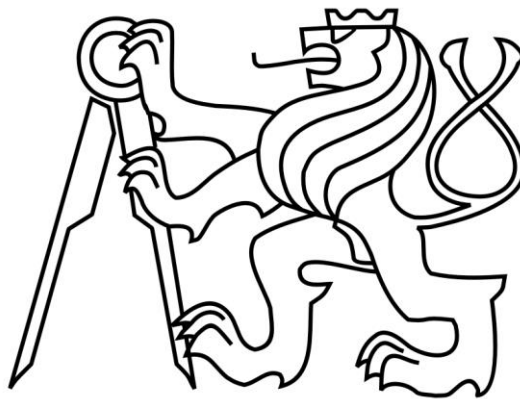


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zařízení pro testování ADCS

Autor: Bc. Karel Pelc

Vedoucí práce: Ing. Jaromír Kučera

Praha, 2021



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pelc** Jméno: **Karel** Osobní číslo: **457519**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zařízení pro testování ADCS

Název diplomové práce anglicky:

ADCS testing equipment

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- Rozbor aktuálně používaných zařízení pro testování ADCS, vysvětlíte principy.
- Vizualizaci zařízení pro testování ADCS, které umožní plyný rotační pohyb kolem všech os.
- Detailní konstrukční návrh takového zařízení a doplňte jej o výrobní podklady, nezbytné informace k realizaci a výběr vhodných komponent.
- Realizujte navržené zařízení, řešte a diskutujte technologické problémy součástí.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

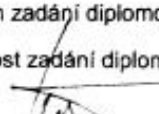
Ing. Jaromír Kučera, ústav letadlové techniky FS


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

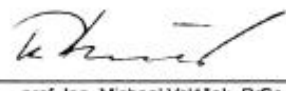
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.06.2021**

Platnost zadání diplomové práce:


Ing. Jaromír Kučera
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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.

29. 4. 2021

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci zpracoval samostatně na základě uvedených zdrojů.

Tato diplomová práce „Zařízení pro testování ADCS“ byla zpracována s použitím důvěrných informací a se souhlasem společnosti Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.

Datum.....

Podpis.....



VÝZKUMNÝ A ZKUŠEBNÍ LETECKÝ ÚSTAV, a. s.

Naše značka
VZLU/2246/2021/SVŘ/TRUN
Vyřizuje
JUDr. Jaroslav Truneček
Telefon / E-mail
tel.: [REDACTED], e-mail: trunecek@vzlu.cz
V Praze dne
23. dubna 2021

Osobně
Bc. Karel Pelc

Věc: Souhlas se zveřejněním diplomové práce

Společnost: **Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.**
se sídlem Beranových 130, 199 05 Praha - Letňany
IČ: 00010669, DIČ: CZ00010669
Zapsaná v OR vedeném MS v Praze pod sp. zn. B 446

tímto dává svolení ke zveřejnění diplomové práce „Konstrukce zařízení pro testování ADCS“, se zpracovanými důvěrnými informacemi, ve znění, jak bylo předloženo dne 29.3.2021 v dokumentu pojmenovaném „pelc_dp_v23“.

Za Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.

Ing. Josef
Kašpar

Digitálně podepsal
Ing. Josef Kašpar
Datum: 2021.04.23
14:03:30 +02'00'

Ing. Josef Kašpar
předseda představenstva a generální ředitel



Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s., Beranových 130, 199 05 Praha-Letňany
OR veden u Měst. soudu v Praze odd. B vl. 446
IČ: 00010669 DIČ: CZ00010669

www.VZLU.cz



Poděkování

Mé poděkování patří společnosti Výzkumný a zkušební letecký ústav a.s. za poskytnutí možnosti zpracování tématu diplomové práce a Ing. Jaromírovi Kučerovi za podmětné rady a konzultace při vedení, které daly pomoci splnění cíle práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá detailním návrhem nového a unikátního zařízení pro testování ADCS a simulaci volného sférického pohybu v prostoru. Z počátku se práce zabývá vysvětlením základních principů ADCS v kontextu s jejich testováním. Dále práce obsahuje rešeršní část, potažmo rozbor aktuálních řešení zařízení, jež se pro testování ADCS v současnosti používají. Zaměření je kladeno na souhrn výhod a nevýhod různých způsobů a principy, které zabezpečují jejich činnost. Hlavní částí je práce věnována komplexnímu vývoji, zmíněného, nového typu zařízení a jeho komponent. Je zde představen detailní postup návrhu a celá řada úskalí, která nastala při jeho vývoji. Samotný konstrukční návrh v práci postupně přechází v část jeho realizace, samotnou výrobu komponent, popis jejího procesu, řešení řady technologických problémů a volbu vhodných alternativ, dokončovacích prací pro samotné zprovoznění zařízení a jeho použitelnou činnost pro svůj zadaný účel.

Abstract

The diploma thesis deals with a detail designing of the new unique device. The device is used for the ADCS testing and free full spherical motion simulation. At the beginning, the work deals with an explanation of the basic principles of the ADCS in the context of ADCS testing. Furthermore, the work consists of a research part, which contains an analysis of current devices solutions which are used for a nanosatellite ADCS testing these days. This part is focused on a summary of advantages and disadvantages of various testing ways. The main part of the work contains the complex development of the new device and itself necessary components. The main part also presents a detail designing process and several pitfalls that occurred during its development. The designing part in the work gradually passes in the part which deals with an implementation, the component manufacturing, realization process description, solving a number of technological problems and suitable alternatives selection for a work finishing to set the equipment into the operation and making the whole device usable for its purpose activities.

Obsah

1	Obecný úvod o ADCS	11
1.1	Funkce ADCS	11
1.2	Části ADCS	11
	Relativní způsob zjištění orientace	11
	Absolutní způsob zjištění orientace	11
1.3	Způsoby řízení orientace a stabilizace	12
1.4	Základní principy řízení orientace a polohy	12
1.4.1	Reakční kola	13
1.4.2	Magnetorquetry	14
2	Pozemní testování ADCS	14
2.1	Obecné provádění testů	14
2.2	Testování ADCS	15
2.2.1	Volné torzní závěsy	15
2.2.2	Plynové sférické standy	16
2.2.3	Rovinný ložiskový stand	17
2.2.4	Kulový ložiskový stand	17
2.2.5	Kapalinový rovinný stand	18
2.2.6	Kardanové suspenze	19
2.2.7	Sférický pohyb na pohyblivých vzduchových ploškách	20
2.2.8	Plynové, plně sférické standy	20
2.2.9	Víceúčelový simulátor volného pohybu	21
2.3	Vývoj ADCS	22
3	Předběžný návrh nového testovací zařízení	22
3.1	Požadavky	22
3.2	Postup návrhu	22
3.3	Předběžný návrh	23
3.3.1	Obecný návrh hlavních částí	23
3.3.2	Úvaha funkcionality	24
3.3.3	Nástin realizace	25
	Technologie PolyJet	25
3.4	Pokročilý předběžný návrh nadnášené koule	25
	Technologie FDM (Fused deposition modeling)	26
	Technologie MJF (MultiJetFusion)	26
3.5	Popis modelu předběžného návrhu	26
3.5.1	Popis konceptu koule	26
3.5.2	Popis konceptu vyvažování	29
3.5.3	Popis konceptu lože	31
4	Detailní konstrukční návrh	32

4.1	Konstrukce koule	32
4.1.1	Zohlednění výrobní technologie	32
4.1.2	Popis konstrukčního řešení vnitřku	36
4.2	Pohyblivé vyvažování	39
4.3	Napájení motorů	43
4.4	Řídící elektronika	43
4.5	Pevné vyvažování	46
4.6	Konstrukce lože	47
4.7	Pneumatický systém	49
4.7.1	Předběžná hmotová rozvaha koule	49
4.7.2	Dimenzování pneumatického systému	50
4.7.3	Volba pneumatických prvků	51
	Kompresorová stanice - Orlik SKS 9-O/100	55
4.8	Shrnutí detailního návrhu	56
5	Realizace nového testovacího zařízení	58
5.1	Tisknuté polokoule	58
5.1.1	Realizace	63
5.1.2	Varianty úpravy výtisků	64
5.1.3	Úpravy výtisků	69
5.2	Sférické lože	70
5.2.1	Realizace pohyblivého vyvažování	73
5.2.2	Realizace elektroniky	74
5.2.3	Realizace pneumatického systému	77
5.2.4	Obecný popis montáže koule	77
5.2.5	Fotodokumentace realizace	81
5.2.6	Finální stav	83
6	Závěr	84
	Seznam zdrojů	85
	Software	88
	Seznam obrázků	89
	Seznam tabulek	90
	Seznam příloh	91

Použité zkratky a jejich význam v této práci

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ADCS	Attitude determination and control system Systém řízení orientace a stabilizace
FDM	Fused deposition modeling
U	Cubesat Unit (100x100x113,5mm)
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolet Ultrafialové záření
LED	Light-Emitting Diode Elektroluminiscenční dioda
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MJF	MultiJet Fusion
PCB	(Elektronická) deska plošných spojů Printed Circuit Board
PA	Polyamid
PET	Polyethylene terephthalate
VZLU	Výzkumný a zkušební letecký ústav, a. s.

1 Obecný úvod o ADCS

1.1 Funkce ADCS

ADCS reprezentuje systém řízení orientace a stabilizace umělých kosmických těles, potažmo družic, sond nebo kosmických lodí. Pro řízení a orientaci polohy umělých kosmických těles existuje celá řada důležitých důvodů, jako ta nejčastější může být uvedena příkladem potřeba zastavení rotace, která byla udělena kosmickému tělesu po vystřelení z vystřelovače nebo uvolnění dispenseru nosiče. Nekontrolovaná rotace umělých kosmických těles může způsobit vážné provozní komplikace jako je například problematická komunikace s pozemní stanicí nebo nežádoucí vysoké odstředivé síly působící na přístroje družice. Dalšími důvody instalace rozličných typů systémů řízení orientace a polohy do umělých kosmických těles bývá požadavek natočit těleso určitým směrem k zájmovému objektu nebo k určité, vybrané, oblasti pro pozorování, snímání, natáčení, měření nebo provádění nejrůznějších experimentů.

Funkce ADCS tedy jsou stabilizace umělého kosmického tělesa, nastavení tělesa do požadované orientace a zjištění aktuální orientace ke zvoleným referenčním bodům. ADCS je schopné tyto úkony provádět navzdory vnějším rušivým momentům sil, které působí na těleso. Rušivé momenty sil mohou být generovány například aerodynamickým odporem zbytkové atmosféry, vlivy nehomogenního gravitačního pole, tlaky dopadajícího kosmického záření nebo magnetickým polem. [39]

1.2 Části ADCS

ADCS se skládá ze dvou hlavních dílců, jež zaměřují vždy na jednu z oblastí ADCS, těmito hlavními oblastmi jsou:

1. Ovládání a řízení orientace
2. Zjištění aktuální orientace

Ovládání řízení orientace je realizováno pomocí akčních členů, tyto členy se od sebe liší vlastními principy funkce, typem konstrukce, technickou náročností i mírou zásahu do ovládání pohybu, co do počtu os nebo rychlosti reakce kosmického tělesa. Pro zjištění aktuální orientace jsou součástí ADCS senzory, které se rozdělují, dle principu, na relativní a absolutní.

Relativní způsob zjištění orientace

První skupina senzorů je schopna orientaci zjistit inkrementálním způsobem ze snímání rotací kolem jednotlivých os kosmického tělesa, jedná se o mechanické jednoosé nebo dvouosé gyroskopy, případně prstencové laserové gyroskopy nebo gyroskopy rezonátorové. Další možností je využití například MEMS akcelerometrů.

Absolutní způsob zjištění orientace

Do druhé skupiny patří snímače, jež plní svoji funkci způsobem, kdy není třeba žádná minulost snímání v průběhu času z kalibrovaného stavu. Jedná se o detekční nebo měřicí sluneční senzory, gyrokompas, rozličné typy sledovačů hvězd a detektory horizontů. [39][1]

1.3 Způsoby řízení orientace a stabilizace

Pro řízení orientace a stabilizace umělých kosmických těles se uplatňuje celá řada různých řešení. Základní rozdělení reprezentuje skupina aktivních a pasivních akčních členů.

Mezi jednodušší realizované řešení patří pasivní akční členy, které mohou být použity pouze pro stabilizaci samotnou nebo tlumení nekontrolované rotace, nikoli pro natočení dle požadované orientace. Mezi pasivní akční členy patří magnetická stabilizace a tlumiče s yo-yo efektem nebo tlumiče magnetické, viskozní, případně stabilizace pomocí gravitačního gradientu.

Aktivní způsoby řízení orientace a stabilizace zahrnují řízení pomocí reakčních kol, momentových kol, gyroskopy, magnetotorquery a různé typy menších reakčních pohonů.

V konstruovaném zařízení ve staťové části práce se uvažuje testování zejména řízení pomocí reakčních kol a magnetotorquerů, tyto principy jsou rozebrány v následujících rešeršních podkapitolách. [39]

1.4 Základní principy řízení orientace a polohy

Pro řízení orientace družice, potažmo testovací ADCS aparatury, je nutné zabezpečit generování momentu, vytvoření časové změny momentu hybnosti. Vyvolaná reakce z principu zachování hybnosti zabezpečí rotaci kolem příslušných os s počátkem v těžišti tělesa. Moment působící v tomto případě je daný z druhé impulsové věty.

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

Pro tuhé těleso s konstantním tensorem setrvačnosti \vec{I} platí obecná rovnice rotačního pohybu.

$$\vec{M} = \vec{I} \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

$d\vec{\omega}/dt$ je časová derivace vektoru úhlových rychlostí, popisující změnu orientace družic kolem jednotlivých os v čase. Moment teoreticky odpovídá dané reakci akčního členu a zároveň aktuální silové dvojici, jež v daný okamžik působí.

$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r}$$

Pro názorný popis principu mějme Eulerovy rovnice na popis rotačního pohybu tuhých těles v prostoru. Souřadnicový systém má počátek v těžišti, osy systému jsou uvažovány paralelně s osami setrvačnosti.

$$\vec{M} = \vec{I} \vec{\alpha} + \vec{\omega} \times (\vec{I} \vec{\omega})$$

$$M_1 = I_1 \frac{d\omega_1}{dt} + (I_3 - I_2)\omega_2\omega_3$$

$$M_2 = I_2 \frac{d\omega_2}{dt} + (I_1 - I_3)\omega_3\omega_1$$

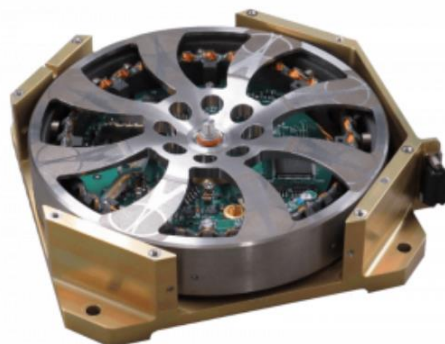
$$M_3 = I_3 \frac{d\omega_3}{dt} + (I_2 - I_1)\omega_1\omega_2$$

Takto rozepsaná pohybová rovnice pro referenční roviny souřadného systému popisuje aplikované momenty rotačního pohybu dle jednotlivých os v závislosti na časové derivaci. Rovnice určují momenty, výstupy akčních členů, pro konkrétní pohyb družice nebo testovací aparatury. Rozepsané rovnice podle jednotlivých os jsou stále obrazem původní rovnice výše, toto vyjádření popisuje názorněji, jakým způsobem dochází mezi osami ke změnám a vzájemnému přetékání momentů, které působí při daném pohybu. Pro ovládání rotačního pohybu nebo stabilizace orientace tělesa je třeba jednotlivé momenty kompenzovat účinky akčních členů. Testovací zařízení ADCS tak musí zabezpečovat podmínky volného rotačního pohybu. Následuje popis potenciálně používaných akčních členů v rámci uvažovaného testování v konstruovaném zařízení. [37] [38] [42]

1.4.1 Reakční kola

Řízení orientace pomocí reakčních kol využívají rychle rotujících setrvačnicků, jež jsou umístěny ve všech třech osách. Tyto setrvačnický jsou pomocí náboje spojeny s elektromotorem. Lože motoru je pevně spojeno s konstrukcí družice. Otáčení a změny orientace družice je dosaženo principem zachování hybnosti, při změně rychlosti otáčení setrvačnicku. Reakční kola družici, potažmo umělé kosmické těleso, otáčí kolem daného těžiště. Samotné setrvačnický jsou konstrukčně řešeny tak, aby jejich parametry vykazovaly co nejvyšší moment setrvačnosti a zároveň nebyla příliš velká pro bezproblémové zakomponování do stísněných prostor družice, hmota setrvačnicku tak bývá soustředěna na obvod do blízkosti maximálního radiusu setrvačnicku.

Reakční kola bývají často doplněna například magnetotoquery pro obejití problémů se saturací setrvačnicků. [1] [2]

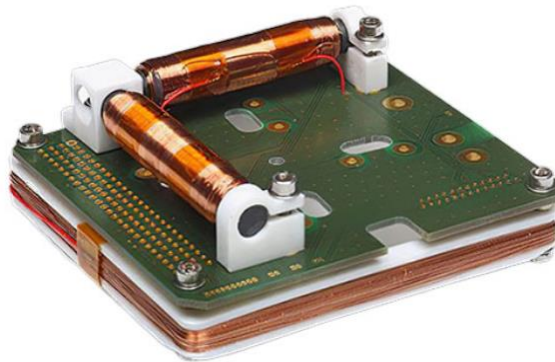


Obrázek 1 – Realizované reakční kolo [2]

1.4.2 Magnetorquetry

Jedná se o elektromagnety uspořádané pro poskytnutí rotačně asymetrického, anizotropního, magnetického pole. Toto pole je řízeno proudem procházejícím cívkami. Při určitém proudu se mají magnetorquetry sesouhlasit s magnetickým polem země v důsledku magnetických sil, které působí na okolní magnetické pole generující reakční moment. Moment je přenesen na družici, protože magnetorquetry jsou pevně spojeny s konstrukcí družice, která se tak udává do otáčivého pohybu kolem daného těžiště.

Konstrukčně se magnetorquetry dělí na momentové tyče, momentové vestavěné cívky a cívky se vzduchovým jádrem. Nejefektivnější řešení je v podobě rozměrné momentové tyče, vodivý drát je namotaný kolem feromagnetického jádra, které je magnetizováno cívkou. Vzniklý magnetický dipól je v tomto řešení nejsilnější z uvedených konstrukčních variant. Magnetorquetry bývají použity v sestavě tří navzájem kolmých, podobně jako v případě reakčních kol. V případě magnetotorquerů je využito sestavy tří pro možnou kompenzaci asymetrických vlivů jednotlivých magnetotorquerů. [3][4]



Obrázek 2 – PCB s Magnetotorquery [3]

2 Pozemní testování ADCS

2.1 Obecné provádění testů

ADCS je sofistikovaný systém, který vyžaduje ověřovací testování, aby prokázal svou funkčnost a ověřil kompatibilitu softwaru s hardwarem a dalšími subsystemy. Postupy jsou široce používány pro rozměrnější družice, ale hlavní částí této práce uvažované, testování nanodružic přichází s mnoha obtížemi. Přestože lze každý prvek systému individuálně ověřit před provedením letu prostřednictvím testů, pouze provoz v kosmickém prostředí spolehlivě ukazuje, zda všechny součásti spolupracují správně. [36]

Jak je výše uvedeno, správná funkce ADCS je důležitou součástí aktivního života družice a plnění cíle mise. Testování tohoto systému může sloužit, mimo jiné, při vývoji konstrukce hardwaru i softwaru celého systému, vylepšování jeho stávající funkce,

analýze činnosti a způsobilosti chodu. Pro požadované provádění ADCS testů je nezbytné zajistit podmínky, které budou efektivním způsobem simulovat okolnosti, v jakých bude dané ADCS působit.

2.2 Testování ADCS

V současné době není mnoho testovacích zařízení optimálních pro pozemní testování ADCS nanodružic. Tato zkušební zařízení mají díky velikostem nanodružic mnoho specifík. Běžná zkušební zařízení nejsou pro testování ADCS nanodružic použitelná, příliš vysoké rušivé momenty není možné jednoduchou cestou zmenšit a uzpůsobit pro malé rozměry akčních členů. Dalším problémem bývá přesnost měření zařízení samotného. K simulaci volných pohybů testovaných družic je možné využívat volných torzních závěsů, vzduchových sférických standů, kapalinových rovinných standů, kardanových suspenzí nebo kulových vzduchových ložisek, jejichž konstrukce jsou ve schématických podobách k dispozici.

Pro správný průběh testování by měla být přesnost zkušebního zařízení v souladu s přesností řídicího systému, schopnostmi jeho akčních členů a velikostí rušivých momentů na družici působících, případně je vhodné dané odchylky při testování rafinovanými způsoby kompenzovat.

Práce je zaměřena na testování ADCS nanodružic - CubeSatů, pro který je v praktické části navržen rozměrově adekvátní zkušební stand. [36]

2.2.1 Volné torzní závěsy

Jsou konstrukčně nejjednodušší a nejlevnější řešeními, je možné efektivní testování rotace kolem jedné osy s relativně malým mechanickým odporem, který je závislý na typu uložení lanka, jeho typu, tloušťce a torzi.

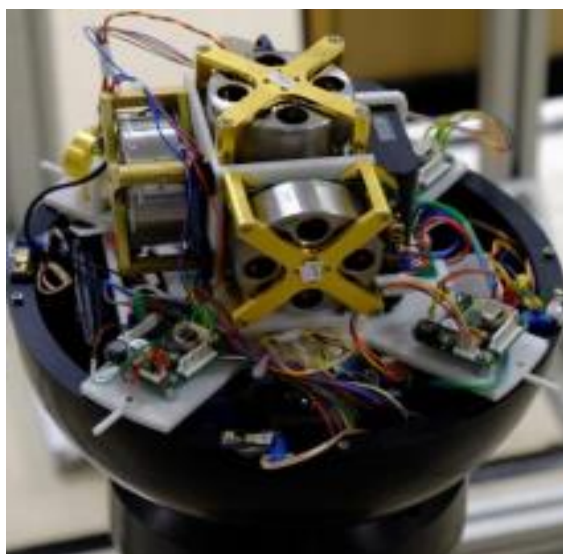
ADCS prvek je uložen v testovací aparatuře. Tato testovací aparatura je zavěšena nad svým těžištěm tenkým torzním, například silonovým, lankem. Samotné zavěšení aparatury je tak vysoko, jak situace prakticky umožňuje. Na obrázku je zachyceno testování experimentálního reakčního kola, které je umístěné ve svislé ose těžiště 3D tištěné konstrukce 1U CubeSatu.



Obrázek 3 – Torzní závěs [5]

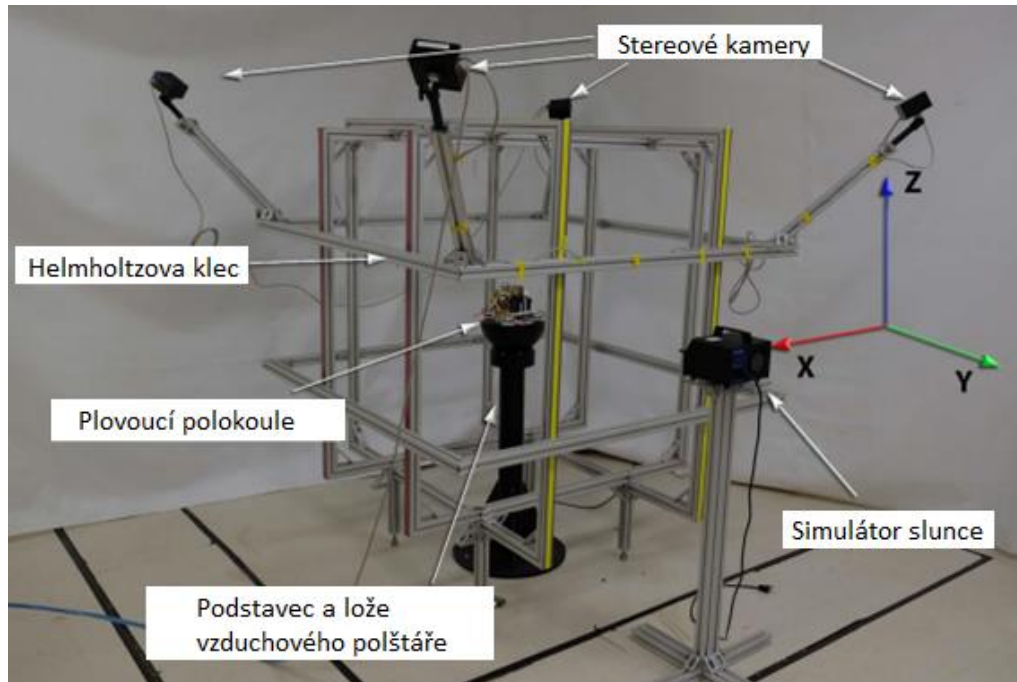
2.2.2 Plynové sférické standy

Toto konstrukčně náročnější řešení je časté při experimentech v Helmholtzově kleci, umožňuje simulaci volného prostorového pohybu, kolem dvou os však není možná plná rotace o 360°. Stand se skládá z vysoké podpůrné nohy, která má na své vrchní části konvexní sférickou plochu, jež tvoří lože zařízení. Pracovní stůl zařízení má svoji podstavu řešenou jako sférickou plochu, která je částí usazena ve sférickém loži. Volný pohyb je realizován stabilním nadnášením stolu, polosféry, na vzduchovém polštáři. Při přípravě pro testování je nutné řešit optimální vyvážení nadnášené polosféry. Rušivé momenty jsou na tomto zařízení generovány, mimo jiné, vlivem odtrhávajících se vírů vzduchu od lože.



Obrázek 4 – Polokoule na vzduchovém polštáři [6]

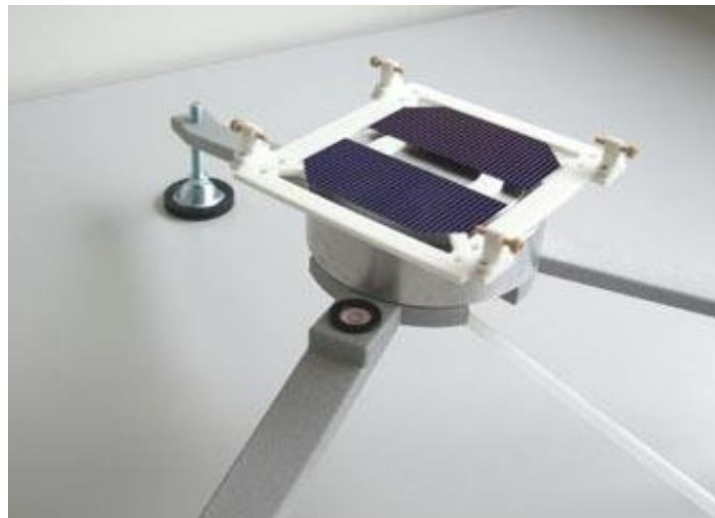
Na obrázku 4 je příklad použití takového typu zařízení. V tomto případě experimenty probíhají v Helmholtzově kleci. Klec je zkonstruována, stejně jako zkušební stand, obecně, z nemagnetických materiálů. Na obrázku 5 je konstrukce klece řešena z hliníkových profilů, ve vnitřku těchto strukturálních prvků prochází měděné vodiče, pokud jimi protéká určitý proud, vytvoří magnetické pole, které dokáže věrně simulovat magnetické pole země na příslušných oběžných drahách nebo vytvořit jiné žádoucí podmínky pro experiment. V případě na obrázku 5 experiment probíhá za účelem ověření správné činnosti a dalšího vývoje magnetometrů a magnetotorquerů. Tyto zkoušené komponenty jsou součástí měřicí aparatury nebo samotné nanodružice, která je upnuta na pracovní ploše testovacího stolu plynového sférického standu. Součástí experimentu je simulátor slunce pro ověření součinnosti systému a využití slunečních detektorů. Pohyby pracovního stolu mohou být detailně analyzovány s pomocí stereového kamerového systému. Účel takovýchto pokusů může být například ověření již navrženého, sběr dat pro další vývoj, kontrola součinnosti navrženého softwaru i hardwaru všech zmíněných komponent ADCS, testování přesnosti, rychlostí odezev na zadané příkazy atp. [6] [7] [45]



Obrázek 5 – Testování ADCS [6]-upraveno

2.2.3 Rovinný ložiskový stand

Klíčová komponenta rovinného ložiskového standu je vzduchové ložisko, které umožňuje volné otáčení kolem jedné osy. Přesné ložisko s velmi tenkým vzduchovým polštářem vykazuje, ve srovnání s torzním závěsem, stabilní a nižší parametry rušivých momentů, jež jsou přidány samotným testovacím standem. [9]



Obrázek 6 – Rovinný ložiskový stand [9]

2.2.4 Kulový ložiskový stand

Kulový ložiskový stand je konstrukční obdobou plynových sférických standů. Pracuje tedy na principu nesení testovací ADCS aparatury pomocí vzduchového polštáře. S tímto typem je možné dosáhnout stálejších a menších nežádoucích odporů jako u

sférických standů. Samotné vzduchové ložisko může mít zaručenou tloušťku vzduchového polštáře, částečně sférický plynový stand nikoli. Aby mohlo být těchto výhod plně využito je nutné celé zařízení přesně kalibrovat, vyvážit, upnutí testovací aparatury nebo nanodružice může být s tímto typem standu obtížnější. Kulový ložiskový stand umožňuje volné otáčení kolem tří os, kolem dvou však opět se značnými omezeními. [10]



Obrázek 7 – Kulový ložiskový stand [10]

2.2.5 Kapalinový rovinný stand

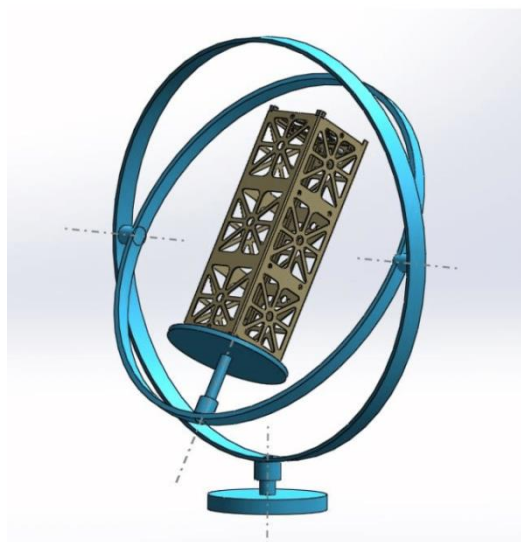
Jedná se o jednoduché improvizované řešení, umožňuje rotaci pouze kolem jedné osy. Skládá se ze dvou vložených nádob, přičemž jedna je naplněna kapalinou s nízkou viskozitou, na níž je volně ložena nádoba s ADCS aparaturou. Stand na obrázku 8 byl využit při testování v Helmholtzově kleci. [11]



Obrázek 8 – Kapalinový rovinný stand [11]

2.2.6 Kardanové suspenze

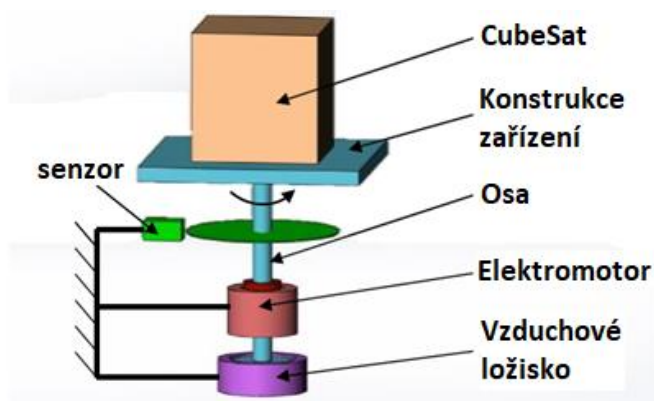
Jedná se o spojení kardanových mechanismů pomocí vzduchových ložisek umožňující simulaci volného pohybu kolem všech os v prostoru. Řešení je konstrukčně náročné, obsahuje mnoho pohyblivých částí, které musí být navzájem synchronizované. Konstrukce se sestává ze tří prstenců, které jsou vzájemně spojeny vzduchovými ložisky pro bezkontaktní rotační pohyb. [8]



Obrázek 9 – Kardanová suspenze [8]

Momenty setrvačnosti prstenců mechanismu jsou vzhledem k momentům setrvačnosti zkoušené družice nebo aparatury značné a nelze je zanedbávat, jejich vliv je tak hlavní důvod pro aktivní kompenzaci a řízení parazitních momentů testovacího zařízení.

Princip aktivní kompenzace momentů je založen na principu snímání úhlového zrychlení nebo úhlové polohy a zpětnovazebně řízených elektromotorů. Sensory detekují úhlovou polohu nebo zrychlení každé rotační osy zařízení, měření probíhá na discích o vhodných průměrech, které jsou součástí os. Elektromotory zpětnovazebně udělují požadované zrychlení pro dané osy, které jsou potřebné pro kompenzaci momentů. Na obrázku 11 je znázornění principu aktivní kompenzace momentu jedné osy zařízení. [13] [8] [36]

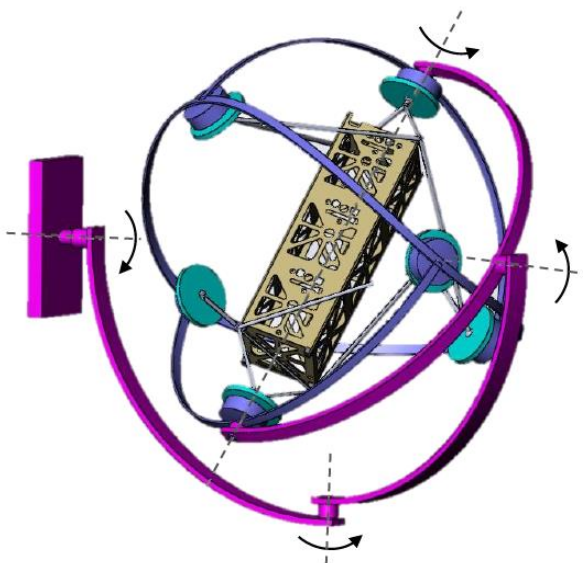


Obrázek 10 – Princip aktivní kompenzace parazitních momentů zařízení [36] - upraveno

2.2.7 Sférický pohyb na pohyblivých vzduchových ploškách

Koncept tohoto zařízení pracuje na principu vzduchového nadnášení družice nebo ADCS aparatury, která je opatřena tenkými pruty s kuličkami. Tomuto pohyblivému celku je umožněn plně volný sférický pohyb, je nicméně nezbytné optickými senzory monitorovat jeho okamžitou orientaci i polohu a aktivně přizpůsobovat polohu natočení vnějších rámů se vzduchovými ploškami, které nadnáší kuličky spojené s pruty.

Z uvedených zařízení testování ADCS je toto konstrukčně zřejmě nejnáročnější. Toto zařízení (pravděpodobně) nebylo v současnosti realizováno, pro správnou činnost je nezbytný vývoj složitého softwaru pro synchronizaci poloh vzduchových plošek. [36]



Obrázek 11 – Využití menších vzduchových plošek pro plný sférický pohyb [36]

2.2.8 Plynové, plně sférické standy

Využívají vzduchového polštáře pro nadnášení sférického tělesa, ve kterém je umístěna testovaná ADCS aparatura. Jedná se o konstrukčně náročné a technologicky velmi náročné řešení. Simulace umožňuje realistickou simulaci volnosti pohybu na oběžné dráze za předpokladu správného vyvážení. Pohyb je neomezený sférický, rotační kolem tří os.

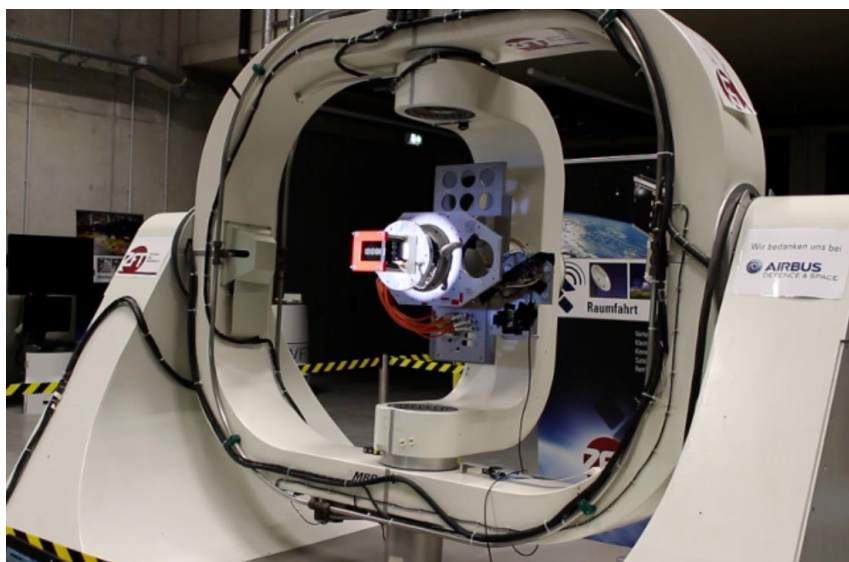
Toto zařízení se pravděpodobně vykazuje možností dosažení nižších parazitních momentů nežli výše uvedená půlsférická varianta. Je nicméně nezbytné řešit vyvažování vnitřní části s ADCS aparaturou a snímání její polohy a orientace ve vnitřku zařízení. [36] [12]



Obrázek 12 – Plynový, plně sférický stand [12]

2.2.9 Víceúčelové simulátory volného pohybu

Jedná se o zařízení, jež se kromě testování ADCS využívá v automobilovém průmyslu i obecném strojírenství. Skládá se ze dvou soustav vysoce přesných pohonů umožňující rotační pohyb kolem všech os. Součástí zařízení jsou i prvky pro testování senzorů ADCS, například simulátor slunce. Veškeré parazitní momenty jsou navíc aktivně řízeny. Principiálně se jedná o pokročilou formu již zmíněného zařízení, kardanové suspenze v kombinaci s kompenzačními prvky pro parazitní momenty. [46][36]



Obrázek 13 – Víceúčelový simulátor volného pohybu [46]

2.3 Vývoj ADCS

Systémy ADCS vyvíjí paralelně více společností po celém světě, pouze několik společností však nabízí k prodeji instalovatelné ADCS pro družice, například typu CubeSat. Ve všech případech těchto systémů v kontextu nanodružic, která jsou k dostání, obvykle platí, že cena samotného přesného ADCS pro řízení orientace ve všech osách je plně srovnatelná s celým zbytkem vyvíjené družice i s jejím startem na oběžnou dráhu.

Mimo jiné, v tomto důsledku jsou ve společnosti Výzkumný a zkušební ústav, a.s. vyvíjeny nová ADCS, pro jejichž testování a pomoc v dalším vývoji může být využito zkušební zařízení navržené v praktické části této práce.

3 Předběžný návrh nového testovacího zařízení

3.1 Požadavky

Nové zařízení má být určeno pro testování ADCS nanodružic, CubeSatů a simulaci volného a neomezeného pohybu kolem všech tří os s použitím vzduchového polštáře. Plného sférického pohybu jsou dle rešeršní části schopné pouze plynové plně sférické standy, kardanová suspenze a její obdoba se vzduchovými ploškami. Ke konkrétním fungujícím zařízením je k dostání pouze málo rešeršních informací. Známa řešení, která fungují na podobném principu, jako například plynové částečně sférické standy, mají rotační pohyb například kolem dvou os omezený.

Pro konstrukci mají být využity nemagnetické dílce. Do vnitřku pohyblivé části zařízení má být možnost upnout CubeSat konstrukci nebo samostatnou měřicí aparaturu osazenou ADCS a příslušnou elektronikou. Požadavky na nové testovací zařízení je možné shrnout do bodů:

- Zařízení má simulovat neomezený rotační pohyb kolem tří os
- V zařízení má být možnost pohodlného umístění 2U CubeSatu nebo rozměrově ekvivalentní testovací aparatury
- Má být proveden detailní konstrukční návrh s technickou dokumentací, zabezpečením výroby, kompletní realizací, montáží, zprovozněním a základními mechanickými zkouškami funkcionality

[34]

3.2 Postup návrhu

Návrh vždy postupoval vytvořením předběžných konstrukčních variant řešení, jejich konzultací a posléze možnými úpravami, vylepšeními a optimalizací pro výrobu. Po vyřešení principů a základních konstrukčních kontur návrh pokračoval zpracováním postupně většího množství detailů zařízení.

Po dokončení návrhu bylo přistoupeno k předběžné realizaci na základě zpracované výrobní dokumentace a podkladů, konzultací s výrobou a jejími možnostmi. V této fázi se objevila řada technologických problémů, které si vyžádaly mnohé konstrukční úpravy a vracely tak již hotové řešení zpět k návrhu.

Následně jsou uvedeny základní koncepce řešení a předběžná konstrukční idea.

3.3 Předběžný návrh

Princip zařízení spočívá v nadnášení pohyblivého tělesa, kterému je umožněn neomezený sférický pohyb.

V předběžném návrhu bylo nadnášené těleso průhledná koule v níž byl umístěn velikostí až 2U CubeSat (nebo rozměrově vyhovující aparatura), tedy nanodružice, která má standardizované vnější rozměry pro umístění do nosné rakety pomocí unifikovaného vystřelovače.

Tato koncepce družic otevírá snazší a rychlejší možnosti vývoje malých technologických družic, které se používají pro testování nových technologií na oběžné dráze i nejrůznějším komerčním a studentským účelům. Další výhodou je například v množství již existujících kvalifikovaných komponent, kterými je možné družici osadit, bez nutnosti vybrané komponenty vyvíjet vlastní. [14][35]



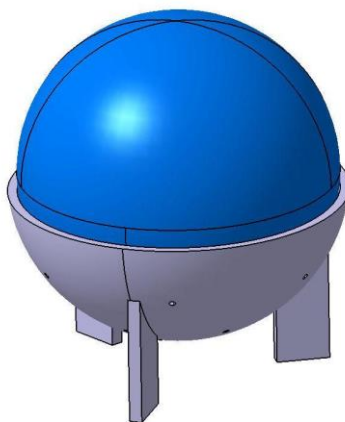
Obrázek 13 – Konstrukce 2U CubeSatu [14] Obrázek 14 – Vystřelovač 2U CubeSatu [15]

Zajištění možnosti rychlého upnutí samotného CubeSatu nebo testované ADCS aparatury s ekvivaletními rozměry se tak jeví jako perspektivní rozhodnutí. Rozměry dle CubeSat standardu jsou pro 2U variantu 100x100x227 mm. [35]

3.3.1 Obecný návrh hlavních částí

Nadnášené těleso je zvolená koule o vnějším sférickém průměru 300 mm s tloušťkou stěny 3 mm. Vzniklý vnitřní pracovní prostor se tak předpokládá dostatečný pro relativně pohodlné umístění až 2U CubeSatu nebo jeho rozměrového ekvivalentu.

Tato koule s uloženou ADCS aparaturou uvnitř je dle předběžného návrhu položena do sférického lože. Sférický průměr lože je zvolen 302 mm, předpokládaná teoretická tloušťka vzduchového polštáře je tedy uvažována 1 mm.



Obrázek 15 – Vizualizace konceptního návrhu nového testovacího zařízení [S1]

3.3.2 Úvaha funkcionality

Hlavním principem zařízení je tedy simulace volného pohybu za pomoci nadnášení koule ve sférickém loži na tenkém vzduchovém polštáři. Použití vzduchového polštáře pro generování vztaku a nesení koule ve sférickém loži poskytuje výhodu relativně malého odporu pohybu, kouli s aparaturou tak je umožněna nelimitovaná možnost pohybu po celé sféře.

Nadnášená koule o sférickém průměru se, ve vizualizaci, skládá ze dvou částí, dělicí rovina rozděluje kouli na dvě stejně velké součásti, polokoule jsou sešroubovány k sobě po montáži veškerých vnitřních náležitostí.

Předpokládalo se, že kouli bude nezbytné pro správný průběh testů vyvážit. Příliš velké nuance v rozložení hmotnosti, ať už způsobené samotným konstrukčním řešením koule nebo umístěním ADCS aparatury do vnitřku mohou způsobit, že koule na vzduchovém polštáři upadne do mrtvé polohy, tedy do takové situace, kdy by se neadekvátně velké množství hmoty ocitlo na samém dně nuceně orientované koule, což by vedlo k vytvoření nepřekonatelných parazitujících momentů a zařízení by tak nebylo pro provádění experimentů nadále jakkoli použitelné.

Aby tato situace nenastala, tak se v návrhu koule počítá s vhodně uzpůsobenou konstrukcí, možností jejího vyvažování a tím i možností ovlivňování rušivých momentů.

Byly uvažovány dva způsoby vyvažování:

- Vyvažování pevné - Závaží jsou umístěna na vhodná, experimentálně určená, místa ve vnitřku koule před začátkem experimentu. Dle předpokladů i toto předběžné vybalancování eliminuje možnost upadnutí koule do mrtvé polohy.
- Vyvažování pohyblivé - Pro tento, druhý, způsob vyvažování jsou uvažovány elektromotory, které pohybují závažími do optimálních poloh pro zlepšení funkce a další snížení parazitujících momentů působících v průběhu experimentů na kouli. Tyto motory mají být ovládané z vnějšku koule a nabízí tak možnost ovládání pro doladění i v průběhu testů.

3.3.3 Nástin realizace

Nadnášená koule měla být v tomto návrhu průhledná, pro tento fakt přicházela předběžně v úvahu technologie 3D tisku, konkrétně technologie PolyJet (viz dále). Pro předběžný i další návrhy bylo nezbytné technologie výroby nadnášené koule volit s ohledem na dostatečné pracovní prostory reálně dostupných výrobních zařízení. Technologie 3D tisku jsou voleny s ohledem na tvarovou náročnost vnitřních částí obou dílů, jež jsou konvenčními metodami neobrobitelné, neboť mnoho funkčních ploch se nachází za záhyby, hluboko ve vybrání kapes. Další nutně obrobitelné plochy se nachází pod nízkými radiálními úhly ve výduti apod. viz. obrázky 19 a 20.

Sférické lože je řešeno jako přesný duralový obrobek vyrobený z mohutného polotovaru.

Technologie PolyJet

Jedná se o výběr technologie 3D tisku se kterou je obě průhledné polokoule možné vyrobit. Jako materiály byly uvažovány možnosti VeroFlex a VeroFlex Clear. Po tisku jsou díly s touto technologií s matným povrchem, nicméně po speciálním postupu rozleštění, materiálu VeroFlexClear, je možné dosáhnout velmi čisté, požadované, průhlednosti. Díly vytisknuté touto technologií se bohužel vykazují křehkostí, lámavostí a špatnou oteřuvzdorností. Cena za tisk se odvíjí od tloušťky tisknuté vrstvy, ve všech případech je však pro takto velké díly velmi vysoká v porovnání s jinými technologiemi 3D tisku. Díly jsou vodotěsné. Fotopolymery jsou ale teplotně odolné pouze do 50 °C, velikost vrstvy je v porovnání s dále uvedenými technologiemi tisku velmi tenká – může být i 0,014 mm.

Polyjet je technologie 3D tisku poskytovaná ve velké míře firmou Stratasys. Tato technologie využívá proces fotopolymerizace pryskyřice, což je proces, který pomocí UV světla vytváří pevné vazby mezi řetězci molekul, čímž se formují polymery. Tyto polymery pak tvoří, vrstvu po vrstvě, výsledný 3D model. Materiál je distribuován do tiskové jednotky, která má v sobě počítačově řízené tiskové hlavy, v tiskových hlavách jsou miniaturní otvory, skrze které je vstříkován materiál na platformu. Na stranách tiskové jednotky jsou silné UV lampy, které během procesu tisku neustále svítí. Samotný tisk tedy probíhá tak, že tisková jednotka přejíždí přes platformu a v místě, kde má být díl vstříkne velmi malé množství materiálu. Díky tomu, že se tisková jednotka pohybuje ze strany na stranu, dojde k osvětlení vstříknutého materiálu pomocí bočních UV lamp, což způsobí okamžité vytvrzení materiálu. Materiál je okamžitě vytvrzený, není tedy potřeba po dokončení stavby žádné další dodatečné vytvrzení.

Tato technologie je použitelná pro rychlé návrhy dílů, pro takzvané nevyrobitelné tvary. Dá se použít na ověření sestavy a designu. Při použití správného materiálu se dá použít i pro teplotně odolné díly. Tato technologie dokáže vytvořit díly s tenkými stěnami, díly jsou křehké a náchylné na teplotní deformaci. [16][44]

3.4 Pokročilý předběžný návrh nadnášené koule

V další fázi postupu nastala řada změn, jako komplikace se ukázalo zrealizování průhledné nesené koule s aparaturou – navržená technologie PolyJet se ukázala jako nepraktická a nákladná s náročnými dalšími povýrobními procesy, aby bylo dosaženo požadované průhlednosti. V důsledku zvažování faktu, že výtisky technologie PolyJet jsou charakteristické křehkostí, lámavostí a jsou rovněž vysoce finančně nákladné, bylo od požadavku průhlednosti nadnášené koule odstoupeno. Jako další alternativy způsoby výroby nadnášené koule byla navržena rozšířená technologie FDM a MJF.

Technologie FDM (Fused deposition modeling)

Jedná se o standardní technologie tavení pevné látky, nejčastěji navinutého plastového drátku nebo napojovatelných tyčinek. Pro výrobu přišel v úvahu stroj Fortus 450mc s dostatečně velkou pracovní plochou. Po tisku technologií zůstávají na povrchu výtisků viditelné postupné vrstvy, povrch navíc nemá zaručenou vodotěsnost. Při tisku je nezbytné využít více nebo méně komplikované odstranitelné podpory, díky kterým jsou tvarově náročné díly vytisknutelné. V případě zvolení technologie FDM by bylo nezbytné tisknout polosféry nadnášené koule v orientaci, kdy by podpory byly nezbytné, a to v případě, že by polokoule byla orientována souvislou vnější sférickou plochou k pracovnímu stolu i v případě, kdy by polokoule byla orientována k pracovnímu stolu tvarově složitou vnitřní částí. Dle zkušeností s touto technologií lze konstatovat, že odstraňování podpor od tvarově složitých dílů může být zdoluhavý proces, který sebou nese řadu rizik. Uvažované materiály byly poloprůhledný PC-ISO, dále ABS a PETG s využitím vrstvení po 0,1778 mm nebo 0,2540 mm. Tyto materiály poskytují dostatečnou pevnost a houževnatost pro využití na nadnášenou kouli, nicméně vlastnosti výtisků se v jednotlivých osách navzájem liší. [40][41][44]

Technologie MJF (MultiJetFusion)

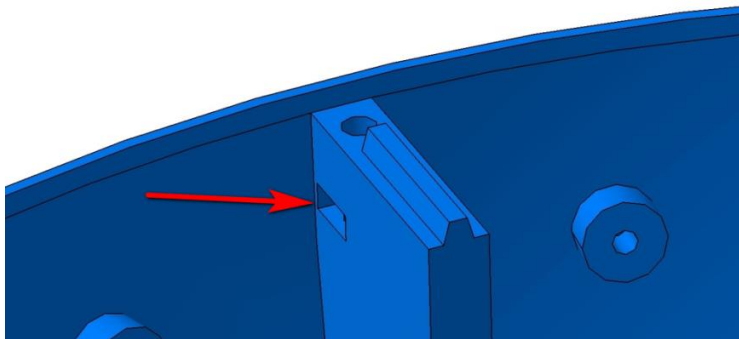
Technologie je patentována společností HP. Zpracovávaný materiál je polymer PA12 ve formě prášku. Díly vyrobené touto metodou mají šedivý, vzhledově kamenný povrch, disponují navíc kompletní vodotěsností. Výtisky MultiJetFusion jsou pevnostně srovnatelné s díly, jež jsou vyráběny technologií vstříkovaním materiálu PA12, pevnost a houževnatost je tak plně postačující pro využití na nadnášené kouli. Uvažované zařízení pro tisk s využitím této technologie je HP Jet Fusion 4200, které disponuje dostatečně velkým pracovním prostorem (380×284×380 mm). Princip tisku touto technologií spočívá ve vytvrzování práškového polymeru s příměsí patentovaného činidla, jež slouží jako pojivo, které je aktivováno zahřáním - UV světlem. Prášek je stmelen do pevného stavu, posléze nastává proces chladnutí. Tímto způsobem technologie tiskne vrstvu po vrstvě, povrch po tisku bývá jednolitý, ale ne příliš hladký. Na povrchu nejsou patrné viditelné vrstvy, jejichž velikost je, v případě HP Jet Fusion 4200, 0,08 mm. Předností technologie MultiJetFusion je vysoká pevnost ve všech osách výtisku, je možné praktické využití pro funkční díly i díly s pružnými prvky, další velkou předností je absence nutnosti podpor, neboť tisk probíhá vytvrzováním vrstev jemného polyamidového prášku, z čehož vyplývá jedna z hlavních technologických zásad. Díly nesmí mít dutiny, vždy musí být přítomna díra pro vysypání nestmeleného, přebytečného, prášku. Další uváděnou technologickou zásadou je dodržení minimální tloušťky stěny, tato tloušťka platí obecně, dle prodejců zařízení, 1 mm. Nicméně u velkých výtisků minimální tloušťka stěn roste a to způsobem, který není nijak specifikován, v případě velkých tenkých dílů jsou rovněž nezbytná výztužná žebra. Standardní přesnost technologie MultiJetFusion se obecně udává $\pm 0,3$ mm. Díly a jejich povrch je možné nadále upravovat obráběním a dokončovacími operacemi. [17][41][44]

3.5 Popis modelu předběžného návrhu

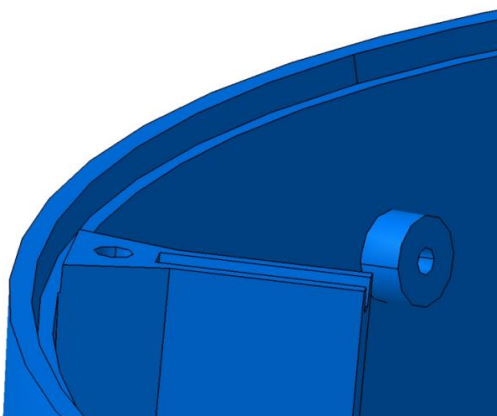
3.5.1 Popis konceptu koule

Obrázky zobrazují jedno z prvních hrubých konstrukčních řešení ADCS koule. Spojení dílců nadnášené koule, z obrázku 15, je realizováno pomocí šesti šroubů způsobem, kde v horní části koule je v zahloubené díře usazena hlava šroubu s příslušnou podložkou a

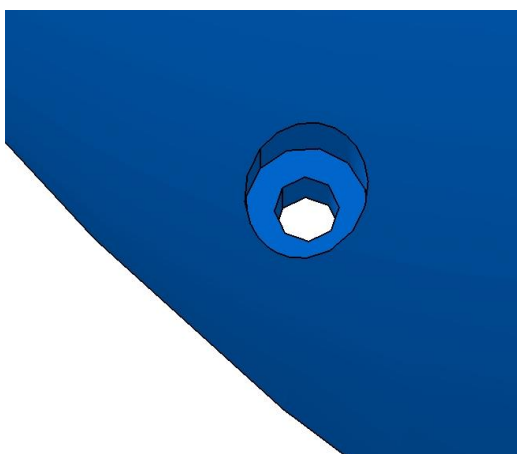
ve spodní části je v obdélníkové kapse usazena matice. Matice by dle návrhu měla být zajištěna na pozici závitovým lepidlem.



Obrázek 16 – Detail kapsy pro usazení matic [S1]



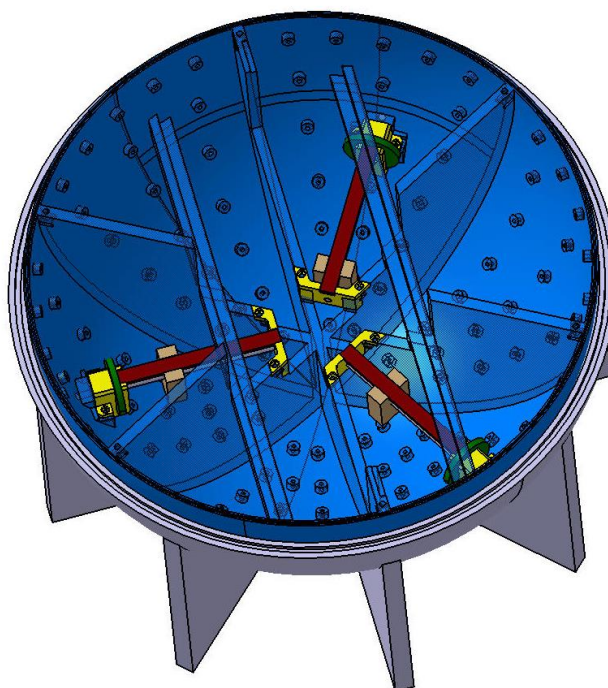
Obrázek 17 – Detail protikusu šroubu [S1]



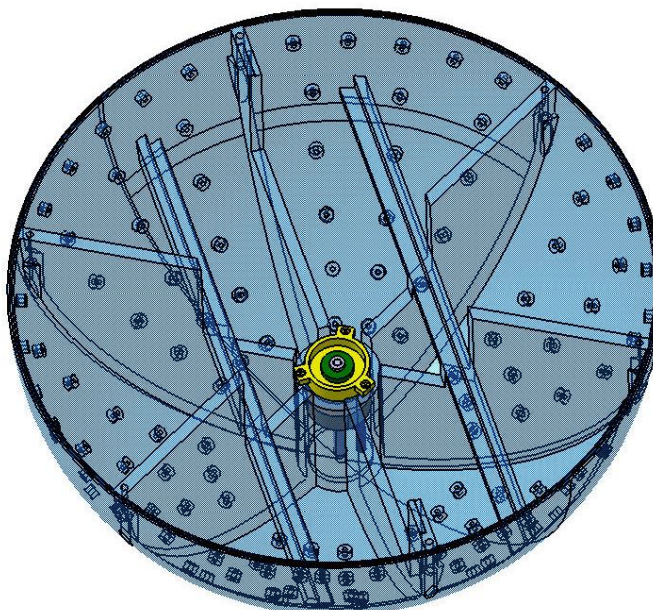
Obrázek 18 – Detail protikusu, umístění hlav šroubů [S1]

Lepidlo neplní žádnou funkci při utahování, neboť v procesu utahování šroubů je matice za svoji kratší šíři držena prostřednictvím tvarového uložení v obdélníkové kapse o vhodném rozměru. Zajištění matice lepidlem je efektivní v okamžiku sesazení zaručuje tak, že matice zůstane při hrubší manipulaci na svém místě a nenastane situace, kdy by došlo k nutnosti nadnášenou kouli opětovně sesazovat v důsledku vynuceného, nového, umístění matic. Předpokládalo se, že nejméně za účelem vyvažování pevnými závažími bude nezbytné kouli vícekrát rozebírat, řezání závitů přímo do vytisknutého materiálu PA12, jenž byl vytisknut technologií MJF je možný, nicméně tato možnost byla zvolena pro zaručenou a neomezenou opakovatelnost použití závitů. Tímto způsobem jsou řešeny také šroubové spoje, jež ke konstrukci polokoulí připevňují lože pohyblivých závaží a PCB desky vnitřní elektroniky.

Každá z polokoulí je opatřena šesti výztužnými žebry, jež jsou přímo spojeny s vnějšími stěnami a částí zabezpečující upnutí 2U CubeSat konstrukce. 2U konstrukce může být usazena mezi čtyřmi kolejnicemi, které zároveň slouží jako další vyztužující žebra obou polokoulí.



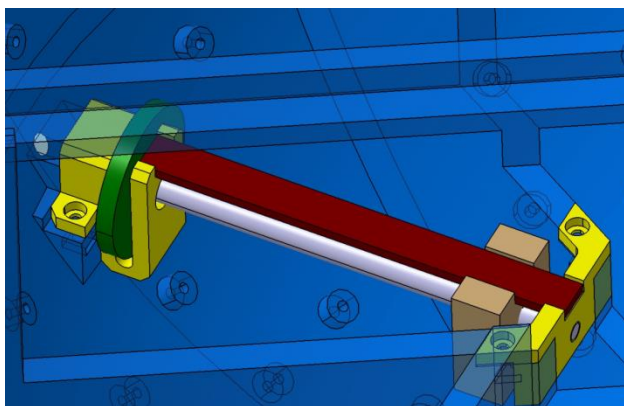
Obrázek 19 – Dolní díl koule a lože – konceptní návrh [S1]



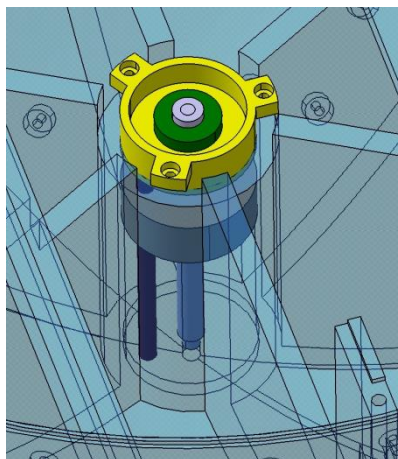
Obrázek 20 – Horní díl koule – koncepční návrh [S1]

3.5.2 Popis konceptu vyvažování

Nejprve navržené pohyblivé vyvažování se skládalo z vodící lišty (na následujících obrázcích červené), jež zaručovalo, že se závaží nebude při podélném pohybu viklat a vždy bude správně relativně orientováno. Další částí bylo závaží samotné o hmotnost 50 gramů, opatřeno vodítkem, tedy výřezem v jeho horní části, v němž je uložena vodící lišta. Samotnou translaci závaží v návrhu zajišťoval závit pohybového šroubu, který byl zároveň spojený s ozubeným kolem (na modelu je znázorněno zeleně). Ozubené kolo je na obrázcích součástí převodového mechanismu s elektromotorem. Tato struktura je usazena v domečcích pohyblivého vyvažování (žluté), společně tak již tvoří komplexní a zakomponovatelný celek.



Obrázek 21 – Předběžné řešení vyvažování dolního dílu [S1]



Obrázek 22 – Předběžné řešení vyvažování horního dílu [S1]

Jinou z prvních koncepcí ovládní pohyblivého vyvažování byla varianta, kdy by bylo možné pohyb závaží ovládat zvenčí jak elektronickým, tak mechanickým způsobem, jednalo se tak o kombinované řešení. Ve stěně koule byl na konci pohyblivé osy otvor pro imbusový klíč, který procházel skrze stěnu domku pohybového šroubu, tato varianta je další interpretací obrázků 21 a 22, kde zelený díl nadále představuje kolo pastorku elektromotoru. Vyvažování tímto způsobem by bylo možné pouze v klidovém stavu koule.

Další možnou variantou bylo vyvažování čistě mechanické, které zabezpečovalo ovládní zvenčí stejným způsobem, jako je uvedeno výše, pro případ sestavené koule. V případě rozšroubované koule měly být pohyby závaží ovládnány pomocí zelených dílů, jež v tomto řešení představovaly rýhovaná kola pro ruční ovládní.

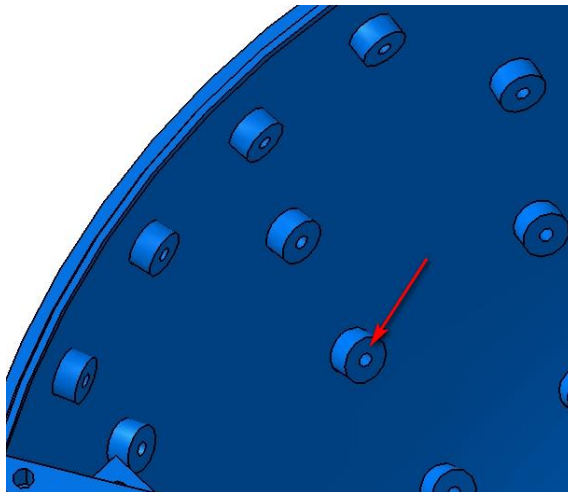
Veškeré tyto návrhy existovaly na úrovni konceptů, pro zjednodušení realizace a pohodlnější ovládní bylo přistoupeno k takovým krokovým motorům, které jsou od výrobce spojeny s posuvovou osou. Mechanické varianty vyvažování tak byly pro pohyblivá závaží nahrazeny elektronikou, která byla koncipována pro plné využití bez ohledu na rozložení či složení částí koule nebo stav experimentu.

Pro pohon byl v tomto řešení navržen krokový elektromotor nebo stejnosměrný motor. Stejnosměrný motor je konstrukčně jednodušší, řešení by ale navíc vyžadovalo potenciometr pro snímání polohy, případně i koncové snímače. V případě motoru krokového nutnost potenciometru odpadá, poloha může být zjištěna pomocí kombinace znalostí výchozí polohy závaží a počtu pólů o které daný motor v chodu otáčí. Tímto způsobem může být stále k dispozici znalost polohy závaží, vše ovšem za předpokladu, že nedojde k přeskočení nebo protočení na pólech motoru.

Motory, jež zajišťují podélný pohyb, jsou umístěné v obou dílech polokoulí nadnášené koule. Ve spodním usazeném dílu nadnášené koule pohyblivé vyvažování zaujímají pozice v korunové formaci po 120° , motor v horním orientovaném dílu koule směřuje přímo vertikálně vzhůru. Takto orientované pohyblivé vyvažování v daných pozicích zajišťují možnost dovyvážení s nula stupni volnosti nadnášené koule, dále poskytují teoretickou možnost úprav parazitních momentů, jež působí v průběhu testů na nadnášenou kouli.

Pevné vyvažování je v návrhu realizováno pomocí závaží ve formě karosářských podložek, matic, stavěcích a dalších šroubů. Tyto závaží mohou být komponovány do

obou částí nadnášené koule na speciální místa tomu určené. Tyto místa jsou řešeny jako úpravy povrchu doplňující vyčnívající tělíska připomínající „nálitky“ rozmístěné ve formaci po celé vnitřní sférické ploše polokouli, jsou opatřeny otvorem, a to takovým, aby do nich bylo možné upnout stavěcí šrouby, jež drží karosářské podložky a další komponenty sloužící jako závaží.



Obrázek 23 – Detail možného umístění pevných vývažků [S1]

Optimální polohy umístění těchto pevných závaží je nezbytné určit experimentálně, například vyvážením zvlášť každé ze dvou polokouli samostatně na vzduchovém polštáři, vždy ve dvou osách. Zbývající svislou osu je možné dovyvážit na základě chování již sešroubované koule a na několik iterací provést předběžné vyvážení.

3.5.3 Popis konceptu lože

Sférické lože je řešeno jako duralový obrobek s patami pro usazení na stůl. Disponuje otvory pro pneumatické prvky a přívod stlačeného vzduchu, ve spodu sférického lože je umístěn velký otvor pro hadici o vnějším průměru 16 mm, jež má být sama o sobě dostatečná pro generování dostatečného výtlaku pro nadnášení koule, dále jsou zde přítomny 2 řady děr pro hadice o průměru 6 mm, které mají za cíl nadnášenou kouli udržovat ve správné poloze nebo se přímo podílet na nadnášení. Existuje rovněž teoretická možnost individuálního škrčení hadic, které vstupují do těchto bočních děr, což teoreticky může mít využití při experimentech pro vyzkoušení aktivního řízení nebo ovlivňování parazitních momentů tímto způsobem. Předběžné schéma s vyznačením otvorů pro vstupy tlakové vzduchu je obsahem přílohy 1.

4 Detailní konstrukční návrh

Pro detailní konstrukční návrh bylo přehodnoceno množství řešení za účelem optimalizovat zařízení pro realizaci, výrobní procesy a lepší samotnou funkci.

4.1 Konstrukce koule

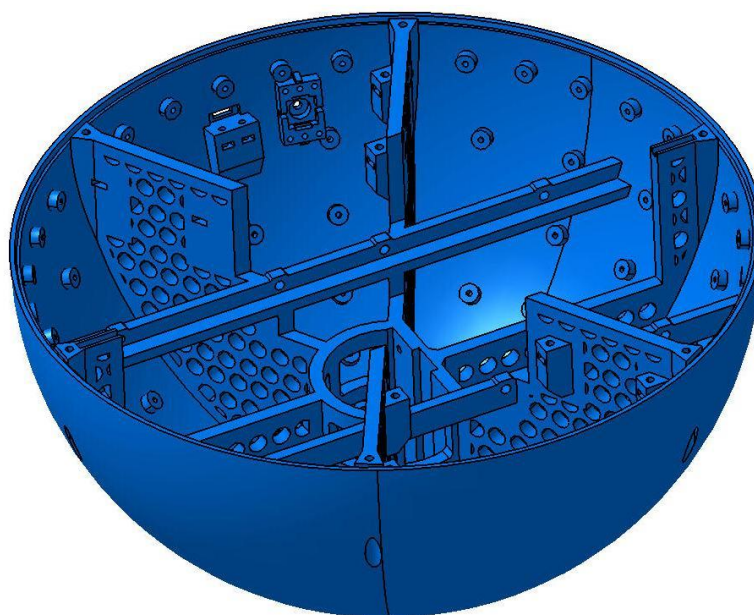
4.1.1 Zohlednění výrobní technologie

Stejně jako v případě předběžného řešení (vizualizace) je koule v detailním návrhu uvažována jako výtisk z technologie tisku MJF od společnosti HP, jež byla popsána v kapitole 3.4. Nespornou výhodou volby této technologie zůstává tisk bez nutnosti zahrnutí podpurných prvků a rizikových postupů jejich odstraňování. Další výhodou byla nejnižší cena výroby v porovnání s ostatními technologiemi, jež byly představeny v předchozích kapitolách. Bylo předpokládáno, že s dodržением obecných doporučených technologických zásad, jež jsou obecně udávány pro výrobní zařízení HP Jet Fusion 4200, bude dosaženo dostatečné přesnosti pro sestavení. Těmito zásadami jsou zejména:

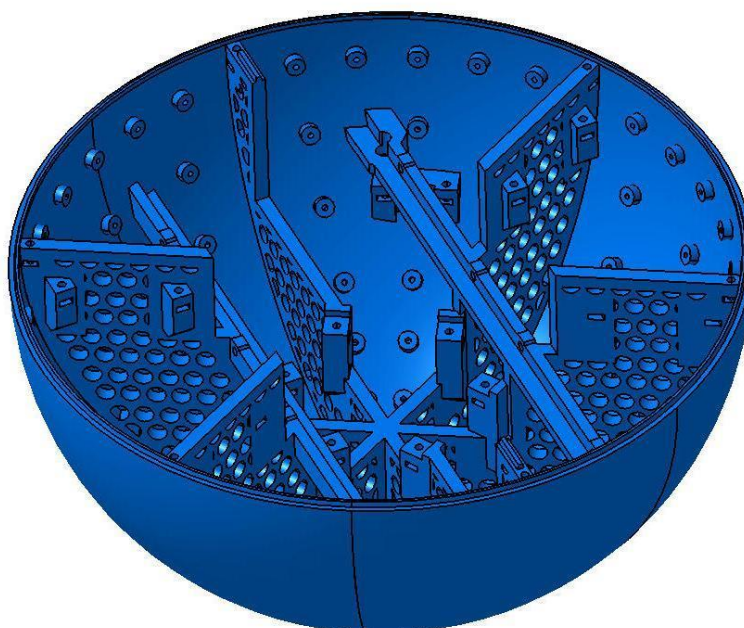
- Minimální tloušťka stěny 1 mm, tloušťka může být i nižší v případě pružných částí, které by však neměly být příliš rozlehlé
- V případě větších výtisků minimální tloušťka stěny nespecifikovaným způsobem roste a pro větší tenké plochy je nutné vytvořit výztužná žebra
- Model nesmí obsahovat dutiny, aby bylo možné nepoužitý prášek, který zbude po procesu tisku a chlazení, vysypat ven z modelu

Nicméně technologická doporučení, které jsou běžně k dispozici, bývají velmi stručná a výroba obzvláště velkých neověřených modelů může být iterativní a experimentální proces. Uvádí se, že tisknutý materiál PA12 je sice tvrdý a houževnatý, nicméně zůstává možnost jeho obrábění a jiné dodatečné úpravy, s jejichž pomocí je možné, již dokončený výtisk, nadále upravovat a modifikovat tak rozličnými ubíracími způsoby jeho tvarovou geometrii. [18]

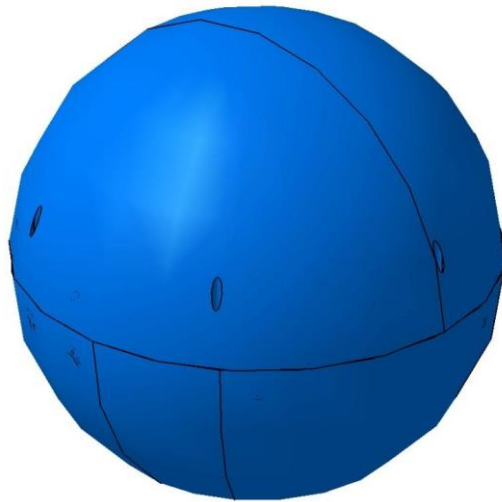
Koule je nadále konstrukčně řešena fragmentací na dvě části dělicí rovinou, která prochází středem a definuje dvě stejně velké polokoule výtisků. Vnější průměr koule je 300 mm, tloušťka stěny byla v tomto řešení zvolena 3 mm, tloušťka se v kombinaci s šesticí masivních žebor o šíři 6 mm považovala za dostatečnou.



Obrázek 24 – Detailní konstrukční návrh horního dílu koule [S1]



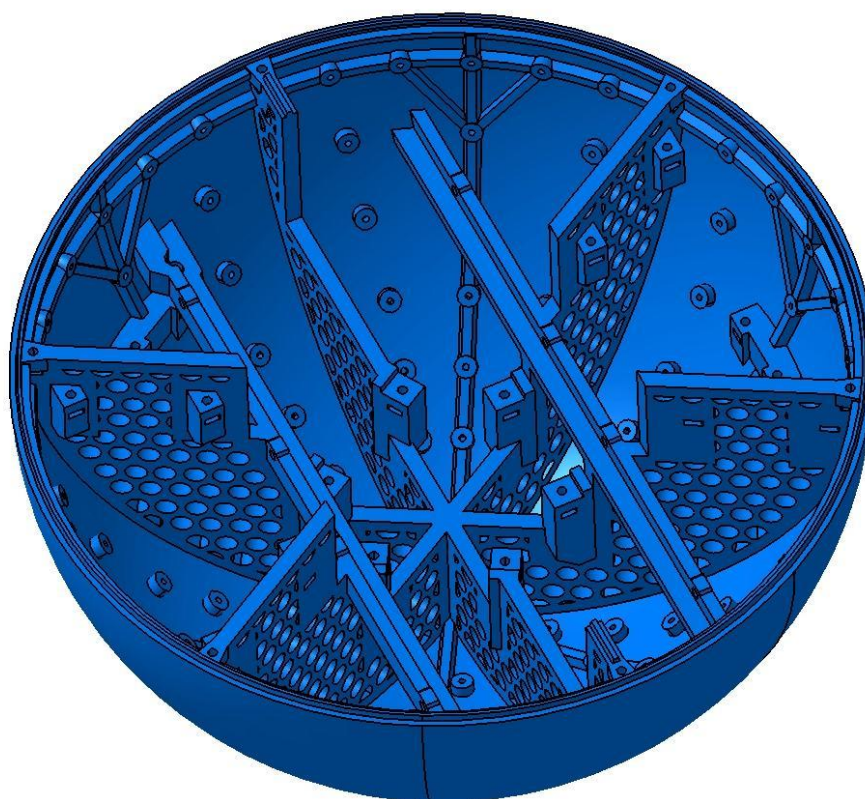
Obrázek 25 – Detailní konstrukční návrh spodního dílu koule [S1]



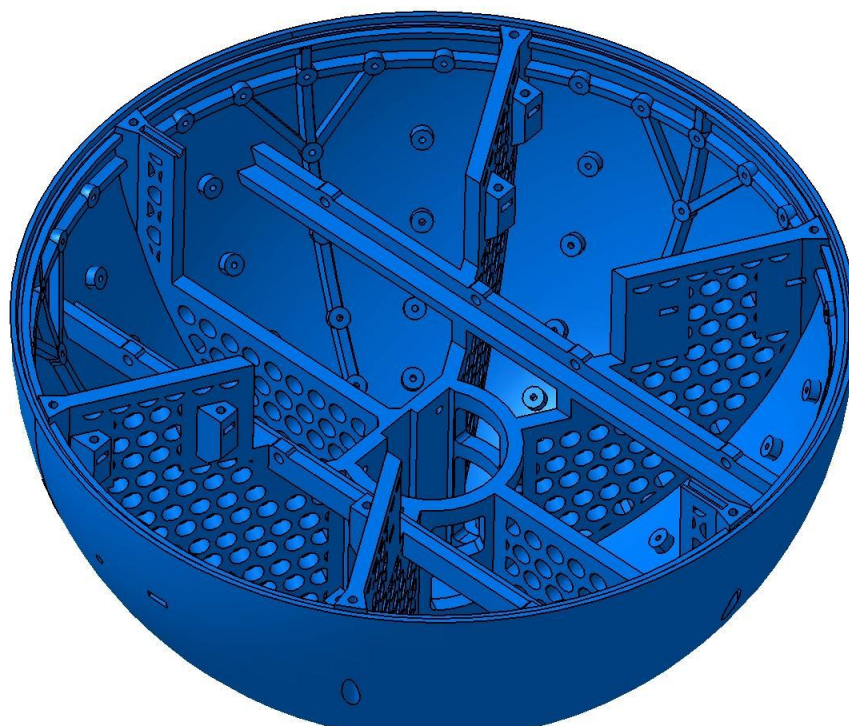
Obrázek 26 – Sesazení obou dílů koule do celku [S1]

Jak je popsáno podrobněji v kapitole 5, tak při výrobě obou dílů polokoulí, byla překonána mnohá úskalí, která působily při tisku technologií MJF značné problémy.

Výsledky těchto řešení byly zejména zvětšení tloušťky stěny na 4 mm a přidání dodatečných výztužných žebér. Tloušťka stěny 4 mm proběhla při zachování vnějšího sférického průměru 300 mm a při snížení vnitřního poloměru o 1 mm. Výztužná žebra byla zkonstruována v podobě dvou obručí v blízkosti maximálního průměru u lemu polokoule. Spodní obruč záměrně protíná tělesa pevného vyvažování, vrchní obruč se nachází v blízkosti spojovacího a izolačního lemu. Další částečná žebra vedou vždy přesně mezi hlavními masivními žebry, o tloušťce 6 mm, od dělicí roviny směrem k vrcholu přes celý poloměr dané polokoule. Specifické řešení těchto žebér nastalo na vnitřní sférické stěně u držáků PCB desek v horní polokouli, kde bylo žebro rozdvojeno a dále u držáků motorů na vnitřní sférické stěně dolní polokoule, kde bylo žebro v jeho spodní části přerušeno, viz obrázek 41. Zmíněné změny jsou podrobněji popsány v kapitole realizace.



Obrázek 27 – Detailní konstrukční návrh spodního dílu koule – vyztužená verze [S1]

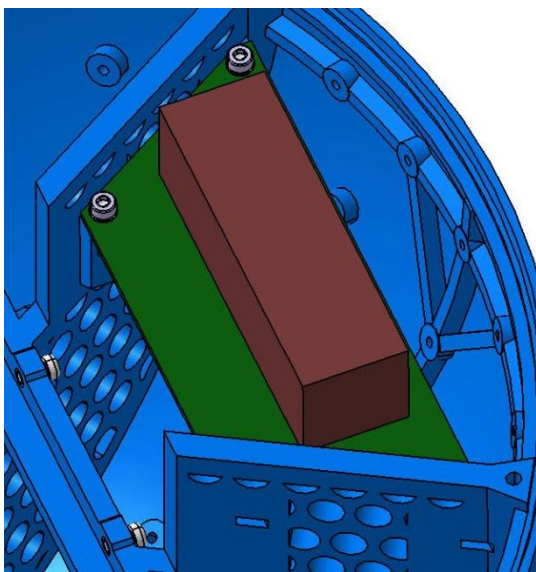


Obrázek 28 – Detailní konstrukční návrh horního dílu koule – vyztužená verze [S1]

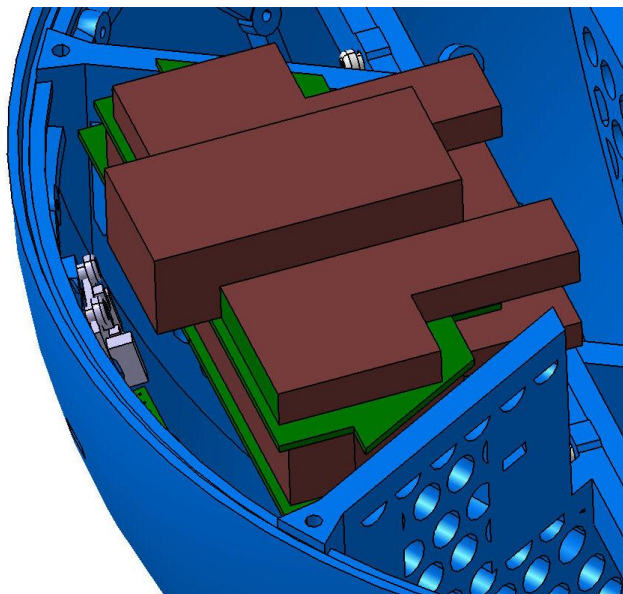
4.1.2 Popis konstrukčního řešení vnitřku

Sešroubování polokoulí bylo navrženo pomocí šesti šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem pro hluboké zahloubení v horní části koule. Šrouby se nacházejí v blízkosti maximálního průměru obvodu koule na roztečné kružnici a jsou rozmístěny po 60°. Na líčujících pozicích se šrouby jsou rozmístěny matice, které jsou upevněny v obdélníkových kapsách v dolní části koule.

Polokoule disponují, v souladu s technologickými doporučeními, výztužnými žebry, tyto žebra zároveň slouží jako těleso umístěných hlavních šroubů a matic, které spojují polokoule do celku. Další funkcí žebrování je zástup nosných prvků kolejnic upnutí 2U CubeSatu nebo experimentální ADCS aparatury. Pro zakomponování PCB elektroniky, tedy hlavní řídicí desky s můstkem ovládání motorů a Wifi rozhraním, PCB baterie a dalších dvou menších PCB s microUSB konektorem a s LED kontaktním tlačítkem, slouží zkonstruované krakorce. Krakorce lichoběžníkových desek využívají žebra jako svoji podporu, jsou umístěny vždy ve čtveřici, po dvou na dvou žebrech tak, aby na ně bylo možné usadit PCB desku s lichoběžníkovým půdorysem. Pro pohodlné usazení elektroniky na krakorce mezi žebra byla kontura, PCB hlavní řídicí elektroniky a PCB, jež nese držák s akumulátorovou baterií 18650, zvolena lichoběžníková, kopírující prostor mezi žebry. V krakorcích nechybí opět prověřené řešení obdélníkové kapsy pro pohodlné uchycení matice při utahování.

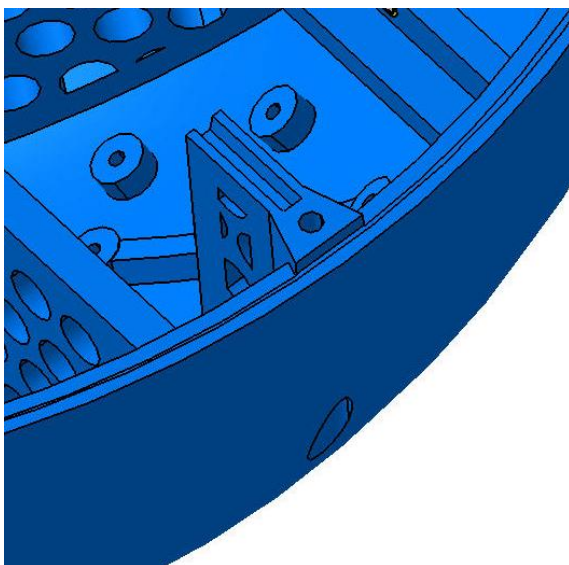


Obrázek 29 – Zakomponovaný model desky s baterií s využitím krakorců [S1]

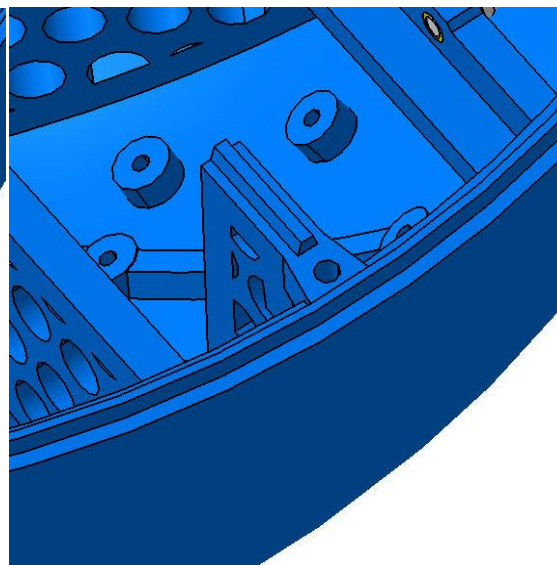


Obrázek 30 – Zakomponovaný model řídicí elektroniky s využitím krakorců [S1]

Polokoule jsou spojeny prostřednictvím zmíněných šroubových spojů po obvodu v optimální blízkosti maximálního průměru dílů. Na samém maximálním průměru a na tloušťce stěny byl zkonstruován dvojitý lem. Hlavní funkce spočívala v přesném sesazení pro zarovnání os polokoulí a pro odizolování vnitřku sestavené koule od vnějšího prostředí, ve kterém proudí tlakový vzduch. Tvar lemu byl navržen tak, aby dosedací funkční plocha obou dílů tvořila dělicí rovinu. Průřez samotného lemu byl na dílech navržen s lichoběžníkovým profilem tak, aby při sesazení byla zaručena drobná vůle mezi lemy protikusů a nebyla tak v důsledku sesazení narušena ideální geometrie tělesa. Dále bylo nezbytné zaručit, aby s polokoulemi před sešroubováním nebylo možné vůči sobě otáčet. Návrh spojení polokoulí tak byl doplněn o dva krátké lemy na vrcholu hlavních žeber, které konkrétněji definují správné sesazení a nemožnost vzájemného otáčení dílů při montáži.

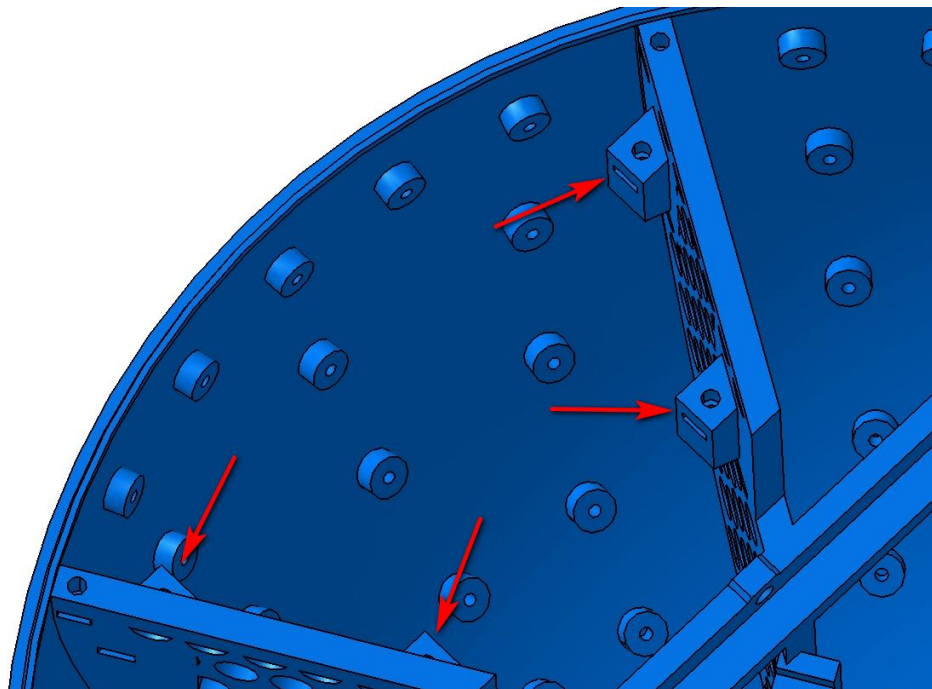


Obrázek 31 – Detail lemu horního dílu [S1]



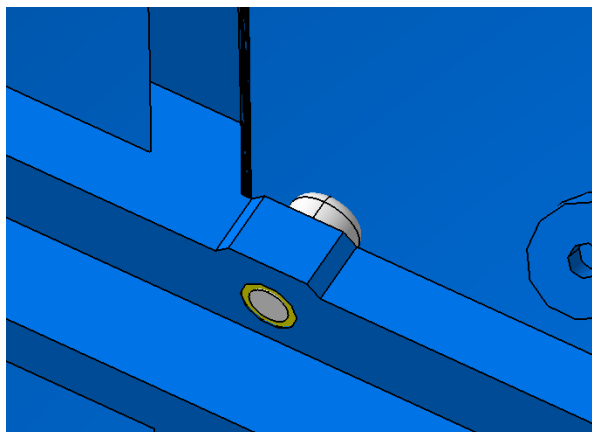
Obrázek 32 – Detail lemu spodního dílu [S1]

V každém výtisku polokoule se v tomto řešení nacházejí dvě sady zmíněných krakorců v obou případech naproti sobě, důvodem je umožnit montážní variace PCB řídicí elektroniky a PCB akumulátorové baterie v důsledku hledání optimálního vyvažovacího stavu.



Obrázek 33 – Krakorce pro umístění elektronických desek [S1]

Pro uložení měřicí aparatury nebo 2U konstrukce modelu, družice typu CubeSat, slouží čtyři kolejnice v souladu s CubeSat standardem. Sesazená koule tak má v upínacím prostoru vymezovat čtvercovou plochu o rozměrech 100x100 mm s drobnou vůlí, přesah kolejnice od rohu 2U struktury činí obecně 7 mm, stykové plochy tak jsou ve srovnání s vystřelovači větší, což umožňuje širší možnosti konstrukce měřících aparatur. Jmenovitá vůle mezi družicí nebo aparaturou je celkově 0,3 mm, tato hodnota se v návrhu přepokládá jako dostatečná na pokrytí výrobních tolerancí nebo nepřesností koule i aparatury. Jako zajišťovací prvky, pro usazení modelu družice nebo aparatury do kolejnic, slouží polyamidové stahovací šrouby, které se zavádí skrze nalisované závitové vložky. Vložky jsou po délce každé kolejnice připraveny 4. Pro ukotvení je kromě stahovacích šroubů možné použít například oboustrannou lepicí pásku, z montážních důvodů vyplývá, že šrouby jsou použitelné vždy pouze v jedné z polokoulí. Kolejnice slouží zároveň jako efektivní přídatná žebra pro technologické potřeby tisku.



Obrázek 34 – Stahovací šroub s vložkou nalisovanou do kolejnice [S1]

Ve fázi detailního návrhu bylo zřejmé, že koule bude naplněna množstvím vnitřních komponent, které budou mít nezanedbatelný vliv na její hmotnost a schopnost reagování na prostředí v loži při proudění tlakového vzduchu. Tyto komponenty nerepresentují pouze motory s pohyblivými závažími, elektronika s akumulátorovou baterií, množství spojovacího materiálu a samotná experimentální aparatura, ale i neznámé množství pevného závaží. V důsledku této záležitosti byl na konstrukci dán požadavek pro odstranění množství přebytečného materiálu obou modelů a tím značně snížit jejich hrubou hmotnost. Po konstrukční stránce byl požadavek vyřešen přidáním řad kruhových odlehčovacích otvorů o průměru 6 mm, dalším řešením v horním dílu koule bylo dosaženo u lože svislého motoru ve vrcholu, kde byly použity velké obdélníkové otvory, které ze střední části dílu vytvořily tvar, jež připomíná příhradovou konstrukci.

Hmotnosti takto řešených dílů vychází při tloušťce stěny sféry 4 mm na:

1,045 kg u horní polokoule bez přídavných žeber

1,074 kg u dolní bez přídavných žeber

1,089 kg u horní s přídavnými žebry (v souladu s obrázky 27 a 28)

1,122 kg u dolní s přídavnými žebry (v souladu s obrázky 27 a 28)

4.2 Pohyblivé vyvažování

Z předešlého předběžného řešení bylo v rámci zjednodušení ustoupeno od vyráběného konceptu pohyblivého vyvažování. Vlastní vyráběné komponenty, jež byly představeny, s sebou nesou řadu obráběných dílů. Po zhodnocení se jako alternativa nabídla možnost se této záležitosti vyvarovat prostřednictvím již kompletní lineární osy, ta již bývá součástí dostupných krokových motorů. Takové komponenty se dodávají jako hotové celky, může se jednat například o motorky s posuvy používané v tiskárnách apod. Klíčová hodnota pro výběr správného krokového motoru byla délka chodu jezdce po ose a napájení. Všechny čtyři motory – jeden v horní části koule, tři ve spodní, jsou napájeny z akumulátorové baterie 18650. Délka osy byla požadována do přibližně 90 mm, problém nastal u jediné osy motoru v horní části koule, která má osu chodu z konstrukčních důvodů přibližně o 20 mm kratší, než je tomu u os v dolní části koule. Bylo preferováno, aby zvolené motory mohly být unifikované, tedy aby jedna volba pokryla všechny čtyři potřebné vyvažovací osy – zároveň však bylo pro lepší funkcionalitu a ovladatelnost

třeba dosáhnout maximálního možného chodu. Tohoto vytyčeného prioritia bylo dosaženo zvolením motoru s lineárním chodem o délce 90 mm, s tím, že se přistoupí k rozsáhlejší mechanické úpravě jednoho kusu, kdy se osa o požadovaný rozměr zkrátí.

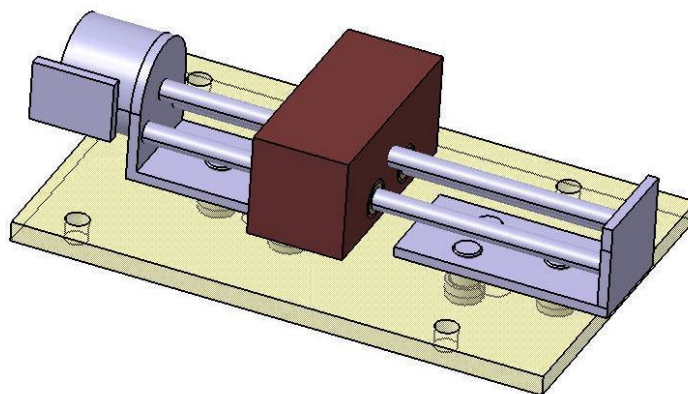
Zvolený motor je krokový motor viz zdroj 19: „Dc12v Stepper Motor With Linear Screw Nut Slider for DIY Laser Engraving Machine“ [19]



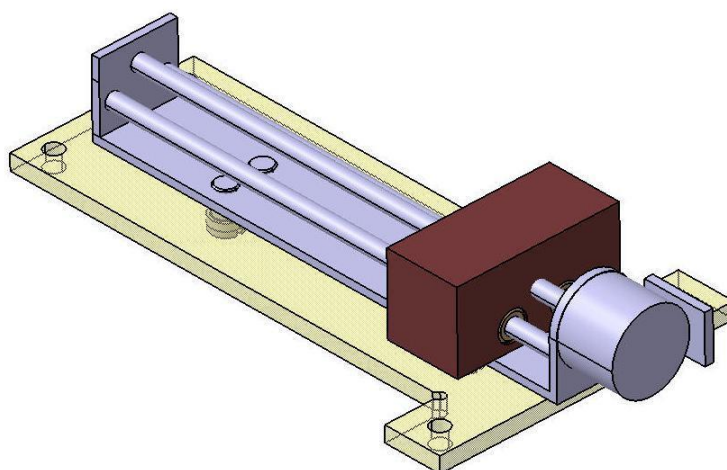
Obrázek 35 – Zvolený motor s lineární posuvovou osou [19]

Ve fázi realizace však bylo, v každém případě, třeba všechny čtyři motory pro sundání plastového originálního jezdce a našroubování vyrobeného 50 g závaží (na obrázcích 36 a 37 hnědý díl). Tyto závaží byly zachovány jako samostatně vyráběné díly, jedná se o jednoduché obrobky disponující vnitřním závitem M3, sloužící pro pohybový šroub a dva přesné otvory pro nalisování teflonových nebo silikonových vodičích vložek pro bezproblémové a přesné vedení. Jako materiál závaží byla uvažována nerezová ocel AISI 316 pro zachování nemagnetického prostředí uvnitř koule.

Na všech těchto lineárních posuvných motorech se počítalo s další úpravou, nezbytnou pro přišroubování motorů s posuvem k motorovému loži, jednalo se o vyřezání závitů M4 do čtyř již existujících děr na posuvu motoru a vytvoření dvou zcela nových závitových děr, v případě zkrácené verze posuvu, pro horní část koule. Zkrácení bylo dosaženo rozpilováním hliníkové části, dna osy. Přiděláním pomocí tří šroubů každé ze dvou částí je dosaženo lepší stability. Čtyři šrouby pro připevnění nezkrácených lineárních posuvů s motory byly považovány za dostačující, neboť hliníkové dno posuvu zůstalo celistvé a pevné.



Obrázek 36 – Návrh pohyblivého vyvažování – zkrácený posuv [S1]

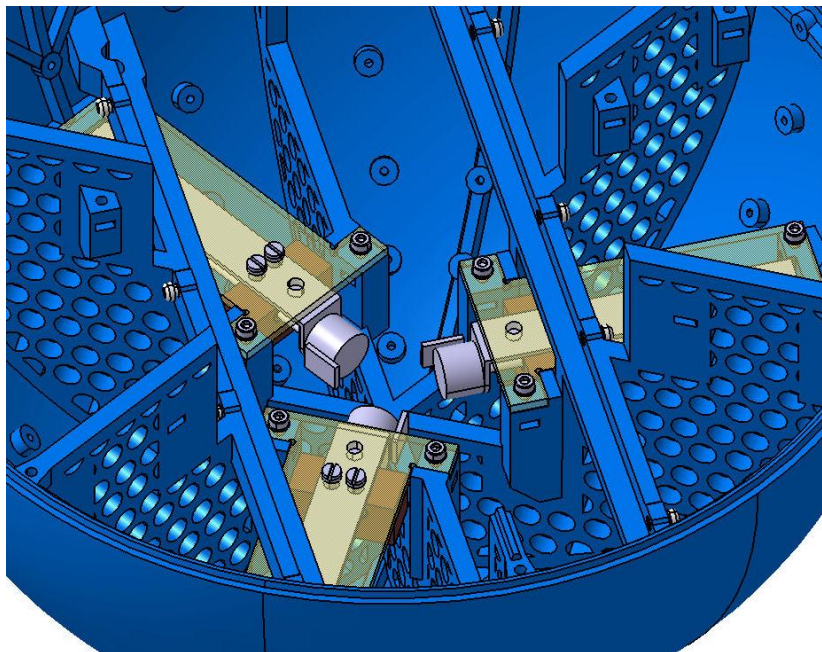


Obrázek 37 - Návrh pohyblivého vyvažování – plný posuv [S1]

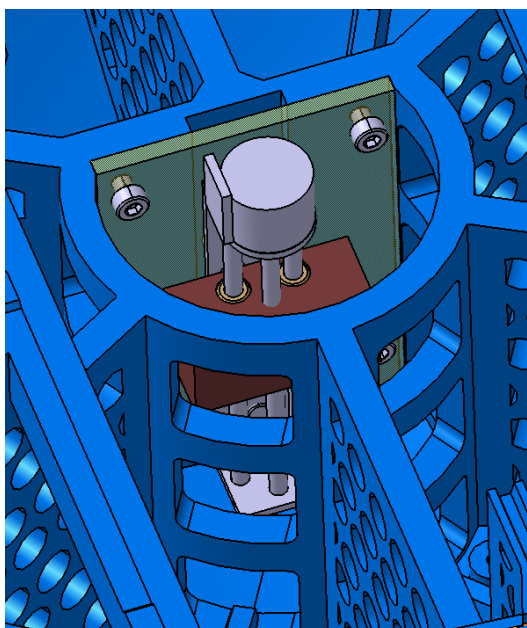
Jako lože těchto motorů byla uvažována obrobená 3 mm silná PCB deska, zvažovaná možnost byla i díly vyrobít standardní technologií 3D tisku FDM, od této možnosti bylo odstoupeno pro předpoklad nedostatečné tuhosti. Tato deska nesoucí krokový motor s lineární posuvovou osou a závažím je již připravena pro montáž na určené místo do útrobu koule. Desky jsou opět ve dvou variacích, tři pro případ nezkrácených posuvových os a jedna pro zkrácený posuv v horní části koule. Pro přišroubování desek je využito vždy čtyř šroubů M3, ke kterým náleží matice v tvarových otvorech, jež zabezpečují pohodlnou montáž a opakovatelné využití šroubového spoje.

Takto je řešené pohyblivé vyvažování, při daném rozmístění, kdy se tři osy posuvů nachází v korunové formaci (rovnoměrně po 120°) v jedné části koule a jedna osa je normálově k ose vrchlíku druhé části koule, uděluje možnost jemného dovyvážení koule s nula stupni volnosti. V případě, že každé ze závaží disponuje hmotností pouze 50 g

musí být koule již předem správně vyvážena pevnými nevývahami, aby byla zaručena funkcionální a dovyvažování proběhlo efektivně s kýženým dopadem.



Obrázek 38 – Návrh pohyblivého vyvažování, spodní díl koule [S1]



Obrázek 39 – Návrh pohyblivého vyvažování, horní díl koule [S1]

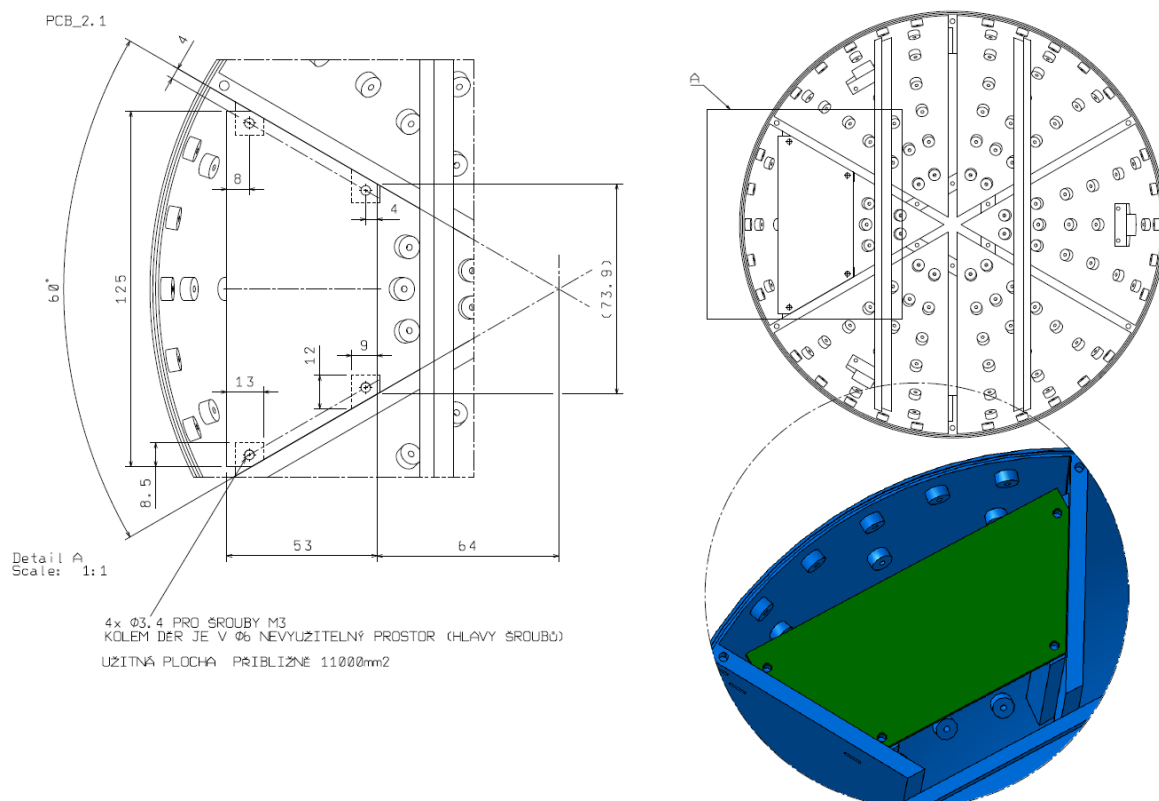
4.3 Napájení motorů

Motory jsou napájené z jedné akumulátorové baterie 18650, jejíž předpokládané umístění bylo do horního dílu koule. Je tak nezbytné, aby byly kabely, pokud možno, pohodlně samostatně zapojitelné a odpojitelné od řídicí elektroniky.

Akumulátorová baterie 18650 je umístěna na samostatném PCB osazeném držákem baterie. PCB je přišroubováno opět pomocí ověřeného způsobu uchycení matic v tvarovém otvoru v pilířích dolní části koule. Baterie byla umístěna na samostatné PCB z důvodu lepšího vyvážení, samotná baterie 18650 má hmotnost 50 g. Jedná se typ Li-Ion baterie, napětí nabité baterie jsou přibližně 4 V a kapacita přibližně 3500 mAh. Těsně před vybitím byla ovládací síla změřena 1.6 N, což je dostatečné pro pohyb daných závaží o hmotnostech 50 g. Samotná deska byla řešena geometricky podobně jako deska řídicí elektroniky v následující kapitole, jako podklad pro výrobu sloužil výkres, jenž je obsahem přílohy 9.

4.4 Řídicí elektronika

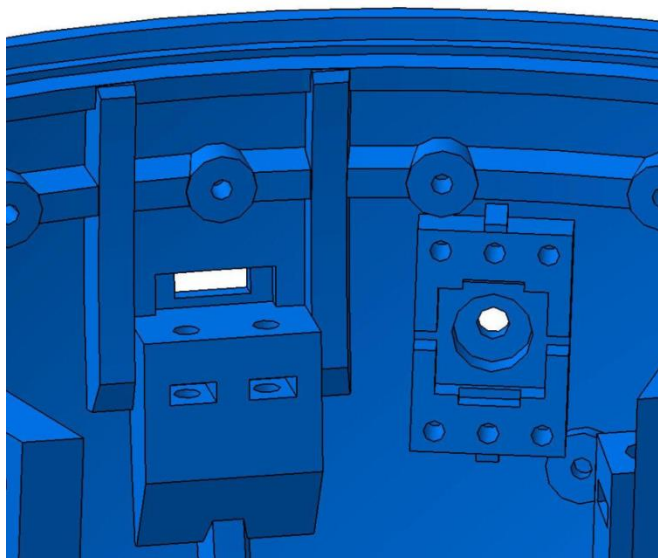
Rovněž samostatně je na protilehlých krakorcích, stejným způsobem jako PCB s baterií, umístěna řídicí elektronika motorů. Jako podklad pro výrobu desky posloužilo následující schéma. K elektronice a softwaru bylo v práci přistoupeno jako k vyráběným, dodávaným dílcům.



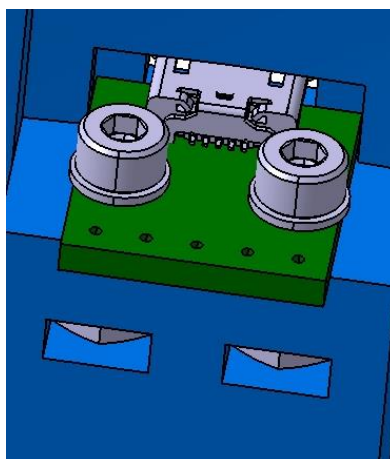
Obrázek 40 – Mechanické vymezení elektronických desek [S1]

Deska je uvažována jako zapojení můstků a wifi modulu pro ovládání motorů zvenčí koule pomocí mobilní aplikace nebo rozhraní v notebooku. Tato deska řídicí elektroniky je spojena s dvěma menšími PCB destičkami.

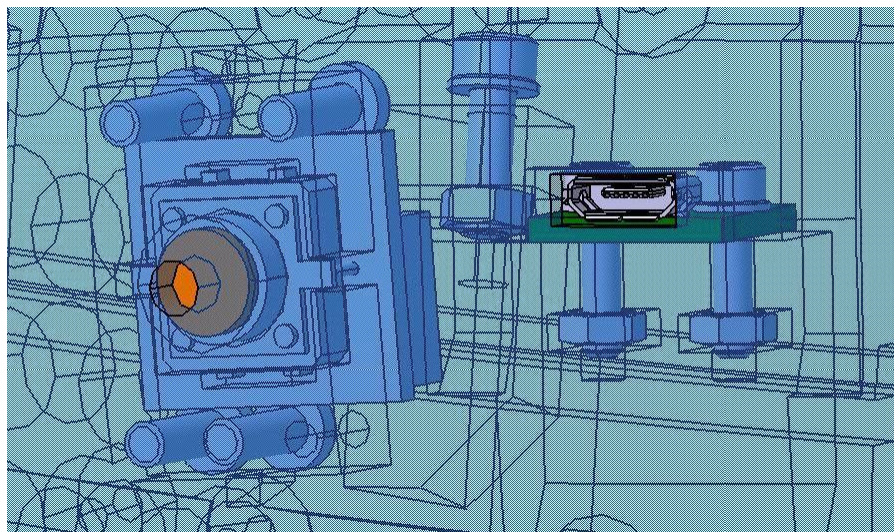
Jedna z nich je osazena micro USB konektorem, který umožňuje nabíjení baterie v případě, že je koule smontovaná do jednoho celku. PCB s konektorem je tak usazeno na specifickém místě při stěně koule, které je k tomu určené (viz následující obrázky). Správně situované PCB je přišroubováno opět pomocí matic umístěných v tvarových kapsách. Konektor míří do průchozího otvoru, ten je navržen podle standardu micro USB, aby bylo zaručené bezproblémové spojení konektorů skrze daný otvor ve stěně koule.



Obrázek 41 – Místa pro integraci micro USB a LED tlačítka pro přístup zvenčí [S1]



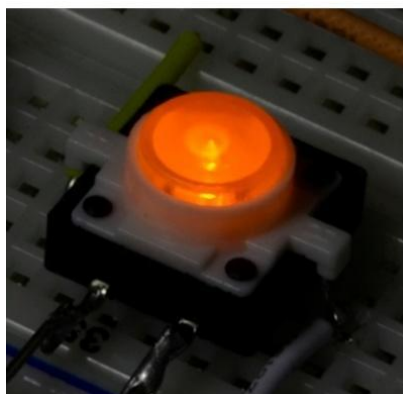
Obrázek 42 – Způsob zakomponování micro USB [S1]



Obrázek 43 – Způsob zakomponování LED tlačítka a micro USB [S1]

Druhou důležitou PCB destičkou, spojenou s hlavní deskou řídicí elektroniky, je PCB s jednoduchým kontaktním tlačítkem. Tlačítko bylo zvoleno takové, aby bylo malé, lehké a mělo zabudovanou LED. Pro PCB s LED tlačítkem bylo zvoleno místo v těsné blízkosti umístění destičky s micro USB zmíněné výše. Pro jeho uchycení byl vyprojektován tvarový domek uložení, normálově ke stěně, pro upnutí jsou určeny závitořezné šrouby do plastu. Jinou možností upnutí je vyřezání závitu závitníkem, do něž je následně zašroubován stavěcí šroub, deska je stažena přes podložku s velkým průměrem kontramaticí. Tlačítko, potažmo LED, má mít volný přístup zvenčí koule v případě jejího sestavení, proto je na dně domku počítáno s otvorem skrze stěnu koule. Tlačítko má sloužit pro zapnutí nebo vypnutí pohyblivého systému vyvažování zvenčí koule, LED potom zastupuje funkci indikátoru chodu motorů, případně i jiných dodatečných účelů.

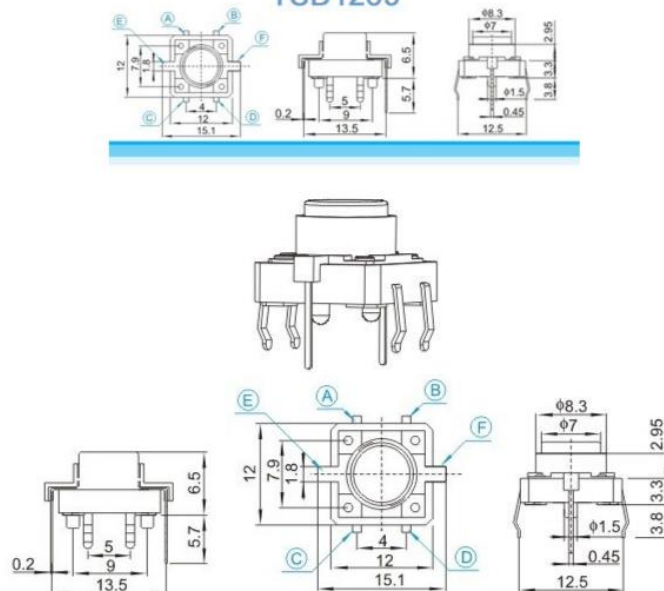
Z popisu je zřejmé, že v důsledku vnějších operací je nezbytné, aby byla koule opatřena dvěma průchozími otvory, jedním pro micro USB konektor a jedním pro tlačítko se zabudovaným LED. Každý z otvorů ve stěně je navržen jako kompromis pohodlného, funkčního řešení pro daný účel a co nejmenších rozměrů. I předběžně se v této fázi návrhu počítalo, že oba tyto servisní otvory budou zalepeny tenkou kaptonovou páskou pro dosažení čistších aerodynamických vlastností tělesa a zajištění nepronikání tlakového vzduchu do vnitřku koule.



Obrázek 44 – Zvolené LED tlačítko [20]



TSD1265



Obrázek 45 – Mechanické vymezení zvoleného tlačítka [20]

4.5 Pevné vyvažování

Základní filozofií pevného vyvažování je dosažení optimálního stavu rozložení hmotnosti ještě před začátkem experimentu a využitím pohyblivého systému vyvažování. Pevným vyvažováním se tedy rozumí umístování závaží do zvolených poloh, což je možné výhradně v případě před experimenty, kdy je kouli možné rozložit.

Konkrétní mechanické řešení tak vyžaduje nutnost možnosti rozmístění hmot, závaží s variabilními hodnotami v co nejvíce možnostech v efektivních polohách.

Závaží je nejefektivnější umístit tak, aby jejich hmota působila co největší možný moment na kouli. Toto řešení má za následek ušetření potřebné hmotnosti instalovaných závaží pro požadovaný efekt. Těmito reálně nejefektivnějšími oblastmi, kam je závaží vhodné instalovat, je celá sféra koule na maximálním poloměru, v praxi tedy přímo na ploše vnitřní stěny celé koule.

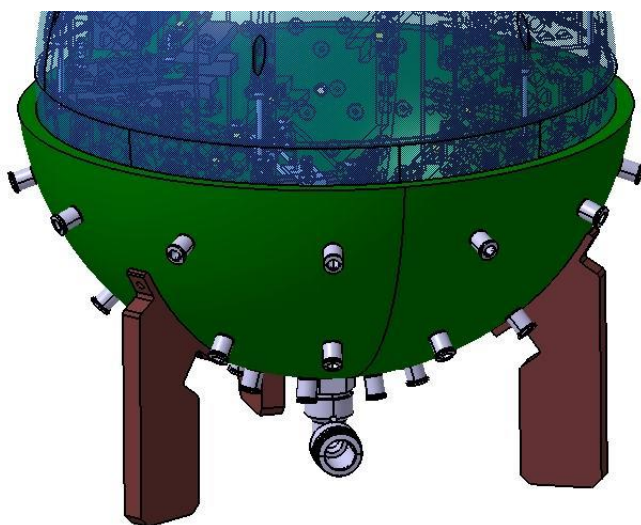
Konstrukčně tak bylo potřeba tuto úlohu vyřešit tak, aby bylo možné variabilní množství různých závaží připevnit přímo na vnitřní stěny koule s dostatečným množstvím možností.

Požadavku na řešení bylo splněno vyprojektováním úchytů pro závaží v celkovém počtu 272. Tyto úchyty jsou zkonstruovány jako nákrůžky s otvorem vhodným pro řezání závitu M3 nebo tváření závitu M2,5 s ohledem na použitý flexibilní materiál z 3D tisku PA12.

Přípevnění závaží pro instalaci bylo uvažováno prostřednictvím stavěcích šroubů a šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem různých délek v kombinaci s maticemi. Jako závaží byly předpokládány karosářské podložky s velkými vnějšími průměry a tloušťkou.

4.6 Konstrukce lože

Lože bylo zprvu navrženo jako konstrukce skládající se z více částí – hlavní díl s vnitřní pánví, sférickou plochou a třemi nohami, které by byly přišroubovány do neprůchozích děr lože. Nohy měly mít na svých podstavách závity pro stavěcí šrouby na kterých měla celá konstrukce spočívat. V důsledku mnohých technologických problémů bylo, po konzultaci s výrobou, v období realizace, od této koncepce odstoupeno. Celá situace je popsána dále.



Obrázek 46 – Prvotní návrh sférického lože [S1]

Z počátečního návrhu byl zachován sférický průměr pánve 302 mm, cílová tloušťka vzduchové polštáře byla 1 mm, pro daný případ koule o průměru 300 mm.

V původním předběžném návrhu bylo sférické lože uvažováno jako vydutý kulový vrchlík s rozdělením 20 mm pod jeho rovinou souměrnosti s tloušťkou stěny 9 mm. Toto byl návrh určený pro konzultaci s výrobou pro zhodnocení technologických úprav. Bylo nutné zajistit možnost upnutí do pracovního prostoru stroje, dostatečný odvod tepla, tuhost při obrábění a zohlednění použitých nástrojů. Předpokládalo se, že technologické podmínky splní pouze pětiosá obráběcí centra.

Ve sféře bylo pod normálovými úhly ve dvou řadách umístěno závitových otvorů M8 pro ukotvení šroubení a přívod tlakového vzduchu. Krom dvou řad, jedné v blízkosti dna pánve o osmi otvorech M8 a druhé řady, v blízkosti největšího průměru o dvanácti otvorech, byl na samém dně umístěn větší otvor s trubkovým palcovým závitem G3/8, který byl určen k tomu, aby prostřednictvím závitu umožnil osazení pneumatického šroubení pro hadici o větším průměru.

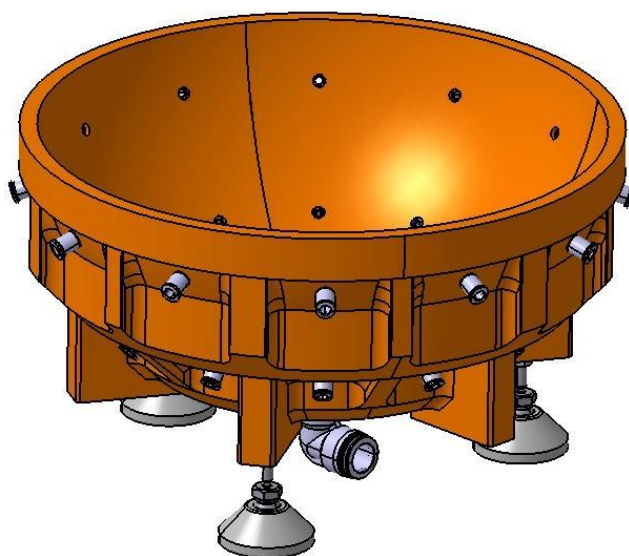
Koncepce přívodu a distribuce tlakového vzduchu tak spočívala v rozmístění celkem dvaceti pneumatických hadic, které přes šroubení vháněly médium do pánve. Výše

položená řada měla udržovat kouli pomocí přídatného tlaku vzduchu ve středové poloze. Níže položená řada měla být schopna generovat dostatečný výtlač pro nadnášení koule. Otvor na dně se závitem G3/8 byl sám o sobě, prostřednictvím pneumatické hadice o větším průměru, schopen nadnášet celou kouli naplněnou všemi náležitostmi. Byla tak vytvořena paleta možností, jakým způsobem pro kouli vytvářet nadnášecí podmínky, různá měření a experimenty mohou mít různé požadavky a podmínky, kromě toho se zde nabízí možnost pro hledání ideálních stavů a experimentování s vlivem parazitujících vlivů pro další vývoj podobných zařízení.

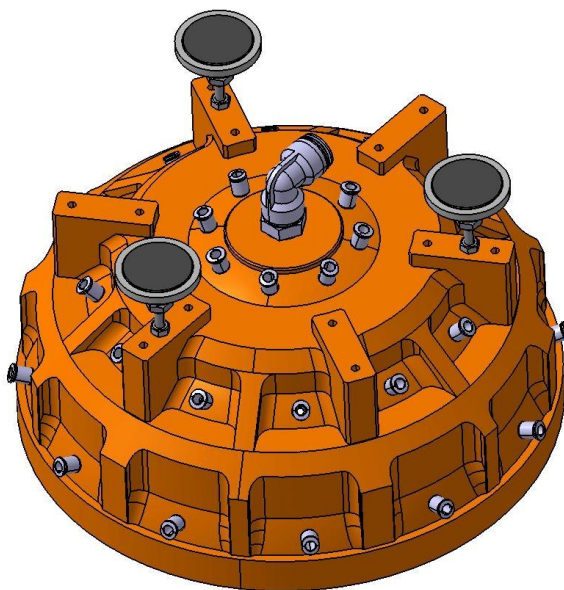
Později byla v rámci těchto zájmů přidána ještě prostření řada dalších osmi závitových děr M8, ta byla umístěna na předběžné místo, přibližně do středu, mezi již existující řady.

Hlavní konstrukční omezení při úpravách výrobní verze lože bylo zaručení možnosti našroubování pneumatických šroubení tak, aby byl pneumatický výstup v blízkosti sférické plochy pánve a bylo dosaženo požadovaného chování proudění vzduchu. Stěna tak nemohla být konstruována příliš silná, zvolené pneumatické šroubení v následující kapitole mají krátkou závitovou část a v důsledku způsobu jejich montáže by je nebylo možno zavádět hluboko do zahluobených otvorů. Na druhé straně musel být obrobek, potažmo polotovar, dobře upínatelný a dostatečně robustní na to, aby nenastaly potíže s odvodem tepla, tvarovou stabilitou při obrábění nebo s nevyhovující tuhostí.

Upínání na výrobní stroj bylo vyřešeno pomocí přišroubování za set dvanácti závitových otvorů se závitem M6 na masivních patkách přečnávajících přes základní, vnější sférickou plochu. Doplněny byly žebra ve vhodných bezpečných vzdálenostech od sebe a obruče rozdělující tři jednotlivé řady závitových otvorů tak, aby všechna šroubení byla normálově na sférickou plochu a měla pro sebe dostatek místa při montáži. V patkách byla vedle technologických otvorů navržena i trojice dalších závitových děr se závitem M6 pro našroubování ukotvovacích prvků s patkou a kloubem, jež se uvažovali se zajištěním kontramaticí. Tyto tři závitové díry pro ukotvení se nacházejí na roztečné kružnici o průměru 220 mm. [43]



Obrázek 47 – Návrh sférického lože jako výsledek konzultace s výrobou [43][S1]



Obrázek 48 – Návrh sférického lože jako výsledek konzultace s výrobou [43][S1]

Se sférickým ložem tak byla vyřešena řada technologických problémů, zprvu obrobek s jednoduchou geometrií se tak stal tvarově komplikovaným, nicméně však plně realizovatelným. Vícero výrobců na tomto, z počátku zdánlivě nenáročném, díle odřeklo spolupráci, a to právě z důvodu kombinace velikosti a řadě zmíněných technologických komplikací.

Materiál sférického lože byl zvolen dural 6082 T651 z důvodu nižší hmotnosti, dostatečných mechanických vlastností a dostupný polotovár.

4.7 Pneumatický systém

4.7.1 Předběžná hmotová rozvaha koule

Pro následující nadimenzování pneumatického systému bylo nezbytné přistoupit k hmotnostní rozvaze nadnášené koule, hmotnosti byly zjištěny na základě kombinace kvalifikovaného odhadu a informací z aktuálního CAD modelu. Tyto dílčí hmotnosti byly:

2,2 kg - Výtisky polokoulí z materiálu PA12

0,1 kg – Baterie a příslušná elektronická deska

0,15 kg – Desky řídicí elektroniky a kabeláž

0,2 kg – Pohyblivá závaží

0,15 kg – Motory a motorová lože

0,2 kg – Spojovací materiál, prostor pro pevná závaží

Hmotnost nadnášené koule bez měřící aparatury ve vnitřním prostoru se tak ve fázi návrhu předpokládala 3 kg.

4.7.2 Dimenzování pneumatického systému

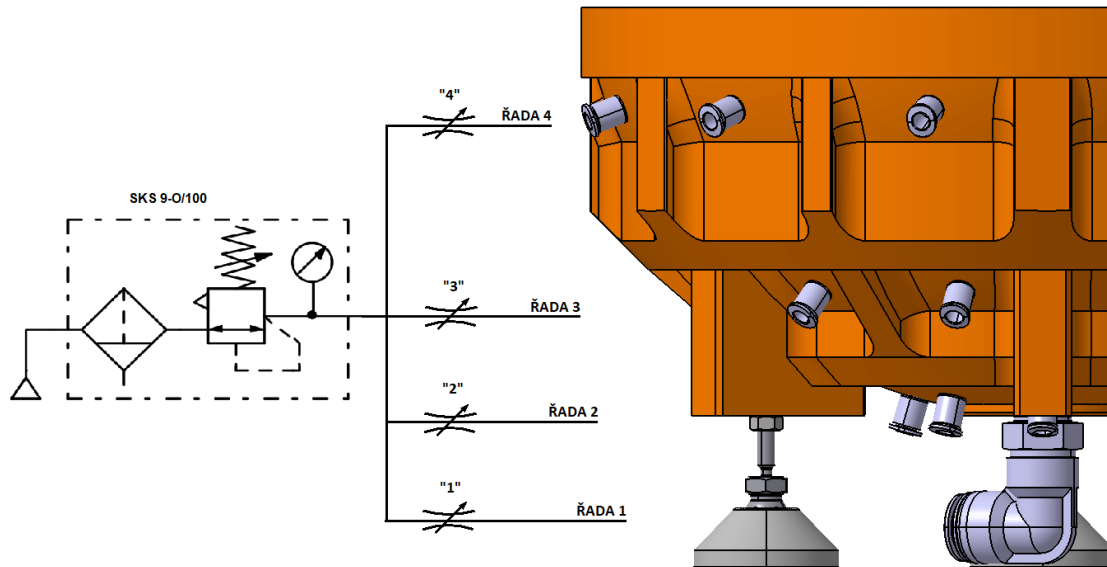
Pneumatický systém zabezpečuje nadnášení koule, pro nadnášení má mít možnost variabilního nastavení pro různé způsoby generování vzduchového polštáře a ovlivňování proudění vzduchu v tenkých spárách mezi koulí a sférickým ložem. Na dně lože se nachází závitový otvor G3/8, který je osazen šroubením s pneumatickou hadicí o vnějším průměru 16 mm. Takto nadimenzovaná hadice byla zvolena takovým způsobem, aby při stabilním tlaku na 0,6 MPa byla generovaná síla, tohoto jediného výstupu, dostatečná pro nadnášení koule včetně všech jejích vnitřních náležitostí.

Vnitřní průměr hadice je 11 mm, což odpovídá ploše průřezu 95 mm². Součinem je snadno zjištěno, že pro stabilní tlak 0,6 MPa je generovaná síla stlačeného vzduchu vedoucí konkrétním šroubením 57 N.

Předpokládaná hmotnost návrhu činila 3 kg, pro nadzvednutí samostatné koule o této hmotnosti je třeba překonání síly, jež je udělena gravitačním zrychlením, tato síla činí 29,4 N. Koule je tímto přístupem nadzvednuta s bezpečností přibližně 2 a to pouze tímto jediným pneumatickým šroubením G3/8 při tlaku 0,6 MPa.

Dále je v loži přítomno celkem 28 šroubení M8, které jsou rozmístěny ve třech ve třech řadách. Ve střední řadě a řadě nejbližší k šroubení G3/8 bylo modelováno po osmi pneumatických výstupech. V řadě nejvrchnější, nejbližší k maximálnímu průměru, bylo modelováno dvanáct výstupů. Šroubení M8 jsou konstruovány pro pneumatické hadice o průměru 6 mm, tyto hadice mají vnitřní průměr, jímž proudí pracovní medium 4 mm, což odpovídá průřezu hadice 12,5 mm². Při stabilním tlaku 0,6 MPa tak je generovaná síla stlačeného vzduchu jedním šroubením 7,5 N. Je nezbytné poznamenat, že veškerá šroubení M8 s hadicemi o vnějším průměru 6 mm jsou ke smyslu síly, jež na kouli působí pod úhlem. Tento úhel je pro případ spodní řady 16°, pro případ střední řady 43° a pro vrchní řadu 70°. Pro generování hlavních nadnášecích sil se však předpokládalo využití pouze u spodní řady s odklonem 16°, potenciální síla 7,5 N je tak rozdělena na složky působí vzhůru a do středu k ose lože. Čistě nadnášecí síla generována ze šroubení M8 je tak uvažována pouze kosinová složka síly 7,5 N pod úhlem 16°, čemuž odpovídá síla 7,2 N. V případě osmi šroubení je tak celková síla spodní řady působící vzhůru 57,6 N, což je přibližně stejně jako v případě jediného spodního šroubení G3/8. Zbylá šroubení v řadě střední a vrchní nebyla určena primárně pro nadnášení, nýbrž pro udržování koule v optimální poloze a experimentování s různými kombinacemi proudění tlakového vzduchu při generování vzduchového polštáře.

Jednotlivé řady pneumatických šroubení mají uvažovány separátní možnosti škrcení, pomocí zvolených pneumatických prvků byl v kapitole realizace zapojen systém, který zmíněné umožňuje. Pro detailní návrh bylo uvažováno následující pneumatické schéma.










Obrázek 49 – Pneumatické schéma [21] - upraveno [43]




Pro generování vzduchového polštáře byl uvažován kompresor s integrovaným vzdušníkem o dostatečné kapacitě. Součástí má být úprava vzduchu zahrnující filtr s odlučovačem vody. Kompresor se vzdušníkem je v návrhu připojen k rozvodnému prvku, za nímž se nachází čtyři škrťací ventily, po jednom pro každou řadu šroubení, pneumatických výstupů.

4.7.3 Volba pneumatických prvků

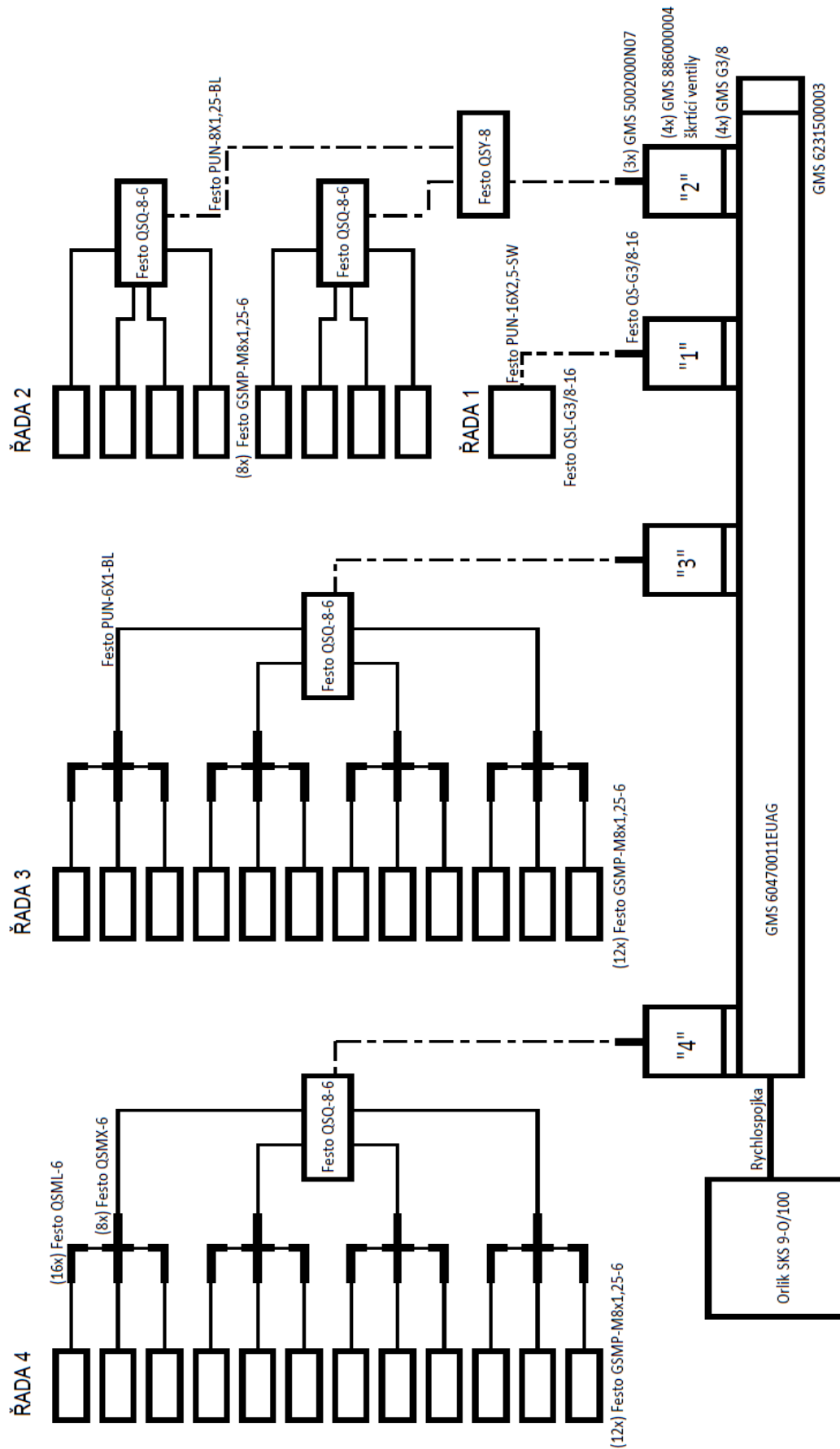
Po nadimenzování pneumatického systému postup pokračoval přes volbu konkrétních pneumatických prvků. Jako poskytovatel komponent byla zvolena společnost Festo v kombinaci se společností GMS.

Na základě obrázku 49 v předchozí kapitole bylo rozkresleno podrobnější schéma pro ujasnění potřebných komponent. Shrnutí vybraných komponent pro realizaci zapojení reprezentuje tabulka 1 a obrázek 50.

Název prvku	Označení	Poznámka	Obrázek
L Šroubení – hadice 16mm	Festo QSL-G3/8-16	Je použito jedenkrát a umístěno ve spodku sférického lože pro pneumatickou hadici o vnějším průměru 16mm.	
Šroubení – hadice 6mm	Festo QSMP-M8X1.25-6	Je instalováno na všech ostatních vstupech tlakového vzduchu do pánve lože.	
Vzduchová hadice 6 mm	Festo PUN-6X1-BL	Použité vzduchové hadice jsou navrženy o průměrech 16 a 6 mm, což odpovídá výstupům tlakového vzduchu do lože. Dále jsou použity vzduchové hadice o průměru 8 mm pro přepojování před hadicemi o průměru 6 mm.	
Vzduchová hadice 8 mm	Festo PUN-8X1,25-BL		
Vzduchová hadice 16 mm	Festo PUN-16X2,5-SW		
Spojka L	Festo QSML-6	Tyto pneumatické prvky slouží pro vhodné propojení vzduchových hadic před škrťacími ventily, dle schématu.	
Spojka X	Festo QSMX-6		
Spojka Y	Festo QSY-8		
Redukce hadice 6 na 8 (4 vstupy 1 výstup)	Festo QSQ-8-6		
Škrťací ventil G3/8 vnitřním závitem	GMS 886000004	Zabezpečuje možnost škrťení přívodu vzduchu každé z uvažovaných řad pneumatických šroubení.	

Šroubení – hadice 8 mm	GMS 5002000N07	Zvoleno pro zabezpečení propojení škrťících ventilů s 8 mm rozvodovými vzduchovými hadicemi pro jednotlivé řady. Druhá z komponent má stejnou úlohu pro samotnou hadici o průměru 16 mm.	
Šroubení – hadice 16 mm	Festo QS-G3/8-16		
Rozdělovací lišta	GMS 60470011EUAG	Jedná se o prvek, ke kterému jsou v návrhu připojeny všechny čtyři škrťící ventily pomocí závitových spojek GMS G3/8, na jednom nevyužitém výstupu je uvažována závitová záslepka GMS 6231500003. Na vstupu rozdělovací lišty se nachází zašroubovaná rychlospojka pro spojení s kompresorovou stanicí a dodávku tlakového vzduchu.	

Tabulka 1 – Přehled zvolených pneumatických prvků [22][23][24][25][26][27][28][29][30][31]



Obrázek 50 – Přehled pneumatického zapojení [S2]

Kompresorová stanice - Orlik SKS 9-O/100

Předběžně byla zvolena kompresorová stanice s pístovým kompresorem Orlik SKS 9-O/100. Předpokládalo se, že s danou výkonností a 100 litrovou kapacitou vzdušníku bude dostatečná pro aplikaci zabezpečující průběh experimentů při nadnášení ADCS koule. [32]

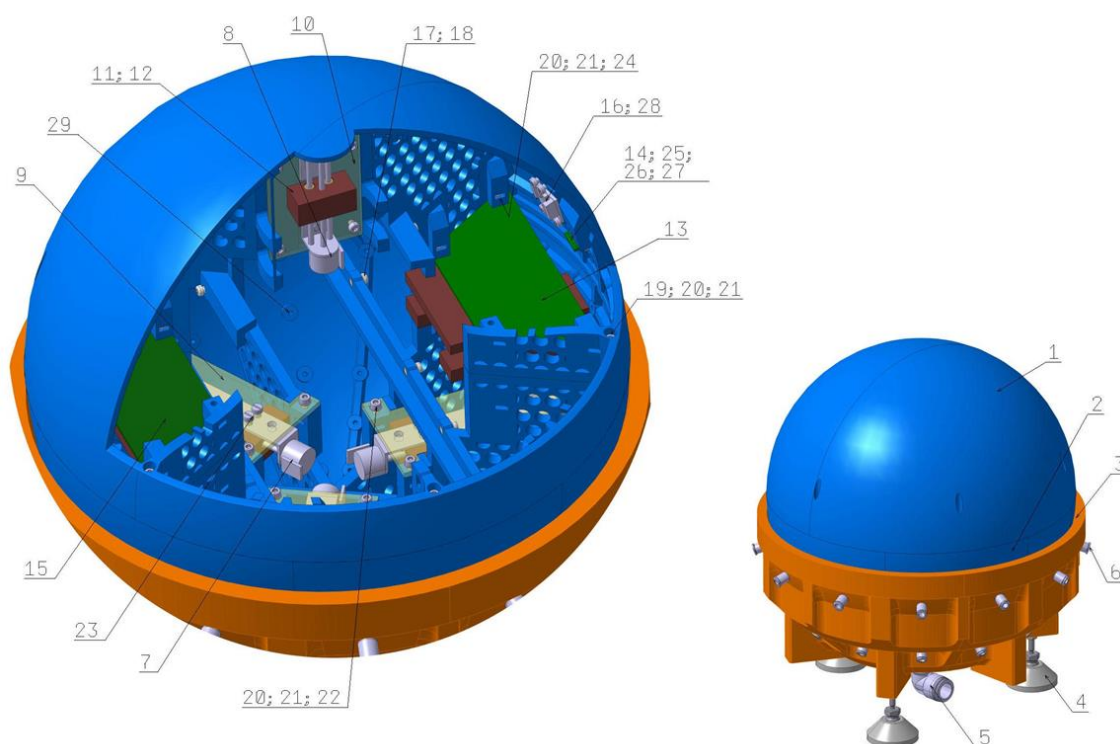
Typ kompresoru		Soustrojí EK 9-O	Stanice PKS 9-O /50	Stanice PKS 9-O /100	Stanice SKS 9-O /100
Teoretická výkonnost	(m ³ /h)	15,1			
	(l/min)	252			
Výkonnost kompresoru při jmenovitém výtlačném přetlaku	(m ³ /h)	9,0			
	(l/min)	150			
Jmenovitý výtlačný přetlak	(bar)	7			
Přetlakový rozsah aut. cyklu	(bar)	-	6 - 8		
Nejvyšší dovolený tlak PS	(bar)	8,5			
Nejnižší a nejvyšší dovol. teplota TS	(°C)	-5 až 40		5 až 40	
Sací tlak absolutní	(bar)	1			
Sací teplota	(°C)	20			
Druh vzdušiny		vzduch			
Počet válců		2			
Počet stupňů		1			
Průměr válce	(mm)	50			
Zdvih pístu	(mm)	45			
Jmenovité otáčky	(min ⁻¹)	1410			
Teplota na výstupu	(°C)	70	30	30	30
Příkon na hřídeli kompresoru	(kW)	1,2			
Chlazení		vzduchem			
Garantovaný akustický výkon L _{WA}	(dB)	85			
Hladina hluku *	(dB)	71			
Hmotnost	(kg)	32	51	61	62
Objem tlakové nádoby	(litry)	-	50	100	100
Stupeň ochrany		IP 44			
Max. počet zapnutí kompresoru	(h ⁻¹)	15			
Instalovaný výkon	(kW)	1,5			
Napětí	(V)	3 x 400			
Kmitočet	(Hz)	50			

Obrázek 51 – Parametry kompresoru [32]



Obrázek 52 – Zvolený kompresor Orlik SKS 9-O/100 [32]

4.8 Shrnutí detailního návrhu



Obrázek 53 – Schéma detailního návrhu [S1][34]

Poz.	Název komponenty	Norma / číslo výkresu	Materiál	Ks
1	Koule – horní díl	N/A	PA12	1
2	Koule – spodní díl	N/A	PA12	1
3	Lože se sférickou pávní	N/A	Dural	1
4	Podpora	Alutec 405006		3
5	L Šroubení – hadice 16 mm	Festo QSL-G3/8-16		1
6	Šroubení – hadice 6 mm	Festo QSMP-M8x1.25-6		32
7	DC12v krokový motor s lineární posuvovou osou	ePID 4021322183 VS2-VZL-DRW-DD-202-a		3
8	DC12v krokový motor s lineární posuvovou osou - zkrácený	ePID 4021322183 VS2-VZL-DRW-DD-203-b		1
9	Lože motoru	VS2-VZL-DRW-DD-205-a	PCB	3
10	Lože motoru – krátká varianta	VS2-VZL-DRW-DD-206-b	PCB	1
11	Závaží	VS2-VZL-DRW-DD-204-a	AISI 316	4
12	Vedení – kluzná vložka	VS2-VZL-DRW-DD-201-a	PA6 / PTFE	8
13	Řídící PCB	(VS2-VZL-DRW-DD-207-a)	PCB	1
14	PCB s micro USB konektorem	N/A	PCB	1

15	PCB baterie	(VS2-VZL-DRW-DD-207-a)	PCB	1
16	PCB s tlačítkem, integrovaná LED	N/A	PCB	1
17	M3 závitová vložka	DIN16903D	Mosaz	16
18	Plastový šroub M3x6	KSS-PF-306K_M3x6	PA6	16
19	Šroub M3x35 vnitřní šestihran	DIN912 M3x35	AISI 304	6
20	Matice M3	DIN934 M3	AISI 304	30
21	Podložka M3/3,2	DIN433 M3	AISI 304	30
22	Šroub M3x12 vnitřním šestihran	DIN912 M3x12	AISI 304	16
23	Šroub M4x5 s drážkou	DIN84 M4x5	AISI 304	24
24	Šroub M3x10 vnitřním šestihran	DIN912 M3x10	AISI 304	8
25	Šroub M2,5x10 vnitřním šestihran	DIN912 M2,5x10	AISI 304	2
26	Matice M2,5	DIN934 M2,5	AISI 304	2
27	Podložka M2,5/2,7	DIN433 M2,5/2,7	AISI 304	2
28	Závitořezný šroub d3x8	AN9091 d3x8	AISI 304	4
29	Pevné nevývahy	DIN913; 934; 9021 M2,5/M3	AISI 304	

Tabulka 3 – Seznam komponent detailního návrhu [34]

Seznam pneumatických prvků mimo souhrnné schéma návrhu

Poz.	Název komponenty	Norma / číslo výkresu	Ks
30	Vzduchová hadice 6	Festo PUN-6X1-BL	
31	Vzduchová hadice 8	Festo PUN-8X1,25-BL	
32	Vzduchová hadice 16	Festo PUN-16X2,5-SW	
33	L-spojka pro hadice 6	Festo QSML-6	16
34	X- spojka pro hadice 6	Festo QSMX-6	8
35	Y- spojka pro hadice 8	Festo QSY-8	1
36	Redukce hadice 6 na 8 (4 vstupy 1 výstup)	Festo QSQ-8-6	3
37	Škrťací ventil G3/8 vnitřním závitem	GMS 886000004	4
38	Šroubení – hadice 8 mm	GMS 5002000N07	3
39	Šroubení – hadice 16 mm	Festo QS-G3/8-16	1
40	G3/8 závitová spojka	GMS G3/8	1
41	G3/8 záslepka	GMS 6231500003	1
42	Rozdělovací lišta	GMS 60470011EUAG	1
43	Kompresorová stanice s příslušenstvím	Orlik SKS 9-O/100	1

Tabulka 4 – Seznam komponent detailního návrh – pneumatický systém [34]

5 Realizace nového testovacího zařízení

Po zpracování detailního návrhu technického řešení nového testovacího zařízení, „ADCS koule“, bylo přistoupeno k realizační fázi, na jejímž konci se předpokládalo odevzdání funkčního zařízení. Některé události, jež nastaly v průběhu realizace, vracely navržené fragmenty zpět k návrhu, kdy bylo nezbytné najít jiné řešení, snáze realizovatelné. V předchozích kapitolách jsou k těmto událostem doplněny odkazy na pasáže v této části.

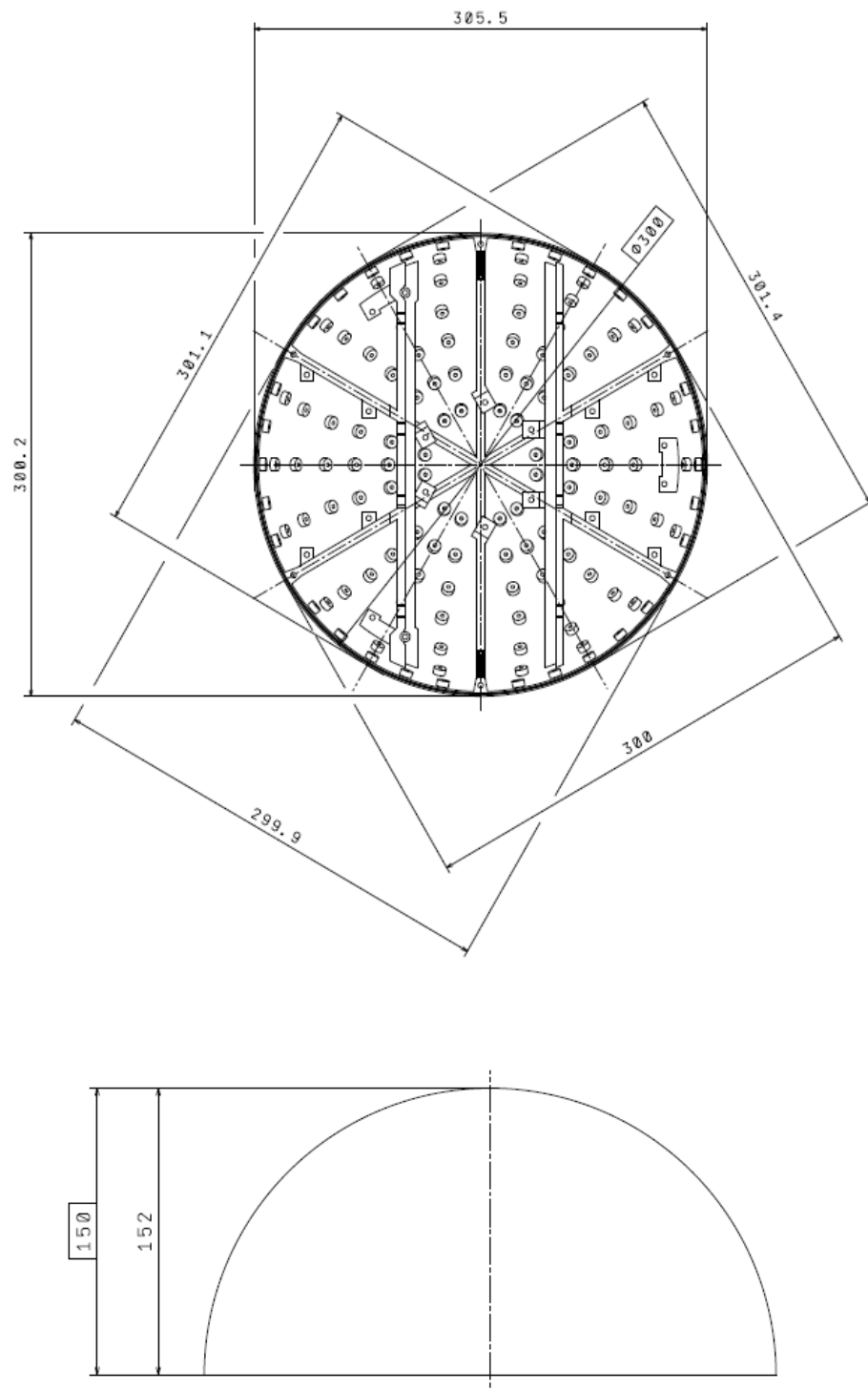
5.1 Tisknuté polokoule

Náročnou část realizace zaujímá pasáž 3D tištěných dílů pomocí technologie MJF. V první fázi realizace byly pro výrobu uvolněny díly s tloušťkou stěny 3 mm s šesti hlavními žebry o tloušťce 6 mm, jejichž úlohu doplňovaly kolejnice pro uložení až 2U konstrukce.

Při zadávání do výroby nebyl očekáván žádný problém sestavení hotových dílů vlivem nepřesností tisku. Bohužel se na prvních vyráběných exemplářích objevily daleko větší nepřesnosti, než byly při použití technologie MJF předpokládány. Dostupné popsané technologické zásady pro návrh dílů pro výrobu technologií tisku MJF a zabezpečení dosažení předepsaných přesností jsou velmi obecné. Výroba tištěných dílů i za pomoci pokročilých technologií tisku, jako je MJF, tak v současné době může být experimentální iterativní proces, na němž nejsou k dispozici věrohodné simulace výsledků procesu.

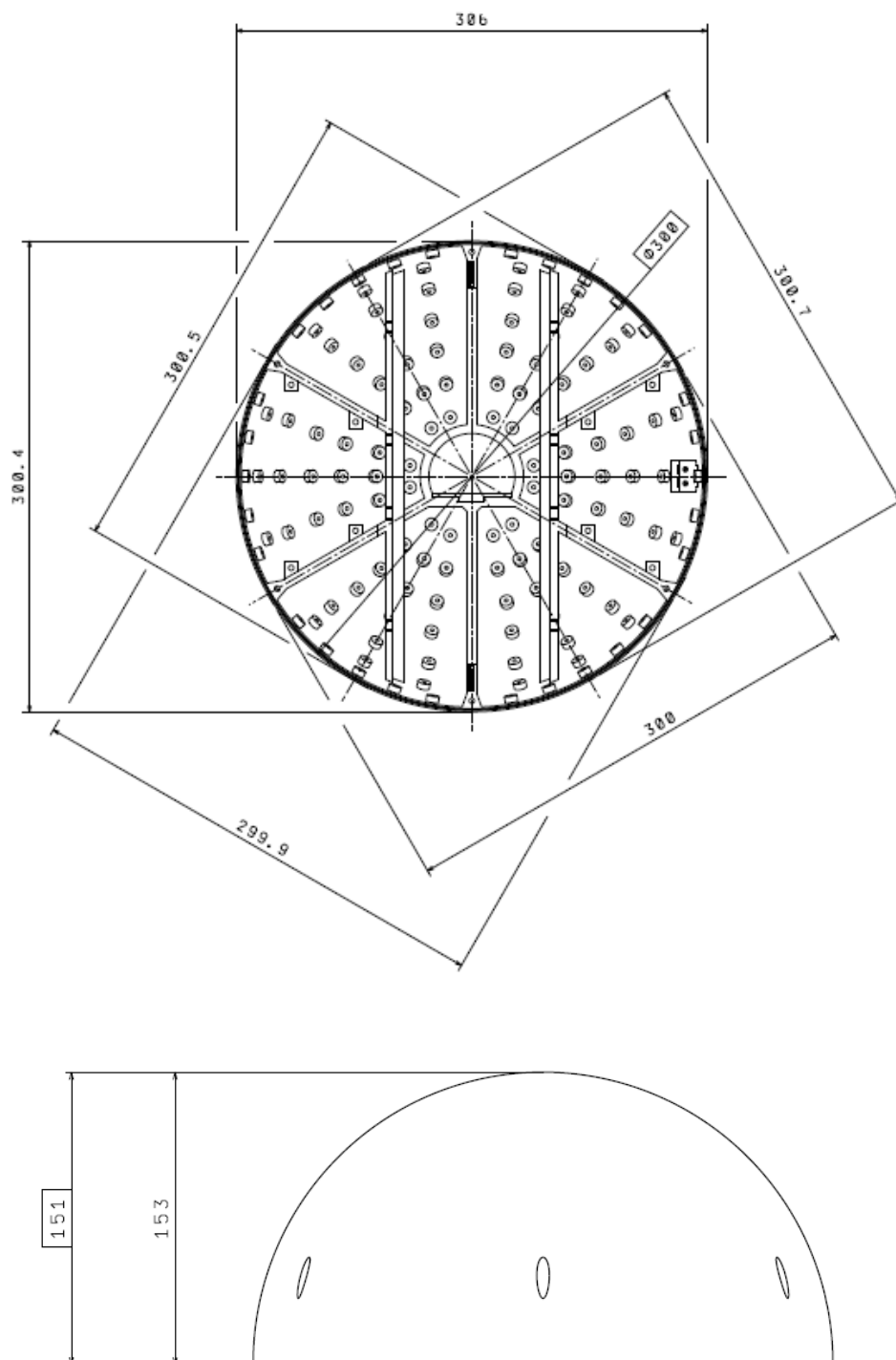
Výsledek prvního vyrobeného exempláře koule nebyl zdaleka vyhovující. Dílčí polokoule nebylo možné sesadit dohromady pro odchylky, zejména na maximálních průměrech dílů v části lemů. Místo s globálně největší odchylkou od jmenovitého rozměru se nacházelo na maximálním průměru kolmo na upínací kolejnice. Tyto odchylky byly měřeny přes průměr obou dílů na několika místech maximálního průměru. Výsledky těchto hrubých měření byly zaznamenány do schémat, obrázků 54 a 55. Dále následovalo měření na 3D scanu. Z výsledků měření bylo patrné, že takto vytištěné díly není možné mechanicky opravit a dosáhnout nutného sesazení částí. Pravděpodobnost neuspokojivého výsledku při výrobě i podobných dílů je vhodné výrazně snížit podrobnější konzultací s výrobou nebo porovnáním již existujících podobných výtisků, jsou-li k dispozici.

DOLNÍ DÍL



Obrázek 54 – Naměřené rozměry prvního tisku – dolní díl [S1]

HORNÍ DÍL



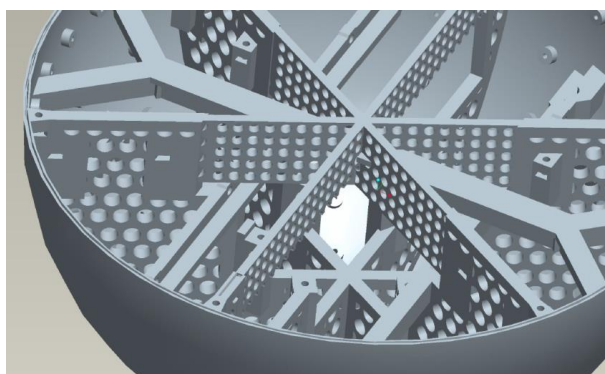
Obrázek 55 – Naměřené rozměry prvního tisku – horní díl [S1]

Zamýšlená oprava měla spočívat v mechanickém úběru materiálu stěny, aby bylo dosaženo sférického průměru 300 mm s přesností rámcově na $\pm 0,3$ mm.

Z výsledků měření je zřejmé, že se kromě vypouknutí na vnější sférické ploše nachází i prohlubně, ty by však bylo možné opravit na jmenovitý rozměr s použitím tmelu, případně nechat lokálně v oblasti prohlubně o určité úchylce, za cenu možného zvýšení parazitních momentů působící při experimentu.

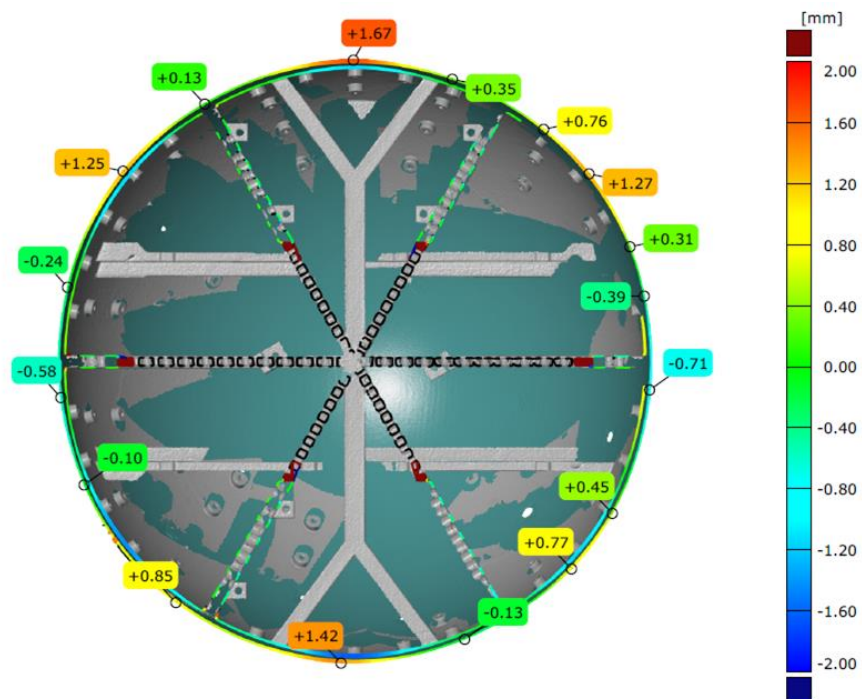
Zmíněné způsoby úpravy byly pro daný výtisk neaplikovatelné, největší naměřené úchylky byly většího rozměru než samotná tloušťka stěny. Dosažení potřebného tvaru těchto výtisků nebylo dosaženo ani při pokusech rovnání za tepla.

Řešení situace pokračovalo přes konzultaci s výrobou. Následovalo doplnění masivních žebér, které prodlužovaly žebra již existující, dále bylo zkonstruováno nové žebro spojující protilehlé kraje, kde byly naměřeny největší deformace. Žebro bylo zamýšleno jako vyjímatelné, které se po tisku s delším pozvolným chladnutím odstraní vyříznutím. [44]

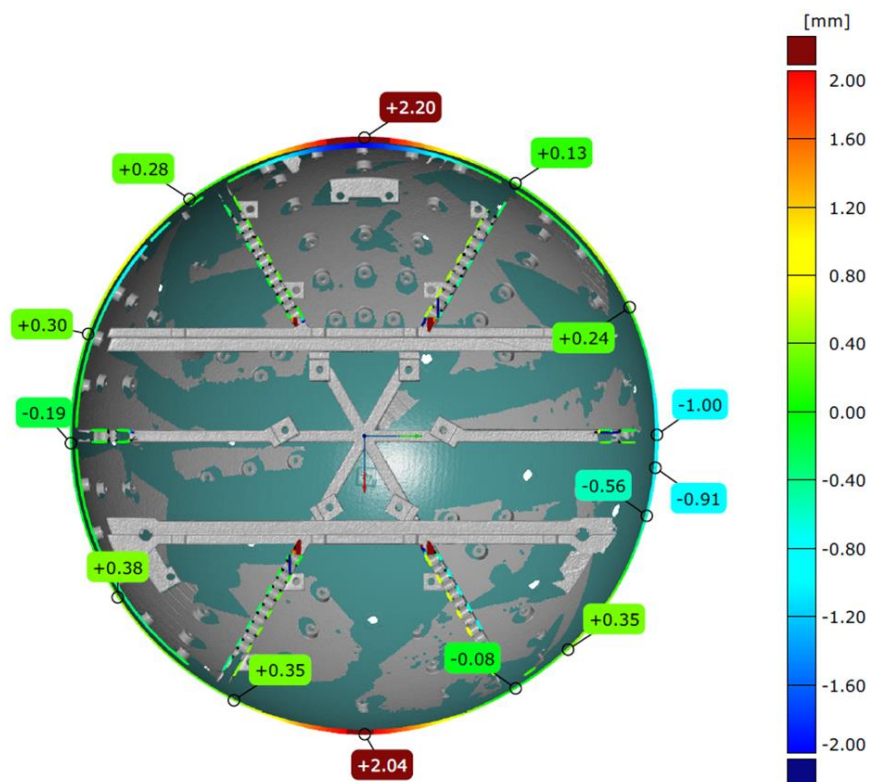


Obrázek 56 – Návrh odstranitelných výtuzných žebér ve spolupráci s výrobou [44]

S žebry, takto navrženými, byl vytisknut jeden díl koule. Výtisk byl podroben měření na 3D scanu před a posléze i po odstranění žebér. Postupy bohužel opět nepřinesly očekávané výsledky, ve výtisku se nacházelo příliš velké vnitřní pnutí z výrobního procesu. I přes opatrnější postup s pozvolnějším chladnutím tak po odstranění nových žebér došlo k deformacím, které byly opět příliš velké na to, aby mohl být výtisk mechanicky opraven na vyhovující výrobek.



Obrázek 57 – 3D Scan před odstraněním žebér - řešeno ve spolupráci s výrobou [44]



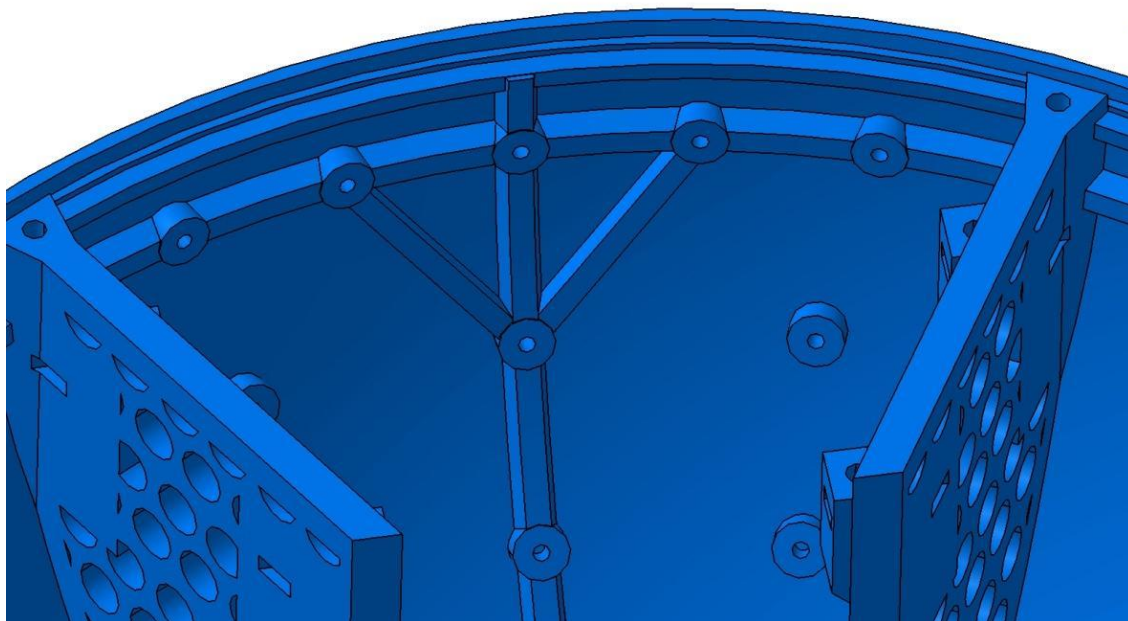
Obrázek 58 – 3D Scan po odstranění žebér – řešeno ve spolupráci s výrobou [44]

5.1.1 Realizace

Pro dosažení optimálního tvaru koule tak bylo přistoupeno k návrhu dalšího postupu, kdy se zvážily tři různé varianty pro dosažení kýženého výsledku. Varianty jsou představené v podkapitole 5.1.2

Ve všech variantách byla stěna zesílena o jeden milimetr směrem do vnitřku koule, jmenovitá tloušťka stěny hotových polokoulí tak byla situována na 4 mm. Toto rozhodnutí bylo učiněno se smířením se s nepřesnostmi, které by zůstaly z výroby. V předchozích výtiscích v mechanických opravách bránil především fakt, že by při úběru materiálu na jmenovitý rozměr v místech vypouknutí nezbyla žádná, nebo pouze velmi tenká, stěna a díly by tak ztratily požadovanou tuhost. Silnější stěna tak uděluje více možností úběru materiálu i značně snižuje riziko, že příliš velké nepřesnosti nebo deformace při výrobě vůbec nastanou.

Dále bylo pro, všechny tři, varianty vytvořené specifické žebrování popsané v rámci detailního návrhu v kapitole 4.1. Jednalo se o konstrukční prvek, který si kladl za cíl dále snížit riziko vysokých nepřesností tisku.



Obrázek 59 – Návrh trvalých výztužných žeber [S1]

5.1.2 Varianty úpravy výtisků

Zvažované varianty byly především:

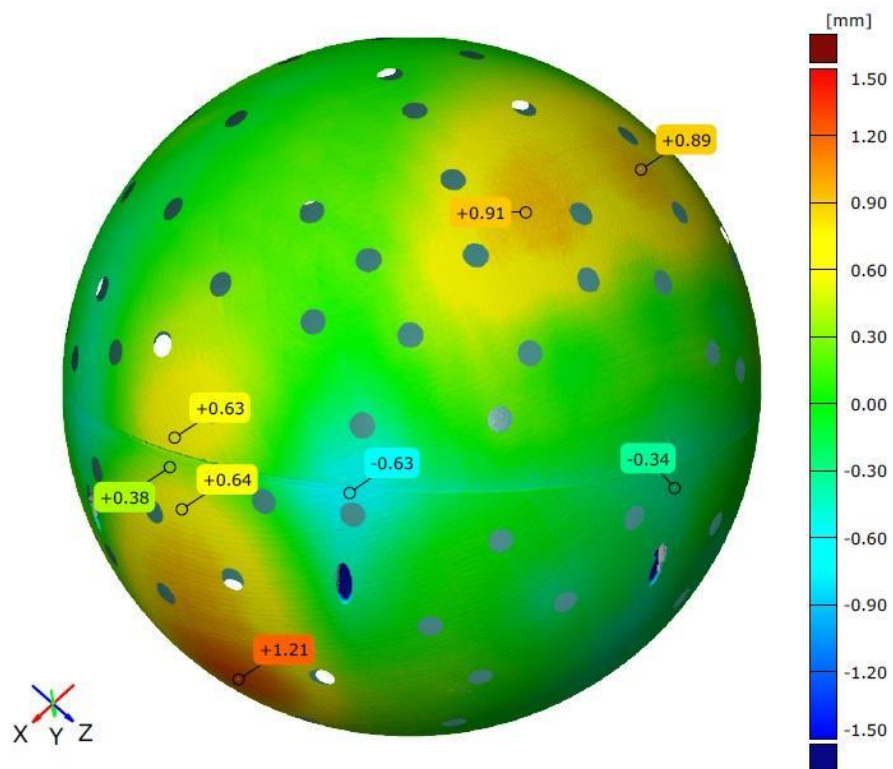
- Přidání přídávku na obrábění na vnější plochy obou dílů polokoulí. Přídavek pro obrobení by i zpevnil celou konstrukci dílů při tisku, vnější sférický průměr by byl navýšen z 300 mm na 306 mm, tloušťka stěny vyrobeného polotovaru pro obrábění by byla 7 mm, 3 mm materiálu by tak bylo ubráno po celé sféře dílů pomocí CNC frézky. Polotovar by byl pro obrábění upnut k přípravku přišroubováním prostřednictvím otvorů, jež jsou při montáži využity pro spojení polokoulí dohromady. Velká nevýhoda této varianty je o poznání dražší tisk v důsledku velkého množství přidaného materiálu. Obě polokoule by bylo nutné obrábět zvlášť, předpokládalo se, že po sešroubování polokoulí a utažení šroubů se geometrie obou dílčích částí v důsledku více přítomných nepřesností zmodifikuje. Velmi přesně obrobené díly koule by tak, při sesazení a utažení šroubů, změnil svůj tvar nepředvídatelným způsobem, což bylo vyhodnoceno jako rizikové. Možným řešením by bylo obrábět kouli v sešroubovaném a staženém stavu, pro toto by bylo nezbytné zkonstruovat komplikovaný upínací přípravek, který by CNC obrábění celé koule umožnil.
- Druhou variantu zaujímá stanovisko žádný přídavek na obrábění nepřidávat a ručním opracováním ubrat přebytečný vypouklý materiál nad jmenovitý průměr 300 mm. Velká výhoda metod ručního opracování spočívá v tom, že je možné bez problému provádět úběr materiálu na sestavené a stažené kouli. Koule by tak tímto způsobem byla opracována v takových podmínkách, v jakých by byla i využívána. Drobné prohlubně by se zahladily tmelem nebo ponechaly výměnou za o něco vyšší parazitující momenty na zařízení.
- Třetí variantou byla kombinace obou variant výše uvedených. Varianta by obnášela ruční opracování v kombinaci s přídávkem, který by činil 1,5 mm. Jmenovitý průměr polotovaru by tak čítal 303 mm a nejspíše by zcela odpadly potíže s řešením prohlubní pod průměrem 300 mm.

Zvolena byla varianta nejlevnější a zároveň druhá nebo první nejjednodušší, tedy varianta druhá.

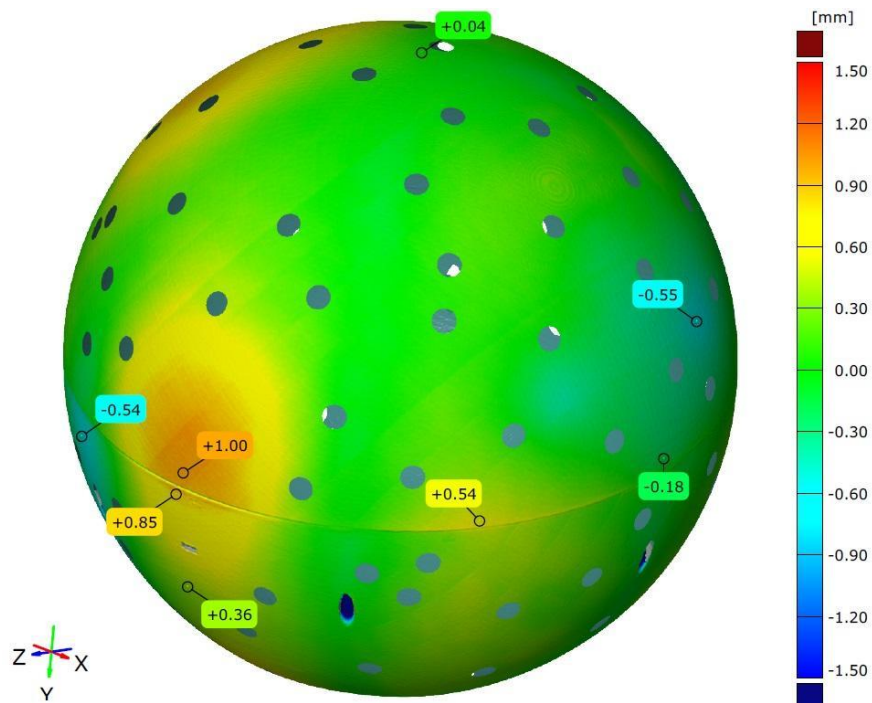
Tisk druhé varianty již nedopadl nijak zásadně od očekávání. Výtisky byly podrobeny opět 3D scanu a měření na souřadnicovém měřicím přístroji Accura.

3D scan proběhl v sešroubovaném, staženém, stavu obou dílů. Dodatečně proběhlo měření na souřadnicovém měřicím přístroji, kde byl měřen každý díl jednotlivě, pro lepší vyšetření nepřesných oblastí. Z výsledků měření je patrné v jak velkém rozsahu jsou díly tvarově závislé na vzájemném stažení nebo jednotlivém ložení.

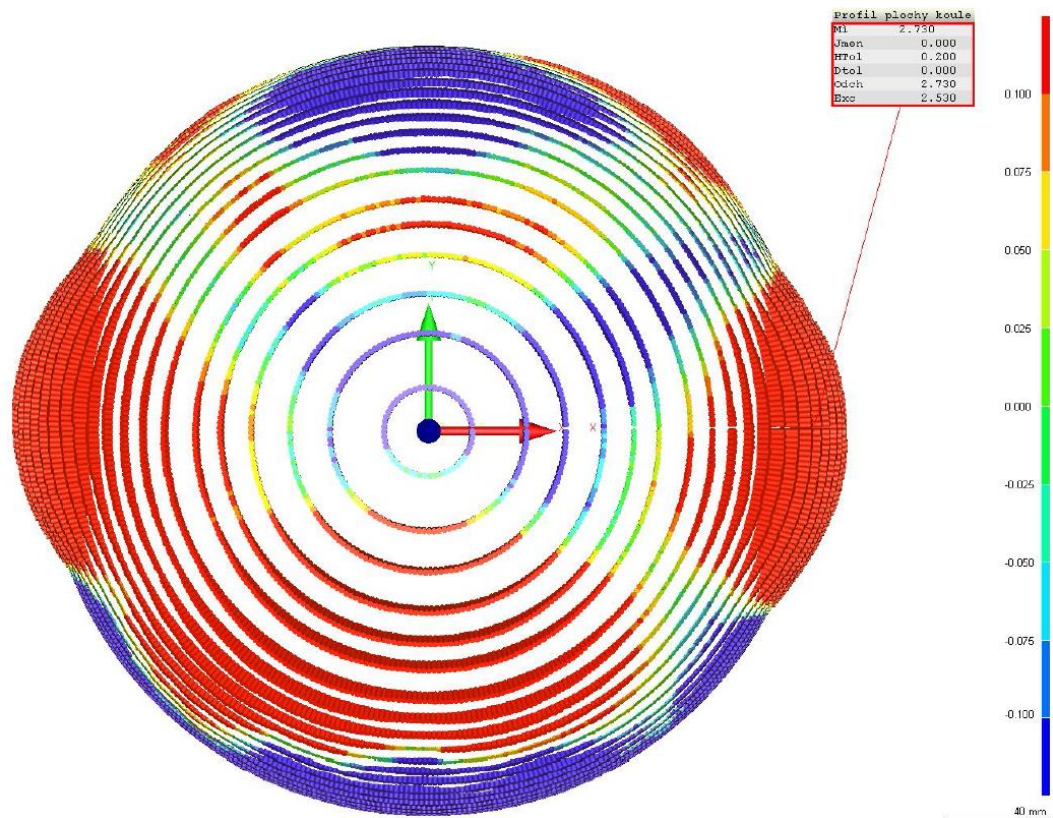
Z výsledků měření pořízených ze souřadnicového měření byly vyšetřeny oblasti s největšími odchylkami do kladných hodnot za jmenovitý sférický průměr. Charakteristické body největších odchylek a příslušné oblasti byly označeny na skutečných dílech pro usnadnění následujících prací.



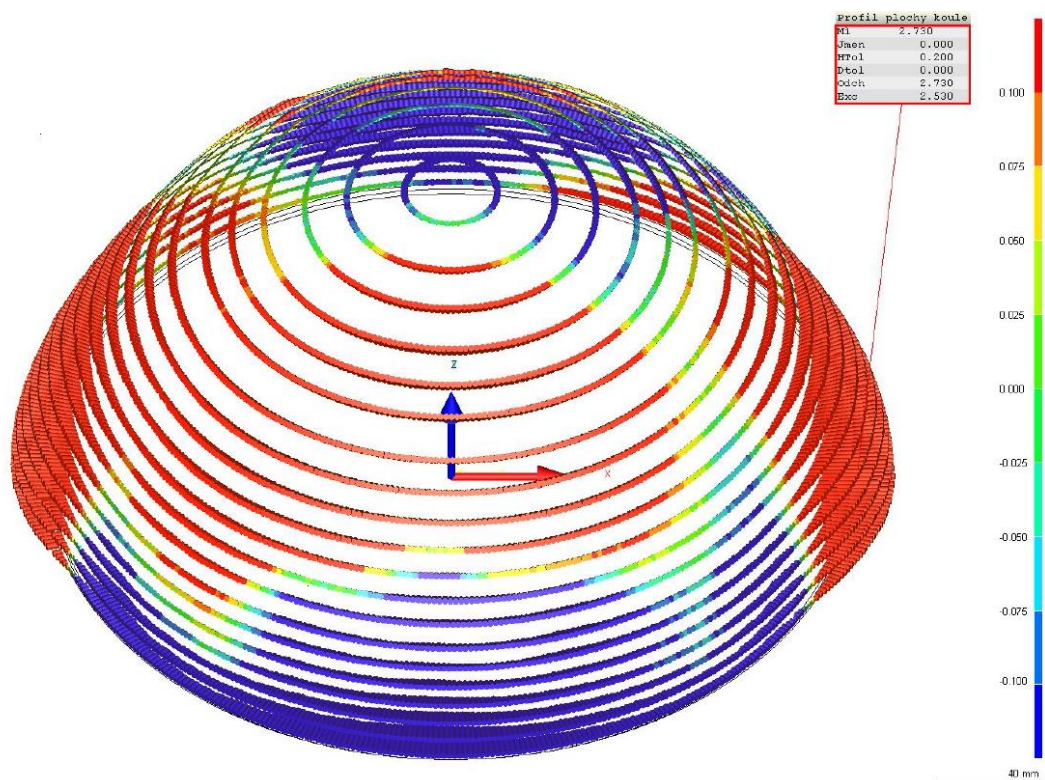
Obrázek 60 – 3D Scan sesazených a stažených dílů výtisků I – řešeno ve spolupráci s výrobou [44]



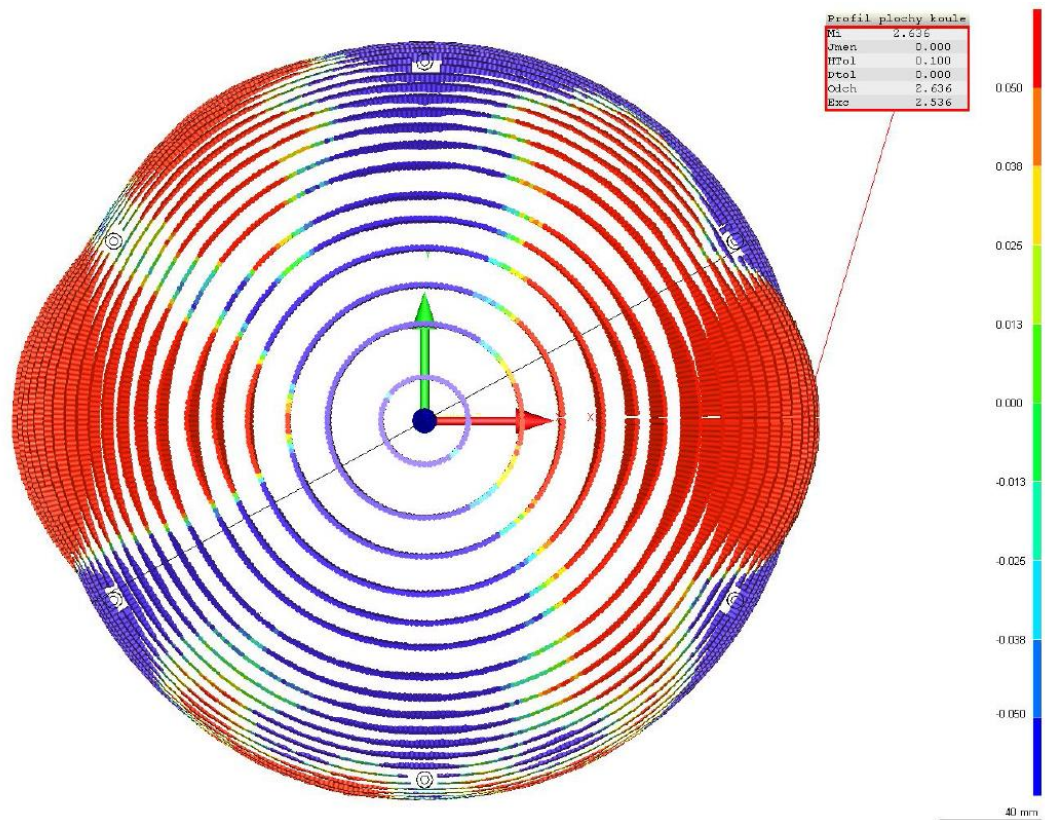
Obrázek 61 – 3D Scan sesazených a stažených dílů výtisků II – řešeno ve spolupráci s výrobou [44]



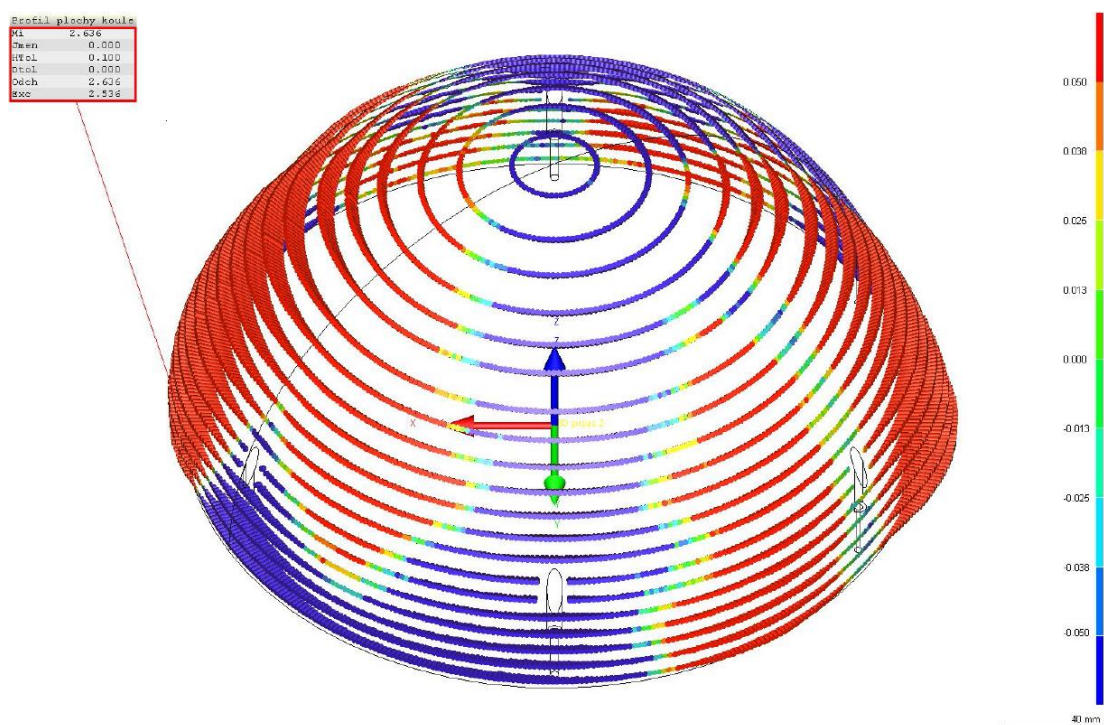
Obrázek 62 – Výsledky souřadnicového měření, samostatný spodní díl I



Obrázek 63 - Výsledky souřadnicového měření, samostatný spodní díl II



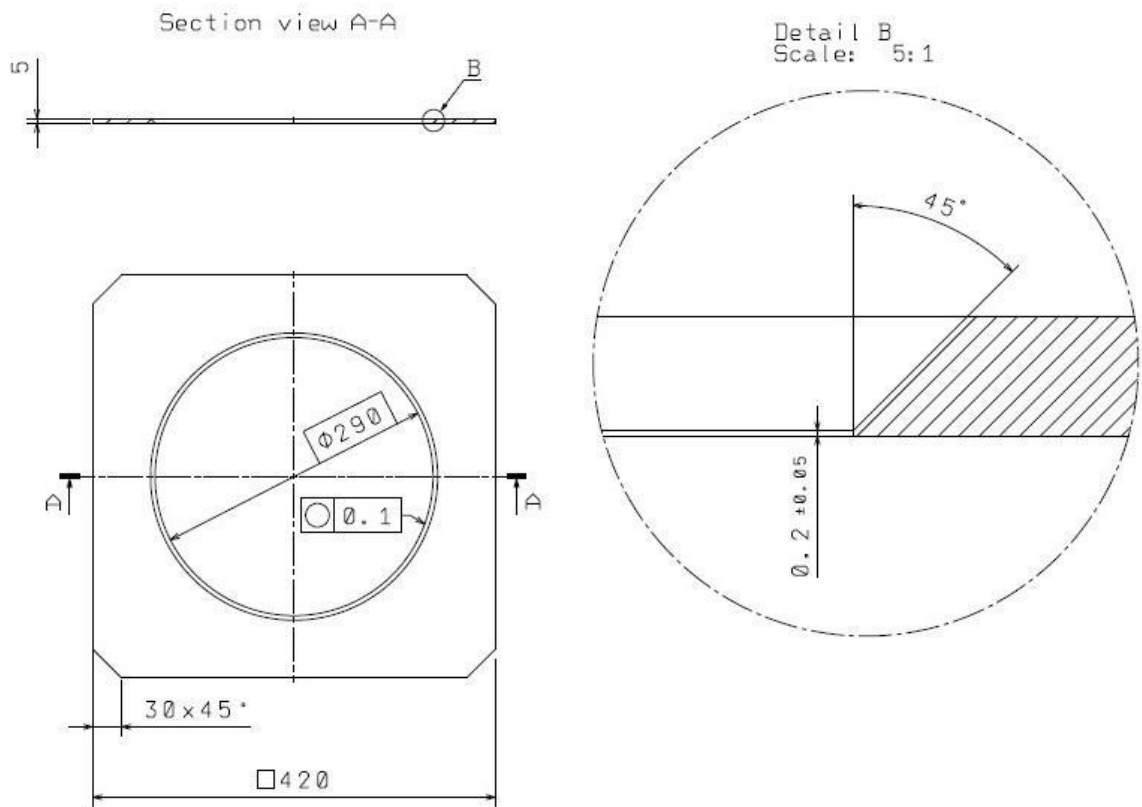
Obrázek 64 - Výsledky souřadnicového měření, samostatný horní díl I



Obrázek 65 - Výsledky souřadnicového měření, samostatný horní díl II

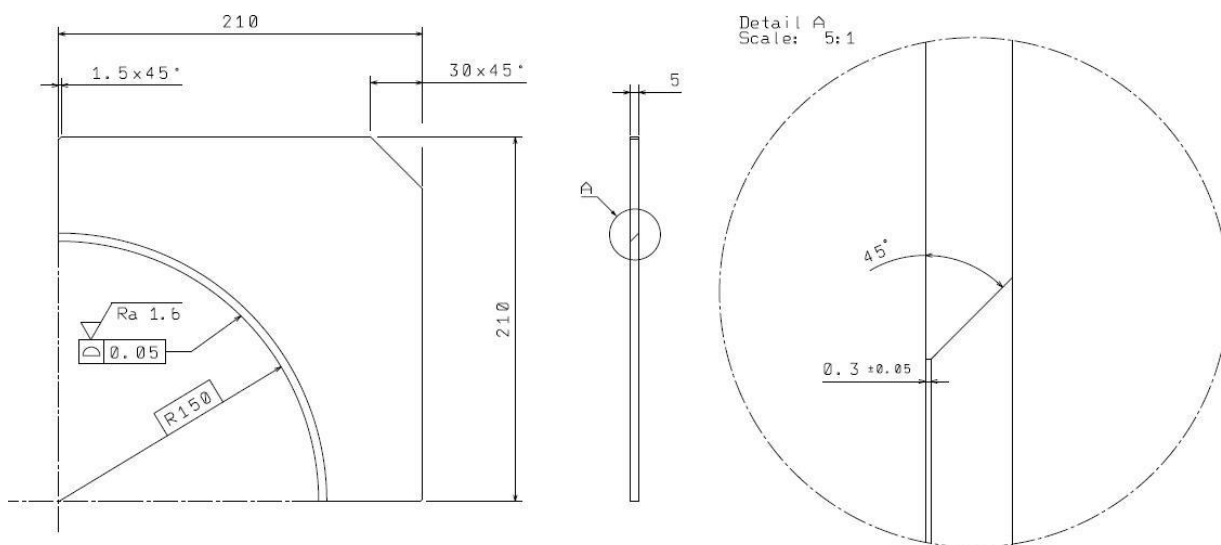
Následovala volba strategie ručního opracování, byly zkonstruovány dvě varianty pomocných šablon. Materiál šablon byl v obou variantách zvolen dural 7075 T651. Šablony jsou obsahem výkresů v přílohách 10 a 11.

Navržená celokruhová šablona měla fungovat zasazením koule do otvoru, jehož průměr byl zvolen, dle kamenické technologické zásady, o několik procent menší než maximální průměr opracovávané koule. Otáčením takto zasazené koule by bylo možné odhalit nekruhovitosti, ty vždy opracovat a uvést tak kouli do požadovaného kruhového tvaru. Velkým nedostatkem této šablony a metody je absence přímé kontroly průměru a vyhodnocení, jak se liší od požadovaného jmenovitého průměru 300 mm.



Obrázek 66 – Navržená celokruhová šablona [S1]

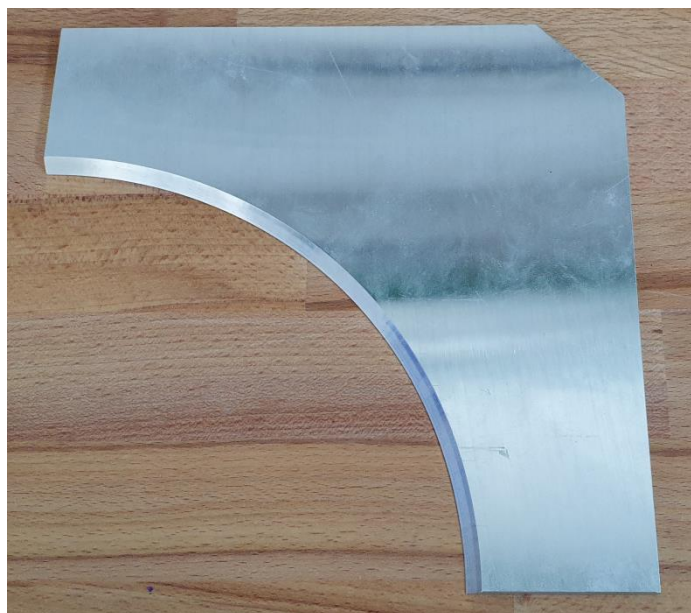
Druhá navržená šablona je v přesném požadovaném průměru 300 mm a vymezuje pouze jeden kvadrant. Šablona má na své pracovní hraně břit, kontroluje se tak průsvit nebo přiléhání u břitu při normálovém přiložení šablony k sešroubované kouli. Tato šablona tak umožňuje přímou kontrolu kruhovitosti i odchylky od jmenovitého rozměru.



Obrázek 67 – Navržená čtvrtkruhová šablona [S1]

5.1.3 Úpravy výtisků

Vyrobena byla pouze druhá zmíněná a navržená šablona, protože sama umožňuje kontrolu kruhovitosti i rozměru, navíc se jedná o velmi praktickou pracovní pomůcku.



Obrázek 68 – Vyrobená šablona

Jako nástroje byly zprvu vyzkoušeny různé typy brusek včetně vibračních a kotoučových. Ztmelený práškový materiál PA12 technologií MJF, s patentovaným pojivem, je však nečekaně tvrdý a houževnatý. Materiál je tak opravdu velmi obtížné a nepohodlné bruskami opracovávat. Jako daleko efektivnější možnost opracování byl shledán způsob pomocí jednoduchých čistě mechanických ručních nástrojů.

S pomocí trpělivého pracovního postupu a využití správných nástrojů bylo dosaženo dobrého kulového tvaru, jehož nedostatkem však byly prohlubně pod úrovní jmenovitého průměru 300 mm, které zbyly z důvodu nepřesnosti tisku. Povrch byl po opracování zjemněn v rámci možností vibrační bruskou.

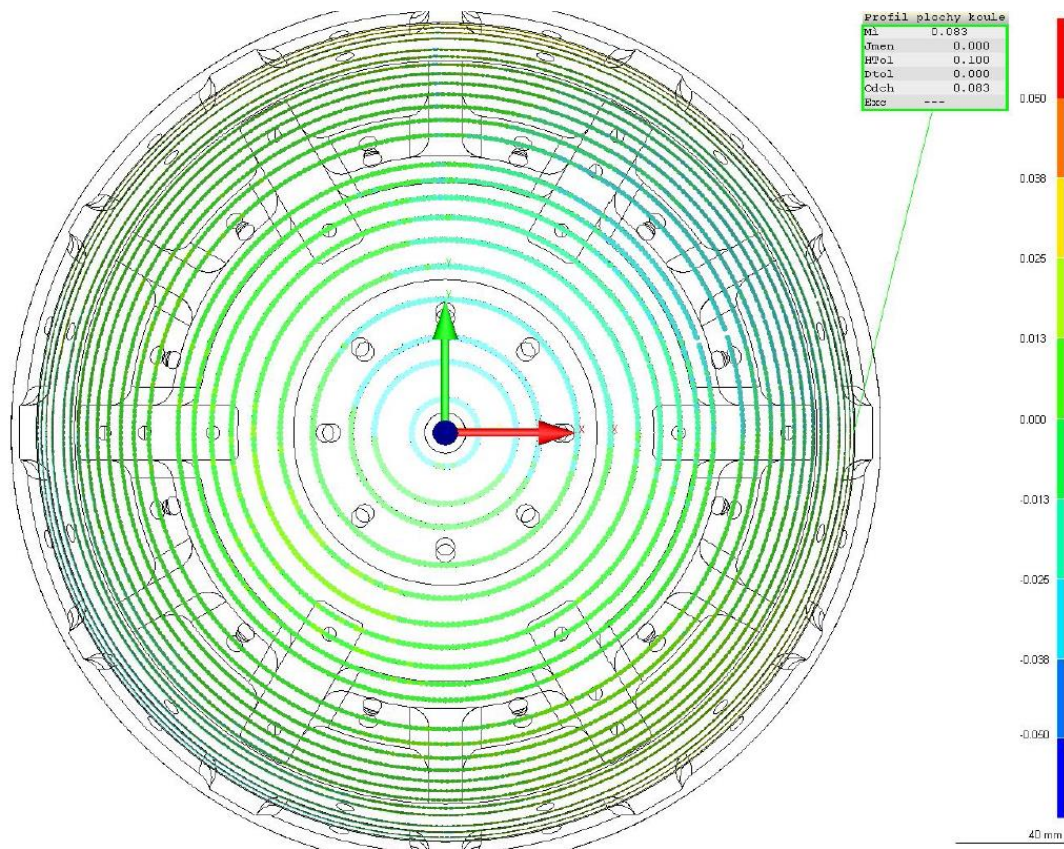
Následovaly lakýrnické práce včetně tmelování, tmel byl zvolen jemný polyesterový, na podklad byla nanášena vrstva lehce lesklé barvy. Tyto postupy efektivně zjemnily a uzpůsobily opracované díly koule, v neposlední řadě přidaly i na estetické stránce věci.

5.2 Sférické lože

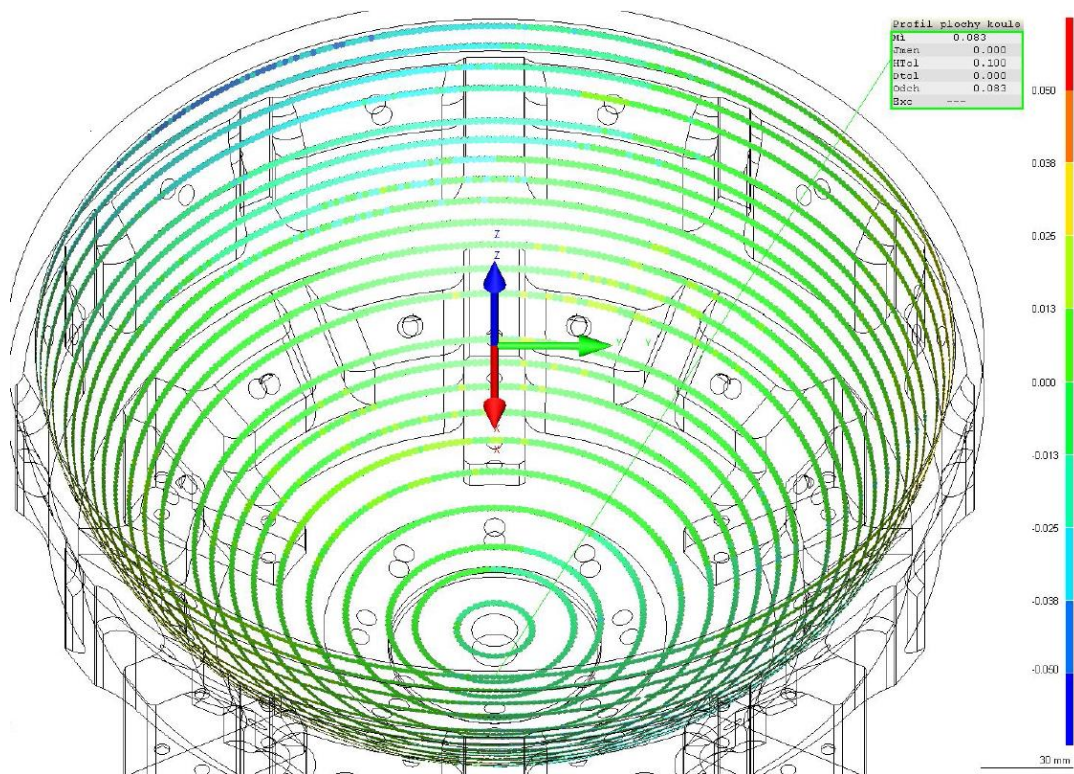
Lože bylo realizováno v souladu s popisem v detailním návrhu kapitoly 4.6.

Materiál byl zvolen pro dobrou obrobiteľnosť a dostupný polotovár dural 6082. Dural rovněž poskytuje dostatečně mechanické vlastnosti, jako jsou od sférického lože očekávány. Výroba proběhla na tříosé frézce, pánev lože byla frézována po čtyřech kvadrantech, v důsledku čehož v pánvi vznikly čtyři hrubé, nerovné paprsky připomínající švy. Tyto nerovnosti byly na svých nejhrubších místech zalapovány lapovacími papírem, díky čemuž bylo dosaženo zcela bezproblémového povrchu v celé pánvi. [43]

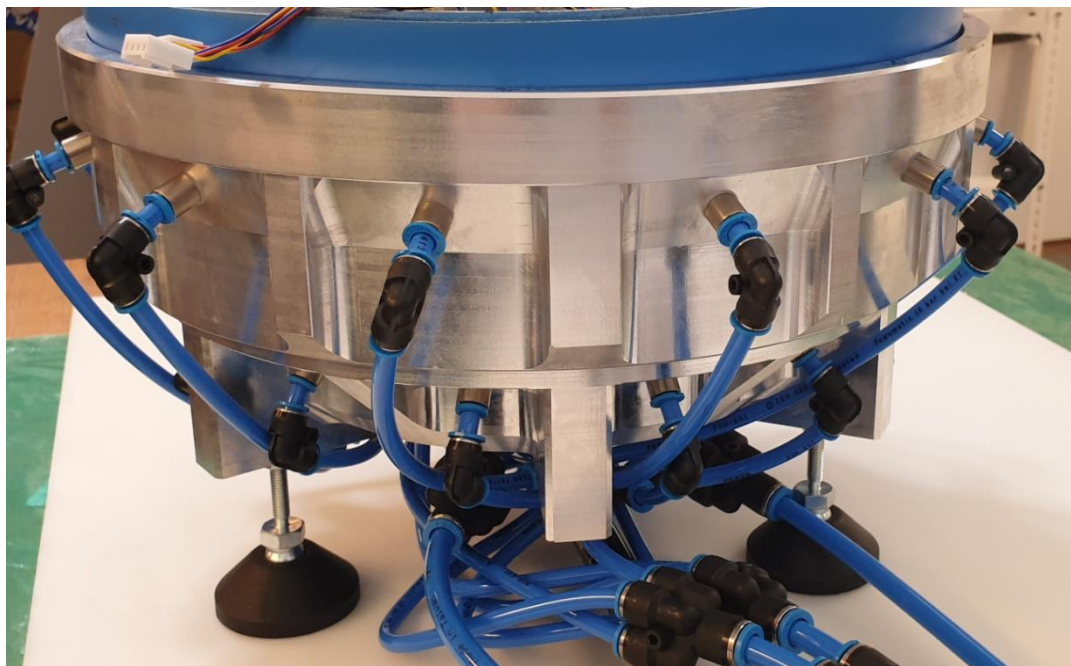
Pánev hotového obrobku byla změřena na souřadnicovém měřicím přístroji Accura a vyhodnocena pro toleranci tvaru celé sférické plochy. Největší naměřená odchylka byla 0,083 mm. Ze závěru měření vyplynulo, že tvar sférické plochy je pro dané použití zcela vyhovující.



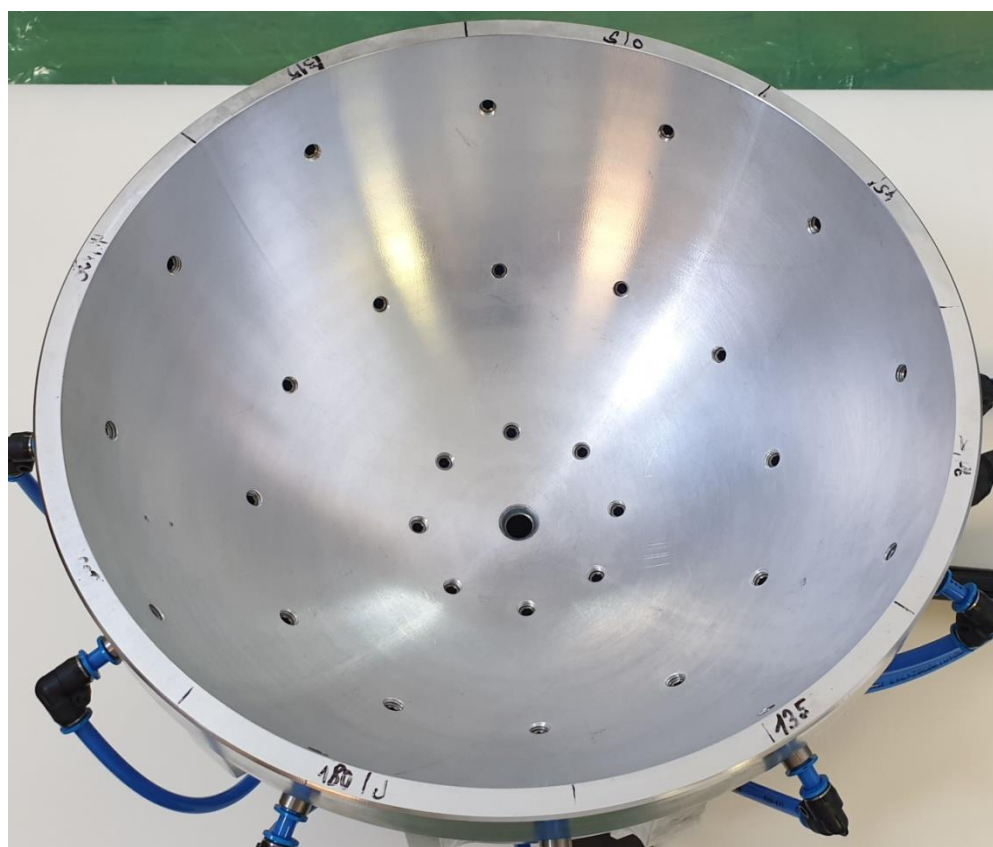
Obrázek 69 – Výsledek souřadnicového měření – sférické lože I



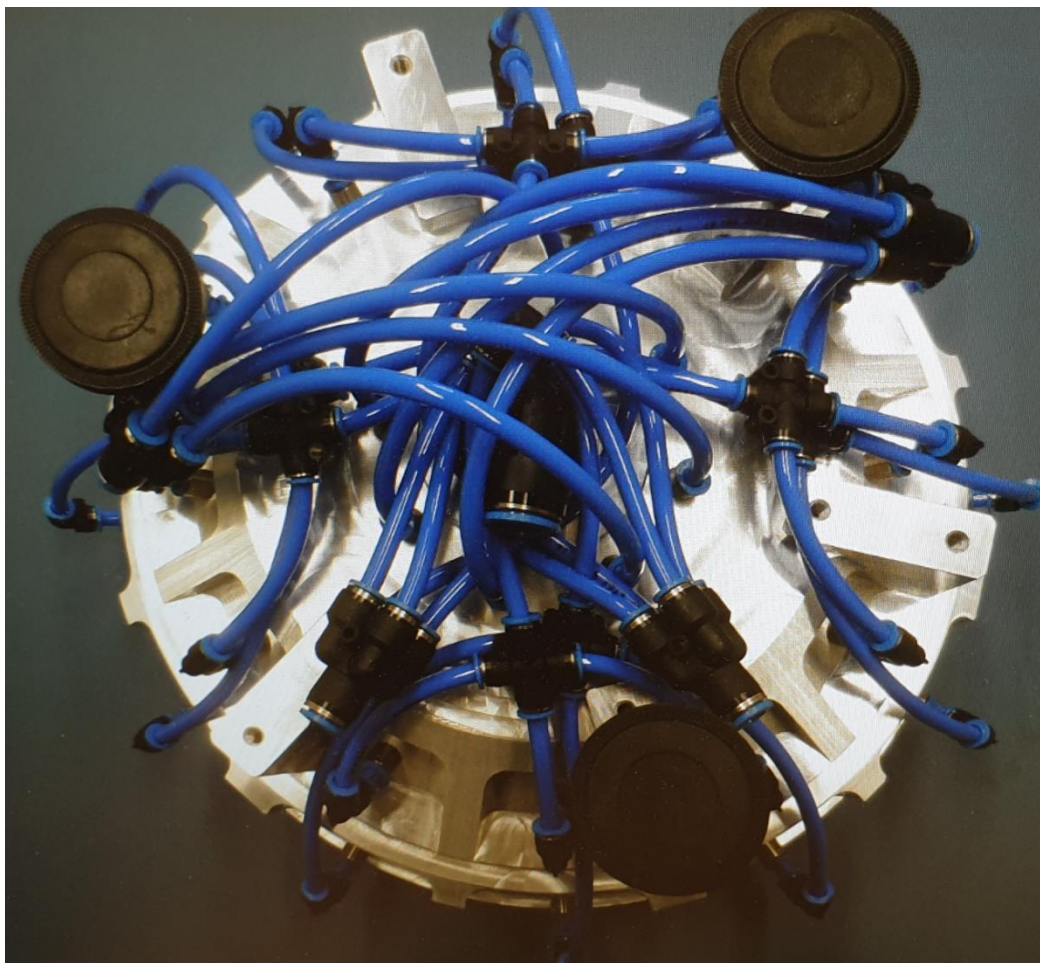
Obrázek 70 - Výsledek souřadnicového měření – sférické lože II



Obrázek 71 – Realizace duralového lože I



Obrázek 72 – Realizace duralového lože II



Obrázek 73 - Realizace duralového lože III

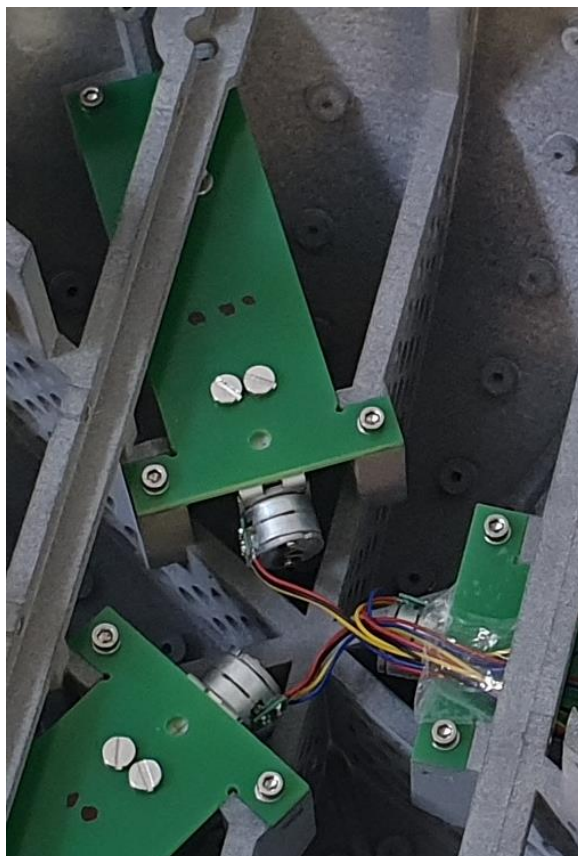
5.2.1 Realizace pohyblivého vyvažování

Řešení pro realizaci a volba krokových motorů s integrovanou pohybovou osou byla zachována z kapitoly detailního návrhu. Motory byly rozšroubovány a proběhly výměny dodaných jezdců posuvů za vyrobená závaží s nalisovanými vložkami pro vodění. Náročnější situace nastala u posuvu osy horní polokoule, která byla o 17 mm zkrácena, hliníkovou podstavu osy tak bylo nezbytné rozdělit na dvě části a mechanicky upravit, aby bylo možné získat požadovanou délku osy.

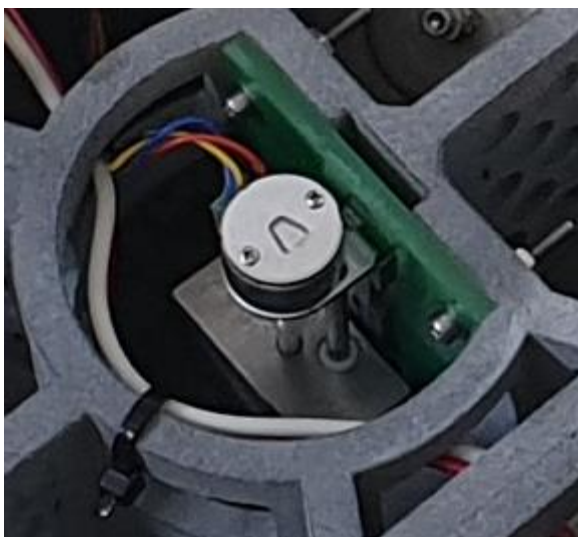
Vodící vložky lisované do otvorů závaží byly místo teflonu z detailního návrhu vyrobeny ze silonu pro dostupný polotovar.

Jako lože krokových motorů byly využity 3 mm silné, odleptané PCB desky. Pro vygenerování podkladů pro výrobu těchto desek byl využit program KiCad do něhož byla geometrie desek z použitého konstrukčního programu převedena. Využití obráběných PCB desek bylo preferováno nad 3D tištěnou variantou pro větší tuhost.

Hliníkové podstavy os motorů byly opatřeny čtyřmi dírami, do nichž byly vyřezány závitové díry pro uchycení k motorovým ložím. V případě zkrácené verze pohybové osy pro horní polokouli byly vytvořeny dvě nové závitové díry zcela nové pro lepší stabilitu rozdělené podstavy osy na dvě části.



Obrázek 74 – Realizace pohyblivého vyvažování, spodní díl

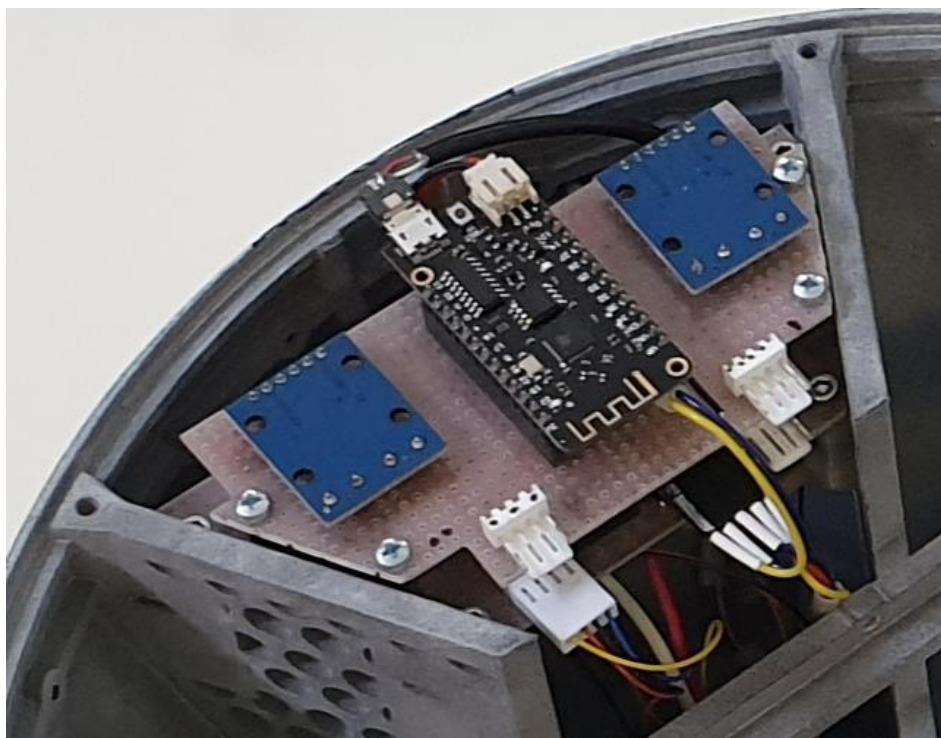


Obrázek 75 – Realizace pohyblivého vyvažování, horní díl

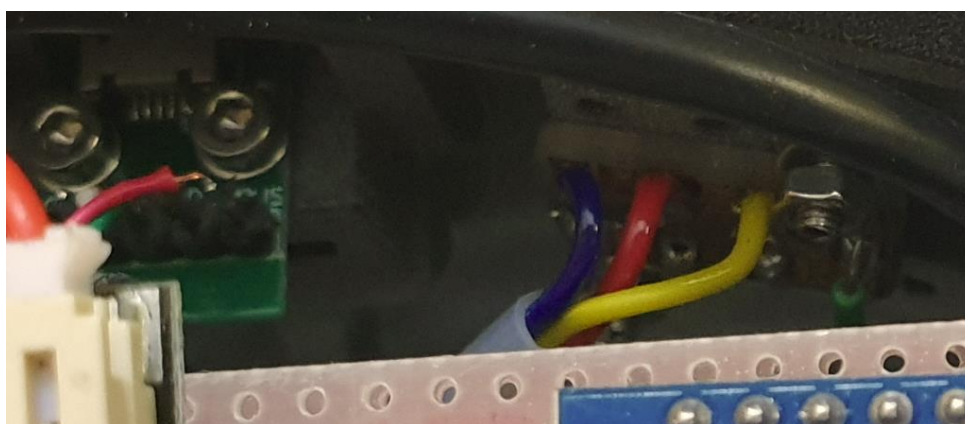
5.2.2 Výroba elektroniky

Elektronika byla vyrobena v rámci levného a rychlého řešení z univerzální pájitelné elektronické desky. Tyto univerzální desky byly využity pro hlavní řídicí elektronickou desku s osazenými můstkem a Wifi modulem, dále pro menší desky s osazeným tlačítkem s integrovanou LED a pro desku s osazeným držákem akumulátorové baterie 18650. V hlavní řídicí elektronice je nahrán software, který komunikuje prostřednictvím wifi

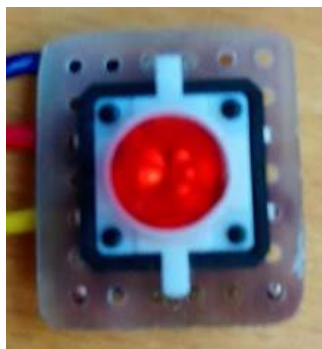
s mobilní aplikací. Tímto způsobem je uzpůsobena možnost ovládní krokových motorů pohyblivých závaží v případě plně sestavené koule. Hlavní řídicí deska a deska držáku baterie byly umístěny naproti sobě, na krakorce do horního dílu koule, mezi hlavními masivními žebry. Umístění všech desek do horní části koule bylo učiněno pro lepší vyvážení podél dělicí roviny koule, neboť ve spodním dílu se nachází tři pohyblivá závaží. Deska s baterií byla oproti detailnímu návrhu otočena baterií dolů, což přineslo výhodnější výchozí vyvážení koule a lepší manipulaci s kabely připojení baterie. Před sesazením koule do jednoho celku je tak nezbytné připojit tři kabely do řídicí elektroniky umístěné v horním dílu, ostatní kabelům nic nebrání v trvalém zapojení.



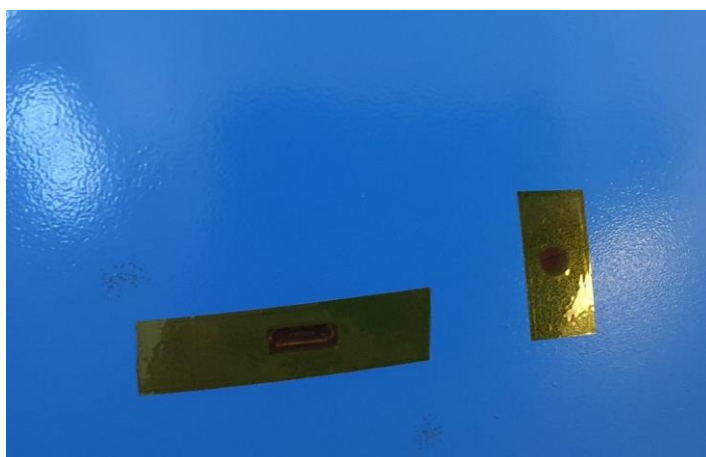
Obrázek 76 – Vyrobená deska řídicí elektroniky



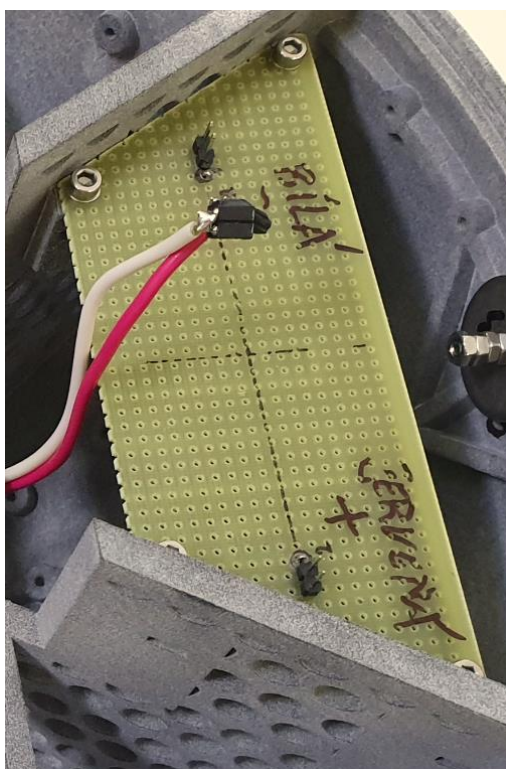
Obrázek 77 – Vyrobené desky micro USB a LED tlačítka, ukázka zakomponování



Obrázek 78 – Vyrobená deska s LED tlačítkem



Obrázek 79 – Ukázka zakomponování tlačítka a micro USB – vnější pohled

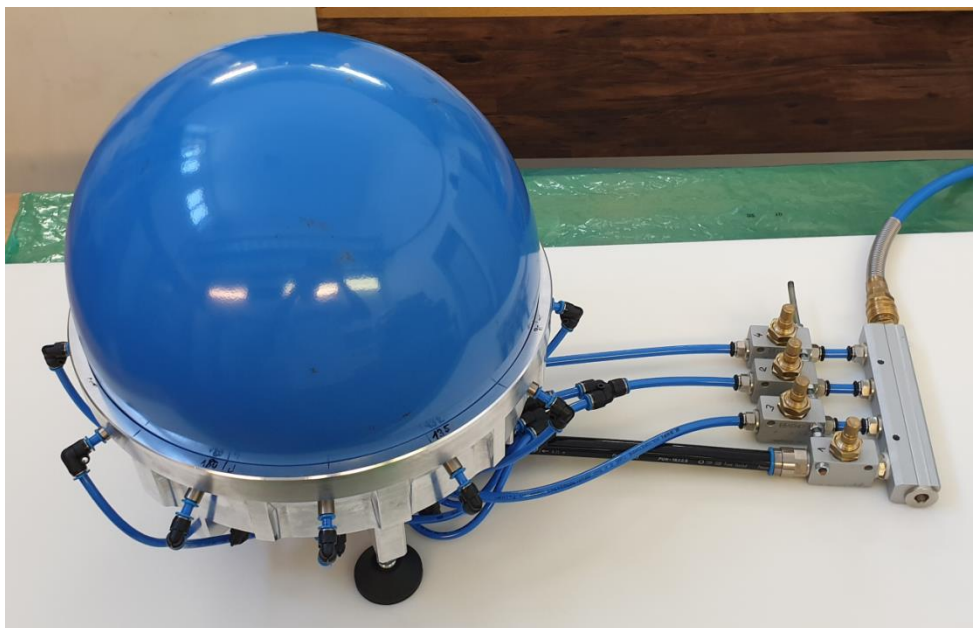


Obrázek 80 – Vyrobená deska s držákem baterie a ukázka zakomponování

5.2.3 Realizace pneumatického systému

Pneumatické zapojení bylo provedeno v souladu se schématem uvedeným v kapitole 4.7.3. Pro nadnášení koule je optimálních podmínek dosaženo například při otevření kombinace ventilu druhé a třetí řady vzduchových šroubení, přičemž ventil druhé řady se stará o zabezpečení hlavní nadnášecí síly a třetí řada udržuje kouli v požadované poloze na vzduchovém polštáři. Možností vytvoření vzduchových polštářů s různými vlastnostmi je mnoho, díky možným kombinacím uzavírání, otevírání nebo částečnému otevírání škrtkových ventilů jednotlivých řad pneumatických šroubení sférického lože. Minimální pracovní tlak vzdušníku kompresoru, kdy je dosaženo dostatečného vzduchového polštáře je obecně 0,6 MPa. Plně akumulovaný vzdušník generuje pro vzduchový polštář tlak o hodnotě až 1,1 MPa, což je i nejvyšší možný tlak, jaký je možný pro použití s vybranými pneumatickými prvky od společností Festo a GMS.

Při plně zkompletované kouli s vnitřními náležitostmi je vybraná kompresorová stanice Orlik SKS 9-O/100 schopna zabezpečit stabilní provoz zařízení na dobu, v závislosti na volbě generování vzduchového polštáře, přibližně pěti minut. Pro delší experimenty je možné využití jiných kompresorů dostupných v rámci společnosti Výzkumný a zkušební ústav, a.s., které umožňují délku experimentu polštáře prakticky neomezeně prodloužit. Toho je dosaženo objemnými vzdušníky a dostatečnou rychlostí dodávání nového stlačeného vzduchu od výkonného kompresoru, což umožňuje vytváření stabilního vzduchového polštáře o řádově delší doby.



Obrázek 81 – Realizace pneumatického systému

5.2.4 Obecný návod montáže koule

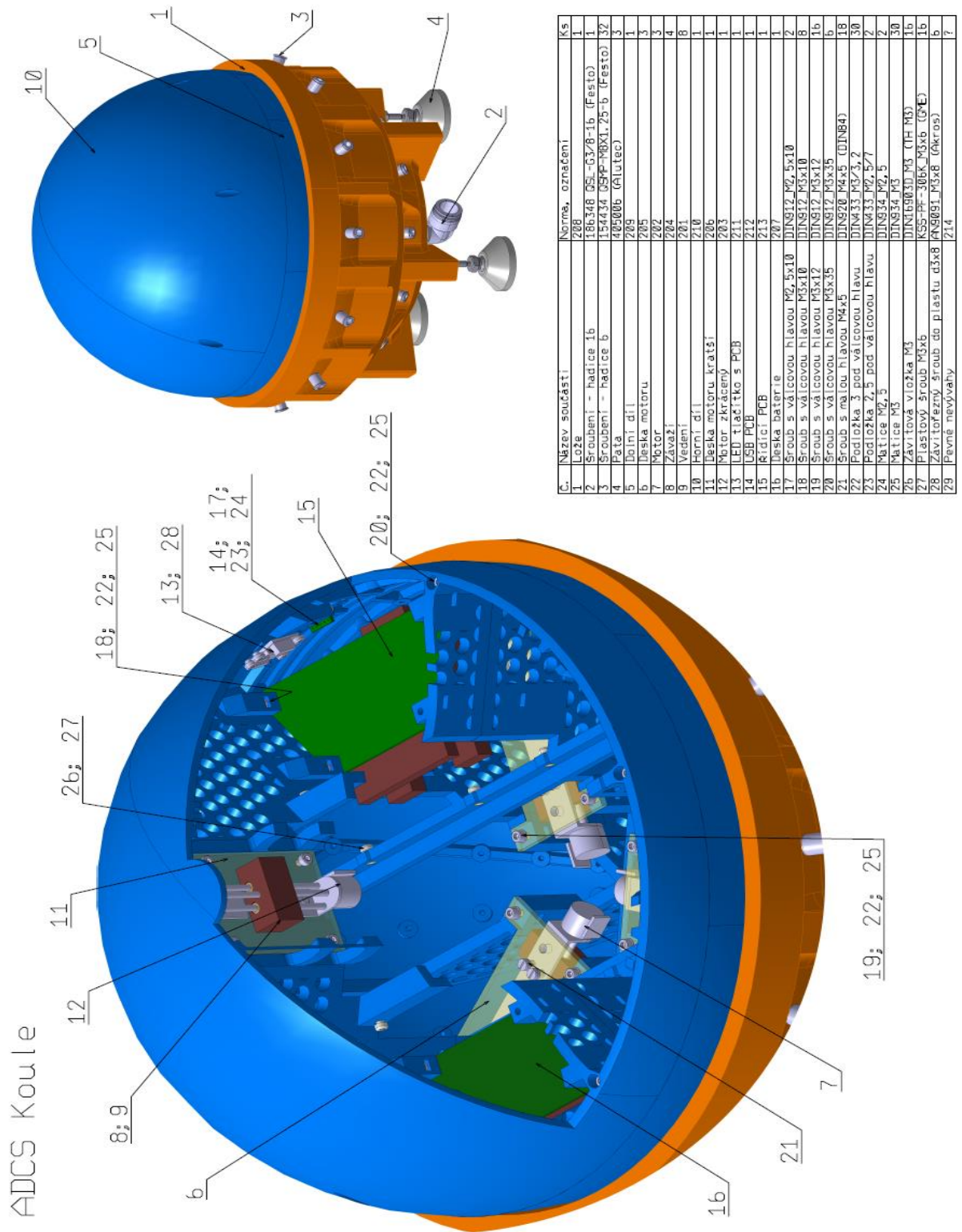
Čísla v textu odkazují na pozice v obrázku 82.

Nejdříve pomocí kleští nalisujeme závitové vložky (26) do kolejnic horního i spodního dílu koule (5, 10), ty budou posléze sloužit jako hlavní ukotvovací prvky pro měřicí aparaturu nebo až 2U CubeSat. Montáž zahájíme sestavením menších celků, které se do dílů polokoulí implementují v úplném stavu. Takovéto celky tvoří pohyblivé osy závaží s krokovými motory. Nejprve připravíme závaží samotná (8), otvory osadíme

vodíci vložkami (9) a našroubujeme přibližně do poloviny pohybového šroubu krokového motoru (7,12), který je pro tento úkon nezbytné rozebrat, při rozebírání krokového motoru postupujeme opatrně, abychom nepoškrábali póly na statoru a rotoru. Neprodleně po uvedení závaží na pohybový šroub a vodící tyče motory opětovně zkompletujeme. Krokové motory přišroubujeme za hliníkové destičky os pomocí šroubů s nízkou hlavou (21) ze zadní strany motorových loží, pro tři nezkrácené varianty pohybových os (6) a k loži pro zkrácenou pohybovou osu (11). Tři nezkrácené, takto připravené pohybová závaží nyní přišroubujeme k pilonům ve spodní části, spodního dílu koule, prostřednictvím matic zasunutých do obdélníkových kapes a šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem (18,22,25). Jedno zbývající, zkrácené, pohybové závaží přišroubujeme do horního dílu koule, kde je pro motor vyčleněn prostor ve středu na svislé desce, těsně pod vrchlíkem polokoule. Pro montáž použijeme opět matice a šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem, matice v tomto řešení spočívá na zadní straně stěny prostor, jež je vyčleněn pro zakomponování motoru. Dalším krokem je přišroubování menších elektronických desek, které jsou osazeny micro USB konektorem a tlačítkem s integrovanou LED (14). Pro přidělení malé elektronické desky s tlačítkem (13), do tvarového tělesa v horním dílu koule s předpřipravenými otvory již z výroby, máme dvě možnosti. Je možné pro přidělení využít závitorezných šroubů do plastu (28) nebo je možné závit vyřezat závitníky, závitovou díru osadit stavěcím šroubem a elektronickou desku stáhnout přes podložku kontramaticí, doporučuje se nicméně druhý způsob pro zaručenou opakovatelnost spoje. Druhou malou elektronickou desku s micro USB přišroubujeme pomocí spojovacího materiálu (17,23,24) za využití obdélníkových kapes pro matice.

Dále postupujeme přišroubováním hlavní řídicí elektroniky (15) a desku s držákem akumulátorové baterie (16). Všechny čtyři sety pilonů v obou dílech koulí mají stejné rozteče, každá z desek řídicí elektroniky a držáku baterie, tak má čtyři možnosti svého umístění. Desky se doporučuje umístit na pilony v horním díle koule pro lepší vyvážení, nicméně je možné využít pro tento účel i pilony v spodním díle v závislosti na požadovaných podmínkách vyvážení. Pro obě desky využijeme spojovacího materiálu (18,22,25) a obdélníkových kapes krakorců pro matice. V této fázi dbáme na to, aby kabel spojující hlavní řídicí desku s deskou akumulátorové baterie nezasahoval do prostoru os pohyblivých závaží, doporučuje se využít stahovací pásky pro ukotvení kabelů ve správné poloze.

Koule se spojují dohromady prostřednictvím spojovacího materiálu (20,22,25), kde matice na správná místa v tvarových kapsách přilepíme závitovým lepidlem pro bezproblémovou a opakovatelnou montáž.



Obrázek 82 – Montážní schéma [S1]

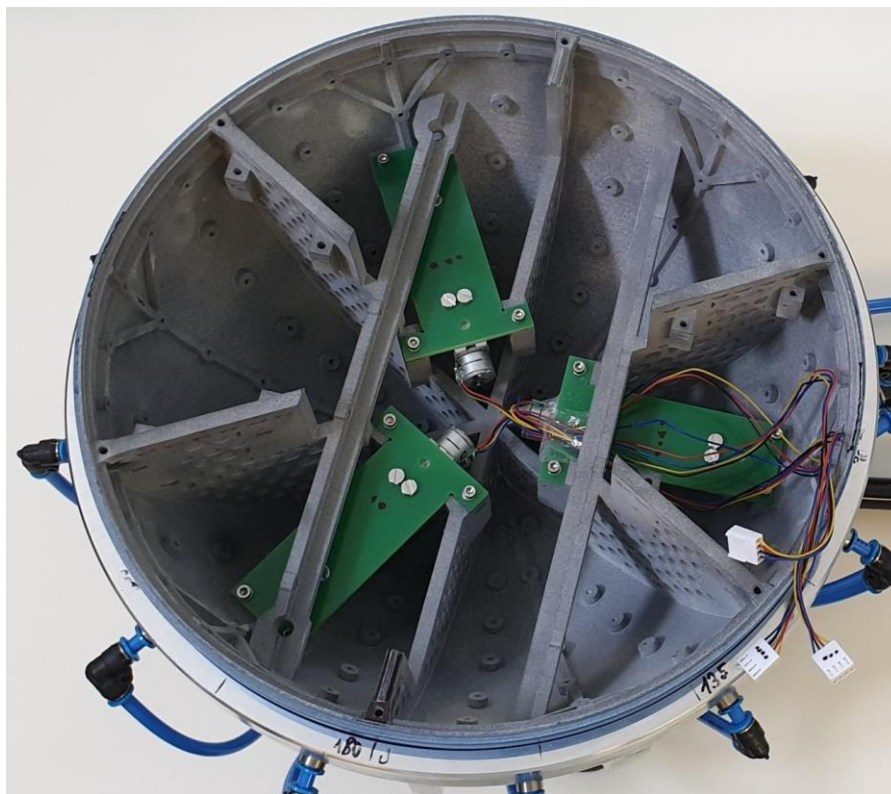
Takto je hlavní montáž koule kompletní, následuje fáze hrubého vyvážení, kdy se testuje chování koule v aktuálních podmínkách vyvážení. Pro tyto účely slouží pevné vyvažování, které reprezentují různé karosářské podložky o velkých průměrech a řada šroubů. Umísťování je realizováno způsobem, jenž byl navržen v detailním návrhu kapitoly 4.5. Hrubé vyvážení probíhá experimentálně, kdy se v první fázi vyváží obě samostatné polokoule na vzduchovém polštáři. Ideální stav je dosažen, když je plocha s lemem dané polokoule v rovině s vrchní částí obruče, o největším průměru, sférického lože. Druhá fáze zahrnuje sesazení obou částí, otočení o 90° (tak, aby byla dělicí rovina kolmo k podstavě zařízení) a sledování chování na vzduchovém polštáři, iterativně se tak přidávají závaží do blízkosti vrchlíku jednoho z dílů. Pro snížení počtu iterací při vyvažování je možné použít siloměr, který se přichytí na vhodné místo na povrchu koule nebo samostatného horního nebo spodního dílu, jednoduchým momentovým pravidlem je tak možné dojít k odhadu správné hmotnosti pevného závaží. Při umístění testovací aparatury se vyvažovací podmínky vždy změni a pro snížení parazitujících momentů působící při experimentu je tak nutné vyvažovací podmínky upravit. Aparaturu je možné stáhnout stahovacími šrouby, jež se šroubují do lisovaných vložek v kolejnicích plastovými šrouby se závitem M3. Tohoto stažení je možné docílit vždy pouze v jednom ze dvou dílů koule, dále je možné využít pro zajištění například oboustranné lepicí pásky.

Jakmile jsou obě polokoule připraveny a sešroubovány k sobě, kouli je možné dovyvážit pouze jemně elektronicky, pohyblivými závažími prostřednictvím mobilní aplikace. Pohybové osy jsou v kouli celkem čtyři, a to v takové formaci, aby vyvážení mohlo proběhnout způsobem, snižující parazitující moment na minimum, v kterémkoli smyslu.

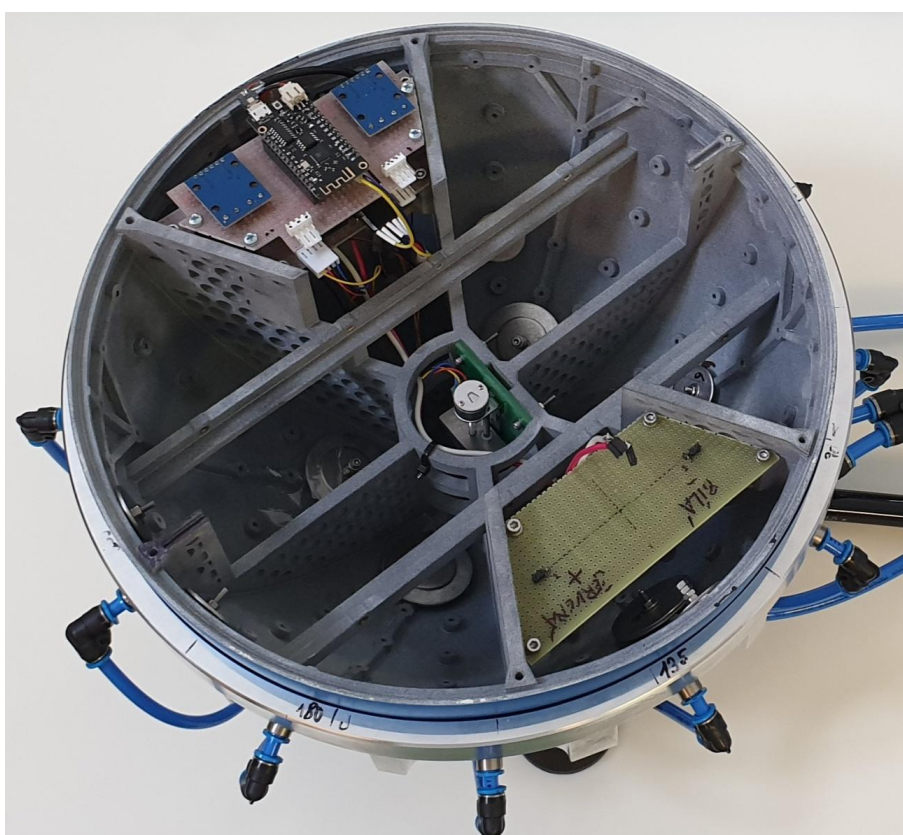
5.2.5 Fotodokumentace realizace



Obrázek 83 – Realizace zařízení



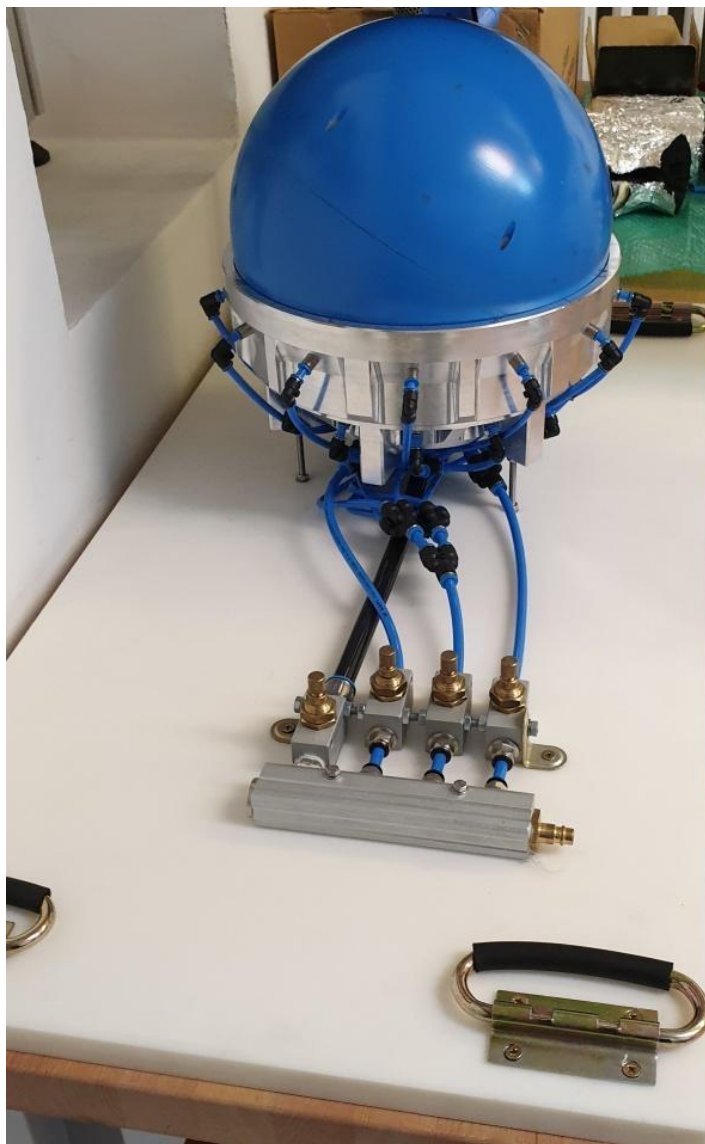
Obrázek 84 – Realizace spodní části



Obrázek 85 – Realizace horní části

5.2.6 Finální stav

V rámci finálních úprav bylo celé zařízení i s pneumatickými prvky připevněno k 20 mm silné polyamidové desce opatřené manipulačními úchopy pro snadné přenášení, například do čistých prostor. Odpadla tak nutnost přišroubovaných dílů patek lože, jež byly původně zamýšleny a v rané realizační fázi i využity.



Obrázek 86 – Finální stav

6 Závěr

V souladu se zadáním práce proběhl detailní návrh unikátního testovacího zařízení pro ADCS, včetně jeho provozuschopné realizace. Díly s největšími technologickými obtížemi, jež reprezentovaly obě hlavní části koule, byly realizovány bez přídavku na opracování, nepředvídatelné složky parazitujících momentů by bylo možné snížit zavedením přídavku na opracování obou dílů, kdy by bylo dosaženo lepší přesnosti kulovitosti povrchu koule díky opracování, pomocí šablony, celé plochy.

Vyvažování testovacího zařízení dokáže efektivně snížit hodnoty parazitujících momentů, nicméně koule, jež byla použita jako nadnášené těleso simulující volný pohyb, je obecně nestabilní už jen v důsledku odtrhávání proudů vzduchu a způsobeným úplavem za hranou sférického lože. Vzduchový polštář rovněž nemá stálé vlastnosti. Pro další vývoj zařízení by bylo možné realizovat aktivní řízení parazitujících momentů pomocí dálkově ovládaného pohyblivého vyvažování v kombinaci se škrcením jednotlivých šroubení. K tomu by však bylo nezbytné vyvinout složitý software a dořešit zpětnou vazbu o stavu parazitních momentů. V momentálním navrženém řešení, jež bylo představeno v práci, je možné aktivní řízení pouze pomocí pohyblivých závaží, řízení změn momentů probíhá ručně s ne zcela jednoznačnou zpětnou vazbou. Záleží na přesnostních požadavcích daných experimentů, které budou na zařízeních tohoto typu probíhat a nakolik bude přesnější řízení parazitních momentů nezbytné.

Seznam zdrojů

[1] Reaction wheel. *Wikipedia* [online]. City and County San Francisco, 2021 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Reaction_wheel

[2] REACTION WHEELS. *ROCKET LAB USA* [online]. Long Beach, California, United States, 2021 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.rocketlabusa.com/satellite-components/reaction-wheels/>

[3] SatCatalog Magnetorquer SatBus MTQ - Magnetorquer - SatCatalog. *Satcatalog* [online]. 2020 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://satcatalog.com/component/magnetorquer-satbus-mtq/>

[4] Magnetorquer. *Wikipedia* [online]. City and County San Francisco, 2020 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetorquer>

[5] Torzní závěs. *Idnes* [online]. Praha: Tomáš Cafourek, 2020 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/satelit-letnany-spacex-vyzkum-druzice-vesmir.A200825_175521_ekonomika_mato?zdroj=galerie

[6] A Dynamic, Hardware-in-the-Loop, Three-Axis Simulator of Spacecraft Attitude Maneuvering with Nanosatellite Dimensions. *Jossonline* [online]. University of California Santa Cruz, Applied Mathematics and Statistics Department, Santa Cruz, CA, USA: Simone Chesi, 2015 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://jossonline.com/wp-content/uploads/2015/06/Final-A-Dynamic-Hardware-in-the-Loop-Three-Axis-Simulator-of-Spacecraft-Attitude-Maneuvering-with-Nanosatellite-Dimensions.pdf>

[7] CubeSAT ADCS Validation and Testing Apparatus. *Scholarworks.wmich.edu* [online]. Western Michigan University, USA: Jacob Stevens, 2016 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: https://scholarworks.wmich.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3786&context=honors_theses

[8] 3U-CubeSat-on-gimbal-suspension. *ResearchGate* [online]. Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier, France: Irina Gavrilovich, 2014 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/3U-CubeSat-on-gimbal-suspension_fig1_308078454

[9] NanoSat Air Bearing Platform with only one vertical rotation axis. *ResearchGate* [online]. Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier, France: Irina Gavrilovich, 2014 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/NanoSat-Air-Bearing-Platform-with-only-one-vertical-rotation-axis-4_fig4_308078454

[10] Gas Bearings. *Raptor scientific* [online]. 81 Fuller Way – Berlin, CT 06037 – USA: Space Electronics, 2020 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://raptor-scientific.com/content/uploads/2020/09/AirBearingsImperial.pdf>

[11] Helmholtz coils for CubeSats - build & tests. *YouTube* [online]. 81 Fuller Way – Berlin, CT 06037 – USA: Charles Grassin, 2020 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=M7ZJ4elroww>

[12] Experimental hollow air bearing platform. *ResearchGate* [online]. Institute of Technology model spacecraft spheres, University of California, Los Angeles/California,

USA: Irina Gavrilovich, 2014 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Experimental-hollow-air-bearing-platform-in-University-of-California-Los_fig6_308078454

[13] Innovative Approach to Use Air Bearings in Cubesat Ground Tests. *HAL archives-ouvertes* [online]. d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier, France: Gavrilovich, Krut, Gouttefarde, Pierrot, Dusseau, 2016 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01348039/document>

[14] 2-Unit CubeSat structure. *IS/Space* [online]. Delft, Neatherlands: ISISpace Group Motorenweg, 2013 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.isispace.nl/product/2-unit-cubesat-structure/>

[15] ISIS ISIPOD 2-Unit CubeSat deployer. *IS/Space* [online]. Delft, Neatherlands: ISISpace Group Motorenweg, 2015 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.cubesatshop.com/product/2-unit-cubesat-deployer/>

[16] POLYJET. *3DTECH* [online]. Ondřejov, 2016 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.3dtech.cz/technology/polyjet/>

[17] Multi Jet Fusion. *Materialise* [online]. Ústí nad Labem, 2016 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/multi-jet-fusion>

[18] 3D tisk v sériové výrobě a rychlém prototypování s HP Jet Fusion 4200. *Slideshare* [online]. Ústí nad Labem, 2018 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/naviga4/3d-tisk-v-sriov-vrob-a-rychl-prototypovn-s-hp-jet-fusion-4200>

[19] Screw Stepper Motor DC 12V Stepper Motor With Linear Screw Nut Slider Maximum. *Ebay* [online]. San Jose, Kalifornie, USA, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.ebay.com/itm/Screw-Stepper-Motor-DC-12V-Stepper-Motor-With-Linear-Screw-Nut-Slider-Maximum/324288905772?trkparms=aid%3D1110009%26algo%3DSPLICE.COMPLISTINGS%26ao%3D1%26asc%3D20201210111452%26meid%3D1799074bccb6404dad64b522e85ef013%26pid%3D101196%26rk%3D6%26rkt%3D12%26mehot%3Dnone%26sd%3D262522745950%26itm%3D324288905772%26pmt%3D1%26noa%3D0%26pq%3D2047675%26algv%3DItemStripV101HighAdFee%26brand%3DUnbranded&trksid=p2047675.c101196.m2219>

[20] Led tactile button. *Hobbytronics.co.uk* [online]. Pocklington, York, UK, 2019 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.hobbytronics.co.uk/led-tactile-button-orange>

[21] Mechatronika. *Spssou-pe* [online]. Pelhřimov, 2013 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <http://www.spssou-pe.cz/userfiles/file/projekty/opvk/mechatronika.pdf>

[22] Push-in L-fitting QSL-G3/8-16. *Festo* [online]. Esslingen am Neckar, Německo, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.festo.com/tw/en/a/download-document/datasheet/186348>

[23] Push-in fitting QSMP-M8X1.25-6. *Festo* [online]. Esslingen am Neckar, Německo, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.festo.com/tw/en/a/download-document/datasheet/154434>

- [24] Push-in L-connector QSML-6. *Festo* [online]. Esslingen am Neckar, Německo, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: https://www.festo.com/us/en/a/153345/?siteUid=fox_us&siteName=Festo+USA
- [25] Push-in X connector QSMX-6. *Festo* [online]. Esslingen am Neckar, Německo, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: https://www.festo.com/us/en/a/153380/?q=~:sortByFacetValues-asc~:CC_Design_FP08010519_C_FP_08-01-05~:CC_Design_FP08010519.S%C2%A8
- [26] Push-in Y-connector QSY-8. *Festo* [online]. Esslingen am Neckar, Německo, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.festo.com/us/en/a/153150/>
- [27] Push-in fitting QS-G3/8-16. *Festo* [online]. Esslingen am Neckar, Německo, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.festo.com/us/en/a/186347/>
- [28] Multiple distributor QSQ-8-6. *Festo* [online]. Esslingen am Neckar, Německo, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.festo.com/us/en/a/153210/?q=~:sortByFacetValues-asc>
- [29] 8860 - Škrťící ventil. *GMS* [online]. Lanškroun, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.gms.cz/8860-skrtyci-ventil>
- [30] 50020N - PŘÍPOJKA PŘÍMÁ: Mosazná přípojka s vnějším paralelním závitem (BSPP, Metrický). *GMS* [online]. Lanškroun, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.gms.cz/50020n-pripojka-prima>
- [31] 6047 - LIŠTA ROZDĚLOVACÍ: Hliníková rozvodná lišta, jednostranná. *GMS* [online]. Lanškroun, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.gms.cz/6047-lista-rozdelovaci?variant=2419365>
- [32] Bezolejový kompresor SKS 9-O/100. *GMS* [online]. Česká Třebová, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <http://eshop.orlik.cz/pistove-kompresory-oilless/bezolejovy-kompresor-sks-9-o-100/>
- [33] *Orlik - Návod k použití: Pístové bezmazné, kompresory řady 9-O*. 05-2018. Moravská Třebová, 2018.
- [34] PELC, Karel. Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. *ADCS Sphere*. R-7318. Praha, 2020.
- [35] *CubeSat Design Specification Rev. 13* [online]. San Luis Obispo, CA, USA: California Polytechnic State University, 2014 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf
- [36] GAVRILOVICH, Irina, Sébastien KRUT, Marc GOUTTEFARDE, François PIERROT a Laurent DUSSEAU. *Test Bench For Nanosatellite Attitude Determination And Control System Ground Tests: Conference Paper*. 5.5.2014. Montpellier, France, 2014.
- [37] P.BENEŠ – MECHANIKA III A. *Stránky odboru mechaniky a mechatroniky FS ČVUT v Praze* [online]. Praha: Beneš, 2017 [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: https://mech.fsid.cvut.cz/?page_id=577

[38] BROUSIL, Jaromír a Stanislav STEJSKAL. *Mechanika III*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-00918-1.

[39] KOUSAL, Jaroslav. MFF UK / FS ČVUT. *Kosmické systémy: Orientace, stabilizace, navigace*. 03/2016-1. Praha, 2016.

[40] HAVLAN, Tomáš. *3D prototyping mechanismů*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Jan Zavřel Ph.D.

[41] CABRNOCH, Bohuslav. *Aditivní výroba: VZLÚ, a.s.* 2020. Praha, 2020.

[42] Euler's equations (rigid body dynamics). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%27s equations \(rigid body dynamics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%27s_equations_(rigid_body_dynamics))

[43] Kovoobrábění R. Mastník, Pěčín – Bratříkov
<http://kovoobrabenimastnik.sluzby.cz/>

[44] Laboratoř prototypových technologií a procesů, Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, Technická univerzita v Liberci
<https://cxi.tul.cz/strojirenstvi/oddeleni-pokrocilych-technologiei/laborator-prototypovych-technologiei-a-procesu>

[45] MODENINI, Dario, Anton BAHU, Giacomo CURZI a Andrea TOGNI. A Dynamic Testbed for Nanosatellites Attitude Verification. *MDPI* [online]. Forlì, Italy: University of Bologna, 2020, 15.5.2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2226-4310/7/3/31/htm>

[46] AOCS/ADCS Simulation Facility. *Triasrnd.com* [online]. Würzburg, Germany: Zentrum für Telematik, 2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://triasrnd.com/l/121-aocs-slash-adcs-simulation-facility>

Software

- [S1] CAD Catia V5R21
- [S2] CAD SolidEdge ST7
- [S3] Microsoft Malování
- [S4] CAD KiCad 5.0.0

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Realizované reakční kolo [2]	13
Obrázek 2 – PCB s Magnetotorquery [3]	14
Obrázek 3 – Torzní závěs [5]	15
Obrázek 4 – Polokoule na vzduchovém polštáři [6]	16
Obrázek 5 – Testování ADCS [6]-upraveno	17
Obrázek 6 – Rovinný ložiskový stand [9]	17
Obrázek 7 – Kulový ložiskový stand [10]	18
Obrázek 8 – Kapalinový rovinný stand [11]	18
Obrázek 9 – Kardanová suspenze [8]	19
Obrázek 10 – Princip aktivní kompenzace parazitních momentů [36] - upraveno	19
Obrázek 11 – Využití menších vzduchových plošek pro plný sférický pohyb [36]	20
Obrázek 12 – Plynový, plně sférický stand [12]	21
Obrázek 13 – Víceúčelový simulátor volného pohybu [46]	21
Obrázek 13 – Konstrukce 2U CubeSatu [14]	23
Obrázek 14 – Vystřelovač 2U CubeSatu [15]	23
Obrázek 15 – Konceptní návrh nového testovacího zařízení [S1]	24
Obrázek 16 – Detail kapsy pro usazení matic [S1]	27
Obrázek 17 – Detail protikusu šroubu [S1]	27
Obrázek 18 – Detail protikusu, umístění hlav šroubů [S1]	27
Obrázek 19 – Dolní díl koule a lože – konceptní návrh [S1]	29
Obrázek 20 – Horní díl koule – konceptní návrh [S1]	29
Obrázek 21 – Předběžné řešení vyvažování dolního dílu [S1]	29
Obrázek 22 – Předběžné řešení vyvažování horního dílu [S1]	30
Obrázek 23 – Detail možného umístění pevných vývažků [S1]	31
Obrázek 24 – Detailní konstrukční návrh horního dílu koule [S1]	33
Obrázek 25 – Detailní konstrukční návrh spodního dílu koule [S1]	33
Obrázek 26 – Sesazení obou dílů koule do celku [S1]	34
Obrázek 27 – Detailní konstrukční návrh spodního dílu koule – vyztužená verze [S1]	35
Obrázek 28 – Detailní konstrukční návrh horního dílu koule – vyztužená verze [S1]	35
Obrázek 29 – Zakomponovaný model desky s baterií s využitím krakorců [S1]	36
Obrázek 30 – Zakomponovaný model řídicí elektroniky s využitím krakorců [S1]	37
Obrázek 31 – Detail lemu horního dílu [S1]	37
Obrázek 32 – Detail lemu spodního dílu [S1]	37
Obrázek 33 – Krakorce pro umístění elektronických desek [S1]	38
Obrázek 34 – Stahovací šroub s vložkou nalisovanou do kolejnice [S1]	39
Obrázek 35 – Zvolený motor s lineární posuvovou osou [19]	40
Obrázek 36 – Návrh pohyblivého vyvažování – zkrácený posuv [S1]	41
Obrázek 37 - Návrh pohyblivého vyvažování – plný posuv [S1]	41
Obrázek 38 – Návrh pohyblivého vyvažování, spodní díl koule [S1]	42
Obrázek 39 – Návrh pohyblivého vyvažování, horní díl koule [S1]	42
Obrázek 40 – Mechanické vymezení elektronických desek [S1]	43
Obrázek 41 – Místa pro integraci micro USB a LED tlačítka pro přístup zvenčí [S1]	44
Obrázek 42 – Způsob zakomponování micro USB [S1]	44
Obrázek 43 – Způsob zakomponování LED tlačítka a micro USB [S1]	45
Obrázek 44 – Zvolené LED tlačítko [20]	45
Obrázek 45 – Mechanické vymezení zvoleného tlačítka [20]	46
Obrázek 46 – Prvotní návrh sférického lože [S1]	47
Obrázek 47 – Návrh sférického lože ve spolupráci s výrobou [43][S1]	48
Obrázek 48 – Návrh sférického lože ve spolupráci s výrobou [43][S1]	49
Obrázek 49 – Pneumatické schéma [21] - upraveno	51
Obrázek 50 – Přehled pneumatického systému	54

Obrázek 51 – Parametry kompresorů Orlik [33]	55
Obrázek 52 – Zvolený kompresor Orlik SKS 9-O/100 [32]	55
Obrázek 53 – Schéma detailního návrhu [S1][34]	56
Obrázek 54 – Naměřené rozměry prvního tisku – dolní díl [S1]	59
Obrázek 55 – Naměřené rozměry prvního tisku – horní díl [S1]	60
Obrázek 56 – Návrh odstranitelných výztužných žebër ve spolupráci s výrobou [44] ..	61
Obrázek 57 – 3D Scan před odstraněním žebër - řešeno ve spolupráci s výrobou [44]	62
Obrázek 58 – 3D Scan po odstranění žebër – řešeno ve spolupráci s výrobou [44]....	62
Obrázek 59 – Návrh trvalých výztužných žebër [S1]	63
Obrázek 60 – 3D Scan sesazených a stažených dílů výtisků I – řešeno ve spolupráci s výrobou [44]	65
Obrázek 61 – 3D Scan sesazených a stažených dílů výtisků II – řešeno ve spolupráci s výrobou [44]	65
Obrázek 62 – Výsledky souřadnicového měření, samostatný spodní díl I	66
Obrázek 63 - Výsledky souřadnicového měření, samostatný spodní díl II	66
Obrázek 64 - Výsledky souřadnicového měření, samostatný horní díl I.....	67
Obrázek 65 - Výsledky souřadnicového měření, samostatný horní díl II.....	67
Obrázek 66 – Navržená celokruhová šablona [S1].....	68
Obrázek 67 – Navržená čtvrtkruhová šablona [S1]	69
Obrázek 68 – Vyrobená šablona.....	69
Obrázek 69 – Výsledek souřadnicového měření – sférické lože I.....	71
Obrázek 70 - Výsledek souřadnicového měření – sférické lože II	71
Obrázek 71 – Realizace duralového lože I.....	72
Obrázek 72 – Realizace duralového lože II.....	72
Obrázek 73 - Realizace duralového lože III	73
Obrázek 74 – Realizace pohyblivého vyvažování, spodní díl.....	74
Obrázek 75 – Realizace pohyblivého vyvažování, horní díl	74
Obrázek 76 – Vyrobená deska řídicí elektroniky	75
Obrázek 77 – Vyrobené desky micro USB a LED tlačítka, ukázka zakomponování	75
Obrázek 78 – Vyrobená deska s LED tlačítkem	76
Obrázek 79 – Ukázka zakomponování tlačítka a micro USB – vnější pohled.....	76
Obrázek 80 – Vyrobená deska s držákem baterie a ukázka zakomponování	76
Obrázek 81 – Realizace pneumatického systému.....	77
Obrázek 82 – Montážní schéma [S1]	79
Obrázek 83 – Realizace zařízení	81
Obrázek 84 – Realizace spodní části	82
Obrázek 85 – Realizace horní části.....	82
Obrázek 86 – Finální stav	83

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Přehled zvolených pneumatických prvků [22][23][24][25][26][27][28][29][30][31]	52
Tabulka 2 – Seznam komponent detailního návrhu [34]	56
Tabulka 3 – Seznam komponent detailního návrh – pneumatický systém [34].....	57

Seznam příloh

Příloha 1 – Koncepční schéma lože

Příloha 2 – výkres VS2-VZL-DRW-DD-201

Příloha 3 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-202

Příloha 4 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-203

Příloha 5 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-204

Příloha 6 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-205

Příloha 7 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-206

Příloha 8 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-207

Příloha 9 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-208

Příloha 10 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-250

Příloha 11 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-251

Příloha 12 – set step modelů [43]

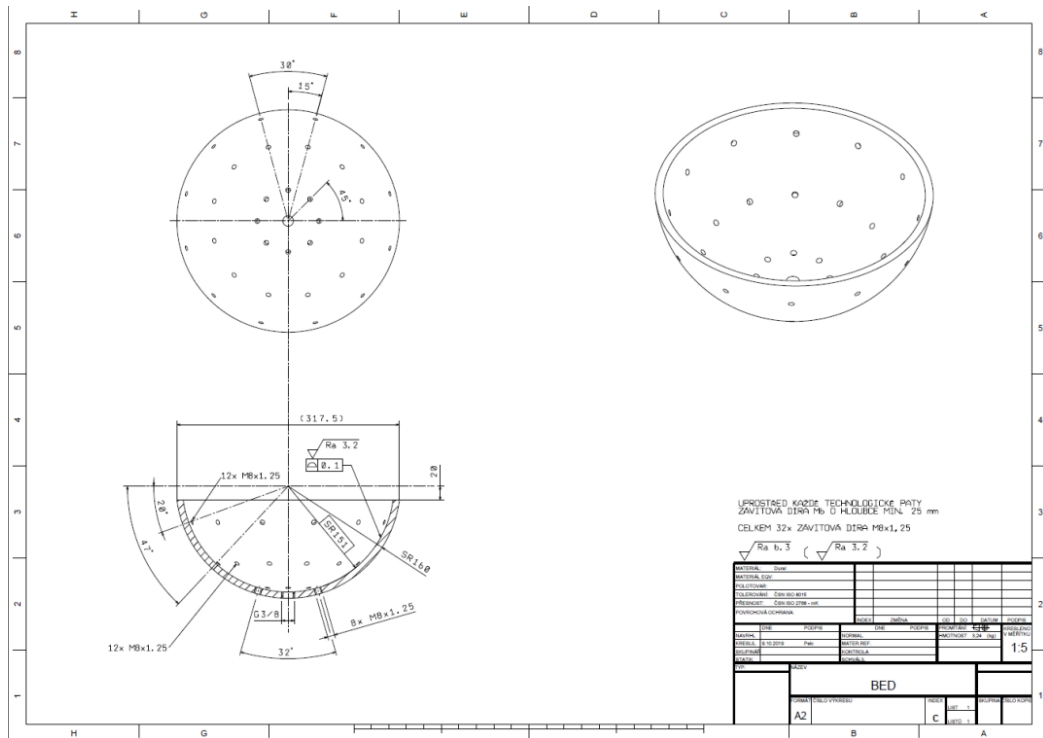
+ set výkresů

+ set KiCad podkladů

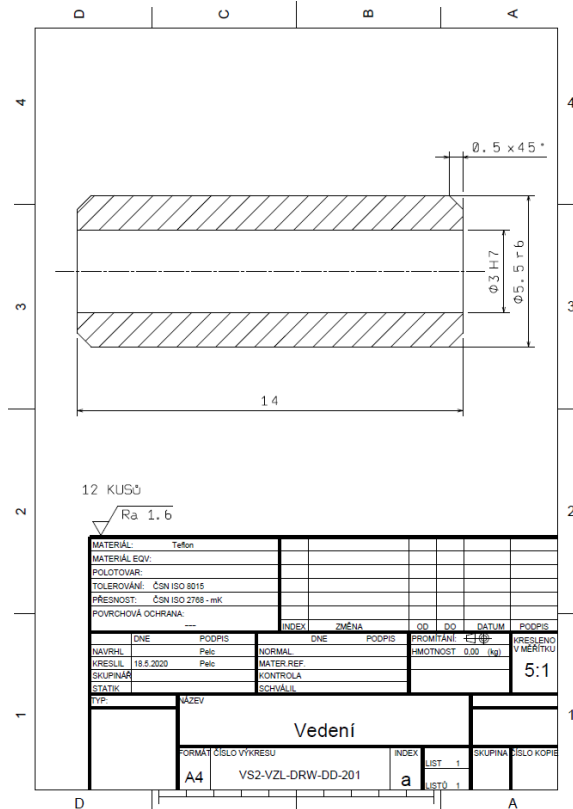
+ set montážních a nákupních kusovníků

Dostupné pouze elektronicky

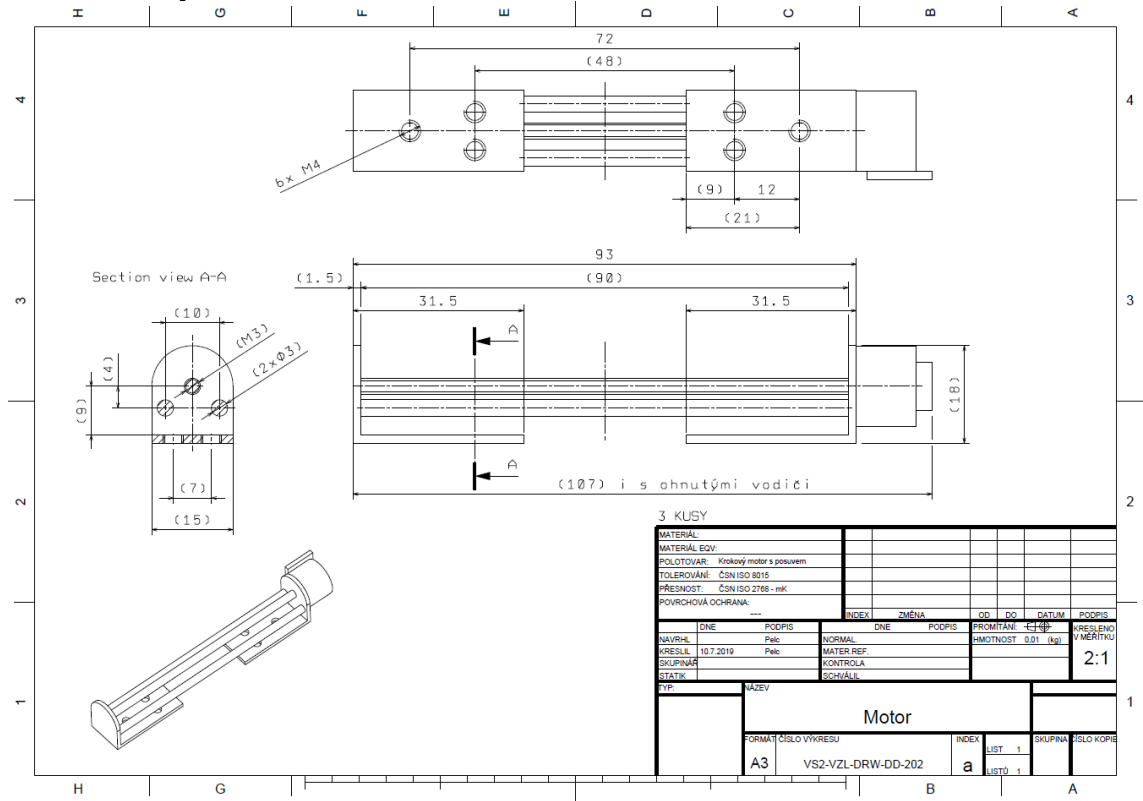
Příloha 1 – Koncepční schéma lože



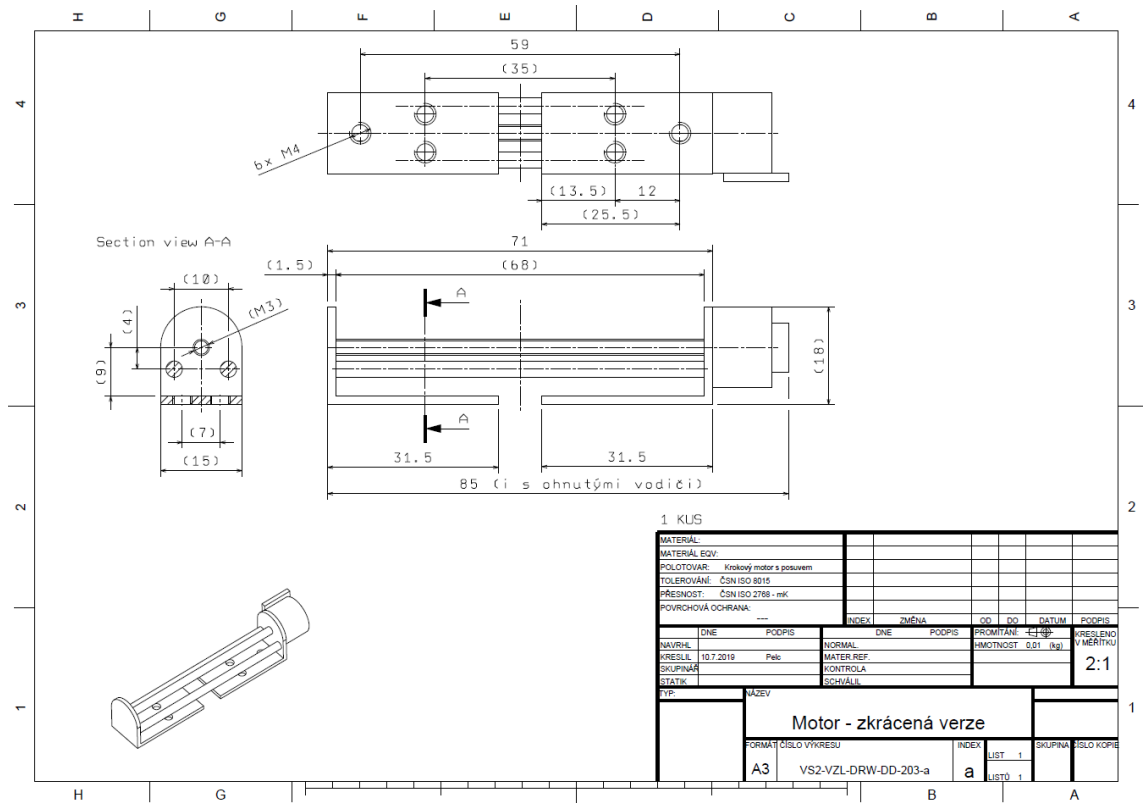
Příloha 2 – výkres VS2-VZL-DRW-DD-201



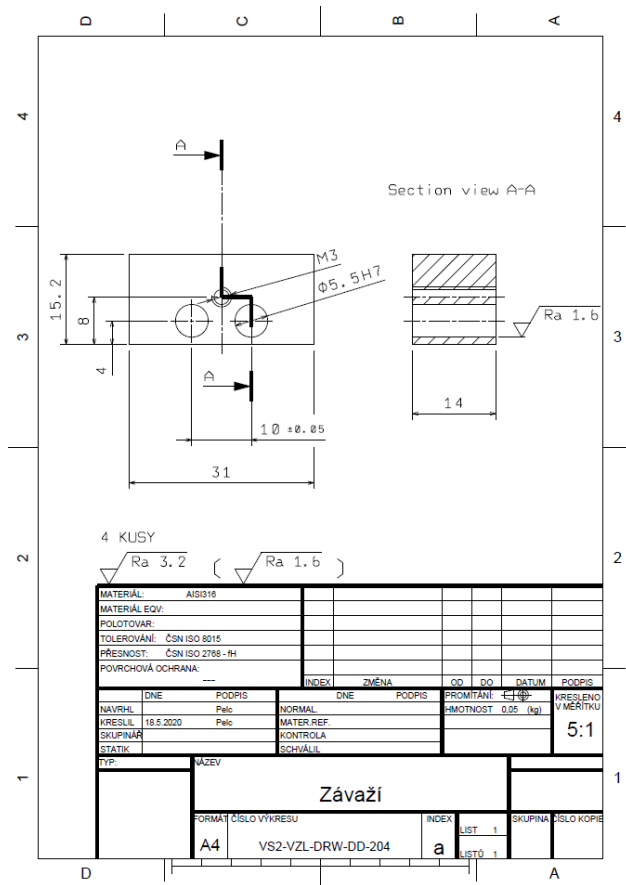
Příloha 3 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-202



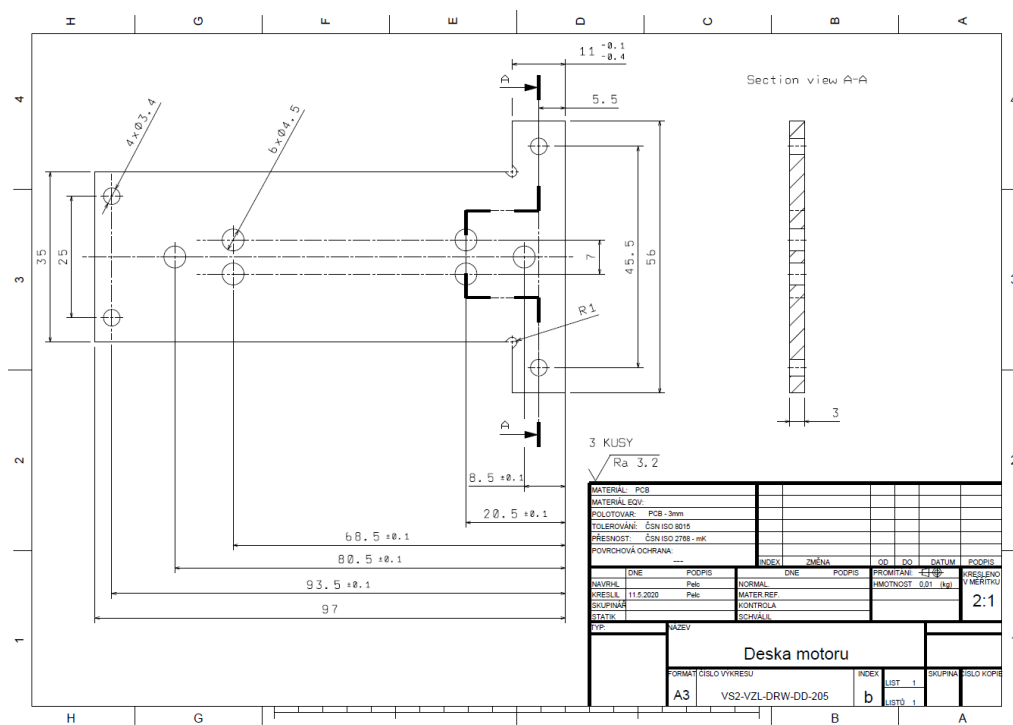
Příloha 4 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-203



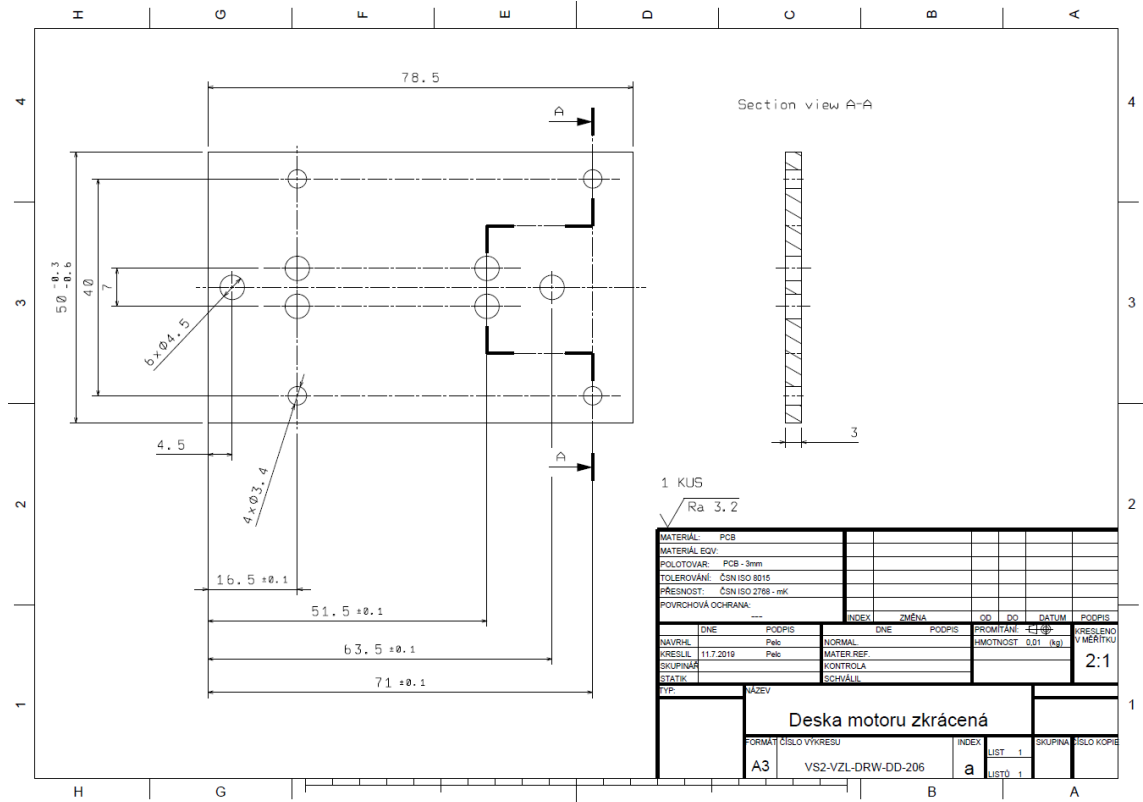
Příloha 5 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-204



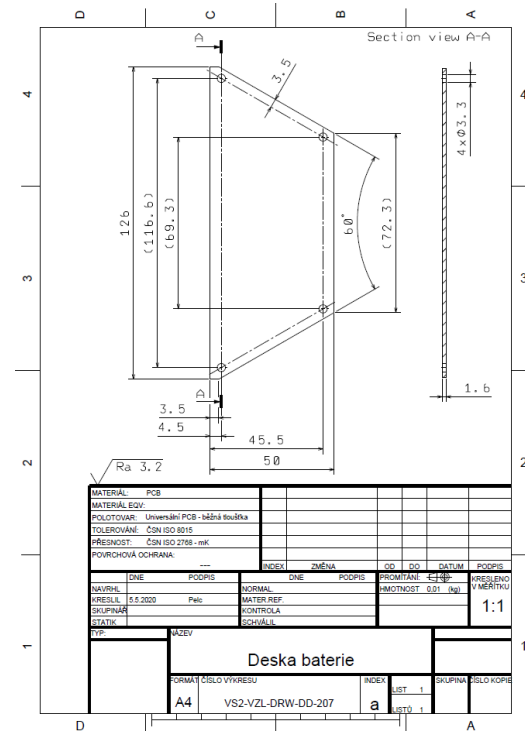
Příloha 6 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-205



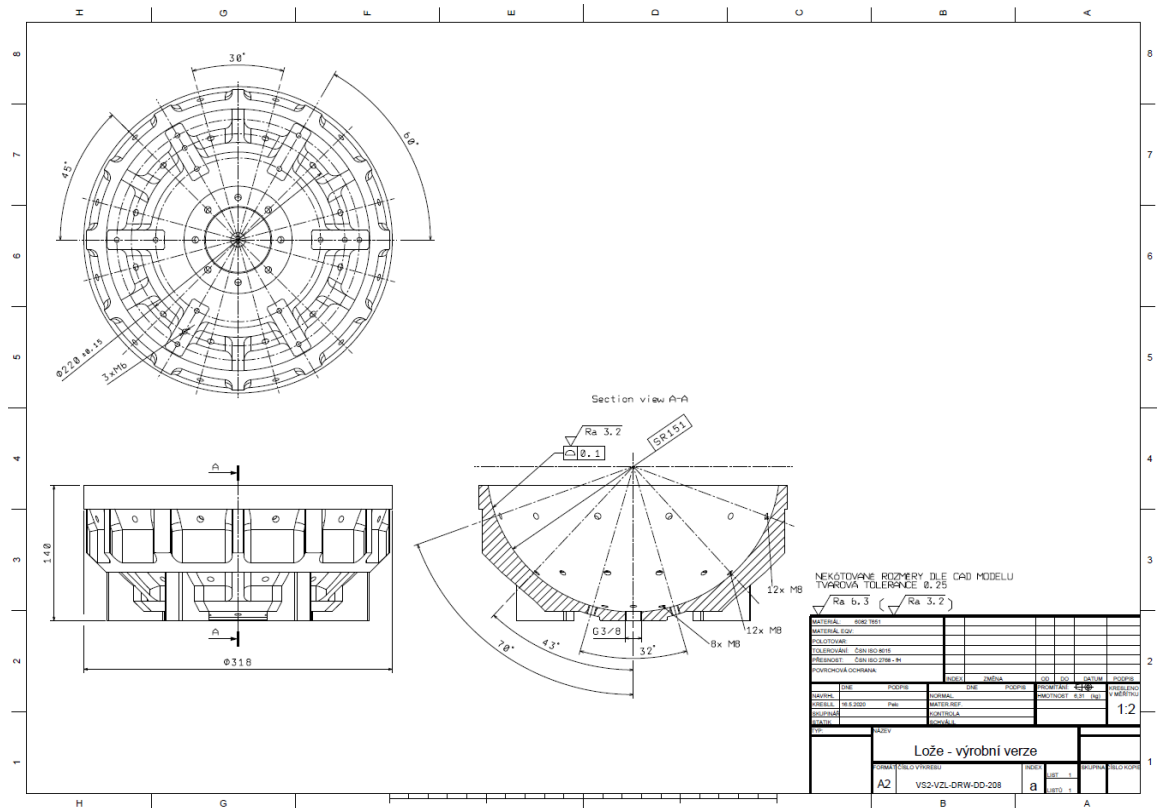
Příloha 7 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-206



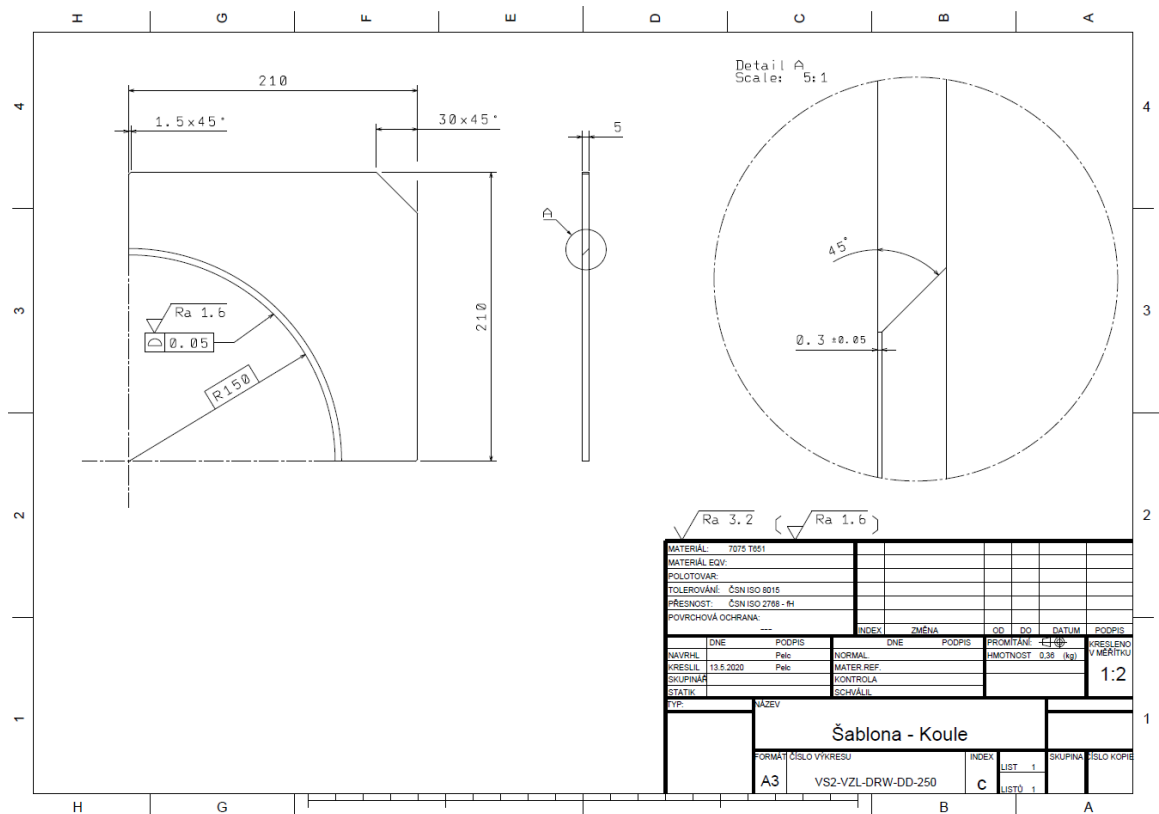
Příloha 8 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-207



Příloha 9 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-208 [43]



Příloha 10 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-250



Příloha 11 – Výkres VS2-VZL-DRW-DD-251

