VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

ÚPRAVA NÁHLEDOVÉHO MODULU SESTAVY LIBS
MODIFICATION OF LIBS SYSTEM SAMPLE VIEW MODULE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Zdeněk Hrabal
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Michal Brada
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav fyzikálního inženýrství
Student:	**Zdeněk Hrabal**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Michal Brada**
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Úprava náhledového modulu sestavy LIBS

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na začátku analýzy metodou spektroskopie laserem buzeného plazmatu (LIBS) se provádí výběr místa analýzy a zaostření ablačního laseru na povrch vzorku. K tomuto účelu slouží náhledový modul. Tvoří jej náhledová kamera s objektivem a do optické osy je naveden přes polopropustné zrcadlo laserový svazek. Při použití zrcadla, které odráží v oblasti 532 nm (dáno vlnovou délkou použitého laseru), dochází ke zhoršení kvality obrazu zaznamenaného kamerou. Předmětem práce je návrh úprav náhledového modulu, které povedou ke zlepšení kvality pozorovaného obrazu.

Cíle bakalářské práce:

Cílem této práce je úprava náhledového modulu umístěného na sestavě LIBS, která povede ke zlepšení kvality obrazu.

Student se v rámci práce seznámí se základy metody LIBS a se základní instrumentací používanou v Laboratoři laserové spektroskopie. V rámci rešerše nastuduje nejen konstrukční řešení náhledů v sestavách pro analýzu metodou LIBS, ale také konstrukce charakteristické pro mikroskopy či další systémy kombinující více optických větví. Na základě rešerše a analýzy problematiky provede návrh několika variant řešení náhledového modulu. Vybranou variantu pak rozpracuje na úroveň výrobní technické dokumentace. Práce je zakončena sestavením a ověřením funkčnosti modulu.

Seznam literatury:

NOVOTNÝ, J. et al. A versatile interaction chamber for laser-based spectroscopic applications, with the emphasis on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. Spectrochimica Acta Part B, 2014, vol. 101, 11, s. 149-154. DOI:10.1016/j.sab.2014.08.004.

MIZIOLEK, Andrzej W., Vincenzo PALLESCHI a Israel SCHECHTER. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS): fundamentals and applications. 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, 620 s. : il., grafy. ISBN 0-521-85274-9.

GLÉZL, Š., et al. Presná mechanika. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1992, 720 s. Edícia strojárskej literatúry. ISBN 80-050-0972-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 18. 11. 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT 9

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá úpravou náhledového modulu pro interakční komoru v sestavě LIBS. Má za cíl inovovat současnou konstrukci. Tato inovace se týká především zlepšení obrazové kvality, bezpečnosti a zvýšení modularity náhledového modulu. Je vypracována rešerše a několik koncepčních návrhů, na základě kterých je následně vytvořen podrobný konstrukční návrh. Je zajištěna výroba součástí tohoto konstrukčního řešení a jeho následné testování a porovnání se současným stavem. Návrh i výkresová dokumentace, potřebná k výrobě, je vytvořena v aplikaci Autodesk Inventor 2015.

Klíčová slova

Náhledový modul, Sci-trace, interakční komora, sklopné zrcátko, LIBS, optomechanika

Anotation

This Bachelor's thesis deals with modification of a sample view module in a LIBS (Laser-induced breakdown spectroscopy) interaction chamber. The main goal of the thesis is innovation of current design. Several conceptual designs which eliminate main drawback of the current sample view module are developed. Final design is based on the analysis of the conceptual designs and research which were described in the Bachelor's thesis. All components were manufactured and functional prototype was tested. Design and drawings of the parts were created using Autodesk Inventor 2015 CAD application.

Keywords

Sample view module, Sci-trace, interaction chamber, LIBS, flip mirror mount, optomechanics

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Brady, a že veškerá použitá literatura je uvedena v seznamu zdrojů.

Zdeněk Hrabal

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Michalu Bradovi za vedení a odbornou kritiku při řešení této bakalářské práce. Dále pak Ing. Janu Novotnému, Ph.D. za návrh optické soustavy a také členům výzkumné skupiny laserové spektroskopie za jejich cenné rady a poznatky.

Obsah

1 Úvod 1
2 Přehled současného stavu poznání 2
2.1 Spektroskopie laserem buzeného plazmatu 2
2.2 Sci-Trace 2
2.2.1 Interakční komora 3
2.3 Sklopná zrcátka 4
2.3.1 Sklopná zrcátka ve fotoaparátech 4
2.3.2 Newport 8892-K-M 5
2.3.3 Owis KSHM 40 6
2.4 Elektrické pohony 7
2.4.1 Modelářské servomotory 7
2.4.2 Krokové motory 8
3 Analýza současného stavu a cíle práce 10
3.1 Primární optika 10
3.2 Nedostatky současného stavu 11
3.2.1 Cíle práce 12
4 Návrh a zhodnocení variant řešení 13
4.1 Koncepty uspořádání náhledového systému 13
4.1.1 Koncept s jedním zrcátkem 13
4.1.2 Koncept s jedním zrcátkem a kupovaným sklopným držákem 14
4.1.3 Koncept se dvěma zrcátky 14
4.2 Varianty sklopného zrcátka 15
4.2.1 Varianta s vačkou 15
4.2.2 Varianta s přehazovačem 16
4.2.3 Varianta s pákou 17
4.3 Zhodnocení a porovnání variant 18
5 Konstrukční návrh 20
5.1 Návrh optické soustavy 21

5.2 Uložení sklopného držáku 23
5.3 Návrh přehazovacího mechanismu 24
5.4 Návrh pohonu 26
5.5 Dynamická simulace mechanismu 27
5.6 Volba materiálů a technologie výroby 29
5.7 Výroba a ekonomické zhodnocení 29
6 Realizace prototypu 31
6.1 Sestavení prototypu a test mechanických funkcí 31
6.2 Test rychlosti sklápění 32
6.3 Test optické soustavy a porovnání se současným stavem 33
7 Závěr 35
8 Bibliografie 36
9 Seznam obrázků 39
10 Seznam tabulek 40
11 Seznam použitých zkratek a symbolů 41
12 Seznam příloh 42

1 Úvod

V dnešní době, kdy se čím dál tím častěji hovoří o přicházející čtvrté průmyslové revoluci (též nazývané Průmysl 4.0) [1], se neustále zvyšuje poptávka po možnostech, jak zkvalitnit, zefektivnit a hlavně zlevnit výrobní proces produktů. Jedna z oblastí výrobního procesu je vstupní a výstupní kontrola kvality, která často zahrnuje kontrolu chemického složení. V automobilovém průmyslu se např. zkoumá složení povlakových vrstev. V geologii se analyzuje složení hornin. Plastikářský průmysl vyžaduje analýzu chemického složení plastových výlisků apod. Automatizace výroby si proto žádá vývoj metod, které by splňovaly přísné požadavky moderního výrobního procesu.

Spektroskopie laserem buzeného plazmatu, neboli LIBS (Laser-induced breakdown spectroscopy) je moderní metoda atomové emisní spektroskopie, která umožňuje analyzovat látky všech skupenství pomocí laseru. Od ostatních metod se vyznačuje především rychlou analýzou, možností detekovat i lehké prvky a také tím, že není nutné nijak zvlášť připravovat vzorek před měřením. Metoda navíc umožňuje měření na dálku (úspěšné testy proběhly na vzdálenost až 180 m [2]). Přístroj LIBS tak může být součástí výrobní linky a provádět prvkovou analýzu přímo v provozu, což naznačuje velký potenciál této metody pro budoucnost v průmyslovém využití.

V současné době si metoda LIBS žádá intenzivní výzkum, který je umocněn rychlým vývojem laserové techniky. S tím souvisí i vývoj přístrojů, které jsou určeny převážně k výzkumu a rozvoji metody LIBS. Jedním z nich je přístroj Sci-Trace, který je používán v laboratoři laserové spektroskopie na Ústav fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně. Součástí přístroje Sci-Trace je interakční komora, která je vakuově těsná, a proto umožňuje měření v různých prostředích (vakuum, atmosféra různých planet atp.). Celý přístroj je zároveň modulární, takže umožňuje použití široké škály rozličných typů přístrojů a modulů, které přístroji propůjčují variabilitu měření. Např. měření technikou *double-pulse* LIBS (použití dvou laserů), *liquid* LIBS (analýza tekutin) atd.

Tato bakalářská práce se zabývá inovací přístroje Sci-Trace. Konkrétně úpravou náhledového modulu, který povede k výraznému zlepšení obrazové kvality, bezpečnosti a zvýšení modularity.

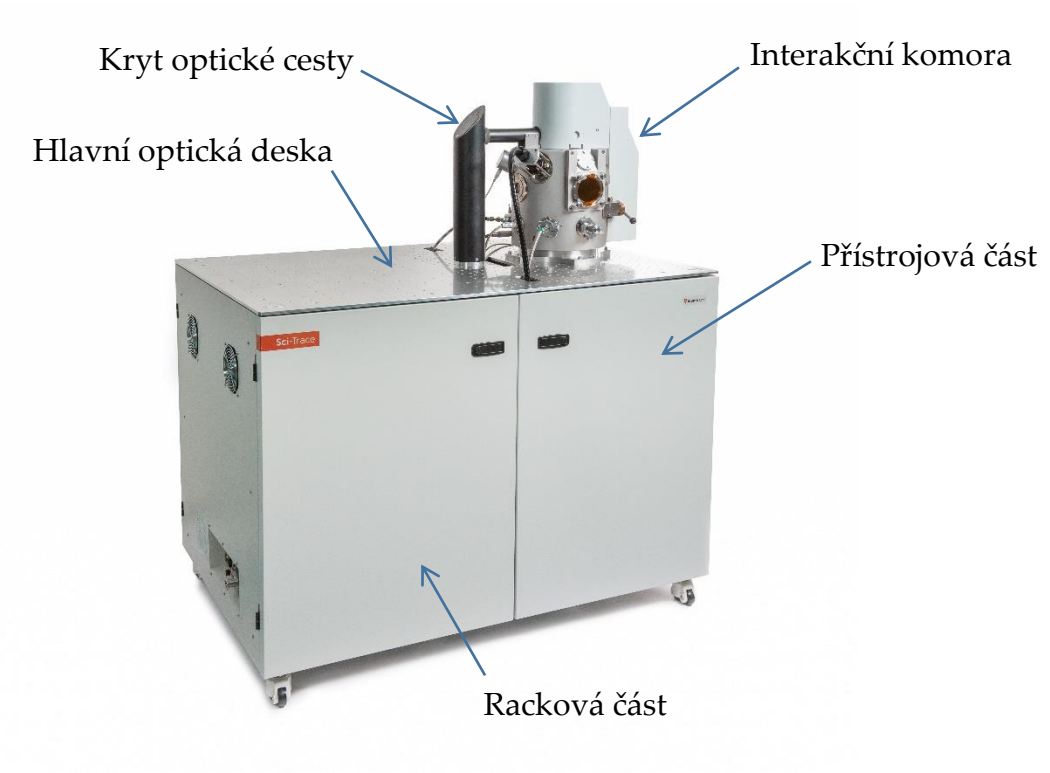
2 Přehled současného stavu poznání

2.1 Spektroskopie laserem buzeného plazmatu

Spektroskopie laserem buzeného plazmatu, neboli LIBS, je moderní analytická metoda atomové emisní spektroskopie, která využívá laserového záření, o vysoké intenzitě, k indukování mikroplazmatu na povrchu vzorku. Touto metodou je možné analyzovat látky pevného, kapalného i plynného skupenství v různém prostředí (např. v atmosférickém tlaku, ve vakuu, ve vodě, v atmosféře jiných planet apod.). [3]
Základ této metody tvoří pulsní laser, který generuje laserový puls v jednotkách až stovkách mJ. Pro většinu aplikací se používá diodami, nebo flash lampou pumpovaný laser typu Nd:YAG. Důležitou vlastností použitého laseru je vlnová délka jeho svazku. Při analýze metodou LIBS se nejčastěji používají vlnové délky 532 nm (zelená) a 1064 nm (infračervené záření). Dalším významným faktorem je energie pulsu a hlavně intenzita záření zaostřeného laserového svazku na povrchu vzorku. Ta dosahuje řádů $GW \cdot cm^{-2}$. [4]
Díky tak vysoké intenzitě dochází k rychlému ohřátí a následnému odpaření, atomizaci a ionizaci malého množství zkoumaného materiálu. Tím vzniká mikroplazma produkující intenzivní záření. V určité fázi průběhu existence mikroplazmatu je sběrnou optikou sesbíráno toto záření a následně navedeno do spektrometru. Ten záření zpracuje a výsledky se vyhodnotí na počítači v podobě grafu závislosti intenzity záření na jeho vlnové délce (spektrum záření). Z analýzy tohoto spektra lze nalézt spektrální čáry, které indikují přítomnost konkrétních prvků ve zkoumaném materiálu. Metoda LIBS umožňuje jak kvalitativní, tak kvantitativní analýzu složení látek. [3]

2.2 Sci-Trace

Sci-Trace (viz. obr. 1) je přístroj používaný na ÚFI FSI VUT na měření vzorků pomocí metody LIBS.



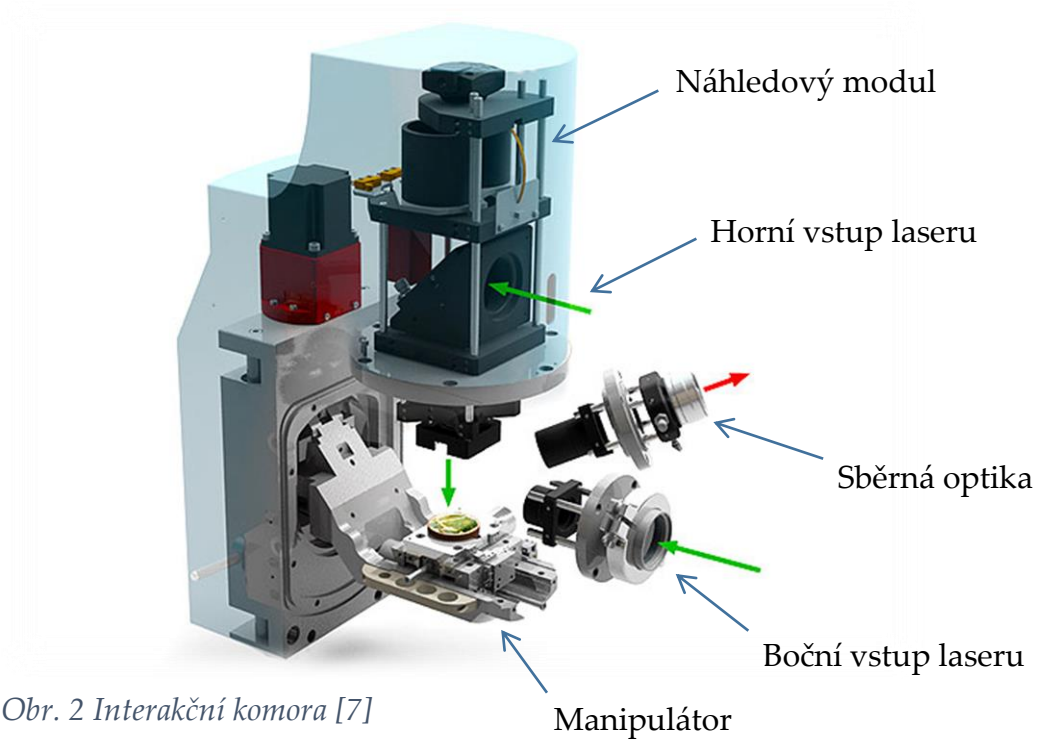
Obr. 1 Sci-Trace [5]

Vnitřek přístroje je rozdělen na dvě části. Na „rackovou“ a přístrojovou. V „rackové“ části je mechanická konstrukce pro elektrotechnická zařízení (rack), ve které jsou umístěny všechny ovládací systémy (řídící elektronika, PC, zdroj laseru a vzduchotechnika). V přístrojové části jsou laserová hlava a spektrometr umístěny zvlášť na poličkách. Polička laserové hlavy je zhotovena jako optická deska. Standardně je přístroj v konfiguraci s laserem Quantel CFR400 (Francie) a spektrometrem EMU-120/65 od společnosti Catalina Scientific (USA).
Ostatní optické přístroje můžou být umístěny na hlavní optickou desku, která je na vrchu přístroje, nebo na optickou desku v přístrojové části, na které je umístěna i laserová hlava. Na hlavní optické desce je postavena interakční komora, nebo klecový systém.

2.2.1 Interakční komora

Interakční komora, zobrazena na obr. 2, je modulární systém pro měření metodou LIBS. Tělo komory má několik vstupních portů pro příruby, jejichž osy se protínají přibližně v jednom bodě (ve středu komory). Tyto vstupní porty slouží k upevnění podpůrných přístrojů (modulů) potřebných k měření. Např. náhledový modul, fokusační modul, sběrná optika, sekundární kamera, ofukovací modul, modul odtahu apod. Vzorek se umísťuje do držáku vzorků na manipulátoru, který umožňuje pohyb ve třech osách (XYZ).

Laserový svazek je náhledovým modulem (dále jen NM) odkloněn směrem do komory a fokusačním modulem zaostřen přibližně na její střed. Do tohoto bodu je zároveň zaostřena sběrná optika, která sbírá záření mikroplazmatu. Ostření povrchu vzorku do této pracovní roviny se provádí NM a posuvem manipulátoru v ose Z. Interakční komora je vakuově těsná. Měření může být proto prováděno v různých tlacích (1 – 1300 mbar), nebo v atmosféře různých plynů (He, N_2, CO_2). Může tak být například simulována atmosféra jiných planet. Měření v jiných tlacích a plynech také často zlepšuje výsledky měření. [6]



Obr. 2 Interakční komora [7]

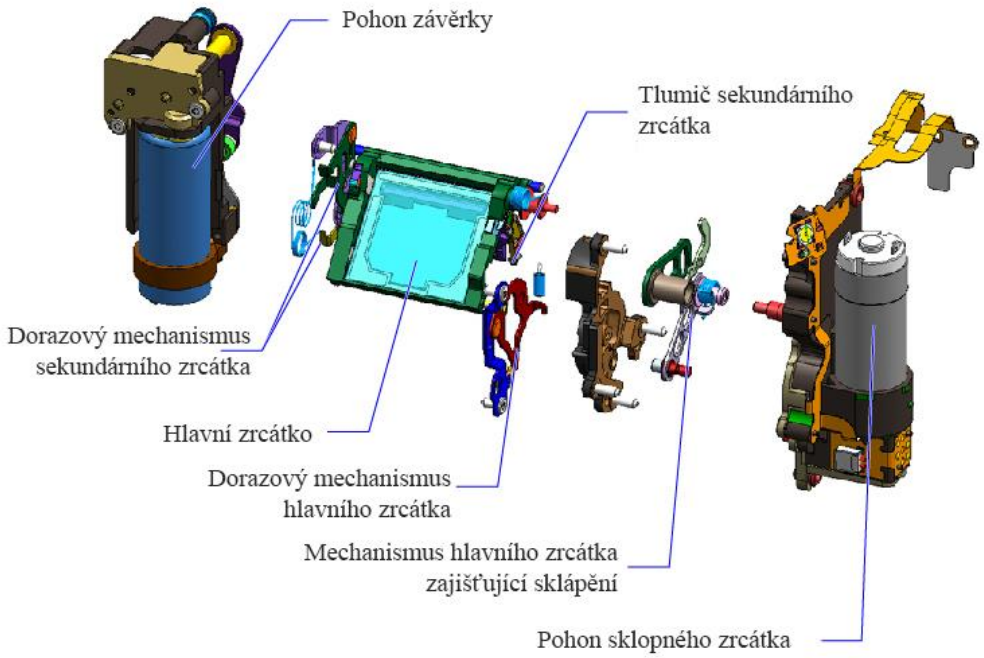
2.3 Sklopná zrcátka

V optomechanice se sklopné držáky zrcátek používají k snadnému odklopení, nebo výměně optických komponent v optické ose. Na trhu jsou v motorizovaném, nebo manuálním provedení. Hojné využitý mají sklopná zrcátka v jednookých zrcadlovkách, kde slouží k odrážení světla do hledáčku. Sklopná zrcátka se také používají v monochromátorech, kde se využívají ke změně vstupních portů. [8]

2.3.1 Sklopná zrcátka ve fotoaparátech

V jednookých zrcadlovkách se sklopná zrcátka využívají k odrážení světla ze scény do hledáčku.

Při focení se sklopné zrcátko sklopí do horní polohy a po otevření závěrky světlo ze scény dopadá na čip.



Obr. 3 Mechanismus sklopného zrcátka modelu Canon EOS 7D Mark II [9]

Moderní fotoaparáty používají propracovaný systém mechanismu a tlumičů sklopného zrcátka, které jsou navrženy tak, aby minimalizovaly vibrace zrcátka při sklápění.

Tato sklopná zrcátka se vyznačují mimořádnou rychlostí sklápění. Firma Canon u svého modelu EOS 7D Mark II (viz. obr. 3) udává rychlost focení při sériovém snímání 55 ms. To znamená vyfocení cca 10 snímků za sekundu, s přeostřením focené scény. Z toho vyplývá, že rychlost sklopení musí být přibližně 25 ms. [9]

2.3.2 Newport 8892-K-M

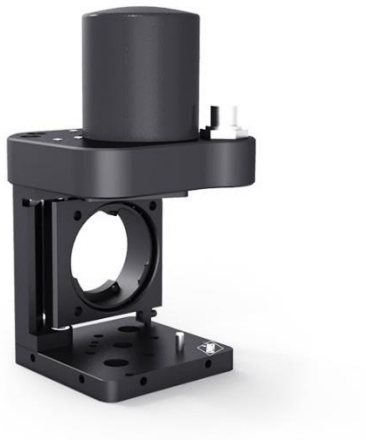
Společnost Newport nabízí několik motorizovaných i manuálních sklopných držáků. Jedním z nich je model 8892-K-M, který je zobrazen na obr. 4. Je určený pro optické prvky o průměru 1“, které jsou umístěny v kinematickém držáku umožňující justáž. Tento model slouží pouze pro odklápění optických prvků z optické osy. Nepodporuje jejich automatickou výměnu.

Obr. 4 Newport 8892-K-M [10]

Sklápění zajišťuje přehazovač poháněný elektrickým pohonem napájeným integrovanou baterkou, nebo externím DC napájením. Ovládání je zajištěno ručním ovladačem, nebo je možné sklopný držák ovládat standardem +5V TTL (tranzistorově-tranzistorová logika). Výrobce udává rychlost sklopení pod 0,5 s. [10]

2.3.3 Owis KSHM 40

Sklopný držák KSHM40 (viz. obr. 5) od firmy Owis je určený pro sklápění zrcátek o průměru 1“ do úhlů 0° a 45° s opakovatelností pod 100 μrad. Umožňuje justáž zrcátka okolo dvou na sebe kolmých os v rozsahu ±1,1°.



Obr. 5 Owis KSHM 40 [11]

Ovládání je za pomoci ovladače NG-E02, který zpracovává vstupní signál v podobě +5V TTL. S tímto ovladačem firma zaručuje dobu sklopení cca 1,5 s. [11]

2.4 Elektrické pohony

2.4.1 Modelářské servomotory

Tímto servomotorem je myšlen pohon s DC motorem a převodovkou, který má zpětnou vazbu a je ovládaný PWM (*Pulse Width Modulation)* signálem. Typický modelářský servomotor je zobrazen na obr. 6

Obr. 6 RC servomotor Hitech HS-77BB [12]

Hojné využití má tento typ pohonu v robotice a zejména v modelářství, protože jeho konstrukce přináší vysoký moment při nízké hmotnosti a rozměrech. Typicky dosahují jmenovitých momentů od 0,15 N·m při hmotnosti 9 g do 0,67 N·m při hmotnosti 40 g. [13] Další výhodou je nízká cena.

Na výstupní hřídeli je potenciometr, který snímá aktuální polohu natočení. Součástí servomotoru je i řídící elektronika, která zpracovává řídící signál a na základě toho ovládá motor. Podle této řídící elektroniky se servomotory dělí na analogové a digitální. Rozdíl je v rychlosti zpracování signálu řídící elektronikou. Analogové pracuje s frekvencí 30 Hz. Digitální, které májí mikroprocesor, pracuje s frekvencí 300 Hz. Z tohoto důvodu jsou digitální servomotory schopny reagovat na změnu polohy výstupní hřídele (změnu zátěžného momentu) desetkrát rychleji, než servomotory analogové. Díky tomu mají menší mrtvý chod a vyšší hodnoty statického momentu. Díky mikroprocesoru, jsou digitální servomotory programovatelné. Dají se naprogramovat jejich maximální krajní polohy, referenční poloha, rychlost, „failsafe“[1] režim atd. Jedinou nevýhodou oproti analogovým servomotorům je jejich vyšší cena. [14]

Vhodnost materiálu převodů se volí zejména s ohledem na cenu, rázy při provozu a vytíženosti servomotoru. V dnešní době výrobci nabízí servomotory s následujícími druhy materiálů převodů:

[1] “failsafe“ režim v praxi znamená, že po ztrátě řídícího signálu zařízení automaticky přejde do naprogramovaného režimu (např. se servomotor natočí do referenční polohy)

- **Nylonové (plastové) převody** vynikají nízkou váhou a malým opotřebováním. Jsou cenově výhodné. Nevýhodou je malá odolnost vůči rázům a menší pevnost.
- **Kovové převody** mají velkou pevnost a odolnost vůči rázům. Jejich nevýhodou je vyšší váha a menší odolnost proti opotřebení. Cenově jsou o něco dražší, než nylonové převody.
- **Kompozitové převody** jsou nejpevnější a nejodolnější proti opotřebení. Zároveň jsou nejdražší ze všech zmíněných převodů.

Někdy se v převodovkách servomotorů používají kombinace těchto typů převodů. Pastorky bývají nejčastěji kovové a kola potom plastová, či kompozitová. [15]
Výhodou RC servomotorů je jednoduché řízení, které zajišťuje PWM. Řídící elektronika reaguje natočením výstupní hřídele servomotoru na délku pulzu tohoto signálu. Standardně, délka pulzu 1,5 ms znamená střední polohu natočení, 1 ms -90° a 2 ms +90°.
RC servomotory umožňují standardně natáčení výstupního hřídele v rozmezí ±90°. Neumožňují otáčení kolem své osy o 360°, což je hlavní nevýhodou těchto pohonů.

<u>Výhodami modelářských servomotorů jsou:</u>

- Vysoký jmenovitý moment při malých rozměrech a hmotnostech
- Snadné řízení pomocí PWM
- Nízká cena

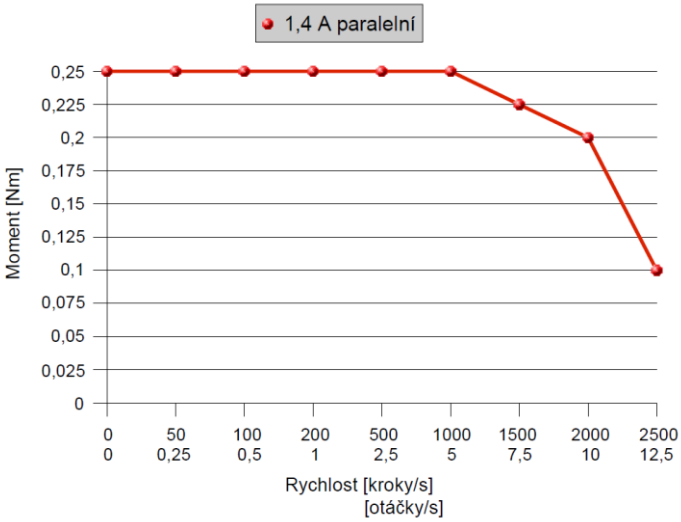
<u>Nevýhody:</u>

- Malý rozsah polohování výstupní hřídele
- Hlučný chod

2.4.2 Krokové motory

Krokový motor je stejnosměrný bezkartáčový synchronní stroj. Úhel natočení výstupní hřídele se ovládá počtem proudových pulzů na vinutí statoru. [16] Počítáním těchto proudových pulzů (počtem kroků) se může ovládat přesná rychlost a poloha natočení výstupní hřídele motoru. Při připojení krokového motoru k řídící jednotce není známá jeho aktuální poloha natočení. To se v praxi řeší kalibrací, kdy se motor natočí do referenční polohy a od této se počítá počet kroků. Další možností je použití absolutních snímačů polohy, které detekují aktuální polohu natočení. Při nulových otáčkách krokového motoru řídící jednotka dokáže držet aktuální polohu napájením příslušných cívek statoru. Charakteristikou každého krokového motoru je

tzv. statický moment. Je to maximální hodnota zátěžného momentu, při kterém motor udrží nulové otáčky.
Specifikace většiny krokových motorů je standardizována asociací NEMA (National Electrical Manufacturers Association) normou NEMA ICS 16 [17]. V obecném povědomí jsou označení jako NEMA 8, NEMA 17 apod. Číslo udává maximální nominální průměr krokového motoru v desetinách palce (např. NEMA 17 má nominální průměr cca 1,7“).



Obr. 7 Momentová charakteristika motoru SX16-0503 od společnosti Microcon s jednotkou CD20M od společnosti Microcon a napájecím napětím 35 V DC [18]

Na obr. 7 je momentová charakteristika krokového motoru velikosti NEMA 17 od společnosti Microcon. Tato charakteristika ukazuje maximální krouticí moment, v závislosti na otáčkách, kterým můžeme zatěžovat výstupní hřídel motoru, aniž by došlo ke ztrátě kroku (vypadnutí rotoru ze synchronních otáček). Na její průběh nemá vliv pouze konstrukce motoru, ale i použitá řídící jednotka a napájecí napětí.

<u>Výhodami krokových motorů jsou:</u>

- Přesné polohování a řízení rychlosti bez nutnosti zpětné vazby
- Spolehlivost a malá náročnost na údržbu
- Tichý chod
- Nízká cena

<u>Nevýhody:</u>

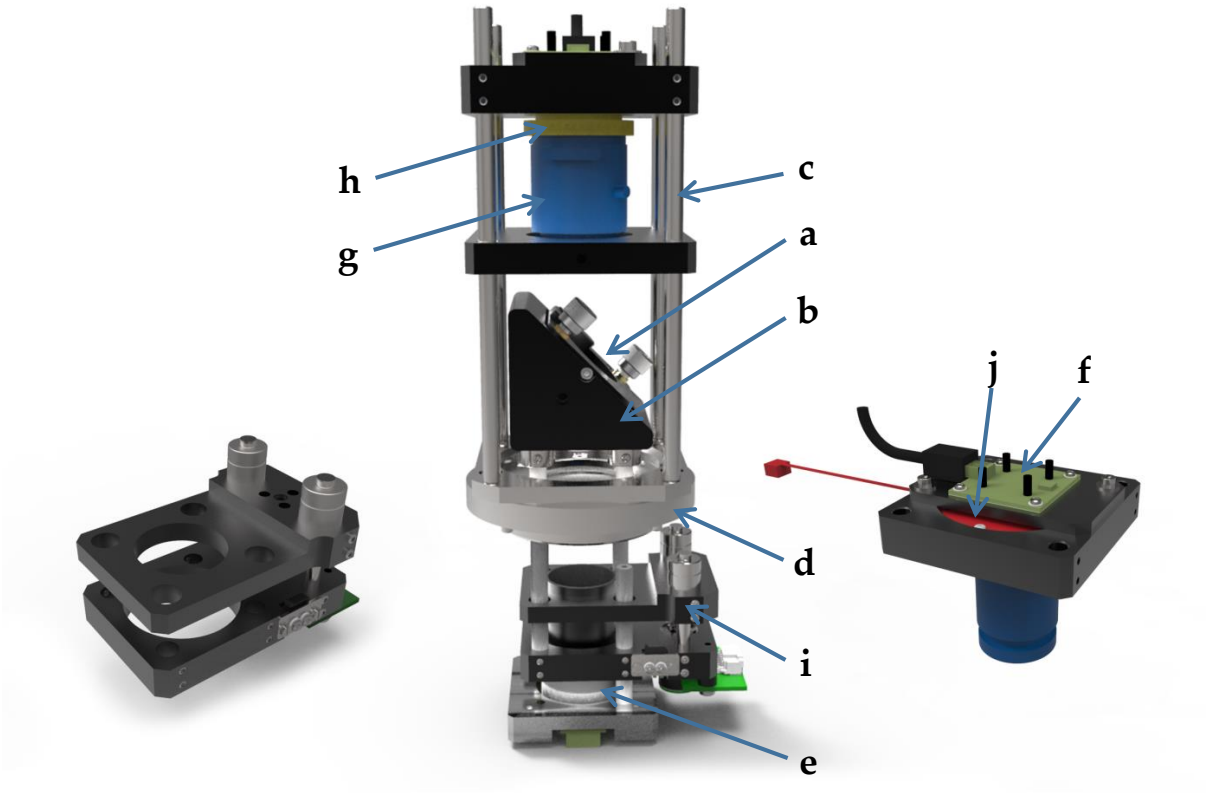
- S rostoucími otáčkami klesá moment
- Nedosahují velkých otáček
- Velké rozměry (v porovnání s modelářskými servomotory při srovnatelných parametrech)

3 Analýza současného stavu a cíle práce

3.1 Primární optika

Pozorování povrchu vzorku v sestavě LIBS je v současné době prováděno pomocí náhledového modulu (dále jen NM), který je součástí primární optiky (zobrazena na obr. 8). Součástí NM je laserové zrcátko (a), které slouží k nasměrování vstupujícího laserového svazku. Jedná se o dielektrické zrcátko speciálně určené pro vysoce intenzivní paprsky laserů typu Nd:YAG, které jsou používány v sestavách LIBS. Zrcátko je umístěno v kinematickém držáku (b) umožňující justáž, který je přes tyče (c) připevněn do příruby (d) komory. Nejčastěji se používá zrcátko *052-5306* od společnosti Eksma Optics. Pro měření se využívá laserového záření s vlnovými délkami 532 nm, nebo 1064 nm.

Laserovým zrcátkem je svazek odražen pod úhlem 90° směrem do komory a následně zaostřen fokusačním modulem, ve kterém je umístěn fokusační objektiv (e), nebo spojná čočka. Nejčastěji se používá objektiv *S6ASS2020/121* s ohniskovou vzdáleností 24,5 mm, nebo planokonvexní kulová čočka s ohniskovou vzdáleností 75 mm.



Obr. 8 Současný stav primární optiky

a – laserové zrcátko NB1-K13, b – kinematický držák, c – tyče, d – příruba,
e – fokusační objektiv, f – kamera Basler Aptina MT9P031,
g – objektiv Computar M5018-MP2, h – extendér Computar EX1,5C,
i – posuv fokusační čočky

Náhled na vzorek je prováděn kamerou skrz laserové zrcátko. To je možné, protože zmíněné dielektrické zrcátko od společnosti Eksma Optics má tu vlastnost, že jím prochází (alespoň částečně) světlo mimo jeho pracovní rozsah vlnových délek. V modulu je použita kamera *Basler Dart daA1280-54uc* (f) s ⅓" CMOS čipem, společně s objektivem *Computar M5018-MP2* (g). Kvůli prodloužení ohniskové vzdálenosti je mezi kamerou a objektivem umístěn extendér *Computar EX1,5C* (h).
Ostření na vzorek se provádí posuvem tříosého manipulátoru v ose Z na základě analýzy obrazu [19]. Z toho důvodu je objektiv zaostřen na nekonečno, neboť při zaostření je zaostřen i laserový svazek na povrch vzorku.
Při měření je někdy výhodné rozostřit laserový svazek. To však není možné provést posuvem manipulátoru, neboť by potom sběrná optika nebyla zaostřena na povrch vzorku. Rozostření se tedy provádí posuvem fokusační čočky (i).
Záření mikroplazmatu v režimu měření je dostatečně intenzivní na poškození čipu v náhledové kameře. Mezi objektivem a kamerou je proto umístěna závěrka (j), která musí být uzavřena během měření.

3.2 Nedostatky současného stavu

Největším současným nedostatkem je zkreslení obrazu pozorovaného vzorku v případě, kdy je použito laserové zrcátko *052-530*. Toto zrcátko odráží světlo o vlnových délkách kolem 532 nm a 1064 nm v úhlu dopadu 45°. Proto je laserový svazek o vlnové délce 532 nm odražen směrem do komory. Světlo o vlnové délce mimo zmíněný rozsah je skrz zrcátko propuštěno, nebo odraženo pouze z části. Tudíž je možné náhledovou kamerou pozorovat povrch vzorku skrz zrcátko. Výsledný obraz je však zkreslený, jelikož dielektrické zrcátko část spektra odrazí, nebo sníží jeho intenzitu. Proto se také obraz z náhledové kamery v současné době zpracovává pouze jako černobílý.
Kinematický držák, ve kterém je dielektrické zrcátko umístěno, vytváří rovněž nežádoucí aperturu, což nepříznivě přispívá k vinětaci. Tato optická vada má potom neblahý vliv na kvalitu obrazu.
Další nedokonalostí současného řešení NM je náchylnost na poškození čipu kamery, v důsledku záření mikroplazmatu. Aby se tomuto poškození předešlo, je před objektivem umístěna závěrka, která je během měření zavřená. Nebezpečí tkví v tom,

že tato závěrka není funkční při odpojené elektronice, která nemusí být zapnutá např. při kalibrací laseru. Pokud není zkontrolováno, zda je při kalibraci laseru zavřená závěrka, tak hrozí nebezpečí zničení kamery. Požadavkem proto je, aby nový NM po odpojení elektroniky automaticky přešel do režimu měření, nebo aby měl možnost ručního ovládání, přičemž v náhledovém režimu musí být kamera bezpečně chráněna.
NM je primárně umístěn na komoře. V některých případech (např.: z důvodu tvaru vzorku) je výhodné provádět náhled z boku komor. To současné řešení neumožňuje. Nový systém by proto měl být univerzální pro použití shora komory i ze strany.
Další požadovanou vlastností je možnost změny orientace laserového zrcátka tak, aby bylo možné přivádět laserový svazek do komory z vícero směrů. Když je NM umístěn na komoře, tak se laserový svazek standardně přivádí ze tří možných směrů.

3.2.1 Cíle práce

Cílem této práce je upravit NM tak, aby byly odstraněny veškeré zmíněné nedostatky současného stavu. Výsledný návrh bude rozpracován na úroveň výrobní dokumentace všech vyráběných součástí a následně zajištěna jejich výroba. Výstupem této práce bude funkční prototyp NM a ověření jeho funkčnosti.

Požadované vlastnosti náhledového modulu:

- Kompatibilita se současnou interakční komorou
- Barevný a nezkreslený obraz
- Ochrana kamery proti poškození
- Automatický přechod do režimu měření po odpojení elektroniky, nebo možnost ručního ovládání
- Možnost místění modulu shora komory i ze strany
- Nastavitelnost vstupu laserového paprsku (tři polohy jsou vůči sobě posunuty o 90°)

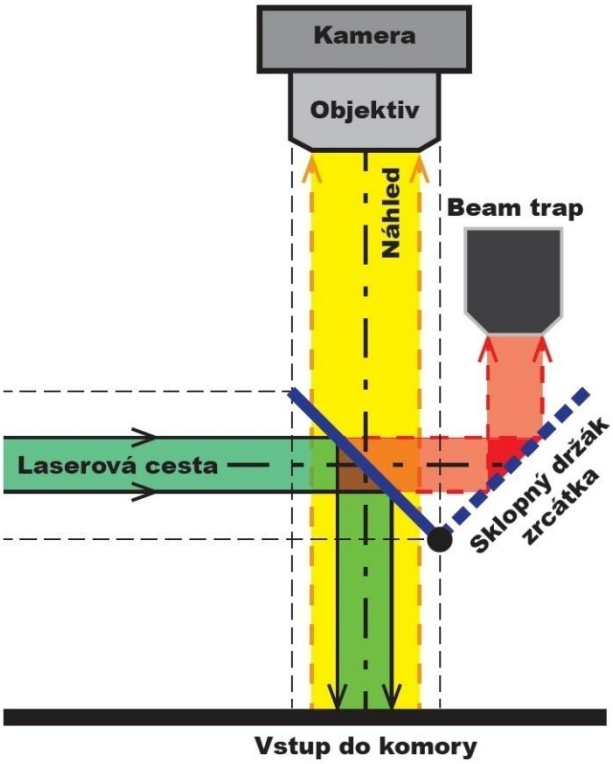
4 Návrh a zhodnocení variant řešení

Z analýzy současného stavu náhledového systému a jeho nedostatků je zřejmé, že je nutno navrhnout nové uspořádání optických komponent, či do současného uspořádání zakomponovat sklopné zrcátko. V následující kapitole je popsáno několik konceptů na nový systém NM, které řeší nedostatky současného stavu. Také jsou zde popsány varianty řešení sklopného držáku zrcátka.

4.1 Koncepty uspořádání náhledového systému

4.1.1 Koncept s jedním zrcátkem

První pojetí náhledového systému vychází ze současného NM. Schéma sestavení je zobrazeno na obr. 9. Náhledová kamera s objektivem je umístěna v ose komory a laserový svazek je odrážen směrem do ní pomocí zrcátka, které je umístěno pod objektivem. Na rozdíl od současného modulu je zrcátko sklopné, což umožní volný průhled při náhledu na vzorek. Aby se předešlo nehodám, které by mohli být způsobeny nechtěným aktivováním laseru, je v režimu náhledu laserový svazek odkláněn do pohlcovače svazků (beam trap).



Obr. 9 Koncept uspořádání s jedním zrcátkem

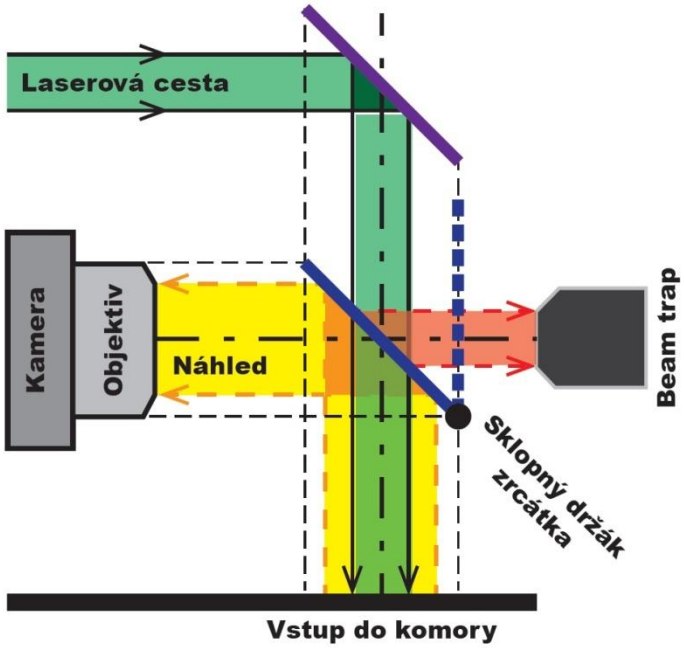
Výhodou takového systému je to, že využívá pouze jedno zrcátko pří umístění NM na komoře, což je nejčastěji používaná poloha. Při umístění NM z boku komory je nutné použít pomocné laserové zrcátko. Jelikož je objektiv s kamerou orientován směrem nahoru, tak zde navíc není omezení z hlediska velikosti objektivu.
Nevýhodou je složitá konstrukce sklopného zrcátka, neboť musí obsahovat jemnou justáž, kterou se navádí laserový paprsek přicházející do komory. Další nevýhodou je požadavek na vysokou opakovatelnost sklápění. Kvůli pohlcovači svazků je navíc vyžadován větší rozsah sklápění (±45°)

4.1.2 Koncept s jedním zrcátkem a kupovaným sklopným držákem

Další koncept využívá sklopný držák KSHM 40 od firmy OWIS pro zrcátka o průměru 1". Použití kupovaného sklopného zrcátka by znamenalo značné zjednodušení návrhu. Konstrukce tohoto držáku však umožnuje sklápění pouze v rozmezí 0° až 45°. Pokud by došlo v náhledovém režimu k nechtěnému zapnutí laseru, zrcátko by laserový svazek odráželo zpět do laseru, což by mohlo způsobit jeho zničení. Eliminace tohoto nebezpečí by vyžadovala zakomponování závěrky, která by takovým nehodám zabraňovala. To by však znamenalo zdražení a zkomplikování konstrukce. Přesto by NM nemusel být zcela bezpečný, neboť by při poruše závěrky, či vypnuté řídící elektronice, mohlo dojít k nehodám.

4.1.3 Koncept se dvěma zrcátky

Třetí koncept využívá v případě, že je NM umístěn na komoře, dvou zrcátek (Náhledového a Laserového). Schéma sestavení je zobrazeno na obr. 10. Náhledové zrcátko, umístěné těsně nad komorou, je sklopné a odráží světlo přicházející z komory, směrem do kamery s objektivem. Laserové zrcátko, je v justovatelném držáku, umístěno nad náhledovým zrcátkem a odráží laserový svazek směrem do komory ve chvíli, kdy je náhledové zrcátko sklopené.



Obr. 10 Koncept uspořádání se dvěma zrcátky

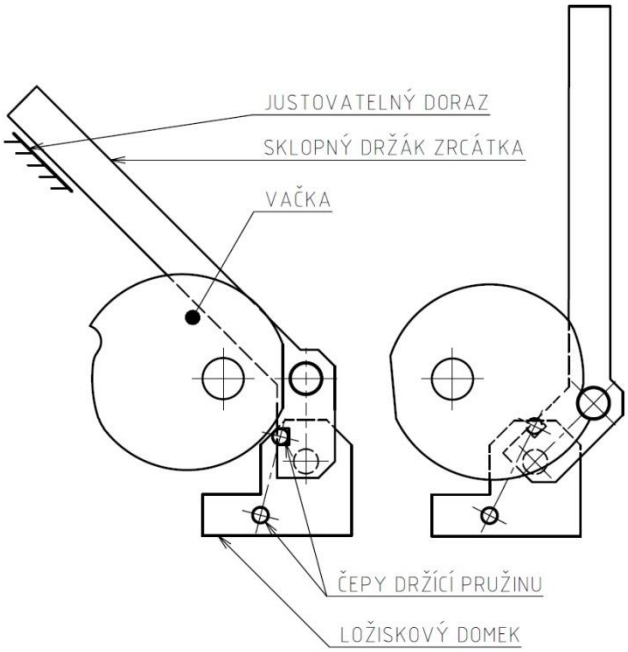
Při nechtěném zapnutí laseru, v náhledovém režimu, je laserový svazek zrcátkem odkloněn do pohlcovače svazků, nebo je pohlcen přímo zrcátkem. Díky tomu je tento koncept bezpečný a znemožňuje laserovému svazku ohrozit kameru, či jiné zařízení.
V případě umístění NM na boku komory je laserové zrcátko odděláno a laserový svazek je naváděn přímo skrz NM.
Výhodou je jednodušší konstrukce a návrh sklopného zrcátka. Náhledové zrcátko totiž nevyžaduje justáž, protože správná poloha sklopení je dána nastavením dorazů a vzájemnou polohou součástí NM. Laserové zrcátko je umístěno v kupovaném nastavitelném držáku.
Nevýhodou tohoto konceptu je omezení z hlediska velikosti objektivu a kamery. Ty totiž sahají do strany, a proto je jejich velikost omezena prostorem nad komorou. Oproti ostatním konceptům je nevýhodou nutnost použití dvou zrcátek v primárně používaném umístění NM na komoře.

4.2 Varianty sklopného zrcátka

4.2.1 Varianta s vačkou

Funkce této varianty je znázorněna na obr. 11. Odklopení zrcátka zajišťuje vačka, která má na svém největším průměru drážku, do které zapadne čep sklopného držáku. Poloha sklopného držáku při sklopení je dána mechanickým nastavitelným dorazem. Proti tomuto dorazu je držák přitlačován tažnou pružinou. Vačka je tvarovaná tak,

aby sklápění bylo co nejplynulejší. Díky tomu nedochází k velkým rázům na zrcátko, což je výhodou.
Nevýhodou této varianty je složitější návrh mechaniky, neboť by konstrukce správného tvaru vačky pravděpodobně vyžadovala komplexnější výpočty a simulace. Další nevýhodou je problematické zakomponování ručního ovládání, protože poloha sklopného držáku je dána pouze polohou vačky, která je ovládána automaticky elektrickým pohonem. Nebylo by tedy snadné navrhnout celý systém tak, aby byla vačka ovládána jak automaticky, tak ručně. Z hlediska životnosti by vačka rovněž kladla větší nároky na materiál, ze kterého by byla vyrobena.

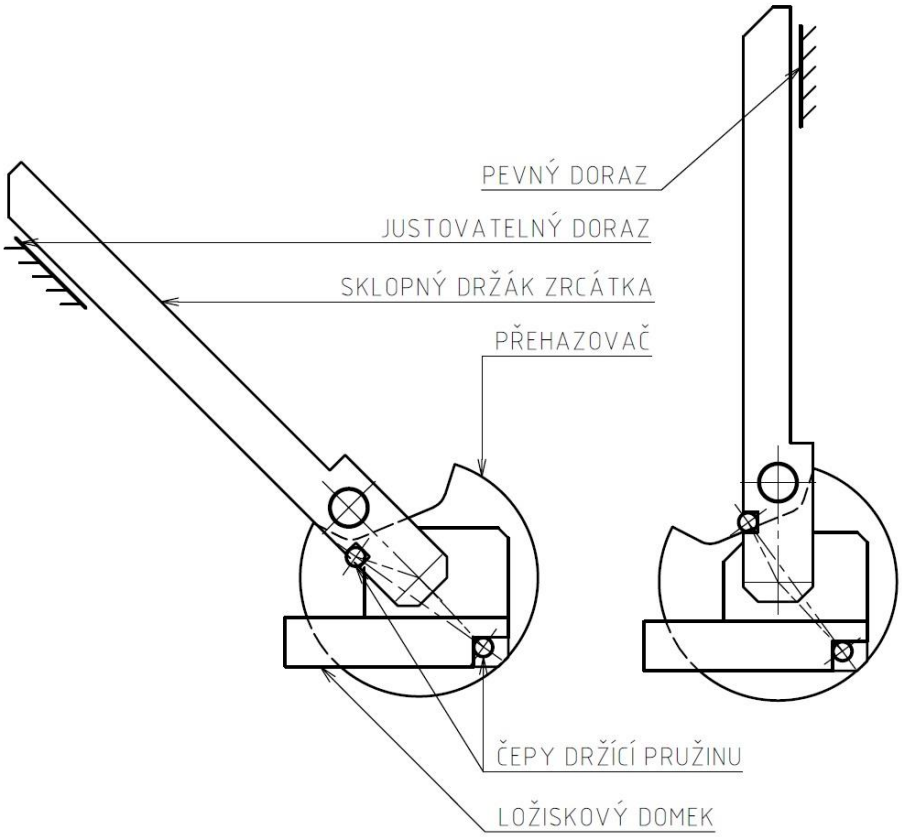


Obr. 11 Varianta mechanismu s vačkou

4.2.2 Varianta s přehazovačem

Automatické překlápění je zajištěno přehazovačem. Sklopný držák je přitahován tažnou pružinou k nastavitelnému dorazu. V průběhu sklápění se dostane do metastabilní polohy, kdy se mění směr momentu od síly pružiny. Po překročení této polohy se držák překlopí do pozice měření a zarazí se o pevný doraz. K překonání této metastabilní pozice slouží přehazovač poháněný automaticky elektrickým pohonem. Výhodou této varianty je snadné zakomponování ručního ovládání, protože přehazovač je tvarován tak, aby v jeho referenční poloze bylo umožněno sklopnému držáku volný pohyb (viz obr. 12). Tento držák potom může být snadno manuálně překlopen. Další výhodou je jednodušší návrh mechaniky, jelikož poloha zrcátka je dána pouze dorazy. Na tvar a materiál přehazovače proto nejsou kladeny žádné větší nároky.

Nevýhodou jsou větší rázy na zrcátko.



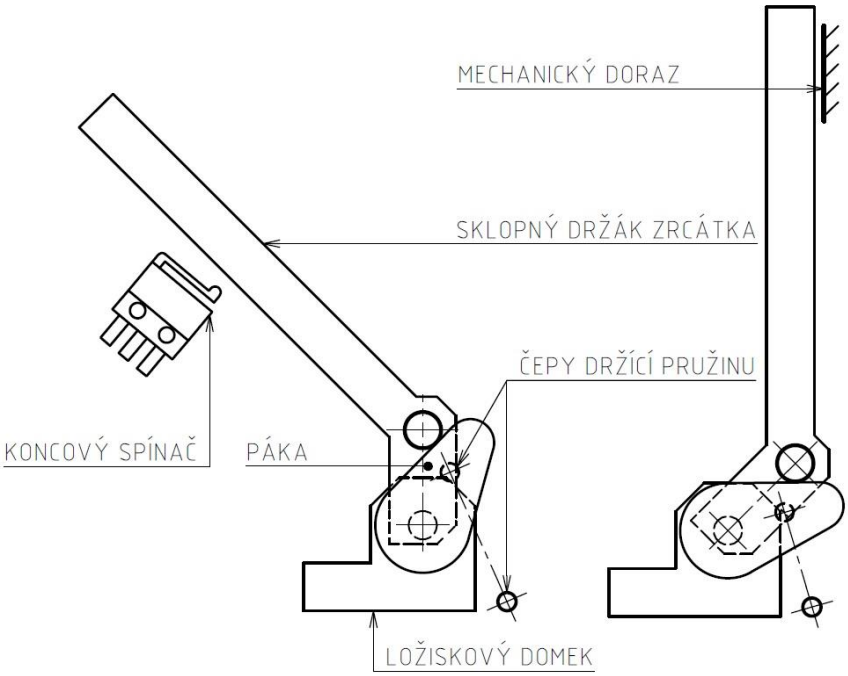
Obr. 12 Varianta mechanismu s přehazovačem

4.2.3 Varianta s pákou

Úhel naklonění je zajištěn polohováním pákou poháněnou krokovým motorem (viz obr. 13). Sklopný držák zrcátka nejprve sepne koncový spínač a od něj potom urazí experimentálně zjištěný počet kroků do správné polohy. V této variantě není použit žádný nastavitelný doraz v poloze náhledu. Tažná pružina táhne za sklopný držák, takže krokový motor musí překonávat tuto sílu po celou dobu náhledu. Po odpojení motoru se držák automaticky sklopí do režimu měření.

Výhodou tohoto návrhu je jednoduchá konstrukce a nenáročný návrh mechaniky, protože přesná poloha úhlu natočení v náhledovém režimu je řízena elektronicky. Kvůli tomu také nedochází k velkým rázům na zrcátko.

Nevýhodou jsou velké nároky na přesnost a jmenovitý moment motoru. Rovněž hrozí přehřívání motoru při dlouhém setrvání v náhledovém režimu. Další nevýhodou je menší rychlost sklápění, protože sklopný držák musí urazit delší vzdálenost (nejprve ke koncovému spínači a potom do správné polohy sklopení.)



Obr. 13 Varianta mechanismu s pákou

4.3 Zhodnocení a porovnání variant

Na základě rozboru popsaných variant jsou v následujících tabulkách shrnuty jejich vlastnosti.

Koncepty uspořádání Náhledového modulu	Koncept s jedním zrcátkem	Koncept s jedním zrcátkem a kupovaným sklopným držákem	Koncept se dvěma zrcátky
Složitost uspořádání			
Složitost sklopného držáku			
Bezpečnost			
Cena			

Tab. 1 Varianty sklopného držáku zrcátka

Varianty sklopného držáku zrcátka	Varianta s vačkou	Varianta s přehazovačem	Varianta s pákou
Složitost návrhu mechanismu			
Rázy na zrcátko			
Požadavky na motor			
Ruční ovládání			neobsahuje
Automatické sklopení do režimu měření	neobsahuje	neobsahuje	

Nevyhovující Vyhovující

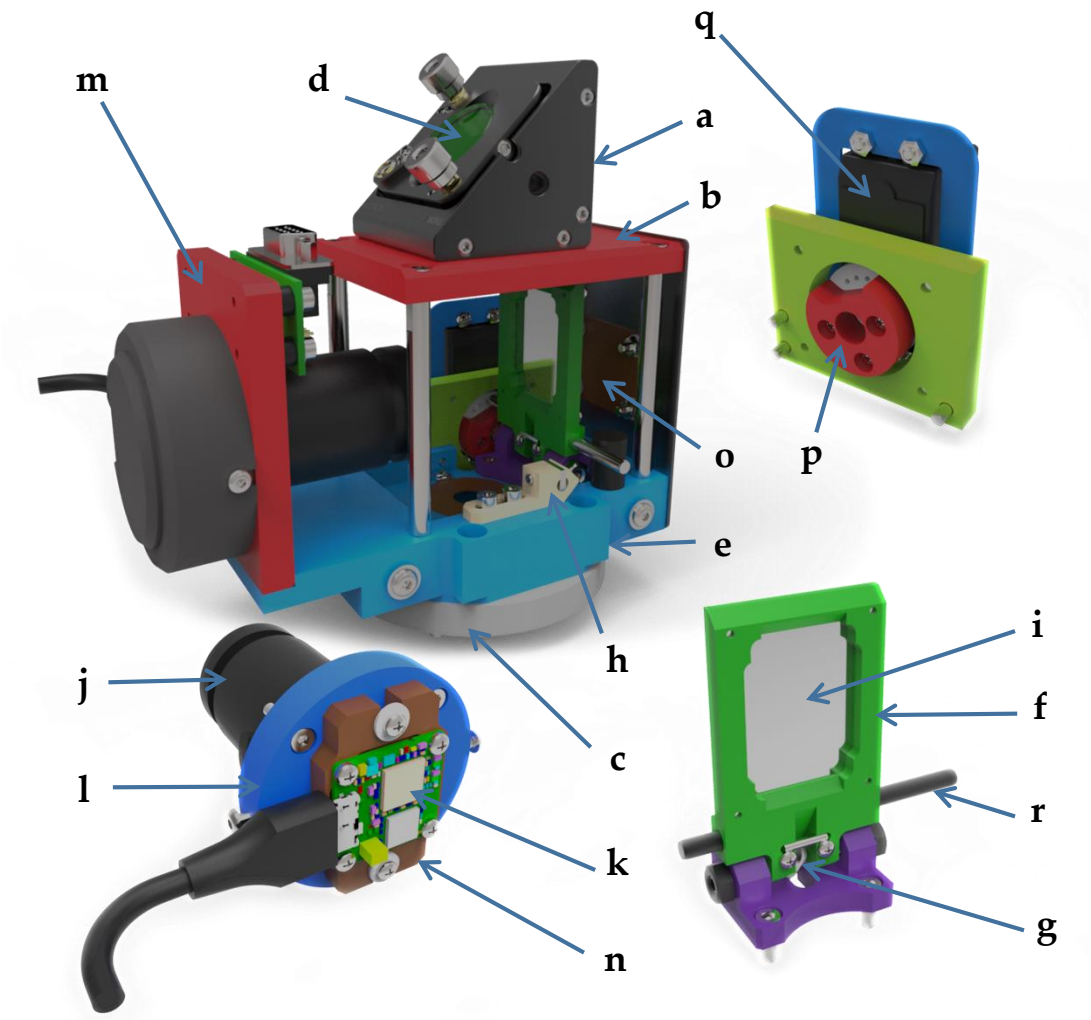
Na základě porovnání všech variant v tab. 1 a tab. 2 je vybrán koncept se dvěma zrcátky společně s variantou s přehazovačem.

Koncept se dvěma zrcátky je zvolen zejména kvůli tomu, že nemá žádné zásadní nedostatky. Na rozdíl od Konceptu s jedním zrcátkem a kupovaným sklopným držákem je mnohem bezpečnější. Oproti konceptu s jedním zrcátkem neobnáší tolik složitý návrh sklopného držáku.

Oproti ostatním mechanismům sklopného držáku zrcátka, varianta s přehazovačem také nemá žádné zásadní nedostatky. Zejména neklade velké požadavky na motor a zakomponování ručního ovládání není z hlediska konstrukce problematické.

5 Konstrukční návrh

Pro zvolený koncept NM je vypracován návrh, výkresová dokumentace a zrealizována výroba. Na obr. 14 je popsána výsledná konstrukce.



Obr. 14 Konstrukční návrh Náhledového modulu

a – kinematický držák KCB1; b – deska kinematického držáku; c – příruba;
d - laserové zrcátko NB1-K13; e – tělo náhledového modulu; f – sklopný držák zrcátka;
g – pružina; h – nastavitelný doraz; i – náhledové zrcátko PFR10-P01;
j – objektiv Computar M5018-MP2; k – čip kamery Basler Aptina MT9P031;
l – příruba objektivu; m – deska kamery; n – držák kamery; o – pohlcovač svazků;
p – přehazovač; q – servomotor HS77BB; r – čep

V režimu měření, laserový paprsek vstupuje do kinematického držáku *KCB1* (a) od firmy Thorlabs. Kinematický držák je umístěn na desce (b), která je slícovaná s tělem náhledového modulu (c) při montáži. Laserový svazek se odrazí od dielektrického

zrcátka *NB1-K13* (d) od firmy Thorlabs, které je umístěno v kinematickém držáku a dále míří skrz přírubu (e), na kterou je přišroubováno tělo náhledového modulu (c).
V náhledovém režimu je Sklopný držák zrcátka (f) sklopený a je přitlačován tažnou pružinou (g) k nastavitelnému dorazu (h). Náhledové zrcátko *PFR10-P01* (i) odráží světlo z komory do objektivu *Computar M5018-MP2* (j) a čipu kamery *Basler Aptina MT9P031* (k). Může tak být prováděn náhled a ostření na vzorek. Poloha objektivu je pevně dána lícováním příruby objektivu (l), Desky kamery (m) a těla náhledového modulu (c). Poloha kamery vůči objektivu se dá nastavit pohybem držáku kamery (n). Zrcátko (i) je oboustranně odrazivé, takže při nechtěném aktivování laseru v náhledovém režimu je laserový svazek odkloněn do pohlcovače svazků (o)
Sklápění sklopného držáku (f) je prováděno automaticky přehazovačem (p), který je poháněn servomotorem *HS-77BB* (q). Když je přehazovač (p) ve své referenční poloze, jde provádět ruční sklápění pomocí čepu (r). Přehazovač (p), při správném natočení, slouží jako zámek proti sklopení ve chvíli, kdy je aktivní laser.

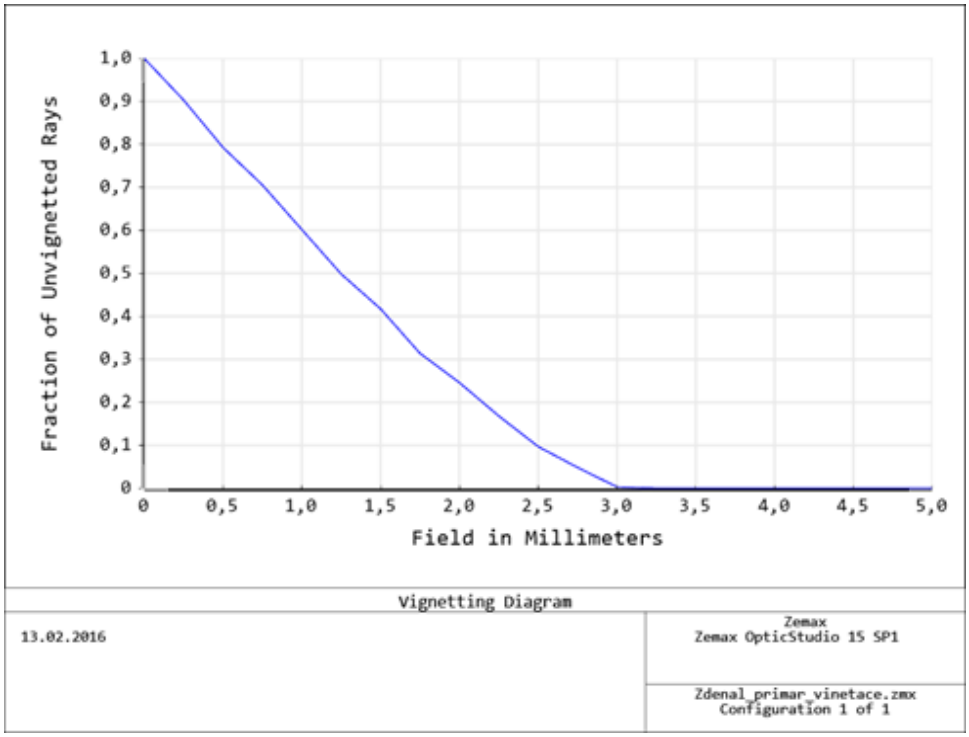
5.1 Návrh optické soustavy

Optická soustava se skládá z fokusačního objektivu, nebo čočky (a), která je součástí fokusačního modulu umístěného v komoře a slouží zároveň k zaostření laserového svazku na vzorek. Tato čočka se volí s ohledem na typ vzorku, způsob měření apod. (Ohnisková vzdálenost fokusační čočky má zejména vliv na tvar indukovaného plazmatu a velikost zanechané stopy laseru na vzorku. [3]) Tudíž se v sestavě používají čočky s různými ohniskovými vzdálenostmi. Výpočet je proveden pouze pro fokusační čočku s ohniskovou vzdáleností $f_f = 20\ mm$.
Součástí samotného NM je sklopné zrcátko (b), které odklání světlo, přicházející z komory, směrem do objektivu *Computar M5018-MP2* (c) s ohniskovou vzdáleností $f_o^{'} = 50\ mm$.
Obraz potom zpracovává kamera *Basler Dart daA1280-54uc* s velikostí čipu 4,8 mm x 3,6 mm (4) (šířka čipu je $v\check{c} = 4{,}8\ mm$). Mezi objektivem a kamerou je umístěn extendér *Computar EX1,5C*, který prodlužuje ohniskovou vzdálenost objektivu 1,5x. Výsledná ohnisková vzdálenost je:

$$f_o = 1{,}5 \cdot f_o^{'} = 75\ mm. \tag{5.1}$$

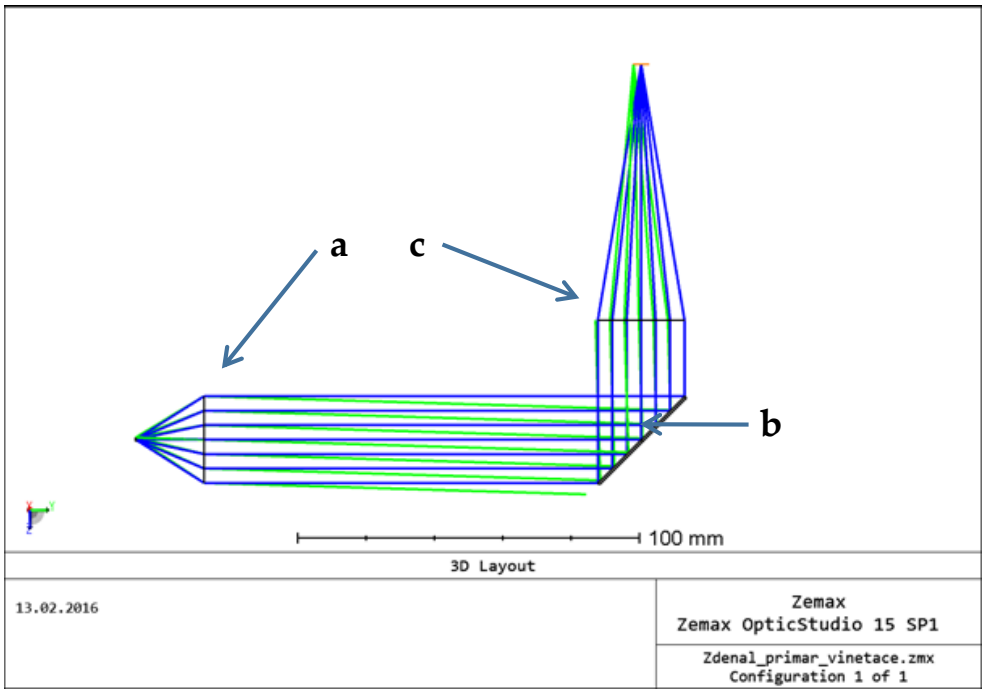
Umístění popsaných optických komponent je navrženo s ohledem na rozměry komory, přičemž je žádoucí, aby vzdálenost mezi vzorkem a náhledovým objektivem byla co nejmenší. Kvůli aperturám zrcátka a objektivu totiž s rostoucí vzdáleností, roste nežádoucí vinětace, která způsobuje pokles intenzity směrem k okrajům obrazu. Tento pokles by v závislosti na požadavcích neměl překročit hodnotu přibližně 10%.

Na základě těchto údajů byl doktorem Janem Novotným proveden výpočet v aplikaci Zemax. Výsledky výpočtu jsou znázorněny na obr. 15 a obr. 16.



Obr. 15 Diagram vinětace

Field in Millimeters – Vzdálenost od středu zorného pole [mm];
Fraction of Unvignetted Rays – Množství nevinětovaných paprsků



Obr. 16 Trasování optické cesty

a – fokusační objektiv; b – náhledové zrcátko; c - objektiv

Velikost zorného pole se vypočte:

$$zp = \frac{f_f \cdot v\check{c}}{f_o} = \frac{20 \cdot 4{,}8}{75} = 1{,}3\ mm. \qquad (5.2)$$

Pro tuto velikost zorného pole lze z grafu na obr. 15 odečíst velikost snížení intenzity cca 22 %, což je více než přípustných 10%. Snížení vinětace by vyžadovalo použití objektivu s delší ohniskovou vzdáleností, což je nepřípustné, neboť by to zmenšilo zorné pole. Další možností je zmenšit vzdálenost mezi vzorkem a objektivem. To však neumožňuje konstrukce komory. Jedinou možností je tedy potlačit vinětaci softwarově.

Z obr. 16 je zřejmé, že pokud je apertura zrcátka větší, než apertura objektivu, tak na vinětaci má největší vliv právě apertura objektivu. Z toho důvodu musí být zrcátko dost velké na to, aby jeho průmět kolmý na optickou osu byl minimálně stejně velký, jako apertura objektivu. Tyto požadavky splňují např. rozměry zrcátka *PFR10-P01* od firmy Thorlabs, které má rozměry 25 mm x 36 mm. Toto zrcátko je postříbřené s ochrannou vrstvou na povrchu a je oboustranně odrazivé. Odrazivost této vrstvy je 97,5 % v rozsahu vlnových délek 450 nm až 20 μm. Dovolená intenzita odráženého záření je výrobcem udaná $E_{emax} = 3\ J \cdot cm^{-2}$. [20]

Je nutno ověřit, zda maximální intenzita laserového svazku nepřekročí tuto dovolenou hodnotu. Maximální energie laserů, které se používají v Laboratoři laserové spektroskopie, je $E_L = 200\ mJ$ a průměr laserového svazku je cca $d_L = 6\ mm$. Intenzita laserového záření potom bude:

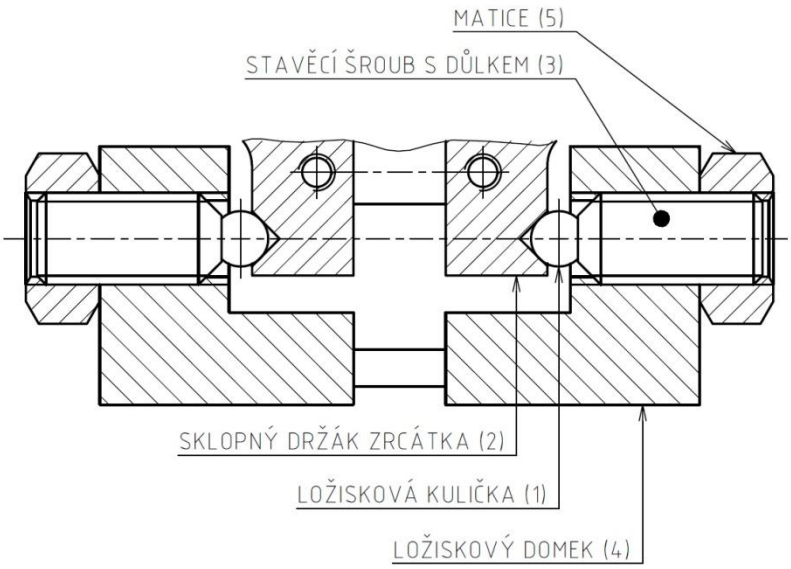
$$E_{eL} = \frac{E_L}{S_L} = \frac{4 \cdot 200}{\pi \cdot {d_L}^2} = 7\ mJ \cdot mm^{-2} = 0{,}7\ J \cdot cm^{-2} < 3\ J \cdot cm^{-2}. \qquad (5.3)$$

Tato velikost intenzity je menší, než dovolená intenzita odráženého záření zrcátka, a proto je pro konstrukční návrh zvoleno toto zrcátko.

5.2 Uložení sklopného držáku

Uložení s kulovou ložiskovou plochou zachycuje radiální i axiální síly a zajišťuje bezvůlový chod. Používá se v případě, kdy záleží více na přesnosti, než na lehkosti chodu. Často se používá ve výkyvných pákách. [21] [22]

Z těchto důvodů je zvolen tento typ uložení, který je zobrazen na obr. 17. Ložiskové kuličky (1) o průměru 3mm jsou uloženy na kuželové ploše sklopného držáku (2) a stavěcího šroubu s důlkem (3). Stavěcími šrouby (3), které jsou zašroubovány do ložiskového domku (4), se šroubováním přitlačí kuličky ke sklopnému držáku (2), čímž se vymezí vůle v uložení. Správná pozice stavěcího šroubu (3) se potom zajistí maticí (5). Při montáži je ložisková kulička (1) zajištěna proti vypadnutí zmagnetizováním stavěcího šroubu (3).

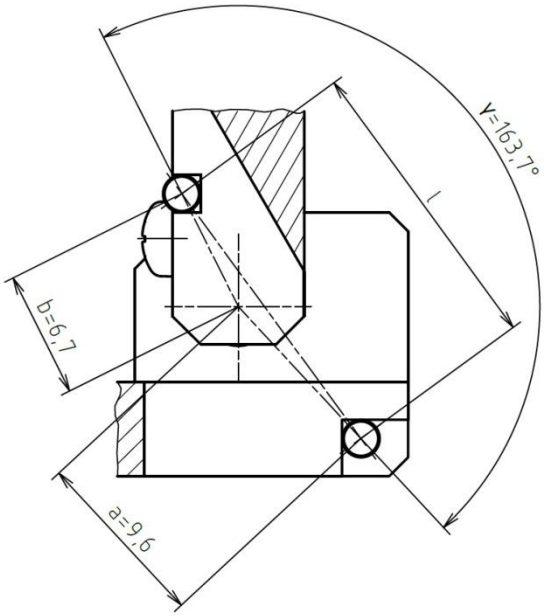


Obr. 17 Uložení sklopného držáku

5.3 Návrh přehazovacího mechanismu

Pružina je navržena tak, aby v režimu náhledu i měření dotlačovala tělo sklopného zrcátka na mechanický doraz. Její umístění v prostoru je takové, aby se sklopný držák zrcátka, dostal přibližně v polovině dráhy sklápění do metastabilní polohy, ve které síla vyvozená touto pružinou změní směr momentu, vůči ose otáčení těla sklopného držáku. Rovněž je žádoucí, aby v režimu náhledu bylo tělo sklopného zrcátka dotlačováno co největší silou, protože pouze v tomto režimu záleží na přesnosti úhlu sklopení. Proto je umístění navrženo tak, aby statický moment v náhledovém režimu byl větší, než v režimu měření.

Vzhledem ke konstrukčním možnostem návrhu, je zvolena tažná pružina od firmy Pružiny Čermák s.r.o. s označením *0,60x4,3x13,8x12,5*. Z konstrukčního návrhu, zobrazeného na obr. 18, jsou odvozeny vztahy pro délku pružiny a statického zátěžného momentu v závislosti na úhlu natočení sklopného držáku (viz příloha A).



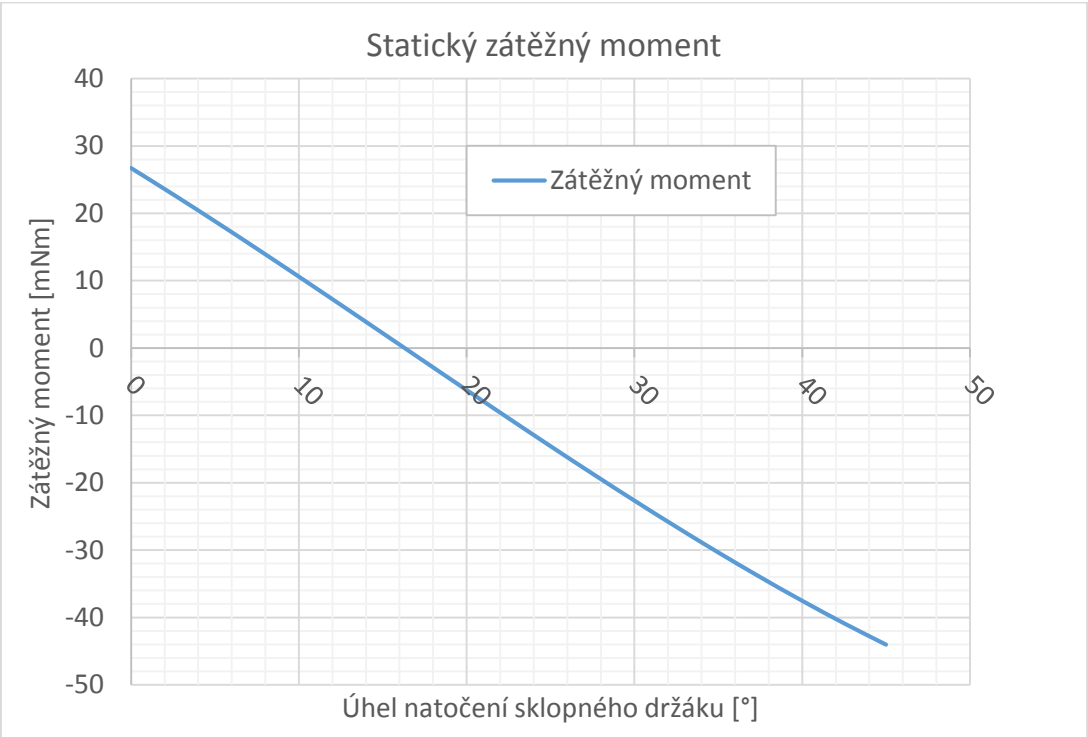
Obr. 18 Mechanismus sklopného držáku

$$l(\alpha) = \sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot cos(\gamma + \alpha)}, \qquad (5.4)$$

kde l je délka pružiny, $a = 9{,}6\ mm$; $b = 6{,}7\ mm$ jsou délky ramen, $\gamma = 163,7°$ je úhel mezi rameny při $\alpha = 0$ a α je úhel natočení sklopného zrcátka.

$$M_s(\alpha) = k_p \cdot (1 - l_0 \cdot l(\alpha)^{-1}) \cdot a \cdot b \cdot sin(\gamma + \alpha), \qquad (5.5)$$

kde $M(\alpha)$je moment k ose rotace těla sklopného zrcátka (totožná s osou pohonu), $k_p = 4{,}06\ N \cdot mm^{-1}$je tuhost pružiny a $l_0 = 10{,}7mm$ je volná délka pružiny mezi osami čepů, které pružinu drží.



Obr. 19 Graf statického zátěžného momentu

Graf na obr. 19 ukazuje závislosti zátěžného momentu od síly pružiny k ose těla sklopného zrcátka v průběhu sklápění. Lze vidět, že velikost momentu, v náhledovém režimu (45°), je z již zmíněných důvodů větší, než v režimu měření.
Z grafu lze rovněž provést alespoň hrubý odhad jmenovitého momentu pohonu. Jsou však zanedbány dynamické vlivy, takže skutečný zátěžný moment bude mnohem větší. Z toho důvodu je v dalších částech práce provedena podrobnější dynamická analýza pro konkrétní pohon.

5.4 Návrh pohonu

Při volbě pohonu jsou uvažovány dvě možnosti v podobě krokového motoru a RC servomotoru.
Krokový motor by byl nejvhodnější volbou z hlediska integrace do řídící elektroniky, jelikož veškeré pohony v sestavě LIBS využívají tento tip pohonu. Navrhnout NM s tímto pohonem by bylo však problematické, protože krokové motory, které dosahují požadovaných jmenovitých momentů, mají příliš velké rozměry pro zakomponování do modulu. V návrhu s krokovým motorem by bylo rovněž nutné počítat s koncovými spínači, které by dávali informaci o aktuální poloze sklopného zrcátka, což je nevýhoda z hlediska konstrukce. Přítomnost koncových spínačů je však výhodná z hlediska řízení, jelikož lze snadno zjistit aktuální polohu sklopného zrcátka.
Druhou možností je RC servomotor. Tyto pohony mají velký jmenovitý moment při malých rozměrech, což je z hlediska konstrukce výhodné. Servomotory se ovládají PWM signálem, a proto je známá aktuální poloha natočení hřídele motoru. Tudíž nejsou nutné koncové spínače, což znamená zjednodušení konstrukce, avšak poloha sklopného zrcátka není známá. Tento problém je řešen tím, že pří zapnutí přístroje, servomotor automaticky sklopí zrcátko do režimu měření, díky čemuž řídící software nepřímo zná polohu zrcátka.
Zejména kvůli menším rozměrům, velkému jmenovitému momentu i ceně je pro návrh pohonu modulu zvolen servomotor.
Z předchozích výpočtů bylo zjištěno, že maximální zátěžný moment je zhruba 40 N·mm, což je moment, kterého dosahují i servomotory nejnižších tříd. Jak již bylo zmíněno, v této hodnotě však nejsou zahrnuty dynamické účinky. Navíc servomotory obecně nejsou příliš odolné vůči prudkým nárazů, které v průběhu sklápění vznikají. Tyto nárazy mohou snížit životnost převodů. Z těchto důvodů je zvolen analogový servomotor *HS-77BB* jehož jmenovitý moment kolem 500 N·mm, je vůči vypočtenému zátěžnému momentu několikanásobně předimenzovaný. Charakteristiky servomotoru jsou zobrazeny v Tab. 2.

Tab. 2 Charakteristiky RC servomotoru HS-77BB

Napájecí napětí	6 V	4,8 V
Rychlost [°·s^{-1}]	430	333
Moment [N·mm]	550	440

5.5 Dynamická simulace mechanismu

Pro výše popsaný mechanismus a servomotor HS-77BB napájený nižším napětím 4,8V je vypracována dynamická analýza v Autodesk Dynamic Simulation 2015.
V simulaci jsou zahrnuty následující parametry pružiny:

- tuhost: $k_p = 4{,}06\ N \cdot mm^{-1}$,
- volná délka pružiny: $l_0 = 13{,}8\ mm$,
- předpětí pružiny: $F_0 = 2\ N$.

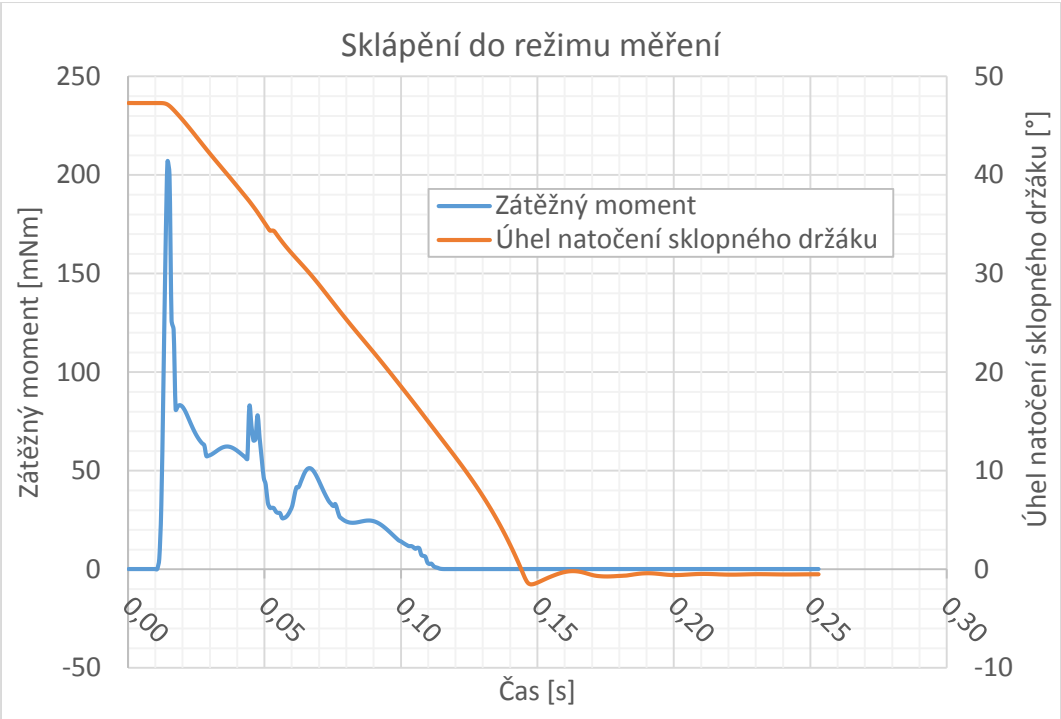
Předpětí pružiny do simulace není možné zadat. Proto je volná délka pružiny přepočítána:

$$l_{0v} = l_0 - \frac{F_0}{k_p} = 13{,}3\ mm, \tag{5.6}$$

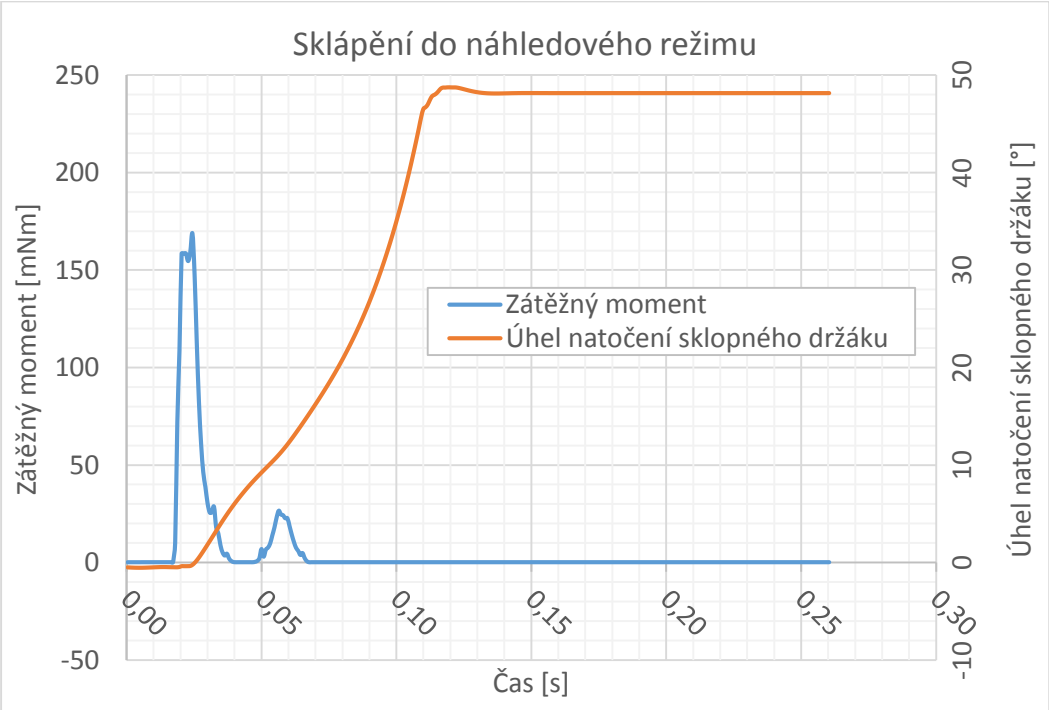
Tlumení pružiny je zanedbáno.
Modelům jsou přiřazeny hustoty materiálů, ze kterých jsou vyrobeny, avšak je zanedbána jejich skutečná tuhost a tlumení. Proto jsou u všech součástí ponechány tyto výchozí hodnoty:

- Tuhost: $k_s = 1000\ N \cdot mm^{-1}$,
- Tlumení: $b_s = 1\ N \cdot s \cdot mm^{-1}$.

Rovněž jsou zanedbány veškeré třecí účinky v uložení.
Je uvažována konfigurace, ve které je NM na komoře. Vektor gravitační síly proto míří kolmo na přírubu komory a má velikost $g = 9{,}81\ ms^{-2}$.
Celá simulace je spuštěna, v časovém intervalu od 0 s do 0,25 s, v konfiguraci, ve které je přehazovač v referenční poloze. V průběhu simulace je zaznamenáván úhel natočení sklopného držáku a zátěžný moment pohonu.



Obr. 20 Graf sklápění do režimu měření



Obr. 21 Graf sklápění do náhledového režimu

Výstupní grafy, závislosti zátěžného momentu a úhlu natočení v čase, pro sklápění v obou směrech, jsou zobrazeny na obr. 20 a obr. 21. Z grafů lze vidět, že maximální hodnoty zátěžného momentu jsou mnohem větší, než vypočtené zátěžné momenty od statické síly pružiny. Tyto maxima však nejsou větší, než jmenovitý moment motoru, a proto je zvolený pohon vyhovující. Z grafů lze odečíst přibližnou dobu sklápění.

Sklápění do režimu měření trvá cca 0,2 s a do náhledového režimu cca 0,15 s. Sklápění do náhledového režimu je rychlejší, protože sklopný držák zrcátka urazí kratší dráhu k metastabilní poloze, než při sklápění do režimu měření (lze vidět v obr. 19). Velikost zátěžného momentu je také menší, protože velikost momentu vyvozeného od síly pružiny má menší hodnotu, než při sklápění do režimu měření. Navíc ke sklopení napomáhá gravitační síla.
Z grafu na obr. 19 lze vidět, že sklopný držák nemá při sklopení do režimu měření přesně 0°. To je způsobeno tuhostí součástí, které se vlivem působící síly od pružiny vzájemně zdeformují. Ze stejného důvodu není úhel sklopení do náhledového režimu na obr. 20 přesně 45°.

5.6 Volba materiálů a technologie výroby

Všechny obráběné díly jsou navrženy tak, aby je bylo možné obrobit konvenčním frézováním, či soustružením. Tělo náhledového modulu, sklopný držák zrcátka, ložiskový domek, deska a příruba kamery, deska kinematického držáku a deska pohonu jsou vyrobeny ze slitiny hliníku *EN AW-6082 T6* a následně saténově eloxovány. Jako materiál přehazovače je zvolen černý *Ertacetal C*, od firmy Tribon, z důvodu snížení setrvačných hmot a rázů při sklápění. Pro výrobu nastavitelného dorazu je rovněž zvolen *Ertacetal C*. V tomto případě byla vhodnost tohoto materiálu zjištěna experimentálně. *Ertacetal C* je elektrický izolant, a proto je z něj vyroben i držák a kryt kamery. Tyče, které spojují spodní a horní polovinu NM, jsou vyrobeny z nerezové oceli *1.4301*.
Veškeré plechy využívají technologii laserového řezání. Primární a sekundární kryt je vyroben ze slitiny hliníku *EN AW-5754 H22* a následně saténově eloxován. Logo na primárním krytu je gravírováno laserovým gravírovacím strojem na Ústavu fyzikálního inženýrství. Držák pohonu je vyřezán z konstrukční oceli *11 321* a lakován komaxitem v odstínu *RAL 9005*. Na výrobu držáku zrcátka je zvolena nerezová ocel *1.4301*.

5.7 Výroba a ekonomické zhodnocení

Výroba většiny obráběných dílů, včetně povrchové úpravy, byla zadána firmě Winston. Některé díly byly vyráběny v dílnách na Ústavu fyzikálního inženýrství. Výroba plechových součástí byla zajištěna firmou Laser technology, která provedla i omílání a lakování některých komponent. Eloxování plechových dílů bylo zadáno firmě DI Industrial. Optomechanické a optické součásti byly zakoupeny od firmy Thorlabs.

Tab. 3 Cena Náhledového modulu

Komponenty	**Cena bez DPH [Kč]**
Obráběné díly (Winston)	26750
Plechové díly (Laser technology)	387
Optika a optomechanika (Thorlabs)	9073
Povrchová úprava (DI Industrial)	363
Kamera (Basler) a objektiv s extendérem (Computar)	8770
Ostatní (spojovací materiál, DPS, servomotor atp.)	878,5
Celkem	46221,5

V Tab. 3 je shrnuta celková cena NM. Prototypová výroba obráběných součástí je finančně velmi náročná, neboť zahrnuje práci technologů, obsluhy obráběcího stroje a v neposlední řadě výstupní kontrolu součásti. Optomechanika, která byla v rámci této bakalářské práce na zakázku vyráběná ve společnosti Winston, navíc klade vysoké nároky na přesnost výroby. Proto je nejdražší položkou z celkové částky cena těchto obráběných dílů. Plechové součásti jsou naopak levné, neboť jejich výroba většinou nevyžaduje složitý technologický postup a nejsou na ně kladeny velké výrobní přesnosti. Významný podíl na celkové částce má i optika a optomechanika zakoupená od firmy Thorlabs.

6 Realizace prototypu

6.1 Sestavení prototypu a test mechanických funkcí

Během montáže prototypu NM se vyskytly menší problémy, které vyžadovaly úpravu některých dílů.

Tyčím, které spojují tělo NM s deskou kinematického držáku, chyběly vyfrézované plošky, které měly sloužit k utáhnutí tyče do těla NM. Tato vada, která vznikla na straně dodavatele, však nebyla nepřekonatelnou překážkou při sestavení, a proto byly tyče použity i v takovém stavu.

V průběhu montáže NM byla nalezena konstrukční chyba hlavního krytu, který nelícoval s desku pohonu. To bylo vyřešeno zbroušením dosedací plochy na hlavním krytu. Další konstrukční chyba vznikla při návrhu uložení čipu kamery s objektivem. Objektiv nebyl ve správné vzdálenosti vůči čipu kamery, což způsobovalo rozostření obrazu. Tato závada byla odstraněna distančním kroužkem umístěným mezi objektivem a přírubou.

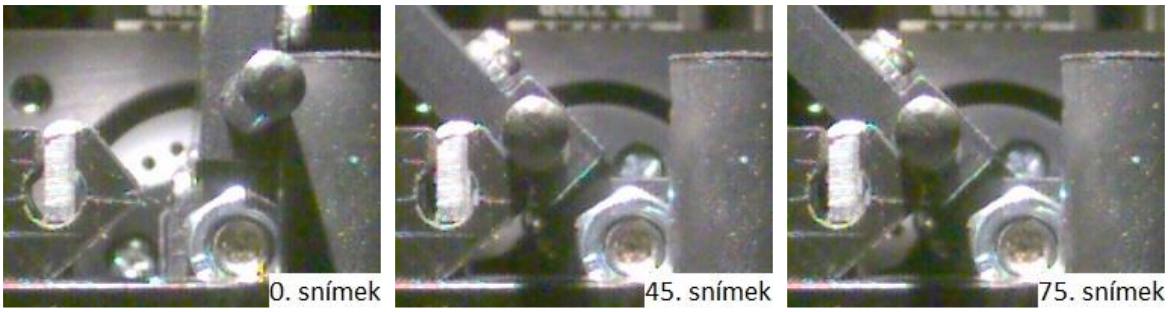
Menší chyba vznikla při objednání stavěcích šroubů s důlkem bez povrchové úpravy (norma DIN 916). Nedopatřením byly objednány nerezové stavěcí šrouby s kuželem (norma DIN 913). Kvůli tomu byl do těchto stavěcích šroubů vysoustružen důlek. Zakoupení nerezových šroubů rovněž zkomplikovalo montáž, neboť nerezová ocel není magnetická a ložisková kulička se tak ke šroubu nepřichytila. Fotka kompletního NM je na obr. 22.

Obr. 22 Sestavený náhledový modul

Po montáži celého NM byl proveden test mechanických funkcí. Ruční překlápění sklopného držáku zrcátka fungovalo bez problému. Stejně tak překlápění automatické, které bylo otestováno provizorní elektronikou pomocí modelářské RC soupravy.

6.2 Test rychlosti sklápění

Tento test byl proveden za účelem ověření rychlosti sklápění, která by měla odpovídat simulaci popsané v části 5.5. Test spočíval v zaznamenání průběhu sklápění pomocí kamery *Basler Dart daA1280-54uc*, která má maximální rozlišení 1920x1080 pixelů. Byl použit objektiv s aperturou 1/3“, jehož ohnisková vzdálenost byla nastavena na 2,8 mm. Aparatura byla umístěna na optický stůl v Laboratoři laserové spektroskopie na ÚFI VUT v Brně společně s NM, který byl nasvícen lampičkou. Servomotor NM byl ovládaný přes systém Arduino a napájen stejnosměrným napětím o velikosti 5 V. Záznam z kamery byl pořízen pomocí aplikace Pylon od výrobce kamery. Kvůli zvýšení počtu snímků za sekundu záznamu (FPS) bylo tímto softwarem omezeno rozlišení záznamu na 250x200 pixelů a expoziční doba snížena na 2500 μs. Tímto se dosáhlo stabilního počtů 300 snímků za sekundu. Vybrané snímky při sklápění do režimu náhledu lze vidět na obr. 23.



Obr. 23 Test rychlosti sklápění do náhledového režimu

Snímek vlevo (0. snímek) zachycuje okamžik, kdy se začíná otáčet přehazovač. Na snímku uprostřed se čep sklopného držáku poprvé dotkne dorazu a na snímku vpravo (75. snímek) je sklopný držák již v klidné, sklopené poloze. Čas od začátku sklápění lze z počtu snímků za sekundu záznamu a příslušného snímku vypočítat následujícím způsobem.

$$t_{45} = \frac{45}{300} = 0{,}15\ s = 150\ ms. \tag{6.1}$$

$$t_{75} = \frac{75}{300} = 0{,}25\ s = 250\ ms. \tag{6.2}$$

Čas natočení sklopného držáku 150 ms je přibližně o 25 ms delší, než vyplývá z grafu na obr. 21. To je pravděpodobně dáno tím, že bylo při simulaci zanedbáno tření. Čas klidové, sklopené polohy sklopného držáku 250 ms je delší o 100 ms. Tuto odchylku zapříčilo zanedbání skutečných tuhostí a tlumení součástí a také již zmíněné tření při simulaci.

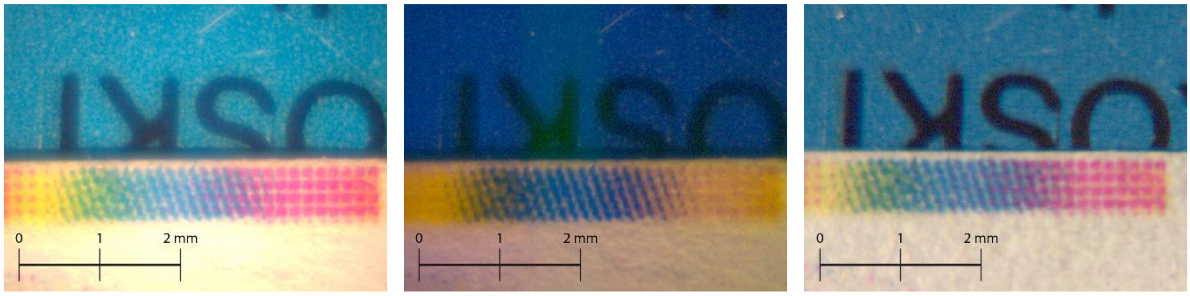
Stejným způsobem byla experimentálně zjištěna rychlost sklápění do režimu měření. Výsledky se shodovaly s měřením rychlosti sklápění do režimu náhledu.

6.3 Test optické soustavy a porovnání se současným stavem

Test optické soustavy NM probíhal v Laboratoři laserové spektroskopie na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně. Pro tyto účely byla v dílně ÚFI FSI VUT v Brně vyrobena provizorní příruba pro montáž současného i upraveného NM. Montáž potřebných modulů a následný test byl proveden na odstavené interakční komoře, ve které chyběl manipulátor s držákem vzorků. Kalibrační obrazec (vzorek), zobrazený na obr. 24, byl proto umístěn do správné polohy podložkami a přesná fokusace byla provedena pohybem fokusační čočky. V rámci experimentu byla použita planokonvexní čočka s ohniskovou vzdáleností 75 mm.

Obr. 24 Kalibrační obrazec (vzorek)

Vzorek byl osvětlen výkonnou lampičkou a následně byl současným NM, ze kterého byl vyjmut kinematický držák s laserovým zrcátkem, pořízen kontrolní snímek vzorku (obrázek vlevo na obr. 25). Následně byl kinematický držák a zrcátko, s označením *052-5306* od firmy Eksma Optics, vráceno zpět a byl pořízen další snímek vzorku (obrázek uprostřed na obr. 25). Poté byl NM vyměněn za nový a po nutné kalibraci, která obnášela nastavení úhlu sklopení a umístění vzorku do správné polohy, byl pořízen snímek z nového NM (obrázek vpravo na obr. 25).



Obr. 25 Porovnání obrazu Náhledového modulu
Vlevo: současný NM bez laserového zrcátka; uprostřed: současný NM s laserovým zrcátkem; vpravo: nový NM (obraz je zrcadlově převrácen).

V obrazu, pořízeného současným NM (obrázek uprostřed), lze vidět značné zkreslení. Laserové zrcátko způsobuje, že v obrazu chybí prakticky celé spektrum zelené a červené barvy a v porovnání s kontrolním snímkem (obrázek vlevo) je značně snížena jeho intenzita. Obraz, pořízený novým NM (obrázek vpravo), je na rozdíl od obrazu současného NM barevně nezkreslený a jeho intenzita se víceméně shoduje s kontrolním snímkem. Tento obraz je však zrcadlově převrácený a proto jej bylo nutné softwarově převrátit.

7 Závěr

V rámci bakalářské práce byly splněny všechny stanovené cíle, které se týkaly úpravy náhledového modulu v sestavě LIBS. Nový náhledový modul (NM) zlepšuje obrazovou kvalitu a chrání čip kamery před poškozením intenzivním zářením mikroplazmatu. Díky modularitě systému, NM umožňuje snadné nastavení pro vstup laserového svazku a připevnění na více přírub (shora, nebo zboku komory)

V rámci řešení práce byl sestaven a otestován prototyp NM. Testování se zabývalo porovnáním obrazu a měřením rychlosti sklápění sklopného držáku zrcátka. Ve výsledcích, popsaných v části 6.3, NM vykazoval výrazné zlepšení obrazové kvality v porovnání s předchozím systémem, což byl hlavní cíl této práce. Rychlost sklápění, vypočtená v části 6.2, byla ověřena zaznamenáním průběhu sklápění sklopného držáku na kameru. Tato rychlost dosahovala hodnoty cca 250 ms. Všechny mechanismy prototypu fyzicky fungovaly přesně podle konstrukčního návrh a jeho vlastnosti se shodovaly s požadavky. Celkové náklady na výrobu prototypu dosáhly částky 46202,- Kč bez DPH.

V současné době je zahájeno rozsáhlejší testování NM. Zejména měření odchylky při sklápění a test opotřebení uložení a životnosti. Poté bude následovat integrace NM do přístroje Sci-Trace, která bude vyžadovat vývoj elektroniky a řídícího softwaru. Po dokončení těchto prací bude probíhat test prototypu NM při plném provozu v přístroji. Další naplánovaný vývoj se bude zabývat implementací koaxiálního osvětlení do NM a zlepšením přesnosti sklápění sklopného držáku zrcátka.

8 Bibliografie

[1] Průmysl 4.0. představuje velkou šanci. *MM spektrum* [online]. 2015, **2015**(11), 42 [cit. 2016-05-12].

[2] ROHWETTER, Ph., K. STELMASZCZYK, L. WÖSTE et al. Filament-induced remote surface ablation for long range laser-induced breakdown spectroscopy operation. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* [online]. 2005, **60**(7-8), 1025-1033 [cit. 2016-05-10]. DOI: 10.1016/j.sab.2005.03.017. ISSN 05848547. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0584854705000893

[3] MIZIOLEK, Andrzej (ed.), Vincenzo PALLESCHI (ed.) a Israel SCHECHTER (ed.). *Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS): fundamentals and applications*. New York: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0521852749.

[4] CREMERS, David a Leon RADZIEMSKI *Handbook of laser-induced breakdown spectroscopy*. 2nd ed. Chichester, West Sussex, U.K.: John Wiley & Sons, Ltd., 2013. ISBN 9781119971122.

[5] *AtomTrace* [online]. Brno: AtomTrace, b.r. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.atomtrace.com/

[6] ASIMELLIS, George, Stephen HAMILTON, Aggelos GIANNOUDAKOS a Michael KOMPITSAS. Controlled inert gas environment for enhanced chlorine and fluorine detection in the visible and near-infrared by laser-induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* [online]. 2005, **60**(7-8), 1132-1139 [cit. 2016-05-11]. DOI: 10.1016/j.sab.2005.05.035. ISSN 05848547. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0584854705001692

[7] NOVOTNÝ, J., M. BRADA, M. PETRILAK, D. PROCHAZKA, K. NOVOTNÝ, A. HRDLIČKA a J. KAISER A versatile interaction chamber for laser-based spectroscopic applications, with the emphasis on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* [online]. 2014, **101**, 149-154 [cit. 2016-05-10]. DOI: 10.1016/j.sab.2014.08.004. ISSN 05848547. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0584854714001773

[8] Charakteristiky monochromátoru MSDD1000. *SOLInstruments* [online]. Minsk: SOLInstruments, b.r. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z:

http://www.solinstruments.com/en/spectroscopy/monochromator-spectrographs/msdd1000/configuration

[9] EOS 7D Mark II: 10FPS high speed continuous shooting and mirror vibration control. *Canon* [online]. Hongkong: Canon, 2014 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: http://www.canon.com.hk/cpx/en/technical/pa_EOS_7D_Mark_II-10FPS_high_speed_continuous_shooting_and_mirror_vibration_control.html

[10] *Motorized flipper Model 8892* [online]. Newport, 2012 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: http://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/800188C_Flipper%20Card.pdf

[11] KSHM 40. *Owis* [online]. Owis, b.r. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: http://www.owis.eu/en/products/optical-components/produktgruppe/optikhalter/produkt/182/productview/Main/

[12] HS-77BB. *HiTech* [online]. USA: HiTech, 2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: http://hitecrcd.com/products/servos/sport-servos/analog-sport-servos/hs-77bb-low-profile-servo/product

[13] Servomotory. *Pololu Robotics and Electronics* [online]. Pololu, b.r. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: https://www.pololu.com/category/143/continuous-rotation-servos

[14] Aktuátory - Serva. *Society of robots* [online]. Society of robots, b.r. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: http://www.societyofrobots.com/actuators_servos.shtml#current

[15] Inside a Servo. *Robot platform* [online]. Robot platform, 2010 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: http://www.robotplatform.com/knowledge/servo/inside_servo.html

[16] BĚLOHOUBEK, Pavel. *Elektrické servopohony, jejich řízení a aplikace I*. Brno: Inženýrské centrum, 1998. ISBN 8090217540.

[17] *NEMA ICS 16*. Rosslyn(Virginia): National Electrical Manufacturers Association, 2001.

[18] *Momentové charakteristiky řady SX16, SX17, SX23* [online]. Microcon, 2015 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: http://microcon.cz/

[19] NOVOTNÝ, Jan. *Návrh systému pro automatické nastavení vzorku do ohniskové vzdálenosti objektivu v sestavě laserové spektroskopie*. Brno, 2007. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Jozef Kaiser, Ph.D.

[20] Protected Silver Mirrors. *Thorlabs* [online]. Thorlabs, b.r. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:

http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=903&pn=PFR10-P01#3848

[21] RICHTER, Otto, Richard VOSS a Fritz KOZER. *Součásti pro jemnou mechaniku*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961, 528 s.

[22] GLÉZL, Štefan, Ivan SLIMÁK a Josef KAMARÁD. *Presná mechanika*. Bratislava: Alfa, 1992. Edícia strojárskej literatúry. ISBN 8005009720.

9 Seznam obrázků

Obr. 1 Sci-Trace [5] 3
Obr. 2 Interakční komora [7] 4
Obr. 3 Mechanismus sklopného zrcátka modelu Canon EOS 7D Mark II [9] 5
Obr. 4 Newport 8892-K-M [10] 6
Obr. 5 Owis KSHM 40 [11] 6
Obr. 6 RC servomotor Hitech HS-77BB [12] 7
Obr. 7 Momentová charakteristika motoru SX16-0503 od společnosti Microcon s jednotkou CD20M od společnosti Microcon a napájecím napětím 35 V DC [18] 9
Obr. 8 Současný stav primární optiky 10
Obr. 9 Koncept uspořádání s jedním zrcátkem 13
Obr. 10 Koncept uspořádání se dvěma zrcátky 15
Obr. 11 Varianta mechanismu s vačkou 16
Obr. 12 Varianta mechanismu s přehazovačem 17
Obr. 13 Varianta mechanismu s pákou 18
Obr. 14 Konstrukční návrh Náhledového modulu 20
Obr. 15 Diagram vinětace 22
Obr. 16 Trasování optické cesty 22
Obr. 17 Uložení sklopného držáku 24
Obr. 18 Mechanismus sklopného držáku 25
Obr. 19 Graf statického zátěžného momentu 25
Obr. 20 Graf sklápění do režimu měření 28
Obr. 21 Graf sklápění do náhledového režimu 28
Obr. 22 Sestavený náhledový modul 32
Obr. 23 Test rychlosti sklápění do náhledového režimu 33
Obr. 24 Kalibrační obrazec (vzorek) 34
Obr. 25 Porovnání obrazu Náhledového modulu 34

10 Seznam tabulek

Tab. 1 Varianty sklopného držáku zrcátka 19
Tab. 2 Charakteristiky RC servomotoru HS-77BB 27
Tab. 3 Cena Náhledového modulu 30

11 Seznam použitých zkratek a symbolů

CMOS		Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
FSI		Fakulta strojního inženýrství
LIBS		Laser-induced breakdown spectroscopy
Nd:YAG		Neodymium–doped Yttrium Aluminium Garnet
NEMA		National Electrical Manufacturers Association
NM		Náhledový modul
PWM		Pulse Width Modulation
RC		radio controlled
TTL		tranzistorově-tranzistorová logika
ÚFI		Ústav fyzikálního inženýrství
VUT		Vysoké učení technické v brně
a	[mm]	délka ramene a
α	[°]	úhel natočení sklopného držáku zrcátka
b	[mm]	délka ramene b
b_s	[N·s·mm^{-1}]	tlumení součásti
f_0	[mm]	ohnisková vzdálenost objektivu s extendérem
f_0	[N]	předpětí pružiny
f_0'	[mm]	ohnisková vzdálenost objektivu
f_f	[mm]	ohnisková vzdálenost fokusační čočky
g	[m·s^{-2}]	gravitační zrychlení
γ	[°]	úhel mezi rameny a a b
k_p	[N·mm^{-1}]	tuhost pružiny
k_s	[N·mm^{-1}]	tuhost součásti
l	[mm]	délka pružiny
l_0	[mm]	volná délka pružiny
l_{0v}	[mm]	výpočtová volná délka pružiny
M_s	[N·mm]	Statický zátěžný moment
zp	[mm]	velikost zorného pole

12 Seznam příloh

Příloha A: Odvození výpočetních vztahů

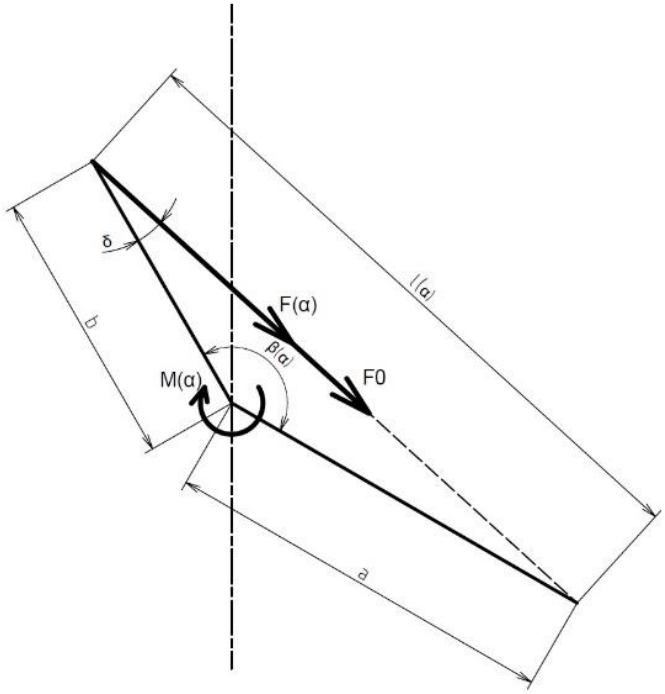
Příloha B: Výkresová dokumentace

Název výkresu	**Číslo výkresu**	**Formát**
Náhledový modul - sklopné zrcátko	V-00982	A2
Sestava pohonu	V-00992	A3
Deska pohonu	V-00993	A4
Přehazovač	V-00994	A4
Držák servomotoru HS-77BB	V-01011	A4
Sklopné zrcátko	V-00916	A3
Tělo sklopného zrcátka	V-00917	A3
Držák zrcátka	V-00973	A4

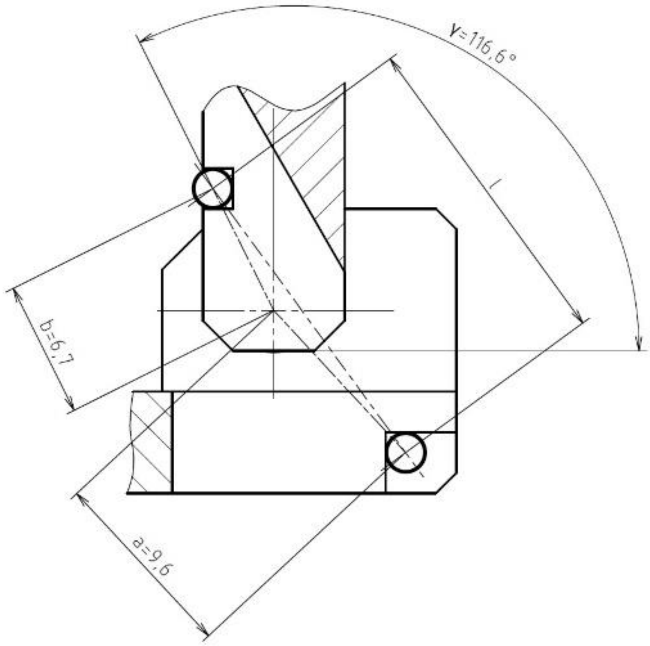
Příloha C: CD

- Pdf verze textu bakalářského projektu
- Výkresová dokumentace
- Výsledky experimentů (záznam videa a snímky vzorku)

Příloha A: Odvození výpočetních vztahů



Obr. 1 Působící síly na sklopný držák



Obr. 2 Konstrukce sklopného držáku

- Z kosinové věty, obr.1 a obr.2 lze odvodit:

$$l(\alpha)^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos\big(\beta(\alpha)\big)$$

$$\beta(\alpha) = \alpha + \gamma$$

- γ je parametr, který je dán geometrií sklopného držáku
- α je úhel natočení sklopného držáku $\alpha \in (0°; 45°)$

$$l(\alpha) = \sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos(\gamma + \alpha)}$$

- Síla od pružiny bez předpětí:

$$F(\alpha) = k \cdot (l(\alpha) - l_0)$$

- Celková síla pružiny:

$$F_c = F(\alpha) + F_0 = k \cdot (l(\alpha) - l_0) + F_0$$

- Složka síly, která vytváří moment k ose rotace sklopného držáku:

$$F_{cx} = F_c \cdot \sin(\delta)$$

- Ze sinovy věty:

$$\frac{a}{\sin(\delta)} = \frac{l(\alpha)}{\sin(\beta(\alpha))} \rightarrow \sin(\delta) = \frac{a \cdot \sin(\beta(\alpha))}{l(\alpha)}$$

$$F_{cx} = F_c \cdot \frac{a \cdot \sin(\beta(\alpha))}{l(\alpha)}$$

- Zátěžný moment

$$M_z = F_{cx} \cdot b = F_c \cdot \frac{a \cdot b \cdot \sin(\beta(\alpha))}{l(\alpha)}$$

$$M_z = (k \cdot (l(\alpha) - l_0) + F_0) \cdot \frac{a \cdot b \cdot \sin(\beta(\alpha))}{l(\alpha)}$$