



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

POLOHOVACÍ ZAŘÍZENÍ PRO SVĚTELNÝ MIKROSKOP

POSITIONING DEVICE FOR LIGHT MICROSCOPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Materna

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Jan Materna
Studijní program:	Mechatronika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

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:

Polohovací zařízení pro světelný mikroskop

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Motivací práce je potřeba uvést sledování vzorek mikroskopem do vodorovné polohy spolu s čočkou mikroskopu a moci s ním otáčet kolem svislé osy. V současné době se takové specifické zařízení na trhu nevyskytuje. Pořízovat již motorizovaný goniometr a rotační osu by bylo příliš nákladné. Navrhnout a zhotovit celé zařízení zas příliš časově náročné. Nabízí se tedy přistoupit na kompromis a pořídit již zhotovený, manuální goniometr spolu s rotační plošinou a navrhnout k nim konstrukci a motorizaci.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše možných provedení
Návrh a realizace prototypu polohovacího zařízení
Návrh motorizace a řízení polohovacího zařízení
Návrh GUI – uživatelského prostředí pro snadnou obsluhu polohovacího zařízení

Seznam doporučené literatury:

1. GREPL, R.: Modelování mechatronických systémů v MATLAB/SimMechanics. BEN-technická literatura, 2007
2. SMITH, W. Steven. Digital signal processing: scientist and engineer's guide. California: California Technical Publishing, 1997. ISBN 0966017633.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem a realizací prototypu zařízení umožňujícího dvouosý náklon a rotaci vzorku zkoumaného invertovaným světelným mikroskopem. Toto zařízení je dále uzpůsobeno vzdálenému ovládání. Práce se nejdříve zaměřuje na rešerši možných řešení a následně i na návrh celého zařízení včetně motorizace, ovládání, napájení nebo práci se vzorky.

Klíčová slova

goniometrická platforma, rotační platforma, krokový motor, grafické rozhraní, koncový spínač, pohybová soustava

ABSTRACT

The thesis deals with the design and implementation of a device prototype enabling biaxial tilt and rotation of a sample examined with an inverted light microscope. This device is also adapted for remote control. The work first focuses on the research of possible solutions and then on the design of the entire device, including motorization, control, power supply or working with samples.

Key words

goniometric platform, rotary platform, stepper motor, graphic interface, limit switch, motion system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MATERNA, J. *Polohovací zařízení pro světelný mikroskop*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2024. 55 s., Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Radek Vlach, PhD.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Polohovací zařízení pro světelný mikroskop** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jan Materna

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Formulace zadání.....	12
2 Rešerše.....	14
2.1 Komerční možnosti	14
3 Návrh zařízení.....	18
3.1 Umístění a propojení motorů s goniometrickou a rotační platformou	19
3.2 Krokové motory.....	21
3.2.1 Ovládání motorů	23
3.3 Koncové spínače.....	27
3.4 Další konstrukční prvky	28
3.4.1 Držáky a přípravky pro vzorky.....	28
3.4.2 Držáky koncových spínačů.....	30
3.4.3 Výměna vzorků	33
3.4.4 Spojení pohybové soustavy s mikroskopem.....	33
4 Zhotovený prototyp polohovacího zařízení	36
ZÁVĚR.....	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
SEZNAM OBRÁZKŮ	42
SEZNAM PŘÍLOH	43

ÚVOD

V oblasti vědeckého výzkumu a průmyslové výroby je přesné polohování vzorků pozorovaných mikroskopem jedním z hlavních aspektů pro dosažení kvalitních výsledků. Přesné nastavení polohy vzorků umožňuje detailní analýzu struktur a vlastností materiálů, což je nezbytné pro mnoho aplikací, od biologického výzkumu až po kontrolu kvality v průmyslových procesech. Tradiční manuální metody polohování však často narážejí na omezení v přesnosti a opakovatelnosti, což může vést ke snížení kvality získaných dat.

Automatizace a motorizace polohovacích zařízení přináší významná vylepšení. Doplnění ovládání o krokové motory umožňuje jemnější a pohodlnější nastavení polohy s vysokou opakovatelností, což je klíčové pro moderní výzkumné aplikace. Díky tomu lze dosáhnout vyšší přesnosti a efektivity v pozorováních vzorků. Automatizovaná polohovací zařízení se stále více uplatňují v laboratořích a průmyslových provozech, kde je důležité dosáhnout přesných výsledků s minimálním zásahem uživatele.

Tato práce se bude zabývat nejprve rešerší komerčních polohovacích zařízení, následně návrhem a realizací prototypu polohovacího zařízení, které umožní rotaci a náklon ve dvou osách pro vzorky zkoumané světelným mikroskopem. V rámci návrhu budou použity manuální komponenty od firmy Thorlabs, konkrétně goniometrická a rotační platforma, které budou následně motorizovány pomocí krokových motorů a mikrokontroleru Arduino Uno. Ovládání bude zajištěno pomocí uživatelského grafického rozhraní. Práce se taktéž zaměří na návrh držáků vzorků, jejich výměnu a začlenění celé soustavy do polohovacího stolku mikroskopu. Dále bude navrženo umístění koncových spínačů a taktéž ploch, které budou snímače snímat, to zajistí bezpečný provoz celého zařízení.

Cílem této práce bude vytvořit funkční a cenově dostupný prototyp polohovacího zařízení, které umožní opakovatelné, přesnější a pohodlnější polohování vzorků světelného mikroskopu, než jak je tomu u manuálních variant. To přispěje ke zlepšení kvality a efektivity mikroskopických analýz.

1 Formulace zadání

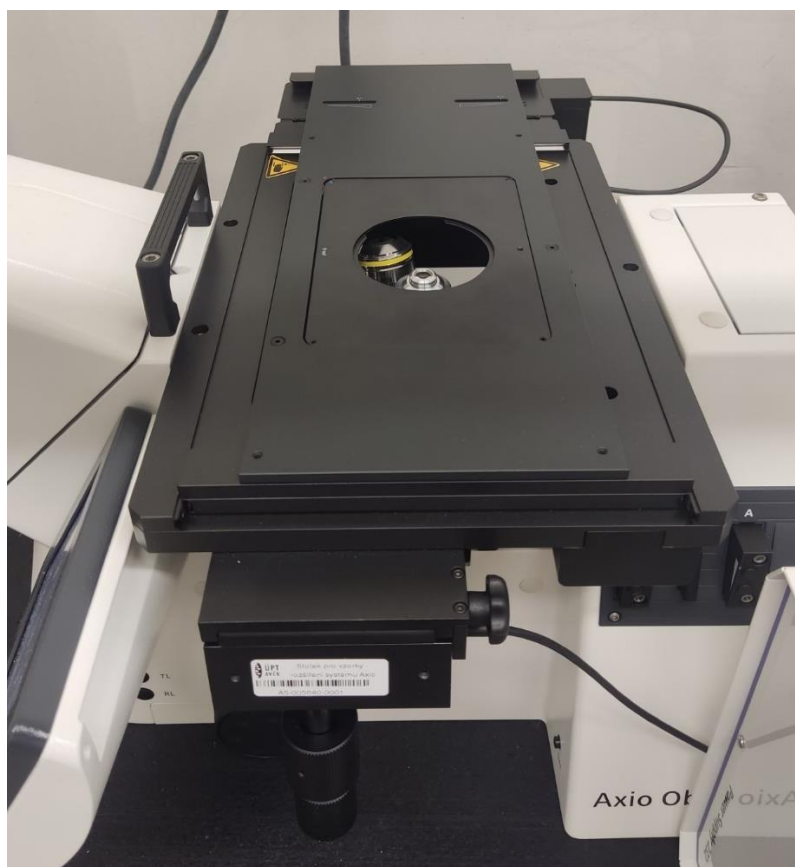
Zadavatelem práce je Ústav přístrojové techniky AV ČR, konkrétně skupina zabývající se mikroskopií pro materiálové vědy. Tato skupina používá pro zkoumání vzorků světelný mikroskop ZEISS Axio Observer for Materials (Obrázek 1).



Obrázek 1 - ZEISS Axio Observer for Materials[1]

Jedná se o invertovaný světelný mikroskop zaměřený na metalografii. Invertovaný, znamená, že jeho objektivy pozorují vzorky zespodu. To je pro zadání celé práce podstatná informace. Mikroskop je dále doplněn o motorizovaný polohovací stolek umožňující pohyb v ose X a Y (Obrázek 2).

Zadáním pro tuto práci je navrhnout rozšíření tohoto stolku, které umožní rotaci a náklony ve dvou osách zkoumaného vzorku. Zároveň je požadováno, aby tyto pohyby byly motorizovány a bylo možné je ovládat vzdáleně.



Obrázek 2 – Polohovací stolek X, Y světelného mikroskopu ZEISS



Obrázek 3 – Vyjímatelná vložka polohovacího stolku pro světelný mikroskop ZEISS

2 Rešerše

2.1 Komerční možnosti

Hexapod, také nazývaný jako Stewart platform, je paralelní mechanismus, který se používá k polohování a stabilizaci. Skládá se ze dvou plošin, jedné pevné a druhé pohyblivé, které jsou spojeny šesti nebo třemi pohyblivými nohama uloženými v kloubech. Často se používá kardanový spoj, jak je možno vidět na Obrázek 4. Nohy se prodlužují a zkracují většinou pomocí hydraulického nebo elektrického aktuátoru. Tímto způsobem získává pohyblivá plošina šest stupňů volnosti. Těmi jsou posuny v osách X, Y, Z a rotace kolem nich.

Polohování hexapodu funguje na principu změny délek jednotlivých noh. Ty musí pracovat závisle na sobě, jinak by mohlo dojít ke kolizi pohybů. Pokud jsou jednotlivé pohyby správně synchronizovány, jedná se o velmi přesné a stabilní zařízení.

Používá se jak v robotice, simulátorech letadel, tak i v lékařství.[2]



Obrázek 4 - Hexapod od firmy Physik Instrumente[3]

Tato zařízení nabízí některé firmy specializované na pokročilé a precizní technologická zařízení, jako třeba Physik Instrumente, Aerotech a ALIO Industries. Ale právě proto, že se jedná o takto specializované firmy, jsou tato zařízení poměrně drahá. Jejich cena se pohybuje v řádech tisíců dolarů.

Výhodou produktů od těchto firem bývá možnost vlastní specifikace. Může se jednat o rozměry, dráhy pohybů, nosnost nebo přesnost. To vše se pak projevuje právě v ceně produktu.

K hexapodu je také většinou potřeba zakoupit ovládací prvky neboli drivery. Drivery jsou zařízení sloužící k řízení a napájení pohyblivých částí zařízení. Zajišťují především komunikaci mezi počítačem a hexapodem. Umožňují uživateli řídit jednotlivé pohyby, nastavovat rychlosti a další parametry pohybu. Nutnost zakoupení driveru tedy ještě navyšuje cenu celého zařízení.

Další zvažovanou možností bylo spojení motorizovaného goniometru a rotační plošiny.

Goniometr, goniometrická platforma či plošina je zařízení, které umožňuje náklon v jedné nebo ve více osách v prostoru. Účelem tohoto zařízení je přesné otáčení, naklánění a vyrovnávání ploch. Tyto pohybové platformy bývají navrženy tak, aby mohly poskytnout

vysokou opakovatelnost a stabilitu. To především z důvodu častého použití v optice, mikroskopii, montážních operacích a dalších odvětvích.[4]



Obrázek 5 - Motorizovaný goniometr od firmy Zaber Technologies[5]

Tato zařízení nabízí jak firmy zmíněné v sekci věnované hexapodu, tak i další firmy s obdobnou specializací. Z nich lze jmenovat Thorlabs, Zaber Technologies, nebo Edmund Optics.

Na Obrázek 5 lze vidět goniometr motorizovaný pomocí krokového motoru od Zaber Technologies. Zařízení se prodává spolu se zabudovaným driverem. Firma ho na svých stránkách nabízí za necelých 2000\$. Jedná se o goniometr, který nabízí náklon pouze v jedné ose.[5]

Naproti tomu firma Thorlabs nabízí polohovací zařízení umožňující náklon již ve dvou osách a to za 1750€. Jedná se o goniometr, jehož ovládání je zajištěno pomocí DC servo motorů. V ceně už není zahrnutý driver, který je potřeba k ovládání goniometru. Tento driver firma Thorlabs nabízí za 700€. Celková cena zařízení by tedy byla necelých 2500€, jedná se již o vyšší částku, ale stále se jedná o nižší cenu než v případě použití dvou goniometrů od firmy Zaber Technologies.[6]

Motorizovaný goniometr od firmy Thorlabs lze vidět na Obrázek 6.



Obrázek 6 - Motorizovaný goniometr od firmy Thorlabs[6]

V případě uvážení použití goniometru by bylo nutno doplnit sestavu ještě o rotační platformu.

Jedná se již o jednodušší zařízení, které umožňuje rotaci objektu kolem jedné osy. Na rozdíl od goniometru často umožňuje rotaci o 360 stupňů a střed rotace je přímo na jedné z platform. Ty jsou na zařízení dvě, přičemž jedna platforma je pevná a druhá pohyblivá. Dohromady jsou spojeny pohyblivým mechanismem. Ten často obsahuje ozubené nebo šnekové soukolí. Vnější ovládání tohoto soukolí je pak zajištěno manuálním ovládáním či některým z typů aktuátorů. Ty mohou být elektrické, hydraulické, pneumatické nebo i piezoelektrické.

Piezoelektrický jev funguje na základě deformace krystalu pod elektrickým polem. Či při opačném postupu, kdy je krystal stlačen, se na jeho určitých plochách objeví elektrický náboj.[7] Piezoelektrický jev jako takový není pro tuto danou práci podstatný. Významným údajem však je, že zařízení ovládaná pomocí tohoto principu jsou zpravidla velmi přesná, ale také dražší než jejich ostatní varianty.

Rotační platformu, která je ovládaná pomocí piezoelektrického jevu, lze vidět na Obrázek 7.



Obrázek 7 – Piezo rotační platforma od firmy Thorlabs[8]

Stejně jako výše zmíněný hexapod či goniometr nabízí i rotační platformy stejný okruh firem. Porovnávat zde lze například již zmíněnou rotační platformu od firmy Thorlabs ovládanou pomocí piezoelektrického jevu s motorizovanou rotační platformou od firmy Edmund Optics. Varianta od firmy Thorlabs je nabízena za 950€ s tím, že je nutné přikoupit driver, jehož varianty se pohybují od 770€ do 2500€.[8] Firma Edmund Optics nabízí svou variantu rotační platformy, která je poháněná pomocí krokových motorů za 860€, ale taktéž je potřeba spolu s ní koupit driver za 1000€.[9]

Poslední zvažovanou variantou bylo použití manuálně ovládaného goniometru a rotační platformy s následným rozšířením o motorizaci. Okruh firem, které byly porovnávány, se prakticky nezměnil od předchozích dvou zkoumaných variant možného provedení. Všechny varianty totiž spadají do sekce přesného polohování.

Taktéž princip fungování těchto variant se nijak neliší od variant motorizovaných, jen jsou ochuzeny o možnost softwarového ovládání.

K porovnání zde byl zvolen goniometr od firmy Standa, který je zobrazen na Obrázek 8. Cena tohoto zařízení je 230€.[10] Jedná se o goniometr pouze s jednou osou náklonu. K požadované aplikaci by tedy byly zapotřebí dva.



Obrázek 8 – Manuální goniometr od firmy Standa[10]

Jeden z jeho konkurentů je například polohovací zařízení od firmy OptoSigma (Obrázek 9). Stejně jako u předchozí varianty i tady je v nabídce pouze jeden náklon. Opět by tedy bylo potřeba pořídit dva tyto goniometry. Jeden lze pořídit za 400€.[11]



Obrázek 9 – Manuální goniometr od firmy OptoSigma[11]

Mechanickou variantu rotační plošiny lze pak pořídit například od firmy Thorlabs za 350€ nebo od firmy Edmund Optics za 310€ (Obrázek 10).[12; 13]



Obrázek 10 - Mechanická rotační plošina od firmy Thorlabs (vlevo) a od firmy Edmund Optics (vpravo) [12; 13]

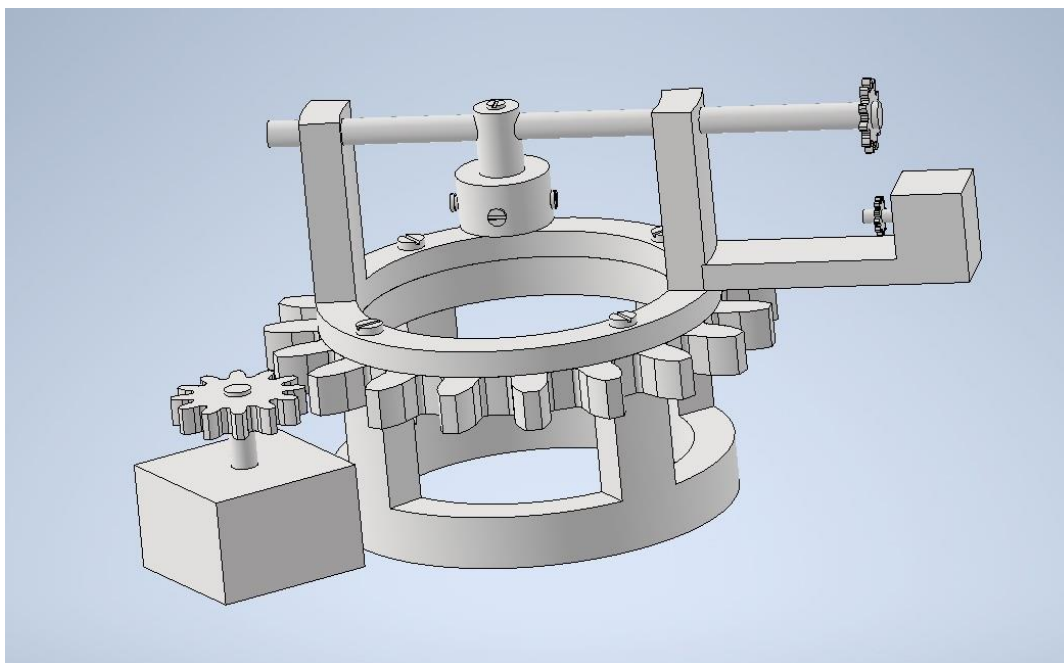
Jak lze vidět, řešerše byla ve svém průběhu zaměřena především na mechanické varianty, protože tato možnost začala být pro zadavatele nejzajímavější. A taktéž byla zúžena na firmy poskytující atraktivnější cenovou nabídkou opět v rámci zájmu zadavatele.

3 Návrh zařízení

Paralelně s řešerší byla uvažována varianta vlastního návrhu. Kdyby se na části celého zařízení nepoužívaly již hotové polohovací platformy, mohlo by celé polohovací zařízení být vytvořeno přímo na míru podle požadavků zadavatele. Celá konstrukce by mohla mít například přesnější rozměry, a to buď malé v místech s omezenými prostory, nebo naopak větší kde by prostoru bylo více. Větší rozměry v místech, kde by nebylo zapotřebí rozměry omezit, by umožnily snížit cenu v závislosti na času potřebného k návrhu. Zpravidla totiž čím menší, přesnější a specifičtější daná část konstrukce musí být, tím je její návrh časově náročnější, tedy i dražší.

Nad vlastním návrhem celého zařízení bylo ovšem uvažováno jen velmi krátce. Byl uskutečněn jeden hrubý návrh modelu pohybové soustavy, který je vidět na Obrázek 11. Během tohoto procesu bylo usouzeno, že by takový vývoj zabral příliš mnoho času, než by mohlo být zařízení používáno v praxi.

Od této varianty bylo tedy upuštěno.



Obrázek 11 – Vlastní návrh celého zařízení

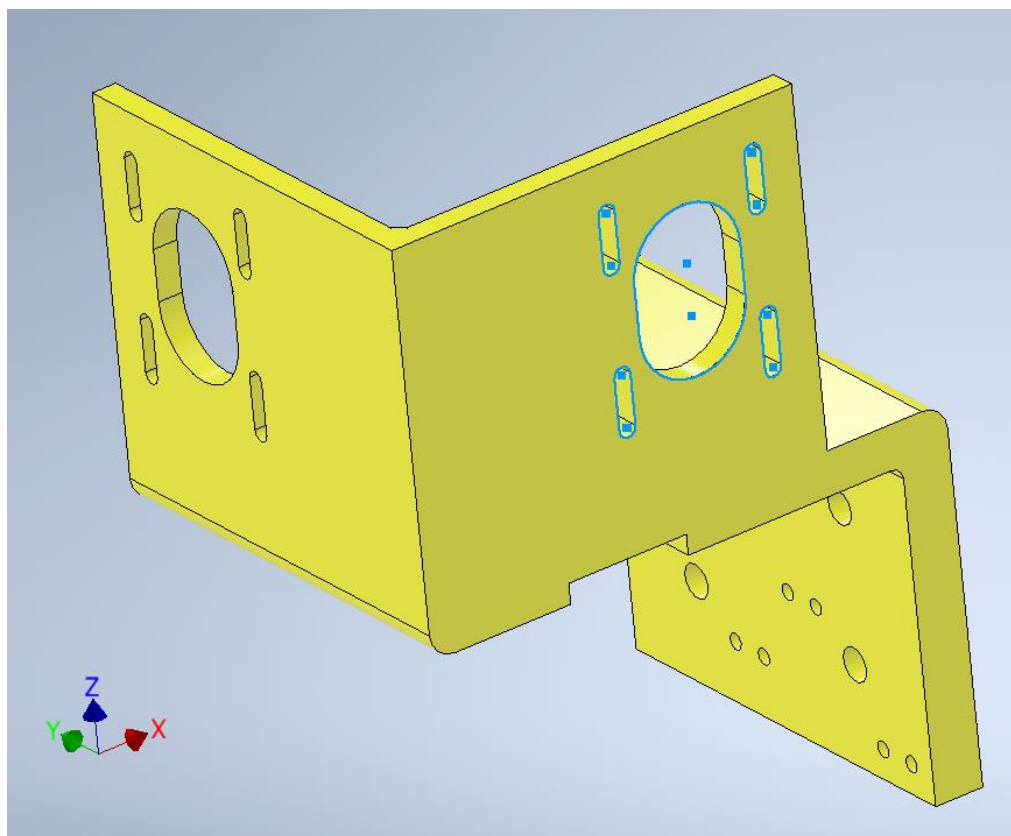
Po zvážení celé řešerše i návrhu vlastního zařízení bylo rozhodnuto, že práce bude pokračovat směrem kompromisu. To znamená, že se použije komerční goniometrická platforma a rotační platforma od firmy Thorlabs. K nim bude následně navržena konstrukce, motorizace manuálního ovládání a uživatelské rozhraní pro desktop. K tomuto rozhodnutí přispěl i fakt, že již dříve byl pořízen mechanický goniometr od firmy Thorlabs zadavatelem práce.

3.1 Umístění a propojení motorů s goniometrickou a rotační platformou

Jednou z hlavních úloh celé práce bylo navrhnout způsob, jakým bude možné motorizovat mechanický goniometr a rotační platformu.

První úvaha byla, že se motor skrze přípravek napojí přímo a pevně na hřídele, které má ovládat. U rotační platformy to není problém, ovšem jeden hřídel goniometru se naklání spolu s polohovatelnou částí. Motor by tedy musel být upevněn přímo na danou část, která se pohybuje. To by vyžadovalo složité řešení, co se týče prostoru a taktéž způsobu uchycení na pohyblivou část goniometru. Bylo tedy přistoupeno k variantě, kdy oba motory ovládající hřídele goniometru jsou připevněny nad goniometrem a jsou spojeny s daným hřídelem pomocí řemenic a řemenů. Díky tomuto řešení se daný hřídel může vůči motoru pohybovat. Je nutno podotknout, že záměr použití celého zařízení se týká vyrovnávání vzorku vůči mikroskopu, a to vyrovnávání ploch, které pouhým okem nejsou zřetelné. Pohyby hřídele, které jsou tu uvažovány jsou tudíž velmi malé.

Přepínání řemenů je řešeno manuálně polohováním motorů v drážkách konstrukce. Drážky jednoho z motorů jsou zvýrazněny na Obrázek 12, jedná se o model s pracovním názvem Strop. Ten je kostrou celé pohybové soustavy. Také obsahuje části a díry pro uchycení prvků, kterým se věnují další části textu.



Obrázek 12 – Model s názvem Strop

Pro tuto úlohu byly zvoleny hnací pryžové ozubené řemeny s profilem HTD (Obrázek 13). Jedná se o velmi rozšířený a ekonomický typ řemenů používaných v průmyslu. Pryž, ze které jsou vyrobeny, je dále posílena skelnými tažnými vlákny. Tento materiál je pružný a odolný proti opotřebení, to umožňuje snadno přenášet moment z hnacího na poháněný hřídel.

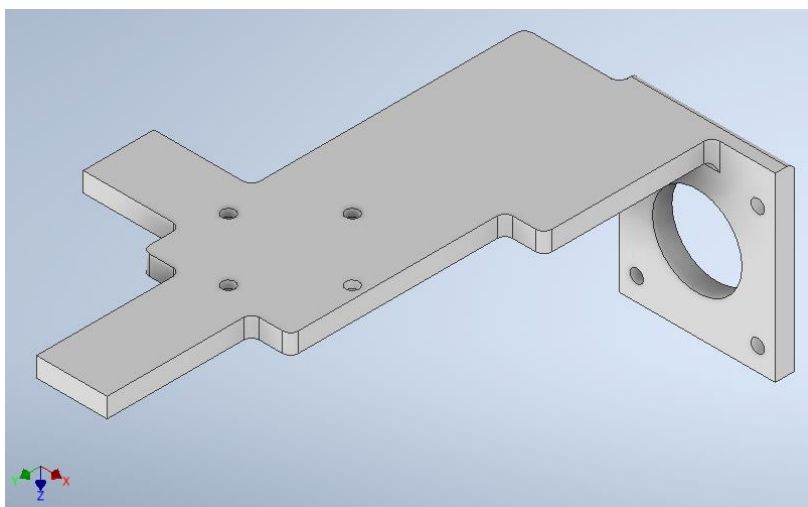
HTD řemeny jsou synchronní, to znamená, že zuby na vnitřním povrchu přesně zapadají do zubů řemenic. Zuby jsou dále chráněny speciální impregnovanou tkaninou. To ještě více zvyšuje odolnost celého řemenu. Tento typ je často používán v různých aplikacích, jako jsou dopravníky, obráběcí stroje nebo tiskařské stroje. Souhrnně jsou HTD řemeny efektivním způsobem, jak přesně přenášet síly a momenty.



Obrázek 13 – Řemen a řemenice s HTD profilem [14; 15]

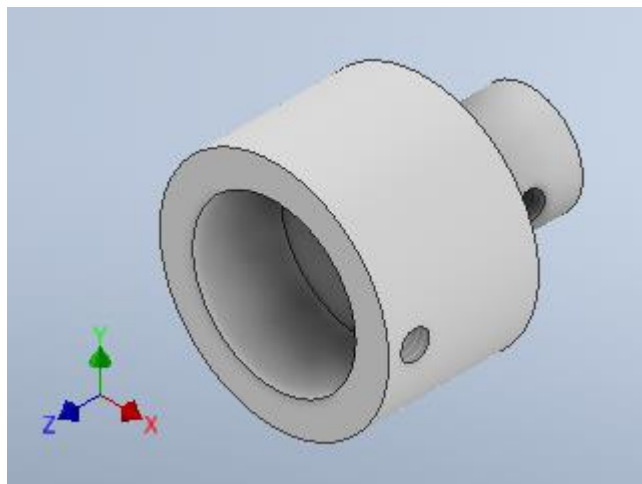
Na základě vybraného typu řemenů k nim byly vybrány i řemenice (Obrázek 13). U nich byl zvolen převod $p = 0.38$. Jedná se tedy o převod snižující otáčky a zvyšující moment na výstupu. Hlavním kritériem zde bylo snížení otáček, což umožní polohování pomocí krokových motorů s vyšší přesností.

Motor ovládající hřídel rotační platformy, jak již bylo zmíněno výše, může být s hřídelem spojen pevně. Byl pro něj tedy navržen držák, který je uchycen mezi goniometrem a rotační platformou (Obrázek 14).



Obrázek 14 – Držák motoru ovládající rotační platformu

Držák také disponuje dvěma vysunutými plošinami, které slouží pro snímání koncové polohy koncovým spínačem. Práce s koncovými spínači bude popsána v části 3.3. Spojení hřídele motoru a hřídele rotační platformy pak řeší přípravek na Obrázek 15.



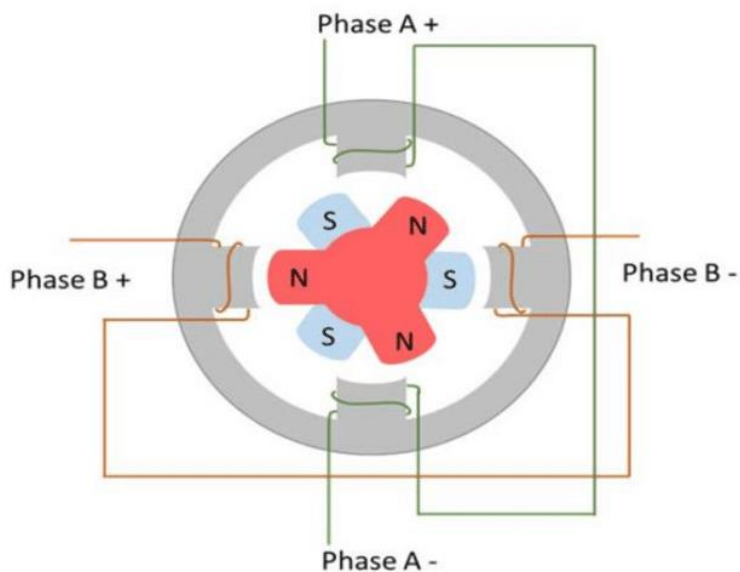
Obrázek 15 – Přípravek pro spojení motoru a hřídele rotační platformy

3.2 Krokové motory

Krokové motory spadají pod synchronní motory. Jejich hlavní výhodou je krokování pohybu, tedy rozdělení rotace motoru na několik přesně definovaných poloh, které při rychlém a postupném přepínání poskytují plynulý otáčivý pohyb.

Krokové motory se skládají ze statoru a rotoru. Stator, jak už z názvu vyplývá, je fixní, tedy nepohyblivý, a tvoří většinou vnější část motoru. Rotor je pohyblivá část motoru, na které je připevněn hřídel, a je většinou vsazen na ložiskách uvnitř statoru.

Tyto motory se dělí na tři typy, s permanentním magnetem (PM), reluktanční (VR) a hybridní. Nejčastěji používané jsou hybridní krokové motory a jejich zjednodušené schéma je vyobrazeno na Obrázek 16.



Obrázek 16 – Schéma hybridního krokového motoru[16]

Hybridní krokový motor funguje tím způsobem, že na statoru jsou dvě, či více skupin cívek (na obrázku jsou zobrazeny dva páry, a proto bude dále v textu uvažováno právě toto provedení). Pár je ve statoru vždy naproti sobě. Rotor je tvořen permanentním magnetem, přičemž každý z pólů má na sobě tři a více výstupků. V jedné rovině vždy leží severní i jižní pól magnetu. Rotace motoru je vyvolána střídavým spouštěním párů cívek. Vždy když je spuštěn jeden pár, na jedné z cívek je vytvořeno kladné a na druhé záporné magnetické pole. Tato pole k sobě přitáhnou nejbližší výstupek rotoru opačné polarity. Následně se tento pár vypne a zapne se druhý, děj se opakuje a stator se opět pootočí tak, aby cívka s kladným magnetickým polem byla co nejbliž severnímu výstupku rotoru a naopak.

Přepínání mezi jednotlivými páry cívek nazýváme právě kroky motoru. Přesnější název by byl plný krok motoru. U krokových motorů se totiž používají i zlomky jednotlivých kroků spuštěním například obou párů cívek najednou. Pro zjednodušenou představu o fungování motoru je ale lepší uvažovat plný krok.

Jednou z výhod krokových motorů, je také možnost kroky nepřepínat a napájet stále ten samý pár cívek. Tím se dá motor aretovat a drží danou pozici silou takzvaného přídržného momentu.

Díky tomu, že rotace motoru je složena z jednotlivých kroků, které můžeme počítat, jsou tyto motory často používány v různých polohovacích systémech. Používají se v CNC technice, 3D tiskárnách, robotice a jiných soustavách, kde je zapotřebí přesné polohování.[17]

Pro tuto práci byly použity krokové motory Nema17 17HS4023 s následujícími parametry:

- Maximální odebíraný proud: 0,7 A / fáze
- Pracovní napětí: 12 V
- Počet fází: 2
- Elektrický odpor: $4,0 \pm 10 \%$ Ω / fáze
- Indukčnost: $3,2 \pm 20 \%$ mH / fáze
- Točivý moment: 14 Ncm
- Moment motoru bez napájení: 2,2 Ncm
- Krokový úhel: $1,8 \pm 5 \%$ / krok
- Počet kroků dokola: 200 kroků
- Velikost: 42 * 42 * 23 mm
- Hmotnost: 126 g / 4,5 oz
- Počet kroků dokola: 200 kroků[18]



Obrázek 17 – Krokový motor
Nema17 17HS4023[18]

Tento motor byl zvolen na základě předešlé zkušenosti s jeho užíváním a dispozicí dvou zakoupených kusů na straně zadavatele. Vzhledem k jeho točivému momentu je také jisté, že bude pro danou úlohu více než dostatečně silný.

Moment, který je potřeba k ovládní goniometru je 2,6 Ncm. Se zahrnutím převodového poměru mezi řemenicemi je potřeba, aby motor vyvinul moment o hodnotě 0,988 Ncm. Točivý moment motoru je tedy 14,17krát větší než minimální potřebný točivý moment k ovládní goniometru.

Potřebný moment k ovládní jednotlivých prvků byl změřen pokusem, při kterém na polohovací hřídel byla upevněna osa, respektive rameno. Po něm bylo posouváno závaží, dokud nebylo rameno dost velké na to, aby moment vyvolaný tíhou závaží překonal síly od statického tření v polohovacím zařízení. Z délky ramene a tíhy, kterou na něj působilo závaží, byl následně vypočítán potřebný moment podle vztahu:

$$M = x \cdot F \quad (2.1)$$

Kde M představuje vyvolaný moment síly, x délku ramene a F sílu působící na rameno. Tato síla je v daném případě tíha závaží. Moment od tíhy ramene je zde nulový, protože rameno je symetrické na obě strany rotace a předpokládá se, že hmota je v něm rovnoměrně rozložena. Za tohoto předpokladu se momenty od tíhy ramene odečtou.

Měření proběhlo v několika různých polohách zařízení a pro výpočet bezpečnosti byl použit největší naměřený moment. Ten byl naměřen při hmotnosti závaží 20,6 g a délce ramene 143,5 mm. Výsledný moment je tedy již zmíněných 2,6 Ncm.

$$M = 0,1435 \cdot 0,0206 \cdot 9,81 \quad (2.2)$$

$$M = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ Nm} \quad (2.3)$$

3.2.1 Ovládání motorů

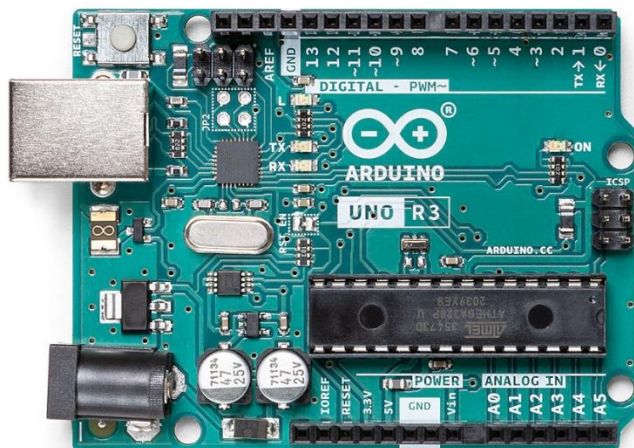
Pro ovládání motorů byla zvolena vývojová deska Arduino UNO spolu s CNC shield rozšířením navrženým právě pro ni.

Arduino UNO je vývojová deska založená na mikrokontroleru ATmega328P. Ten je přes desku propojen se čtrnácti vstupně výstupními digitálními piny, z nichž šest může být použito pro generování PWM signálu, šesti vstupními analogovými piny, USB konektorem, napájecím konektorem, 16 MHz keramickým rezonátorem.

Obecně je Arduino Uno vývojová deska, která může sloužit jako základ pro různé elektrotechnické projekty. Jedná se o velmi uživatelsky přívětivou variantu mikrokontroleru. A to díky možnosti programování skrze USB, ale především díky vysokoúrovňovému jazyku, ve kterém se kód pro mikrokontroler píše, dále díky velké škále knihoven, ať už poskytnutých výrobcem nebo komunitou, a také s možnostmi zakoupit nejrůznější nadstavby.

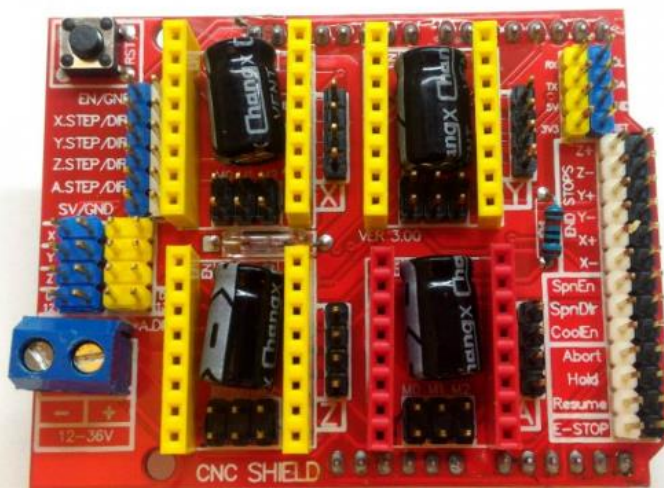
Tato uživatelská přívětivost se ovšem projevuje ve vyšší ceně naproti jiným mikrokontrolerům, které lze na trhu najít. To je způsobeno právě různými nadstavbami, takže mnohdy základní desky Arduino obsahují více komponent, než je potřeba na projekt, na něž jsou použity.

Z toho vyplývá, že se desky Arduino nehodí například do zařízení, které budou sériově vyráběny, právě vzhledem k vyšší ceně. Nebo do zařízení, která potřebují specifické rozhraní. Hodí se pro hobby uživatele, ale taktéž pro pokročilé návrháře elektronických systémů a soustav. Záleží na zamýšleném použití.[19]



Obrázek 18 – Arduino Uno[19]

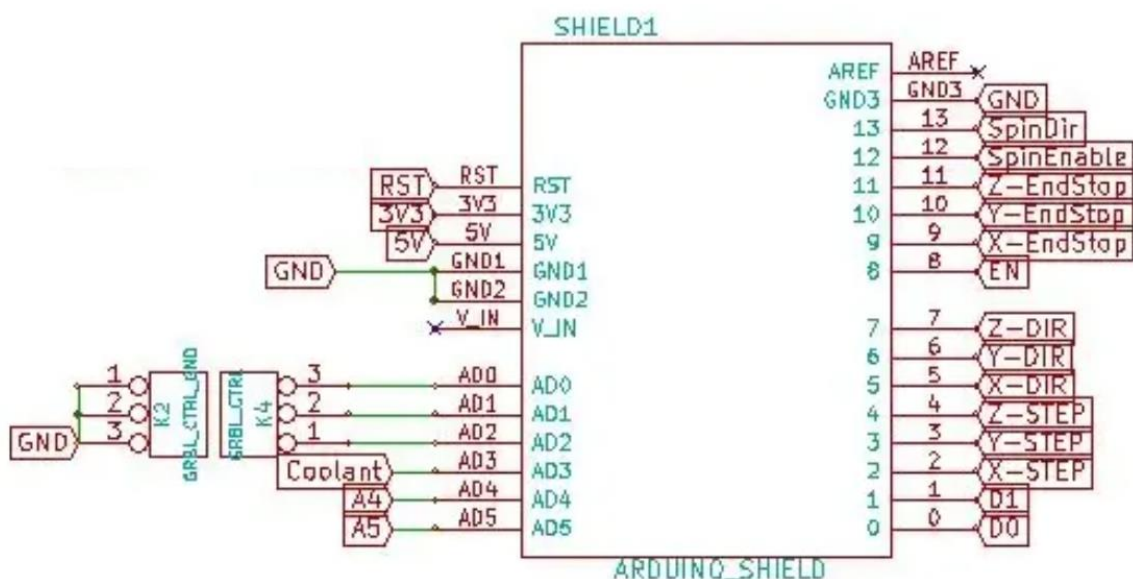
Jako rozšíření pro programovací desku Arduino Uno byl použit CNC Shield V3 (Obrázek 19). Ten je primárně určen pro stavbu 3D tiskárny nebo CNC stroje. Jeho hlavní funkcí je, že piny mikrokontroleru uspořádává pro snadné osazení driverů A4988 nebo DRV8825 určené pro krokové motory, protože právě ty jsou v těchto úlohách nejčastěji použity. Je přizpůsoben k používání tří až čtyř motorů. Použití prvních třech motorů je zamýšleno jako ovládání poloh X, Y, Z.



Obrázek 19 – CNC Shield V3[20]

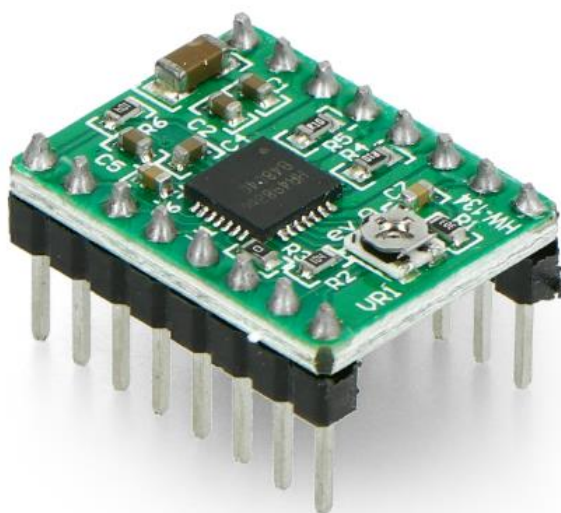
Čtvrtý motor může buď kopírovat jeden z předešlých, nebo může pracovat samostatně a rozšířit tak mechanismus, ve kterém by byl použit, o pohyb v další ose. To, jestli bude pracovat samostatně nebo paralelně k jinému, lze volit spojením dvou párů pinů umístěných vedle sebe. K propojení lze tedy použít propojku neboli jumper. Dále shield disponuje svorkami pro zdroj externího napájení 12–36 V a jeho výstupní proud je 2 A. Také má vyvedenou pinovou lištu, která nabízí další možnosti, jak s motory pracovat.

Souhrnně tedy CNC shield nabízí snadné propojení driverů krokových motorů.[20]



Obrázek 20 – Schéma zapojení základních funkcí CNC Shield[20]

Zde byly použity drivery A4988 (Obrázek 21). Ty umožňují snadné ovládání krokových motorů, a to přepínáním hodnoty HIGH a LOW na konkrétním pinu určeném pro daný motor. Vložení prodlevy mezi tyto dvě operace se pak nastavuje pauza mezi kroky motoru, respektive rychlost jeho otáčení. Směr otáčení se nastavuje obdobně zapsáním hodnoty HIGH nebo LOW na daný pin. To, které piny používat pro danou operaci, je popsáno na Obrázek 20.[21] Jakým způsobem pracuje s driverem skrze Arduino kód lze vidět v příloze 2024-05-18_kod_arduino, SEZNAM PŘÍLOH.



Obrázek 21 – Driver pro krokové motory A4988[22]

Aby mohla deska Arduino spolu s CNC shieldem a drivery skutečně ovládat v této práci vybrané krokové motory, je zapotřebí externího zdroje stejnosměrného napětí (Obrázek 22). Samotná deska Arduino UNO může totiž poskytnout pouze napájení o hodnotě 5 V a max.

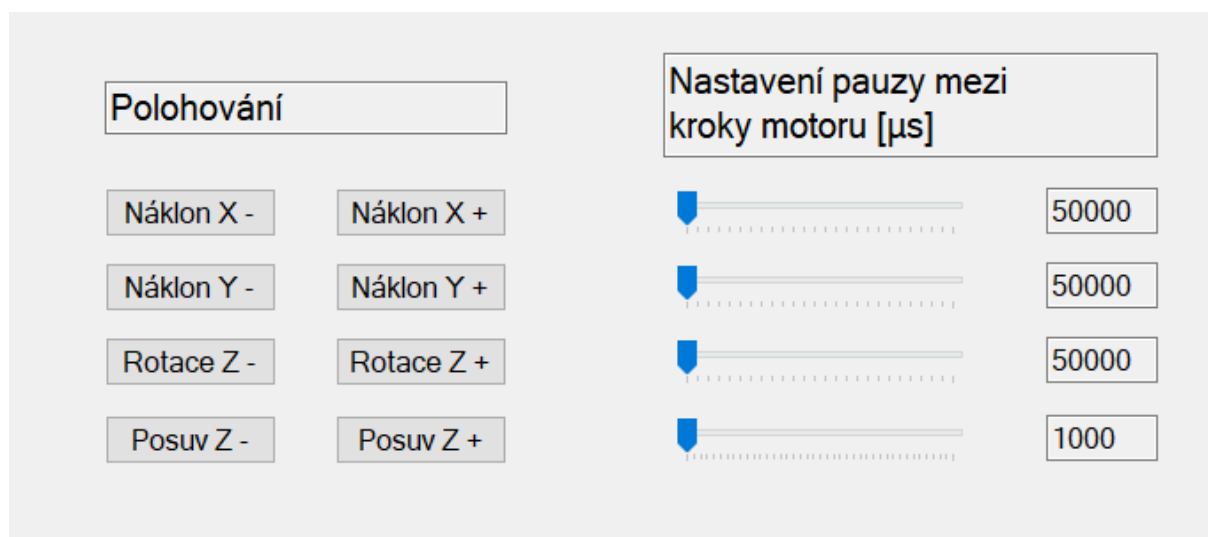
800 mA DC. Přičemž zde použité krokové motory pracují s napájecím napětím 12 V a každý z nich může odebírat až 0.7 A.

V tomto případě použitý zdroj je napájen ze sítě AC 175-240 V, 50/60 Hz a na výstupu poskytuje 12 V s odběrem max. 5 A, tedy příkon 60 W. Tudíž může napájet všechny 4 použité motory i v případě, že by pracovaly všechny současně na maximální výkon, protože celkový odebíraný proud by byl 2.1 A. Tím je zde získána bezpečnost 2.38. Praktická bezpečnost je přitom ještě mnohem vyšší. Protože v daném provedení není možné, aby všechny motory pracovaly současně a taktéž není potřeba, aby pracovaly na maximální výkon.[23]



Obrázek 22 – Spínaný zdroj SANPU 12 V, 5 A, 60 W[23]

Co se motorů týče, jako poslední bylo nutno vyřešit jejich snadné ovládání pro uživatele. Za tímto účelem bylo vytvořeno jednoduché grafické rozhraní (GUI) (Obrázek 23). Toto rozhraní nabízí jednoduché ovládání rotací jednotlivých motorů na jednu nebo druhou stranu. Pak je zde také možnost nastavit pauzu mezi jednotlivými kroky motoru, což je prakticky nastavování rychlosti rotace.



Obrázek 23 – Grafické rozhraní pro ovládání krokových motorů

Grafické rozhraní bylo navrženo a naprogramováno v programovacím jazyce C#.

Použita byla platforma Windows Forms, což je jedna z možných technologií používána pro vytváření uživatelského rozhraní v jazyce C# pro platformu Windows. Poprvé byla uvedena již s .NET Framework 1.0, stále je ale běžně používána pro vývoj desktopových aplikací.

Nabízí jednoduchý způsob vytváření GUI s využitím Microsoft Visual Studia. Vývojář tímto způsobem může přetahovat a upravovat ovládací prvky jako jsou tlačítka, textová pole, checkboxy, seznamy a další pomocí grafického rozhraní. Windows Forms používá řízený model programování, tudíž aplikace reaguje na události, jako je kliknutí myši, stisk tlačítka nebo i pouhé přejetí myši nad daným objektem, se kterým vývojář pracuje. Samotná platforma Windows Forms pak umí vytvořit funkci pro dané události, které lze následně upravit. Dále umožňuje vývojáři vytvořit své vlastní ovládací prvky a ty následně integrovat do aplikací pomocí API, což je soubor definic, protokolů a nástrojů k tomu určený.[24]

Samotná aplikace pak v tomto případě komunikuje s vývojovou deskou Arduino UNO pomocí USB. Pro každou událost pošle do mikrokontroleru konkrétní znak, z něj program v mikrokontroleru vyhodnotí, co proběhlo za událost, a dále s touto informací pracuje.

3.3 Koncové spínače

S ohledem na bezpečnost používání navrhované pohybové soustavy bylo žádoucí ji opatřit koncovými spínači, které budou detekovat buď krajní polohy rozsahu soustavy nebo rozsah pohybu, který si sám uživatel nastaví.

Koncové spínače, použité v tomto návrhu, jsou elektromechanické (Obrázek 24). Dále se v podobných soustavách používají spínače kapacitní, indukční, optické nebo magnetické. Záleží na záměru použití.



Obrázek 24 – Koncový spínač[25]

Zde použitý koncový spínač je v podstatě tlačítko uzpůsobeno stisknutí vzájemným pohybem součástí. Koncový spínač má tři kontakty označené C, NO a NC. Kontakt označený jako C je nazýván Common, kontakty NO a NC jsou pak nazývány Normally Open a Normally Closed. Při rozepnutí spínače je kontakt C spojen s kontaktem NC, při stisku se pak spojí s kontaktem NO.

V této práci je na kontakt NO přiveden signál GND z mikrokontroleru Arduino UNO a kontakt C je připojen do jednoho pinu mikrokontroleru. Ten pak kontroluje hodnotu tohoto pinu

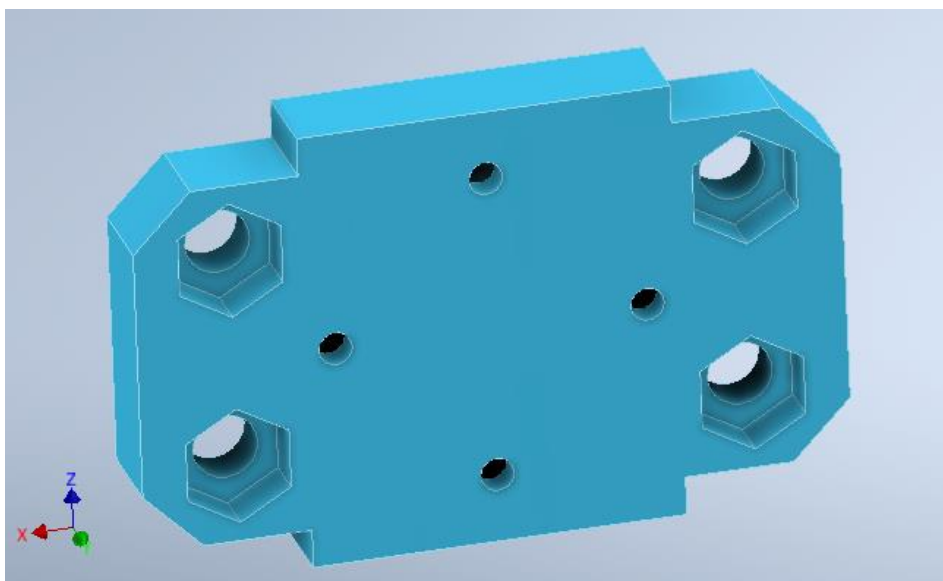
a v případě, že se na něm nachází hodnota LOW, vyhodnotí, že byl spínač sepnut a dále s touto informací pracuje tak, že spustí funkci, která soustavu uvede do polohy, kdy spínač není sepnutý.

Skrze koncové spínače se zde kontroluje 6 krajních poloh. A to kladná i záporná rotace obou náklonů goniometru a kladný i záporný lineární posuv. U rotační platformy není nutné kontrolovat polohu otočení, protože rotace je neomezená.

Při krajní pozici lineárního posuvu se spínač sepne buď kontaktem s hranou lineárního posuvu nebo kontaktem s podstavou. Pro pozice náklonů byly vyvedeny pomocné plochy na držáku motoru ovládající rotační platformu (Obrázek 14).

3.4 Další konstrukční prvky

Pro spojení goniometrické a rotační platformy je zajištěno vložkou na Obrázek 25.

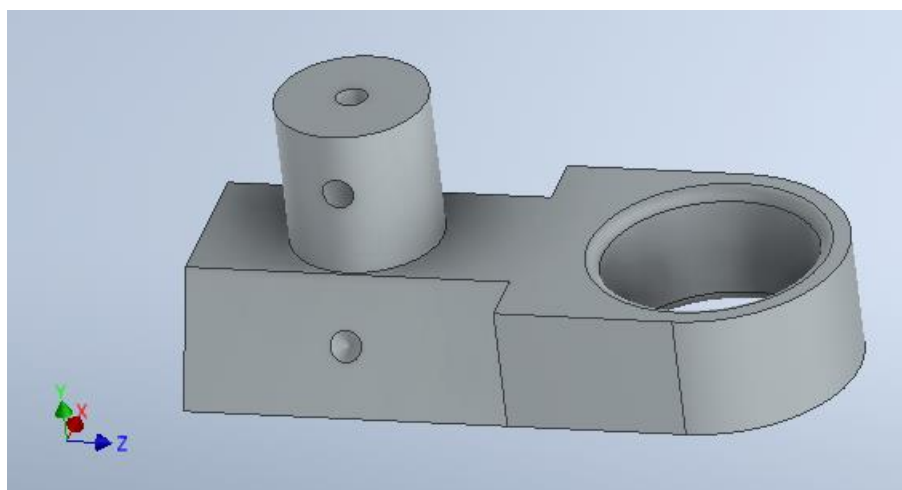


Obrázek 25 – Vložka pro spojení goniometrické a rotační platformy

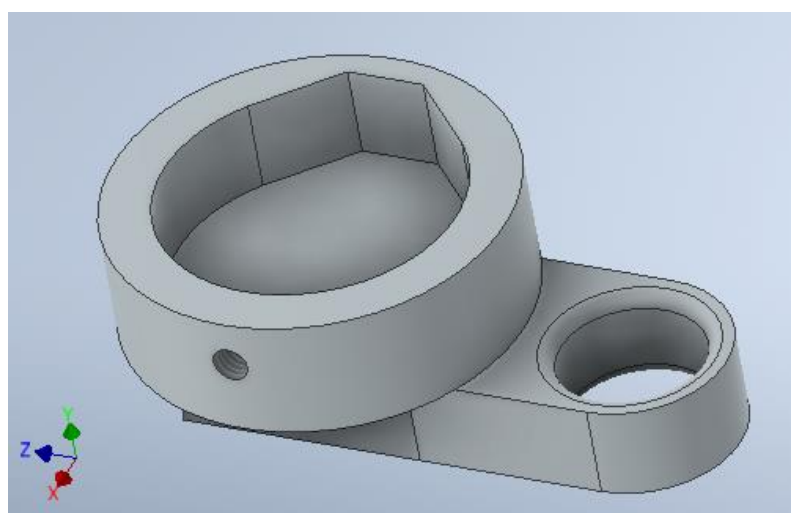
Spoj využívá závitů M3, kterými disponuje pohyblivá plošina goniometru. S jejich vyžitím je vložka spojena s goniometrem. Díry pro šrouby obsahují zahloubení pro hlavu šroubu, tak aby šroub mohl být do vložky zapuštěn. Rotační platforma pro tento spoj nabízí pouze drážky. Závit pro tento spoj by tedy mohl být přímo ve vložce, ale jelikož jsou jednotlivé díly tisknuty na 3D tiskárně, byla zvolena varianta zapuštění matky z druhé strany.

3.4.1 Držáky a přípravky pro vzorky

Vzorky, na jejichž pozorování je práce zaměřená, jsou buď přilepeny na hliníkovém podstavci, nebo zalisovány do pecky z pryskyřice. Z tohoto hlediska bylo nutné navrhnout dva držáky vzorků. Do držáku na Obrázek 26 může být vložen hliníkový podstavec, který lze následně zajistit šroubem.

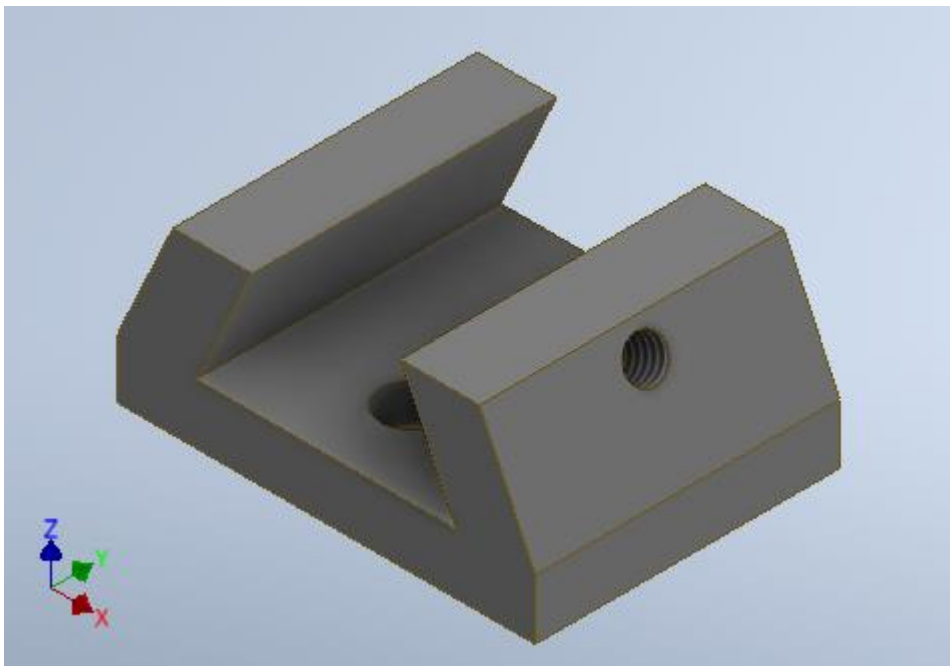


Obrázek 26 – Model držáku hliníkových podstavců se vzorky



Obrázek 27 – Model držáku pryskyřičných pecek se vzorky

Držák určený na pecky z pryskyřice lze vidět na Obrázek 27. Prostor, který je určen pro pecku, přesně nekopíruje její tvar. Pro pohodlnou výměnu je nutná určitá vůle mezi peckou a držákem. Z tohoto důvodu je obvod daného prostoru zkosen ve dvou směrech, aby měla pecka při zajištění šroubem tři opěrné body. Podstava držáku je tvořena lichoběžníkem, na němž je zahloubení. Celá podstava slouží k zasunutí do přípravku s drážkou jemu inverzní (Obrázek 28).



Obrázek 28 – Model přípravku pro držáky vzorků

Ten je přímo spojen s rotační platformou pomocí dvou šroubů. Ty využívají závity, kterými disponuje pohyblivá část rotační plošiny. Lichoběžníkový tvar podstavy držáků a drážky přípravku je způsob zajištění, které se nazývá rybinový spoj. V jedné boční straně přípravku je navržen závit určený pro odpružený šroub. Ten má na svém konci odpruženou ocelovou kuličku (Obrázek 29).

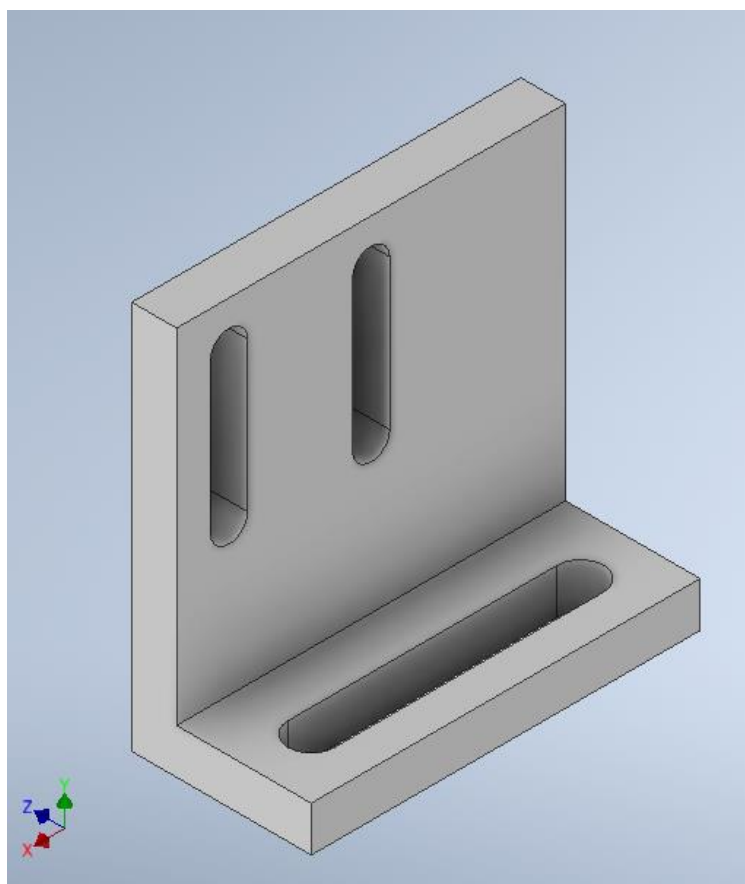


Obrázek 29 – Odpružený šroub[26]

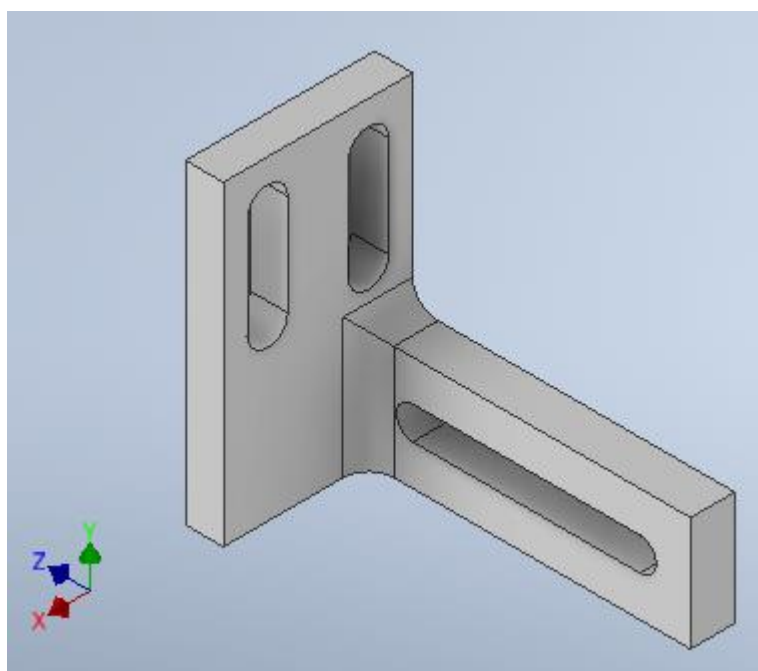
Kulička může být zatlačena do šroubu, to umožní vsunutí držáků. Při plném vsunutí zapadne do zhloubení, které se nachází na jejich podstavách. Tím držák přitlačí na stěnu drážky a tímto způsobem jej zajistí. Toto řešení poskytuje možnost rychlé výměny držáků a vzorků.

3.4.2 Držáky koncových spínačů

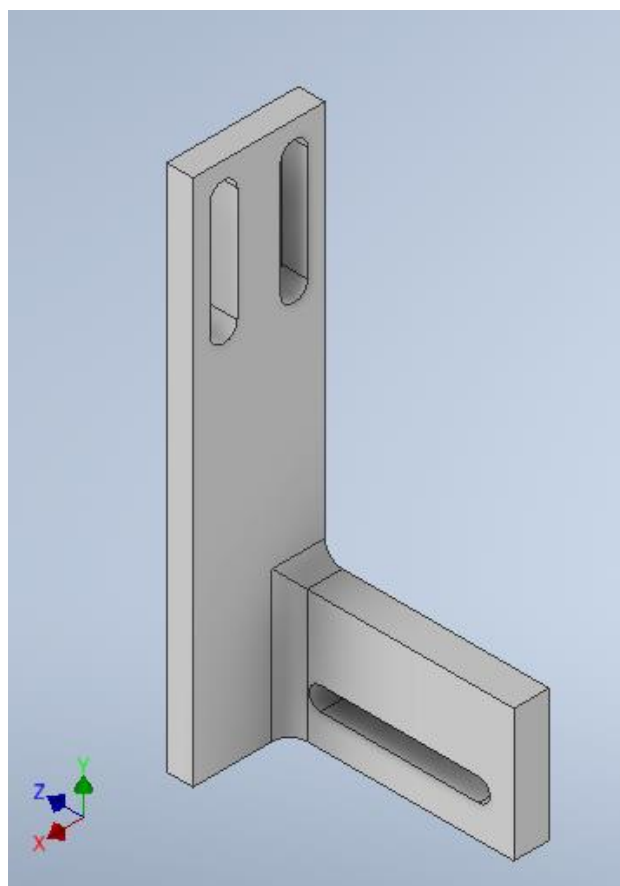
Pro jednotlivé koncové spínače byl navržen držák na Obrázek 30, Obrázek 31 a Obrázek 32. Držáky díky svým drážkám umožňují určitý rozsah, ve kterém lze koncové spínače individuálně polohovat a tím nastavit rozsahy pohybů pohybové soustavy.



Obrázek 30 – Model držáku koncového spínače

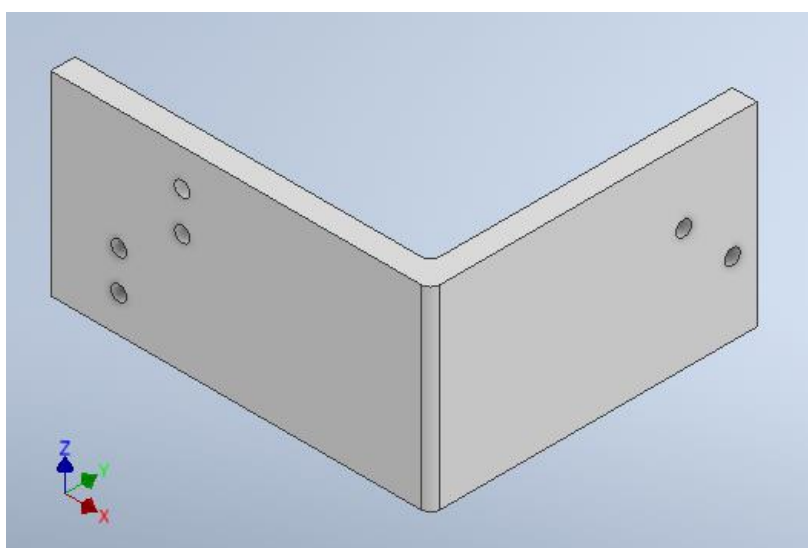


Obrázek 31 – Model držáků koncových spínačů



Obrázek 32 – Model držáku koncového spínače

Samotné držáky jsou pak kromě jednoho případu upevněny přímo na hlavním konstrukčním prvku s názvem Strop (Obrázek 12), na němž pro tyto účely byly navrženy díry pro šrouby a matky. V jednom případě byl pro držáky navržen úchyt tvaru L (Obrázek 33).



Obrázek 33 – Model úchytu držáků koncových spínačů

3.4.3 Výměna vzorků

Při pozorování jsou vzorky velmi blízko optickým objektivům mikroskopu. Bylo nutné navrhnout mechanismus, díky kterému půjdou vzorky vyměnit jak pohodlně, tak bezpečně vzhledem k objektivům.

Zprvu bylo pracováno s variantou, kdy by se celá soustava vyklápěla na pantu spojeném s podstavou. Vzhledem k bezpečnosti bylo od této varianty upuštěno. V případě nedokonalého upevnění vzorku by mohla celá soustava mít jinou výšku, než se kterou se počítá a při sklopení by mohl vzorek narazit do objektivu a tím jej poškodit.

Soustava byla tedy doplněna o vertikální lineární posuv, k němuž je připevněn hlavní díl soustavy, Strop. Lineární posuv zajistí jak pohodlnou výměnu, tak i bezpečné polohování vzorku na správnou vzdálenost.

Posuv nebyl navrhován, ale zakoupen hotový jako celek. Použit byl CNC lineární pohon s krokovým motorem T8x8 - 100 mm (Obrázek 34).[27]



Obrázek 34 – CNC lineární pohon[27]

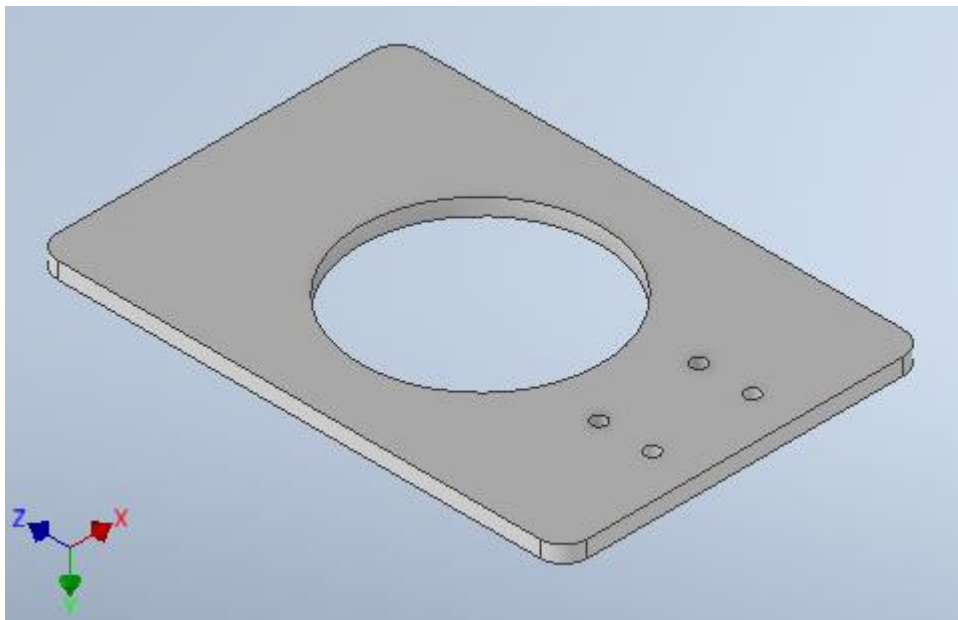
Parametry použitého lineárního posuvu jsou:

- Napájecí napětí: 12 V
- Max. proud: 1,2 A
- Točivý moment: 45 N.cm
- Přesnost posuvu: 0,1 mm
- Rozměry: 55 x 55 x 65 mm
- Délka posuvu: 100 mm
- Hnaný šroub: trapézový, M8
- Max. vertikální zatížení: 15 kg
- Max. horizontální zatížení: 56 kg

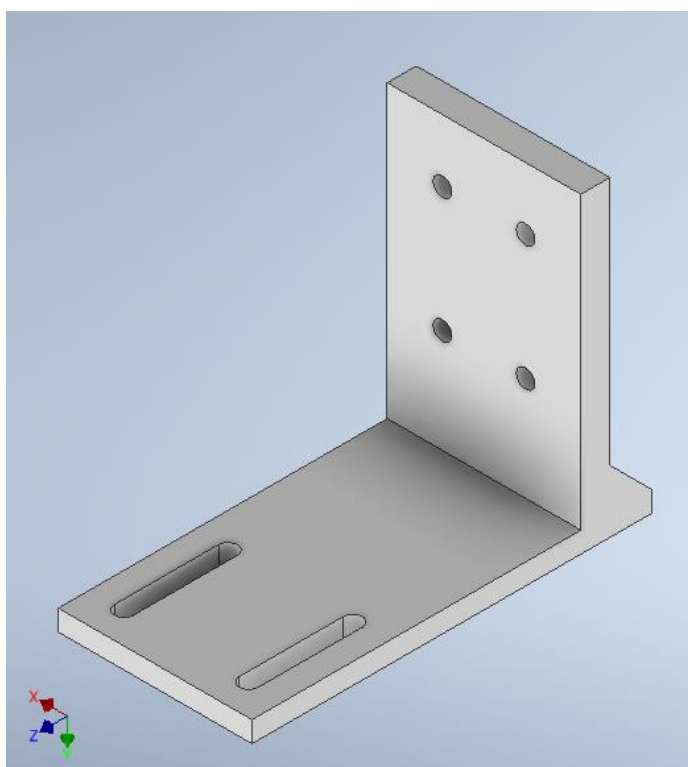
3.4.4 Spojení pohybové soustavy s mikroskopem

Prvním modelem, který zajišťuje spojení celé soustavy a mikroskopu je vložka (Obrázek 35), která kopíruje tvar originální vložky zasazené do pohyblivého stolku mikroskopu (Obrázek 3). Na rozdíl od ní ale disponuje čtyřmi dírami pro šrouby, kterými jsou uchyceny další komponenty. K vložce je následně skrze tyto díry a jeho drážky uchycen držák tvaru L (Obrázek

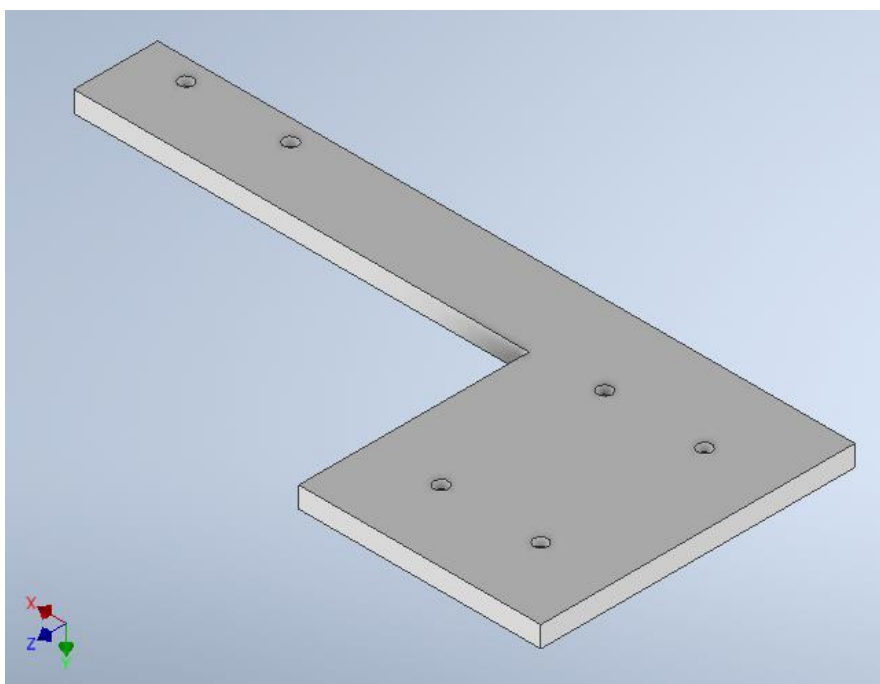
36) a k němu lineární posuv. Spojeny jsou pomocí šroubů a posuvných matek, které má lineární posuv na své zadní straně. K držáku jsou ještě připevněny modely na Obrázek 37 a Obrázek 38. Ty slouží k zafixování mikrokontroleru Arduino UNO.



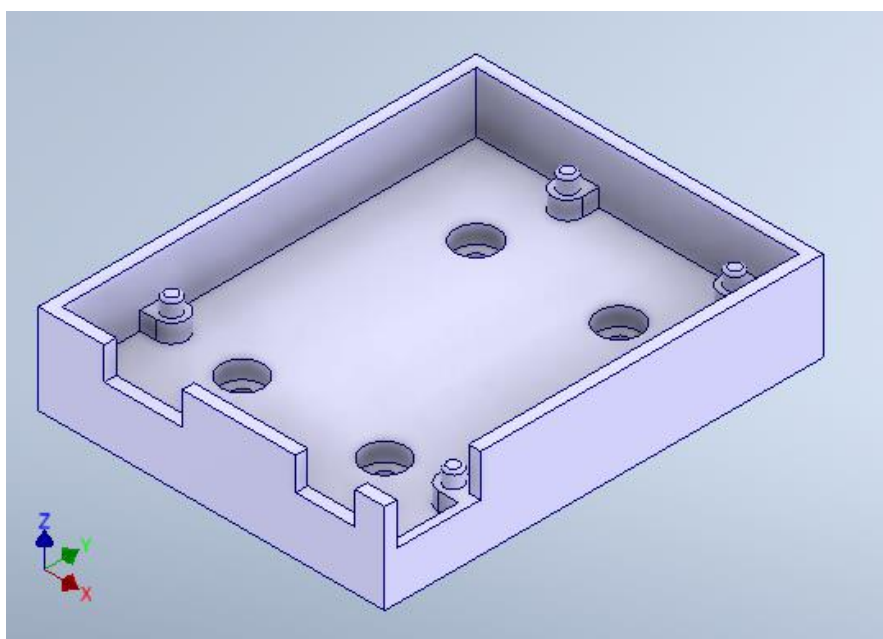
Obrázek 35 – Model vložky pro polohovací stolek mikroskopu



Obrázek 36 – Model držáku lineárního posuvu tvaru L



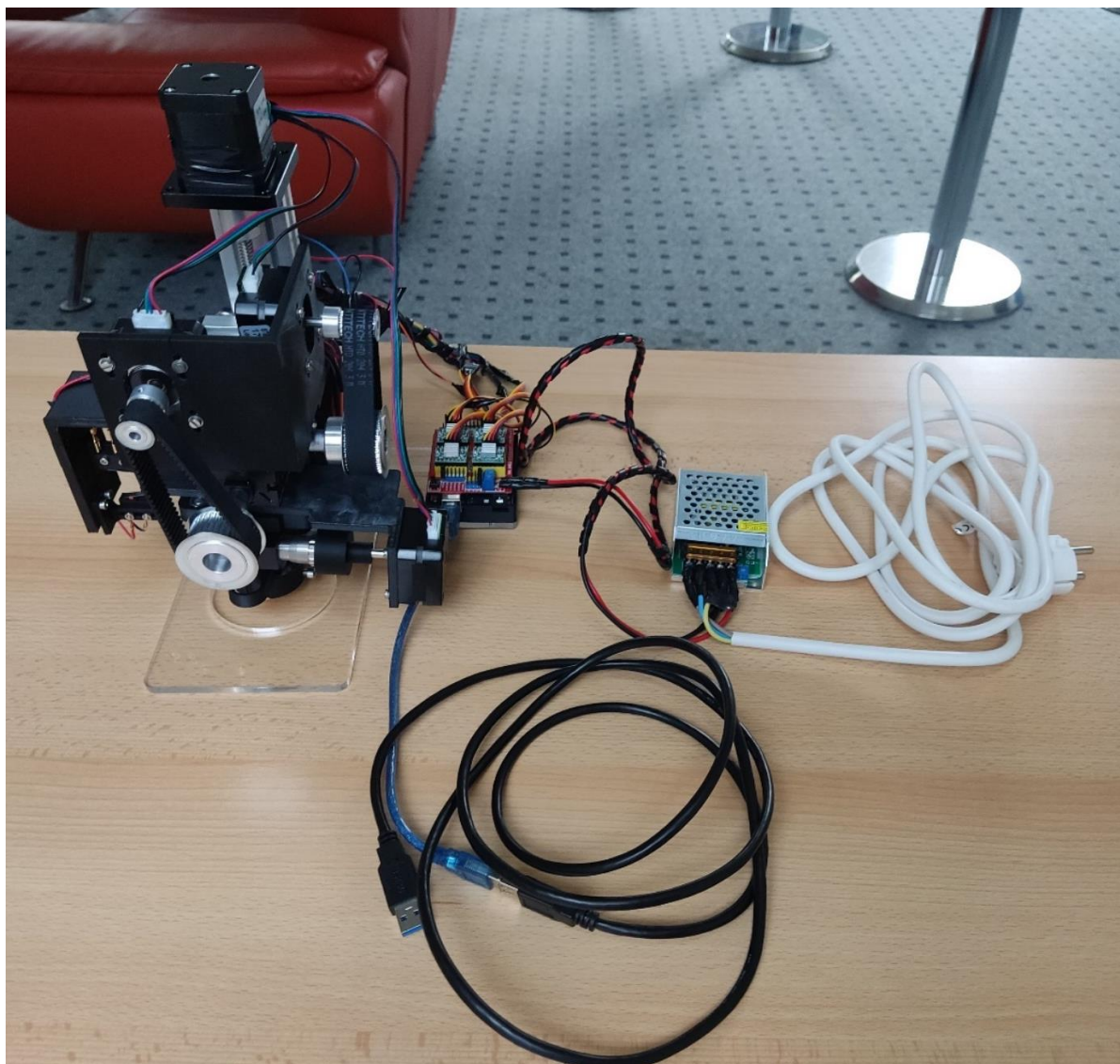
Obrázek 37 – Model přípravku pro připojení mikrokontroleru



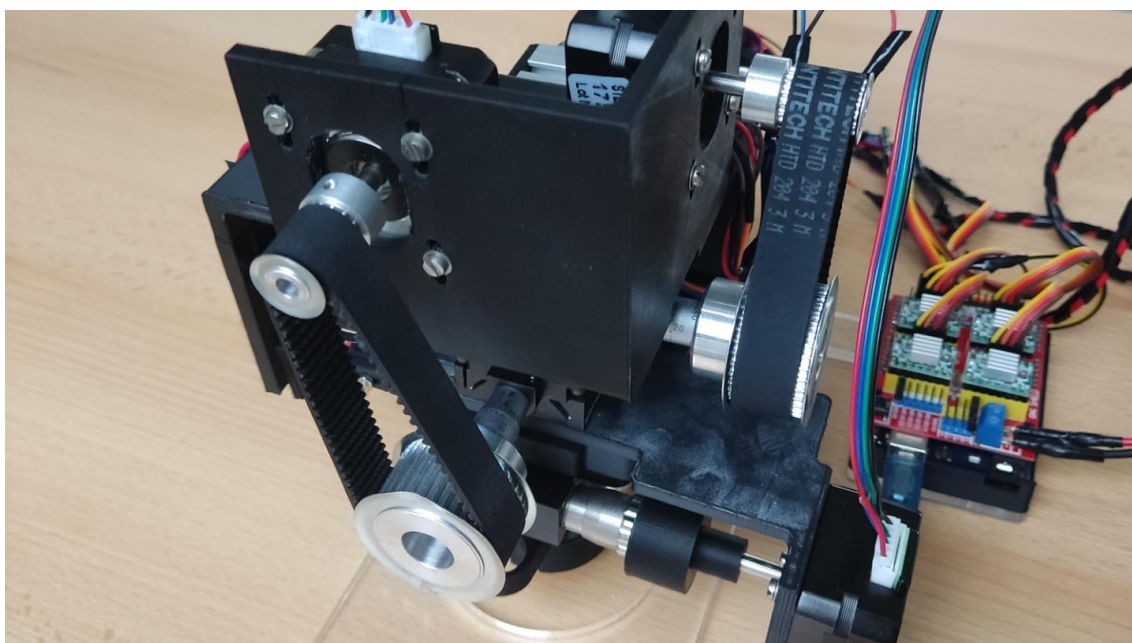
Obrázek 38 – Model boxu k fixaci mikrokontroleru

4 Zhotovený prototyp polohovacího zařízení

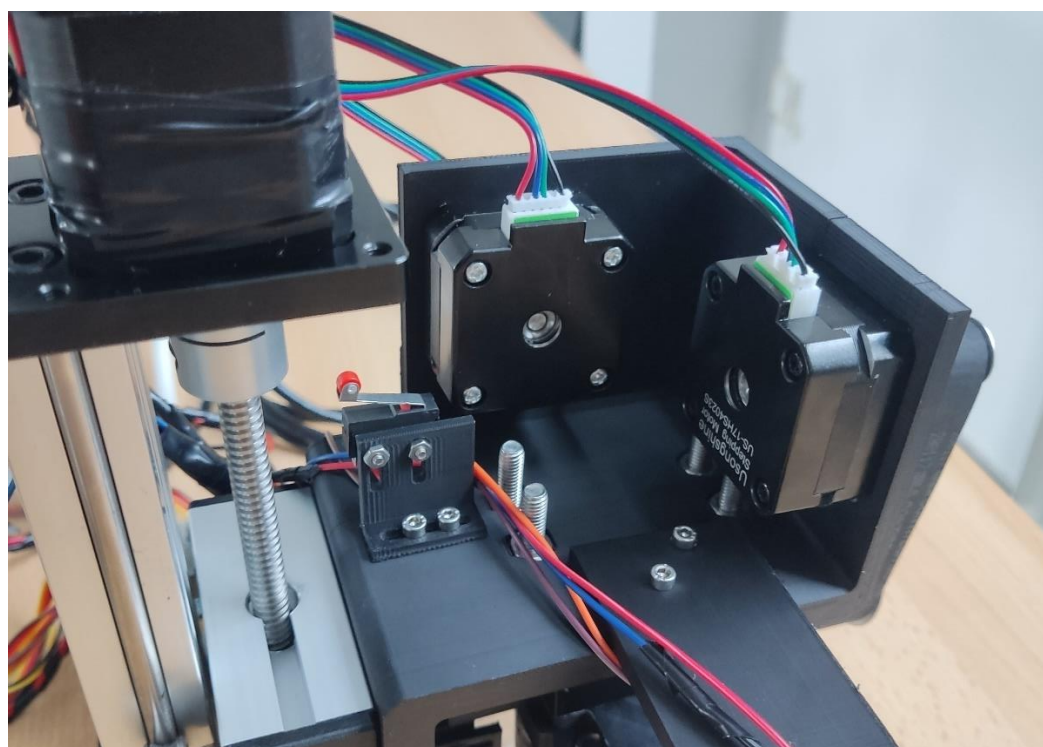
Všechny navržené modely byly vytisknuty na 3D tiskárně nebo, když to bylo možné, vyříznuty z plexiskla. Následně sestaveny do pohybové soustavy a doplněny o motorizační prvky. Zařízení je schopno uchytit vzorek ve dvou variantách, buď na hliníkovém podstavci, nebo v pecce z pryskyřice, a následně ho naklánět ve dvou osách a rotovat s ním kolem svislé osy. Tyto pohyby jde ovládat vzdáleně skrze grafické rozhraní a desku Arduino UNO. Zhotovené zařízení lze vidět na Obrázek 39, Obrázek 41, Obrázek 40 a Obrázek 42.



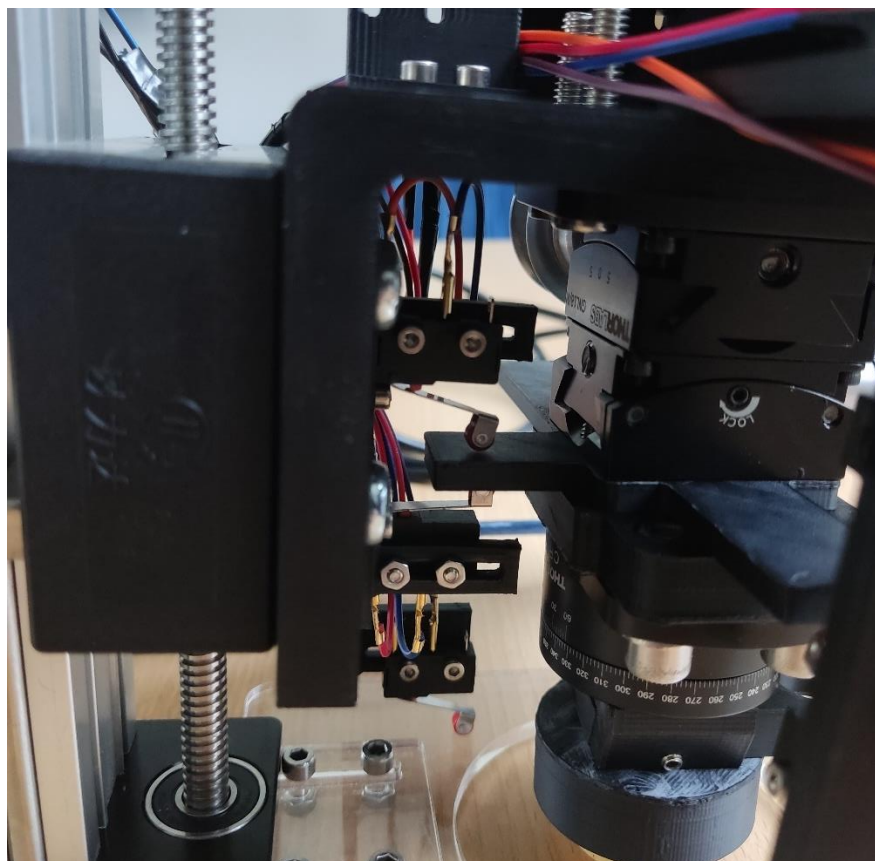
Obrázek 39 – Polohovací zařízení jako celek



Obrázek 40 – Detail na řemeny a řemenice polohovacího zařízení spojující motory a goniometr



Obrázek 41 – Detail na motory polohovacího zařízení ovládající goniometr



Obrázek 42 – Detail na koncové spínače polohovacího zařízení kontrolující jeden z náklonů

ZÁVĚR

Cílem práce bylo provést rešerši v oblasti komerčních polohovacích zařízení, které umožňují náklon a rotaci vzorku, následně na základě provedené rešerše navrhnout funkční prototyp motorizovaného polohovacího zařízení pro světelný mikroskop, které bude cenově dostupné a umožní rotaci spolu s dvouosým náklonem zkoumaného vzorku.

Po zvážení informací získaných z rešerše komerčních zařízení bylo přistoupeno k variantě spojení mechanické goniometrické a rotační platformy od firmy Thorlabs, která byla následně doplněna o motorické ovládání pomocí krokových motorů, Mikrokontroleru Arduino UNO a grafického uživatelského rozhraní. Taktéž bylo nutné navrhnout konstrukční prvky, které umožní spojení jednotlivých komponent do jednotně pohyblivé soustavy. V rámci ovládání soustavy do ní byly také začleněny koncové spínače, které ošetří krajní polohy zařízení a tím zajistí bezpečnost provozu.

Mimo motorizaci a ovládání byly rovněž navrženy držáky vzorků, k nim pak prvky umožňující jak jejich uchycení, tak pohodlnou a bezpečnou výměnu. K uchycení byla navržena rybinová drážka s odpruženým šroubem. Ta spolu s dokoupeným lineárním vertikálním posuvem umožňuje držáky se vzorky vyměnit rychle a také v bezpečné vzdálenosti od objektivů mikroskopu.

Nakonec byly navrženy součásti, které zakomponují celou soustavu do polohovacího stolku mikroskopu. Za tímto účelem byla navržena vložka, která kopíruje originální součást polohovacího stolku. Doplněna je o díry, skrze které jsou k ní upevněny další držáky. K těm je následně připojena celá pohybová soustava. Ta taktéž myslí na jasné umístění mikrokontroleru.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZEISS Axio Observer for Materials. *ZEISS* [online]. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/microscopy/en/products/light-microscopes/widefield-microscopes/axio-observer-for-materials.html>
- [2] Application of H1 theory to a 6 DOF flight simulator motion base. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2012, **2012**(34), 193-204.
- [3] H-850 6-Axis Hexapod. In: *PI* [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://www.physikinstrumente.com/en/products/parallel-kinematic-hexapods/h-850-6-axis-hexapod-700800>
- [4] Positioning goniometer. *Wikipedia* [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Positioning_goniometer
- [5] GSM Series: Motorized goniometers. *ZABER* [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://www.zaber.com/products/goniometer-stages/GSM>
- [6] GNL20/M-Z8 - Large Motorized Dual-Axis Goniometer, 25.4 mm Distance to Point of Rotation, Metric. *Thorlabs* [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=GNL20/M-Z8>
- [7] PETRŽÍLKA, Václav a Josef Bartoloměj SLAVÍK. *Piezoelektrina a její použití v technické praxi ...* V Praze: Jednota českých matematiků a fyziků, 1940. Cesta k vědě (Jednota českých matematiků a fyziků).
- [8] ORIC® Rotation Stages with Piezoelectric Inertia Drive. *Thorlabs* [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=13798
- [9] Compact Motorized Rotation Stages. *EO Edmund optics / worldwide* [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/f/compact-motorized-rotation-stages/39950/>
- [10] 7G174-30 - Small Goniometer. *Standa* [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://www.standa.lt/products/catalog/translation_rotation?item=54&prod=small_goniometer
- [11] 40X40MM GONIOMETER, BRASS DOVETAIL, 1-AXIS, +/-20 DEG, 35MM AXIS HT, WORM-GEAR, M3 THD. *OptoSigma* [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://www.optosigma.com/eu_en/40x40mm-goniometer-brass-dovetail-1-axis-20-deg-35mm-axis-ht-worm-gear-m3-thd-GOH-40A35.html
- [12] Continuous Rotation Stage. *Thorlabs* [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=991&pn=CR1/M
- [13] 30mm, Metric Rotary Stage. *EO Edmund optics / worldwide* [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/p/30mm-metric-rotary-stage/21013/#>
- [14] HTD 3M-90-6. *TYMA* [online]. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/produkty/htd-3m-90-6/>
- [15] 14-3M-15 (typ 1F, Al slitina). *TYMA* [online]. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/produkty/14-3m-15-typ-1f-al-slitina/>
- [16] Fig1. *ResearchGate* [online]. [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-a-stepper-motor-with-three-teeth4_fig1_324261648

- [17] HUGHES, Austin a Bill DRURY. *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications*. 3rd ed. Oxford: Newnes, 2006. ISBN 07-506-4718-3.
- [18] Krokový motor NEMA 17 17HS4023 0,14Nm. *Láskakit* [online]. [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/krokovy-motor-nema-17-17hs4023-0-14nm/#relatedFiles>
- [19] Arduino Uno Rev3. -+STORE [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?_gl=1*_xdt7k*_ga*MTkyMjUwMzE5LjE3MTQ4NTgwMjg.*_ga_NEXN8H46L5*MTcxNDg1ODAyNy4xLjEuMTcxNDg1ODAzNS4wLjAuMTQ0ODQ5Mzk0MA..*_fplc*dlh3REdxajklMkJIV0E4Y1dEOVVNUjJ1MUd0azdpNW1mcnY4RGxRb2RMb2JDTjBGeUxqOGJSUDlxZ21EeDBtZ0VoREQ3RzM5JTJGc0k3eG42VCUyQmlYV00IMkZTd21pMkVoZlF5T2E2OE43WUMlMkJRcmZ4QTdTd3Y2WDIBUnRhNFJkWjZEUSUzRCUzRA..
- [20] Arduino CNC shield V3. *Láskakit* [online]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/arduino-cnc-shield-v3/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw0YGYBhByEiwAQmBEWvt67fQd5ISp5Zi1Db7Ge79jojc7OMaxnFSMRoobo8UQeYm06AyKR0CTCgQAvD_BwE
- [21] DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection. *Láskakit* [online]. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/user/related_files/a4988.pdf
- [22] A4988 driver pro krokové motory. *Láskakit* [online]. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/a4988-driver-pro-krokove-motory/>
- [23] Zdroj 12V 5A 60W spínaný SANPU YS-60-12. *Drátek* [online]. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/74698-zdroj-12v-5a-60w-spinany-sanpu-ys-60-12.html>
- [24] Desktop Guide (Windows Forms .NET). *Microsoft* [online]. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/desktop/winforms/overview/?view=netdesktop-6.0>
- [25] Koncový mikrospínač a pákový doraz s kladkou - 5A 125V. *Drátek* [online]. [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/1113-koncovy-doraz-pakovy-s-kladkou-5a-125v.html>
- [26] *Odpružený šroub ELESA+GANter s kuličkou GN 615.3-M12-K* [online]. Mateza [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: https://www.mateza.cz/e-shop/odpruzeny-sroub-s-kulickou-gn-615-3-m12-k?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwupGyBhBBEiwA0UcqaMWJtuUucDOq4jXEpNfL6JMc2iFxaSQgTy0_1E0Eab0H91XLWSzBehoCwJ4QAvD_BwE
- [27] CNC lineární pohon s krokovým motorem T8x8 - 100 mm. *Drátek* [online]. [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/74095-cnc-linearni-pohon-100-mm-s-krokovym-motorem.html>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - ZEISS Axio Observer for Materials[1].....	12
Obrázek 2 – Polohovací stolek X, Y světelného mikroskopu ZEISS	13
Obrázek 3 – Vyjímatelná vložka polohovacího stolku pro světelný mikroskop ZEISS	13
Obrázek 4 - Hexapod od firmy Physik Instrumente[3]	14
Obrázek 5 - Motorizovaný goniometr od firmy Zaber Technologies[5].....	15
Obrázek 6 - Motorizovaný goniometr od firmy Thorlabs[6]	15
Obrázek 7 – Piezo rotační platforma od firmy Thorlabs[8]	16
Obrázek 8 – Manuální goniometr od firmy Standa[10]	17
Obrázek 9 – Manuální goniometr od firmy OptoSigma[11]	17
Obrázek 10 - Mechanická rotační plošina od firmy Thorlabs (vlevo) a od firmy Edmund Optics (vpravo) [12; 13].....	17
Obrázek 11 – Vlastní návrh celého zařízení	18
Obrázek 12 – Model s názvem Strop.....	19
Obrázek 13 – Řemen a řemenice s HTD profilem[14; 15].....	20
Obrázek 14 – Držák motoru ovládající rotační platformu.....	20
Obrázek 15 – Přípravek pro spojení motoru a hřídele rotační platformy	21
Obrázek 16 – Schéma hybridního krokového motoru[16]	21
Obrázek 17 – Krokový motor Nema17 17HS4023[18].....	22
Obrázek 18 – Arduino Uno[19].....	24
Obrázek 19 – CNC Shield V3[20].....	24
Obrázek 20 – Schéma zapojení základních funkcí CNC Shield[20].....	25
Obrázek 21 – Driver pro krokové motory A4988[22].....	25
Obrázek 22 – Spínaný zdroj SANPU 12 V, 5 A, 60 W[23]	26
Obrázek 23 – Grafické rozhraní pro ovládání krokových motorů.....	26
Obrázek 24 – Koncový spínač[25]	27
Obrázek 25 – Vložka pro spojení goniometrické a rotační platformy	28
Obrázek 26 – Model držáku hliníkových podstavců se vzorky.....	29
Obrázek 27 – Model držáku pryskyřičných pecek se vzorky.....	29
Obrázek 28 – Model přípravku pro držáky vzorků	30
Obrázek 29 – Odpružený šroub[26]	30
Obrázek 30 – Model držáku koncového spínače.....	31
Obrázek 31 – Model držáků koncových spínačů.....	31
Obrázek 32 – Model držáku koncového spínače.....	32
Obrázek 33 – Model úchytu držáků koncových spínačů.....	32
Obrázek 34 – CNC lineární pohon[27].....	33
Obrázek 35 – Model vložky pro polohovací stolek mikroskopu.....	34
Obrázek 36 – Model držáku lineárního posuvu tvaru L.....	34
Obrázek 37 – Model přípravku pro připojení mikrokontroleru.....	35
Obrázek 38 – Model boxu k fixaci mikrokontroleru	35
Obrázek 39 – Polohovací zařízení jako celek.....	36
Obrázek 40 – Detail na řemeny a řemenice polohovacího zařízení spojující motory a goniometr.....	37
Obrázek 41 – Detail na motory polohovacího zařízení ovládající goniometr.....	37
Obrázek 42 – Detail na koncové spínače polohovacího zařízení kontrolující jeden z náklonů	38

SEZNAM PŘÍLOH

- 2024-05-18_kod_arduino – obsahuje kod kterým pracuje mikrokontroler Arduino uno s
krokovými motory
- 2024-05-18_GUI_ – obsahuje kod pro grafické rozhraní polohovacího zařízení