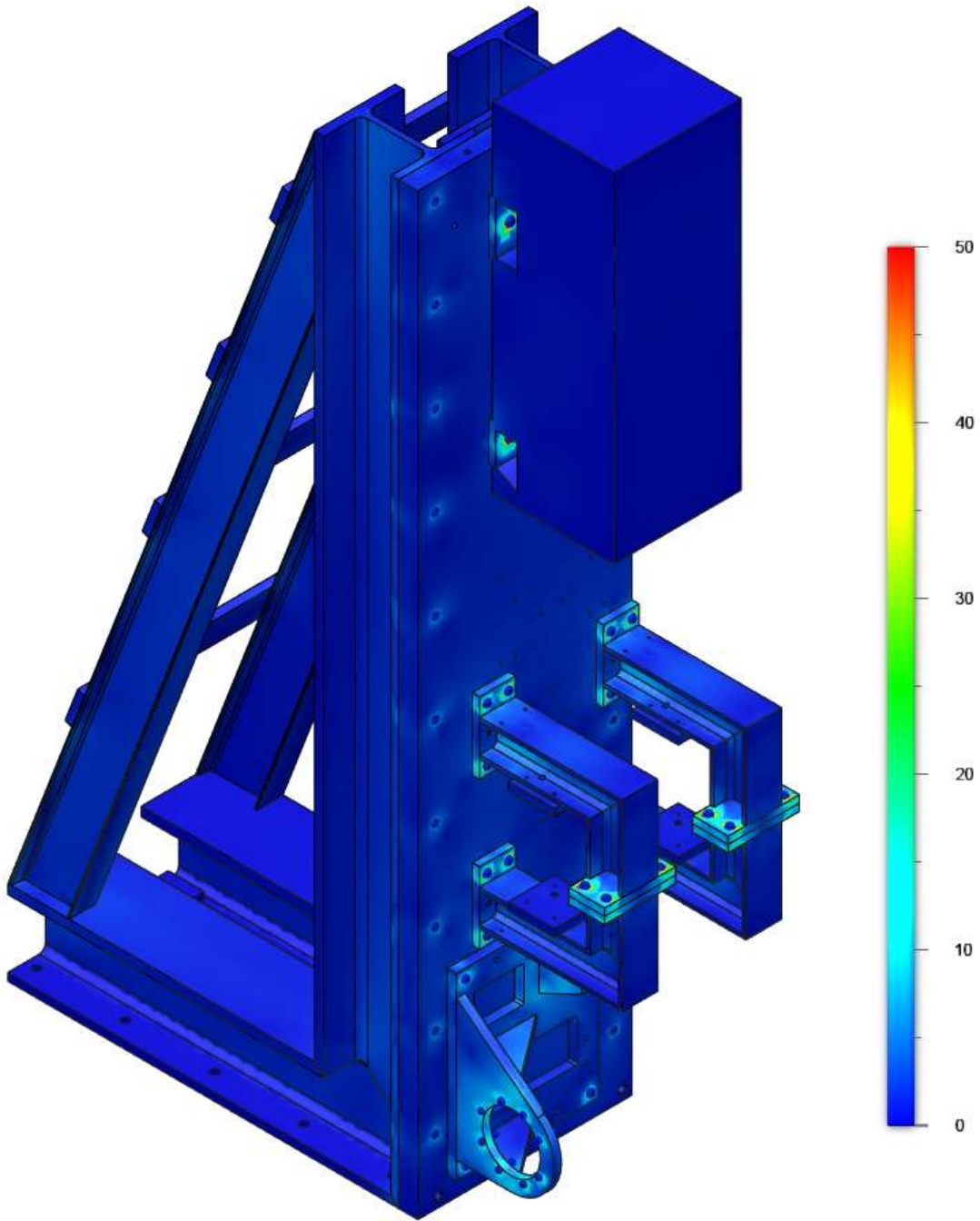
Obr. 60 Zatížení 2 – napětí [MPa]

Z výsledků na Obr. 60 je vidět, že napětí v součásti je podobné jako u předchozího zatížení. Směr působení axiální síly má zanedbatelný vliv.



Obr. 61 Zatížení 2 – posunutí [mm]

Z výsledků na Obr. 61 je vidět, že deformace sestavy jsou podobné jako u předchozího zatížení. Směr působení axiální síly má malý zlepšující vliv. Zařízení by mělo být provozováno primárně v tomto režimu, takže maximální deformace bude 0,27 mm.

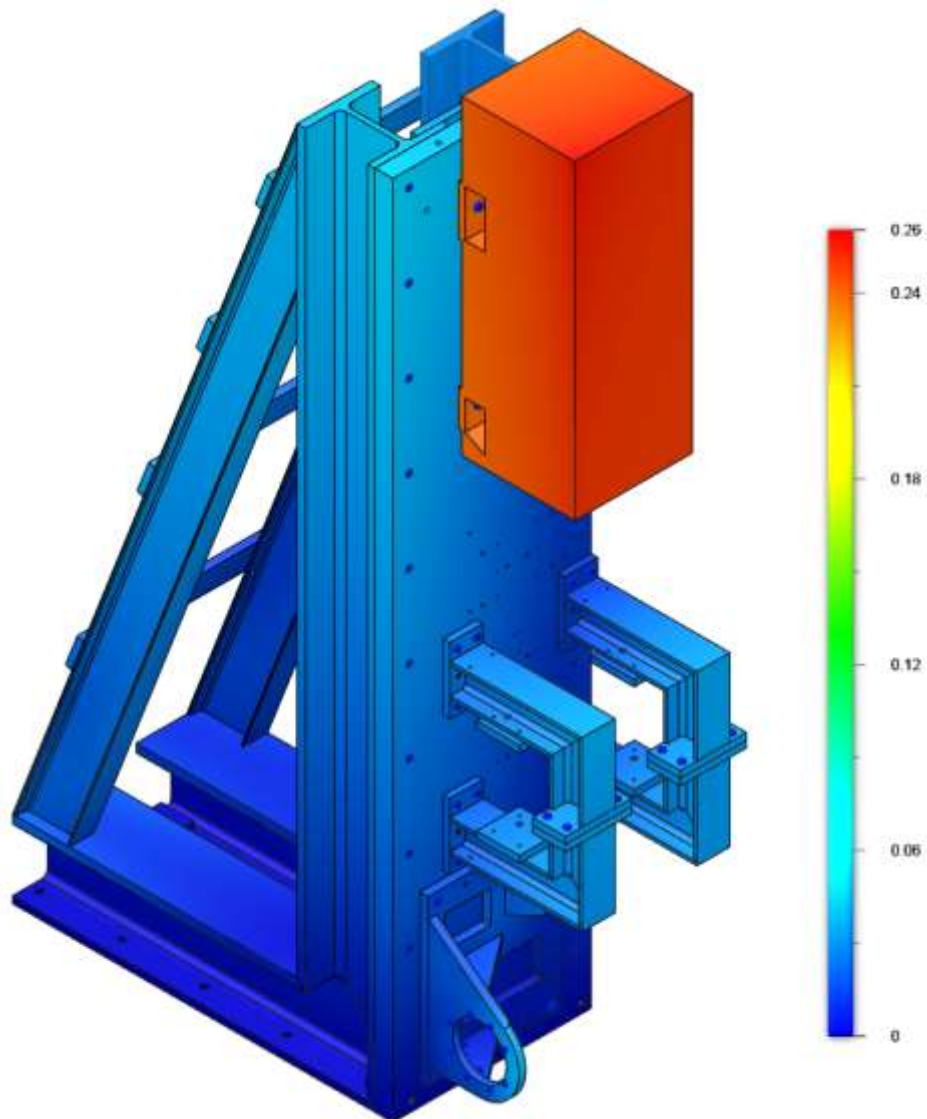


Obr. 62 Zatížení 2 – kontaktní tlak [MPa]

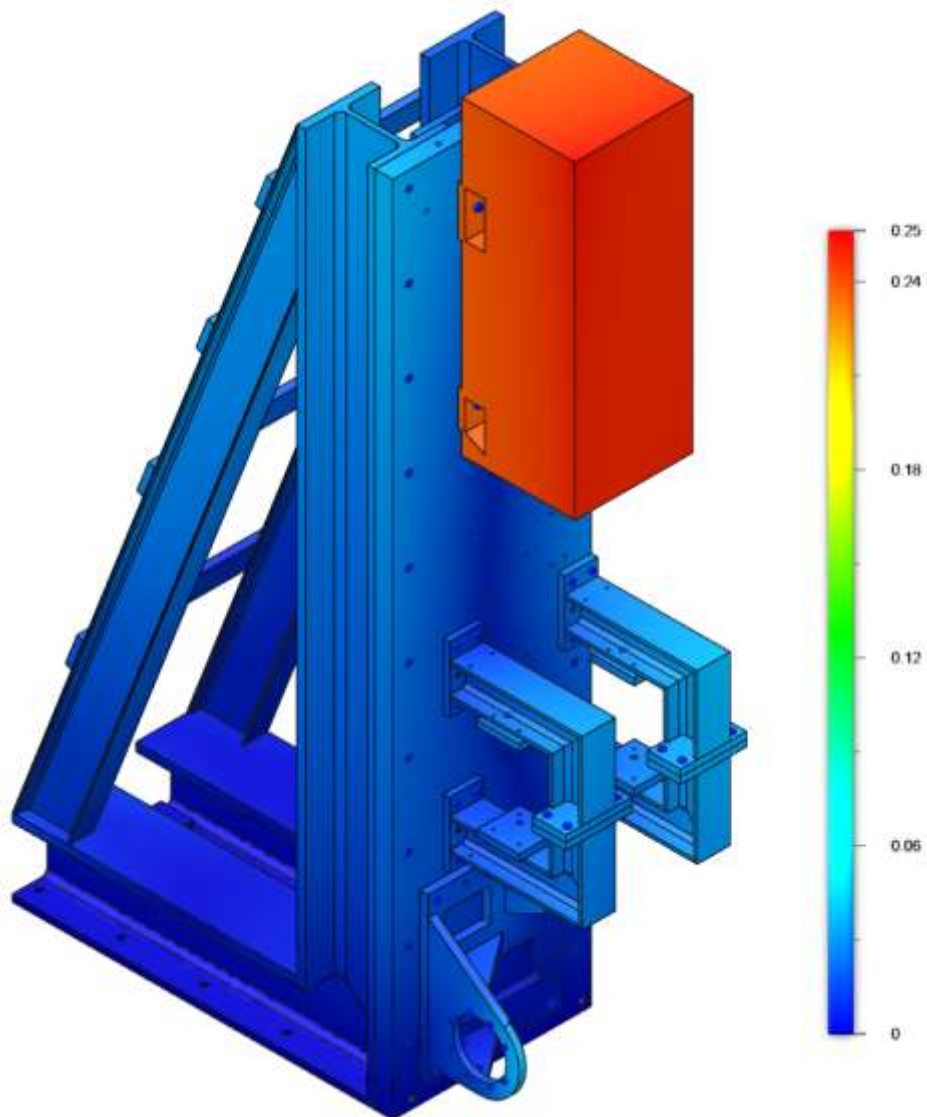
Z výsledků na Obr. 62 je vidět, že předpětí šroubových spojů je podobné jako u předchozího zatížení. Směr působení axiální síly má zanedbatelný vliv.

6.5 Zlepšení

Jedna z možností, jak zlepšit výsledky simulací, je podepřít desku spodní hranou o drážkový stůl, který zachytí její hmotnost. Proto byla provedena simulace, kde bylo přidáno podepření ze spodní strany desky.



Obr. 63 Zatížení 1 podepřená deska – posunutí [mm]



Obr. 64 Zatížení 2 podepřená deska – posunutí [mm]

Výsledky napětí a kontaktního tlaku byly prakticky shodné s předchozími simulacemi. Došlo pouze k mírnému zlepšení deformace. Na výsledné řešení proto nemá montáž desky příliš velký vliv.

6.6 Tuhostní analýza

Důležitým parametrem vyvíjeného zkušebního zařízení je tuhost. Je potřeba, aby zkušební zařízení bylo dostatečně tuhé, aby bylo možné z naměřených hodnot dojít ke správným výsledkům.

Tuhost je důležitá zejména u držáku převodovky, konzol axiálního zatěžovacího členu a dynamometru. Na dynamometru je sice velké posunutí řádově 0,3 mm, ale žádné napětí. Konzoly drží axiální zatěžovací člen. Nás zajímají patky, na které jsou umístěny pneumatické pružiny, které vyvíjejí axiální sílu. Deformace je zde řádově 0,05 mm a napětí do 20 MPa. Podobné hodnoty jsou také u držáku převodovky.

Díky těmto hodnotám vykazuje rám vysokou tuhost. Nemělo by tedy docházet k ovlivňování samotného měření vlivem nedostatečné tuhosti zařízení.

7 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout zkušební zařízení pro testování převodovek vrtulníku SkySpotter 150 firmy Modelárna LIAZ.

Práce se na začátku zabývala obecně zkušebnami pro testování převodovek. Byly popsány jejich základní části. Dále byly rozepsány základní principy snímačů a dynamometrů, které tvoří nejdůležitější část těchto pracovišť.

Proveden byl také rozbor testovaných převodovek. Byly spočítány frekvence, které jsou důležité pro převodovky. Tyto údaje budou složité k vyhodnocování testů.

Byla navržena celá koncepce měření od ovládání z osobního počítače přes sběr dat až k jednotlivým snímačům. Prvky připojené do ústředny, ze které se řídí testy, jsou rozděleny do několika základních skupin. Jde o signalizaci, komunikaci s pohonem a dynamometry, pneumatickou část a sběr dat ze snímačů.

Dále byla detailně popsána konstrukce zařízení. Zařízení bylo nejprve zkonstruováno ze svařovaného rámu jako jednoúčelové. Kvůli možným změnám a vyšší univerzálnosti testování bylo pak zařízení upraveno na modulární se standardní upínací deskou. V této části práce jsou detailně popsány jednotlivé části zkušebního zařízení a jejich konstrukční řešení, volená ložiska s výpočtem životnosti a výpočty průměrů hřídelů. Dále pak použité spojky hřídelů a upínání převodovky. Důležitou součástí tohoto zařízení je také návrh a konstrukce axiálního zatěžovacího členu výstupního hřídele převodovky.

V závěrečné části práce byla provedena tuhostní analýza. Nejprve byl připraven model pro simulace z 3D dat. Následně byly zadány veškeré okrajové podmínky a materiály součástí. Z provedené simulace byl získán výsledek průběhu napětí deformací a kontaktních tlaků. Pro zlepšení výsledků byla simulována úprava rámu, ale přínos byl minimální. Z výsledků napětí a deformací byl stanoven závěr, že tuhost navrženého rámu zařízení je plně vyhovující.

Částečná výkresová dokumentace druhé konstrukční varianty zařízení je uvedena v příloze práce. Obsahuje výkres sestavy, výkres podsestavy a tři výrobní výkresy součástí. Dále je v příloze uveden toleranční výkres, kde jsou spočítány celkové výrobní tolerance zařízení.

Seznam obrázků

Obr. 1 SkySpotter 150 [1]	10
Obr. 2 Příklad panelů	11
Obr. 3 Upínací deska drážková	12
Obr. 4 Princip hydrodynamických dynamometrů [2]	13
Obr. 5 Příklad hydrodynamického dynamometru	13
Obr. 6 Příklad asynchronního dynamometru	14
Obr. 7 Příklad dynamometru na vířivé proudy	15
Obr. 8 Topný odpor	15
Obr. 9 Princip kondenzátorového mikrofonu [3]	17
Obr. 10 Princip termoelektrického snímače [4]	18
Obr. 11 Příklad elektrických snímačů teploty	19
Obr. 12 Princip Piezoelektrického snímače [5]	20
Obr. 13 Různá konstrukční provedení piezoelektrických akcelerometrů [6]	20
Obr. 14 Schéma zapojení akcelerometru [5]	21
Obr. 15 Omezení kmitočtu při montáži akcelerometrů [6]	22
Obr. 16 Princip kapacitního snímače zrychlení [7]	22
Obr. 17 Příklady snímačů momentu od firmy Kistler [5]	23
Obr. 18 Zapojení tenzometrů do Wheatstonova můstku [8]	24
Obr. 19 Příklad nalepeného tenzometru	24
Obr. 20 Princip inkrementálního snímače [9]	25
Obr. 21 Pneumatické řazení a použitý setrvačnick [10]	26
Obr. 22 Testované převodovky	27
Obr. 23 Kinematické schéma hlavní převodovky	28

Obr. 24 Kinematické schéma zadní převodovky	28
Obr. 25 Návrh koncepce měřicího zařízení.....	31
Obr. 26 Schéma zařízení	33
Obr. 27 Jednoúčelové pracoviště	34
Obr. 28 Lineární vedení	35
Obr. 29 Spojení rámu	36
Obr. 30 Nový konstrukční návrh zkušebního zařízení	37
Obr. 31 Schéma zařízení	38
Obr. 32 Hlavní komponenty stanoviště.....	39
Obr. 33 ložiska 6406 a 6407 [11] Obr. 34 ložisko 52 310 [12].....	41
Obr. 35 ložisko SKF NK 35/20 TN [12].....	42
Obr. 36 Hřídel motoru.....	42
Obr. 37 Hřídel velkého dynamometru.....	43
Obr. 38 Hřídel malého dynamometru	44
Obr. 39 Spojka motor - snímač momentu	45
Obr. 40 Spojka snímač momentu - velká převodovka	46
Obr. 41 Spojka snímač momentu – malá převodovka	46
Obr. 42 Velká převodovka - axiální zatěžovací člen	47
Obr. 44 Spojka Axiální zatěžovací člen - snímač momentu [13].....	48
Obr. 43 Schéma výpočtu	48
Obr. 45 Spojka Snímač momentu – velký dynamometr	49
Obr. 46 Spojka Velká převodovka - snímač momentu	49
Obr. 47 Spojka Malá převodovka - snímač momentu.....	50
Obr. 48 Spojka Snímač momentu - malý dynamometr	50
Obr. 49 Krytování (světle modrá)	51

Obr. 50 Upínání převodovky.....	52
Obr. 51 Elektrické axiální zatěžování	53
Obr. 52 Pneumatické axiální zatěžování	53
Obr. 53 Schéma pneumatického axiálního zatěžování.....	54
Obr. 54 Kalibrace axiálního zatěžovacího členu.....	55
Obr. 55 Okrajové podmínky.....	58
Obr. 56 Síť.....	59
Obr. 57 Zatížení 1 – napětí [MPa].....	60
Obr. 58 Zatížení 1 - deformace [mm]	61
Obr. 59 Zatížení 1 - kontaktní tlak [MPa]	62
Obr. 60 Zatížení 1 – napětí [MPa].....	63
Obr. 61 Zatížení 1 – posunutí [mm].....	64
Obr. 62 Zatížení 1 – kontaktní tlak [MPa]	65
Obr. 63 Zatížení 1 podepřená deska – posunutí [mm]	66
Obr. 64 Zatížení 2 podepřená deska – posunutí [mm]	67

Seznam tabulek

Tab. 1 Základní frekvence.....	29
Tab. 2 Frekvence ložisek malé převodovky.....	30
Tab. 3 Frekvence ložisek hlavní převodovky.....	30
Tab. 4 Základní parametry dynamometrů a pohonu	39
Tab. 5 Základní parametry ložisek.....	40
Tab. 6 Přehled spojek.....	45
Tab. 7 Šroubové spoje.....	57
Tab. 8 Zatížení.....	58

Seznam příloh

Příloha 1 – Datasheet tříosého snímače zrychlení

Příloha 2 – Datasheet snímač točivého momentu

Příloha 3 – Datasheet snímač zdvihu

Příloha 4 – Datasheet snímač teploty

Příloha 5 – Výkresová dokumentace

- KVM-DP-000 Výkres sestavy
- KVM-DP-000 Toleranční výkres sestavy
- KVM-DP-200 Výkres podsestavy
- KVM-DP-201 Výrobní výkres dílu
- KVM-DP-202 Výrobní výkres dílu
- KVM-DP-206 Výrobní výkres dílu

Použitá literatura

- [1] LIAZ - SKYSPOTTER 150 UAV system. LIAZ - SKYSPOTTER 150 UAV system [online]. Dostupné z: <https://www.liaz-uav.com>
- [2] AUTOR NEUVEDEN. *Wikipedia* [online]. [cit. 11. 2. 2021]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_brake
- [3] NĚMEČEK, Pavel. *Hluk v technické praxi*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1998. ISBN 80-7083-285-1.
- [4] Seebeckův jev :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 05.04.2021]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [5] Measurement Systems and Sensors | Kistler. [online]. Copyright © 2021 Kistler Group [cit. 05. 04. 2021]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/>
- [6] Brüel & Kjær | B&K | Sound and Vibration Measurement . [online]. [cit. 05.04.2021]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en>
- [7] Odborné časopisy [online]. Copyright © [cit. 15.04.2021]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38277.pdf>
- [8] Wheatstoneův můstek – Wikipedie. [online]. [cit. 05.04.2021]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Wheatstone%C5%AFv_m%C5%AFstek
- [9] Sensors: New encoder track design improves position control. Design Engineering News, Engineering Videos, Engineering Resources [online]. Copyright © 2021 WTWH Media, LLC. All Rights Reserved. The material on this site may not be reproduced, distributed, transmitted, cached or otherwise used, except with the prior written permission of WTWH Media. [cit. 14.04.2021]. Dostupné z: <https://www.designworldonline.com/new-encoder-track-design-improves-position-control/>
- [10] Sborník přednášek ... konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů: Ústav dopravní techniky, Odbor transportních, stavebních a zemědělských strojů. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, [198-]. S. 159. ISBN 978-80-7494-196-2.
- [11] ZKL Group. ZKL Group [online]. Copyright © 2012 ZKL, a.s. [cit. 28.12.2020]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/>

- [12] SKF. *SKF* [online]. [cit. 05.04.2021]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz>
- [13] KTR | ktr.com. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © 2021 KTR Systems GmbH [cit. 05. 04. 2021]. Dostupné z: <https://www.ktr.com/cz>
- [14] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [15] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [16] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled*. Vyd. 5., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-183-2.
- [17] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled*. Vyd. 5., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-184-9.