
ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem polohovací jednotky pro laserovou spektroskopii a jeho realizací do podoby prototypu. Konstrukční návrh vychází z analýzy současného stavu poznání z oblasti zařízení pro dálkovou laserovou spektroskopii. K pohonu je použita harmonická převodovka a šneková převodovka s krokovými motory. Hlavní části polohovací jednotky jsou navrženy převážně z duralu. Polohovací jednotka bude sloužit k experimentálním měřením na Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Konstrukční návrh a výrobní výkresy byly vytvořeny v aplikaci Autodesk Inventor 2010.

KLÍČOVÁ SLOVA

LIBS, Remote LIBS, servomotory, harmonická převodovka, optomechanické komponenty

ANOTATION

This diploma thesis deals with design of positioning unit for laser spectroscopy and its realization to shape of prototype. The design of positioning unit is based on the analysis of the current state of knowledge in the field of remote laser spectroscopy systems. Precise harmonic drive and worm drive with stepper motors are used to drive. The main parts of positioning unit are designed primarily from duraluminium. The positioning unit will be used for experimental measurements at the Institute of Physical Engineering Faculty of Mechanical Engineering Brno University of Technology. 3D digital prototype and technical drawings were created in Autodesk Inventor 2010.

KEYWORDS

LIBS, Remote LIBS, servomotors, harmonic drive, optomechanic components

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BRADA, M. Polohovací jednotka pro laserovou spektroskopii. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Polohovací jednotka pro laserovou spektroskopii“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Daniela Koutného, Ph.D. a uvedl v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně, dne 24. května 2012

.....
Michal Brada

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval doktoru Danielu Koutnému za vedení mého diplomového projektu, pracovníkům Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně za poskytnutí možnosti podílet se na řešení zajímavé technického problému, mým kolegům Petru Fišerovi a Marku Kurucovi za jejich ochotu a konstruktivní kritiku a především mým rodičům za to, že mi umožnili vydat se správnou cestou.

OBSAH

ÚVOD	13
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
1.1 Spektroskopie laserem buzeného plazmatu	15
1.1.1 Základní popis technologie	15
1.1.2 Aplikační možnosti technologie	16
1.1.3 Mobilní laserová spektroskopie	16
1.2 Současná zařízení pro dálkovou laserovou spektroskopii s přenosem záření vzduchem	18
1.2.1 Zařízení TELELIBS	18
1.2.2 Zařízení ST-LIBS	21
1.2.3 Zařízení ChemCam	21
1.2.4 Shrnutí poznatků o současných zařízeních	23
1.3 Elektrické rotační servopohony	23
1.3.1 Základní popis technologie	23
1.3.2 Dynamika rotačních servopohonů	24
1.3.3 Zásady pro návrh servopohonů	25
1.4 Nepřímé rotační servopohony	26
1.4.1 Motory nepřímých rotačních servopohonů	27
1.4.2 Planetové, harmonické a cykloidní převodovky	27
1.4.3 Předepnuté pohony	27
1.5 Přímé rotační servopohony	28
1.5.1 Prstencové motory	28
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA	29
2.1 Formulace řešeného problému	29
2.2 Technicko-vývojová analýza	30
2.2.1 Technická analýza laboratorní aparatury	30
2.2.2 Pohony nastavení azimutu a elevace	30
2.2.3 Umístění laserové hlavy	32
2.2.4 Optická cesta laserového svazku	32
3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	34
4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	35
4.1 Postup řešení projektu	35
4.1.1 Fáze projektu	35
4.2 Časový harmonogram projektu	36
5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY	37
5.1 Popis variant řešení pohonu elevace a rotace	37
5.1.1 Varianta pohonu A	37
5.1.2 Varianta pohonu B	38
5.1.3 Varianta pohonu C	38
5.2 Zhodnocení a výběr optimální varianty pohonu	40
6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	41
6.1 Základní popis konstrukce	41
6.1.1 Tělo jednotky	42
6.1.2 Teleskop	43
6.1.3 Zaměřovací kamera	43

6.1.4	Rameno optiky	43
6.2	Optická cesta laserového svazku	44
6.3	Pohon nastavení azimutu	45
6.4	Pohon nastavení elevace	46
6.5	Použité konstrukční materiály	47
6.6	Hmotové parametry konstrukce	48
6.6.1	Parametry naklápěcí části	49
6.6.2	Parametry pohyblivé části	50
6.7	Kontrola použitých servopohonů	51
6.7.1	Kontrola servopohonu nastavení elevace	51
6.7.2	Kontrola servopohonu nastavení azimutu	53
7	REALIZACE PROTOTYPU	56
7.1	Výroba prototypu	56
7.1.1	Vyčíslení nákladů na stavbu prototypu	57
7.2	Závady prototypu	58
7.3	Astigmatismus optické soustavy	58
7.3.1	Úvod do problematiky	58
7.3.2	Navržené řešení problému	59
7.3.3	Zhodnocení navrženého řešení	61
7.4	Nepřiměřená velikost mrtvého chodu šnekové převodovky	62
7.4.1	Úvod do problematiky	62
7.4.2	Navržené řešení problému	62
7.4.3	Zhodnocení navrženého řešení	63
8	ZÁVĚR	64
8.1	Konstrukční rozbor řešení	64
8.2	Technologický a ekonomický rozbor řešení	64
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	68
11	SEZNAM TABULEK	69
12	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	70
13	SEZNAM PŘÍLOH	71

ÚVOD

Metody laserové spektroskopie, které jsou intenzivně rozvíjeny od 80. let 20. století, patří mezi moderní technologie materiálové analýzy. Lze je využívat k rychlé analýze látek všech skupenství umístěných jak v atmosférických podmínkách, tak např. pod vodou. Výhodou této technologie je relativní nedestruktivnost zkoumaného vzorku a rychlost analýzy. Laserová spektroskopie využívá záření plazmatu, které je vybuzené na povrchu vzorku pomocí pulsního laseru. Toto záření je následně podrobeno spektroskopické analýze.

Jedna z modifikací laserové spektroskopie je tzv. dálková laserová spektroskopie, která umožňuje analyzovat vzorky na vzdálenost desítek až stovek metrů. Dálková laserová spektroskopie nachází uplatnění v mnoha oblastech lidské činnosti. Je využívána v průmyslu, pro armádní účely, pro průzkum vesmíru (např. robotické vozítko Curiosity, které je určeno pro průzkum planety Mars), v archeologii a dalších oblastech. [3]

Aplikační možnosti dálkové laserové spektroskopie jsou také intenzivně zkoumány v Laboratoři laserové spektroskopie na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně. Byla zde sestavena laboratorní aparatura pro dálkovou laserovou spektroskopii, se kterou byla provedena řada měření. Po ověření teoretických předpokladů, bylo rozhodnuto o stavbě experimentálního zařízení.

Předmětem této práce je konstrukční návrh a realizace prototypu polohovací jednotky pro laserovou spektroskopii, která bude součástí experimentálního zařízení pro dálkovou laserovou spektroskopii. S tímto experimentálním zařízením poté bude prováděna série měření pro ověření technologie v podmínkách mimo laboratoř. Díky spolupráci s Masarykovou univerzitou nalezne experimentální zařízení uplatnění např. při archeologických průzkumech.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Tato kapitola předkládá stručný přehled současného stavu poznání z oblasti laserové spektroskopie, které je věnována první podkapitola. V druhé podkapitole jsou popsány zařízení pro dálkovou laserovou spektroskopii. Poslední podkapitola se věnuje shrnutí poznatků z oblasti servopohonů, přičemž jsou v ní uvedeny základní předpoklady, které musí být respektovány při návrh servopohonů.

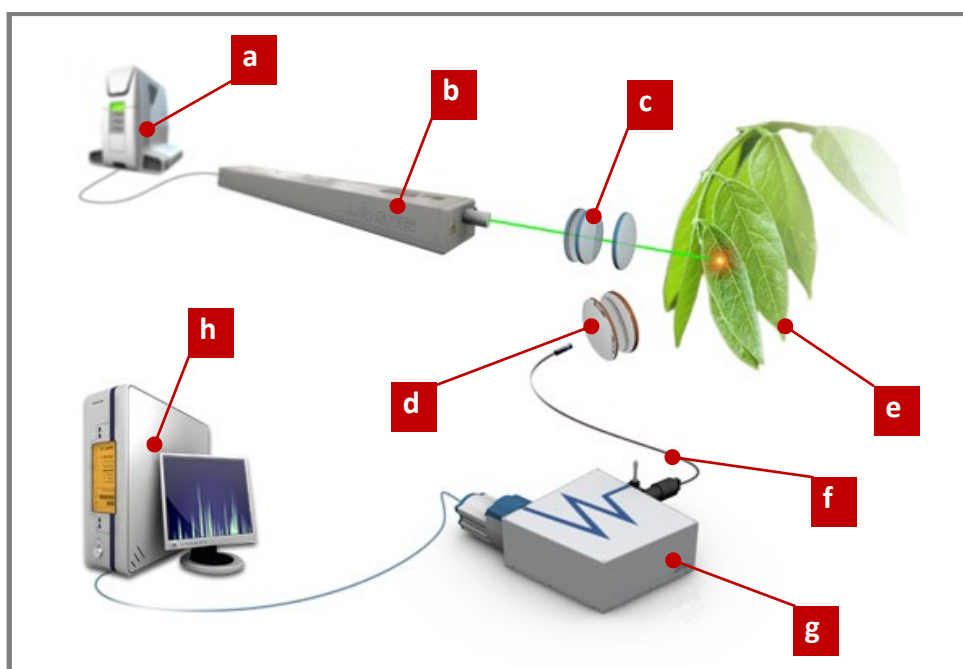
1.1 Spektroskopie laserem buzeného plazmatu

1.1

1.1.1 Základní popis technologie

1.1.1

Spektroskopie laserem buzeného plazmatu, zkráceně též laserová spektroskopie či LIBS (z angl. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy), patří mezi moderní technologie materiálové analýzy. Historie této technologie, která umožňuje zjišťovat chemické složení anorganických i organických vzorků, sahá do 60. let minulého století, tedy do doby zkonstruování prvního laseru. Masivní rozvoj této technologie probíhá od 80. let minulého století, kdy začínají být k dispozici vysoce výkonné pulsní lasery. [7]



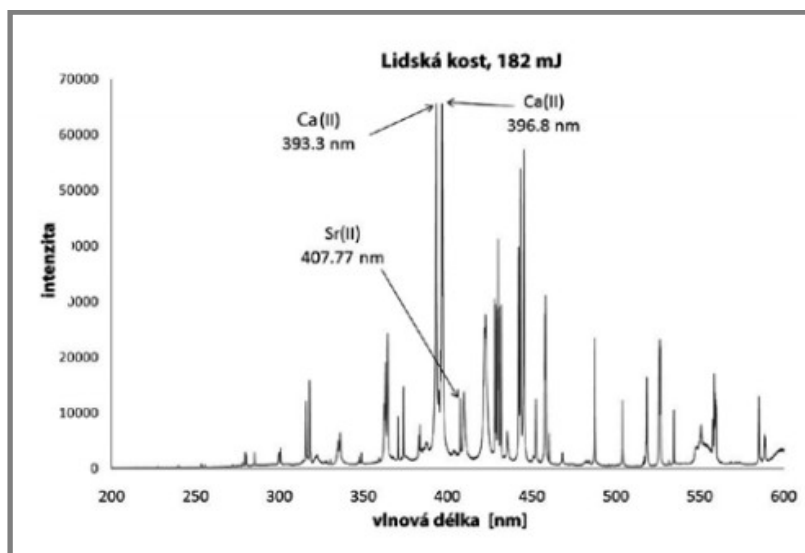
Obr. 1-1 Schéma laboratorní LIBS aparatury [17]

a – zdroj laseru; b – laserová hlava; c – fokusační optika; d – sběrná optika;
e – vzorek; f – optické vlákno; g – spektroskop s ICCD kamerou; h – PC

LIBS pracuje na principu analýzy spektra záření mikroplazmatu vytvořeného na povrchu zkoumaného vzorku. Plazma je na povrchu vytvořeno pomocí pulsního ablačního laseru, jehož laserový svazek je zfokusován na malý prostor vzorku, díky čemuž je dosaženo velmi vysoké intenzity záření (až GW/cm^2). Dnes jsou nejčastěji užívány pevnolátkové Nd:YAG a Nd:KGW lasery. [3, 7]

Vzniklé záření plazmatu je zachyceno sběrnou optikou a přeneseno optickým vláknem do spektroskopu, kde je rozloženo podle vlnové délky a takto rozložené dopadá na čip kamery. Výsledkem je signál ve tvaru závislosti intenzity záření na

vlnové délce. Tento signál je dále zpracován a porovnán se známými závislostmi pro jednotlivé prvky – emisními čarami, na základě čehož je určeno chemické složení vzorku, tedy kvalitativní zhodnocení. Pro zjištění koncentrace prvků, tedy pro provedení kvantitativní analýzy, je potřeba provést předem kalibraci, tj. zjistit závislost intenzity emisní čáry na koncentraci. [17]



Obr. 1-2 Ukázka LIBS spektra lidské kosti [5]

1.1.2 Aplikační možnosti technologie

Technologie LIBS se úspěšně využívá v mnoho vědeckých a průmyslových oblastech díky schopnosti analyzovat vzorky všech skupenství, bez nutnosti jejich přípravy, a díky její relativní nedestruktivnosti – dochází pouze k poškození povrchu vzorku. [7]

V průmyslové praxi je tato technologie užívána pro analýzu složení slitin kovů např. v ocelářském (možno provádět analýzu složení ocelí přímo při tavbě) či elektrotechnickém průmyslu, rovněž je užívána pro identifikaci plastů v odpadovém hospodářství etc. Ve vědních oborech je užíván především v biologii, archeologii (analýza nástěnných frezek a historických předmětů), geologii, ekologii (analýza kontaminace vod) a kriminologii. [3, 18]

Detekční limity této technologie mají poměrně velký rozptyl, neboť jsou závislé na podmínkách měření – především na vzdálenosti laserové hlavy a optiky od vzorku. V případě analýzy v podmínkách laboratoře, tj. na vzdálenost několika centimetrů, se pohybují okolo jednotek $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. V případě dálkové laserové spektroskopie, tj. měření na vzdálenost desítek či stovek metrů, klesají až na hodnotu $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. [3, 7]

1.1.3 Mobilní laserová spektroskopie

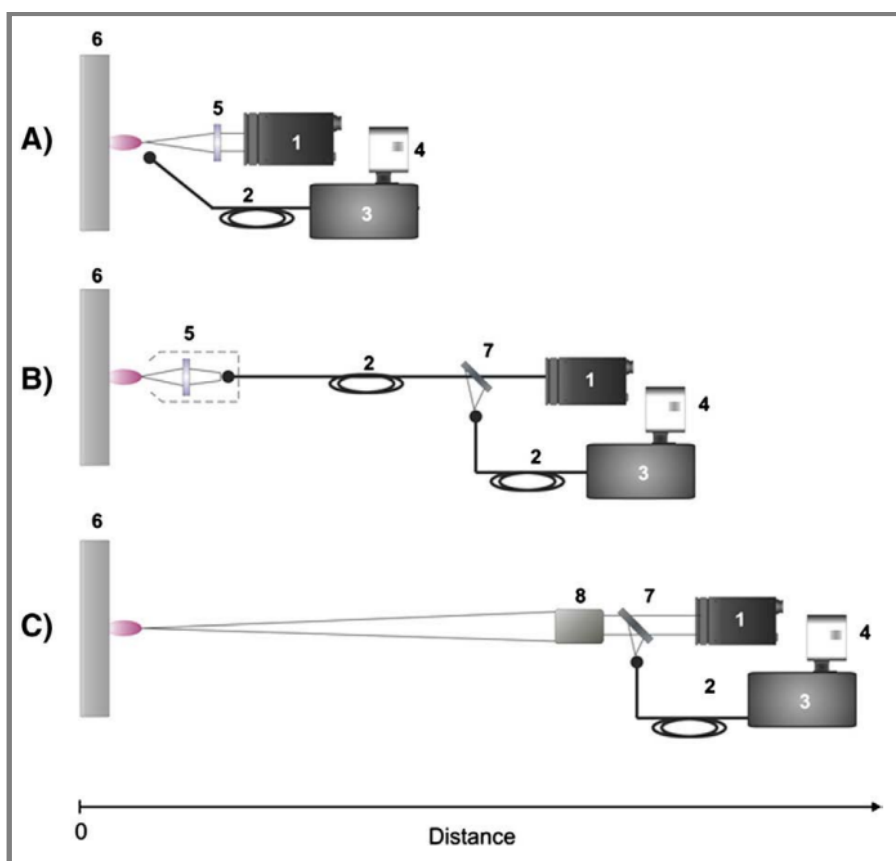
Mobilní laserová spektroskopie umožňuje provádět rychlou in situ chemickou analýzu předmětů (vzorků), které není možno dopravit do prostředí laboratoře z důvodu jejich omezené transportovatelnosti (předměty archeologických a geologických průzkumů), nebo z důvodu rizika, které by transport samotný představoval (výbušné, radioaktivní a jinak nebezpečné materiály). Pomocí této

technologie lze taktéž provádět analýzu v místech, které jsou člověku obtížné či zcela nepřístupné (podmořský a vesmírný výzkum). [18]

Zařízení pro mobilní laserovou spektroskopii jsou tvořeny podobnými komponenty jako zařízení určená pro měření v prostředích laboratoří, liší se především v uspořádání a také v tom, že z důvodu lepší mobility jsou užívány kompaktnější lasery a spektroskopy. Tyto zařízení lze rozdělit do několika skupin, např. F. J. Fortes a J. J. Laserna [3] uvádějí toto rozdělení

- přenosná LIBS zařízení (Portable LIBS systems),
- LIBS zařízení pro dálkové měření,
 - s přenosem záření pomocí optických kabelů (Remote LIBS systems),
 - s přenosem záření vzduchem (Stand-off LIBS systems).

Schematicky je toto rozdělení zobrazeno na Obr. 1-3. Neboť však neexistuje žádné kodifikované rozdělení, je toto pouze orientační.



Obr. 1-3 Konfigurace zařízení pro mobilní LIBS [3]

A) Přenosné LIBS zařízení; B) LIBS zařízení pro dálkové měření s přenosem záření pomocí optických kabelů; C) LIBS zařízení pro dálkové měření s přenosem záření vzduchem

1 – laserová hlava; 2 – optické vlákno; 3 – spektrometr; 4 – CCD kamera;
5 – fokusační/sběrná optika; 6 – vzorek; 7 – polopropustné zrcátko; 8 – teleskop

1.1.3.1 Přenosná LIBS zařízení

Přenosná LIBS, která jsou nejčastěji „kufříkového“ provedení či v provedení k nošení na zádech, umožňují provádět měření v terénu na vzorcích, které jsou

obsluze dostupné, tj. různé kameny, zeminy, historické předměty archeologických průzkumů etc. [3]

1.1.3.2 LIBS zařízení pro dálkové měření

LIBS zařízení pro dálkové měření, tj. pro dálkovou laserovou spektroskopii, umožňují provádět analýzu vzorků, které jsou obsluze nedostupné (např. nástěnné malby ve výškách), nebo jsou nebezpečné (např. výbušniny, radioaktivní materiály). Na rozdíl od přenosných zařízení mají lepší detekční limity, neboť je u nich možno užít výkonnější (a těžší) lasery a přesnější spektroskopy.

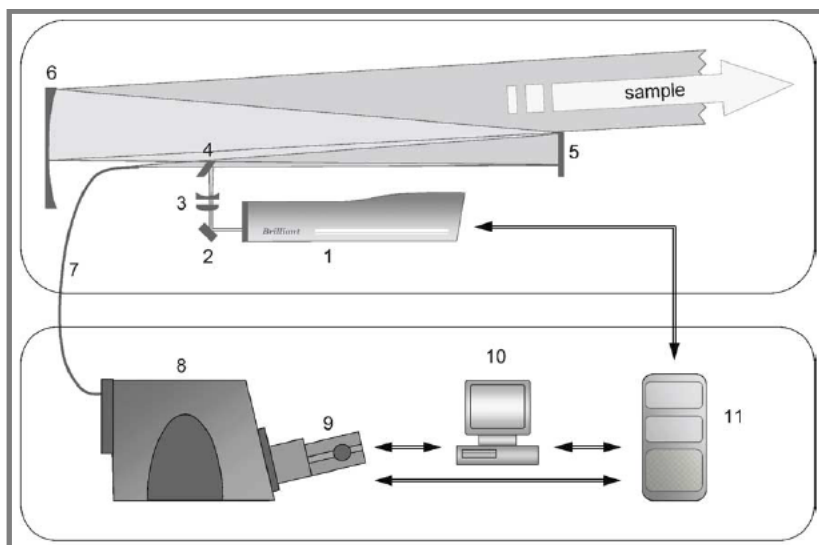
Zařízení s přenosem záření pomocí optických kabelů využívá optické vlákno pro přivedení laserového svazku ke vzorku, kde je poté zfokusován pomocí optiky. Stejnou cestou je přiváděno záření mikroplazmatu do spektroskopu, které bylo sesbíráno sběrnou optikou. Nevýhodou tohoto uspořádání je fakt, že optickými kabely není možno přenášet laserový svazek s velkými plošnými výkony, čímž jsou sníženy detekční schopnosti.

Naopak zařízení s přenosem záření vzduchem dosahují lepších detekčních limitů, neboť mohou být užity laserové svazky s většími výkony. Nevýhodou tohoto uspořádání je fakt, že může dojít k ovlivnění laserového svazku i vzniklého záření atmosférickými jevy. Pro sběr záření jsou užívány zrcadlové teleskopy, ke zfokusování laserového svazku jsou užívány zrcadlové i optické teleskopy. Tato konfigurace umožňuje provádět měření na vzdálenosti desítek až stovek metrů. [3, 11]

1.2 Současná zařízení pro dálkovou laserovou spektroskopii s přenosem záření vzduchem

1.2.1 Zařízení TELELIBS

S. Palanca a kol. [12] publikovali v roce 2006 výsledky experimentů provedených na zařízení pro dálkovou laserovou spektroskopii vlastní konstrukce. Zařízení, jehož schéma se nachází na Obr. 1-4, je sestaveno z pulsního 1064nm Nd:YAG laseru (Quantel Brilliant, energie pulsu 350 mJ s šířkou 4,6 ns), pro vyhodnocení spektra je užít spektroskop Mechelle s CCD kamerou.



Obr. 1-4 Schéma experimentálního zařízení [12]

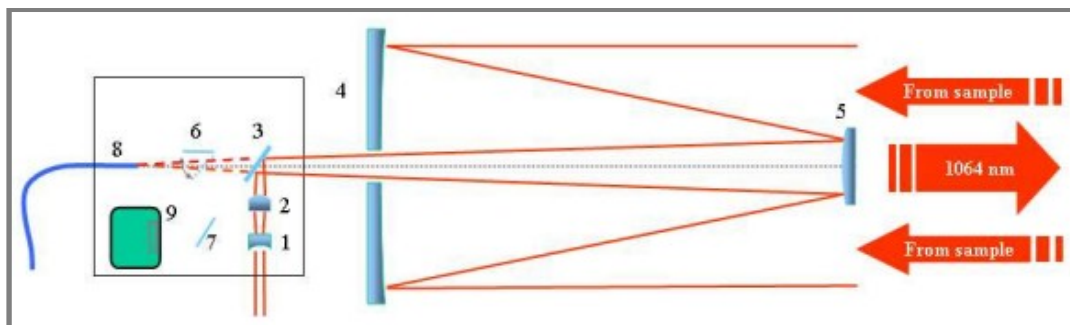
1 – laserová hlava; 2 – zrcátko; 3 – fokusační optika; 4 – polopropustné zrcátko; 5 – sekundární zrcátko; 6 – primární zrcátko; 7 – optické vlákno; 8 – spektrometr; 9 – CCD kamera; 10 – řídicí PC; 11 – zdroj laseru

Optická cesta je složena z fokusační optiky Galileova typu pro rozšíření laserového svazku a ze soustavy zrcadel, tvořící teleskop Herschelova typu, pro jeho navedení a pro sběr záření plazmatu. Zaostřování je realizováno pohybem sekundárního zrcátka, opatřeného elektrickým pohonem. Mechanická část zařízení neumožňuje přesné zaměření na cíl, neboť teleskop není opatřen aktuátory pro nastavení azimutu a elevace. Komponenty jsou umístěny v jednoduché rámové konstrukci opatřené kolečky a opláštěním pro ochranu před atmosférickými vlivy (viz Obr. 1-5), která dovoluje provádět měření v reálných podmínkách v terénu na vzdálenost až 120 m.



Obr. 1-5 Fotografie experimentálního zařízení [12]

V roce 2009 publikovali J. J. Laserna a kol. [11] popis zařízení s názvem TELELIBS (viz Obr. 1-7), které částečně vychází z práce S. Palanca a kolektiv, umožňující přesné zaměření na cíl. Sběr záření plazmatu je realizováno teleskopem Cassegrainova typu, s průměrem primárního zrcadla 400 mm, který je polohován aktuátory pro nastavení azimutu a elevace. Jako zdroj laserového svazku jsou užity dva 1064nm Nd:YAG pulsní lasery (Quantel Brilliant, energie pulsu 750 mJ s šířkou 5,5 ns). Neboť jsou laserové hlavy umístěny na statické části TELELIBSU, je laserový svazek veden soustavou kinematických periskopů od společnosti Applied Photonics, které dovolují natáčení a naklápění teleskopu.



Obr. 1-6 Schéma optické soustavy TELELIBS [11]

1, 2 – fokusační optika; 3 – polopropustné zrcátko; 4 – primární zrcátko; 5 – sekundární zrcátko; 6 – sklopné zrcátko; 7 – zrcátko; 8 – optické vlákno; 9 – CCD kamera

Optická soustava (viz Obr. 1-6) je sestavena z primárního a sekundárního zrcadla teleskopu a fokusační optiky Galileova typu, která umožňuje efektivně „střílet“ na vzdálenost v rozsahu 20 až 120 m. Před vstupní část optického vlákna spektroskopu je vloženo sklopné zrcátko umožňující odklonění světelného záření do CCD kamery pro sledování cíle. Zařízení je taktéž vybaveno laserovým zaměřovačem.



Obr. 1-7 Zařízení TELELIBS [11]

1.2.2 Zařízení ST-LIBS

F. C. De Lucia a kolektiv publikovali v roce 2009 [4] přehledový článek popisující pět vývojových generací zařízení ST-LIBS, jež byly vyvinuty pro účely Armády Spojených států amerických, především k provádění dálkové analýzy výbušnin.

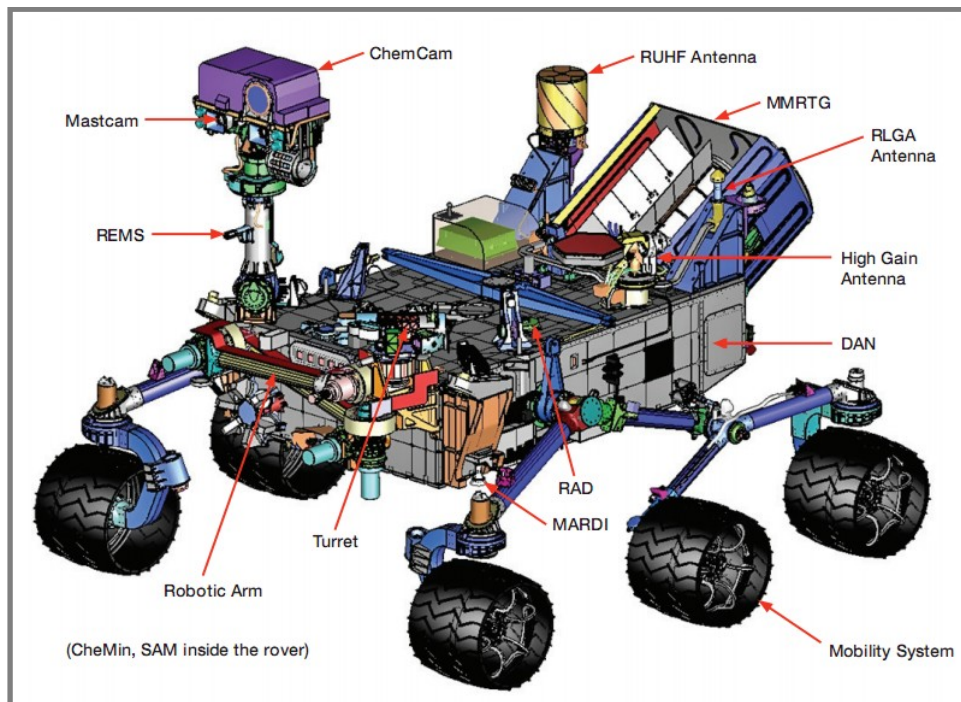
První generace ST-LIBS umožňuje provádět měření na vzdálenost cca 20 m, pátá až na vzdálenost 100 m, přičemž toto zařízení páté generace je zcela přizpůsobeno vojenským polním podmínkám, zatímco první až čtvrtá generace sloužila k ověřování možností samotné technologie dálkové laserové spektroskopie. Tyto první generace vykazují podobné koncepční řešení konstrukce, viz Obr. 1-8. Pro sběr záření je užit 14" teleskop Cassegrainova typu (v případě první generace pak 8"), který je polohován aktuátory. Laserový svazek je přiveden od staticky uložených laserových hlav soustavou kinematických periskop, zfokusován optikou Galileova typu a přiveden do osy teleskopu. Jako zdroje laserového svazku jsou použity Nd:YAG pulsní lasery, např. v případě třetí generace je užit laser Quantel Brilant B (energie pulsu 850 mJ s šířkou 5 ns).



Obr. 1-8 ST-LIBS třetí generace [24]

1.2.3 Zařízení ChemCam

Pro účely studia povrchu planety Mars a složení jeho hornin, v rámci mise Mars Science Laboratory, bylo vyvinuto zařízení ChemCam (z angl. Chemistry and Camera). ChemCam využívá technologii dálkové laserové spektroskopie pro in situ chemickou analýzu složení hornin, solí a dalších. Rovněž využívá technologii dálkového mikro-snímání pro studium charakteru povrchu a představuje jedno z deseti vědeckých zařízení, které jsou umístěny na robotickém vozítku Curiosity. [2, 8]



Obr. 1-9 Robotické vozítko Curiosity [8]

ChemCam je uloženo v polohovatelné hlavě, umístěné na sklopném pivoťu, umožňující přesné nastavení azimutu a elevace pomocí aktuátorů, které byly navrženy speciálně pro tuto misi. ChemCam umožňuje provádět měření v rozsahu vzdáleností 2 až 7 m. Celé zařízení je modulární, složené ze čtyř modulů (boxů) – modul s pulsním laserem, teleskopem, elektronikou a kamerou pro mikrosnímkování –, které jsou umístěny v polohovatelné hlavě (viz Obr. 1-10), a z modulu se spektrometrem, který je umístěn v těle Curiosity a je propojen s polohovací hlavou pomocí optického vlákna.

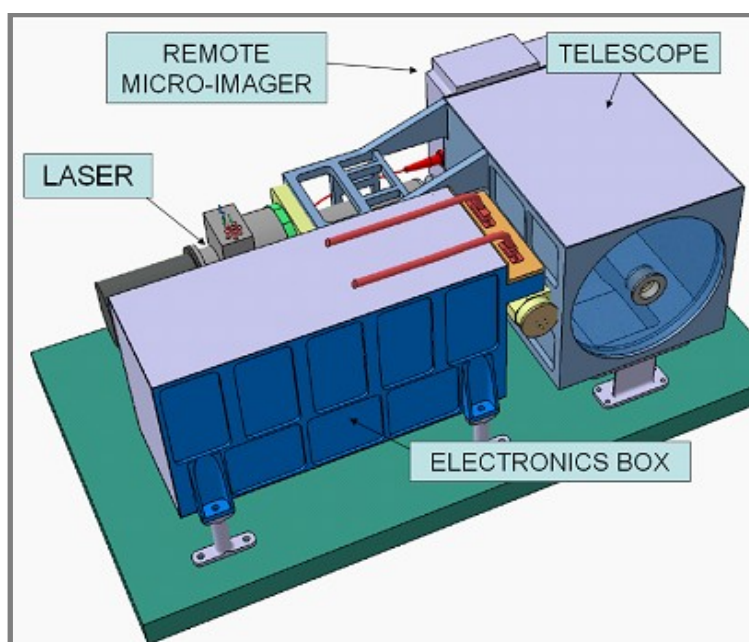
1.2.3.1 Modul s pulsním laserem

Pro vytvoření plazmatu na povrchu vzorku je užit pevnolátkový 1067 nm Nd:KGW pulsní laser (energie pulsu 14 mJ s šířkou 5 ns). Laser neslouží pouze k vytvoření plazmatu na povrchu vzorku, ale taktéž slouží k jeho „čistění“ od nánosů prachu, které jsou na něm usazeny a tvoří překážku. Pro rozšíření laserového svazku je užitá fokusační optika Galileova typu, umístěná již v boxu s laserem z důvodu optimalizace celkovým rozměrů. [2]

1.2.3.2 Modul s teleskopem

Sběr záření plazmatu je realizován teleskopem Cassegrainova, s primárním zrcadlem o průměru 110 mm a sekundárním zrcadlem o průměru 28 mm. Zrcadla jsou vyrobena ze slitiny hliníku s deponovanou reflexní vrstvou (lehčí a robustnější řešení oproti zrcátku ze skla). Pro přesné navedení laserového paprsku a maximální sběr záření je teleskop vybaven automatickým ostřením. Ostření je prováděno pohybem sekundárního zrcadla v rozsahu 15 mm, které je upevněno na vozíčku jezdícím v lineárním vedení s valivými elementy. Pohyb je realizován pomocí pohybového šroubu hnaného krokovým motorem a mosazné matice. Konstrukce zajišťuje stabilní

ostření v rozsahu pracovním teplot $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, s životností cca 10 tisíc pracovních cyklů. [1]



Obr. 1-10 Vnitřní rozmístění částí ChemCam [9]

1.2.4 Shrnutí poznatků o současných zařízeních

1.2.4

Jak je z předešlého výčtu patrné, současné zařízení pro dálkovou laserovou spektroskopii s přenosem záření vzduchem nacházejí uplatnění především v armádním sektoru (ST-LIBS) a ve výzkumu vesmíru (ChemCam), popř. se nacházejí ve fázi funkčních vzorků (TELELIBS), a nenašly si tedy prozatím cestu do privátního sektoru.

Toto je dáno především vyšší pořizovací cenou jednotlivých komponent (pevnolátkového laseru a spektroskopu) a jejich hmotností (v případě, kdy je použit komerčně dostupný laser a spektroskop). [3]

U všech popsaných zařízení je laserový svazek vždy přiveden do osy teleskopu pro optimální sběr záření a snadnější zaměřování (fokusační optika i sběrná optika jsou nastaveny na stejnou vzdálenost). Z výčtu jsou taktéž zřejmé dvě základní koncepce umístění laseru, resp. laserové hlavy. V případě první koncepce je laser umístěn na pohyblivé části zařízení a laserový svazek je přiveden do osy teleskopu pomocí soustavy nepohyblivých zrcadel (ChemCam a raná fáze TELELIBS). Druhá koncepce využívá kinematický periskop, který slouží k přivedení laserové svazku od laseru, jenž je uložen na statické části zařízení (ST-LIBS a TELELIBS). U žádného zařízení není k přenosu laserového svazku užito optické vlákno.

1.3 Elektrické rotační servopohony

1.3

1.3.1 Základní popis technologie

1.3.1

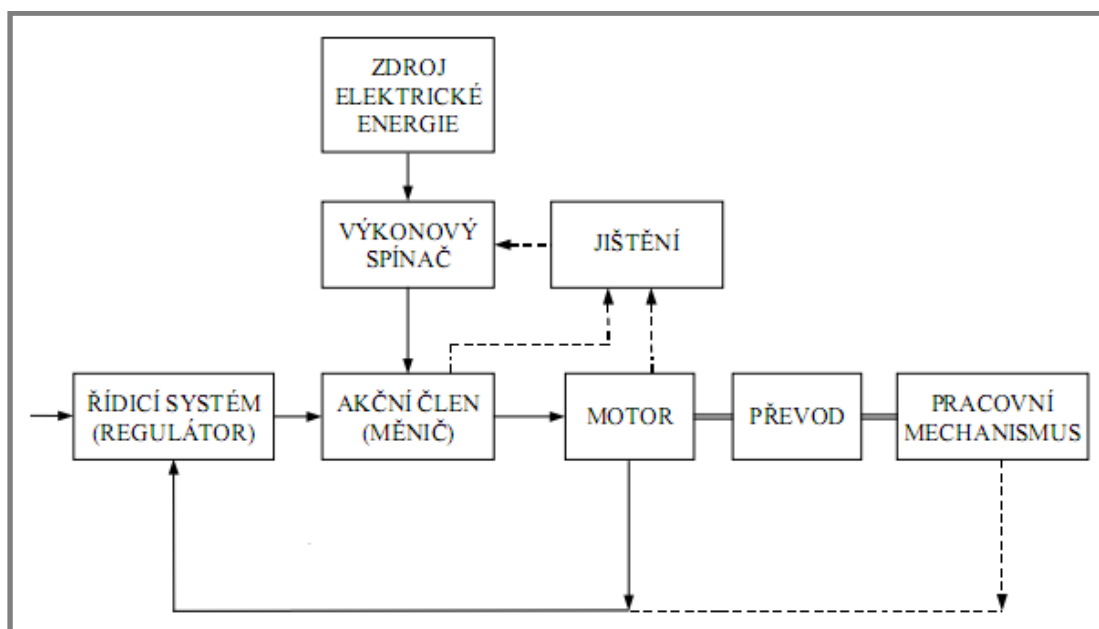
Elektrický (rotační) servopohon představuje mechatronický subsystém, který zajišťuje řízení pohybu při současné přeměně elektrické energie na energii mechanickou. Servopohon je regulační obvod, který, na rozdíl od běžného

elektrického pohonu pracujícího v otevřené smyčce, je vždy zapojen v uzavřené regulační smyčce, s rychlostní, často i polohovou, zpětnou vazbou. [15]

Mezi základní prvky servopohonu (viz Obr. 1-11) především patří

- elektromotor,
- převodový mechanismus,
- akční člen (dnes nejčastěji polovodičový budič/měnič),
- řídicí systém (regulátor),
- jisticí prvky,
- spínací prvky.

Elektrické servopohony můžeme rozdělit na přímé a nepřímé, přičemž u nepřímých servomotorů je mezi pracovní mechanismus a elektromotor vřazen převodový mechanismus.



Obr. 1-11 Schéma elektrického servopohonu [16]

1.3.2 Dynamika rotačních servopohonů

Dynamiku pohybu elektrických rotačních servopohonů můžeme popsat pomocí pohybové rovnice, [16] která má základní tvar

$$M_M - M_Z = J_C \frac{d\omega_{PM}}{dt} \quad (1.1)$$

kde

M_M [N·m] je točivý moment motoru,

M_Z [N·m] je točivý moment zátěže,

J_C [kg·m²] je moment setrvačnosti pohybujících se hmot působících na motor,

ω_{PM} [rad·s⁻¹] je úhlová rychlost pracovního mechanismu.

V případě, kdy je mezi elektrický motor a pracovní mechanismus vřazen převodový mechanismus (viz Obr. 1-12), dochází k redukci momentu setrvačnosti všech

pohybujících se hmot. [15] Potom můžeme psát, s využitím rovnováhy kinetických energií před a za převodovým mechanismem, pro moment setrvačnosti

$$\frac{1}{2}J_{CR}\omega_M^2 = \frac{1}{2}J_{RM}\omega_M^2 + \frac{1}{2}J_{RG}\omega_M^2 + \frac{1}{2}J_{PM}\omega_{PM}^2 \quad (1.2)$$

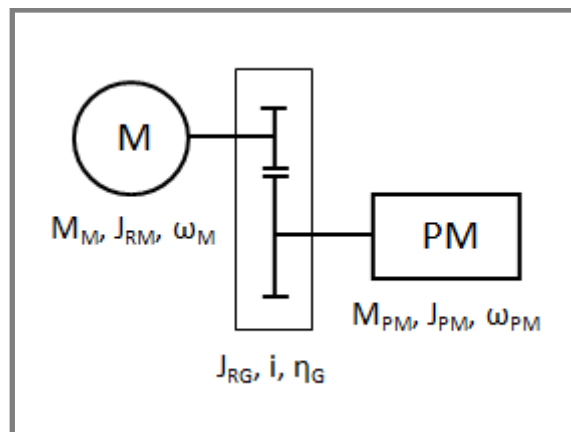
a po úpravě

$$J_{CR} = J_{RM} + J_{RG} + J_{PM} \frac{\omega_{PM}^2}{\omega_M^2} = J_{RM} + J_{RG} \frac{1}{i^2} + J_{PM} \frac{1}{i^2} \quad (1.3)$$

kde

- J_{CR} [kg·m²] je redukovaný moment setrvačnosti,
- J_{RM} [kg·m²] je moment setrvačnosti rotoru motoru,
- J_{RG} [kg·m²] je moment setrvačnosti převodového mechanismu na vstupu,
- J_{PM} [kg·m²] je moment setrvačnosti pracovního mechanismu,
- ω_M [rad·s⁻¹] je úhlová rychlost motoru.
- i [-] je převodový poměr převodového mechanismu.

Protože dochází k redukci momentu setrvačnosti pracovního mechanismu s kvadrátem převodového poměru, přispívá převodový mechanismus velmi výrazně ke zlepšení dynamických vlastností pohonu.



Obr. 1-12 Schéma elektrického pohonu s převodovkou

Následně můžeme přepsat pohybovou rovnici, se započítáním ztrát v převodu, do tvaru

$$M_M - M_{PM} \frac{1}{i} \frac{1}{\eta_G} = \left(J_{RM} + J_{RG} + J_{PM} \frac{1}{i^2} \frac{1}{\eta_G} \right) \frac{d\omega_{PM}}{dt} \quad (1.4)$$

kde

- M_M [N·m] je točivý moment pracovního mechanismu,
- η_G [-] je účinnost převodového mechanismu.

1.3.3 Zásady pro návrh servopohonů

Při návrhu současných pokročilých strojírenských aplikací, užívaných především ve výrobním sektoru (CNC obráběcí centra, roboty a manipulátory), letectví, kosmonautice, lékařství a armádním sektoru, jsou kladeny vysoké požadavky na

pohony těchto aplikací, aby byla zaručena požadovaná funkčnost aplikace. Tyto požadavky jsou často v rozporu (např. cena vs. přesnost, kompaktní provedení vs. tuhost etc.). [19]

Mezi tyto požadavky především patří

- vysoká momentová přenositelnost,
- přesnost a opakovatelnost polohování,
- vysoká účinnost,
- minimalizace vibrací a hluku.

Na základě zkušeností s návrhem servopohonů respektující výše zmíněné požadavky, byl vytvořen soubor zásad pro návrh servopohonů. Respektování těchto zásad má pozitivní vliv na výslednou funkčnost.

1.3.3.1 Vysoká polohová přesnost

Velikost celkové hystereze v polohovací smyčce, která je dána velikostí vůle, ale také ztrátou pohybu vlivem nízké tuhosti a pasivními odpory, má vliv nejenom na přesnost polohování, ale také na vznik vibrací a s tím spojeného hluku. Velikost vůle lze minimalizovat užitím pohonů s přesnými převodovými mechanismy. Jedná se např. o harmonické, cykloidní a přesné planetové převodovky, popř. předepjaté pohony s čelními a šnekovými převodovkami. Další možností, jak minimalizovat vůli, je užití přímých pohonů. [20, 21]

1.3.3.2 Maximální tuhost

Tuhostí se rozumí především torzní tuhost servopohonů, převodových mechanismů a dalších částí, které přímo souvisí s pohonem. Neboť má výsledná velikost tuhosti aplikace vliv na polohovou přesnost, především při zátěži, je nutné maximalizovat tuhost servopohonu, tak tuhost zbývajících částí konstrukce.

1.3.3.3 Přiměřený moment setrvačnosti

Přiměřenost momentu setrvačnosti zátěže pracovního mechanismu vzhledem k momentu setrvačnosti rotoru servomotoru lze vyjádřit poměrem

$$k_M = \frac{J_{CR}}{J_{RM}} \quad (1.5)$$

kde

k_M [-] je poměr momentů setrvačnosti,

J_{CR} [kg·m²] je redukovaný moment setrvačnosti, viz vztah (1.3),

J_{RM} [kg·m²] je moment setrvačnosti rotoru motoru.

Pro optimální polohování je vhodné navrhnout servopohon s poměrem $k_M < (10 \div 15)$. Někdy je uváděna hodnota $k_M < 5$. [22]

Pro usnadnění návrhu servopohonů dnes výrobci servomotorů často uvádějí doporučený maximální moment setrvačnosti zátěže, pro který je servomotor optimalizovaný.

1.4 Nepřímé rotační servopohony

Nepřímý rotační servopohon je tvořen elektrickým servomotorem a převodovým mechanismem, který je vložen mezi pracovní mechanismus a servomotor. Vložený

převodový mechanismus zvyšuje tuhost servopohonu a redukuje moment setrvačnosti zátěže, který působí na rotor servomotoru. Vložený převodový mechanismus dovoluje užít servomotor, který má nižší nominální krouticí moment a vyšší otáčky. Protože je velikost proudu tekoucího vinutím přibližně úměrná velikosti krouticího momentu a proud tedy může být nižší než např. u přímých pohonů, dochází k menším Jouleovým ztrátám. Proto není nutné např. vodní chlazení u motorů nižších výkonů. [25]

1.4.1 Motory nepřímých rotačních servopohonů

1.4.1

Dříve hojně užívané stejnosměrné komutátorové motory (DC motory) jsou dnes nahrazovány elektricky komutovanými stejnosměrnými motory (BLDC motory) a synchronními střídavými motory. Výhodou je především jejich bezúdržbovost (absence komutátoru s uhlíky, ložiska s celoživotní náplní atd.). Pokud je elektrický motor vybaven zpětnovazebním členem, rotačním enkodérem, hovoříme o elektrickém servomotoru.

1.4.2 Planetové, harmonické a cykloidní převodovky

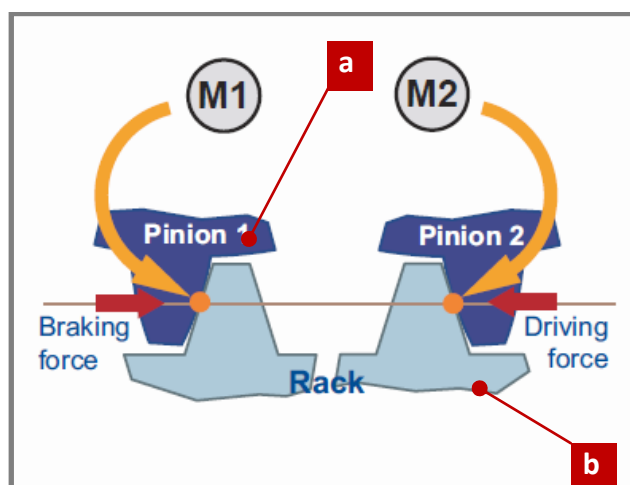
1.4.2

Při návrhu přesných pohonů není možné užít konvenční převodovky (čelní, šnekové či kuželové), především z důvodu velké vůle v převodu. Protože zde nacházejí uplatnění převodovky planetové, harmonické a cykloidní. Společnými vlastnostmi těchto převodovek je nízká vůle v převodu (desítky úhlových vteřin až jednotky úhlových minut), vysoká kinematická přesnost, možnost dosáhnouti velkého převodového poměru při malých zástavbových rozměrech, vysoká momentová přenositelnost a vysoká tuhost. [19]

1.4.3 Předepnuté pohony

1.4.3

U předepnutých pohonů (někdy také označovány jako pohony Master&Slave) je díky elektrické, popř. mechanické, vazbě páru servomotorů vyvozeno předpětí mezi pastorkem a ozubeným hřebenem (věncem). Díky tomuto předpětí je v převodu vymezena vůle a dosažena požadovaná přesnost polohování. Předepnuté pohony nacházejí uplatnění především při konstrukci lineárních pohonů obráběcích CNC center (uspořádání s pastorkem a ozubeným hřebenem), popř. při konstrukci rotačních pohonů frézovacích hlav (uspořádání s pastorkem a ozubeným věncem). [27]



Obr. 1-13 Schéma předepnutého pohonu s elektrickou vazbou
a – pastorek servomotoru; b – ozubený hřeben (věnc)

1.5 Přímé rotační servopohony

Přímý rotační servopohon je složen s elektrického servomotoru a hnaného mechanismu.

Použití přímých pohonů přináší zjednodušení konstrukce pohonů a zbavuje tyto některých negativních vlastností, např. vůle nebo kinematických chyb v převodu.

Na rozdíl od nepřímých pohonů s přídatnou mechanickou tuhostí, která je tvořena vloženým převodovým mechanismem, tvoří u přímých pohonů veškerou tuhost pohonu pouze její zpětnovazební regulace. Na regulaci jsou tedy kladeny vysoké nároky, zvláště v případech, kdy je pohon zatížen velkými setrvačnými hmotami. Problematické je taktéž zahřívání těchto motorů. U přímých pohonů je výsledný silový účinek vyvozen přímo motorem, čemuž odpovídá někdy poměrně vysoká velikost proudu tekoucího vinutím, která, z důvodu Jouleových ztrát v tomto vinutí, způsobuje oteplení motoru. Jako řešení se často užívá vodní nebo vzduchové chlazení. Nevýhodou je také vyšší cena oproti pohonům nepřímým. Mezi přímé servopohony patří např. prstencové motory. [25]

1.5.1 Prstencové motory

Prstencové motory (někdy také momentové motory) se vyznačují nízkými otáčkami (cca do 500 min^{-1}), vysokým krouticím momentem a velmi často dutým výstupním hřídelem. Po funkční stránce se jedná o synchronní vícepólové motory s permanentními magnety. Tyto motory se nejčastěji užívají při stavbě obráběcích CNC center (otočné stoly, vřetena, souřadnicové hlavy) a průmyslových robotů.



Obr. 1-14 Prstencový motor VUES ROL [26]

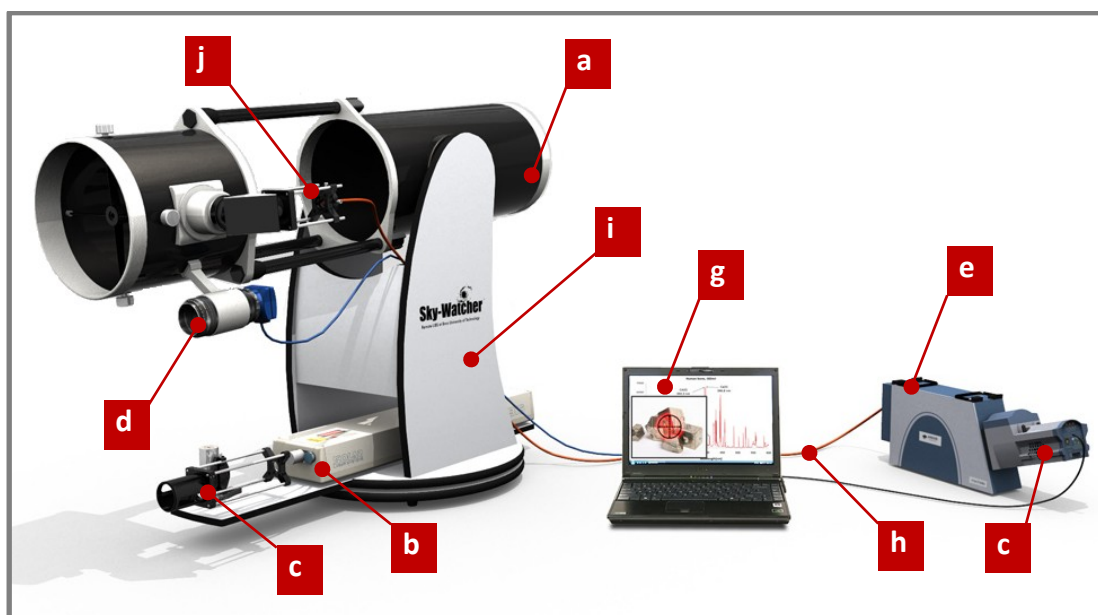
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

2

2.1 Formulace řešeného problému

2.1

Tým pod vedením doc. Kaisera, z Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně, sestavil na základě vlastních výsledků měření s laboratorní aparaturou pro dálkovou laserovou spektroskopii inovovanou verzi této aparatury, která slouží k ověřování možnosti provádění dálkové laserové spektroskopie v podmínkách mimo laboratoř (především pro potřeby archeologických průzkumů). Sestavená aparatura, která je zobrazena na Obr. 2-1, potvrdila teoretické předpoklady poté, co s ní byla provedena série měření na vzdálenost cca 6,2 m. [5, 6, 13]



Obr. 2-1 Laboratorní aparatura pro dálkovou laserovou spektroskopii [14]

a – teleskop SkyWatcher Newtonova typu; b – laserová hlava laseru Solar LQ-916; c – fokusační optika; d - pozorovací kamera; e – spektrometr Andor Mechelle 5000; f – ICCD kamera Andor iStar 734; g – řídicí PC; h – optické vlákno; i – montáž typu Dobson; j – sběrná optika

Měření proběhla pouze v Laboratoři laserové spektroskopie, která se nachází na ÚFI, protože sestavená aparatura neumožňovala provádět měření mimo laboratoř. Důvodem byla skutečnost, že jednotlivé části, tj. laserová hlava, sběrný teleskop, PC atd., nebyly spojeny do žádného kompaktního celku, jak je zřejmé z Obr. 2-1. Nebylo tak možné provádět automatické měření na zvolené oblasti, zaměřování na danou oblast bylo prováděno pouze manuálně a to pro teleskop a laserovou hlavu zvlášť. Uspořádání a uchycení jednotlivých komponent také vylučovalo přesun mimo laboratoř. Komplikované bylo i seřizování optické cesty.

Snahou tedy je vytvořit polohovací jednotku integrující v sobě některé prvky laboratorní aparatury (teleskop, laserová hlava, fokusační optika a zaměřovací kamera), která by umožnila provádět automatické měření na zvolené oblasti vzorku, při zachování manuálního ostření na vzdálenost vzorku. Tato jednotka bude tvořit část mobilního zařízení pro dálkovou laserovou spektroskopii, které není předmětem

řešení tohoto diplomového projektu. S tímto zařízením pak bude možné provést měření v reálných podmínkách mimo laboratoř a validovat možnosti této technologie.

2.2 Technicko-vývojová analýza

2.2.1 Technická analýza laboratorní aparatury

Aparatura (viz Obr. 2-1) je složena z hvězdářského teleskopu SkyWatcher. Jedná se o teleskop Newtonova typu s 10" primárním parabolickým zrcadlem, který je umístěn v montáži typu Dobson. Tubus teleskopu (a) je vyroben z plechu a odlehčen, jeho hmotnost je přibližně 15 kg. Montáž (i) je vyrobena z laminované dřevotřískové desky, která není vhodná pro další užití v konstrukci zařízení. Pro nastavení azimutu a elevace jsou použity pohony s velkým úhlovým rozlišením (45 úhlových vteřin), tyto ale nelze ovládat pomocí PC. Pohony nastavení azimutu vykazují vůli. Na teleskopu je umístěna sběrná optika (j) pro navedení záření do optického vlákna.

Jako zdroj laserového svazku je použit 532nm Nd:YAG pulsní laser (energie pulsu 200 mJ) Solar LQ-916. Tento je složen z laserové hlavy (b), která je nerozebíratelně spojena s laserovým zdrojem, jak je patrné z Obr. 2-2, a má hmotnost přibližně 8 kg. V případě kdy bude zvolena koncepce řešení s umístěním laserové hlavy na pohyblivé části, bude nutné zohlednit hmotnost a tuhost tohoto spojovacího kabelu při návrhu pohonů.

Pro zfokusování laserového svazku na cíl je použita fokusační optika, která byla navržena na ÚFI. Je složena z jedné plankonkávní 1" čočky a dvojice plankonvexních 2" čoček.

Pro vyhodnocení spektra je použit spektrometr Andor Mechelle 5000 s ICCD kamerou Andor iStar 734.



Obr. 2-2 Detail spojovacího kabelu laserové hlavy

2.2.2 Pohony nastavení azimutu a elevace

Jeden z požadavků, který vyplynul z konzultací s pracovníky Ústavu fyzikálního inženýrství, je umožnit provádět tzv. bodové snímání (viz Obr. 2-3), kdy je snímána oblast proložena sítí s uzlovými body a snímání pak probíhá v těchto jednotlivých

bodech zcela automaticky. Snímání s rozlišením h na vzdálenost l odpovídá natočení v ose elevace a azimutu o úhel α , tomu odpovídá požadovaný počet kroků pohonu m na 360° , číselně pak

$$h = 1 \text{ cm}$$

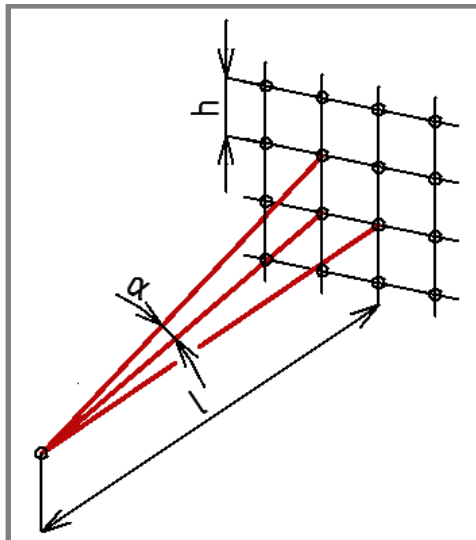
$$l = 10 \text{ m}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h}{l}\right) = \arctan\left(\frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ m}}\right) = 0,0573^\circ = 3,44' \quad (2.1)$$

$$m = \frac{360^\circ}{\alpha} = \frac{360^\circ}{0,0573^\circ} = 6283 \quad (2.2)$$

kde

h	[cm]	je rozlišení snímání,
l	[m]	je maximální vzdálenost snímání,
α	[°]	je úhel natočení v ose elevace a azimutu,
m	[-]	je počet kroků na 360° .



Obr. 2-3 Schéma bodového snímání

Z výpočtu vyplývá, že pro polohování s rozlišením 1 cm na vzdálenost 10 m je potřeba servopohon, který má 6283 kroků na 360° . Na trhu lze nalézt např. krokové servomotory, které disponují rozlišením 10 000 kroků/ 360° , popř. rozlišením 20 000 kroků/ 360° , v režimu mikrokrokování. V případě použití těchto servomotorů by byl pohyb vhodně interpolován.

Některé části laboratorní aparatury, např. teleskop či laserová hlava, mají poměrně velký moment setrvačnosti. To by mohlo způsobovat problémy s přesností polohování, protože by nebyla dodržena podmínka přiměřenosti momentů setrvačnosti zátěže vůči momentu setrvačnosti rotoru servomotoru, podle vztahu (1.5) Jako nevhodné se proto jeví využití přímého pohonu bez vloženého převodového mechanismu, který redukuje moment setrvačnosti zátěže působící na rotor servomotoru.

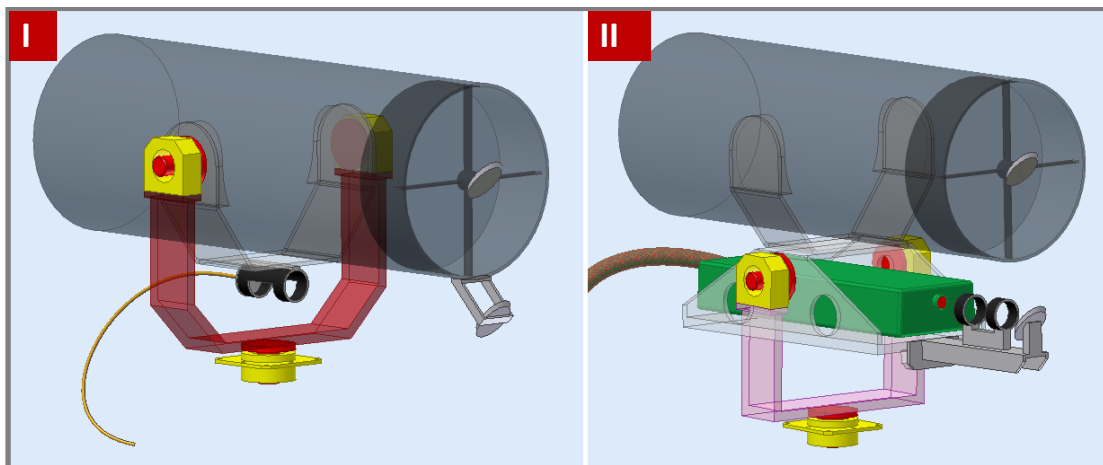
2.2.3 Umístění laserové hlavy

Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, existují tři základní koncepce umístění laserové hlavy na zařízeních pro dálkovou laserovou spektroskopii. Koncepce umístění laserové hlavy mimo pohyblivou část s přivedením laserového svazku pomocí optického vlákna (viz Obr. 2-4, část A) je nevyhovující, neboť se na trhu nepodařilo nalézt optické vlákno, které by zvládlo přenést pulsní výkon použitého laseru.

Jako vyhovující se jeví koncepce s umístěním laserové hlavy na pohyblivé části (viz Obr. 2-4, část B), dále v textu jako *Koncepce II*, nebo koncepce umístění laserové hlavy na statické části s přivedením laserového svazku pomocí kinematického periskopu, dále v textu jako *Koncepce III*.

Koncepce II klade vyšší požadavky na použité servopohony, protože je nutné urychlovat více setrvačné hmoty. Navýšení setrvačné hmoty je však pouze cca 10%. Koncepce II je kompaktnější než Koncepce III, protože není potřeba další nepohyblivá část konstrukce, na které by byla upevněna laserová hlava a vstupní část kinematického periskopu.

Na trhu se podařilo nalézt tři výrobce kinematických periskopů. Jejich cena ale převyšovala částku, která by byla ušetřena díky použití servomotorů s nižším nominálním krouticím momentem.

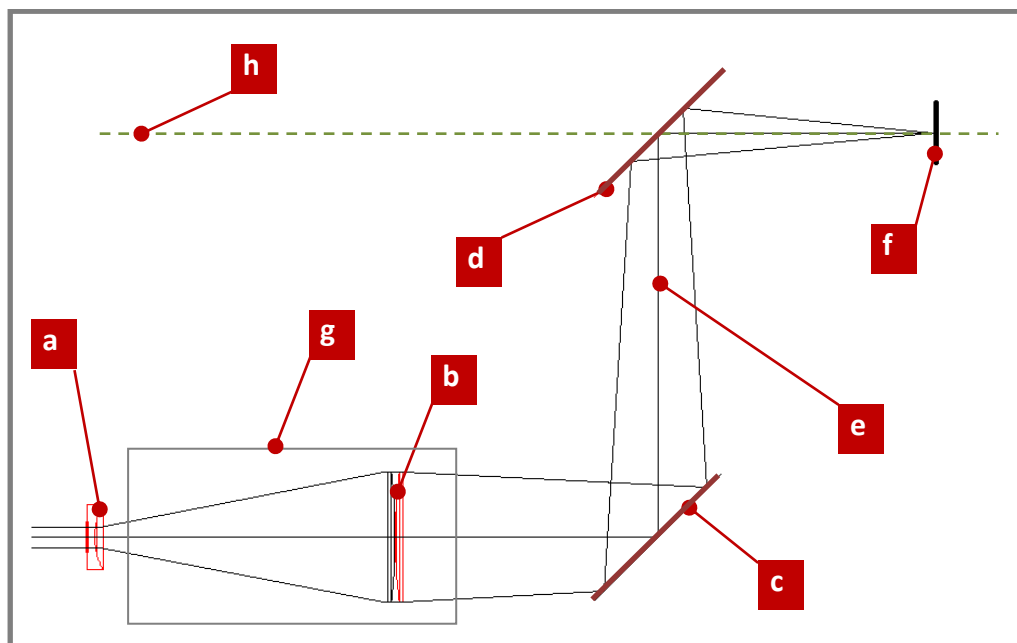


Obr. 2-4 Navržené koncepce umístění laserové hlavy

I) Koncepce umístění laserové hlavy mimo pohyblivou část s přivedením laserového svazku pomocí optického vlákna; II) Koncepce umístění laserové hlavy na pohyblivé části

2.2.4 Optická cesta laserového svazku

Pro potřebu přivedení laserového svazku do osy teleskopu a zfokusování jej na cíl, je navržena optická cesta (viz Obr. 2-5), která v sobě integruje již dříve pracovníky ÚFI navrženou fokusační optiku (g), která pomocí optické soustavy složené z plankonkávní 1" čočky – rozptylka (a) a dvojice plankonvexních 2" čoček – spojky (b) rozšiřuje laserový svazek a dovoluje měnit jeho ohnisko změnou vzdálenosti mezi rozptylkou a spojkami. Pro přivedení laserového svazku do osy teleskopu je navržen periskop, který je složen z dolního (c) a horního (d) eliptického rovinného zrcátka.



Obr. 2-5 Schéma optické cesty laserového svazku

a – plankonkávní 1" čočka (rozptylka); b – dvojice plankonvexních 2" čoček (spojky);
 c – dolní eliptické rovinné zrcátko periskopu; d - horní eliptické rovinné zrcátko
 periskopu; e – laserový svazek; f – vzorek; g – fokusační optika; h – osa teleskopu

S navrženou optickou cestou je možné vytvořit stopu laserové svazku na vzorku o průměru 1,2 mm. Tato hodnota je teoretická a zahrnuje předpokládané sférické a difrakční vady optické soustavy.

S ohledem na nepřesnosti vnesené do konstrukce během výroby a montáže, je nutné vybavit optické komponenty justačními členy, se kterými bude možno korigovat tyto nepřesnosti.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Primárním cílem tohoto diplomového projektu je konstrukční návrh polohovací jednotky, která bude součástí mobilního zařízení dálkovou laserovou spektroskopií.

Výsledná konstrukce by měla především

- obsahovat části, které jsou užity na stávající laboratorní aparatuře,
- umožnit přivedení laserového svazku do osy sběrného teleskopu,
- umožnit polohování v rozsahu rotace $\pm 50^\circ$ a náklonu -16° až $+40^\circ$.

Sekundárním cílem tohoto diplomového projektu je zajistit realizaci (tj. výrobu a montáž) funkčního vzorku, podle vytvořené výrobní a montážní dokumentace, provést následnou analýzu vyrobeného funkčního vzorku, navrhnout a zrealizovat případné drobné úpravy konstrukce a nastítnit možnosti dalšího vývoje jednotky.

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

4

4.1 Postup řešení projektu

4.1

Vzhledem k rozsahu řešené problematiky, je nutné rozdělit diplomový projekt do několika dílčích fází.

4.1.1 Fáze projektu

4.1.1

Projekt je rozdělen do sedmi fází, které na sebe postupně navazují, resp. se částečně překrývají.

4.1.1.1 Fáze I: Analýza řešeného problému a současného stavu poznání

První fází tohoto diplomového projektu je analýza zadání řešené problematiky, která je kombinována s analýzou současného stavu poznání v oblasti zařízení pro dálkovou laserovou spektroskopii a zhodnocení konstrukčních řešení těchto zařízení. Přičemž výsledky této analýzy a zhodnocení poslouží jako podklad pro tvorbu koncepce řešení a variant řešení částí zařízení.

4.1.1.2 Fáze II: Vývojová analýza

Náplní vývojové analýzy je, vzhledem ke komplexnosti řešené problematiky, především vhodné rozdělení navrhovaného zařízení do menších celků, které budou řešeny zvlášť a návrh koncepcí řešení těchto celků.

4.1.1.3 Fáze III: Návrh variant řešení a výběr optimální varianty

Náplní této fáze je návrh několika realizovatelných variant řešení, které se od sebe liší především funkčními, technologickými, a ekonomickými parametry. Výběr optimální varianty je pak proveden na základě kritériální analýzy.

4.1.1.4 Fáze IV: Rozpracování vybrané varianty řešení

Rozpracováním vybrané varianty řešení se rozumí vytvoření 3D modelu zařízení a všech jeho dílů s provedením kontrolních výpočtů vybraných konstrukčních uzlů dílů. A taktéž vytvoření výrobní dokumentace.

4.1.1.5 Fáze V: Realizace funkčního vzorku

Pracovní náplní fáze činnosti je realizace funkčního vzorku navrženého zařízení, přičemž tato v sobě zahrnuje výběr dodavatelů nakupovaných dílů, případný výběr externích firem zajišťujících výrobu dílu, jež nelze vyrobit ve fakultních dílnách, výrobu dílů ve fakultních dílnách a montáž.

4.1.1.6 Fáze VI: Ověření funkčnosti

Fáze ověření funkčnosti zařízení v sobě zahrnuje nejenom samotný činnost ověřování, ale také analýzu vyskytnuvších se problémů s návrhem jejich řešení.

4.1.1.7 Fáze VII: Vytvoření závěrečné zprávy

Vytvořením závěrečné zprávy se rozumí vytvoření textu diplomové práce, se všemi jejími případnými přílohami.

4.2 Časový harmonogram projektu

Na základě předpokládané doby řešení jednotlivých fází je sestaven časový harmonogram. Řešení projektu je naplánováno na dobu jednoho roku.

Tab. 1 Časový harmonogram

Fáze	2011								2012				
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
I	*	*											
II	*	*	*										
III			*	*	*								
IV					*	*	*	*					
V								*	*	*	*		
VI										*	*	*	
VII											*	*	*

5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

5

Tato kapitola prezentuje navržené varianty pohonů, které jsou vytvořeny na základě analýzy požadavků zadání. V závěru kapitoly je provedeno celkové shrnutí a výběr optimální varianty pomocí kritériálního hodnocení.

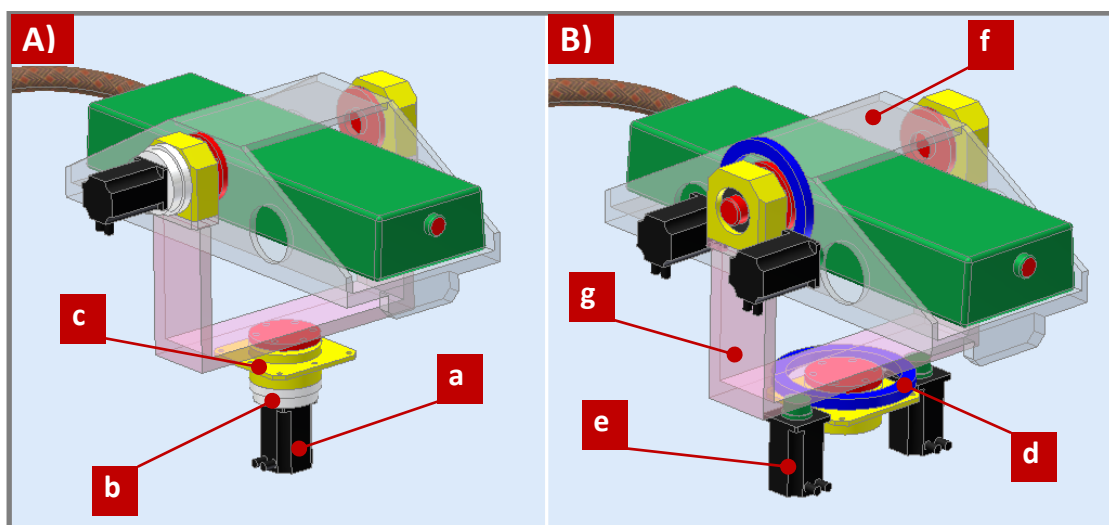
5.1 Popis variant řešení pohonu elevace a rotace

5.1

5.1.1 Varianta pohonu A

5.1.1

U této varianty, jež je zobrazena na Obr. 5-1, část A, je k nastavení azimutu a elevace užit krokový servomotor (a) s harmonickou převodovkou (b), tvořící tzv. rotační polohovací modul. Je vybrána harmonická převodovka z řady HFUC od společnosti Harmonic Drive, neboť tato má velmi vysokou přesnost polohování ($> 0,7$ úhlových minut) a je možno ji užít přímo jako rotační uložení, čímž ušetřit část nákladů na ložiska uložení. Cena harmonické převodovky z řady HFUC je přibližně 45 000,- Kč. K pohonu je pak vybrán 3fázový krokový servomotor řady BRS od společnosti Berger Lahr, který má v režimu mikrokrokování až 20 000 kroků na otáčku. Jeho cena je přibližně 20 000,- Kč. Náklady na tuto variantu pohonu tedy dosahují částky přibližně 130 000,- Kč.



Obr. 5-1 Vizualizace a popis variant pohonů

a – servomotor; b – harmonická převodovka; c – uložení rotace; d – ozubený věnec; e – servomotor s pastorkem; f – rám elevace; g – rám rotace

Výběr přesného typu krokového motoru a harmonické převodovky z uvedených výrobních řad, resp. výběr velikosti výstupního kroučícího momentu a převodového poměru, již poté závisí na parametrech případně rozpracované varianty.

Výhody varianty:

- vysoká přesnost polohování
- výborné dynamické vlastnosti
- rotační moduly možno užít jako uložení

Nevýhody varianty:

- vysoké pořizovací náklady
- nutnost užití elektromagnetické brzdy u pohonu elevace (zabránění překlopení při přerušení dodávky elektrické energie)

5.1.2 Varianta pohonu B

V případě této varianty, zobrazené na Obr. 5-1, část B, jsou k polohování elevace a rotace použity páry servomotorů v uspořádání Master & Slave. V převodech, které jsou složeny ze dvou servomotorů vybavených planetovou převodovkou s pastorkem (e) a ozubeného věnce (d), který je připevněn na rám rotace (g), resp. na rám elevace (f), je vyvozeno předpětí pomocí elektronické vazby mezi servomotory. Toto předpětí, jak bylo popsáno v kap. 1.4.3, eliminuje vůli v převodu. K pohonu je, jako v případě Varianty A, použit 3fázový krokový servomotor řady BRS, na který je instalována přímá planetová převodovka řady AE od společnosti Apex Dynamics. Pořizovací cena planetové převodovky této řady je přibližně 15 000,- Kč. Ozubený věnec a pastorek jsou vlastní konstrukce. Náklady na tuto variantu pohonu dosahují částky přibližně 110 000,- Kč. Do nákladů nejsou zahrnuty výrobní náklady ozubených věnců.

Výběr přesných typů krokových motorů a planetových převodovek z uvedených výrobních řad je poté záležitostí případného rozpracování této varianty.

Cena pohonů této varianty je přibližně

Výhody varianty:

- vysoká přesnost polohování
- výborné dynamické vlastnosti

Nevýhody varianty:

- vysoké pořizovací náklady
- vysoké nároky na konstrukci uložení převodu s ozubeným věncem (zakrytování a mazání)
- velký zástavbový prostor
- nutnost užití elektromagnetické brzdy u pohonu elevace (zabránění překlopení při přerušení dodávky elektrické energie)

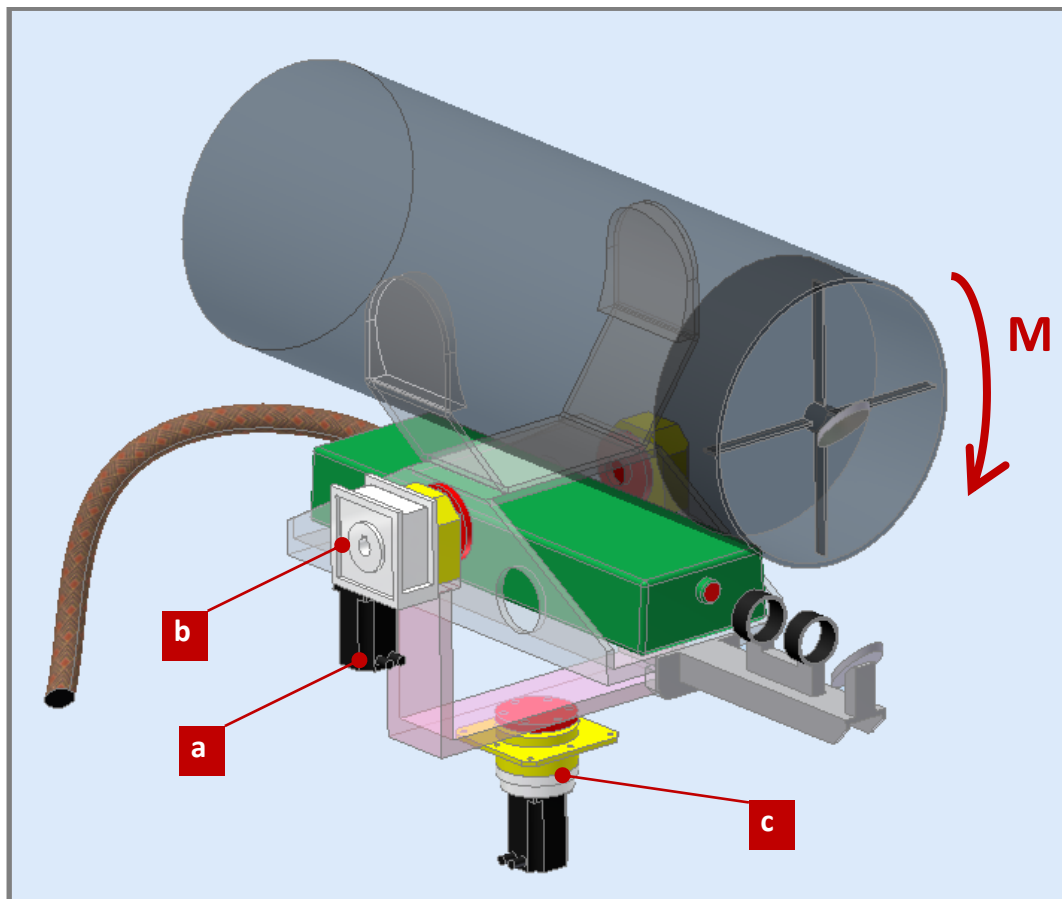
5.1.3 Varianta pohonu C

Na základě kompromisu mezi cenou a funkčností je navržena třetí varianta pohonu, která je zobrazena na Obr. 5-2. Zde je, podobně jako v případě Varianty A, k pohonu nastavení azimutu užit rotační polohovací modul s 3fázovým krokovým servomotorem BRS a harmonickou převodovkou HFUC (c). K pohonu elevace je užit 3fázový krokový servomotor BRS (a) se šnekovou převodovkou (b). Je vybrána šneková převodovka řady CM od společnosti Transtecno. Cena převodovky této řady je přibližně 5 000,- Kč.

Vůle, která se vyskytuje ve šnekovém převodu (u běžných šnekových převodovkem do 15 úhlových minut), je eliminována pomocí klopného momentu (na Obr. 5-2 označen písmenem „M“), který je způsoben nevyvážeností naklápěné části konstrukce.

Navržené uspořádání pohonů je kompaktnější než u Varianty B. Pokud bude použita šneková převodovka s vyšším převodovým poměrem, bude zajištěna její

samosvornost. Servopohon nastavení elevace pak nebude muset být vybaven elektromagnetickou brzdou. Nevýhodou šnekového převodu je jeho velmi nízká statická a dynamická účinnost, při návrhu potřebného momentu motoru je nutno toto zohlednit.



Obr. 5-2 Vizualizace a popis varianty C

a – servomotor; b – šneková převodovka; c – harmonická převodovka

Náklady na tuto variantu pohonu dosahují částky přibližně 90 000,- Kč. Ze všech variant je právě nejlevnější.

Výhody varianty:

- nižší pořizovací náklady (ve srovnání s Variantou A a Variantou B)
- malý zástavbový prostor

Nevýhody varianty:

- středně vysoké pořizovací náklady
- vyšší ztráty ve šnekové převodovce

5.2 Zhodnocení a výběr optimální varianty pohonu

Byly navrženy tři varianty řešení pohonů. Všechny tři varianty disponují pohonem, který má více jak 6283 kroků/360°. Varianty se liší především cenou, komplikovaností konstrukčního řešení a požadavky na zástavbový prostor.

Na základě předchozích návrhů je sestavena tabulka, srovnávající navržené varianty. Jako hodnotící kritéria je stanovena přesnost polohování, zástavbový prostor, složitost pohonu (tj. kolik obsahuje komponent, složitost jejich upevnění etc.), dynamiku pohonu a náklady (dány především cenou komponent). Jako optimální bude vybrána ta varianta, která bude pohledem všech kritérií označena minimálně jako dostačující.

Tab. 2 Srovnání navržených variant pohonů

	Varianta A	Varianta B	Varianta C
Přesnost polohování	*****	*****	****
Zástavbový prostor	***	**	****
Složitost pohonu	*****	**	***
Dynamika pohonu	*****	*****	***
Pořizovací náklady	**	**	***

Legenda: ***** – zcela vyhovující; ** – vyhovující s dodatkem; **** – dostačující;
** – nevyhovující s dodatkem; * – zcela nevyhovující

Z Tab. 2 je zřejmé, že se jako optimální jeví Varianta C, neboť tato je pohledem všech kritérií označena minimálně jako dostačující. Varianta A je z pohledu mechanických vlastností výhodnější, protože jsou k pohonu elevace i rotace užity rotační moduly s harmonickou převodovkou, má ale nejvyšší pořizovací náklady ze všech uvažovaných variant. Varianta B je konstrukčně složitější, vyžaduje větší zástavbový prostor a má vyšší pořizovací náklady než Varianta C.

Vybrána Varianta C bude v dalších částech tohoto diplomového projektu rozepsána a následně bude vytvořen její prototyp.

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

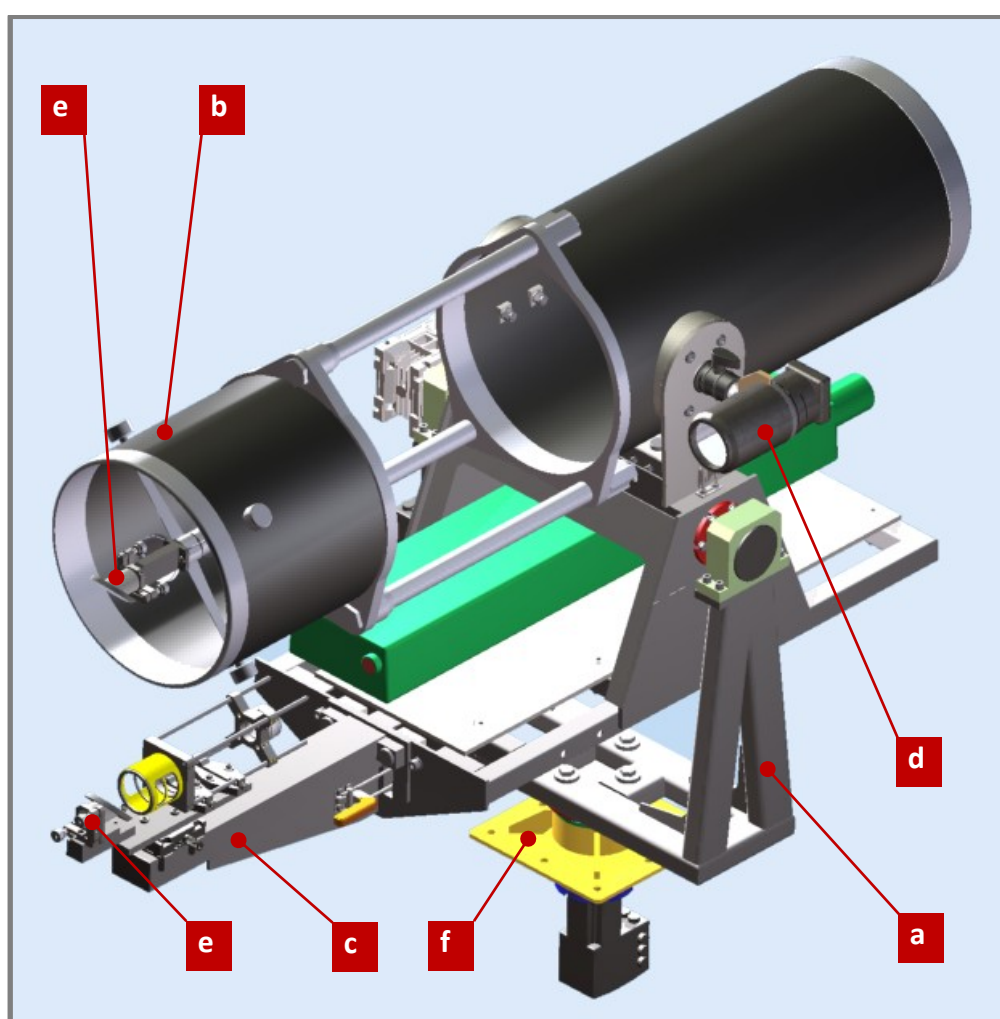
6

Tato kapitola prezentuje konstrukční řešení polohovací jednotky pro laserovou spektroskopii. Jsou zde popsány jednotlivé části konstrukce.

6.1 Základní popis konstrukce

6.1

Na základě rozpracování vybrané varianty pohonu byl vytvořen konstrukční návrh polohovací jednotky pro laserovou spektroskopii, který respektuje parametry zadání. Polohovací jednotka je složena ze sedmi základních částí. Tyto jsou spojeny pomocí upínacích prvků, které zajišťují pevné a přesné spojení. Jednotka je navržena jako rozmontovatelná z toho důvodu, aby ji bylo možné jednoduše transportovat do prostředí mimo laboratoř.



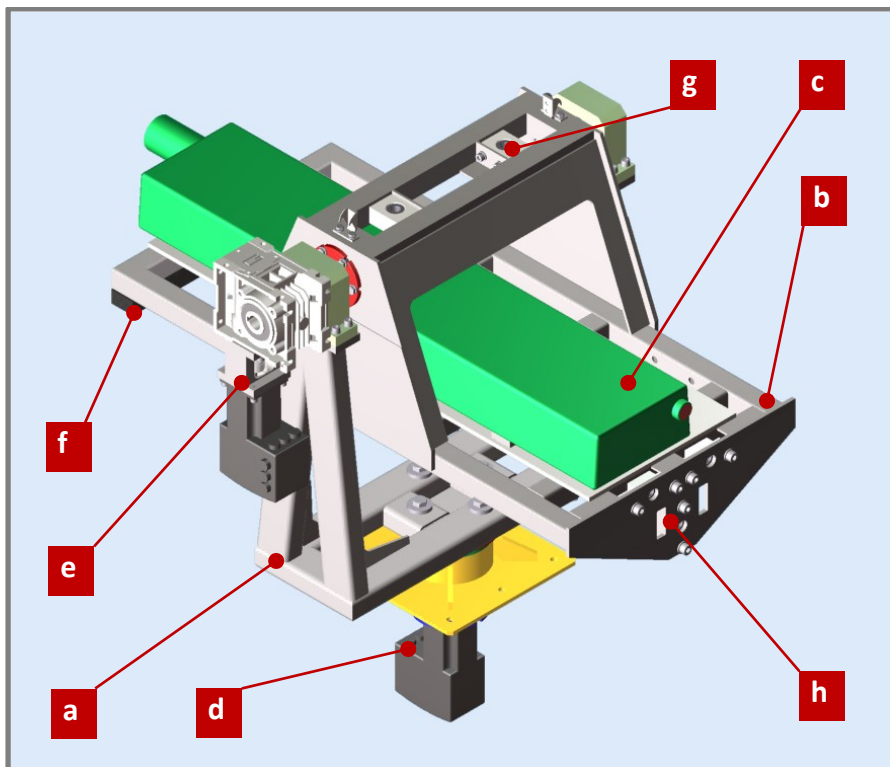
Obr. 6-1 Konstrukční návrh polohovací jednotky pro laserovou spektroskopii

Části polohovací jednotky (viz Obr. 6-1) jsou: tělo jednotky (a), teleskop (b), rameno optiky (c), zaměřovací kamera (d) a dvě eliptická zrcátka (e). Celková hmotnost jednotky je 56 kg. Maximální rozměry jsou 1375x1090x630 mm. Připojovací rozměry příruby (f) a potřebný prostor pro krokový servomotor je uveden na výkresu

s č. A1-PULS/00. Příruba slouží k budoucímu upevnění na zařízení pro dálkovou laserovou spektroskopii, jehož bude polohovací jednotka součástí.

6.1.1 Tělo jednotky

Tělo jednotky (viz Obr. 6-2) představuje hlavní část konstrukce a základnu pro připevnění ramena optiky a teleskopu. Základní částí těla je pohon nastavení azimutu (d), na který je připevněn nosný rám (a), který je navrhnout jako svarek z duralových tenkostěnných profilů. Na nosný rám je připevněn pohon nastavení elevace (e), který pohybuje s hlavním rámem (b). Hlavní rám je navrhnout jako svarek z duralových tenkostěnných profilů a plechů. Na horní části hlavního rámu jsou umístěny dvě vodící pouzdra (g), do kterých zapadají vodící čepy teleskopu. Tímto je zajištěna opakovatelná přesnost umístění teleskopu (více o spojení teleskopu s tělem jednotky v kap. 6.1.2). V přední části rámu se nachází tři vodící pouzdra (h), do kterých zapadají vodící čepy ramena optiky. Protizávaží (f), kterým je odlehčován pohon nastavení elevace, je připevněno pomocí šroubu k zadnímu profilu hlavního rámu. Je navrhnout z ocelové pásoviny, která je ošetřena nátěrem proti korozi. Duralové díly jednotky jsou navrhnout bez povrchové úpravy.

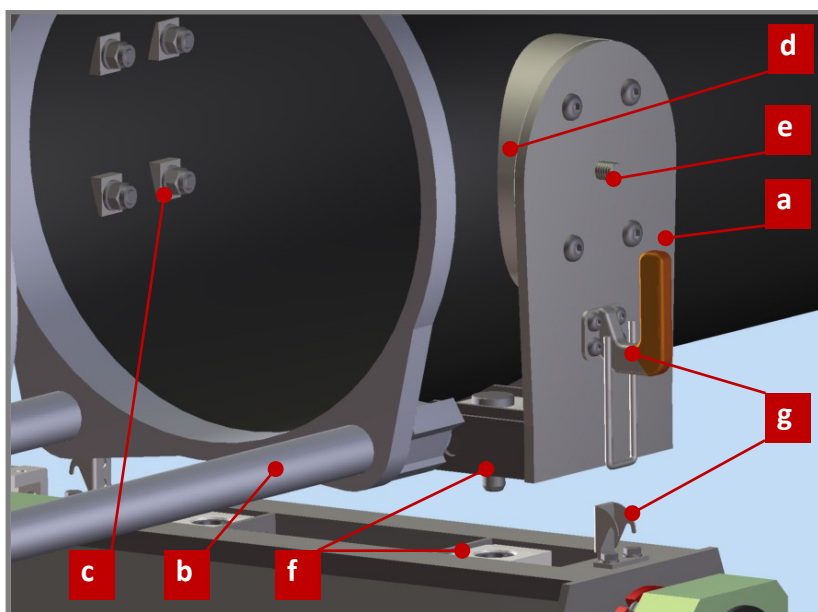


Obr. 6-2 Tělo jednotky

Hmotnost těla jednotky s připevněnou laserovou hlavou a protizávažím je 35 kg. Instalované pohony umožňují nastavit úhel elevace v rozsahu -20° až $+43^\circ$, který je větší než požadovaný rozsah -16° až $+40^\circ$ a úhel nastavení azimutu v rozsahu minimálně $\pm 60^\circ$, který je větší než požadovaný rozsah $\pm 50^\circ$. Omezujícím prvkem je zde spojovací kabel laserové hlavy.

6.1.2 Teleskop

Teleskop (viz Obr. 6-3) slouží ke sběru záření plazmatu. Je tvořen rámem (a), který navržen jako svarek z duralových tenkostěnných profilů a plechů. Na rám je připevněn, pomocí osmi šroubů M8 (c) teleskop SkyWatcher (b). Mezi teleskop a rámem je vložena příruba (d), která je navržena z PA6, a tvoří přechodový stupeň mezi válcovým tvarem teleskopu a rovinným tvarem rámu. Šroub UNC 3/8-16 (e), jehož hlava je pojištěna proti pootočení 6HR dírou v přírubě, slouží k připevnění 3D hlavy zaměřovací kamery. Opakovatelná přesnost spojení teleskopu s hlavním rámem je zajištěna dvojicí (f) vodicích čepů ECO, které zapadají do středících pouzder EBU od společnosti Jan Svoboda. Pro pevné spojení je použita dvojice třmenových upínačů Kipp (g). Hmotnost teleskopu je 17,3 kg. Převážné rozměry jsou přibližně 470x420x1280 mm.



Obr. 6-3 Detail spojení teleskopu s tělem jednotky

6.1.3 Zaměřovací kamera

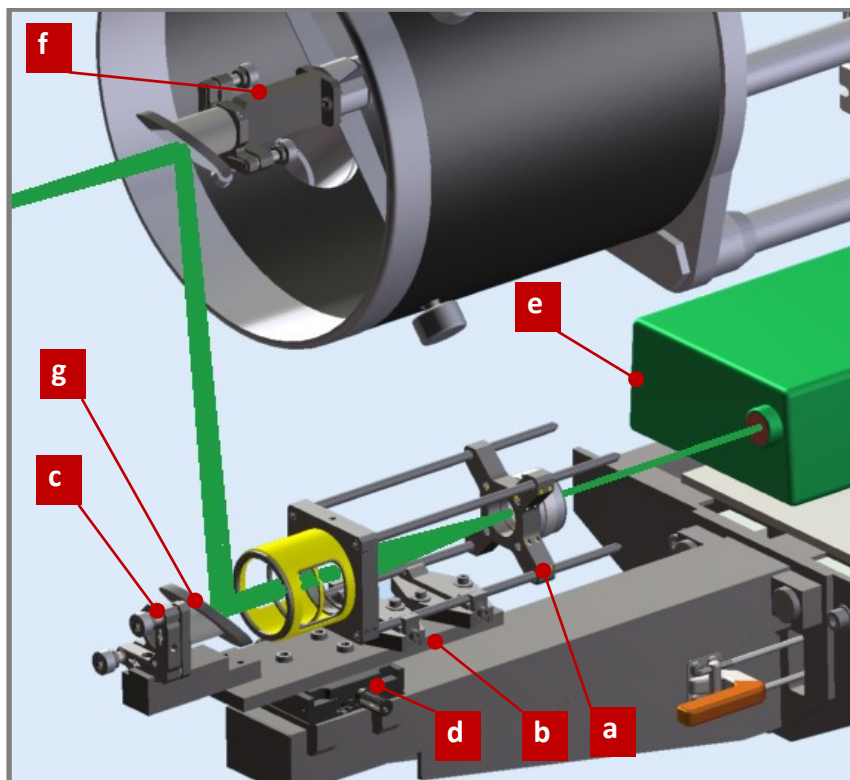
Zaměřovací kamera slouží ke sledování cíle. Je tvořena teleobjektivem Canon EF 70-300 mm s CMOS kamerou DCC1645C od společnosti Thorlabs. Teleobjektiv je upevněn na 3D hlavě Triopo RS-1, kterou je možno přišroubovat na šroub umístěný na teleskopu. Hmotnost zaměřovací kamery je 0,9 kg.

6.1.4 Rameno optiky

Rameno optiky je složeno z nosného rámu, který je navržen jako svarek z duralových tenkostěnných profilů a duralových plechů. Je zde umístěna část prvků optické cesty laserového svazku (více o optické cestě v kap. 6.2) Opakovatelná přesnost spojení ramena optiky s hlavním rámem je, podobně jako u teleskopu, zajištěna trojicí vodicích čepů ECO, které zapadají do středících pouzder EBU. Pro pevné spojení je použita dvojice třmenových upínačů Kipp. Hmotnost ramena, se započítáním hmotností optických prvků, je 3,1 kg.

6.2 Optická cesta laserového svazku

Optická cesta (viz Obr. 6-4) slouží k přivedení laserového svazku do osy teleskopu. Konstrukční uspořádání vychází z koncepce optické cesty, která byla nastíněna v kap. 2.2.4. Je složena z fokusační jednotky (a), která je připevněna je pomocí dvou upínek na základovou duralovou destičku (b). Horní i spodní zrcátka periskopu je uchyceno v kinematickém držáku Thorlabs KM100 (c), který umožňuje polohovat uchycený prvek ve dvou osách v rozsahu $\pm 4^\circ$. Základová destička je uchycena na lineárním vedení Thorlabs DTM/25 (d), které je vybaveno justačním šroubem umožňujícím polohování ve vodorovném směru v rozsahu 25,4 mm. Laserová hlava (e) je opatřena čtyřmi justačními šrouby, které s ní umožňují pohybovat ve svislém směru v rozsahu 15 mm a naklánět jí v rozsahu $\pm 1^\circ$. Proti posunu laserové hlavy při naklonění je tato připevněna dvěma šrouby k hlavnímu rámu těla jednotky. Kinematický držák horního zrcátka je uchycen na držák sekundárního zrcátka teleskopu SkyWatcher. Protože je držák sekundárního zrcátka teleskopu zapuštěn, je zde vložen distanční člen (f).



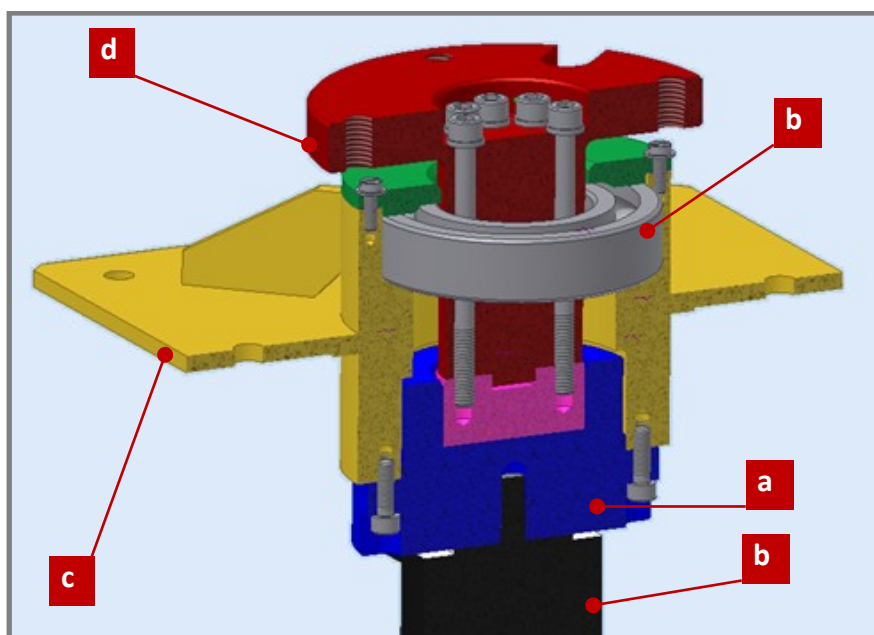
Obr. 6-4 Detail optické cesty

Zrcátka (g) periskopu jsou vlastní konstrukce. Zrcátko je tvořeno skleněným substrátem s deponovanou reflexní vrstvou, který je připevněn na duralovou kulatinu, která je zkosena pod úhlem 45° .

6.3 Pohon nastavení azimutu

Pohon nastavení azimutu (viz Obr. 6-5) se skládá ze dvou celků: uložení a rotačního polohovacího modulu.

Rotační polohovací modul je tvořen harmonickou převodovkou HFUC-2UH 20-SP (a) od společnosti Harmonic Drive AG a 3fázovým krokovým servomotorem ILS1573PB1A (b) od společnosti Berger Lahr. Jedná se o kompaktní krokový servomotor, který v sobě obsahuje výkonový budič a řídicí elektroniku. Je napájen napětím 24 V. Řízení může být pomocí rozhraní RS-485, nebo CANbus. Protože má krokový servomotor 20 000 kroků/360 ° a harmonická převodovka převodový poměr 1:50, disponuje pohon nastavení azimutu rozlišením 10⁶ kroků/360 °. Toto rozlišení vysoce překračuje požadované (6283 kroků/360 °). Harmonická převodovka s poměrem 1:50 je zvolena s ohledem na velikost momentu setrvačnosti pohyblivé části. Další parametry užití harmonické převodovky viz Tab. 3.



Obr. 6-5 Pohon nastavení azimutu

Uložení pohonu je složeno z ocelového svarku (c), ke kterému je připevněna harmonická převodovka. K ní je pomocí osmi šroubů M6x60 připevněna hřídel, navržená z konstrukční oceli, zakončená přírubou (d) se čtyřmi závitovými otvory, kterými je připevněn nosný rám polohovací jednotky. Harmonická převodovka je vybavena jedním obousměrným válečkovým ložiskem, pro zvýšení tuhosti je uložení vybaveno dalším jednořadým kuličkovým ložiskem SKF 6209 2Z. Ložiska jsou naplněna plastickým mazivem a jsou bezúdržbová.

Součástí příloh diplomového projektu je výrobní dokumentace tohoto pohonu.

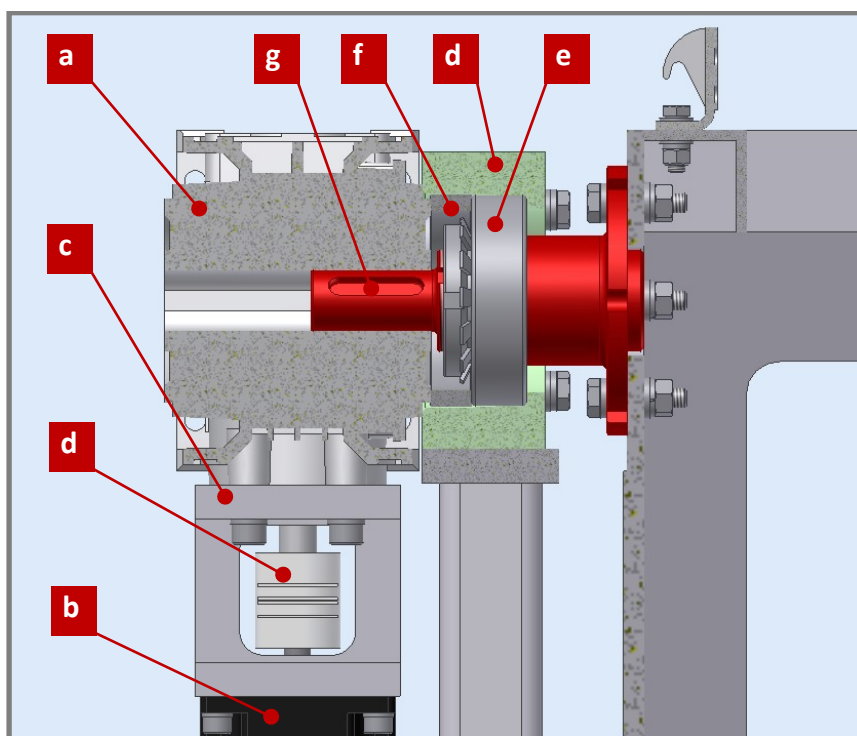
Tab. 3 Parametry harmonické převodovky [29]

Parametr	Zkratka	Hodnota
Převodový poměr	i_h	50
Účinnost	η_h	85 %
Maximální výstupní moment	$M_{h,max}$	56 Nm
Moment setrvačnosti	I_h	0,193 kg·cm ²

6.4 Pohon nastavení elevace

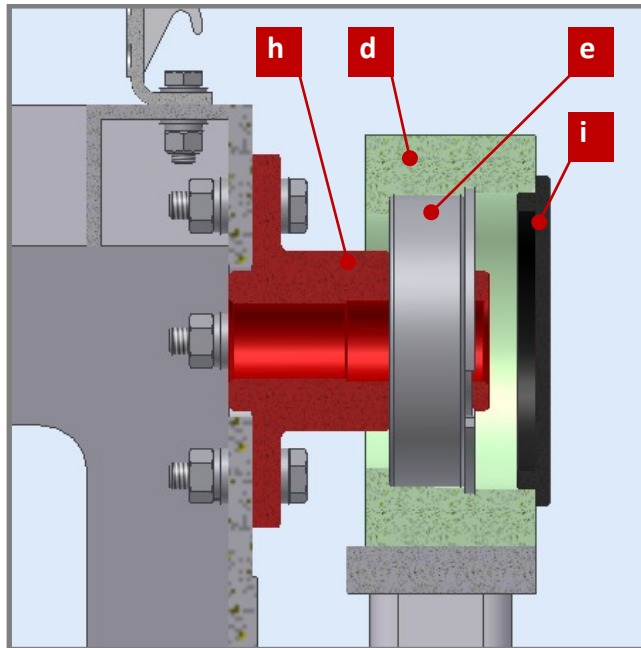
Pohon nastavení elevace (viz Obr. 6-6 a Obr. 6-7) se skládá ze dvou funkčních celků: uložení a rotačního servopohonu.

Servopohon je tvořen šnekovou převodovkou CM-040-U-50-V6 (a) od společnosti Transtecno a 3fázovým krokovým servomotorem ILS1573PB1A (b) od společnosti Berger Lahr. Protože má krokový servomotor 20 000 kroků/360 ° a šneková převodovka převodový poměr 1:50, disponuje pohon nastavení elevace, podobně jako pohon nastavení azimutu, rozlišením 10⁶ kroků/360 °. Toto rozlišení vysoce překračuje požadované (6283 kroků/360 °). Krokový servomotor je připojen k šnekové převodovce pomocí příruby (c), která byla navržena pro tuto aplikaci. Přenos krouticího momentu je realizován pružnou spojkou EVK-25 (d) od společnosti Berger Lahr. Pružná spojka eliminuje případnou nesouosost hřídele krokového servomotoru a vstupní hřídele šnekové převodovky.



Obr. 6-6 Pohon nastavení elevace – strana servopohonu

Uložení pohonu na straně servopohonu je složeno z ložiskového domečku (d), ve kterém je usazeno jednořadá kuličkové ložisko SKF 6206 2Z (e). Vnější kroužek tohoto ložiska je přidržován šnekovou převodovkou přes distanční člen (f). Ložiska jsou naplněna plastickým mazivem a jsou bezúdržbová. Přenos momentu ze šnekové převodovky na hlavní rám je realizován hřídelem, který je zakončen přírubou (g). Hřídel je pojištěn proti pohybu pojistnou maticí s pojistnou podložkou.



Obr. 6-7 Pohon nastavení elevace – strana bez servopohonu

Uložení pohonu na straně bez servopohonu je taktéž složeno z ložiskového domečku, navrženého z duralu, (d) ve kterém je usazeno jednořadá kuličkové ložisko SKF 6206 2Z (e). Čep s přírubou (h) nalisován na ložisko a pojištěn pojistným kroužkem proti vypadnutí. Ložiskový domeček je zakrytován plastovým víčkem (i).

Tab. 4 Parametry šnekové převodovky [28]

Parametr	Zkratka	Hodnota
Převodový poměr	I_s	50
Účinnost	η_s	36 %
Maximální výstupní moment	$M_{s,max}$	56 Nm

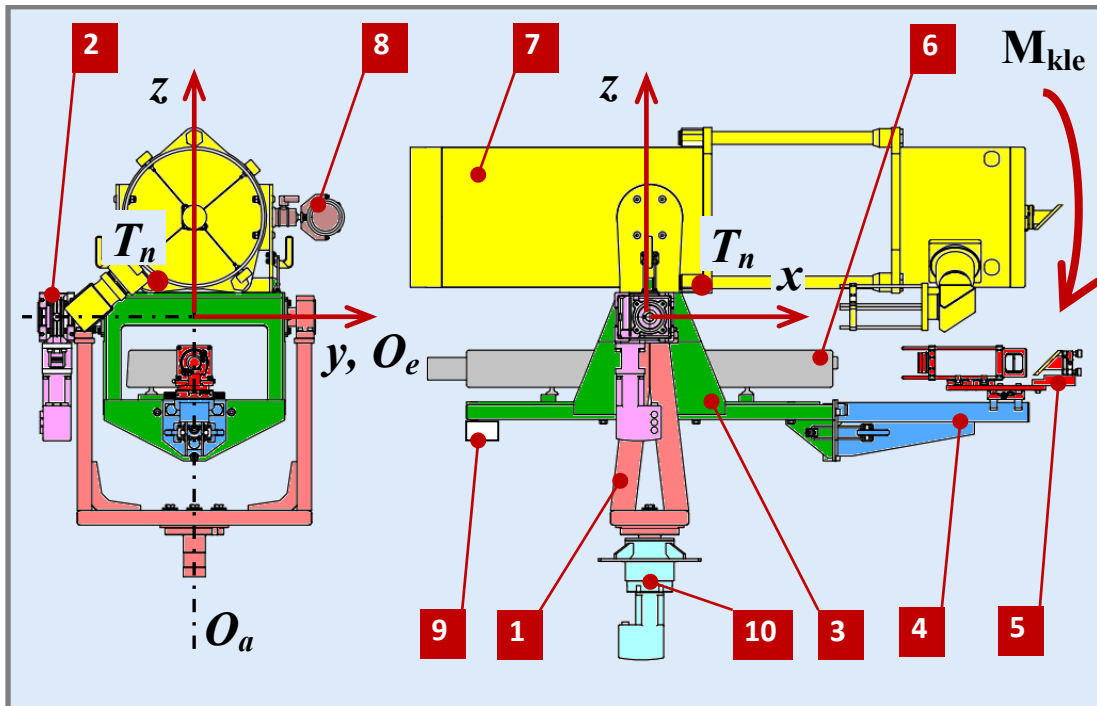
6.5 Použité konstrukční materiály

6.5

Ocelové hřídele a příruby pohonů jsou navrženy z konstrukční oceli 1.0050 (11 500). U všech ocelových dílů je navržena povrchová ochrana formou galvanického pokovení, vyjma protizávaží, které je ošetřeno nátěrem. Svařované duralové části jsou navrženy převážně z materiálu EN AW-6060. Obráběné duralové díly pak z materiálu EN AW-6061.

6.6 Hmotové parametry konstrukce

Před provedením kontrolních výpočtů použitých servopohonů, je nutné určit hmotové parametry konstrukce. Tato je rozdělena na devět částí, jak je patrné z Obr. 6-8. Hodnoty, které byly převzaty z 3D modelu, jsou uvedeny v Tab. 5.



Obr. 6-8 Rozdělení konstrukce pro určení hmotových parametrů

Polohy těžišť jednotlivých částí jsou vztaženy k počátku souřadného systému, který je umístěn v průsečíku osy azimutu O_a a osy elevace O_e . Pro přehlednost je vyznačena pouze poloha společného těžiště částí 3 až 9, které jsou dále v textu souhrnně označovány jako *naklápěcí část*. Části 1 a 8 pak jako *pohyblivá část*.

Tab. 5 Hmotové parametry

	Poloha těžiště			Hmotnost	Moment setrvačnosti	
	$x_{T,i}$	$y_{T,i}$	$z_{T,i}$	m_i	$I_{e,i}$	$I_{a,i}$
Část	mm	mm	mm	kg	kg·m ²	kg·m ²
1	0	0	-215	5,2	-	0,167
2	-23	-282	-89	4,8	-	0,416
3	30	5	-118	11,5	0,604	0,384
4	537	0	-206	1,4	0,464	0,404
5	658	0	-123	1,7	0,609	0,559
6	0	-59	-108	9	0,108	0,476
7	43	-35	176	17,5	2,35	2,03
8	30	250	177	0,9	0,029	0,058
9	-360	0	-220	2	0,221	0,184
10	-	-	-	8,7	-	-

6.6.1 Parametry naklápěcí části

6.6.1

Pro výpočet hmotnosti, souřadnic polohy společného těžiště a momentů setrvačnosti naklápěcí části jsou použity hodnoty z Tab. 4.

6.6.1.1 Hmotnost naklápěcí části

$$m_n = \sum_{i=3}^9 m_i = 11,5 \text{ kg} + \dots + 2 \text{ kg} = 37,3 \text{ kg} \quad (6.1)$$

kde

m_n [kg] je hmotnost naklápěcí části,
 m_i [kg] je hmotnost i -té části konstrukce.

6.6.1.2 Poloha těžiště naklápěné části

$$x_T = \frac{\sum_{i=3}^9 (x_{T,i} \cdot m_i)}{\sum_{i=3}^9 (m_i)} = \frac{30 \text{ mm} \cdot 11,5 \text{ kg} + \dots - 360 \text{ mm} \cdot 2 \text{ kg}}{11,5 \text{ kg} + \dots + 2 \text{ kg}} = 49 \text{ mm} \quad (6.2)$$

$$y_T = \frac{\sum_{i=3}^9 (y_{T,i} \cdot m_i)}{\sum_{i=3}^9 (m_i)} = \frac{5 \text{ mm} \cdot 11,5 \text{ kg} + \dots + 0 \text{ mm} \cdot 2 \text{ kg}}{11,5 \text{ kg} + \dots + 2 \text{ kg}} = -62 \text{ mm} \quad (6.3)$$

$$z_T = \frac{\sum_{i=3}^9 (z_{T,i} \cdot m_i)}{\sum_{i=3}^9 (m_i)} = \frac{-118 \text{ mm} \cdot 11,5 \text{ kg} + \dots - 220 \text{ mm} \cdot 2 \text{ kg}}{11,5 \text{ kg} + \dots + 2 \text{ kg}} = 24 \text{ mm} \quad (6.4)$$

kde

$x_{T,i}$ [mm] je složka x polohy těžiště i -té části konstrukce,
 $y_{T,i}$ [mm] je složka y polohy těžiště i -té části konstrukce,
 $z_{T,i}$ [mm] je složka z polohy těžiště i -té části konstrukce,
 x_T [mm] je složka x polohy těžiště,
 y_T [mm] je složka y polohy těžiště,

z_T [mm] je složka z polohy těžiště,
 m_i [kg] je hmotnost i -té části konstrukce.

6.6.1.3 *Moment setrvačnosti naklápěcí části vztažený k ose elevace*

$$I_{ne} = \sum_{i=3}^9 I_{e,i} = 0,604 \text{ kgm}^2 + \dots + 0,221 \text{ kgm}^2 = 4,385 \text{ kgm}^2 \quad (6.5)$$

kde

I_{ne} [kgm²] je moment setrvačnosti naklápěné části vztažený k ose O_e ,
 $I_{e,i}$ [kgm²] je moment setrvačnosti i -té části konstrukce vztažený k ose O_e .

6.6.1.4 *Moment setrvačnosti naklápěcí části vztažený k ose azimutu*

$$I_{na} = \sum_{i=3}^9 I_{a,i} = 0,384 \text{ kgm}^2 + \dots + 0,184 \text{ kgm}^2 = 4,095 \text{ kgm}^2 \quad (6.6)$$

kde

I_{na} [kgm²] je moment setrvačnosti naklápěných částí vztažený k ose O_a ,
 $I_{a,i}$ [kgm²] je moment setrvačnosti i -té části konstrukce vztažený k ose O_a .

6.6.2 Parametry pohyblivé části

Pro výpočet hmotnosti, souřadnic polohy společného těžiště a momentů setrvačnosti pohyblivé části jsou použity hodnoty z Tab. 4.

6.6.2.1 *Hmotnost pohyblivé části*

$$m_p = \sum_{i=1}^9 m_i = 5,2 \text{ kg} + \dots + 2 \text{ kg} = 47,3 \text{ kg} \quad (6.7)$$

kde

m_p [kg] je hmotnost pohyblivé části,
 m_i [kg] je hmotnost i -té části konstrukce.

6.6.2.2 *Moment setrvačnosti pohyblivé části vztažený k ose azimutu*

$$I_{na} = \sum_{i=1}^8 I_{a,i} = 0,167 \text{ kgm}^2 + \dots + 0,184 \text{ kgm}^2 = 4,678 \text{ kgm}^2 \quad (6.8)$$

kde

I_{na} [kgm²] je moment setrvačnosti naklápěných částí vztažený k ose O_a ,
 $I_{a,i}$ [kgm²] je moment setrvačnosti i -té části konstrukce vztažený k ose O_a .

Na obr je zobrazena polohovací jednotka, která je výsledkem rozpracování vybrané varianty řešení. byla navržena jako rozmontovatelná, pro ulehčení transportu.

6.7 Kontrola použitých servopohonů

Pro správnou funkčnost navrženého servopohonů musí být splněno několik podmínek. Splněna musí být podmínka velikosti potřebného krouticího momentu krokového servomotoru, která je popsána vztahem (1.4), podmínka momentové přiměřenosti zátěže, která je popsána vztahem (1.5) a podmínka maximálního výstupního momentu převodovky.

6.7.1 Kontrola servopohonu nastavení elevace

6.7.1.1 Podmínka velikosti potřebného krouticího momentu

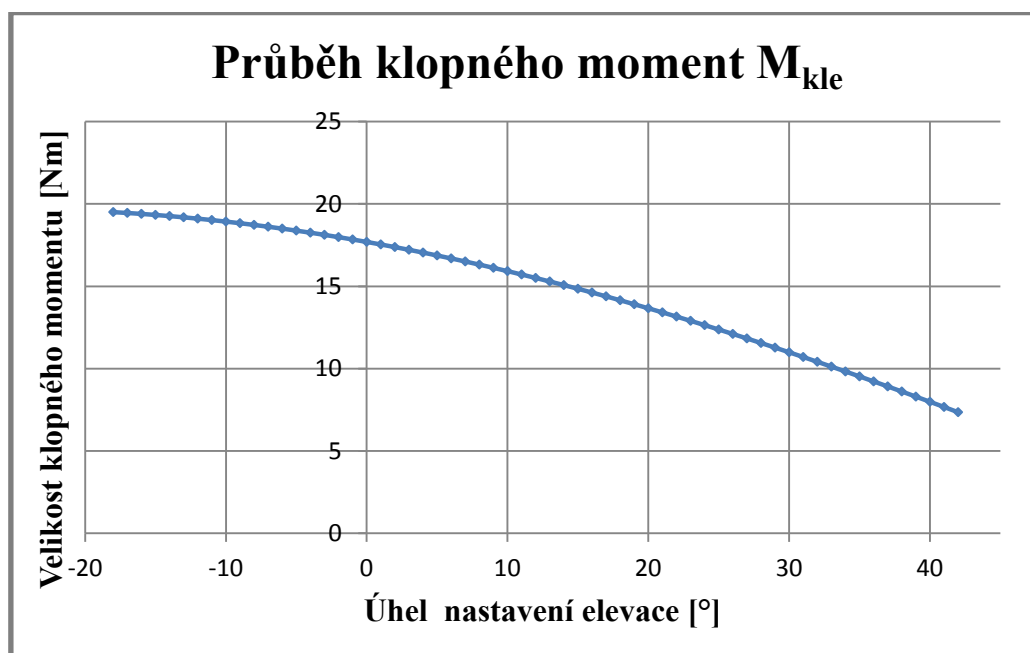
Nejprve je nutné určit klopný moment (na Obr. 6-8 je označen jako M_{kle}), který je vyvolán hmotností naklápěcí části. Jeho velikost je funkcí úhlu nastavení elevace.

$$M_{kle} = m_n \cdot g \cdot \sqrt{x_T^2 + z_T^2} \cdot \sin\left(\arctg \frac{x_T}{z_T} - \alpha_e\right) \quad (6.9)$$

kde

M_{kle}	[Nm]	je klopný moment,
m_n	[kg]	je hmotnost naklápěcí části,
g	[ms ⁻²]	je gravitační zrychlení.
x_T	[m]	je složka x polohy těžiště,
z_T	[m]	je složka z polohy těžiště,
α_e	[°]	je úhel nastavení elevace,

Pro ilustraci je vykreslen průběh klopného momentu (viz Graf 6-1) v rozsahu úhlů nastavení elevace $\alpha_e = -16^\circ$ až $+40^\circ$. Maximální velikost klopného momentu $M_{kle,max} = 19,4$ Nm nastává při úhlu nastavení elevace $\alpha_e = -16^\circ$, tedy v dolní poloze. Minimální hodnota $M_{kle,min} = 7,98$ Nm nastává při úhlu nastavení elevace $\alpha_e = 40^\circ$, tedy v horní poloze.



Graf 6-1 Průběh klopného momentu

Nyní je možné přistoupit k výpočtu potřebného krouticího momentu krokového servomotoru. Pro výpočet se vychází ze vztahu (1.4). Při výpočtu není uvažována hmotnost a tuhost spojovacího kabelu laserové hlavy. Dá se ale předpokládat, že spojovací kabel bude polohovací část odlehčovat. Určení skutečného vlivu spojovacího kabelu bude předmětem analýzy vyrobeného prototypu.

Dáno:

$$M_{kle,max} = 19,4 \text{ Nm}$$

$$i_s = 50$$

$$\eta_s = 0,36$$

$$I_{km} = 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

$$I_{ne} = 4,385 \text{ kgm}^2$$

$$\varepsilon_{km} = 1,5 \text{ rads}^{-2}$$

$$M_{km,potř} = M_{kle,max} \frac{1}{i_s} \frac{1}{\eta_s} + \left(I_{km} + I_{ne} \frac{1}{i_s^2} \frac{1}{\eta_s} \right) \varepsilon_{km}$$

$$M_{km,potř} = 19,4 \cdot \frac{1}{50} \frac{1}{0,36} + \left(1,38 \cdot 10^{-4} + 4,385 \frac{1}{50^2} \frac{1}{0,36} \right) \cdot 1,5 \quad (6.10)$$

$$M_{km,potř} = 1,08 \text{ Nm}$$

kde:

$M_{km,potř}$	[Nm]	je potřebný krouticí moment krokového motoru,
M_{kle}	[Nm]	je maximální velikost klopného momentu,
i_s	[-]	je převodový poměr šnekové převodovky,
η_s	[-]	je účinnost šnekové převodovky,
I_{km}	[kgm ²]	je moment setrvačnosti rotoru krokového motoru,
I_{ne}	[kgm ²]	je moment setrvačnosti naklápěné části vztažený k ose O_e ,
ε_e	[rads ⁻²]	je úhlové zrychlení krokového motoru.

Použitý 3fázový krokový servomotor ILS1573PB1A disponuje maximálním krouticím momentem 1,5 Nm, platí tedy podmínka $M_{km,potř} = 1,08 \text{ Nm} < 1,5 \text{ Nm}$. Zvolený servomotor **vyhovuje**.

Při výpočtu potřebného krouticího momentu servomotoru nebyla uvažována tuhost a hmotnost spojovacího kabelu. Velikost úhlového zrychlení ε_e , se kterou bylo v předchozím výpočtu počítáno, je nejmenší hodnota úhlového zrychlení, které může použitý krokový servomotor vyvinout. Tato hodnota je uvažována především s ohlednutím k velikosti celkového momentu setrvačnosti naklápěné části. Při vyšších hodnotách úhlového zrychlení by mohlo docházet k nepřesnému chodu krokového servomotoru.

6.7.1.2 Podmínka momentové přiměřenosti

Pro posouzení momentové přiměřenosti je nutné určit poměr momentu setrvačnosti zátěže vůči momentu setrvačnosti rotoru použitého krokového servomotoru. Pro výpočet se vychází ze vztahů (1.5) a (1.3).

Dáno:

$$I_{km} = 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

$$I_{ne} = 4,385 \text{ kgm}^2$$

$$i_{\dot{s}} = 50$$

$$k_{M\dot{s}} = \frac{I_{km} + I_{ne} \frac{1}{i_{\dot{s}}^2}}{I_{km}} = \frac{1,38 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 + 4,385 \text{ kgm}^2 \frac{1}{50^2}}{1,38 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2} = 13,7 \quad (6.11)$$

kde:

$k_{M\dot{s}}$	[-]	je poměr momentů setrvačnosti,
$i_{\dot{s}}$	[-]	je převodový poměr šnekové převodovky,
I_{km}	[kgm ²]	je moment setrvačnosti rotoru krokového motoru,
I_{ne}	[kgm ²]	je moment setrvačnosti naklápěné části vztažený k ose O_e .

Pro optimální chod servoponu je doporučován poměr $k_M < 15$. Protože platí $k_{M\dot{s}} = 13,7 < 15$, navržený servopohon **vyhovuje**.

6.7.1.3 Podmínka maximálního výstupního momentu

Maximálním výstupním momentem servoponu musí být menší než maximální dovolený výstupním momentem použité šnekové převodovky.

Dáno:

$$M_{\dot{s},max} = 44 \text{ Nm}$$

$$M_{km} = 1,5 \text{ Nm}$$

$$i_{\dot{s}} = 50$$

$$\eta_{\dot{s}} = 0,36$$

$$k_{\dot{s}} = \frac{M_{\dot{s},max}}{M_{km} \cdot i_{\dot{s}} \cdot \eta_{\dot{s}}} = \frac{44 \text{ Nm}}{1,5 \text{ Nm} \cdot 50 \cdot 0,36} = 1,63 \quad (6.12)$$

kde:

$k_{\dot{s}}$	[-]	je poměr mezi dovoleným a maximálním momentem převodovky,
$M_{\dot{s},max}$	[Nm]	je maximální dovolený výstupní moment šnekové převodovky,
M_{km}	[Nm]	je maximální moment krokového motoru,
$i_{\dot{s}}$	[-]	je převodový poměr šnekové převodovky,
$\eta_{\dot{s}}$	[-]	je účinnost šnekové převodovky.

Poměr mezi maximálním dovoleným výstupním momentem a maximálním výstupním momentem $k_{\dot{s}} = 1,63$ je větší než jedna. Šneková převodovka tedy **vyhovuje** s koeficientem bezpečnosti 1,63.

6.7.2 Kontrola servopohonu nastavení azimutu

6.7.2

6.7.2.1 Podmínka velikosti potřebného krouticího momentu

Pro výpočet se vychází ze vztahu (1.4). Při výpočtu je uvažována pouze setrvačná hmota, která je urychlována.

Dáno:

$$i_h = 50$$

$$\eta_h = 0,85$$

$$I_{km} = 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

$$I_h = 0,193 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

$$I_{na} = 4,385 \text{ kgm}^2$$

$$\varepsilon_a = 5 \text{ rads}^{-2}$$

$$M_{km,potř} = \left(I_{km} + I_h + I_{na} \frac{1}{i_s^2} \frac{1}{\eta_h} \right) \varepsilon_{km}$$

$$M_{km,potř} = \left(1,38 \cdot 10^{-4} + 0,193 \cdot 10^{-4} + 4,678 \frac{1}{50^2} \frac{1}{0,85} \right) \cdot 5 \quad (6.13)$$

$$M_{km,potř} = 1,21 \text{ Nm}$$

kde:

$M_{km,potř}$	[Nm]	je potřebný krouticí moment krokového motoru,
i_h	[-]	je převodový poměr harmonické převodovky,
η_h	[-]	je účinnost harmonické převodovky,
I_{km}	[kgm ²]	je moment setrvačnosti rotoru krokového motoru,
I_h	[kgm ²]	je moment setrvačnosti harmonické převodovky,
I_{ne}	[kgm ²]	je moment setrvačnosti pohyblivé části vztažený k ose O_a ,
ε_{km}	[rads ⁻²]	je úhlové zrychlení krokového motoru.

Použitý 3fázový krokový servomotor ILS1573PB1A disponuje maximálním krouticím momentem 1,5 Nm, platí tedy podmínka $M_{km,potř} = 0,01 \text{ Nm} \ll 1,5 \text{ Nm}$. Zvolený servomotor **vyhovuje**. Pohledem tohoto výpočtu se může zdát servomotor jako předdimenzovaný. Pro pohon je ale použit servomotor ILS1573PB1A z toho důvodu, že je již tento použit pro pohon nastavení elevace.

6.7.2.2 Podmínka momentové přiměřenosti

Pro posouzení momentové přiměřenosti je nutné určit poměr momentu setrvačnosti zátěže vůči momentu setrvačnosti rotoru použitého krokového servomotoru. Pro výpočet se vychází ze vztahů (1.5) a (1.3).

Dáno:

$$I_{km} = 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

$$I_h = 0,193 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

$$I_{na} = 4,678 \text{ kgm}^2$$

$$i_h = 50$$

$$k_{Mh} = \frac{I_{km} + I_h + I_{na} \frac{1}{i_s^2}}{I_{km}}$$

$$k_{Mh} = \frac{1,38 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 + 0,193 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 + 4,678 \text{ kgm}^2 \frac{1}{50^2}}{1,38 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2} \quad (6.14)$$

$$k_{Mh} = 13,7$$

kde:

k_{Mh}	[-]	je poměr momentů setrvačnosti,
i_h	[-]	je převodový poměr harmonické převodovky,
I_{km}	[kgm ²]	je moment setrvačnosti rotoru krokového motoru,
I_h	[kgm ²]	je moment setrvačnosti harmonické převodovky,
I_{ne}	[kgm ²]	je moment setrvačnosti pohyblivé části vztažený k ose O_a .

Pro optimální chod servoponu je doporučován poměr $k_M < 15$. Protože platí $k_{M\dot{s}} = 14,7 < 15$, navržený servopohon **vyhovuje**.

6.7.2.3 Podmínka maximálního výstupního momentu

Maximálním výstupním momentem servoponu musí být menší než maximální dovolený výstupním momentem použité šnekové převodovky.

Dáno:

$$M_{h,max} = 56 \text{ Nm}$$

$$M_{km} = 1,5 \text{ Nm}$$

$$i_h = 50$$

$$\eta_h = 0,85$$

$$k_h = \frac{M_{h,max}}{M_{km} \cdot i_h \cdot \eta_h} = \frac{56 \text{ Nm}}{1,5 \text{ Nm} \cdot 50 \cdot 0,85} = 0,88 \quad (6.15)$$

kde:

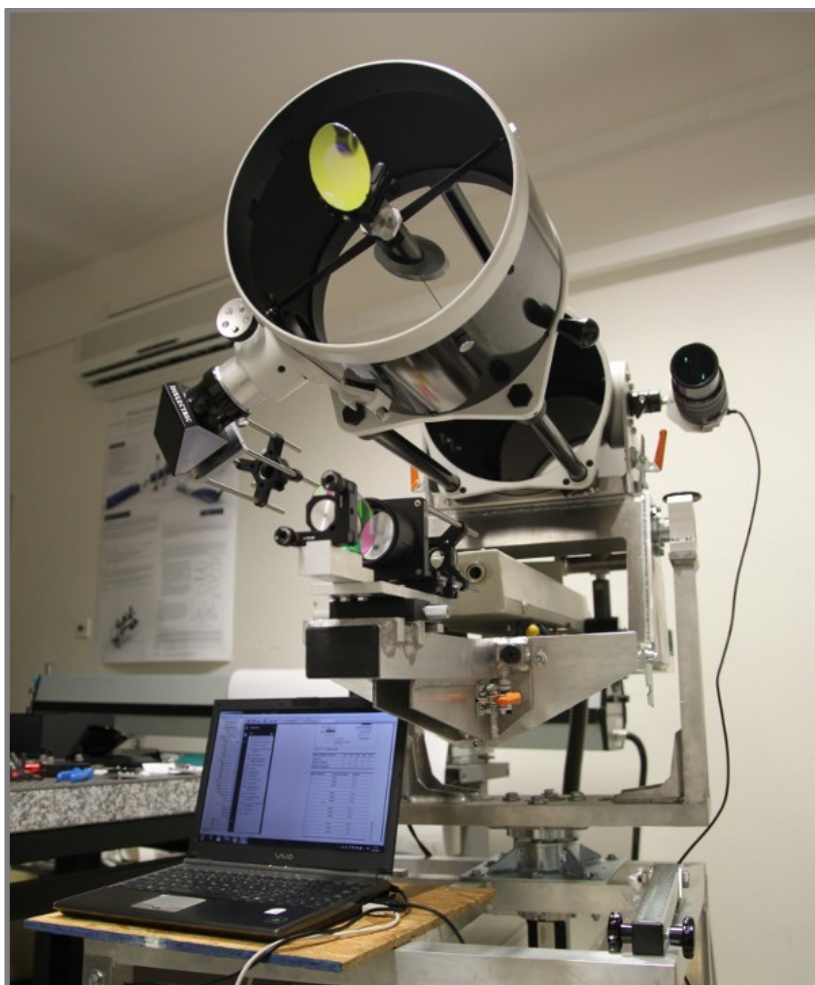
k_h	[-]	je poměr mezi dovoleným a maximálním momentem převodovky,
$M_{h,max}$	[Nm]	je maximální dovolený výstupní moment harmonické převodovky,
M_{km}	[Nm]	je maximální moment krokového motoru,
i_h	[-]	je převodový poměr harmonické převodovky,
η_h	[-]	je účinnost šnekové převodovky.

Poměr mezi maximálním dovoleným výstupním momentem a maximálním výstupním momentem $k_h = 0,88$ je menší než jedna. Protože je však potřeba jen velmi malý krouticí moment krokového servomotoru ($M_{km,poř} = 0,01 \text{ Nm}$), je možné omezit velikost jeho výstupního krouticího momentu pomocí řídicího software na 30 % nominálního krouticího momentu. Po splnění této podmínky již bude navržená harmonická převodovka **vyhovovat**.

7 REALIZACE PROTOTYPU

7.1 Výroba prototypu

Na základě vyhotovené výrobní dokumentace, byl zrealizován prototyp polohovací jednotky pro laserovou spektroskopii, který bude sloužit k ověřování funkčnosti navržené konstrukční varianty. Finální montáž a oživení proběhlo v Laboratoři laserové spektroskopie ÚFI, výroba dílů byla zadána dvěma externím firmám (AQUADEM, s.r.o. a Ing. Zdeněk Životský), část dílů pak byla vyrobena v dílnách ÚK a ÚFI. Výroba zrcátek optické cesty, resp. depozice reflexní vrstvy těchto zrcátek, proběhla na ÚPT AVČR, v.v.i. Přehledněji viz Tab. 6.



Obr. 7-1 Polohovací jednotka pro laserovou spektroskopii

Samotná realizace proběhla v období od listopadu 2011 do května 2012, přičemž v období od listopadu 2011 do ledna 2012 proběhl výběr dodavatelů nakupovaných komponent, výběr externích firem zajišťujících výrobu dílů, které nebylo možno, z technologických důvodů, vyrobit v prototypových dílnách ÚFI a ÚK (především svařované duralové části rámu, části pohonů a uložení etc.) a předání výrobní dokumentace těmto vybraným firmám.

V období od ledna 2012 do dubna 2012 probíhala výroba dílů v dílnách ÚK a ÚFI, úprava komponent původní laboratorní sestavy (především tubusu teleskopu), finální

montáž a oživení pohonů. Elektrické zapojení a vytvoření softwaru pro ovládání servopohonů bylo realizováno zaměstnanci ÚFI.

Tab. 6 Přehled realizace jednotlivých dílů

Místo realizace	Realizovaná část
AQUADEM, s.r.o.	Svařované duralové díly rámu jednotky
Ing. Zdeněk Životský	Díly pohonů a uložení (čepy, domečky ložisek)
ÚPT AVČR, v.v.i.	Depozice reflexní vrstvy na zrcátka optické cesty
Prototypová dílna ÚFI	Duralové díly optické cesty
Prototypová dílna ÚK	Duralové díly optické cesty, úprava nakoupených komponent
Studentská dílna ÚK	Díly z PA 6, dílčí montáže
Laboratoř laserové spektroskopie ÚFI	Finální montáž

7.1.1 Vyčíslení nákladů na stavbu prototypu

Náklady na stavbu prototypu dosáhly částky 169 373 Kč. Cena nakupovaných komponent a spojovacího materiálu dosáhla částky 112 564,- Kč, přičemž nejdražší položkou byla harmonická převodovka s cenou 49 900,- Kč. Po zrealizování úprav, kterými byly eliminovány některé závady konstrukce, celkové náklady vzrostly ještě o cenu nových komponent.

7.1.1

Tab. 7 Dodatečný cenový přehled

Položka	Dodavatel	Cena [Kč]
Šneková převodovka Tramec	MOTOR-GEAR a.s.	4 500,--
Eliptická zrcátka BBE2-E02	Thorlabs	7 600,--
		12 100,--

Celkové náklady na stavbu prototypu tedy dosáhly částky 181 473,- Kč (vč. DPH). Tato cena nezahrnuje režijní náklady prototypových dílen Ústavu konstruování a Ústavu fyzikálního inženýrství.

Podrobný cenový rozpis je součástí Přílohy A: Cenový rozpis položek.

7.2 Závady prototypu

Po sestavení a oživení prototypu bylo objeveno několik závad. U šnekové převodovky pohonu nastavení elevace byla identifikována nepřiměřená velikost mrtvého chodu. Optická cesta laserového svazku vykazovala znaky astigmatismu.

7.3 Astigmatismus optické soustavy

7.3.1 Úvod do problematiky

Astigmatismus je vada, kdy při zobrazení roviny kolmé k optické ose dochází k tomu, že body v navzájem kolmých osách se nezobrazí ve stejné vzdálenosti. Dojde ke vzniku dvou ohnisek. Z tohoto důvodu nebylo možné zfokusovat laserový svazek tak, aby průměr jeho stopy byl menší než 5 mm.

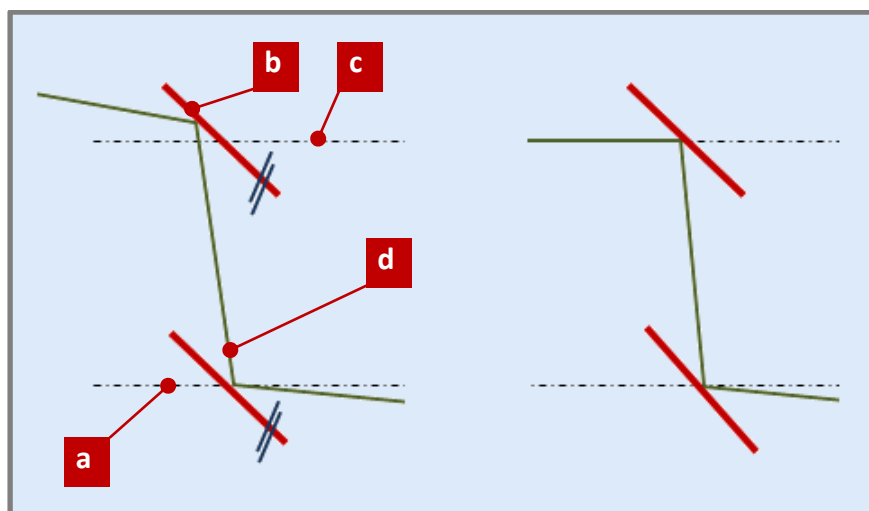
Vznik astigmatismu mohla způsobit fokusační optika, nebo periskop. S použitou fokusační optikou byla v minulosti provedena řada měření, k výskytu astigmatismu nedocházelo. Jako problematický prvek optické cesty se proto jevil periskop. U periskopu byly uvažovány dva důvody vzniku astigmatismu:

- nevyhovující odchylka vzájemné rovnoběžnosti čelních ploch zrcátek,
- nevyhovující odchylka rovinnosti čelních ploch zrcátek.

7.3.1.1 Nevyhovující odchylka vzájemné rovnoběžnosti čelních ploch zrcátek

Do prototypu byla vnesena, vlivem výroby a montáže, řada nepřesností. Korekci těchto nepřesností je možné provádět pomocí justačních členů.

Nepřesnost sestavení a výroby se může projevit u optické cesty tak (viz Obr. 7-2, že laserový svazek nevstupuje (d) na dolní zrcátko periskopu (a) pod ideálním úhlem 45° . Tehdy dojde k jeho vybočení a horní zrcátko periskopu (b) svazek již opouští mimo osu teleskopu. Tento stav je nepřijatelný. Pro korekci je nutné zrcátka naklonit tak, aby byl laserový svazek přiveden do osy teleskopu. Po naklonění zrcátek už jejich čelní plochy nejsou rovnoběžné, resp. odchylka vzájemné rovnoběžnosti je větší než před seřízením. Odchylka může být až v jednotkách stupňů. Podobnou korekci je nutné provést i vzhledem k hlavním osám eliptických zrcátek. Kombinace naklonění v těchto dvou osách by mohla způsobovat vznik astigmatismu.

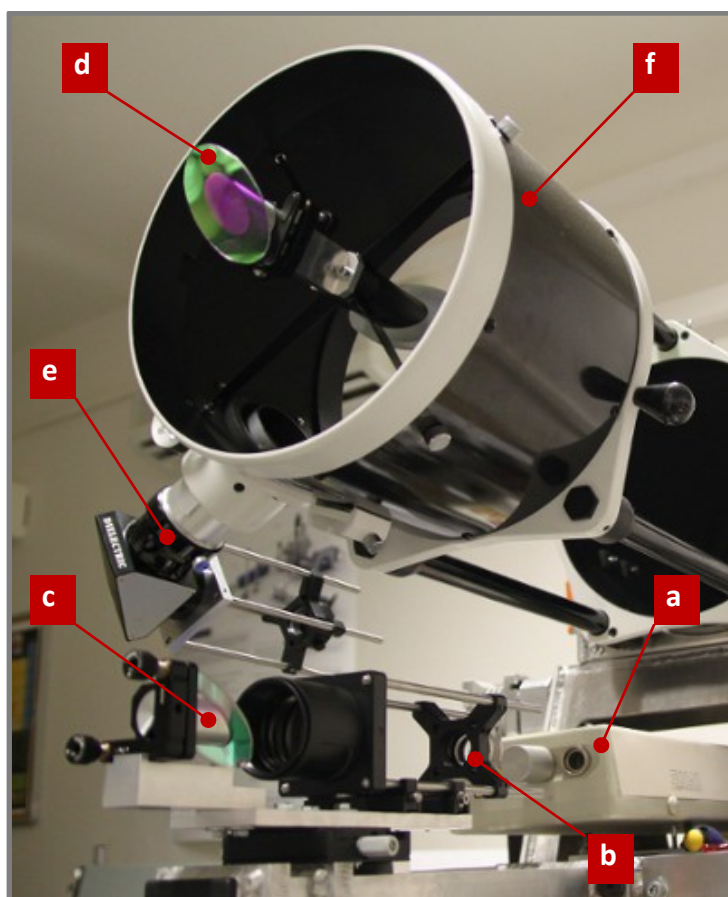


Obr. 7-2 Periskop před a po seřízení
a – dolní zrcátko periskopu; b – horní zrcátko periskopu; c – osa teleskopu;
d – laserový svazek; c – osa teleskopu

Po nasimulování této situace v aplikaci WinLens3D bylo zjištěno, že odchylka vzájemné rovnoběžnosti čelních ploch zrcátek nemá vliv na vznik astigmatismu. Simulace byla provedena pracovníky Ústavu fyzikálního inženýrství.

7.3.1.2 *Nevyhovující odchylka rovinnosti čelních ploch zrcátek*

Na interferometru Askania, umístěném v laboratoři ÚFI, proběhlo změření hodnot odchylek rovinnosti a určení typu křivosti čelních ploch užitých eliptických zrcátek. Bylo zjištěno, že zrcátka mají poměrně komplikovanou křivost, kdy ve směru hlavní osy elipsy je zakřivení konkávní a ve směru vedlejší osy pak konvexní, přičemž naměřena maximální hodnota rozdílu těchto křivostí, resp. odchylka, byla $3 \cdot \lambda$. Protože je pro tento typ aplikace přípustná maximální odchylka ($\lambda/20 \div \lambda/10$), jsou původně užitá zrcátka zcela nevyhovující. Příčinou byla nejspíše nevyhovující kvalita povrchu substrátu zrcátka (skla), na který byla na Ústavu přístrojové techniky deponována reflexní vrstva.



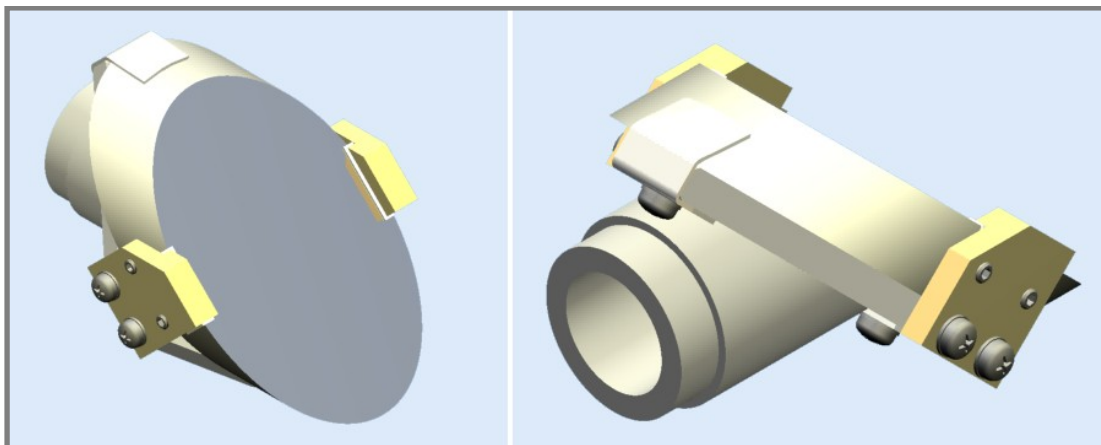
Obr. 7-3 Detail optických dílů zařízení
 a – laser Solar LQ-916; b – fokační optika; c – dolní zrcátko periskopu; d – horní zrcátko periskopu; e – sběrná optika; f – teleskop SkyWatcher

7.3.2 **Navržené řešení problému**

Vzhledem k problémům s výrobou vlastních eliptických zrcátek, bylo rozhodnuto nová zrcátka zakoupit. Zaměstnanci ÚFI byla vybrána dvě 2" eliptická zrcátka BBE2-E02 od společnosti ThorLabs. Jedná se o masivní skleněná zrcátka, s deponovanou reflexní vrstvou, s mezní hodnotou odchylky rovinnosti čelní plochy

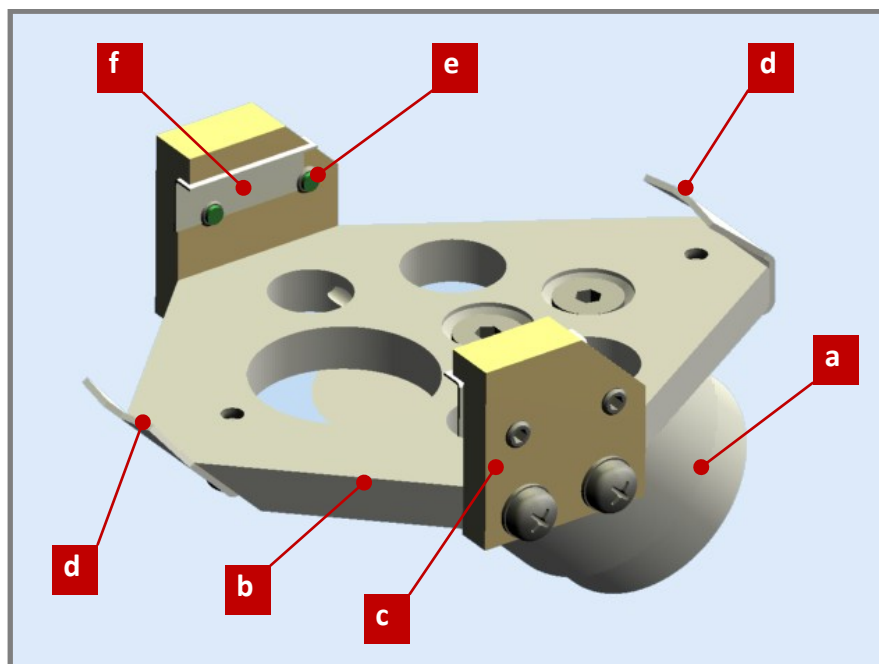
7.3.2

$\lambda/10$, která je pro tuto aplikaci vyhovující. Neboť byl vznesen požadavek na snadnou vyměnitelnost zrcátek (např. v případě, kdy by byl užit laserový svazek s jinou vlnovou délkou, na kterou není zrcátko optimalizováno; zrcátko BBE2-E02 je optimalizováno na vlnové délky v rozsahu 400 – 750 nm), byl navržen držák, ve kterém je zrcátko upevněno pomocí tvarového, resp. silového, styku, jak je patrné z Obr. 7-4.



Obr. 7-4 Nové řešení držáku eliptického zrcátka

Konstrukční řešení držáku, viz Obr. 7-5, vychází částečně z původního řešení. Na duralový čep držáku (a), který je opatřen odlehčovacím otvorem, je připevněna duralová destička (b), sloužící jako základna pro připevnění zrcátka (není zobrazeno), a která je taktéž opatřena odlehčovacími otvory. Samotné zrcátko je vsazeno mezi dvojicí bočnic (c) a uchyceno pomocí dvou párů stavěcích šroubů, které jsou zakončeny špičkou z PA 6. Tento typ šroubu byl zvolen z důvodu zamezení možnosti vyštípnutí části skleněného těla zrcátka při kontaktu s hranou ocelového šroubu. Do místa styku bočnice a čelní plochy zrcátka je vložena netkaná textilie (f), zamezující poškození deponované vrstvy. Proti případnému vypadnutí (např. z důvodů vibrací při transportu) zrcátka je držák opatřen dvěma přídržnými plechy (d) z hliníku.

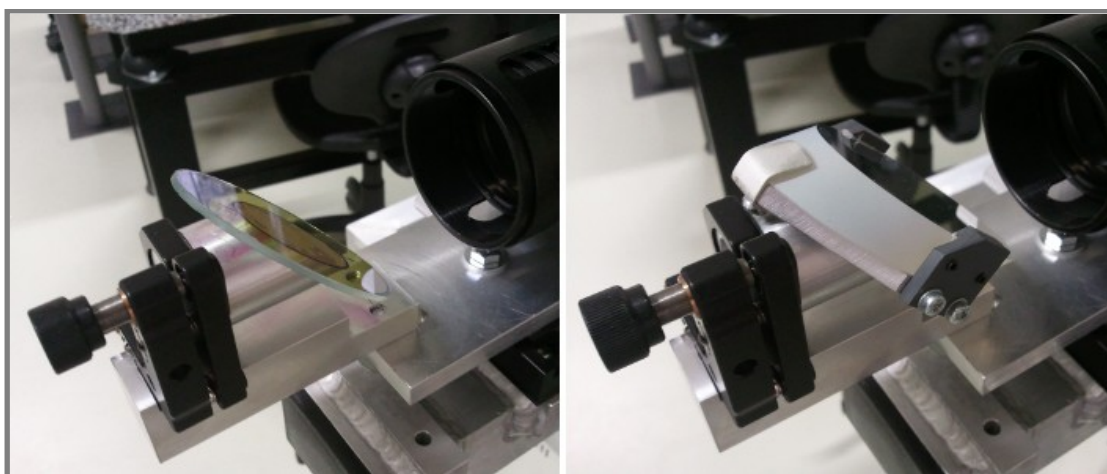


Obr. 7-5 Popis konstrukčního řešení držáku
 a – čep držáku; b – destička držáku; c – bočnice; d – přídržovací plech;
 e – stavěcí šroub s PA6 špičkou; f – netkaná textilie

7.3.3 Zhodnocení navrženého řešení

Navržené řešení minimalizovalo projev astigmatismu. S upravenou optickou soustavou bylo možno vytvořit spot o průměru 1,4 mm, přičemž teoretická hodnota je přibližně 1,2 mm (se zahrnutím předpokládaných sférických a difrakčních vad optické soustavy). Konstrukce držáku zrcátka se jevila po montáži jako dostatečně tuhá. Díky charakteru upevnění zrcátka, je možno toto v budoucnu vyměnit za zrcátko s povlakem optimalizovaným pro jinou vlnovou délku. Hmotnost vzrostla, oproti původnímu řešení, přibližně o 80 g na 146 g (tj. o 120 %), což je především způsobeno hmotností užitého eliptického zrcátka.

7.3.3



Obr. 7-6 Porovnání původního a nového držáku eliptického zrcátka

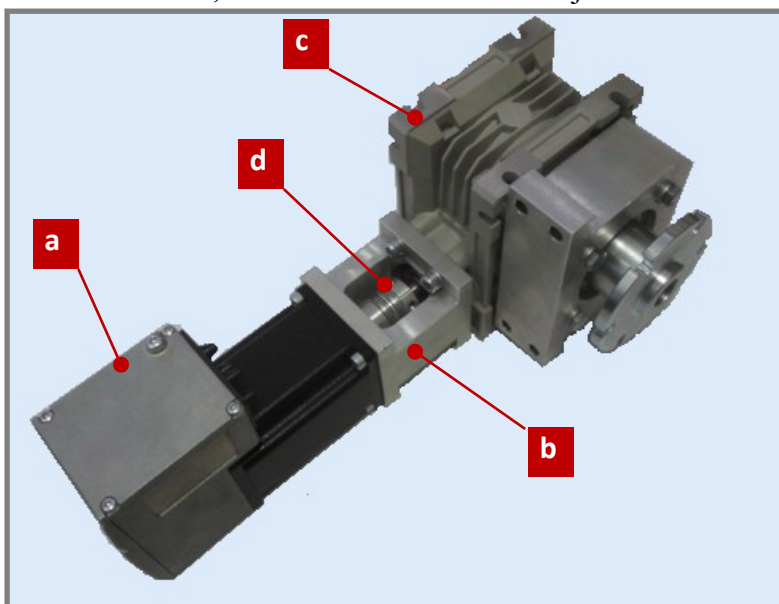
7.4 Nepřiměřená velikost mrtvého chodu šnekové převodovky

7.4.1 Úvod do problematiky

Po finální montáži byla identifikována v pohonu elevace (viz Obr. 7-7) nestandardní velikost „mrtvého chodu“ užití převodovky, jejíž hodnota byla přibližně 1,5 °. Měření proběhlo při aplikování zatížení momentem o velikosti 20 N·m, který odpovídá působícímu klopnému momentu bez vyvažovacího závaží. Přičemž bylo vyzorováno, že na velikost „mrtvého chodu“ má vliv

- vůle mezi šnekem a šnekovým kolem a vůle v uložení šneku (cca 60% vliv),
- nízká tuhost uložení šneku a šnekového kola (cca 40% vliv).

Tyto skutečnosti negativně ovlivňují funkčnost celého zařízení a mohou zkrátit životnost některých komponent. Po aplikování zatížení dochází k zasouvání vstupní hřídele dovnitř tělesa převodovky, přibližně o hodnotu 0,5 mm, přičemž je toto eliminováno pružnou spojkou. Přípustná velikost axiální deformace spojky je však pouze 0,3 mm, dochází tedy k přetěžování této spojky. Dochází taktéž k přenášení axiální síly na hřídel motoru, což může zkrátit životnost jeho ložisek.



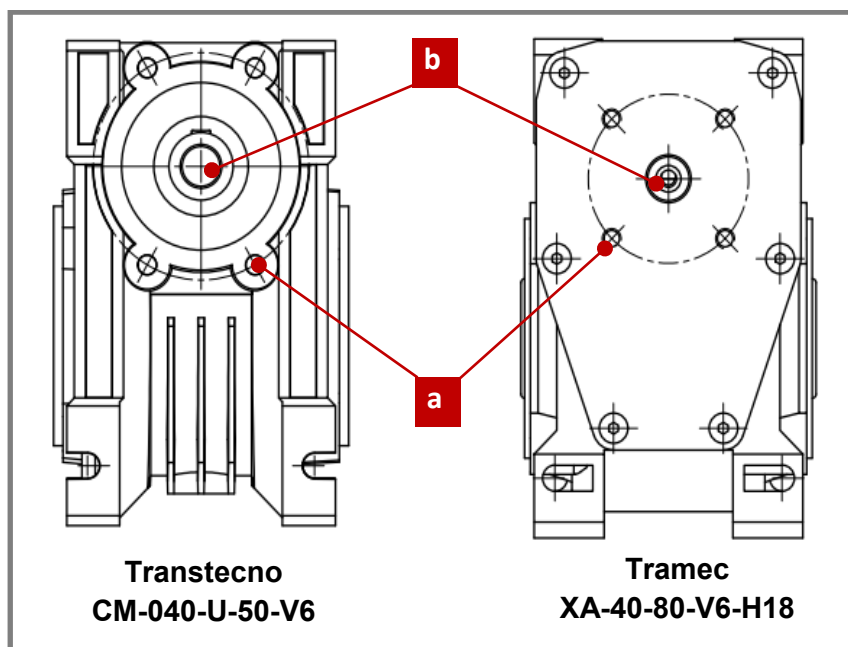
Obr. 7-7 Detail pohonu elevace

a – krokový servomotor; b – příruba; c – šneková převodovka;
d – pružná spojka

7.4.2 Navržené řešení problému

Z finančních a konstrukčních důvodů (minimální dodatečné úpravy stávajících dílů konstrukce), bylo přistoupeno k nahrazení stávající šnekové převodovky šnekovou převodovkou od jiného výrobce. Byla vybrána převodovka XA-40-80-V6-H18 od společnosti Tramec. Výrobce garantuje, pro daný typ převodovky, velikost vůle do 11,5 ′. Tato byla výrobcem určena při zatížení, které bylo rovno 2 % maximální dovoleného výstupního momentu, v tomto případě tedy při zatížení 0,84 N·m. Je tedy zřejmé, že celková velikost „mrtvého chodu“ bude větší, protože není uvažován vliv tuhosti převodu a jeho uložení v těle převodovky. Údaje o tuhosti převodu výrobce neposkytuje. [23]

Přestože byla vybrána převodovka stejné velikosti (velikost 40) a tedy průměry vstupního hřídele, resp. výstupního náboje, jsou shodné, rozmístění otvorů pro spojovací šrouby na vstupní straně je rozdílné, jak je patrné z Obr. 7-8. Z tohoto důvodu byla navržena nová příruba spojující servomotor s převodovkou. Rozmístění otvorů na výstupní straně převodovky je shodné.



Obr. 7-8 Porovnání vstupní strany původní a nové převodovky
a – závitové otvory M5x10 (4x); b – vstupní hřídel $\varnothing 11j6$

Jako výhodnější se však jeví nahrazení šnekové převodovky např. úhlovou planetovou převodovkou (řada ABR od společnosti Apex Dynamics). Výhodou této varianty by byla nižší vůle ($< 3 \mu\text{m}$) a vyšší tuhost převodu, při zachování podobné velikosti zástavbového prostoru. Varianta by však vyžadovala modifikaci ložiskového domečku na straně pohonu, dovybavení pohonu elevace elektromagnetickou brzdou (nebyla by zajištěna samosvornost převodu) a cena samotné převodovky by byla násobně vyšší než cena šnekové převodovky. Proto tato nebyla zvolena.

7.4.3 Zhodnocení navrženého řešení

Řešení nebylo v době psaní textu diplomového projektu fyzicky zrealizováno, nebylo tedy možno jej zhodnotit.

8 ZÁVĚR

V rámci řešení tohoto diplomového projektu bylo dosaženo všech vytyčených primárních a sekundárních cílů. Konstrukční řešení respektuje parametry zadání. Navržené servopohony umožňují provádět automatické měření na vzdálenost 10 m s rozlišením větším než 1 cm, v rozsahu úhlu nastavení elevace -16° až 40° . Konstrukce je navržena jako rozmontovatelná, pro zvýšení mobility.

Na základě konstrukčního návrhu byl vyroben prototyp polohovací jednotky. Náklady na stavbu dosáhly částky 181 473,- Kč. Závady, které se vyskytly na prototypu, byly odstraněny, popř. bylo navrženo jejich řešení. Po odstranění závady optické cesty, se podařilo vytvořit stopu laserového svazu o průměru 1,4 mm na vzdálenost 6 m, kdy teoretická hodnota byla 1,2 mm.

Prototyp bude dále sloužit na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně k provádění experimentálních měření a rozšiřování znalostí z oblasti dálkové laserové spektroskopie.

Dalším vývojovým krokem bude dovybavení fokusační optiky elektromechanickými prvky, které umožní poloautomatické ostření. Objektiv kamery bude doplněn o elektromechanickou clonu, která bude chránit CCD čip kamery před poškozením. Pro zvýšení bezpečnosti práce bude polohovací jednotka dovybavena snímačem pohybu před teleskopem.

8.1 Konstrukční rozbor řešení

Polohovací jednotka je navržena jako rozmontovatelná. Toto umožňuje snazší transport. Jednotlivé části jsou opatřeny spojovacími čepy a upínacími prvky, které zajišťují přesné a pevné spojení. Většina vyráběných dílů je navržena z duralu z důvodu snížení hmotnosti a má masivní provedení pro zvýšení tuhosti. Celková hmotnost polohovací jednotky je 56 kg. Hmotnost žádné z částí nepřekračuje 50 kg (limit pro hmotnost ručně manipulovaného břemena) a je tedy možné je bezproblémově přenášet.

Použité servopohony jsou složeny z přesné harmonické převodovky s krokovým motorem (nastavení azimutu) a ze šnekové převodovky s krokovým motorem (nastavení elevace). Řízení je prováděno pomocí vytvořeného software. Toto uspořádání dovoluje provádět bodové snímání s rozlišením větším než 1 cm na vzdálenost 10 m. Pohony a jejich uložení bezúdržbové.

Prvky optické cesty (eliptická zrcátka, fokusační optika) jsou vybaveny justačními členy, které umožňují korigovat nepřesnosti výroby a montáže.

8.2 Technologický a ekonomický rozbor řešení

Z časových a technologických důvodů byla výroba dílů rozdělena. Externí firmy zajistily nařezání duralových dílů pomocí vodního paprsku a jejich svaření a také zajistily obrobení a galvanické pokovení ocelových dílů. Náklady na výrobu těchto dílů dosáhly částky 56 809,- Kč. V dílnách Ústavu konstruování a Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně pak byly vyrobeny zbývající díly. Což pomohlo ušetřit část nákladů na realizaci. Cena nakupovaných komponent a spojovacího materiálu a polotovarů dosáhla částky 112 564,- Kč, přičemž nejdražší položkou byla harmonická převodovka s cenou 49 900,- Kč.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MICHEL, Y. et al. ChemCam screw/nut autofocus mechanism: qualification data and guidelines for space-use of ground equipments. *Proceedings of 13th European Space Mechanism and Tribology Symposium - ESMATS 2009*, 2009, Vienna, Austria.
- [2] SACCOCIO, M. et al. ChemCam on MSL 2009: First laser-induced breakdown spectrometer for space science. *Proceedings of International Conference on Space Optics*. 2008, Toulouse, France.
- [3] FORTES, F. J.; LASERNA, J. J. The development of fieldable laser-induced breakdown spectrometer: No limits on the horizon. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*. 2010, vol. 65, no. 12, p. 975-990
- [4] DE LUCIA, F. C. et al. Current Status of Standoff LIBS Security Applications at the United States Army Research Laboratory. *Spectroscopy*. 2009, p. 29-34
- [5] NOVOTNÝ, J. et al. Vývoj mobilní aparatury pro dálkovou laserovou spektroskopii: laboratorní sestava. *Jemná mechanika a optika*. 2009, vol. 54. no. 7-8. p. 200-203
- [6] HRDLIČKA, A. et al. Development of a remote laser-induced breakdown spectroscopy system for investigation of calcified tissue samples. *Applied Optics*. 2010, vol. 49. no. 13. p. C16-C20
- [7] NOVOTNÝ, K. et al. Spektroskopie laserem buzeného plazmatu (LIBS). *Československý časopis pro fyziku*, 2010, vol. 60, no. 4-5, p. 280-285.
- [8] Newsroom: Mars Science Laboratory Launch Press Kit. *NASA/JPL* [online]. 2011 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <<http://mars.jpl.nasa.gov/msl/news/newsroom/>>
- [9] ChemCam instrument on MSL rover. *MSL Curiosity* [online]. 2011 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://smc.cnes.fr/MSL/GP_chemcam.htm>
- [10] WIENS, R. C.; MAURICE, S. The ChemCam Instrument Suite on the Mars Science Laboratory Rover Curiosity: Remote Sensing by Laser-Induced Plasmas. *Geochemical News* [online]. 2011, vol. 145 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <<http://www.geochemsoc.org/publications/geochemicalnews/gn145jun11/chemcaminstrumentsuite.htm>>
- [11] LASERNA, J. J.; REYS R. F. et al. Study on the effect of beam propagation through atmospheric turbulence on standoff nanosecond laser induced breakdown spectroscopy measurements. *Optics Express*. 2009, vol. 12, p. 10256-10276
- [12] PALANCO, S. et al. Design, construction and assessment of a field-deployable laser-induced breakdown spectrometer for remote elemental sensing. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*. 2006, vol. 61, no. 1, p. 88-958
- [13] Funkční vzorky. *LIBS laboratory* [online]. 2011-03-16 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z WWW: <<http://libs.fme.vutbr.cz/index.php/cs/laborato/prototypy-a-funkni-vzorky>>

- [14] Remote LIBS/rLIBS aparatura. *LIBS laboratory* [online]. 2011-10-11 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z WWW: <<http://libs.fme.vutbr.cz/index.php/cs/laborato/dalkova-libslibs-aparatura>>
- [15] SKALICKÝ, J. *Elektrické servopohony*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1978-4.
- [16] NEBORÁK, I. a V. SLÁDEČEK. *Elektrické pohony: pro kombinovaná distanční studium* [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z WWW: <http://homen.vsb.cz/~vac174/vyuka/EP%20PEZ+USP/Studijni_opory/Elektricke_pohony.pdf>
- [17] Fyzikální princip LIBS. *LIBS laboratory* [online]. 2010-05-05 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z WWW: <<http://libs.fme.vutbr.cz/index.php/cs/teorie/fyzikalni-princip-libs-zaklady>>
- [18] GAUDIUSO, R. et al. Laser Induced Breakdown Spectroscopy for Elemental Analysis in Environmental, Cultural Heritage and Space Applications: A Review of Methods and Results. *Sensors*. 2010. no. 8. p. 7434-7468
- [19] DYNBYL, V. Přesné reduktory v pohonných řetězcích moderních strojů. *Automa* [online]. 2002, vol. 2002, no. 05 [cit. 2012-02-19]. ISSN 1210-9592. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28452>
- [20] HALE, L. C.; SLOCUM, A. H. Design of Anti-backslash Transmissions for Precision Position Control-Systems. *Precision Engineering-Journal of the American Society for Precision Engineering*. 1994, vol. 16, no. 4, p. 244-258
- [21] DOČKAL, A. Konstrukční optimalizace ozubené převodovky s ohledem na snižování hlukové emise. Brno, 2003. 107 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Dušan Kolář, CSc.
- [22] ARMSTRONG, R. W. Load To Motor Inertia Mismatch: Unveiling The Truth. *Drives and Controls Conference*. 1998. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.diequa.com/download/articles/inertia.pdf>>
- [23] Worm gearboxes catalogue. *Tramec* [online]. 2012 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z WWW: <http://www.tramec.it/documentation/new_VSF/Catalogo%20riduttore%20VSF%20italiano%20inglese%20tedesco.pdf>
- [24] ST-LIBS™ Image Gallery. *Applied Photonics Ltd* [online]. 2006 [cit. 2012-05-11]. Dostupné z WWW: <http://www.appliedphotonics.co.uk/Libs/gallery/st_gallery.htm>
- [25] BUBÁK, A. Zkušenosti s přímými pohony v konstrukcích obráběcích strojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, č. 5 [cit. 2012-05-02]. Dostupné z WWW <<http://www.mmspektrum.com/clanek/zkusenosti-s-primymi-pohony-v-konstrukcich-obrabecich-stroju.html>>. ISSN 1212-2572
- [26] Stroje s permanentními magnety. *VUES Brno s.r.o.* [online]. 2007 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.vues.cz/stroje-s-permanent.-magnety.html>>
- [27] KOTROUŠOVÁ, R. Pohony pro obráběcí stroje. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, č. 12 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z WWW

- <<http://www.mmspektrum.com/clanek/pohony-pro-obrabeci-stroje-4841.html>>. ISSN 1212-2572
- [28] Technický list šnekové převodovky TRANSTECNO. *Raveo* [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://raveo.cz/sites/default/files/transtecno/manualy/manual-snekove-prevodovky.pdf>>
- [29] Rotační polohovací moduly. Regulační pohony [online]. 2010 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z WWW: <http://www.regulacni-pohony.cz/firm_robot.html>

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1	Schéma laboratorní LIBS aparatury [17]	15
Obr. 1-2	Ukázka LIBS spektra lidské kosti [5]	16
Obr. 1-3	Konfigurace zařízení pro mobilní LIBS [3]	17
Obr. 1-4	Schéma experimentálního zařízení [12]	19
Obr. 1-5	Fotografie experimentálního zařízení [12]	19
Obr. 1-6	Schéma optické soustavy TELELIBS [11]	20
Obr. 1-7	Zařízení TELELIBS [11]	20
Obr. 1-8	ST-LIBS třetí generace [24]	21
Obr. 1-9	Robotické vozítko Curiosity [8]	22
Obr. 1-10	Vnitřní rozmístění částí ChemCam [9]	23
Obr. 1-11	Schéma elektrického servopohonu [16]	24
Obr. 1-12	Schéma elektrického pohonu s převodovkou	25
Obr. 1-13	Schéma předeprnutého pohonu s elektrickou vazbou	27
Obr. 1-14	Prstencový motor VUES ROL [26]	28
Obr. 2-1	Laboratorní aparatura pro dálkovou laserovou spektroskopii [14]	29
Obr. 2-2	Detail spojovacího kabelu laserové hlavy	30
Obr. 2-3	Schéma bodového snímání	31
Obr. 2-4	Navržené koncepce umístění laserové hlavy	32
Obr. 2-5	Schéma optické cesty laserového svazku	33
Obr. 5-1	Vizualizace a popis variant pohonů	37
Obr. 5-2	Vizualizace a popis varianty C	39
Obr. 6-1	Konstrukční návrh polohovací jednotky pro laserovou spektroskopii	41
Obr. 6-2	Tělo jednotky	42
Obr. 6-3	Detail spojení teleskopu s tělem jednotky	43
Obr. 6-4	Detail optické cesty	44
Obr. 6-5	Pohon nastavení azimutu	45
Obr. 6-6	Pohon nastavení elevace – strana servopohonu	46
Obr. 6-7	Pohon nastavení elevace – strana bez servopohonu	47
Obr. 6-8	Rozdělení konstrukce pro určení hmotových parametrů	48
Obr. 7-1	Polohovací jednotka pro laserovou spektroskopii	56
Obr. 7-2	Periskop před a po seřízení	58
Obr. 7-3	Detail optických dílů zařízení	59
Obr. 7-4	Nové řešení držáku eliptického zrcátka	60
Obr. 7-5	Popis konstrukčního řešení držáku	61
Obr. 7-6	Porovnání původního a nového držáku eliptického zrcátka	61
Obr. 7-7	Detail pohonu elevace	62
Obr. 7-8	Porovnání vstupní strany původní a nové převodovky	63

11 SEZNAM TABULEK**11**

Tab. 1 Časový harmonogram	36
Tab. 2 Srovnání navržených variant pohonů	40
Tab. 3 Parametry harmonické převodovky [29]	46
Tab. 4 Parametry šnekové převodovky [28]	47
Tab. 5 Hmotové parametry	49
Tab. 6 Přehled realizace jednotlivých dílů	57
Tab. 7 Dodatečný cenový přehled	57

12 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

k_M	[-]	poměr momentů setrvačnosti
k_{Mh}	[-]	poměr momentů setrvačnosti u pohonu nastavení azimutu
$k_{Mš}$	[-]	poměr momentů setrvačnosti u pohonu nastavení elevace
g	[ms ⁻²]	gravitační zrychlení.
h	[cm]	rozlišení snímání,
i	[-]	převodový poměr převodového mechanismu
$I_{a,i}$	[kgm ²]	moment setrvačnosti i -té části konstrukce vztažený k ose O_a
$I_{e,i}$	[kgm ²]	moment setrvačnosti i -té části konstrukce vztažený k ose O_e
i_h	[-]	převodový poměr harmonické převodovky
I_h	[kgm ²]	moment setrvačnosti harmonické převodovky
I_{km}	[kgm ²]	moment setrvačnosti rotoru krokového motoru
I_{na}	[kgm ²]	moment setrvačnosti naklápěných částí vztažený k ose O_a
I_{ne}	[kgm ²]	moment setrvačnosti naklápěné části vztažený k ose O_e
$i_š$	[-]	převodový poměr šnekové převodovky
J_C	[kg·m ²]	moment setrvačnosti pohybujících se hmot působících na motor
J_{CR}	[kg·m ²]	redukovaný moment setrvačnosti
J_{CR}	[kg·m ²]	redukovaný moment setrvačnosti
J_{PM}	[kg·m ²]	moment setrvačnosti pracovního mechanismu
J_{RG}	[kg·m ²]	moment setrvačnosti převodového mechanismu na vstupu
J_{RM}	[kg·m ²]	moment setrvačnosti rotoru motoru
k_h	[-]	poměr mezi dovoleným a maximálním momentem převodovky
$k_š$	[-]	poměr mezi dovoleným a maximálním momentem převodovky
l	[m]	maximální vzdálenost snímání
m	[-]	počet kroků na 360 °
$M_{h,max}$	[Nm]	maximální dovolený výstupní moment harmonické převodovky
m_i	[kg]	hmotnost i -té části konstrukce
M_{kle}	[Nm]	maximální velikost klopného momentu
M_{km}	[Nm]	maximální moment krokového motoru
$M_{km,potř}$	[Nm]	potřebný krouticí moment krokového motoru
M_M	[N·m]	točivý moment pracovního mechanismu
m_n	[kg]	hmotnost naklápěcí části
m_p	[kg]	hmotnost pohyblivé části
$M_{š,max}$	[Nm]	maximální dovolený výstupní moment šnekové převodovky
M_Z	[N·m]	točivý moment zátěže
x_T	[m]	složka x polohy těžiště
$x_{T,i}$	[mm]	složka x polohy těžiště i -té části konstrukce
y_T	[mm]	složka y polohy těžiště,
$y_{T,i}$	[mm]	složka y polohy těžiště i -té části konstrukce
z_T	[mm]	složka z polohy těžiště,
$z_{T,i}$	[mm]	složka z polohy těžiště i -té části konstrukce
α	[°]	úhel natočení v ose elevace a azimutu
α_e	[°]	úhel nastavení elevace
ε_e	[rads ⁻²]	úhlové zrychlení krokového motoru
ε_{km}	[rads ⁻²]	úhlové zrychlení krokového motoru
η_G	[-]	účinnost převodového mechanismu
η_h	[-]	účinnost šnekové převodovky
$\eta_š$	[-]	účinnost šnekové převodovky
ω_M	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost motoru
ω_{PM}	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost pracovního mechanismu

13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Cenový rozpis položek

Příloha B: Výkresová dokumentace

Název výkresu	Číslo výkresu	Formát
Polohovací jednotka	A1-PULS/00	A1
Pohon nastavení azimutu	A2-PULS/01/01	A2
Uložení pohonu	A2-PULS/01/01/01	A2
Příruba pohonu	A3-PULS/01/01/02	A3
Víčko pohonu	A4-PULS/01/01/03	A4

Příloha C: Montážní návod

Příloha D: CD

- pdf verze textu diplomového projektu
- pdf verze montážního návodu
- výkresová dokumentace

PŘÍLOHA A: CENOVÝ ROZPIS POLOŽEK

Název položky	Dodavatel	Cena za položku	Ks.	Cena
Díly vyráběné v externích firmách				
Svařované duralové díly rámu (včetně obrábění)	AQUADEM s.r.o.	41 809,-	1	41 809,-
Díly pohonů (včetně gal. pokovení)	Ing. Zdeněk Životský	10 200,-	1	10 200,-
Depozice reflexní vrstvy na zrcátka optické cesty	ÚPT AVČR v.v.i.	4 800,-	1	4 800,-
Nakupované díly				
Harmonická převodovka HFUC-2UH 20-SP	Berger Positec s.r.o.	49 900,-	1	49 900,-
Krokový servomotor ILS1F573PB1A	Berger Positec s.r.o.	23 520,-	2	47 040,-
Pružná spojka EVK-025	Berger Positec s.r.o.	974,-	1	974,-
Šneková převodovka CM-040-U-50-V6	RAVEO s.r.o.	3 030,-	1	3 030,-
Vodící čepy ECO	JAN SVOBODA s.r.o.	110,-	5	550,-
Vodící pouzdra EBU	JAN SVOBODA s.r.o.	110,-	5	550,-
3D hlava Triopo RS-1	Daganet s.r.o.	690,-	1	690,-
Třmenový upínač Kipp	MAREK Industrial a.s.	350,-	4	1 400,-
Kinematický držák KM100	Thorlabs	895,-	2	1 790,-
Lineární vedení DT25/M	Thorlabs	3 290,-	1	3 290,-
Ložisko SKF 6206 2Z	Hoňka s.r.o.	196,-	2	392,-
Ložisko SKF 6209 2Z	Hoňka s.r.o.	418,-	1	418,-
Pojistná matice KM6, pojistná podložka MB6, pojistné kroužky DIN 471 30 a DIN 472 60	Hoňka s.r.o.	210,-	1	210,-
Spojovací materiál	FASTENERS CZ a.s.	930,-	1	930,-

Pokračování cenového rozpisu na další straně.

PŘÍLOHA A: CENOVÝ ROZPIS POLOŽEK

Název položky	Dodavatel	Cena za položku	Ks.	Cena
Nakupované polotovary				
Duralové tyče a kulatina	ALMS spol. s r.o.	750,-	1	750,-
PA6	TRIBON s.r.o.	450,-	1	450,-
Dodatečný nákup dílů				
Šneková převodovka Tramec XA-40-80-V6-H18	MOTOR-GEAR a.s.	4 500,-	1	4 500,-
Eliptické zrcátko BBE2-E02	Thorlabs	3 800,-	2	7 800,-
Celková cena				181 473,-

Ceny jsou uvedeny v Kč včetně DPH v zákonné výši.
