

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Konstrukční návrh mobilního
testovacího standu pro malé
raketové motory do 10 kN**

**Structural design of a mobile test
stand for small rocket engines up to
10 kN**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

Bc. Viktor HAIS

Studijní program: NLAK LETECTVÍ A KOSMONAUTIKA
Studijní specializace: N071KOTE KOSMICKÁ TECHNIKA
Vedoucí práce: Ing. Jaromír KUČERA

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hais** Jméno: **Viktor** Osobní číslo: **478012**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Specializace: **Kosmická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Konstrukční návrh mobilního testovacího standu pro malé raketové motory do 10 kN

Název diplomové práce anglicky:

Structural design of a mobile test stand for small rocket engines up to 10 kN

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši stávajícího stavu
Proveďte koncepční návrh testovacího standu
Proveďte konstrukční návrh mobilního testovacího standu
Proveďte návrh měřícího řetězce
Vypracujte stručné pokyny k obsluze

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jaromír Kučera ústav letadlové techniky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jaromír Kučera
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Milan Dvořák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod dohledem svého vedoucího práce a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje.

V Praze

23. 5. 2024

.....

HAIS Viktor

Poděkování

Tímto děkuji Ing. Kučerovi za přínosné konzultace, klidné vedení práce a povzbuzování v další práci jak radami, tak návrhy na zlepšení.

Taktéž děkuji všem členům týmu CTU Space Research za skvělou práci a nasazení. Speciální poděkování směřuje ke členům, se kterými jsem v rámci jejich závěrečných prací spolupracoval.

Chtěl bych poděkovat i svému (současnému i minulému) blízkému okolí za trpělivost, kterou prokázalo při mých studiích.

Název práce:

Konstrukční návrh mobilního testovacího standu pro malé raketové motory do 10 kN

Autor: Bc. Viktor Hais

Studijní program: Letectví a kosmonautika

Obor: Kosmická technika

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Jaromír Kučera
Ústav letadlové techniky, Fakulta strojní,
České vysoké učení technické v Praze

Bibliografické údaje: počet stran: 53

počet kapitol: 9

počet obrázků: 41

počet tabulek: 8

Abstrakt: Tato práce se zabývá konstrukčním návrhem mobilní testovací platformy pro účely testování raketových motorů vyvíjených v rámci studentského týmu CTU Space Research. V rámci práce byl navržen i měřící řetězec.

Klíčová slova: Testovací stand, raketový motor, CTU Space Research, konstrukční návrh

Title:

Structural design of a mobile test stand for small rocket engines up to 10 kN

Author: Bc. Viktor Hais

Abstract: This thesis deals with the structural design of a mobile test platform for the purpose of testing rocket engines developed within the CTU Space Research student team. A measurement chain was also designed as part of the work.

Key words: Test stand, rocket engine, CTU Space Research, structural design

Seznam symbolů použitých v textu

Řecké symboly

α součinitel úměrnosti napětí [-]

σ_{DL} početní napětí [MPa]

σ_U mez pevnosti [MPa]

σ_Y mez kluzu [MPa]

τ smykové napětí [MPa]

Latinka

A plocha [mm^2]

E modul pružnosti v tahu [GPa]

F_{DL} početní zatížení [N]

F_{kr} kritická síla [N]

F_{max} maximální tah motoru [N]

H_1 nosná hloubka závitu [mm]

J_{min} moment setrvačnosti průřezu [mm^4]

K_p početní koeficient [-]

l_{red} redukovaná délka [mm]

M_o ohybový moment [$N \cdot mm$]

- n počet závitů [-]
- s stoupání závitu [mm]
- W_o průřezový modul v ohybu [mm^3]

Zkratky

CTU SR CTU Space Research

DAQ sběr dat

FDM Fused Deposition Modeling

FOSY yield design factor of safety

GSE Ground Support Equipment

MTS Mobile Test Stand

N_2O oxid dusný

NASA National Aeronautics and Space Administration

NI National Instruments

RM raketové motory

Obsah

1	Úvod	9
2	Požadavky na testovací stanoviště	10
3	Rešerše testovacích platforem	11
3.1	Problematika uspořádání testování RM	11
3.2	Současný stav CTU SR	12
3.3	Týmy účastníci se EuRoC	13
3.4	Vhodná řešení	14
3.4.1	TU Space Team	14
3.4.2	Rice Eclipse	15
4	Koncepční návrh	16
4.1	Testovací platforma	16
4.2	Experimentální aparatura	18
4.2.1	Motorizace ventilů	19
4.2.2	Tlakové nádoby	20
5	Měřicí řetězec	24
5.1	Senzory	24
5.2	National Instruments	24
5.3	Vlastní návrh - DAQ shield	26
5.4	Porovnání měřících řetězců	28
6	Konstrukční návrh	29
6.1	Předběžný návrh	29

6.2	Výsledná konstrukce	30
6.2.1	Subsystémy	30
6.2.1.1	Platforma	30
6.2.1.2	Rozvody plynů	32
6.2.1.3	Rozvaděč	32
6.2.1.4	Akustická ochrana	33
6.2.1.5	Deflektor	33
6.2.1.6	Měřicí věž	35
6.2.2	Třípohledové schéma	37
6.2.3	Pevnostní výpočty	38
6.2.3.1	Vzpěr lože	39
6.2.3.2	Šroubový spoj	40
6.2.3.3	Průhyb nosníku	41
6.2.3.4	Šroubový spoj	41
6.2.3.5	Prostý tah	42
6.2.3.6	Šroubový spoj	43
6.2.3.7	Ohyb nosníku	44
6.2.3.8	Rotační spoj	45
6.2.3.9	Prostý tah	46
6.2.3.10	Šroubový spoj	46
6.2.3.11	Šroubový spoj	47
6.2.3.12	Vzpěr	48
7	Pokyny k obsluze	49
8	Finanční rozbor	52
9	Závěr	53

1 Úvod

Vývoj malých raketových motorů s tahem do 10 kN umožňuje studentům získat zkušenosti nejen s návrhovou, ale i jejich výrobní a testovací fází. Na základě navržených pohonných jednotek je možné koncipovat rakety na studentské soutěže, jakou je například European Rocketry Challenge.

Správné testování raketových motorů v konfiguraci co nejbližší napodobující letové uspořádání je důležité pro kvalitní návrh nejen pohonné jednotky, ale ve výsledku i celé rakety. V rámci týmu CTU Space Research již vznikly hybridní raketové motory i raketové motory na tuhá paliva s tím, že vývoj motoru na kapalná paliva je v pokročilé fázi s očekávaným počátkem testování na podzim roku 2024. Pro funkci testovacího standu je tedy klíčová univerzálnost navrhovaného řešení.

Práce si klade za cíl vypracování konstrukčního návrhu mobilního testovacího standu využitelného pro současné i budoucí testování motorů navržených studenty a studentkami z týmu CTU Space Research. V rámci práce bude vzhledem k povaze studentského týmu zohledňována finanční náročnost navrhovaných řešení.

2 Požadavky na testovací stanoviště

Požadavky byly sepsány s ohledem na možnosti studentského týmu. V ideálním případě by nebyla potřeba požadavku na mobilitu testovacího stanoviště a celá platforma by byla umístěna do lodního kontejneru. Takové řešení ale vyžaduje pevné prostory optimálně v majetku ČVUT a stavební povolení. Vzhledem k umístění testovací lokace v bývalé raketové základně Bratronice je toto řešení nemožné.

Všechny požadavky na testovací stand byly sepsány podle ECSS-E-ST-10C Rev.1. Číslování požadavků se vztahuje k nastavenému internímu číslování týmu CTU Space Research (dále jen CTU SR). Pro přehlednost jsou čísla požadavků uvedených v tabulce 2.1 pouze posledním dvojčíslím z celého čísla RQ-04-00-00-00-XX kde "XX" je číslo požadavku v tabulce. [1]

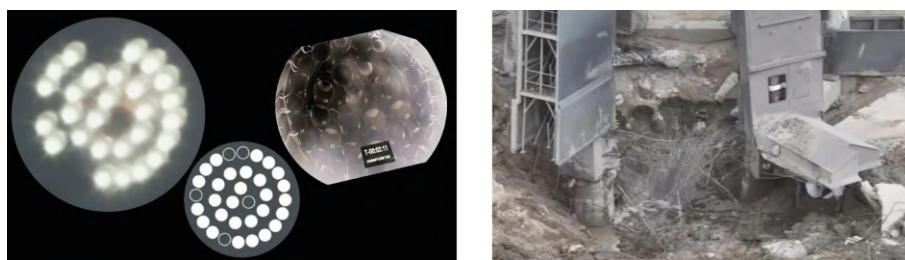
Číslo	Požadavek	Hodnota	Zadavatel
01	Test stand musí být schopen testovat raketové motory s maximálním tahem 10 kN	$F = 10 \text{ kN}$	Propulsion
02	Test standu musí být schopen testování všech typů chemických raketových motorů	Solid, Hybrid, Liquid	Propulsion
03	K převážení test standu musí stačit řídičské oprávnění kategorie B	řídičské oprávnění B	General
04	Testovací stanoviště musí být vybaveno krytem na elektrické subsystémy se stupněm krytí minimálně IP54	IP54	Avionics
05	Testovací stanoviště musí být vybaveno vizuálním identifikátorem bezpečnostního stupně testování	vizuální indikátor	BOZP

Tabulka 2.1: Přehled požadavků na testovací stand

3 Rešerše testovacích platforem

3.1 Problematika uspořádání testování RM

Cílem validačních testů je získání dat o bezpečnosti, spolehlivosti a zejména výkonnosti pohonné jednotky pro predikci letových charakteristik raketového nosiče. Vzhledem k obecné problematice a komplikovanosti raketových nosičů je proto žádoucí získat nutná data v konfiguraci pohonné jednotky co nejbližší připomínající letovou konfiguraci. Vertikální testování raketových motorů s sebou však přináší značné množství komplikací, z nichž nejvýznamnější jsou odvozy tepelné energie plamene a akustické energie, které mohou při nevhodném odrazu od dopadové plochy poničit pohonnou jednotku teplem či akustickými vibracemi. Pro vhodné testování je tedy nutné navrhnout celou infrastrukturu testovacího místa tak, aby zajišťovala bezpečný průběh testů - například vybavit ji deflektorem a kanálem na spaliny či akustickou ochranou v podobě vodní mlhy. Ignorování těchto opatření může vést ke katastrofickému selhání nosiče, jako tomu bylo na příkladu testovacího letu IFT-1 rakety Starship společnosti SpaceX. Při zážehu motorů Raptor došlo k destrukci betonové základny startovací rampy, jejíž úlomky ihned po startu zničily 5 z 33 motorů nosiče Superheavy. [2] [3] [4]



Obrázek 3.1: Vlevo porovnání záběrů na motorovou sekci Superheavy s infografikou [3], vpravo poškození startovací rampy [4]

Alternativou k vertikálnímu testování je tak testování v horizontální konfiguraci, kdy je spalovací komora umístěna tak, že je osa plamene v ose či s malým náklonem od horizontály. Při takovýchto testech se předpokládá disipace tepelné a akustické energie do okolního prostředí. Nevýhodou je odlišnost přívodního potrubí pro okysličovadlo (a případně palivo) od letového uspořádání. To může mít za následek jiné výkony raketových motorů (dále jen RM) například vinou tlakových ztrát v potrubí způsobených jinou délkou či jeho zakřivením. Vybudování takového testovacího stanoviště je ale výrazně méně nákladné, než vybudování stanoviště vertikálního, a proto se hojně využívá zejména v počátečních fázích validace RM. Před samotným letem je nicméně stále nutné přistoupit k letu ve finální konfiguraci. [2]

Problematika změny uspořádání nabírá na významu při řešení této diplomové práce. Vzhledem k maximálnímu tahu RM omezeným v požadavcích na projekt se nedá předpokládat využití čerpadel pro dopravu okysličovadla (a případně paliva) do spalovací komory, nýbrž využití přetlakového systému. Oproti velkým RM, které mívají před spalovací komorou čerpadla zajišťující požadovaný tlak a jsou tak lépe schopné kompenzovat tlakové ztráty ve vedení, jsou tyto malé RM více náchylné na tlakové ztráty ve vedení.

3.2 Současný stav CTU SR

Současná testovací aparatura sestává z horizontálního motorového lože, na kterém je motor flexibilní hadicí propojen s vertikální palivovou věží, na které jsou zároveň umístěné všechny ventily. Umístění nádrže na okysličovadlo ve vertikální poloze je kritické pro čerpání tekutého oxidu dusného do spalovací komory. Toto řešení bylo dostačující pro počáteční validační kampaň vývoje hybridního raketového motoru, není však vhodné pro poslední předletové testy. Zejména dlouhá flexibilní hadice je problematická svou vnitřní drsností a délkou, díky kterým v sobě akumuluje vysoké tlakové ztráty. Naměřený tah RM tak neodráží skutečný potenciál motoru.



Obrázek 3.2: Současná testovací aparatura CTU SR [archiv CTU SR]

3.3 Týmy účastníci se EuRoC

V rámci soutěže European Rocketry Challenge (dále jen EuRoC) soupeří každý rok 25 týmů z evropských univerzit. Tým CTU Space Research se kvalifikoval do posledních dvou ročníků, během kterých došlo k přínosnému sdílení zkušeností. Podle informací od týmů vyvíjejících vlastní motory došlo k sestavení přehledu stávajících řešení testovacích platforem do tabulky 3.1.

Z průzkumu mezi týmy vyplývá, že vertikální testování motorů využívají pouze týmy testující raketové motory na pevná paliva, u kterých orientace motoru neovlivňuje tlakové ztráty na vedení pohonných látek. Ostatní týmy tedy motory netestují v reprezentativní pozici a před účastí na soutěži EuRoC musí improvizovaně testovat pohonnou jednotku v letové konfiguraci pro splnění požadavků soutěže.

Tým	Země	Typ motoru	Uspořádání motoru	Platforma
Skyward	Itálie	Hybrid	Horizontální	Volně stojící
ICLR	VB	Liquid	Horizontální	Volně stojící
ASTG	Rakousko	Hybrid	Horizontální	Volně stojící
Propulse NTNU	Norsko	Liquid	Horizontální	Lodní kontejner
Aris	Švýcarsko	Liquid	Horizontální	Přívěsný vozík
Gruyere Space Programme	Švýcarsko	Liquid	Horizontální	Lodní kontejner
EPFL	Švýcarsko	Liquid	Horizontální	Podzemní bunkr
Fenix	Portugalsko	Solid	Vertikální	Volně stojící
Danstar	Dánsko	Liquid	Horizontální	Lodní kontejner
TU Space Team	Rakousko	Liquid	Nakloněné/vertikální	Přívěsný vozík
Aerotec RED	Portugalsko	Solid	Vertikální	Volně stojící
PUT Rocketlab	Polsko	Hybrid	Horizontální	Volně stojící
PW in Space	Polsko	Hybrid	Horizontální	Volně stojící

Tabulka 3.1: Přehled testovacích kapacit týmů EuRoC

Z 10 týmů využívajících tohoto uspořádání 8 uvedlo, že výsledný tah RM testovaného v letové konfiguraci nedosahoval napočítaných hodnot.

3.4 Vhodná řešení

Pro průzkum vhodných existujících řešení bylo hledání rozšířeno mimo týmy soutěžící na EuRoC i na studentské týmy mimo Evropský kontinent a na amatérské raketové spolky.

3.4.1 TU Space Team

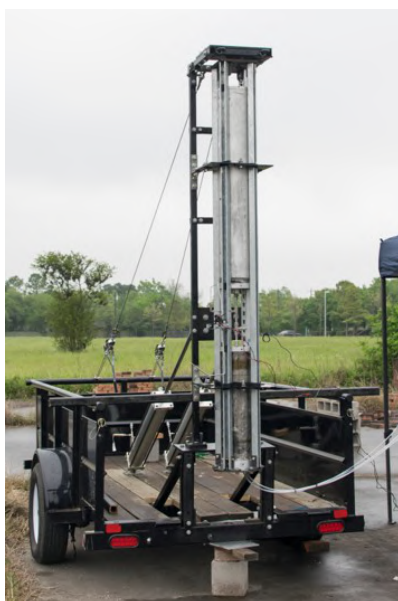
Z evropských týmů se požadovanému řešení nejvíce blíží testovací stand Franz od TU Space Team z Vídeňské technické univerzity. Ten byl navržen na nominální tah 24 kN speciálně pro týmem vyvíjený motor na kapalné pohonné látky. Pro zachování letové konfigurace sestavy motor - nádrž na pohonné látky a rozměrové obálky vozíku byla zvolena nakloněná orientace motoru, jedná se tak o jakési kompromisní řešení. [5]



Obrázek 3.3: 24 kN Franz [5]

3.4.2 Rice Eclipse

Nejblíže možnostem a očekávaným rozměrům testovací aparatury v rámci CTU SR je Mobile Test Stand (dále MTS) od studentské iniciativy Rice Eclipse. Testovací věž je transportována v horizontální poloze a až před zahájením testovací kampaně dojde k jejímu vztyčení. Na přívěsném vozíku se však nenachází žádné další podpůrné systémy pro měření či bezpečnost. Princip měření tahu není přesně známý, nicméně z dostupných záznamů je zřejmé, že se motor vůči rámu nemůže pohybovat například pomocí lineárního vedení. [6]

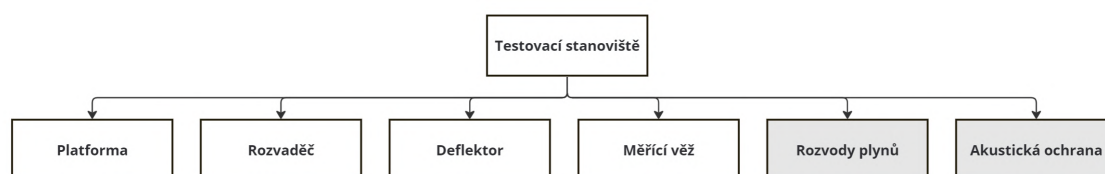


Obrázek 3.4: MTS [6]

4 Koncepční návrh

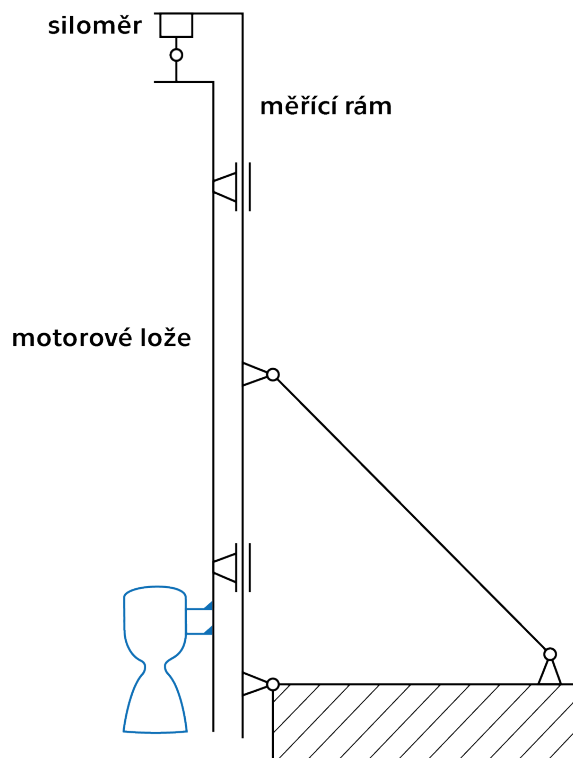
4.1 Testovací platforma

Celé testovací stanoviště bylo ideově rozděleno na subsystémy dle schématu 4.1. Subsystémy vyznačené šedivou barvou (akustická ochrana a rozvody plynů) nebudou v této práci řešeny.



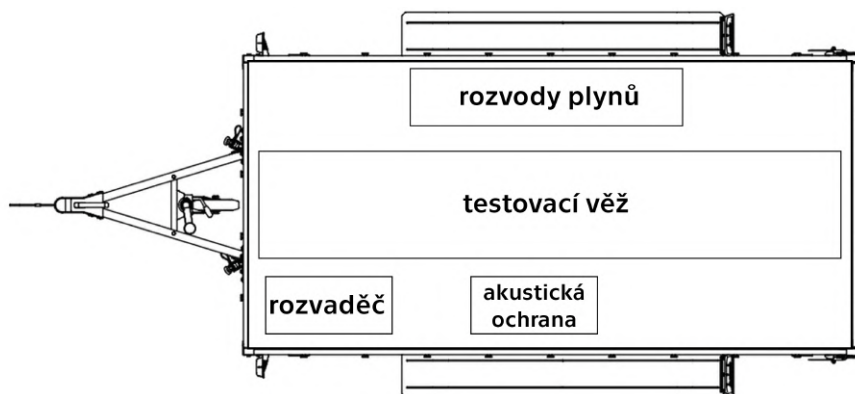
Obrázek 4.1: Subsystémy testovacího stanoviště

V uvažovaném řešení je sestava měřicí věže složena z měřicího rámu a motorového lože. Motorové lože je uchyceno vůči rámu na lineárním vedení. Vysoká kvalita tohoto kluzného uložení je podstatná pro správné měření tahu motoru. Jako pevný spoj mezi motorovým ložem a měřícím rámem je uložen siloměr, který bude při plnění nádrží sloužit k měření jejich naplnění a při zážehu motoru sloužit k měření tahu. Měřicí věž je vůči vozíku ukotvena pomocí rotačního uložení na hraně vozíku a vzpěry. Motorové lože je tak v přímé blízkosti uložení věže a tím jsou minimalizována ramena působících sil. Zároveň je v převozovém (složeném) stavu věž blízko dna vozíku, což usnadňuje její kotvení. Přenos sil probíhá po ose motor - motorové lože - siloměr - měřicí rám - rám vozíku. Vozík samotný by měl být vybavený stabilizačními prvky vůči zemi a ideálně kotvicím mechanismem, který bude jednoduché při stavění standu rychle nainstalovat.



Obrázek 4.2: Schéma měření

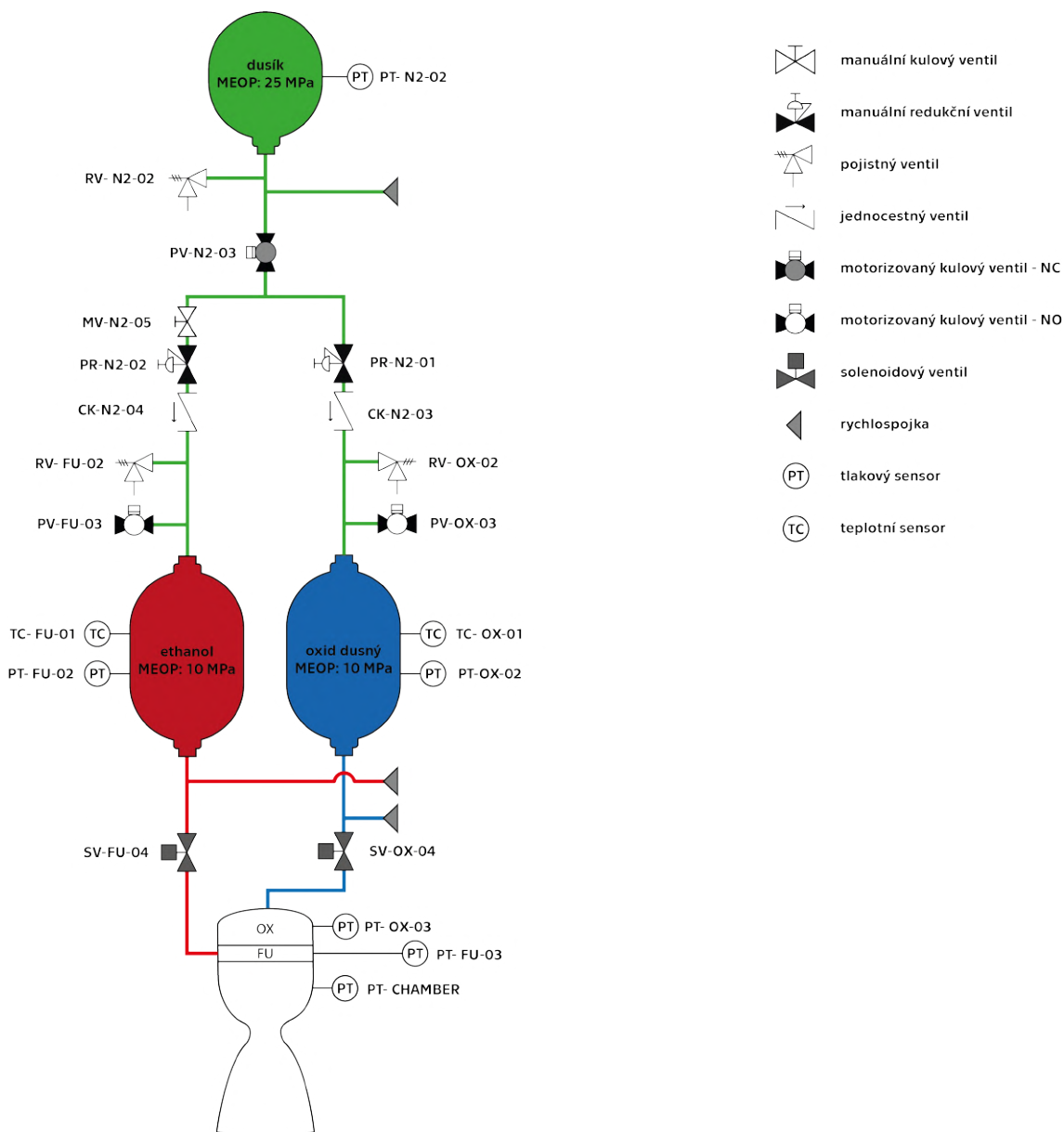
Pro komfort převozu a minimalizaci rizika silničních kontrol je doporučeno volit přívěsný vozík s možností zakrytování plachtou. Pro maximálně efektivní rozložení subsystémů na platformu vozíku je uvažované umístění testovací věže ve sklopeném stavu v podélné ose ložné plochy vozíku. Ostatní subsystémy jsou rozloženy u krajů ložné plochy. Rozvaděč s měřicí a ovládací elektronikou je umístěn v nejvzdálenějším rohu vozíku od motorového lože pro zvýšení ochrany elektroniky před poškozením.



Obrázek 4.3: Konceptuální rozložení subsekcí na vozíku

4.2 Experimentální aparatura

Jedním z možných osazení motorového lože bude experimentální aparatura pro testování hybridních raketových motorů i raketových motorů na kapalná paliva. Zásadním požadavkem na tuto aparaturu je schopnost testovat raketový motor Daedalus, jehož návrh je předmětem diplomové práce Bc. Daniela Hořejšího (viz příloha 7 - PID Daedalus).



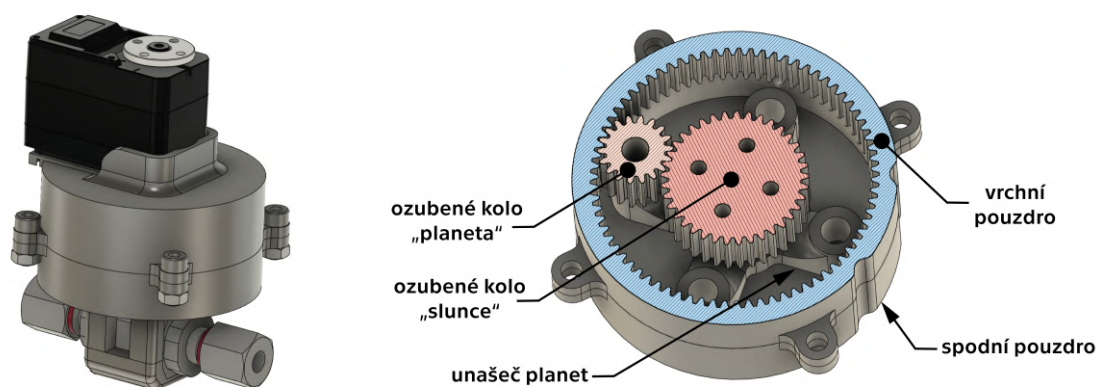
Obrázek 4.4: PID schéma testovací aparatury

Pro úpravy v průběhu testovací kampaně je nutné vybavit experimentální aparaturu tlakovými nádržemi pro okysličovadlo a palivo dimenzovanými pro operační tlak 10 MPa. Tomu musí být uzpůsobené i rozsahy senzorů. Tato aparatura také obsahuje maximální množství senzorů, se kterými se v rámci měření počítá - ze schématu 4.4 bylo tedy vycházeno i při návrhu měřicího řetězce.

Detailní realizace testovací aparatury nebyla předmětem této diplomové práce a výběr finálních komponent byl výsledkem práce skupiny Propulsion týmu CTU Space Research. Autor této práce se podílel pouze na motorizaci ventilů a návrhu tlakových nádob pro palivo a okysličovadlo.

4.2.1 Motorizace ventilů

Pro automatický chod aparatury byla zkonstruována planetová převodovka s převodovým poměrem 3:1 pro získání dostatečného momentu pro otevření ventilů Schwer A-BVM6L-4. Servo má dle technického listu krouticí moment $30 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ při 12V, pro otevření ventilu je výrobcem uváděný moment minimálně $50 \text{ kg} \cdot \text{cm}$. K ovládání ventilů byla použita serva Waveshare ST3215 se zpětnovazebním řízením polohy. V každém momentě užívání serva je tak přes řídicí elektroniku možné odečíst polohu serva (a tím i otevření ventilu). Tato data mohou posloužit při případném řešení problémů při neúspěšném testování.



Obrázek 4.5: Model sestavy převodovky + řez převodovkou

Planetová převodovka je vyrobena technologií MultiJet Fusion z materiálu HP PA12. Vrchní pouzdro, které zároveň slouží jako vnější ozubení, je upevněné vůči

servu šrouby do plastu. Ozubené kolo "slunce" je připevněno k talíři serva. Spodní pouzdro je upevněno vůči tělu ventilu. Unašеч planet je připevněn na osu ventilu. Celá sestava je tak velmi snadno rozdělitelná na dvě poloviny pro potřeby oprav či údržby.

Parametr	hodnota
převodový poměr	3:1
modul	0,75
počet planet	4
počet zubů "slunce"	37
počet zubů "planeta"	18
počet zubů rámu	74

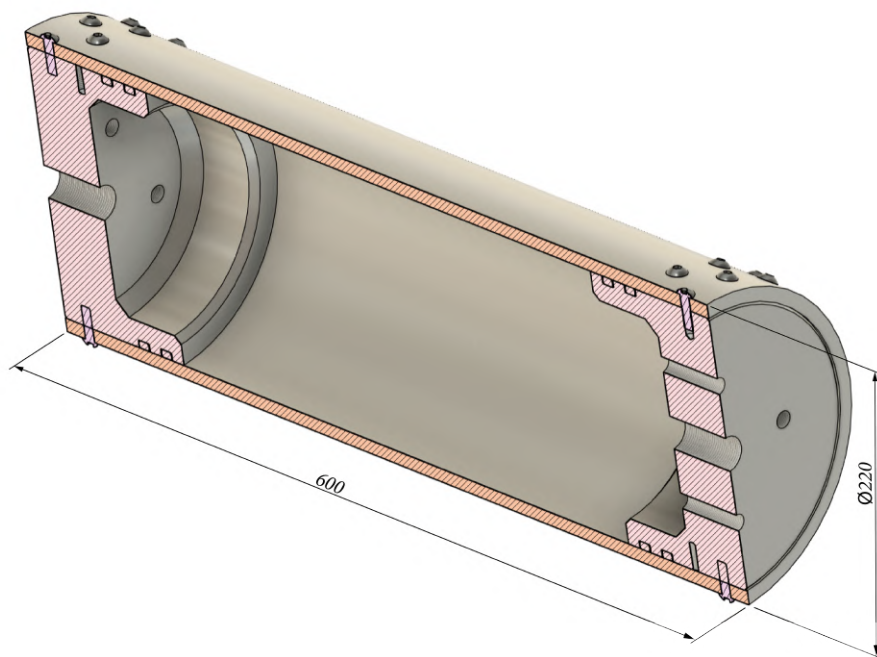
Tabulka 4.1: Parametry planetové převodovky

4.2.2 Tlakové nádoby

Pro testovací účely byly navrženy nádrže na oxid dusný a ethanol schopné vydržet tlak 100 bar navržené v souladu s požadavky soutěže EuRoC. Splněním podmínek návrhu dle požadavků soutěže EuRoC zároveň splnily standardy návrhu tlakových nádob dle ECSS-E-ST-32-02C Rev.1 a ECSS-E-ST-32-10C Rev.2. Jelikož se jedná o neletové nádrže, nebylo odlehčování komponent kritickým parametrem. Požadavkem na minimální objemy nádrží je 18,2 litrů pro N_2O a 10,7 litrů pro ethanol. S ohledem na bezpečnostní rezervu 20 % u kapalného N_2O byly nádrže navrženy s objemem 24, respektive 18 litrů. Pro zlevnění výroby mají nádrže shodný design a liší se pouze délkou trubky a materiálem těsnění. [7] [8] [9]

Tělo nádrže je vyrobeno z materiálu EN AW-6068 T6, víčka jsou z EN AW-6060 T6 a jako spojovací materiál jsou použity šrouby ISO 7380 M8x25 třídy 8.8. Pro těsnění nádrže na N_2O byly použity opláštěné FEP o-kroužky, pro utěsnění nádrže na ethanol byly použity o-kroužky z NBR70.

Pevnostní výpočty byly provedeny dle rovnic a postupů uvedených v [10], [11] a [12]. Stěna nádrže byla pevnostně kontrolována dle rovnice 4.1 pro tlustostěnnou trubku s vnitřním přetlakem.



Obrázek 4.6: Řez modelem tlakové nádoby

$$(p_1 - p_2) \leq \frac{\sigma_D}{2} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \quad (4.1)$$

Z čehož plyne:

$$\frac{Rp}{k} \geq (p_1 - p_2) \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]^{-1} \quad (4.2)$$

$$\frac{255}{2} \geq (10 - 0) \left[1 - \left(\frac{100}{110} \right)^2 \right]^{-1} \quad (4.3)$$

$$127,5 \geq 57,61 \quad [MPa] \quad (4.4)$$

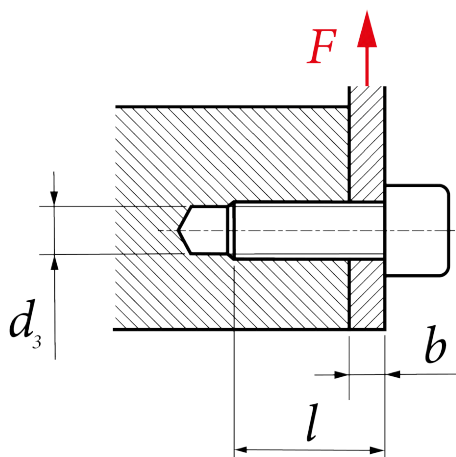
Pevnostní kontrolní výpočty šroubů byly provedeny na stříh a na otláčení dle rovnic 4.5, 4.9 a 4.13.

Pevnostní výpočty šroubů na stříh:

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{2}} \leq \tau_{d_{\text{šroub}}} \quad (4.5)$$

kde F ... síla na jeden šroub (42 šroubů ve dvou řadách)

α ... pevnostní koeficient zvolen dle teorie HMM



Obrázek 4.7: Výpočtové schéma šroubového spoje

$$\frac{R_e}{k \cdot \alpha} \geq \frac{F}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{2}} \quad (4.6)$$

$$\frac{640}{2 \cdot \sqrt{3}} \geq \frac{7480}{\frac{\pi \cdot 6,4^2}{2}} \quad (4.7)$$

$$184,97 \geq 116,26 \quad [MPa] \quad (4.8)$$

Pevnostní výpočty víčka a stěny nádrže na otláčení:

$$p_{\text{víčko}} = \frac{F}{(l - b) \cdot d_3} \leq \sigma_{d_{\text{víčko}}} \quad (4.9)$$

$$\frac{R_e}{k} \geq \frac{F}{(l - b) \cdot d_3} \quad (4.10)$$

$$\frac{160}{2} \geq \frac{7480}{(25 - 10) \cdot 6,4} \quad (4.11)$$

$$80 \geq 77,92 \quad [MPa] \quad (4.12)$$

$$p_{\text{stěna}} = \frac{F}{b \cdot d_3} \leq \sigma_{d_{\text{stěna}}} \quad (4.13)$$

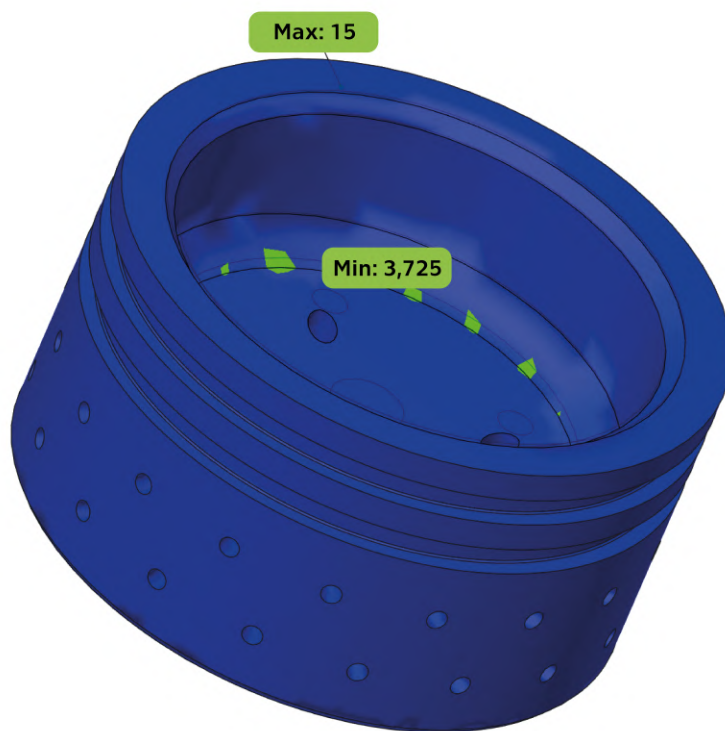
$$\frac{R_e}{k} \geq \frac{F}{b \cdot d_3} \quad (4.14)$$

$$\frac{255}{2} \geq \frac{7480}{10 \cdot 6,4} \quad (4.15)$$

$$127,5 \geq 116,84 \quad [MPa] \quad (4.16)$$

Jak je zřejmé z rovnic 4.4, 4.8, 4.12 a 4.16, navržené komponenty splnily pevnostní kontroly.

Návrh víček tlakové nádoby se odvíjel od konstrukčních zástavbových rozměrů potřebných pro šroubové spoje a těsnící prvky. Při tloušťce nejtenčí části víčka 50 mm byla provedena simulace metodou konečných prvků, ze které plyne minimální koeficient bezpečnosti 3,725, který splňuje požadavky soutěže. K simulaci byl použit řešič Autodesk Nastran za použití sítě s 150 215 tetrahedral elementy. [13]



Obrázek 4.8: Pevnostní simulace víčka tlakové nádoby

5 Měřicí řetězec

5.1 Senzory

Byly vybrány senzory pro měření veličin dle PID diagramu 4.4. Vybrané senzory musí být kompatibilní ke všem látkám používaným v raketových motorech týmu - dusík, oxid dusný a ethanol. Jako vhodný materiál sensorů či jejich pouzder byla vybrána nerezová ocel.

Přehled vybraných sensorů a jejich rozsahů a výstupů je pro přehlednost uveden v tabulce 5.1. Teplota bude primárně měřena pomocí snímačů teploty PT1000, které se vyznačují lineární převodní charakteristikou. Do této chvíle probíhalo měření teploty při testech týmu pomocí termočlánků, jedním z požadavků na testovací aparaturu tedy byla možnost akvizice teploty pomocí termočlánků. To bylo promítnuto i do návrhu měřicího řetězce.

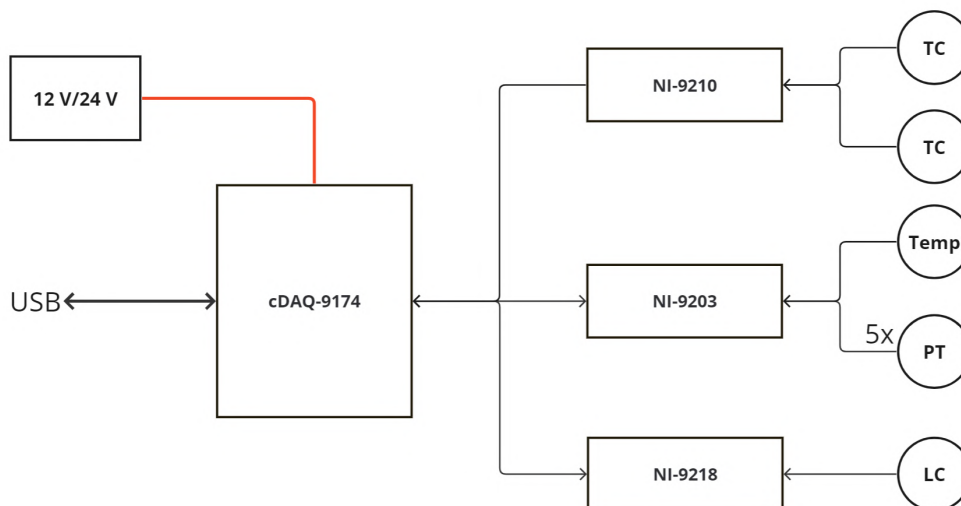
Senzor	Výrobce	Veličina	Rozsah	Umístění	Výstup
EMS41	EMSYST	síla	0 - 10 kN	LC-1	0,5 - 4,5 V
PT1000	Steca	teplota	-30 - 500 °C	TC-OX-01, TC-FU-01	882 - 2809,8 Ohm
AP027	Autosen	tlak	0 - 10 MPa	PT-OX-02, PT-FU-02, PT-OX-03, PT-FU-03, PT-CHAMBER	4...20 mA
AP029	Autosen	tlak	0 - 40 MPa	PT-N2-02	4...20 mA

Tabulka 5.1: Přehled vybraných sensorů

5.2 National Instruments

Pro vysokou kvalitu měřených dat byl vypracován návrh měřicího řetězce z komponent od společnosti National Instruments (dále NI). Přístroje této společnosti jsou

v souvislosti s testováním raketové techniky široce používané, a tak má společnost dostupnou brožuru asistující s vhodným návrhem měřicího řetězce. [14]



Obrázek 5.1: Schéma měřicího řetězce NI



Obrázek 5.2: Přehled zvolených modulů NI [15, úprava autor]

Měřicí centrály společnosti National Instruments mají skvělé napojení na program LabVIEW umožňující okamžitou vizualizaci dat přesně dle přání uživatele. ČVUT v Praze disponuje licencí na tento program. [15]

Velikou nevýhodou tohoto řešení je však jeho cena (převyšující 130 000 Kč). Pro potřeby studentského týmu je v současné situaci pořízení daného systému ne-realizovatelné. [15]

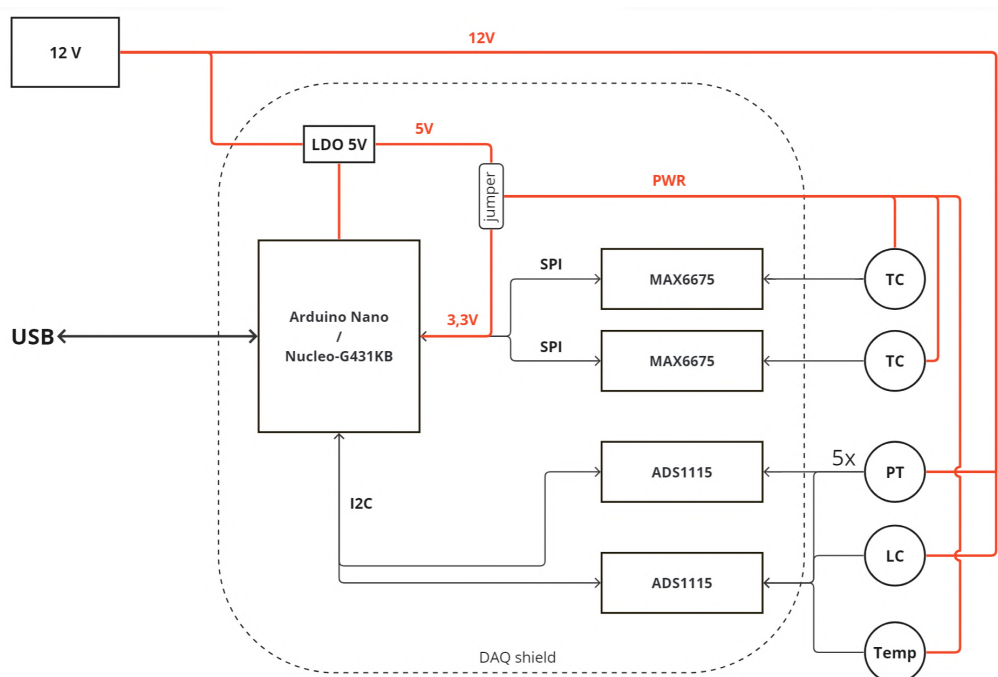
5.3 Vlastní návrh - DAQ shield

Pro překonání problematiky vysoké ceny měřícího řetězce od společnosti National Instruments bylo přistoupeno k návrhu vlastního řešení měřícího řetězce. Výsledkem této snahy byl vývoj jakéhosi "shield" modulu pro Arduino Nano či Nucleo G431KB (oba mikrokontrolery mají stejné rozložení pinů a je tedy je možné používat záměnně). Dle volby mikrokontroleru je třeba přepájet tzv. jumper na desce (+5V pro Arduino Nano, +3,3V pro Nucleo G431KB) který zajistí, aby byly senzory napájeny nativním napětím mikrokontroléru. Toto opatření umožňuje mikrokontroleru komunikovat s převodníky bez rizika poškození.

Pro připojení termočlánků byl užit převodník MAX6675. Pro měření ostatních veličin byly použity převodníky ADS1115. Vzhledem k odlišným výstupům ostatních senzorů byla mezi výstupy ze senzorů a převodníky umístěna jiná struktura komponent - všechny vstupy byly vybaveny tzv. "lowpass filtrem" vytvořeným dle Shannonova Nyquistova teorému (rovnice 5.1). Vstup ze siloměru byl navíc opatřen dalším odporem pro vytvoření odporového děliče. Detailní schéma DAQ shieldu je k nahlédnutí v příloze 4.

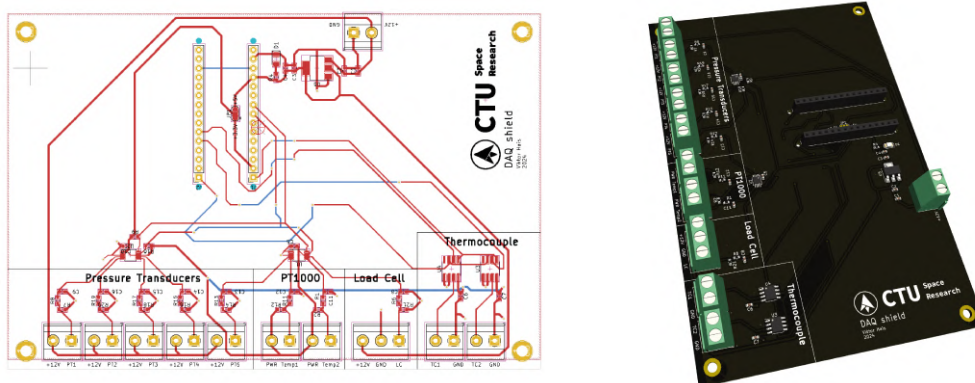
$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.1)$$

Vzhledem k návrhové vzorkovací frekvenci 200 Hz byl lowpass filtr počítaný na frekvenci 100 Hz. Byly zvoleny odpory o $R = 10 \text{ k}\Omega$ a kondenzátory o $C = 10 \text{ nF}$.



Obrázek 5.3: Blokové schéma měřícího řetězce pomocí DAQ shield

Zřejmou nevýhodou oproti řešení od National Instruments je nedostatek softwarového zázemí. Data získaná z tohoto systému momentálně není možné jednoduše vizualizovat v reálném čase a je navrženo pouze pro zaznamenávání dat přes prostředí Arduino IDE. Tuto nevýhodu vyvažuje nesrovnatelně nižší cena (cca 3000 Kč). Ve světle finančních možností studentského týmu je přesnost tohoto řešení hodnocena jako momentálně dostačující. V následujících letech je však doporučeno systém sběru dat nahradit výkonnějším systémem vlastního návrhu týmu či komerčním řešením.



Obrázek 5.4: DAQ shield - schéma + render

5.4 Porovnání měřících řetězců

Pro korektní volbu systému sběru dat byla vypracována multikriteriální analýza podle ECSS-E-ST-10C Rev.1. Z této analýzy vyplývá, že vhodným řešením bude za současných podmínek DAQ shield, a to zejména kvůli rozpočtovým důvodům. [1]

Parametr	Váha	NI DAQ		DAQ Shield	
		Hodnocení [1-5]	Skóre	Hodnocení [1-5]	Skóre
Cena	0,5	1	0,5	5	2,5
Uživatelská přívětivost	0,2	5	1,0	2	0,4
Robustnost	0,1	4	0,4	1	0,1
Software	0,1	4	0,4	2	0,2
Vzorkovací frekvence	0,1	4	0,4	1	0,1
	1		2,7		3,3

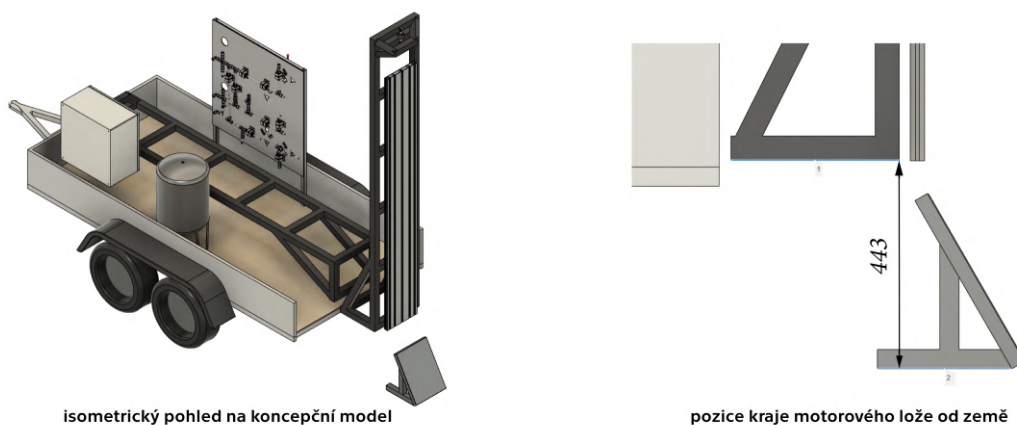
Tabulka 5.2: Multikriteriální analýza DAQ systému

6 Konstrukční návrh

6.1 Předběžný návrh

V první verzi návrhu bylo počítáno s výrobou měřicího rámu jako svařence z jeklů 40x40x3. Od tohoto návrhu bylo upuštěno s ohledem na výrobní možnosti týmu, zejména s ohledem na možnost zkroucení celého rámu vlivem tepelného namáhání při svařování. To by mohlo mít za následek vyšší odpor v lineárním vedením a ovlivnění přesnosti měření - bylo tedy rozhodnuto přejít na konstrukci z extrudovaných profilů z hliníkových slitin a to na úkor zvýšení rozpočtu projektu.

Osa rotace rámu byla plánována v souladu s koncepčním návrhem na hraně ložné plochy vozíku. Při tomto uspořádání nebylo možné zajistit bezpečnou vzdálenost mezi koncem trysky a dopadovou plochou deflektoru, bylo tedy nutné přistoupit k vyvýšení osy rotace věže. Tyto změny byly promítnuty do výsledné konstrukce vozíku.



Obrázek 6.1: Konceptuální model

6.2 Výsledná konstrukce

Jako spojovací materiál byly použity šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem DIN912 pevnostní třídy 8.8, není-li uvedeno jinak. Všechny šrouby byly utaženy na doporučený utahovací moment dle DIN898/1. Ukotvení pevnostních prvků (přípevnění základny a vzpěr testovací věže vůči vozíku) bylo vedeno skrz ocelové profily konstrukce vozíku a přípevněné maticí samojistnou DIN985. Prvky, které nepřenášejí zatížení motoru (rozvody plynů, deflektor, rozvaděč) jsou ukotvené přes dno vozíku (překližka 9mm) pomocí narážecích matic AN 9260/A2.

Pro potřeby rychlého upevňování testovacího standu byl navržen vlastní stavěcí šroub (obrázek 6.2) na základě šroubu se šestihrannou hlavou DIN933. Na ten byly vymodelovány příchytné součásti (úchyt a pojistné dno) optimalizované na výrobu aditivní technologií FDM, které usnadňují ruční utažení šroubu. Tento šroub je zakázané užívat pro osově namáhané šroubové spoje.



Obrázek 6.2: Stavěcí šroub

6.2.1 Substýémy

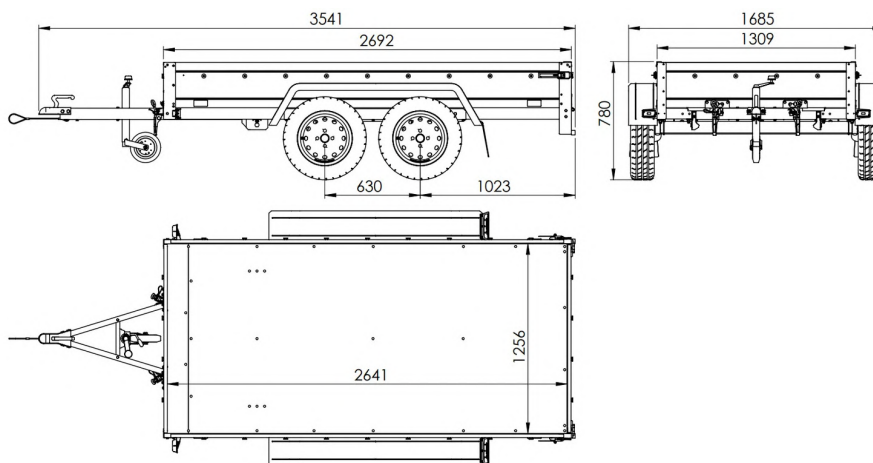
6.2.1.1 Platforma

Jako platforma pro testovací stanoviště byl vybrán přívěsný vozík Unitrailer Garden Trailer 264/2 KIPP v sadě s opěrným kolečkem, rámem 80 cm a dedikovanou modrou plachtou. Vozík má maximální hmotnost 750 kg a disponuje dvěma nebrzděnými nápravami - k jeho převozu je tak v kombinaci s vhodným osobním

automobilem dostačující řidičské oprávnění skupiny B. Vzhledem k prázdné hmotnosti vozíku (300 kg) je tak nové omezení pro testovací aparaturu - její hmotnost nesmí přesáhnout 450 kg. [16]



Obrázek 6.3: Unitrailer Garden Trailer 264/2 KIPP [16]

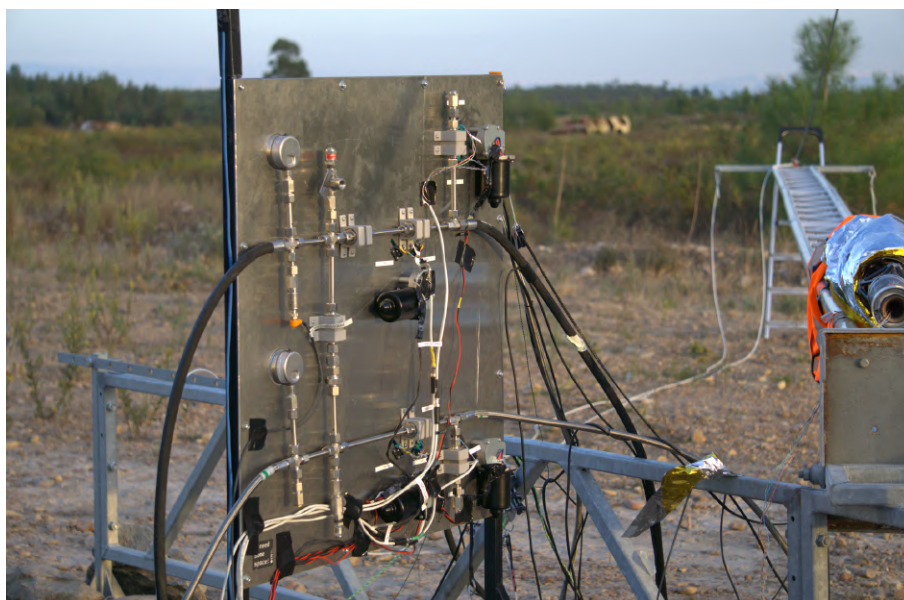


Obrázek 6.4: Výkres Unitrailer Garden Trailer 264/2 KIPP [16]

Vozík byl v rozích vybaven opěrnými nohama z nabídky výrobce. Opěrné nohy slouží k stabilizaci samostatně a v případě potřeby je možné je zatížit závažím pro lepší ukotvení stanoviště.

6.2.1.2 Rozvody plynů

V rámci týmu byla vyvinuta stanice pro bezobslužné tankování nádrží pro raketové motory. V nomenklatuře týmu se zařízení nazývá "Ground Support Equipment" (dále jen GSE). Vývoj tohoto systému probíhá v rámci skupiny Propulsion a není v této práci detailně řešen. GSE se ve své současné podobě (obrázek 6.5) na platformu stanoviště vejde ve dvou osách, jeho užití se však neslučuje s použitím zakrytování vozíku plachtou. Bylo tedy vydáno doporučení o přepracování GSE s navrženou maximální obálkou 400x1200x900 [mm]. Ke zmenšení GSE je doporučeno změnit motorizaci ventilů na kombinaci serva a planetové převodovky zmíněné v sekci 4.2.1.



Obrázek 6.5: Současný stav GSE [archiv CTU SR]

6.2.1.3 Rozvaděč

Pro umístění elektroniky potřebné k ovládání testovací aparatury, bezobslužnému tankování a sběru dat z testování byl zvolen venkovní rozvaděč pro 19" od společnosti XtendLan. Využití standardizovaného uchycovacího systému usnadňuje modifikace elektronických systémů do budoucna i pro další členy týmu. Rozvaděč disponuje třídou krytí IP55, je tedy odolný proti ničivému objemu prachu i tryskající vodě. Při případných modifikacích rozvaděče do budoucna je nutno tento stupeň krytí zachovat, tedy užívat kabelové průchodky či konektory minimálně

stupně krytí IP55 a vyšší. [17]

6.2.1.4 Akustická ochrana

Jedním z témat pro budoucí rozvoj raketových motorů je i tlumení akustických vibrací vzniklých při jejich testování. Ty působí negativně nejen na osoby účastnící se testování, ale i na techniku samotnou. Při současných výkonech týmem testovaných RM (maximální tah do 5 kN) není akustické zatížení kritické, proto není v současné chvíli nutné tento subsystém navrhovat. V rámci budoucích prací však bylo vypracováno doporučení pro vývoj této akustické ochrany a na testovací platformě pro ni bylo vyhrazené místo. Jako zdroj vody pro akustickou ochranu byla zvolena tlaková nádoba AQUA OLA 50l stojatá, která svými rozměry splňuje vyhrazenou obálku. [18]

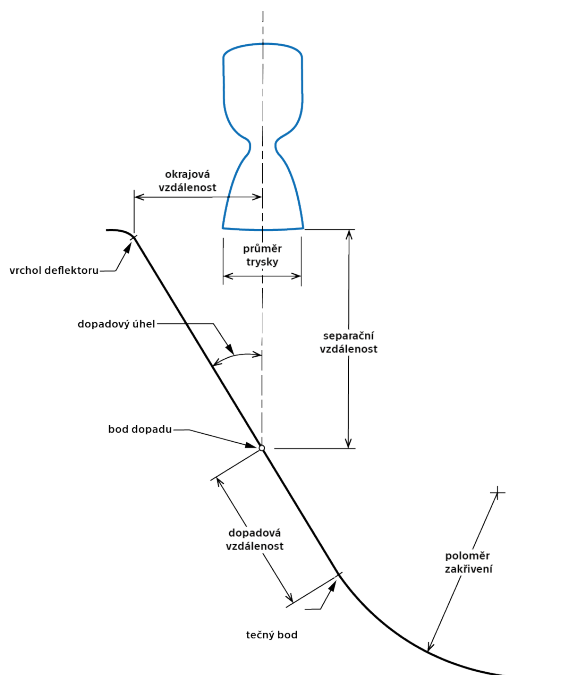
6.2.1.5 Deflektor

Zážeh raketového motoru ve vertikální pozici blízko země může poškodit testovací aparaturu či motor samotný plamenem, teplem nebo akustickým zatížením. Pro minimalizaci možného poškození byl navržen deflektor dle standardu NASA KSC-STD-Z-0012B podle parametrů motoru Daedalus. Zakřivená plocha byla vzhledem k rozměrům deflektoru a dostupným technologiím výroby nahrazena šikmou plochou svírající úhel 30° s horizontálou. [2] [19]

Veličina	minimální hodnota	zvolená hodnota
Separáční vzdálenost	273 mm	XXX mm
dopadov� úhel	30°	30°
bod dopadu	68,25 mm	75 mm
te�n� bod	45,5 mm	50 mm
poloměr zakřiven�	154,7 mm	170 mm
Š�rka deflektoru	145,6 mm	400 mm

Tabulka 6.1: Přehled rozměrů deflektoru dle NASA KSC-STD-Z-0012B a zvoleného konstrukčního řešení

Deflektor je zkonstruován z jeklů 40x40x3 a na jeho funkční povrch je navařený



Obrázek 6.6: Výpočtové schéma deflektoru [19, úprava autor]

5 mm plech. Materiál obou konstrukčních prvků je ocel S235JR. Konstrukce deflektoru je přenosná, vybavená pozičními značkami vůči vozíku a na vozíku má vyhrazené místo na převážení. Kvůli umožnění převozu na vozíku je konstrukce skládací, přičemž boční pásnice slouží k zaaretování ve složené i funkční poloze. Pro aretaci pásnice jsou použity vlastní stavěcí šrouby zmíněné na začátku sekce 6.2, k jejichž uchycení jsou v konstrukci použity nýťovací matice se zápustnou hlavou.

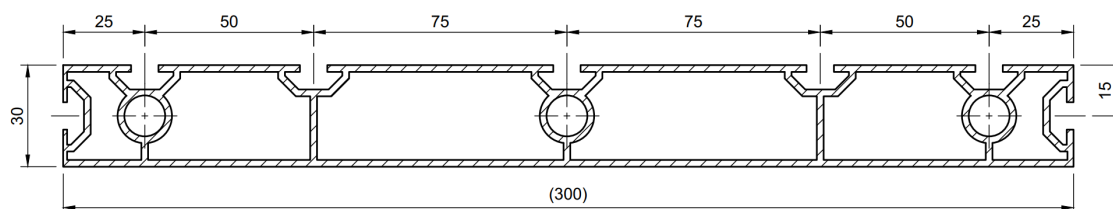


Obrázek 6.7: Pohled na model deflektoru + porovnání rozloženého a složeného stavu

6.2.1.6 Měřicí věž

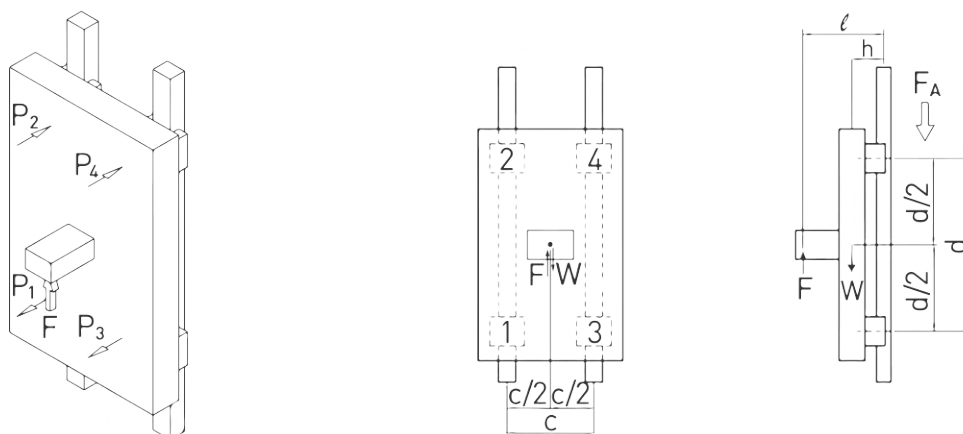
Rám měřicí věže byl zkonstruován z profilů společnosti KANYA řady 50 s drážkou N8. To usnadňuje případné modifikace či montáž přídatných zařízení do budoucna. Profily jsou vůči sobě spojené úhlovými spojkami s kolíky proti protočení. Profily spojené na tupo jsou navíc spojené průchozími šrouby. [20]

Jako motorové lože byl vybrán profil KANYA B03-3 30x30 v délce 2350 mm. K připojení jsou používány matice systému KANYA N8. Toto řešení umožňuje jednoduché připevnění motorů a celé testovací aparatury dle potřeb daného testování. [20]



Obrázek 6.8: Přípojný rozměry motorového lože

Lineární vedení bylo dimenzováno v souladu s doporučeními výrobce dle rovnice 6.1. [21]



Obrázek 6.9: Schéma pro dimenzování lineárního vedení [21]

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = -\frac{W \cdot h}{2d} + \frac{F \cdot l}{2d} \quad (6.1)$$

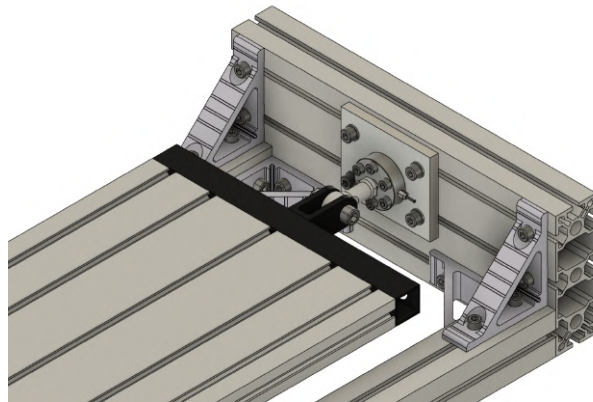
kde P_i ... zatížení vozíku
 W ... tíha aparatury
 F ... zatížení od tahu motoru

Pro návrhový výpočet byla odhadnuta tíha natankované soustavy $W = 600 \text{ N}$ a poloha těžiště soustavy přibližně v ose tahu, tedy $h = l$. Po dosazení docházíme k upravenému vztahu:

$$P_i = (F - W) \frac{h}{d} = (15\,000 - 600) \frac{120}{1\,500} = 1\,152 \text{ N} \quad (6.2)$$

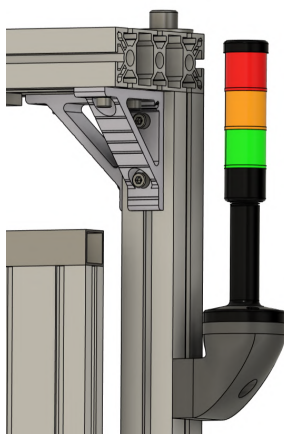
Bylo zvoleno lineární vedení řady MGN-H s vozíky MGN12H s dynamickou únosností 3720 N a tedy s koeficientem bezpečnosti lineárního vedení $k = 3,23$.

Siloměr je vůči rámu upevněn dle instrukcí výrobce pomocí šroubového spoje. Motorové lože je k siloměru připevněno pomocí kloubového oka. Osa siloměru je v rovině osy motorového lože.



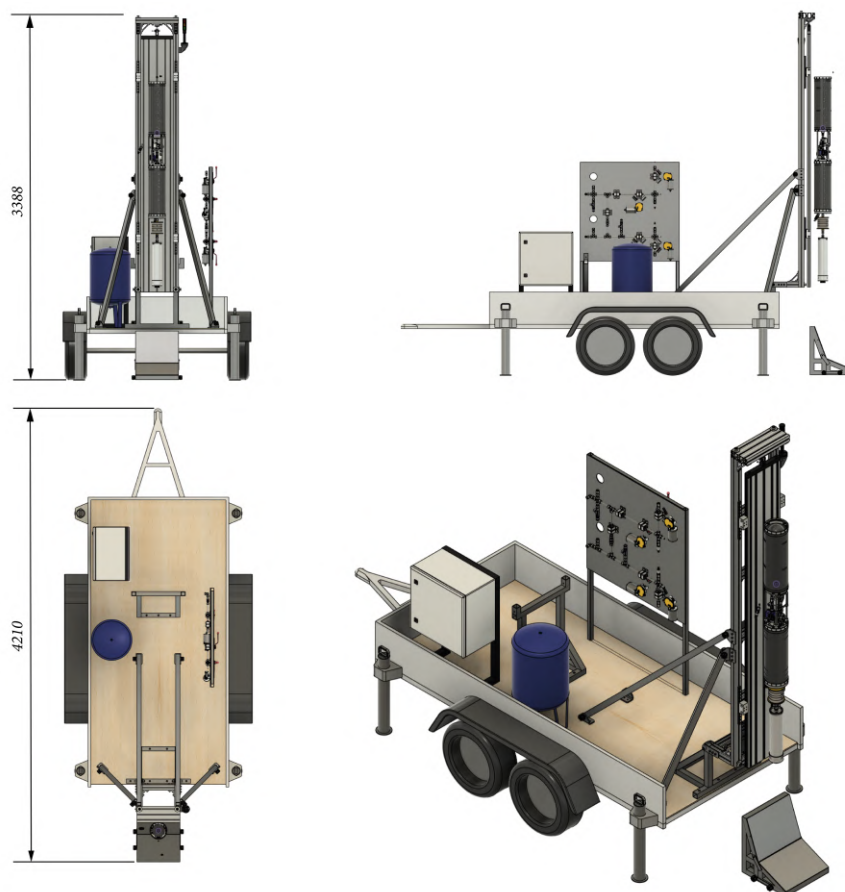
Obrázek 6.10: Uložení siloměru v testovací věži

Testovací věž byla vybavena opticko-akustickým výstražným systémem ve formě semaforu s bzučákem. Připojení semaforu vůči rámu je řešeno pomocí 3D tištěnce (doporučená výrobní metoda FDM). Ovládání semaforu probíhá přes univerzální odpalovací kufřík týmu CTU Space Research.



Obrázek 6.11: Umístění semaforu na testovací věži

6.2.2 Třípohledové schéma



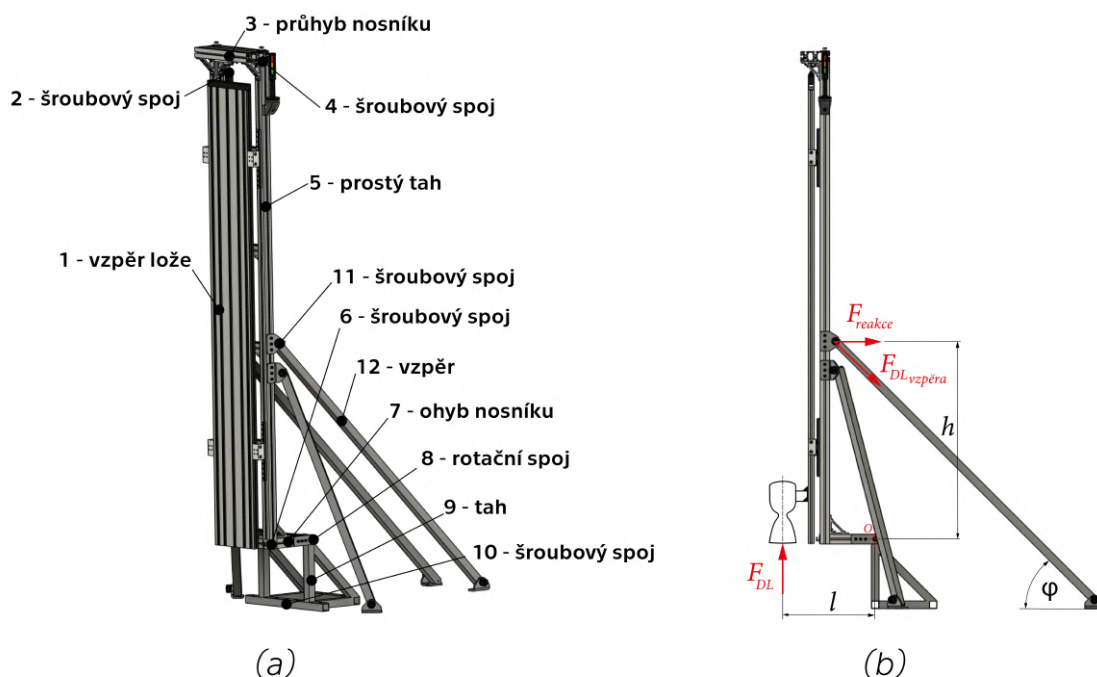
Obrázek 6.12: Přehledové schéma předkládaného řešení s umístěným RM Phoenix

6.2.3 Pevnostní výpočty

Pevnostní výpočty byly provedeny dle standartu ECSS-E-ST-32-10C-Rev.2. Početní zatížení od tahu motoru bylo stanoveno pomocí příslušného bezpečnostního koeficientu a maximálního dovoleného tahu motoru dle rovnice 6.3.

$$F_{DL} = F_{MAX} \cdot K_p = 10\,000 \cdot 1,25 = 12\,500\, N \quad (6.3)$$

Dále se musí vyznačovat minimální rezervou maximálního napětí vůči mezi kluzu $FOSY \geq 1,25$ (yield design factor of safety). Přehled použitých materiálů a jejich relevantních vlastností, stejně jako profilů a relevantních průřezových charakteristik byl sestaven do příloh 1 a 2. Pevnostní výpočty byly provedeny za užití rovnic a postupů uvedených v [10], [11] a [12].

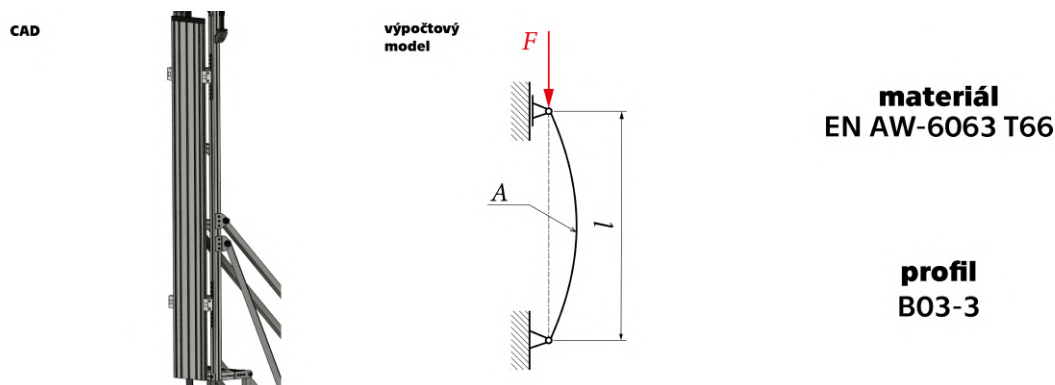


Obrázek 6.13: Body kontrolních výpočtů (a) a schéma určení zatížení (b)

místo pevnostní kontroly	FOSY	pevnostní kontrola
1 - vzpěr lože	29,98	splněna
2 - šroubový spoj	1,58	splněna
3 - průhyb nosníku	5,38	splněna
4 - šroubový spoj	11,16	splněna
5 - prostý tah	27,36	splněna
6 - šroubový spoj	2,52	splněna
7 - ohyb nosníku	1,34	splněna
8 - rotační spoj	2,77	splněna
9 - prostý tah	16,69	splněna
10 - šroubový spoj	9,88	splněna
11 - šroubový spoj	2,29	splněna
12 - vzpěr	19,93	splněna

Tabulka 6.2: Přehled výsledků pevnostních kontrol s vypočtenými FOSY

6.2.3.1 Vzpěr lože



Obrázek 6.14: Popis kontrolního místa 1

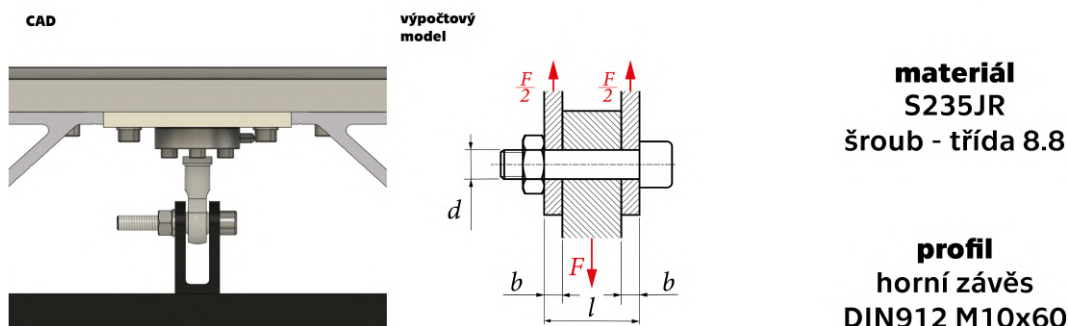
$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{l_{red}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 70\,000 \cdot 260\,600}{1\,500^2} = 80\,018,36 \text{ N} \quad (6.4)$$

$$F_{kr} \leq F_{DL} \quad (6.5)$$

$$\sigma_{DL} = \frac{F_{DL}}{A} = \frac{12\,500}{1\,874} = 6,67 \text{ MPa} \quad (6.6)$$

$$FOSY = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{DL}} = \frac{200}{6,67} = 29,98 \quad (6.7)$$

6.2.3.2 Šroubový spoj



Obrázek 6.15: Popis kontrolního místa 2

Kontrola tohoto spoje byla provedena na ohyb, stříh a otláčení. Jako výsledný FOSY byl vybrán nejnižší ze získaných FOSY.

$$\sigma_{ohyb} = \frac{5}{4} \cdot F_{DL} \cdot \frac{l}{d^3} = \frac{5}{4} \cdot 12\,500 \cdot \frac{26}{10^3} = 406,25 \text{ MPa} \quad (6.8)$$

$$FOSY_{ohyb} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{ohyb}} = \frac{640}{406,25} = 1,58 \quad (6.9)$$

Pevnostní kontrola na stříh:

$$\tau = \frac{F_{DL}}{\frac{\pi \cdot d^2}{2}} = \frac{12\,500}{\frac{\pi \cdot 10^2}{2}} = 79,58 \text{ MPa} \quad (6.10)$$

$$FOSY_{stříh} = \frac{\sigma_Y \cdot \alpha}{\tau} = \frac{640 \cdot \sqrt{3}}{79,58} = 4,65 \quad (6.11)$$

Pevnostní kontrola na otláčení:

$$p_{oko} = \sigma_{oko} = \frac{F}{(l - 2 \cdot b) \cdot d} = \frac{12\,500}{(26 - 2 \cdot 6) \cdot 10} = 89,29 \text{ MPa} \quad (6.12)$$

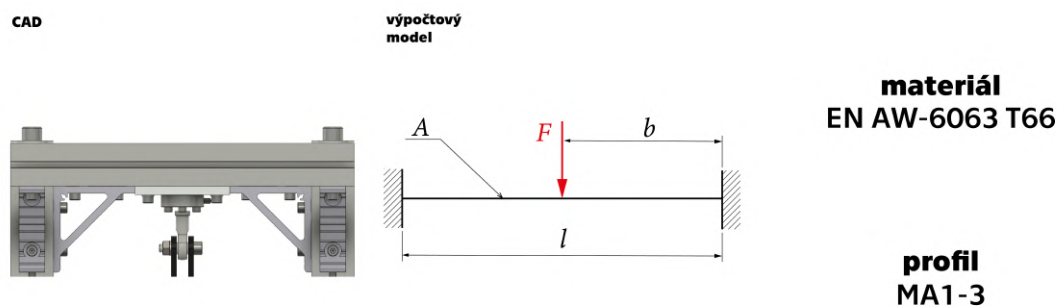
$$FOSY_{oko} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{oko}} = \frac{640}{89,29} = 7,17 \quad (6.13)$$

$$p_{zavěs} = \sigma_{zavěs} = \frac{F}{2 \cdot b \cdot d} = \frac{12\,500}{2 \cdot 6 \cdot 10} = 104,17 \text{ MPa} \quad (6.14)$$

$$FOSY_{z\u00e1v\u00e9s} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{z\u00e1v\u00e9s}} = \frac{235}{104,17} = 2,26 \quad (6.15)$$

$$FOSY = \min(FOSY_{ohyb}, FOSY_{st\u00edh}, FOSY_{oko}, FOSY_{z\u00e1v\u00e9s}) = 1,58 \quad (6.16)$$

6.2.3.3 Pr\u00fabybnosn\u00edku

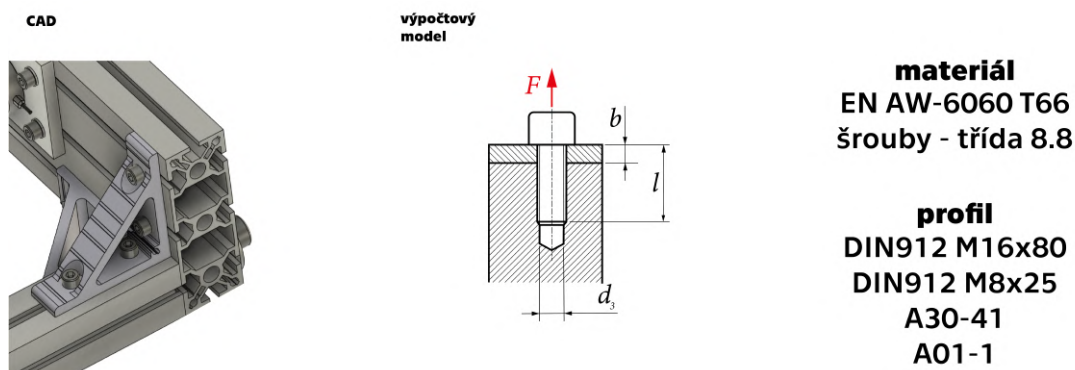


Obr\u00e1zek 6.16: Popis kontroln\u00edho m\u00edsta 3

$$\sigma_{ohyb} = \frac{M_o}{W_o} = \frac{F_{DL} \cdot l}{4 W_o} = \frac{12\,500 \cdot 350}{4 \cdot 29\,420} = 31,18 \text{ MPa} \quad (6.17)$$

$$FOSY = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{ohyb}} = \frac{200}{31,18} = 5,38 \quad (6.18)$$

6.2.3.4 \u0160roubov\u00fd spoj



Obr\u00e1zek 6.17: Popis kontroln\u00edho m\u00edsta 4

V rámci tohoto kontrolního místa byla kontrolována pouze únosnost šroubového spoje M16. Jelikož byl FOSY výrazně vyšší než požadovaná hodnota, nebylo nutné přistupovat k pevnostní kontrole šroubových spojení úhelníky, které přenášejí nezanedbatelnou část zatížení a celkový FOSY tohoto spoje tak zvyšují.

Kontrola šroubu:

$$\sigma_{\text{šroub}} = \frac{\frac{F_{DL}}{2}}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{\frac{12\,500}{2}}{\frac{\pi \cdot 12,8^2}{4}} = 48,57 \text{ MPa} \quad (6.19)$$

$$FOSY_{\text{šroub}} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{\text{šroub}}} = \frac{640}{48,57} = 13,18 \quad (6.20)$$

Kontrola vnitřního závitu:

$$\sigma_{\text{závit}} = \frac{\frac{F_{DL}}{2}}{\frac{\pi}{2} \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot n} = \frac{\frac{12\,500}{2}}{\frac{\pi}{2} \cdot 14,8 \cdot 1 \cdot 15} = 17,92 \text{ MPa} \quad (6.21)$$

kde H_1 ... nosná hloubka závitu

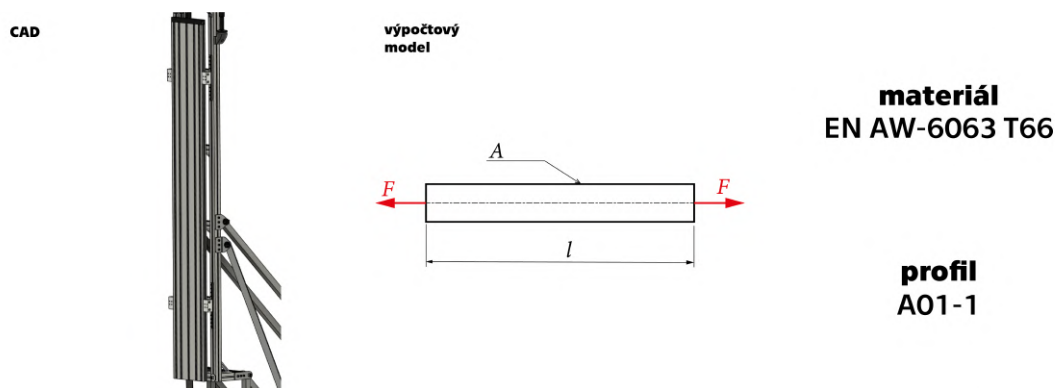
n ... počet závitů

s ... stoupání závitu

$$FOSY_{\text{závit}} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{\text{závit}}} = \frac{200}{17,92} = 11,16 \quad (6.22)$$

$$FOSY = \min(FOSY_{\text{šroub}}, FOSY_{\text{závit}}) = 11,16 \quad (6.23)$$

6.2.3.5 Prostý tah

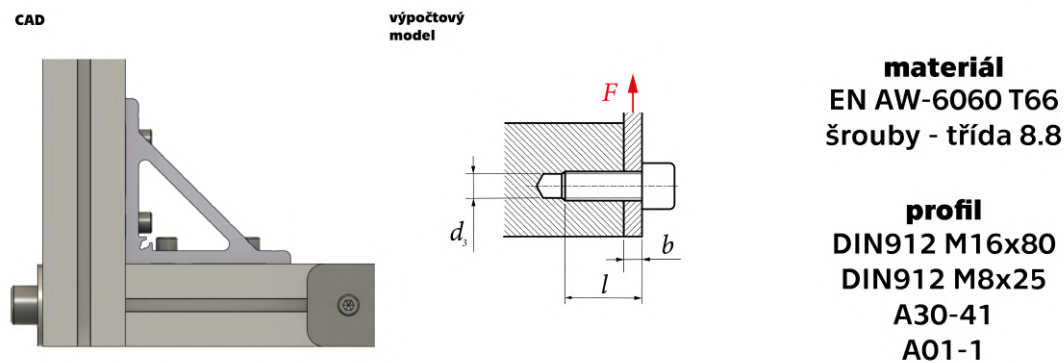


Obrázek 6.18: Popis kontrolního místa 5

$$\sigma_{\text{tah}} = \frac{F_{DL}}{2} = \frac{12500}{855} = 7,31 \text{ MPa} \quad (6.24)$$

$$FOSY_{\text{tah}} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{\text{tah}}} = \frac{200}{7,31} = 27,36 \quad (6.25)$$

6.2.3.6 Šroubový spoj



Obrázek 6.19: Popis kontrolního místa 6

Kontrola tohoto spoje byla provedena na ohyb, stříh a otláčení. Jako výsledný FOSY byl vybrán nejnižší ze získaných FOSY. Jelikož byl FOSY vyšší než požadovaná hodnota, nebylo nutné přistupovat k pevnostní kontrole šroubových spojení úhelníky, které přenášejí nezanedbatelnou část zatížení a celkový FOSY tohoto spoje tak zvyšují.

$$\sigma_{\text{ohyb}} = \frac{5 \cdot F_{DL} \cdot l}{4 \cdot d_3^3} = \frac{5 \cdot 12500 \cdot 26}{4 \cdot 10^3} = 254,03 \text{ MPa} \quad (6.26)$$

$$FOSY_{\text{ohyb}} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{\text{ohyb}}} = \frac{640}{254,03} = 2,52 \quad (6.27)$$

Pevnostní kontrola na stříh:

$$\tau = \frac{F_{DL}}{2} = \frac{12500}{\frac{\pi \cdot d^2}{2}} = 21,83 \text{ MPa} \quad (6.28)$$

$$FOSY_{\text{stříh}} = \frac{\sigma_Y \cdot \alpha}{\tau} = \frac{640 \cdot \sqrt{3}}{21,83} = 16,95 \quad (6.29)$$

Pevnostní kontrola na otláčení:

$$p_1 = \sigma_1 = \frac{F}{(l-b) \cdot d_3} = \frac{12\,500}{(80-50) \cdot 13,5} = 15,43 \text{ MPa} \quad (6.30)$$

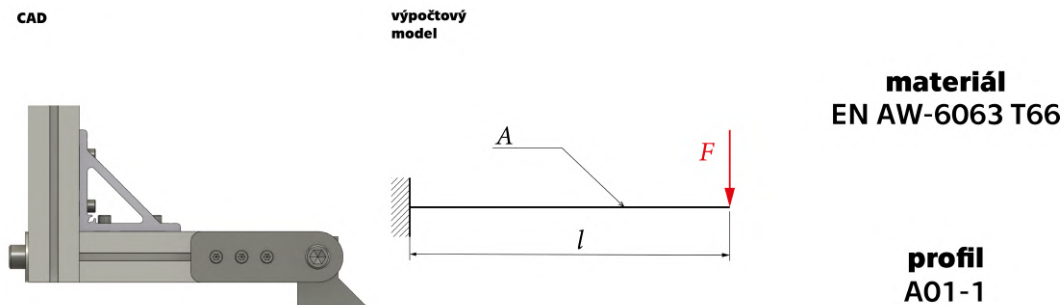
$$FOSY_1 = \frac{\sigma_Y}{\sigma_1} = \frac{640}{15,43} = 15,43 \quad (6.31)$$

$$p_2 = \sigma_2 = \frac{F}{\frac{1}{2} \cdot b \cdot d_3} = \frac{12\,500}{\frac{1}{2} \cdot 50 \cdot 13,5} = 18,52 \text{ MPa} \quad (6.32)$$

$$FOSY_2 = \frac{\sigma_Y}{\sigma_2} = \frac{235}{18,52} = 12,69 \quad (6.33)$$

$$FOSY = \min(FOSY_{ohyb}, FOSY_{střih}, FOSY_1, FOSY_2) = 2,52 \quad (6.34)$$

6.2.3.7 Ohyb nosníku

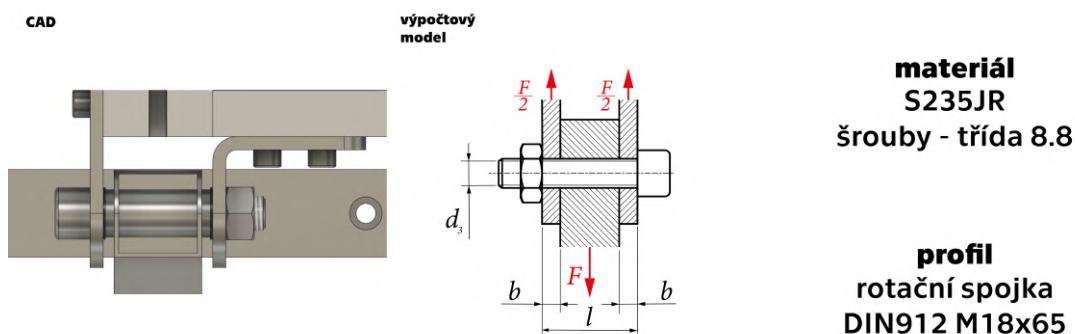


Obrázek 6.20: Popis kontrolního místa 7

$$\sigma_{ohyb} = \frac{M_o}{W_o} = \frac{\frac{F_{DL}}{2} \cdot l}{W_o} = \frac{\frac{1250}{2} \cdot 200}{8\,350} = 149,7 \text{ MPa} \quad (6.35)$$

$$FOSY = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{ohyb}} = \frac{200}{149,7} = 1,34 \quad (6.36)$$

6.2.3.8 Rotační spoj



Obrázek 6.21: Popis kontrolního místa 8

Kontrola tohoto spoje byla provedena na ohyb, stříh a otláčení. Jako výsledný FOSY byl vybrán nejnižší ze získaných FOSY.

$$\sigma_{ohyb} = \frac{5}{4} \cdot \frac{F_{DL}}{2} \cdot \frac{l}{d_3^3} = \frac{5}{4} \cdot \frac{12\,500}{2} \cdot \frac{62}{10^3} = 24,29 \text{ MPa} \quad (6.37)$$

$$FOSY_{ohyb} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{ohyb}} = \frac{640}{24,29} = 2,77 \quad (6.38)$$

Pevnostní kontrola na stříh:

$$\tau = \frac{\frac{F_{DL}}{2}}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{2}} = \frac{\frac{12\,500}{2}}{\frac{\pi \cdot 12,8^2}{2}} = 24,29 \text{ MPa} \quad (6.39)$$

$$FOSY_{stříh} = \frac{\sigma_Y \cdot \alpha}{\tau} = \frac{640 \cdot \sqrt{3}}{24,29} = 15,23 \quad (6.40)$$

Pevnostní kontrola na otláčení:

$$p_{kotva} = \sigma_{kotva} = \frac{\frac{F_{DL}}{2}}{(l - 2 \cdot b) \cdot d} = \frac{\frac{12\,500}{2}}{(62 - 2 \cdot 6) \cdot 12,8} = 9,77 \text{ MPa} \quad (6.41)$$

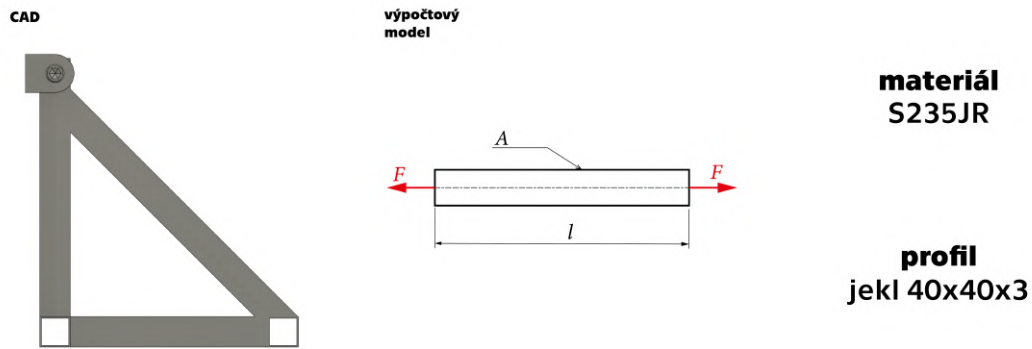
$$FOSY_{ohyb} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{kotva}} = \frac{235}{9,77} = 24,06 \quad (6.42)$$

$$p_{závěs} = \sigma_{závěs} = \frac{\frac{F_{DL}}{2}}{2 \cdot b \cdot d} = \frac{\frac{12\,500}{2}}{2 \cdot 6 \cdot 12,8} = 40,69 \text{ MPa} \quad (6.43)$$

$$FOSY_{závěs} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{závěs}} = \frac{235}{40,69} = 5,78 \quad (6.44)$$

$$FOSY = \min(FOSY_{ohyb}, FOSY_{střih}, FOSY_{kotva}, FOSY_{závěs}) = 2,77 \quad (6.45)$$

6.2.3.9 Prostý tah

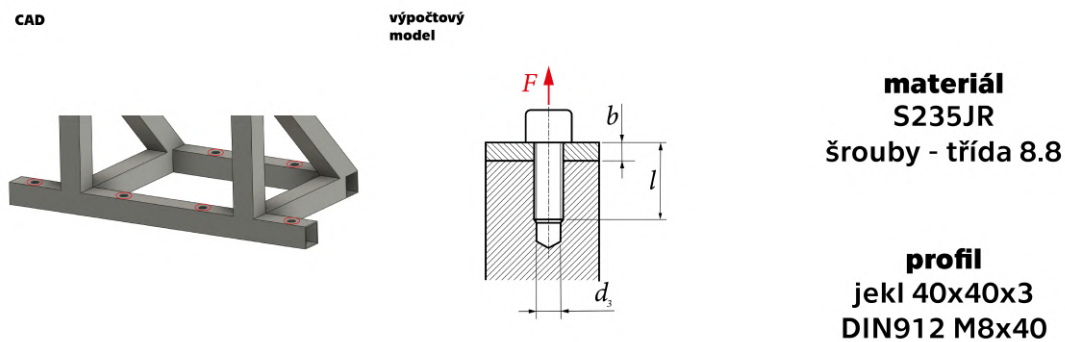


Obrázek 6.22: Popis kontrolního místa 9

$$\sigma_{tah} = \frac{F_{DL}}{2A} = \frac{12\,500}{2 \cdot 444} = 14,08 \text{ MPa} \quad (6.46)$$

$$FOSY_{tah} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{tah}} = \frac{235}{14,08} = 16,69 \quad (6.47)$$

6.2.3.10 Šroubový spoj

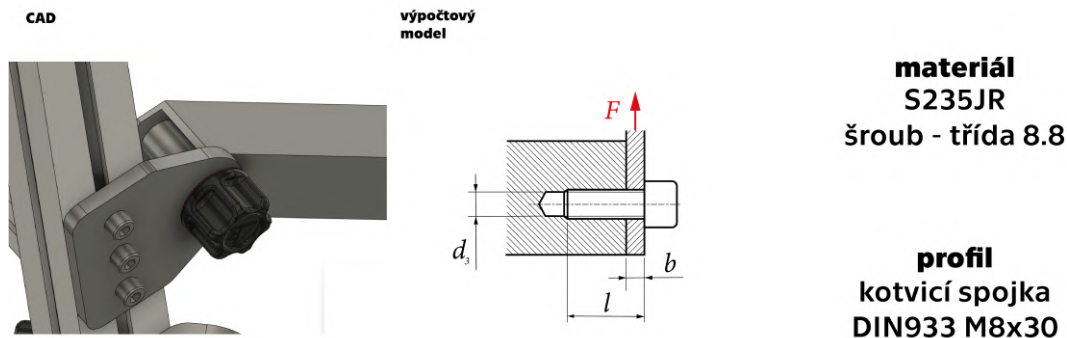


Obrázek 6.23: Popis kontrolního místa 10

$$\sigma_{tah} = \frac{F_{DL}}{6A} = \frac{F_{DL}}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{12\,500}{\frac{\pi \cdot 6,4^2}{4}} = 64,76 \text{ MPa} \quad (6.48)$$

$$FOSY_{\text{tah}} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{\text{tah}}} = \frac{640}{64,76} = 9,88 \quad (6.49)$$

6.2.3.11 Šroubový spoj



Obrázek 6.24: Popis kontrolního místa 11

Na základě prvního obrázku 6.13 bylo určeno zatížení na jednu vzpěru

$$F_{DL_{\text{vzpěra}}} = \frac{\frac{F_{DL} \cdot l}{2}}{\cos(\varphi)} = \frac{\frac{12500 \cdot 1000}{2}}{\cos(45^\circ)} = 5234,9 \text{ N} \quad (6.50)$$

Pevnostní kontrola na stříh:

$$\tau = \frac{F_{DL_{\text{vzpěra}}}}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{2}} = \frac{5235}{\frac{\pi \cdot 6,4^2}{2}} = 81,86 \text{ MPa} \quad (6.51)$$

$$FOSY_{\text{stříh}} = \frac{\sigma_Y \cdot \alpha}{\tau} = \frac{640 \cdot \sqrt{3}}{81,86} = 4,55 \quad (6.52)$$

Pevnostní kontrola na otláčení:

$$p_{\text{vzpěra}} = \sigma_{\text{vzpěra}} = \frac{F_{DL_{\text{vzpěra}}}}{(l - b) \cdot d_3} = \frac{5235}{(30 - 8) \cdot 6,4} = 37,18 \text{ MPa} \quad (6.53)$$

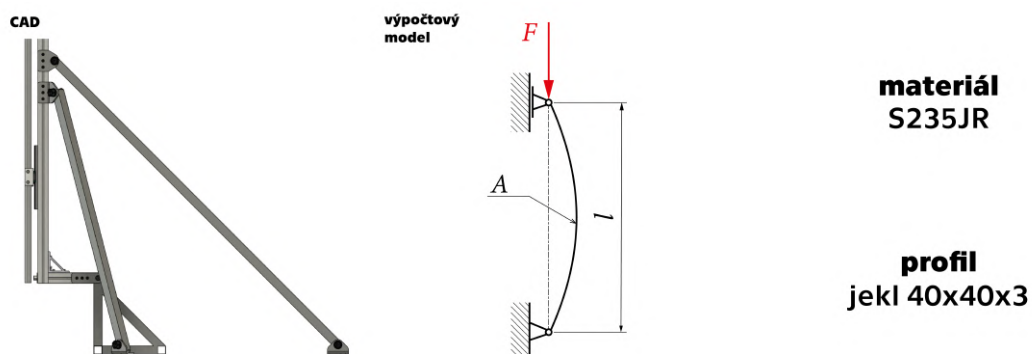
$$FOSY_{\text{vzpěra}} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{\text{vzpěra}}} = \frac{235}{37,18} = 6,32 \quad (6.54)$$

$$p_{\text{kotva}} = \sigma_{\text{kotva}} = \frac{F_{DL_{\text{vzpěra}}}}{b \cdot d_3} = \frac{5235}{8 \cdot 6,4} = 102,24 \text{ MPa} \quad (6.55)$$

$$FOSY_{\text{kotva}} = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{\text{kotva}}} = \frac{235}{102,24} = 2,29 \quad (6.56)$$

$$FOSY = \min(FOSY_{\text{stříh}}, FOSY_{\text{vzpěra}}, FOSY_{\text{kotva}}) = 2,29 \quad (6.57)$$

6.2.3.12 Vzpěr



Obrázek 6.25: Popis kontrolního místa 12

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{l_{red}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 101\,972}{1\,500^2} = 93\,933 \text{ N} \quad (6.58)$$

$$F_{kr} \leq F_{DL_{vzpěra}} \quad (6.59)$$

$$\sigma_{DL_{vzpěra}} = \frac{F_{DL_{vzpěra}}}{A} = \frac{5\,235}{444} = 11,79 \text{ MPa} \quad (6.60)$$

$$FOSY = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{DL_{vzpěra}}} = \frac{235}{11,79} = 19,93 \quad (6.61)$$

7 Pokyny k obsluze

Byly vypracovány pokyny k obsluze vozíku. Pokyny byly sepsány ve formě odškrtačacího seznamu dle zvyklostí interní dokumentace týmu CTU Space Research do dokumentů CL-04-00-00-00-01 a CL-04-00-00-00-02 (přílohy 5 a 6). Pokyny obsažené v tomto dokumentu jsou k nahlédnutí níže. Povolení k obsluze testovacího standu má pouze osoba pověřená šéfinženýrem týmu či vedoucím skupiny Propulsion po zaškolení od dané zodpovědné osoby.

Pokyny pro obsluhu před zahájením testu:

1. Stabilizujte vozík vytažením opěrného kola
2. Vysuňte stabilizační nohy vozíku tak, aby byla ložná plocha vodorovná
3. Uvolněním gumového lana po obvodu vozíku uvolněte a z vozíku odendejte krycí plachtu
4. Uvolněním pojistných šroubů v rozích vozíku uvolněte a z vozíku odendejte konstrukci krycího rámu
5. Odklopte zadní dvířka vozíku a pružnou západkou je zajistěte proti dalšímu pohybu
6. Odšroubováním stavěcích šroubů uvolněte deflektor od ložné plochy vozíku. Deflektor umístěte vedle pravé zadní nápravy vozíku
7. Povolením stavěcích šroubů uvolněte testovací věž
8. Pomocí zadních vzpěr vztyčte testovací věž

9. Pomocí stavěcích šroubů zajistěte zadní vzpěry testovací věže ve svislé pozici vůči pojistným kotvám na ložné ploše vozíku
10. Pomocí bočních vzpěr a stavěcích šroubů zajistěte testovací věž proti bočnímu pohybu
11. Pomocí bočních vzpěr a stavěcích šroubů zajistěte testovací věž proti bočnímu pohybu
12. Sestavte deflektor do testovacího stavu
13. Umístěte deflektor pod motorové lože a zarovnejte jej podle pozičních značek umístěných na testovací aparatuře
14. Zapojte napájecí kabel elektroniky test standu do sítě 230 VAC
15. Připojte semafor k odpalovacímu kufříku
16. Je-li to třeba, propojte testovanou aparaturu s GSE
17. Propojte DAQ shield s počítačem pomocí USB kabelu
18. V programu Arduino IDE spusťte skript "TS_measure.ino"
19. Postupujte podle pokynů vedoucího testu. Záznamu testu odstartujete napsáním "START" do sériového monitoru programu Arduino IDE. Pro ukončení záznamu tamtéž napište "STOP". Po ukončení testu se data automaticky uloží do pracovní složky skriptu

Pokyny pro obsluhu po ukončení testu:

1. Vyčkejte minimálně 10 minut, než bude bezpečné manipulovat s technikou
2. Odpojte napájecí kabel elektroniky test standu od sítě 230 VAC
3. Odpojte USB kabel propojující DAQ shield s počítačem
4. Je-li to třeba, odpojte testovanou aparaturu od GSE

5. Odpojte semafor od odpalovacího kufříku
6. Složte deflektor do převozového stavu
7. Umístěte deflektor za pravou zadní nápravu
8. Uvolněte boční vzpěry testovací věže
9. Odšroubováním stavěcích šroubů uvolněte zadní vzpěry testovací věže od kotev na ložné ploše vozíku
10. Pomocí zadních vzpěr složte testovací věž
11. Pomocí stavěcích šroubů zajistěte testovací věž v převozové pozici
12. Pomocí stavěcích šroubů připevněte deflektor k ložné ploše vozíku
13. Zavřete a zajistěte zadní dvířka vozíku
14. Na vozík umístěte konstrukci krycího rámu a zajistěte ji pojistnými šrouby
15. Na konstrukci rámu umístěte krycí plachtu a zajistěte ji vůči vozíku gumovým lanem
16. Zasuňte stabilizační nohy vozíku
17. Uvolněte vozík zatažením opěrného kola

8 Finanční rozbor

Byl vypracován finanční odhad fáze jedna - konstrukčního řešení předkládaného v této práci. K realizovatelnosti projektu pomáhá sponzoring od společností vůči studentskému týmu, díky kterému se podařilo snížit odhadované náklady na projekt o více než 35 %.

Položka	MJ	Jednotková cena	Celková cena	Sponzoring
Přívěsný vozík	1	33 999,00 Kč	33 999,00 Kč	
Lineární vedení	4	578,00 Kč	2 312,00 Kč	2 312,00 Kč
Spojovací materiál	1	685,00 Kč	685,00 Kč	
Profily KANYA	1	19 925,14 Kč	19 925,14 Kč	10 000,00 Kč
Siloměr	1	12 300,00 Kč	12 300,00 Kč	11 600,00 Kč
Tlakový senzor	5	1 751,74 Kč	8 758,70 Kč	
Teplotní článek	2	288,00 Kč	576,00 Kč	
Jekly	12	106,18 Kč	1 274,16 Kč	
Rozvaděč	1	3 769,00 Kč	3 769,00 Kč	
DAQ systém	1	2 659,00 Kč	2 659,00 Kč	
Lineární aktuátor	2	2 475,00 Kč	4 950,00 Kč	
		Suma	91 208,00 Kč	
		Suma po sponzoringu	67 296,00 Kč	

Tabulka 8.1: Finanční odhad realizace fáze jedna

9 Závěr

Předkládaná práce se zabývá problematikou návrhu testovacího standu pro raketové motory. Problematika nabývá v posledních letech na významu, neboť v průběhu uplynulých tří let vznikly mezi studenty jen v rámci týmu CTU Space Research tři raketové motory kompletně studentského návrhu s dalšími dvěma motory aktuálně ve vývojové fázi.

V rámci této práce byla provedena stručná rešerše stávajícího stavu testovacích standů relevantních velikostí mezi studentskými týmy. Na základě provedeného koncepčního návrhu byl vypracován konstrukční návrh mobilního testovacího standu. Tento návrh byl posléze pevnostně překontrolován výpočty dle ECSS standartů. K testování plánovaných raketových motorů týmu byl vypracován návrh měřícího řetězce. Pro korektní a efektivní využívání testovacího standu byly vypracovány pokyny k jeho obsluze.

Plánovaná realizace řešení vypracovaných v rámci této práce má potenciál významně zefektivnit testování raketových motorů týmu CTU Space Research.

Seznam tabulek

2.1	Přehled požadavků na testovací stand	10
3.1	Přehled testovacích kapacit týmů EuRoC	14
4.1	Parametry planetové převodovky	20
5.1	Přehled vybraných senzorů	24
5.2	Multikriteriální analýza DAQ systému	28
6.1	Přehled rozměrů deflektoru dle NASA KSC-STD-Z-0012B a zvoleného konstrukčního řešení	33
6.2	Přehled výsledků pevnostních kontrol s vypočtenými FOSY	39
8.1	Finanční odhad realizace fáze jedna	52

Seznam obrázků

3.1	Vlevo porovnání záběrů na motorovou sekci Superheavy s infografikou [3], vpravo poškození startovací rampy [4]	11
3.2	Současná testovací aparatura CTU SR [archiv CTU SR]	13
3.3	24 kN Franz [5]	15
3.4	MTS [6]	15
4.1	Subsystémy testovacího stanoviště	16
4.2	Schéma měření	17
4.3	Konceptuální rozložení subsekcí na vozíku	17
4.4	PID schéma testovací aparatury	18
4.5	Model sestavy převodovky + řez převodovkou	19
4.6	Řez modelem tlakové nádoby	21
4.7	Výpočtové schéma šroubového spoje	22
4.8	Pevnostní simulace víčka tlakové nádoby	23
5.1	Schéma měřicího řetězce NI	25
5.2	Přehled zvolených modulů NI [15, úprava autor]	25
5.3	Blokové schéma měřicího řetězce pomocí DAQ shield	27
5.4	DAQ shield - schéma + render	27
6.1	Konceptuální model	29
6.2	Stavěcí šroub	30
6.3	Unitrailer Garden Trailer 264/2 KIPP [16]	31
6.4	Výkres Unitrailer Garden Trailer 264/2 KIPP [16]	31
6.5	Současný stav GSE [archiv CTU SR]	32

6.6	Výpočtové schéma deflektoru [19, úprava autor]	34
6.7	Pohled na model deflektoru + porovnání rozloženého a složeného stavu	34
6.8	Přípojně rozměry motorového lože	35
6.9	Schéma pro dimenzování lineárního vedení [21]	35
6.10	Uložení siloměru v testovací věži	36
6.11	Umístění semaforu na testovací věži	37
6.12	Přehledové schéma předkládaného řešení s umístěným RM Phoenix .	37
6.13	Body kontrolních výpočtů (a) a schéma určení zatížení (b)	38
6.14	Popis kontrolního místa 1	39
6.15	Popis kontrolního místa 2	40
6.16	Popis kontrolního místa 3	41
6.17	Popis kontrolního místa 4	41
6.18	Popis kontrolního místa 5	42
6.19	Popis kontrolního místa 6	43
6.20	Popis kontrolního místa 7	44
6.21	Popis kontrolního místa 8	45
6.22	Popis kontrolního místa 9	46
6.23	Popis kontrolního místa 10	46
6.24	Popis kontrolního místa 11	47
6.25	Popis kontrolního místa 12	48

Literatura

- [1] EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. ECSS-E-ST-10C Rev.1, System engineering general requirements. 2017.
- [2] SUTTON, George P. a BIBLARZ, Oscar. Rocket propulsion elements. Ninth edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2017. ISBN 978-1-118-75365-1.
- [3] Figuring out which boosters failed to ignite. Online. In: Reddit. Dostupné z: https://www.reddit.com/r/spacex/comments/12t04pd/figuring_out_which_boosters_failed_to_ignite3/. [cit. 2024-05-22].
- [4] SpaceX Starship Blasted Hundreds of Tons of Dirt and Concrete. Online. In: Next Big Future. Dostupné z: <https://www.nextbigfuture.com/2023/04/spacex-starship-blasted-hundreds-of-tons-of-dirt-and-concrete-space-spacex-starship.html>. [cit. 2024-05-22].
- [5] 24 knFranz. TU Space Team [online]. [cit. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://spaceteam.at/test-stands/ts03-24kn-franz/?lang=en>
- [6] Mobile Test Stand. RICE ECLIPSE [online]. [cit. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://eclipse.rice.edu/mobile-test-stand>
- [7] Design, Test & Evaluation Guide. European Rocketry Challenge, 2024.
- [8] EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. ECSS-E-ST-32-02C Rev. 1, Structural design and verification of pressurized hardware. 2008.

- [9] EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. ECSS-E-ST-32-10C Rev.2 Corrigendum 1, Structural factors of safety for spaceflight hardware. 2019.
- [10] BOLEK, Alfred a KOCHMAN, Josef. Části strojů. 1. svazek. 5. přeprac. vyd. Česká matice technická, č. spisu 349. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00046-7.
- [11] TIMOŠENKO, Štěpán P. Pružnost a Pevnost, I. díl. 2. vydání. Praha: Technicko-vědecké vydavatelství, 1951.
- [12] TIMOŠENKO, Štěpán P. Pružnost a Pevnost, II. díl. 2. vydání. Praha: Technicko-vědecké vydavatelství, 1951.
- [13] Katalog těsnění. HENNLICH, 2024.
- [14] Rocket Engine Test Systems: Modern architecture to meet rocket test challenges. National Instruments, 2022.
- [15] Aerospace, Defense, and Government Solutions. Online. National Instruments. Dostupné z: <https://www.ni.com/en/solutions/aerospace-defense.html>. [cit. 2024-05-22].
- [16] UNITRAILER PŘÍVĚS GARDEN TRAILER 264/2 KIPP S OPĚRNÝM KOLEČKEM, RÁMEM H-800 A MODROU PLACHTOU. Unitrailer [online]. [cit. 2024-01-23]. Dostupné z: https://unitrailer.cz/product-cze-4570-UNITRAILER-PRIVES-GARDEN-TRAILER-264-2-KIPP-S-OPERNYM-KOLECKEM-RAMEM-H-800-A-MODROU-PLACHTOU.html?query_id=1
- [17] Rozvaděč XtendLan WEH-11U-503060. Online. ASM. Dostupné z: <https://www.asm.cz/cs/197471-rozvadec-xtendlan-weh-11u-503060>. [cit. 2024-05-23].
- [18] Tlaková nádoba AQUA OLA 50l, stojatá. Online. Prodoshop. Dostupné z: <https://www.prodoshop.cz/tlakova-nadoba-aqua-ola-50l-stojata>. [cit. 2024-05-23].

- [19] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. KSC-STD-Z0012B, Flame deflector design. 1990.
- [20] Katalog profilů a příslušenství. KANYA, 2021.
- [21] Lineární vedení. HIWIN, 2021.

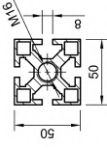
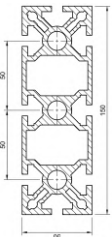
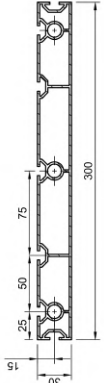
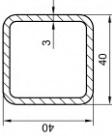
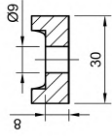
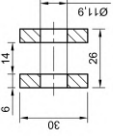
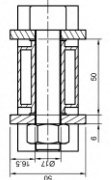
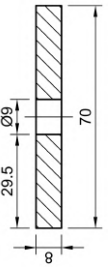
Seznam příloh

- Příloha 1 Přehled použitých materiálů
- Příloha 2 Přehled použitých profilů
- Příloha 3 Přehledové schéma test standu
- Příloha 4 Schéma DAQ Shield
- Příloha 5 Předtestový checklist
- Příloha 6 Potestový checklist
- Příloha 7 PID Daedalus

Příloha 1 - Přehled použitých materiálů

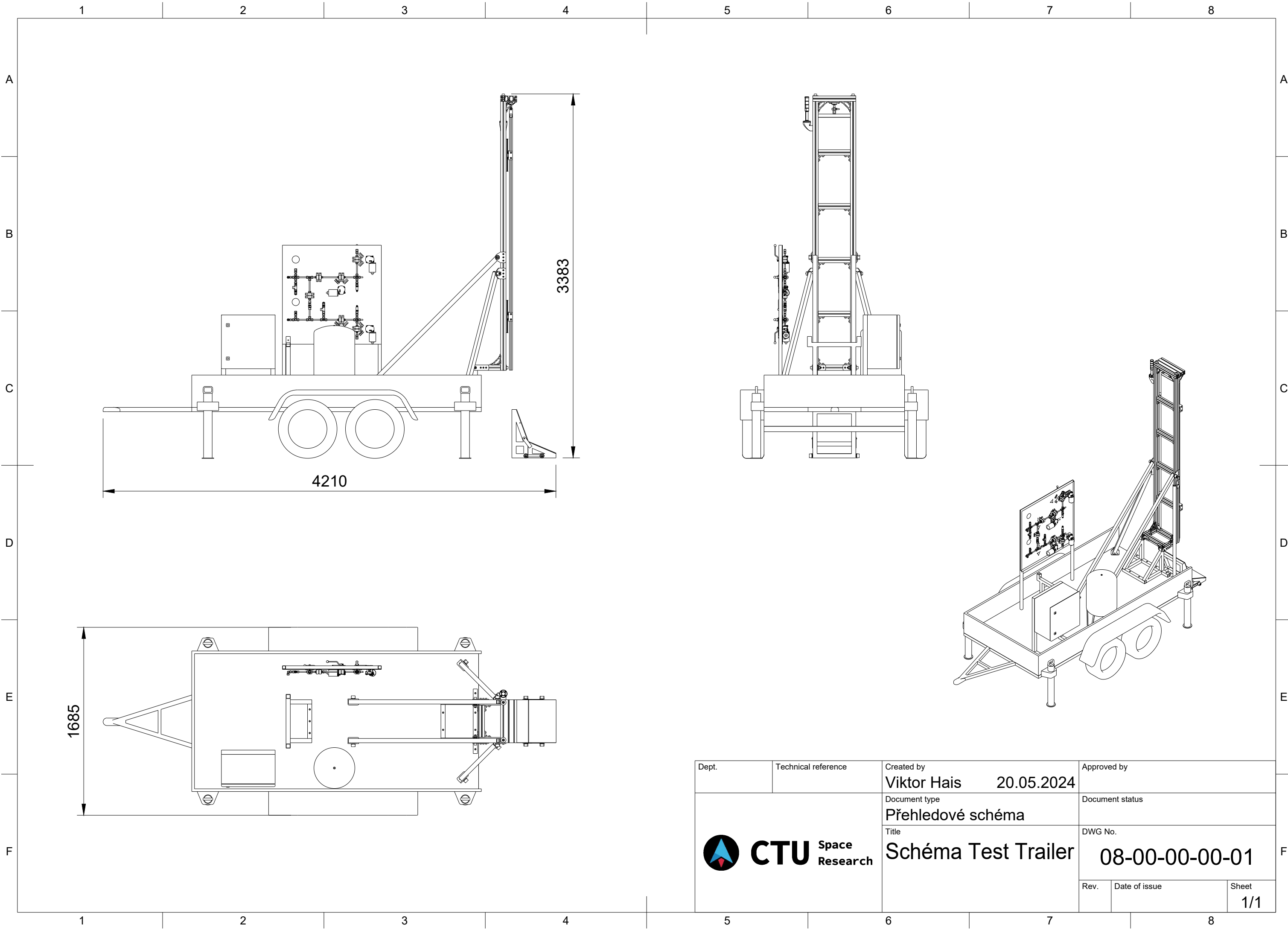
Součást	Materiál	Zpracování	σ_U [MPa]	σ_Y [MPa]	τ_Y [MPa]	E [GPa]
Spojovací prvky	ocel 8.8	třída 8.8	800	640	369,9	210
Spojovací prvky	ocel 10.9	třída 10.9	1000	900	520,2	210
Víko nádrže	EN AW-6060	T6	215	160	92,5	70
Stěna nádrže	EN AW-6082	T6	300	255	147,4	70
Hliníkové profily KANYA	EN AW-6063	T66	245	200	115,6	70
Hliníkové spojky KANYA	EN AW-6060	T66	215	160	92,5	70
Spojovací součásti	EN AW-6060	T6	215	160	92,5	70
Jekly	S235JR		360	235	135,8	210


Příloha 2 - Přehled použitých profilů

Místo	Profil	I_x [mm^4]	I_y [mm^4]	W_x [mm^3]	W_y [mm^3]	A [mm]
	A01-1 (50x50)	208800	208800	83500	83500	855
	MA1-3 (50x150)	6083100	735600	81110	29420	2604
	B03-3	17556400	260600	117040	17300	1874
	Jekl 40x40x3	101972	101972	5098,6	5098,6	444
	A30-41	N/A	N/A	N/A	N/A	168
	horní závěs	N/A	N/A	N/A	N/A	216
	rotační spojka	N/A	N/A	N/A	N/A	392
	kotvicí spojka	N/A	N/A	N/A	N/A	472

Příloha 3 - Přehledové schéma test standu

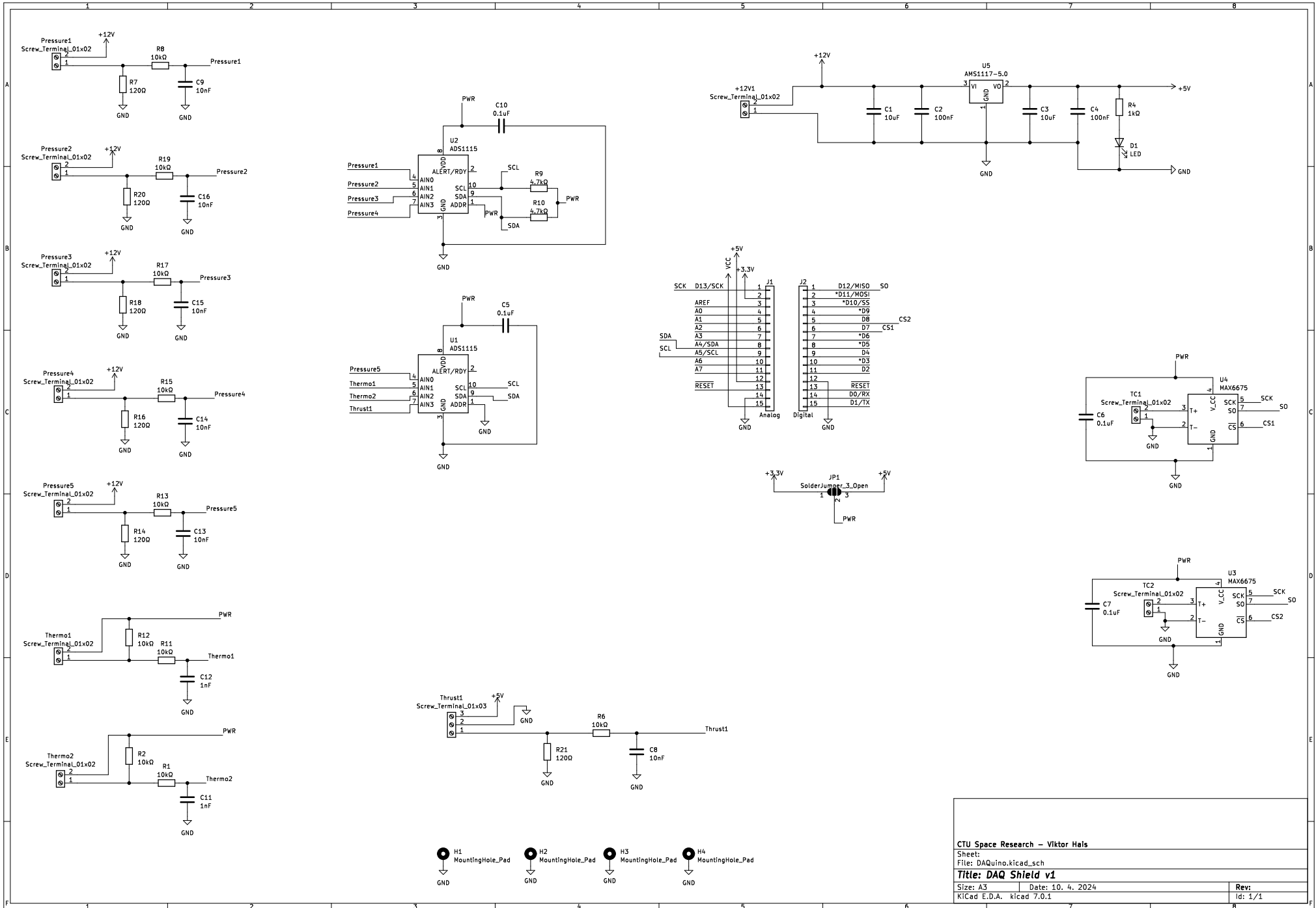
(Příloha je k nahlédnutí na samostatném listu)



Dept.	Technical reference	Created by Viktor Hais 20.05.2024	Approved by
		Document type Přehledové schéma	Document status
		Title Schéma Test Trailer	DWG No. 08-00-00-00-01
		Rev.	Date of issue
		Sheet 1/1	

Příloha 4 - Schéma DAQ Shield

(Příloha je k nahlédnutí na samostatném listu)



CTU Space Research – Viktor Hals
 Sheet:
 File: DAQuino.kicad_sch
Title: DAQ Shield v1
 Size: A3 Date: 10. 4. 2024 Rev:
 KiCad E.D.A. kicad 7.0.1 Id: 1/1

Příloha 5 - Předtestový checklist

(Příloha je k nahlédnutí na samostatném listu)



Test Trailer



Příprava stanoviště - Checklist CL-04-00-00-00-01

Date: _____

Responsible person: _____

#	Item	Check
1.	<u>Stabilizujte vozík vytažením opěrného kola</u>	<input type="checkbox"/>
2.	<u>Vysuňte stabilizační nohy vozíku tak, aby byla ložná plocha vodorovná</u>	<input type="checkbox"/>
3.	<u>Uvolněním gumového lana po obvodu vozíku uvolněte a z vozíku odendejte krycí plachtu</u>	<input type="checkbox"/>
4.	<u>Uvolněním pojistných šroubů v rozích vozíku uvolněte a z vozíku odendejte konstrukci krycího rámu</u>	<input type="checkbox"/>
5.	<u>Odklopte zadní dvířka vozíku a pružnou západkou je zajistěte proti dalšímu pohybu</u>	<input type="checkbox"/>
6.	<u>Odšroubováním stavěcích šroubů uvolněte deflektor od ložné plochy vozíku. Deflektor umístěte vedle pravé zadní nápravy vozíku</u>	<input type="checkbox"/>
7.	<u>Povolením stavěcích šroubů uvolněte testovací věž</u>	<input type="checkbox"/>
8.	<u>Pomocí zadních vzpěr vztyčte testovací věž</u>	<input type="checkbox"/>
9.	<u>Pomocí stavěcích šroubů zajistěte zadní vzpěry testovací věže ve svislé pozici vůči pojistným kotvám na ložné ploše vozíku</u>	<input type="checkbox"/>
10.	<u>Pomocí bočních vzpěr a stavěcích šroubů zajistěte testovací věž proti bočnímu pohybu</u>	<input type="checkbox"/>
11.	<u>Pomocí bočních vzpěr a stavěcích šroubů zajistěte testovací věž proti bočnímu pohybu</u>	<input type="checkbox"/>
12.	<u>Sestavte deflektor do testovacího stavu</u>	<input type="checkbox"/>

-
13. Umístěte deflektor pod motorové lože a zarovnejte jej podle pozičních značek umístěných na testovací aparatuře
 14. Zapojte napájecí kabel elektroniky test standu do sítě 230 VAC
 15. Připojte semafor k odpalovacímu kufříku
 16. Je-li to třeba, propojte testovanou aparaturu s GSE
 17. Propojte DAQ shield s počítačem pomocí USB kabelu
 18. V programu Arduino IDE spusťte skript "TS_measure.ino"
 19. Postupujte podle pokynů vedoucího testu. Záznamu testu odstartujete napsáním "START" do sériového monitoru programu Arduino IDE. Pro ukončení záznamu tamtéž napište "STOP". Po ukončení testu se data automaticky uloží do pracovní složky skriptu

Signature: _____

Příloha 6 - Potestový checklist

(Příloha je k nahlédnutí na samostatném listu)



Test Trailer



Úklid stanoviště - Checklist CL-04-00-00-00-02

Date: _____

Responsible person: _____

#	Item	Check
1.	<u>Vyčkejte minimálně 10 minut, než bude bezpečné manipulovat s technikou</u>	<input type="checkbox"/>
2.	<u>Odpojte napájecí kabel elektroniky test standu od sítě 230 VAC</u>	<input type="checkbox"/>
3.	<u>Odpojte USB kabel propojující DAQ shield s počítačem</u>	<input type="checkbox"/>
4.	<u>Je-li to třeba, odpojte testovanou aparaturu od GSE</u>	<input type="checkbox"/>
5.	<u>Odpojte semafor od odpalovacího kufříku</u>	<input type="checkbox"/>
6.	<u>Složte deflektor do převozového stavu</u>	<input type="checkbox"/>
7.	<u>Umístěte deflektor za pravou zadní nápravu</u>	<input type="checkbox"/>
8.	<u>Uvolněte boční vzpěry testovací věže</u>	<input type="checkbox"/>
9.	<u>Odšroubováním stavěcích šroubů uvolněte zadní vzpěry testovací věže od kotev na ložné ploše vozíku</u>	<input type="checkbox"/>
10.	<u>Pomocí zadních vzpěr složte testovací věž</u>	<input type="checkbox"/>
11.	<u>Pomocí stavěcích šroubů zajistěte testovací věž v převozové pozici</u>	<input type="checkbox"/>
12.	<u>Pomocí stavěcích šroubů připevněte deflektor k ložné ploše vozíku</u>	<input type="checkbox"/>
13.	<u>Zavřete a zajistěte zadní dvířka vozíku</u>	<input type="checkbox"/>
14.	<u>Na vozík umístěte konstrukci krycího rámu a zajistěte ji pojistnými šrouby</u>	<input type="checkbox"/>
15.	<u>Na konstrukci rámu umístěte krycí plachtu a zajistěte ji vůči vozíku gumovým lanem</u>	<input type="checkbox"/>

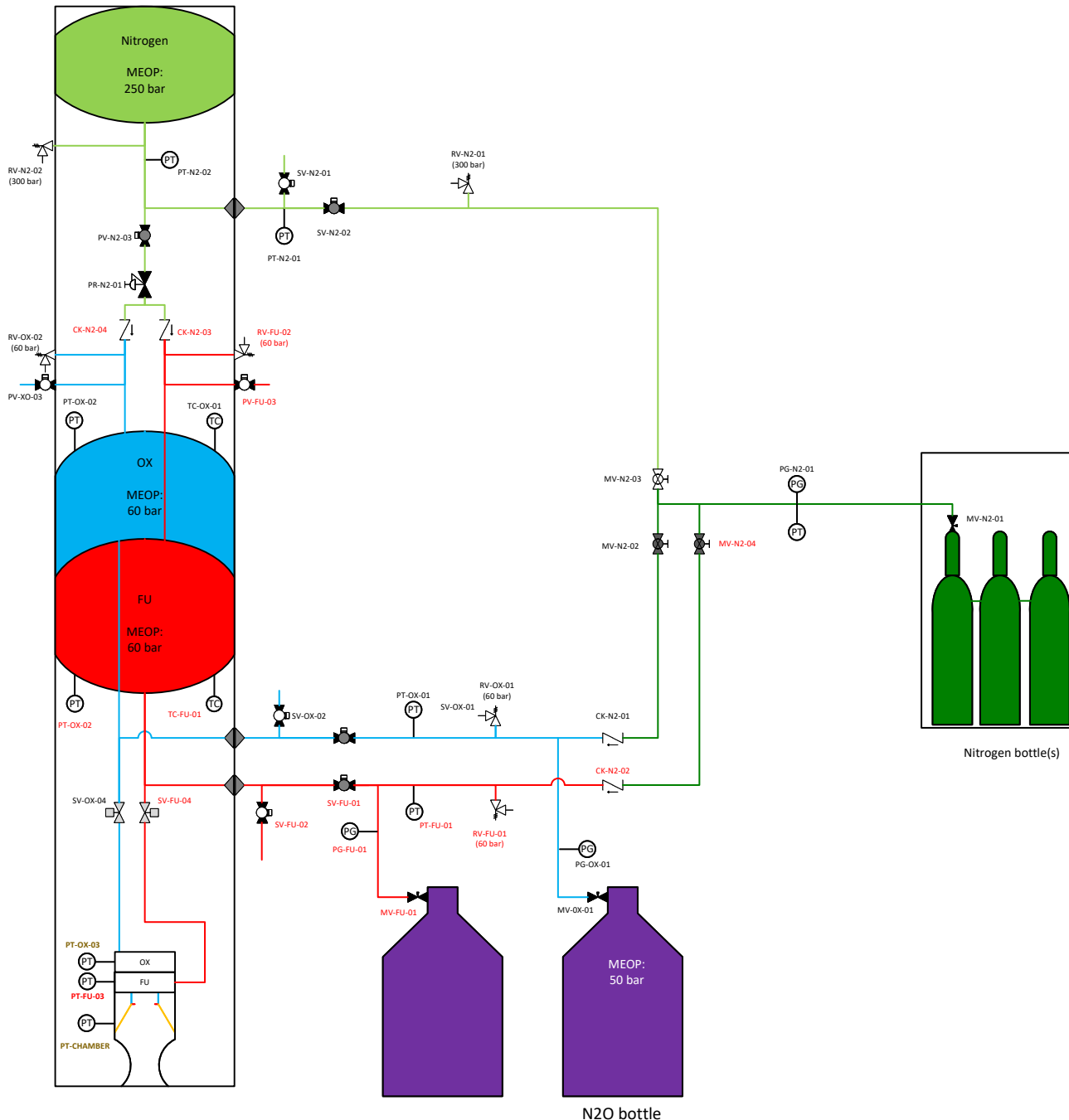
16. Zasuňte stabilizační nohy vozíku

17. Uvolněte vozík zatažením opěrného kola






















Signature: _____


Příloha 7 - PID Daedalus

(Příloha je k nahlédnutí na samostatném listu)



Legend

-  Thermocouple
-  Pressure Transducer
-  Pressure Gauge
-  Manual Ball Valve (NO)
-  Manual Ball Valve (NC)
-  Servo actuated Ball Valve (NO)
-  Servo actuated Ball Valve (NC)
-  Needle/Globe Valve
-  Manual Regulator
-  Solenoid Valve
-  Check Valve
-  Pressure Relief Valve
-  Quick Disconnect
-  Self Closing QD
-  Filter
-  Venturi
-  N2O
-  Fuel
-  Inert Gas (N2)
-  Inert Gas (N2)
-  Inert Liquid (N2)
-  Vent

		TEAM							
		Fluid Systems & Propulsion							
		DOCUMENT TITLE							
		Concept design							
AUTHORS	Daniel Horejsl	SIZE	A1	PARENT	System CAD	DWG NO	-	REV	-
REVIEWER	??	SCALE	??	DATE	25.4.2022	SHEET	1	OF 1	