

Mikropočítačově řízený plotr

Josef Zatloukal

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Josef Zatloukal**
Osobní číslo: **A22207**
Studijní program: **B0714A150006 Aplikovaná informatika v průmyslové automatizaci**
Specializace: **Inteligentní systémy s roboty**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Mikropočítačově řízený plotr**
Téma práce anglicky: **Microcomputer controlled plotter**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Vyberte vhodný typ řídicího mikropočítače včetně snímačů a akčních členů potřebných pro realizaci plotru.
3. Proveďte hardwarový návrh plotru a jeho propojení s řídicí jednotkou.
4. Fyzicky zrealizujte navržený plotr.
5. Ověřte funkci zařízení a vyhodnoťte jeho vlastnosti.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Arduino.cc: Oficiální web vývojových desek Arduino [online]. Arduino S.r.l., c2022 [citováno 2024-10-22]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>
2. *Espressif* [Online]. Dostupné z: <https://www.espressif.com>. [cit. 2024-10-22].
3. MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. MM speciál. Praha: MM publishing, 2014. ISBN 9788026067801.
4. Raspberry Pi Ltd. *Raspberry Pi Pico W Datasheet: An RP2040-based microcontroller board with wireless*. [online]. 2024 [cit. 2024-10-17]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/>.
5. ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada Publishing, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Dostálek, Ph.D.
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **13. prosince 2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2025**



doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 13. prosince 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.
- Prohlašuji, že při tvorbě této práce jsem použil nástroj generativního modelu AI ChatGPT <https://chatgpt.com> jako pomocný nástroj při parafrázování a úpravě textu. Po použití tohoto nástroje jsem provedl/a kontrolu obsahu a přebírám za něj plnou zodpovědnost.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá kompletním návrhem, výběrem komponent a sestavením plotru řízeného mikropočítačem. Zařízení je navrženo s důrazem na dosažení vysoké přesnosti a rychlosti díky využití kinematiky typu CoreXY. Plotr je řízen mikropočítačem ESP32-WROOM-32U a využívá open-source firmware FluidNC. Plotr umožňuje vykreslování na dvourozměrnou plochu pomocí popisovače. Nakonec byly experimentálně otestovány a zhodnoceny základní vlastnosti zařízení. Práce zároveň slouží jako návod pro návrh a sestavení podobného zařízení.

Klíčová slova: plotr, mikropočítač, CoreXY, krokový motor, FluidNC, řízení pohybu

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the complete design, component selection, and construction of a plotter controlled by a microcontroller. The device is designed with an emphasis on achieving high precision and speed through the use of CoreXY kinematics. The plotter is controlled by an ESP32-WROOM-32U microcontroller and utilizes the open-source firmware FluidNC. It enables drawing on a two-dimensional surface using a pen. Finally, the basic properties of the device were experimentally tested and evaluated. The thesis also serves as a guide for designing and assembling a similar device.

Keywords: plotter, microcontroller, CoreXY, stepper motor, FluidNC, motion control

Rád bych poděkoval panu Ing. Petru Dostálkovi, Ph.D. za vstřícnost a odborné vedení během zpracování této bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 TYPY PLOTŘŮ	15
1.1 DĚLENÍ PODLE KONSTRUKCE.....	15
1.1.1 Plošný plotr	15
1.1.2 Bubnový plotr.....	16
1.2 DĚLENÍ PODLE TECHNOLOGIE TISKU.....	18
1.2.1 Perový plotr	18
1.2.2 Inkoustový plotr	18
1.2.3 Elektrostatický plotr	19
1.2.4 Řezací plotr	19
1.2.5 Laserový plotr	20
1.3 ROZDÍL MEZI TISKÁRNOU A PLOTREM.....	21
1.3.1 Vektorová grafika.....	22
1.3.2 Rastrová grafika	23
2 KOMPONENTY	24
2.1 MIKROPOČÍTAČ	24
2.1.1 Vývojová deska	25
2.2 LINEÁRNÍ VEDENÍ.....	28
2.2.1 Kluzná ložiska	28
2.2.2 Recirkulační kuličková ložiska	29
2.2.3 Válečková ložiska	31
2.3 ŘEMENY PRO PŘÍMOČARÝ POHYB.....	32
2.3.1 Ozubené řemeny GT2	32
2.4 KROKOVÝ MOTOR	33
2.4.1 Konstrukce a princip činnosti.....	33
2.4.2 Dělení podle konstrukce rotoru	34
2.4.3 Dělení podle zapojení statoru.....	35
2.4.4 Výhody a nevýhody krokových motorů.....	35
2.4.5 Použití krokových motorů.....	35
2.5 ŘÍZENÍ KROKOVÉHO MOTORU.....	36
2.5.1 Vlnový režim.....	37
2.5.2 Režim plného kroku	37
2.5.3 Režim polovičního kroku	38
2.5.4 Mikrokrokování.....	38
3 KINEMATIKA.....	39
3.1 KARTÉZSKÝ SYSTÉM	39
3.2 COREXY	40

3.3	H-BOT.....	41
4	PROGRAMOVÁNÍ PLOTRU	43
4.1	STRUKTURA BLOKU G-KÓDU.....	43
4.2	ZÁKLADNÍ G-KÓDY PRO PEROVÝ PLOTR.....	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST	46
5	KONSTRUKCE.....	47
5.1	RÁM	47
5.1.1	Montáž.....	47
5.2	LINEÁRNÍ VEDENÍ	48
5.2.1	Čištění lineárního ložiska	48
5.2.2	Mazání lineárního ložiska.....	49
5.2.3	Montáž.....	49
5.3	VYTISKNUTÉ KONSTRUKČNÍ DÍLY NA KADKY	51
5.3.1	Návrh.....	51
5.3.2	Montáž.....	53
5.4	KROKOVÉ MOTORY.....	54
5.4.1	Držák na motor.....	54
5.5	OZUBENÝ ŘEMEN.....	55
5.5.1	Vedení a napínání ozubeného řemene	55
5.6	ŘÍDICÍ DESKA.....	56
5.7	MOTOR DRIVERY (OVLADAČE MOTORŮ).....	57
5.7.1	Nastavení proudu motoru	58
5.7.2	Nastavení mikrokrokování	59
5.8	KONCOVÉ SPÍNAČE	60
5.9	ZVEDACÍ MECHANISMUS PERA.....	62
5.9.1	Servomotor a napájení.....	63
5.10	MONTÁŽ ELEKTRONIKY A KABELÁŽ	64
5.11	VÝSLEDNÁ KONSTRUKCE	66
6	PROGRAM.....	67
6.1	NAHRÁNÍ FIRMWARE DO MIKROPOČÍTAČE.....	67
6.2	KONFIGURAČNÍ SOUBOR.....	70
6.3	SPUŠTĚNÍ G-KÓDU.....	71
7	OVĚŘENÍ FUNKCE A ZHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ PLOTRU.....	72
7.1	TEST OPAKOVATELNOSTI.....	72
7.2	TEST PŘESNOSTI	73
7.3	TEST VIBRACÍ	74

7.4	TEST DLOUHODOBÉHO BĚHU	74
ZÁVĚR		76
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		77
SEZNAM OBRÁZKŮ		81
SEZNAM TABULEK		83
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		84
SEZNAM PŘÍLOH		86

ÚVOD

Plotr je zařízení umožňující kreslení či vyřezávání na dvourozměrnou plochu. První plotry se začaly objevovat v druhé polovině 20. století a postupně se začaly vyvíjet různé technologie vykreslování. I když jsou dnes plotry často nahrazovány tiskárnami, v některých odvětvích jsou však stále nenahraditelné díky schopnosti pracovat s vektorovou grafikou, a tak poskytnout vysokou přesnost a detailní výstup.

Tato práce se zaměřuje na návrh, konstrukci a řízení perového plošného plotru, který má oproti jiným typům jednodušší konstrukci a lze sestavit z běžně dostupných komponent, které lze snadno pořídit z internetových obchodů specializujících se na CNC nebo 3D tisk. Díky aktivní komunitě a množství dostupných návodů na internetu je možné nalézt řešení různých problémů, které mohou nastat u stavby takového zařízení. I v této práci byly informace často čerpány z webových stránek a článků zabývajících se tematikou CNC a 3D tisku.

Pro řízení zařízení jako je plotr je nezbytné použít řídicí jednotku, která dokáže přesně řídit otáčení krokových motorů. V současnosti jsou oblíbené vývojové desky osazené mikropočítači jako jsou Arduino UNO, ESP32 nebo Raspberry Pi Pico. Pro efektivní využití mikropočítače při řízení pohybu je možné využít různé open-source firmwary jako jsou GRBL, Marlin nebo FluidNC. Díky rozsáhlé uživatelské komunitě a dostupnosti mnoha návodů na internetu je tak možné proniknout do světa CNC i bez hlubších předešlých znalostí.

Cílem této práce je navrhnout a sestavit perový plošný plotr s důrazem na rychlý a zároveň přesný pohyb, který bude schopen vykreslovat detailní obrazy na rovinnou plochu na základě zadaného vstupního kódu. Současně práce slouží jako návod pro zájemce o stavbu podobného zařízení.

V práci jsou představeny základy fungování plotru, různé technologie vykreslování a rozdíly mezi plotrem a tiskárnou. Dále je popsán výběr různých komponent na základě požadovaných vlastností, kinematika pohybu a programování pomocí G-kódu. Následuje detailní popis návrhu a konstrukce plotru. Poté následuje nastavení firmwaru FluidNC a konfigurace. Nakonec se práce zaměřuje na testování zařízení a jeho základní vlastnosti.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 TYPY PLOTRŮ

Plotry představují důležitou součást moderního tisku a zpracování grafiky. Na současném trhu je k dispozici široká škála plotrů, které se liší svou konstrukcí, technologií tisku či oblastí využití. Tyto rozdíly jsou zásadní pro volbu vhodného zařízení v závislosti na konkrétním účelu použití, ať už jde o technické výkresy, reklamní grafiku nebo řezání různých materiálů.

1.1 Dělení podle konstrukce

Plotry můžeme dělit podle konstrukce na dva základní typy: plošné plotry a bubnové plotry. Tyto typy se liší v tom, jak pracují s médiem a v konstrukčním provedení pohybu tiskové nebo řezací hlavy.

1.1.1 Plošný plotr

Plošný neboli stolní plotr má pevnou rovinnou základnu, na kterou se umístí používané médium, jako je například papír. Médium se pevně přichytí k základně, aby se zamezilo pohybu, který by mohl ovlivnit výslednou kvalitu tisku. Nad tímto médiem se potom pohybuje nástroj (pero, tisková hlava, čepel) ve dvou osách a je přikládán a zvedán v závislosti na požadované trajektorii, čímž vznikne výsledný obraz. [1; 2]

Výhody:

- Plošný plotr nabízí velmi přesný a detailní výstup.
- Může též pracovat s různými pevnými materiály jako je například karton, plast nebo kov. [1; 2]

Nevýhody:

- S rostoucí velikostí pracovního média výrazně roste i velikost plotru, což vede k vyšším pořizovacím nákladům.
- Je pomalejší než bubnový plotr. [1; 2]

Použití:

Díky detailnímu tisku ve vysokém rozlišení se využívá zvláště v architektuře, inženýrství, umění a grafice. [1]



Obrázek 1: Stolní řezací plotr [32]

1.1.2 Bubnový plotr

Bubnový plotr má papír či jiný materiál namotaný na velkém válci (bubnu). Válec se otáčí a posouvá tak médium do požadované polohy pod kreslicí nástroj. Rotace tohoto válce tvoří osu Y a nástroj se pohybuje v ose X. Pokreslený papír se odvíjí ven z válce. Tímto způsobem je možné kreslit i na dlouhé plochy. [1; 2]

Výhody:

- Bubnový plotr dokáže pracovat s dlouhými formáty materiálu.
- Velikost materiálu tolik neovlivní velikost stroje, protože se médium navine na válec.
- Vysoká rychlost tisku. [1; 2]

Nevýhody:

- Bubnový plotr není určen pro pevné materiály, jelikož pevný materiál nelze navinout na buben.
- Jelikož je uzpůsoben spíše pro rychlý a objemný tisk než pro maximální přesnost, tak může mít nižší rozlišení výstupu, tedy omezenou schopnost vykreslovat velmi jemné detaily. [1; 2]

Použití:

Díky možnosti kvalitního tisku na velký formát se bubnové plotry používají na velkoformátové projekty, v kartografii či na technické výkresy. [1; 2]



Obrázek 2: Historický bubnový plotr Calcomp (1966) [33]



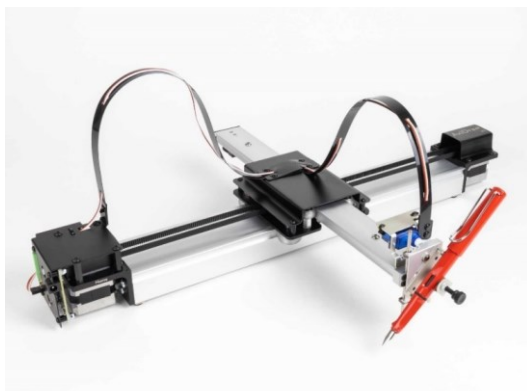
Obrázek 3: Moderní bubnový plotr [34]

1.2 Dělení podle technologie tisku

Plotry lze dále dělit na základě technologie, kterou využívají ke zpracování média. Kromě tisku existují také plotry specializované na řezání či gravírování. Každý z těchto principů je vhodný pro jiné použití a pracuje s různými druhy materiálů. [1; 2]

1.2.1 Perový plotr

Perový plotr používá pro kreslení na materiál pero, kterým pohybuje pomocí ramena v osách X a Y. Pohyb je ovládán pomocí dvou motorů a může vykonávat pohyby z bodu do bodu. Pero tedy pracuje na základě vektorové grafiky a výstupem je velmi kvalitní a detailní kresba. Avšak nemá vysoké barevné spektrum, protože používá jen jedno pero nebo pár základních barev, které střídá. Perový plotr je sice předchůdce tiskárny, přesto se ale dnes používá díky vysoce detailnímu výstupu například v inženýrství, architektuře, školství, umění a designu. [1; 2]



Obrázek 4: Perový plotr AxiDraw V3 [35]

1.2.2 Inkoustový plotr

Inkoustový plotr používá inkoust, který je malými tryskami vypouštěn z tiskové hlavy přímo na materiál. Poskytuje vysoce kvalitní tisk s širokým barevným spektrem. Je velmi efektivní, jelikož dokáže tisknout vysokou rychlostí za nízké provozní náklady. Tento plotr na rozdíl od klasické inkoustové tiskárny dokáže tisknout na velkou plochu různých materiálů, takže je ideální volbou pro tisk reklamních billboardů a bannerů. [1; 2]



Obrázek 5: Inkoustový plotr [36]

1.2.3 Elektrostatický plotr

Elektrostatický plotr tiskne tak, že nabije papír v určitých bodech záporným elektrickým nábojem a tyto body poté přitahují kladně nabitý toner, a tak vzniká výsledný obraz. Tento plotr se vyznačuje vysokou rychlostí a tichým provozem. Toner je při vyšším množství levnější než inkoust, avšak nemá tak vysoké rozlišení oproti ostatním typům a nemá pestré barevné spektrum jako je tomu u inkoustové tiskárny. [1; 3]



Obrázek 6: Elektrostatický plotr [37]

1.2.4 Řezací plotr

Řezací plotr je speciální stroj, který slouží k řezání různých plochých materiálů jako jsou papír, karton, textilní látky a plastové nebo vinylové fólie. Místo pera či tiskové hlavy tento stroj používá čepel. Po vložení materiálu do plotru čepel řízená počítačem řeže daný materiál přesně v požadovaném místě. Může se nastavit řezná síla či rychlost řezu. Používá se pro vyřezávání reklamních předmětů (samolepky, polepy na auta), nažehlovacích folií na trika, šablon, etiket a štítků. Je to velmi přesný a efektivní stoj, který zvládne i složitější řezy. Poslouží v několika odvětvích (reklamní průmysl, balící průmysl, textilní průmysl), protože dokáže pracovat s různými materiály. Po čase je potřeba vyměnit řeznou čepel, což zvyšuje náklady. [1; 2]



Obrázek 7: Bubnový řezací plotr [38]

1.2.5 Laserový plotr

Laserový plotr, známý také jako gravírovací stroj, využívá laserovou hlavu, kterou pomocí ramene pohybuje nad pracovním médiem v osách X a Y. Tato hlava vysílá laserový paprsek, který tepelným působením odebírá vrstvu materiálu, nebo materiál kalí, čímž vytváří trvalý obraz v materiálu. Při tomto procesu může dojít i ke zbarvení povrchu materiálu. Například u dřeva se mohou objevit tmavé až černé oblasti, kde došlo ke spálení povrchu. U jiných materiálů může dojít ke změně barvy materiálu v závislosti na jejich složení a reakci na teplo. Tento proces umožňuje gravírování nebo řezání různých materiálů, jako je dřevo, plast, kov či kůže. [5]



Obrázek 8: Laserový plotr [39]

1.3 Rozdíl mezi tiskárnou a plotrem

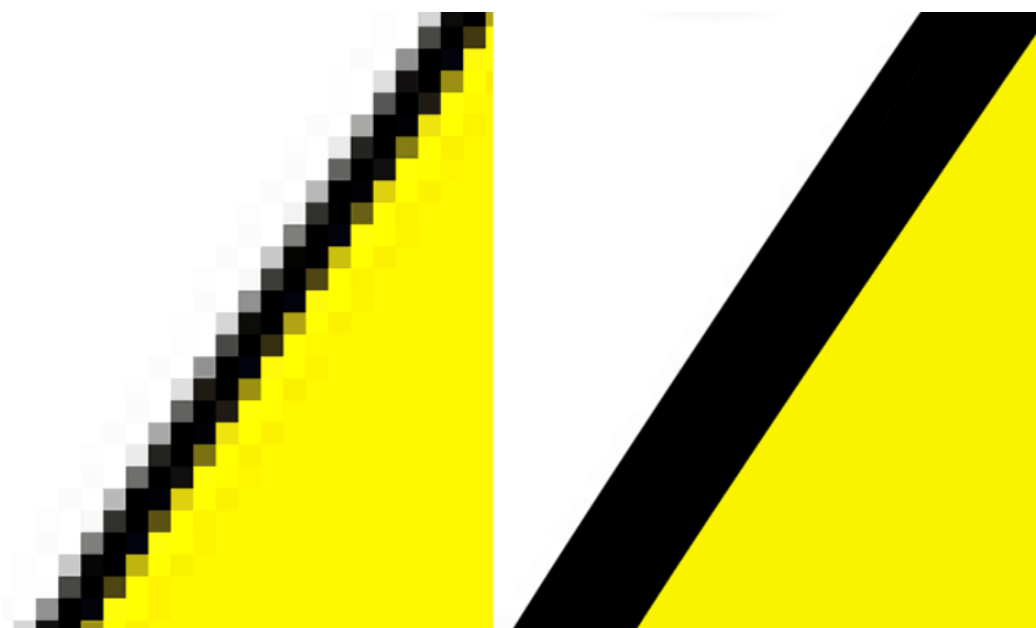
I když na první pohled se zdá, že plotr a tiskárna je téměř totožný stoj, je mezi nimi hned několik rozdílů, které ovlivňují oblast jejich použití.

Tiskárny běžně tisknou do formátu A4 nebo A3, avšak plotr je konstruovaný pro tisk daleko větších formátů, které mohou dosahovat i několika metrů. Tato vlastnost se využívá zejména v reklamním průmyslu pro velké bannery nebo ve stavebním či strojním průmyslu, pokud je potřeba výkres velkých rozměrů. Plotr je také více flexibilní ve výběru pracovního materiálu, jelikož dokáže tisknout například i na plast, karton, kov, dřevo atd. [4]

Jelikož plotr pohybuje kreslícím nebo řezacím nástrojem ve dvou osách, X a Y, podobně jako při zpracování vektorové grafiky, je schopen vytvářet přesnější a ostřejší výkresy v různém rozlišení. To si však na druhou stranu žádá více času.

Zatímco tiskárna funguje na základě rastrové grafiky tak, že tiskne body po řádcích, ze kterých vzniká obraz, který nemusí být tak detailní a ostrý. Zato se jedná o rychlejší způsob, který běžným, nenáročným potřebám vyhovuje více než tisk plotrem. [5]

Na obrázku č. 9 je znázorněno porovnání rastrového a vektorového obrázku. Z něj je patrné, že rastrový obraz se při zvětšení vyznačuje nižším rozlišením a ztrátou kvality, zatímco vektorový obraz si i při změně měřítka zachovává vysokou ostrost a detailnost.



Obrázek 9: Porovnání – rastrový obrázek vlevo a vektorový obrázek vpravo [40]

1.3.1 Vektorová grafika

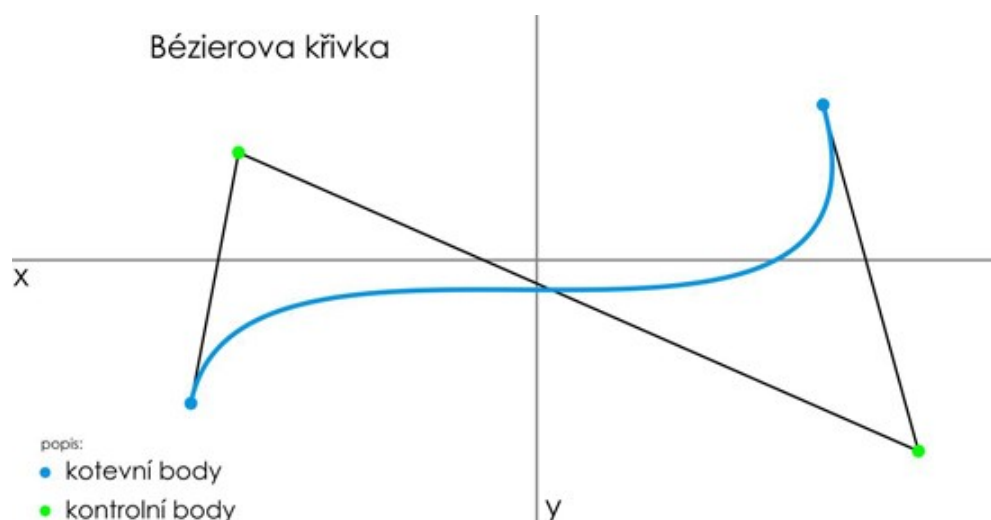
Vektorová grafika je způsob reprezentace dvourozměrných obrazů pomocí matematických výrazů, které definují geometrické objekty, jako jsou body, přímky, křivky a další tvary. Základním prvkem je křivka (Bézierova křivka), která se zhotoví na základě kotevních a kontrolních bodů (viz obrázek č. 10). Součástí matematického zápisu je též barva, tloušťka, barva obrysu, zakřivení aj. Výhodou vektorové grafiky je, že se při změně velikosti obrazu nemění výsledná kvalita, tak jako tomu je u rastrové grafiky. Při změně se pouze přepočítá matematický výraz, a tak se zachová přesnost a ostrost celého obrazu. Díky těmto vlastnostem se plotry používají pro technické výkresy, v kartografii, či jinde kde je klíčový ostrý obraz. Mezi vektorové formáty patří: CDR, PDF, EPS, SVG. [6]

Výhody vektorové grafiky:

- Vektorový obrázek zabírá méně místa v paměti než rastrový.
- Změnou velikosti obrázku zůstává obrázek stále kvalitní.
- Možnost samostatně upravovat jednotlivé prvky. [6]

Nevýhody vektorové grafiky:

- Složitě pořízení vektorového obrazu.
- Pro zobrazení na běžném zařízení je třeba převést vektorový obrázek na rastrový.
- Více využívá operační paměť a procesor. [6]



Obrázek 10: Bézierova křivka [41]

1.3.2 Rastrová grafika

Rastrový obraz je dvourozměrná matice, skládající se z jednotlivých bodů, kterým se říká pixely. Každý pixel má svou barvu a souřadnici v této matici. Počet pixelů na šířku a na výšku udává rozlišení. Čím více pixelů rastrový obraz obsahuje, tím je obraz na pohled kvalitnější a ostřejší. Dalším důležitým faktorem je barevná hloubka, která udává kolik je možných barev pro zobrazení rastrového obrazu. Na základě rozlišení a barevné hloubky se určuje kvalita obrazu. Při nižším rozlišení výsledný obraz z tiskárny ztrácí ostrost, což může být problém u různých technických výkresů či v kartografii. Ovšem v běžném nenáročném používání tiskáren tohle nebývá problém. Mezi rastrové formáty patří: JPEG, BMP, PDF, TIFF, PNG, GIF [6]

Výhody rastrové grafiky:

- Snadné zobrazení a široká kompatibilita s programy pro práci s rastrovou grafikou.
- Jednoduché vytvoření obrazu pomocí skeneru nebo fotoaparátu. [6]

Nevýhody rastrové grafiky:

- S rostoucím rozlišením rastrový obrázek zabírá hodně místa v paměti.
- Změnou rozlišení obrazu klesá jeho kvalita. [6]

2 KOMPONENTY

Tato kapitola se věnuje jednotlivým komponentám potřebným pro konstrukci plošného perového plotru – od řídicích prvků až po mechanické části zajišťující lineární pohyb. Jsou zde popsány různé typy těchto komponent, jejich výhody, nevýhody i vhodné způsoby použití.

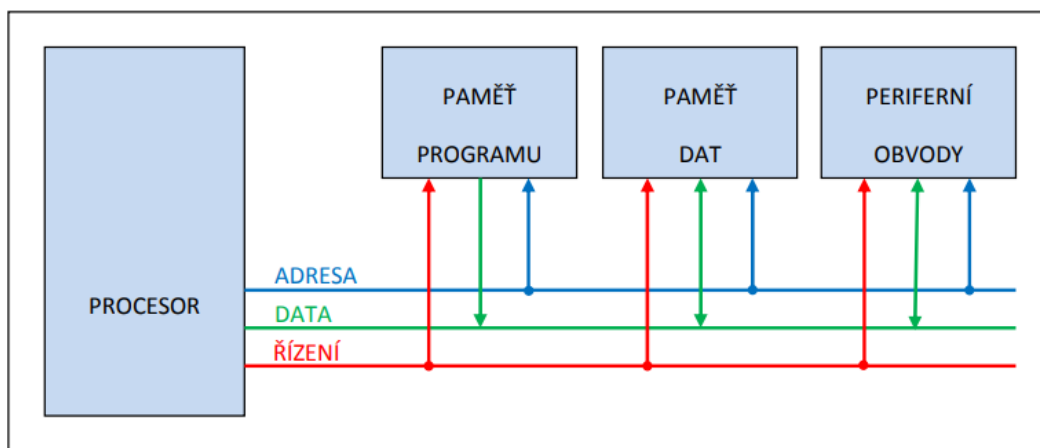
2.1 Mikropočítač

Mikropočítač je počítač malých rozměrů integrován na jednom čipu. Díky těmto malým rozměrům se mohl začít používat pro řízení či měření v různých aplikacích. Například v měřicích přístrojích, mobilních telefonech, televizorech, automobilech, automatizaci či hračkách. [7]

Mikropočítač, tak jako každý jiný počítač se skládá z těchto základních částí:

- **Procesor** – Procesor vykonává instrukce uložené v programové paměti. Procesor načte instrukci, dekoduje ji a poté vykoná příslušnou operaci (např. sčítání, přesun dat, logická operace). Výsledek uloží do registru nebo paměti. [7]
- **Paměť dat (RAM)** – Paměť RAM (Random-Access Memory) také nazývaná jako operační paměť, slouží k dočasnému ukládání dat a instrukcí během programu. Procesor do ní zapisuje a čte z ní potřebné informace pro operace. Po odpojení napájení od zařízení se její obsah vymaže, jedná se o tzv. volatilní paměť. [7]
- **Paměť programu (ROM/Flash)** – Paměť ROM (Read-Only Memory) nebo Flash slouží k uchování firmwaru nebo uživatelského programu, který vykonává mikropočítač. Na rozdíl od RAM je nevolatilní, což znamená, že si uchovává data i po odpojení napájení. ROM bývá pouze pro čtení, zatímco Flash paměť lze přepisovat a aktualizovat. [7]
- **Periferní obvody** – Periferní obvody zajišťují komunikaci mikropočítače s okolními zařízeními a umožňují interakci s reálným světem. Patří sem časovače, čítače, přerušeni, převodníky a výstupní rozhraní. [7]
 - Přerušeni umožňuje okamžité přerušeni běžícího programu a vykonání specifické operace na základě externí události.
 - Časovače a čítače se používají pro měření časových intervalů a počítání událostí.

- A/D převodníky převádějí analogové signály na digitální, zatímco D/A převodníky umožňují převod digitálních hodnot na analogové signály.
- Výstupní rozhraní (např. GPIO, UART, I2C, SPI) umožňuje mikropočítači komunikovat s externími zařízeními, jako jsou senzory, displeje nebo motory, a to jak pro vstupní, tak výstupní operace.



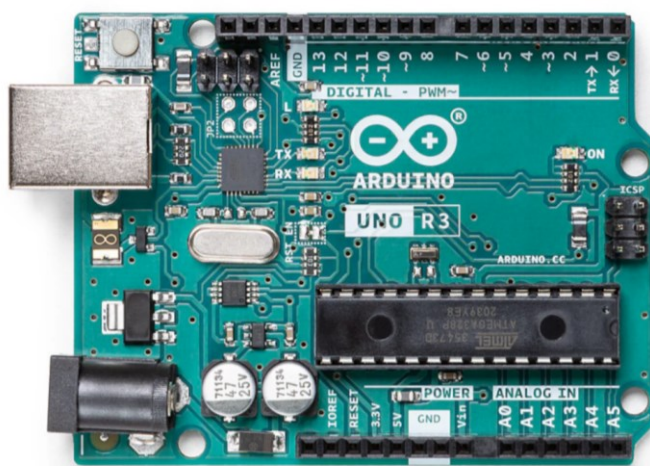
Obrázek 11: Zjednodušené schéma počítače [7]

2.1.1 Vývojová deska

Vývojová deska slouží jako praktické prostředí pro programování a testování mikropočítačových aplikací. Obsahují nejen samotný mikropočítač, ale i další součásti, které usnadňují práci, například USB komunikační rozhraní pro nahrávání programů, napájení, pinové konektory nebo LED diody. Mezi nejčastěji používané vývojové desky patří desky z rodiny Arduino [8], ESP32/ESP8826 [9] a Raspberry Pi Pico. [10; 11] Každá z nich má své specifické vlastnosti a je vhodná pro různé typy projektů – od jednoduchých automatizací, až po pokročilé aplikace s Wi-Fi nebo Bluetooth.

Arduino

Arduino je jedna z nejrozšířenějších vývojových platform určená pro začátečníky i pokročilé uživatele. Nabízí jednoduché programování v prostředí Arduino IDE a velkou komunitu, která poskytuje spoustu návodů a knihoven. Nejznámější modely jsou Arduino Uno s mikropočítačem ATmega328P a Arduino Mega s ATmega2560, které se liší především počtem vstupů a výstupů. Arduino samo o sobě nemá vestavěnou Wi-Fi nebo Bluetooth, ale tyto funkce lze přidat pomocí externích modulů. Výhodou Arduino je jeho jednoduchost, spolehlivost a široká dostupnost. [8]



Obrázek 12: Vývojová deska Arduino Uno R3 [8]

ESP32

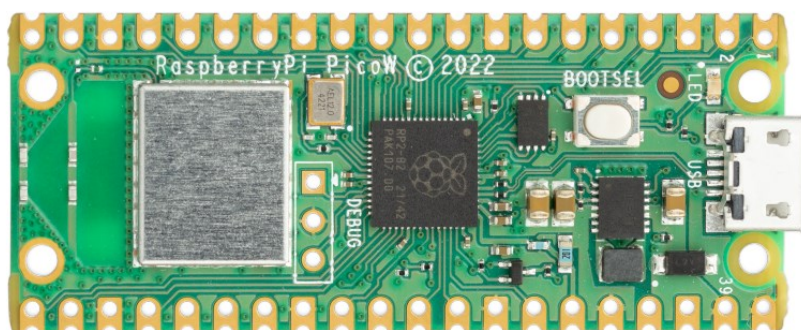
ESP32 je výkonný mikropočítač vyvinutý firmou Espressif, který je oblíbený hlavně díky vestavěné podpoře Wi-Fi a Bluetooth. Oproti Arduino nabízí vyšší výpočetní výkon, více paměti a rychlejší procesor. Často se používá v projektech chytré domácnosti, bezdrátové komunikace nebo IoT zařízení. Programovat ho lze v prostředí Arduino IDE nebo ve frameworku ESP-IDF. Díky nízké ceně a širokým možnostem je ESP32 vhodnou volbou pro pokročilejší projekty, kde je potřeba bezdrátová komunikace nebo více výpočetního výkonu než u klasického Arduina. [9]



Obrázek 13: Vývojová deska ESP32-S2-DevKitM-1 [42]

Raspberry Pi Pico

Raspberry Pi Pico je vývojová deska založená na mikropočítači RP2040, který vyvinula společnost Raspberry Pi. [10] Tento mikropočítač nabízí dvě jádra ARM Cortex-M0+ s frekvencí až 133 MHz, což poskytuje vyšší výkon než tradiční 8bitové mikropočítače. Raspberry Pi Pico je ideální pro projekty, které vyžadují více výpočetního výkonu, ale bez potřeby plného operačního systému, jaký používají například modely Raspberry Pi s Linuxem. Deska je velmi cenově dostupná, má 26 GPIO pinů a je kompatibilní s Arduino IDE, což usnadňuje její programování. Pico je ideální pro projekty, které zahrnují senzory, motory a jiné komponenty. [11]



Obrázek 14: Vývojová deska Raspberry Pi Pico W [11]

2.2 Lineární vedení

Lineární vedení je mechanický prvek, který umožňuje přesný pohyb v přímém směru. Využívá se zde valivých těles, jako jsou kuličky nebo válečky, které minimalizují tření a zajišťují hladký chod neseného břemena. Tento princip je široce využíván v různých oblastech, například v CNC strojích, 3D tiskárnách, XY plotrech a dalších automatizovaných systémech, kde je potřeba přesné polohování v ose. Pro většinu aplikací se používá jeden ze tří hlavních typů lineárního vedení: kluzná ložiska, recirkulační kuličková ložiska a válečková ložiska. [12]

2.2.1 Kluzná ložiska

Kluzná ložiska umožňují pohyb pomocí kluzného kontaktu mezi vodicí tyčí a ložiskem. Ložiska jsou vyrobena z měkčích materiálů, jako je plast, kompozit nebo bronz, zatímco vodicí tyč je obvykle z tvrdšího materiálu, například z hliníku nebo oceli. Tento systém se vyznačuje jednoduchou konstrukcí, nízkými náklady a samomaznými vlastnostmi, což snižuje potřebu údržby. Přestože jsou kluzná ložiska méně přesná než kuličková vedení, dokážou nést vysoká zatížení a fungovat v náročných podmínkách. [12]

Výhody:

- Nízké náklady a jednoduchá montáž.
- Samomazná varianta nevyžaduje pravidelné mazání.
- Odolnost vůči nečistotám a vlhkosti.
- Vhodné pro aplikace s vysokým zatížením. [12]

Nevýhody:

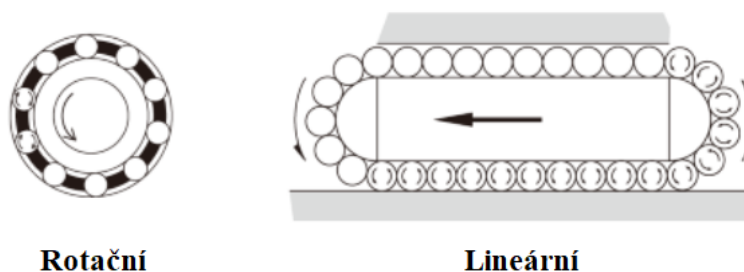
- Vyšší tření než u valivých ložisek.
- Nižší přesnost a možné vůle při pohybu.
- Opotřebení může vést ke snížení přesnosti a nutnosti výměny. [12]



Obrázek 15: Kluzné ložisko na vodicí tyči [43]

2.2.2 Recirkulační kuličková ložiska

Recirkulační kuličková ložiska se dělí na dvě hlavní kategorie podle tvaru vodícího prvku, po kterém se pohybují: kulatý hřídel a profilovaná kolejnice. U obou typů kuličky přenášejí zátěž a recirkulují mezi zatíženou a nezatíženou částí ložiska. [12]



Obrázek 16: Porovnání rotačního a lineárního ložiska [44]

Kulatý hřídel s kuličkovým ložiskem

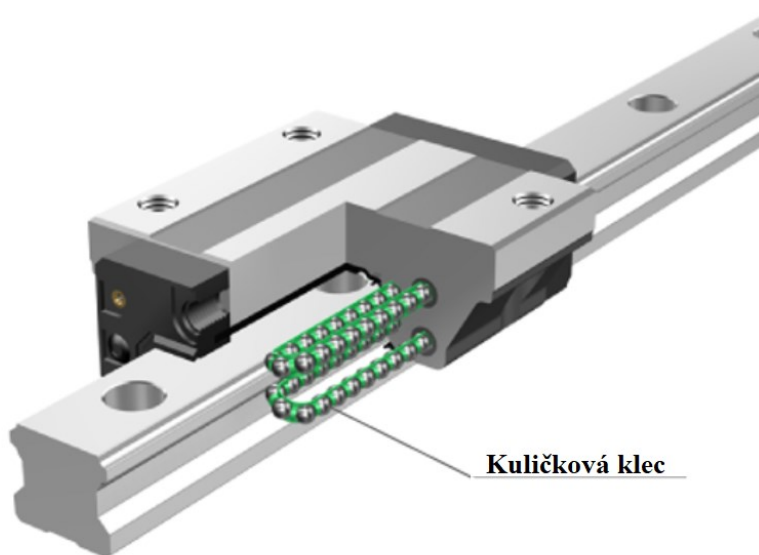
Konstrukce zahrnuje pevnou, hladkou a přesně opracovanou tyč (hřídel), obvykle vyrobenou z kalené nebo nerezové oceli. Po této tyči se pohybuje kuličkové ložisko, které obsahuje kuličky zajišťující plynulý pohyb a vysokou přesnost (viz obrázek č. 17). [12]



Obrázek 17: Kuličkové ložisko na kulatý hřídel [45]

Profilovaná kolejnice s vozíkem

Profilovaná kolejnice má přesné drážky pro kuličky, ve kterých se pohybuje vozík s kuličkovým ložiskem. Uvnitř vozíku kuličky nepřetržitě recirkulují, což snižuje tření a umožňuje hladký a přesný pohyb s minimální vůlí po celé délce kolejnice. Na obrázku č. 18 je znázorněn řez vozíkem, ve kterém je patrné uložení kuliček v takzvané kuličkové kleci. Tento typ ložiska je běžně používán v CNC strojích a průmyslových aplikacích, které vyžadují precizní a opakovatelné polohování. [13; 12]



Obrázek 18: Řez vozíkem na profilované lineární kolejnici [44]

Výhody:

- Vysoká přesnost a tuhost systému.
- Nízké tření umožňuje rychlý a plynulý pohyb.
- Vhodné pro aplikace s vysokým zatížením. [13]

Nevýhody:

- Vyšší cena oproti jiným systémům.
- Vyžaduje pravidelné mazání a údržbu. [12]

2.2.3 Válečková ložiska

Tento typ lineárního vedení využívá hliníkový profil jako vodící prvek, po kterém se pohybuje vozík osazený válečky (V-kolečky) přesně zapadajícími do jeho drážky. Tento systém je často používán v hobby 3D tiskárnách, laserových gravírovacích plotrech a lehkých CNC strojích. [14]

Výhody:

- Hliníkový profil slouží jako vedení a zároveň jako konstrukční rám.
- Jednoduchá montáž a nízká cena.
- Tichý provoz oproti kuličkovým ložiskům. [14]

Nevýhody:

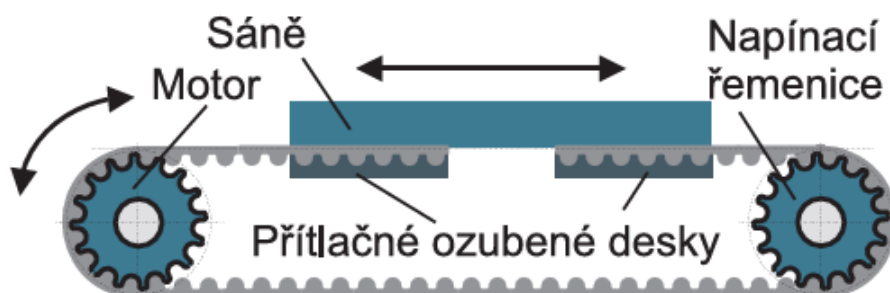
- Plastová kolečka pohybující se po hliníkovém profilu se mohou opotřebovat, což může mít vliv na přesnost.
- Nenabízí stejnou úroveň přesnosti jako lineární ložiska.
- Kolečka mohou způsobit prohnutí nebo vůli v systému, a tak ovlivnit kvalitu pohybu, zejména při vyšších rychlostech. [14]



Obrázek 19: Válečková ložiska (V-kolečka) na hliníkovém profilu [14]

2.3 Řemeny pro přímočarý pohyb

Řemenové systémy jsou jedním z běžných řešení pro zajištění přímočarého pohybu v průmyslových i hobby aplikacích. Nabízejí tichý chod, nízkou hmotnost a minimální údržbu, což je činí vhodnou alternativou k jiným systémům, jako jsou kuličkové šrouby nebo ozubené hřebeny. Významnou výhodou je možnost použití dlouhých řemenů bez složitého seřízení, což umožňuje jejich efektivní nasazení například v CNC strojích, 3D tiskárnách nebo dopravníkových systémech. [15]



Obrázek 20: Uspořádání převodu na přímočarý pohyb s vratnou větví [15]

2.3.1 Ozubené řemeny GT2

Mezi nejběžnější řemeny patří ozubené řemeny GT2, které mají optimalizovaný tvar zubů pro přesný a plynulý přenos síly. Jsou vyráběny z polyuretanu nebo pryže a obsahují tažná lanka z kevlaru, skla či oceli, což zajišťuje vysokou odolnost a dlouhou životnost. Díky své konstrukci eliminují prokluz a jsou ideální pro aplikace s nároky na přesnost a stabilitu pohybu. Je však důležité řemen správně napnout. Příliš volný řemen může způsobit nepřesnosti v pohybu, zatímco nadměrné napnutí zkracuje jeho životnost a zbytečně namáhá ostatní součásti. [15; 13]



Obrázek 21: Ozubený řemen GT2 [46]

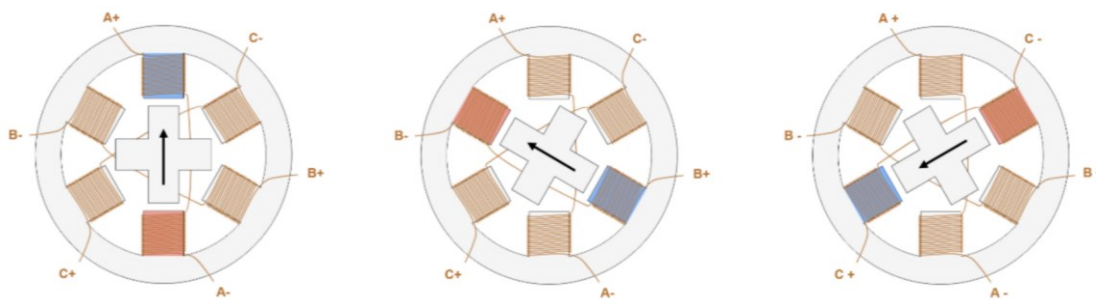
2.4 Krokový motor

Krokový motor je elektrický motor, jehož hlavní vlastností je pohyb rotoru po daných úhlových krocích. Díky této vlastnosti lze přesně určit jeho polohu bez nutnosti zpětné vazby ze senzoru. To umožňuje využití v široké škále aplikací. [16]

2.4.1 Konstrukce a princip činnosti

Krokový motor se skládá z rotoru a statoru. Stator obsahuje cívky, které jsou navinuty na zubech, které vytvářejí magnetické pole, když cívkami prochází proud. Rotor může být tvořen permanentním magnetem, nebo železným jádrem s proměnlivou reluktancí. [16]

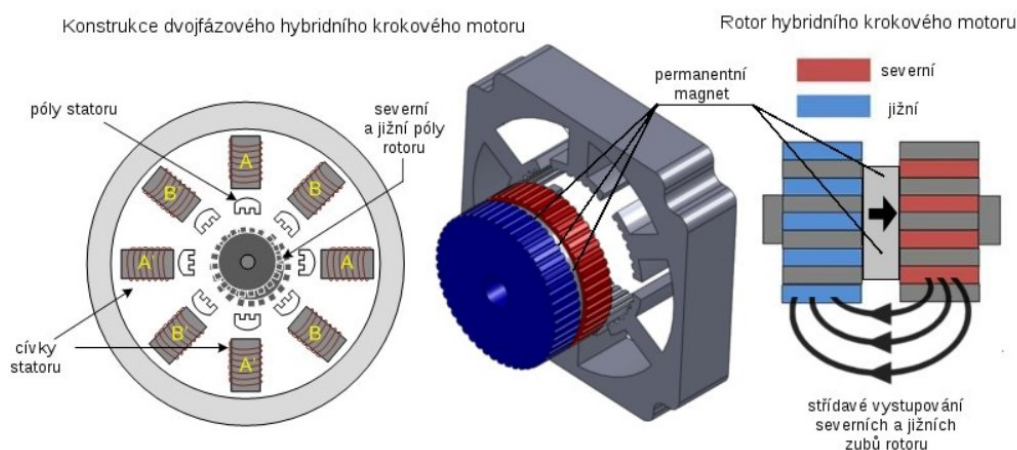
Na obrázku č. 22 je názorně vysvětlen princip krokového motoru. Na statoru jsou tři vinutí označené písmeny A, B a C. Pokud bude napájena cívka A, bude v ní procházet proud, který vytvoří magnetické pole (na obrázku č. 22 je magnetické pole znázorněno modrou barvou pro jižní pól a červenou pro severní pól) a tak donutí rotor, aby se s tímto polem vyrovnal. Po odpojení cívky A od napájení a připojení cívky B se rotor otočí o 60° tak, aby se opět vyrovnal s novým magnetickým polem. Stejně tak po odpojení cívky B a připojení cívky C se rotor opět vyrovná s nově vytvořeným magnetickým polem, a tak provede otočení o dalších 60° . Při opačném pořadí spínaných pólů by se rotor otáčel opačným směrem. [16]



Obrázek 22: Princip funkce krokového motoru [16]

2.4.2 Dělení podle konstrukce rotoru

- **Rotor z permanentního magnetu:** Rotor je tvořen permanentním magnetem, který se vyrovnává s magnetickým polem statoru. Tento typ poskytuje vysoký točivý a aretační moment, ale má nižší rychlost a přesnost. [16]
- **Rotor s proměnnou reluktancí:** Rotor je vyroben ze železa se specifickým tvarem pro zarovnání s magnetickým polem. Tento typ umožňuje vyšší rychlost a přesnost, ale má nižší točivý moment a žádný aretační moment. [16]
- **Hybridní rotor:** Kombinuje vlastnosti obou předchozích variant. Rotor má dvě opačně magnetizované ozubené části, které jsou pootočený tak, aby se zuby přesně střídaly (viz obrázek č. 23). Rotor je magnetizován axiálně, což znamená, že magnetické pole je orientováno podél osy rotoru. Tento typ nabízí vysokou přesnost, rychlost a točivý moment, je však složitější a dražší na výrobu. [16]



Obrázek 23: Konstrukce dvojfázového hybridního krokového motoru [47]

2.4.3 Dělení podle zapojení statoru

- **Unipolární krokový motor:** Každá fáze má jeden vodič navíc, který je připojen ke středovému bodu cívk, což umožňuje jednodušší řízení směru proudu. Ale využívá vždy pouze polovinu vinutí, což se negativně odráží na vlastnostech motoru. [16]
- **Bipolární krokový motor:** Každá fáze má pouze dva vývody, což vyžaduje složitější řízení. Využívá však celého vinutí pro lepší výkon. [16]

2.4.4 Výhody a nevýhody krokových motorů

Výhody:

- Není potřeba snímač polohy pro zpětnou vazbu.
- Oproti jiným motorům má jednoduché řízení a vysokou přesnost.
- Vysoký točivý moment při nízkých otáčkách a možnost držení polohy. [16]

Nevýhody:

- Možnost ztráty kroku při vysokém zatížení, což má negativní vliv na přesnost.
- Motory odebírají proud i v klidové poloze, což snižuje účinnost motoru.
- Nízký točivý moment při vysokých otáčkách. [16]

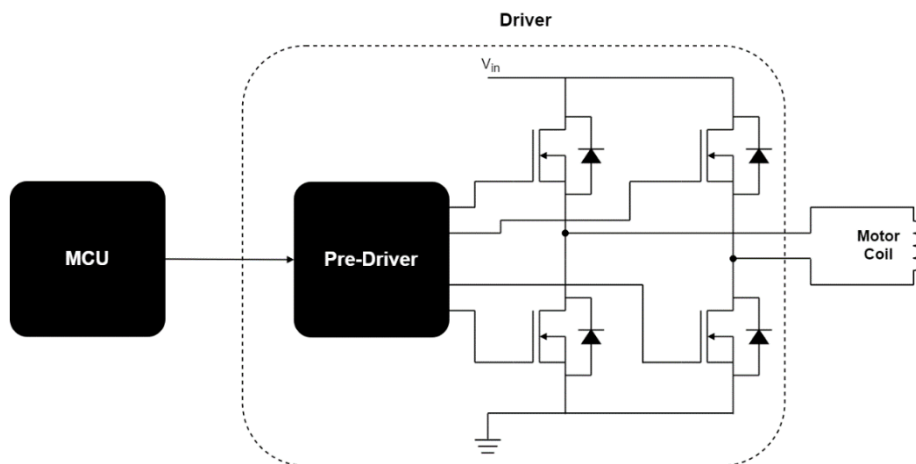
2.4.5 Použití krokových motorů

Díky svým vlastnostem jsou krokové motory využívány v mnoha aplikacích, jako jsou například tiskárny, 3D tiskárny, fotoaparáty, automatizace, CNC stroje, bankomaty a další aplikace, kde je potřeba přesné a jednoduché ovládání polohy. [16]

2.5 Řízení krokového motoru

Pro řízení krokového motoru je nutné, aby byly jednotlivé cívky napájené ve specifické sekvenci. Tento proces zajišťují následující komponenty, jejichž propojení je znázorněno na obrázku č. 24. [16]

- **MCU (mikrokontrolérová jednotka):** Je uživatelem naprogramována tak, aby vysílala požadované řídicí signály, jak se má krokový motor chovat.
- **Pre-Driver:** Poskytuje požadované napětí a proud pro řízení tranzistoru, a tak na základě obdržených signálu z MCU spíná tranzistory zapojené v můstku.
- **Tranzistorový můstek:** Ovládá směr proudu v cívce a tím ovlivňuje směr otáčení rotoru.

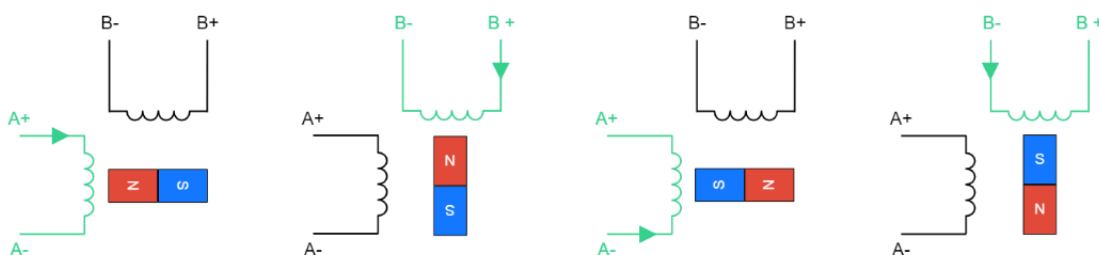


Obrázek 24: Základní schéma řízení krokového motoru [16]

Existují čtyři různé techniky, jakými lze řídit otáčení rotoru, které ovlivňují točivý moment a úhel otočení: vlnový režim, režim plného kroku, režim polovičního kroku a mikrokrokování. [16]

2.5.1 Vlnový režim

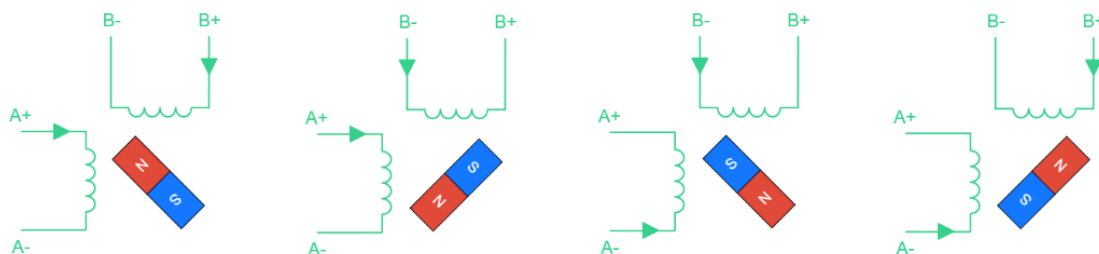
Ve vlnovém režimu je aktivní vždy jen jedna fáze. Na obrázku č. 25 je vidět, že při každém kroku protéká proud pouze jednou fází, přičemž jeho směr určuje orientaci magnetického pole a tím i polohu rotoru, který je znázorněn magnetem. Nejprve protéká proud fází A kladným směrem a vytváří magnetické pole, se kterým se rotor vyrovná, tím se provede první krok. Následně se fáze A odpojí a proud začne téct kladným směrem ve fázi B, což způsobí otočení rotoru o 90° , tedy provedení druhého kroku. Poté proud teče záporným směrem ve fázi A a rotor se opět otočí o 90° , což představuje třetí krok. Nakonec proud protéká záporným směrem fází B, rotor tak vykoná čtvrtý krok o 90° , čímž se celý cyklus uzavírá. [16]



Obrázek 25: Kroky ve vlnovém režimu [16]

2.5.2 Režim plného kroku

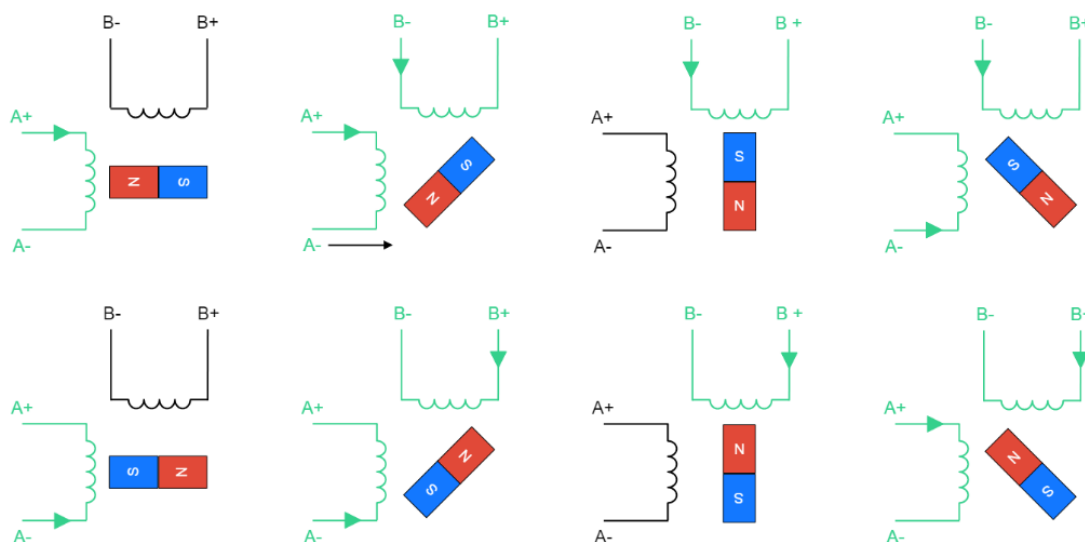
V režimu plného kroku jsou vždy aktivní dvě fáze současně. Úhel otočení rotoru je stejný jako u vlnového režimu tedy 90° , ale má vyšší točivý moment, protože na rotor působí magnetické pole obou fází. [16]



Obrázek 26: Kroky v režimu plného kroku [16]

2.5.3 Režim polovičního kroku

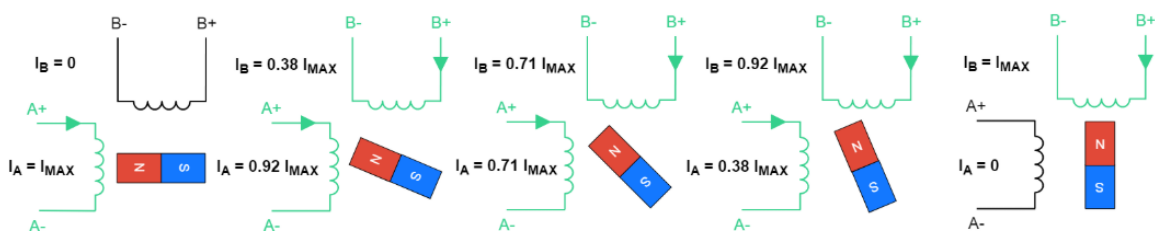
Režim polovičního kroku kombinuje vlnový režim a režim plného kroku. Střídá se napájení jedné fáze a napájení obou fází. To má za následek možnost zmenšit velikost kroku na polovinu. Nevýhodou je nekonstantní točivý moment. [16]



Obrázek 27: Kroky v režimu polovičního kroku [16]

2.5.4 Mikrokrokování

Regulací proudové intenzity v jednotlivých fázích lze rozdělit standardní krok na menší úseky, tzv. mikrokroky. Na obrázku č. 28 je zobrazen princip mikrokrokování, při kterém se do fází A a B dodává proud v různém poměru. Hodnota I_{MAX} představuje maximální proud, který může procházet danou fází. Ve druhém kroku na obrázku poměr proudů $I_A = 0,92 I_{MAX}$ a $I_B = 0,38 I_{MAX}$ způsobí natočení o $22,5^\circ$. Dalším postupným řízením poměru proudů lze docílit úhlů jako 45° , $67,5^\circ$ a 90° . Běžně lze dosáhnout daleko vyššího rozlišení polohy, za cenu snížení točivého momentu. Pro takové řízení je třeba složitější zařízení, kterému se říká driver. [16]



Obrázek 28: Princip mikrokrokování [16]

3 KINEMATIKA

Kinematika pohybu určuje uspořádání všech důležitých komponent stroje a ovlivňuje jeho vlastnosti, jako jsou přesnost, maximální rychlost, stabilita a celkové rozměry. Správně zvolená kinematika má zásadní vliv na efektivitu pohybu, složitost řízení a konstrukční náročnost celého systému. [17]

3.1 Kartézský systém

Kartézský systém je nejběžnější a zároveň nejjednodušší typ kinematiky. Tento systém používá dva motory, z nichž každý řídí pohyb v jedné ose – jeden motor ovládá pohyb v ose X, druhý v ose Y. Motory pracují nezávisle na sobě, takže řízení pohybu je přímé a snadno pochopitelné. [17]

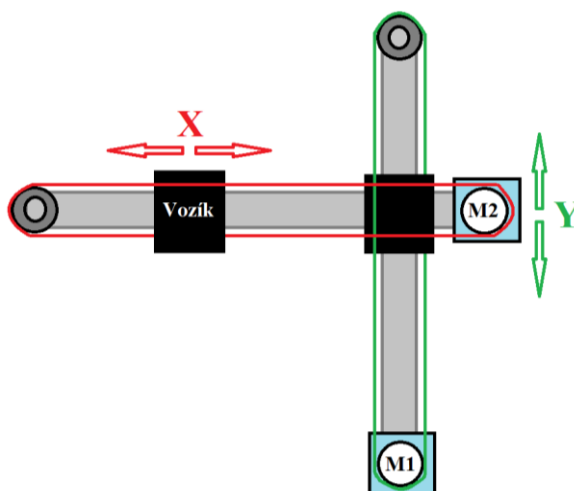
Jeden z motorů je připevněný přímo k rámu a druhý je umístěný na pohyblivé ose, což však zvyšuje její hmotnost a setrvačnost. [18] Každá osa má svůj vlastní řemen, který je veden přímo ve směru dané osy. K vedení řemene stačí jen jedna kladka na konci osy a hnací kladka na motoru.

Výhody:

- Konstrukce je přímá a snadná na pochopení.
- Snadná údržba a opravy.
- Obvykle levnější na výrobu než složitější mechanismy. [17]

Nevýhody:

- Větší hmotnost na pohyblivé ose může způsobit nepřesnosti pohybu, hlavně při vyšších rychlostech. [17]



Obrázek 29: Jednoduchá kartézská kinematika

3.2 CoreXY

CoreXY je pokročilý pohybový mechanismus, který využívá dva pevně uchycené motory a systém dvou ozubených řemenů s kladkami k zajištění pohybu v osách X a Y. Díky tomu, že jsou motory stacionární, minimalizují se setrvačné síly, což přispívá k vyšší rychlosti a přesnosti pohybu. [18]

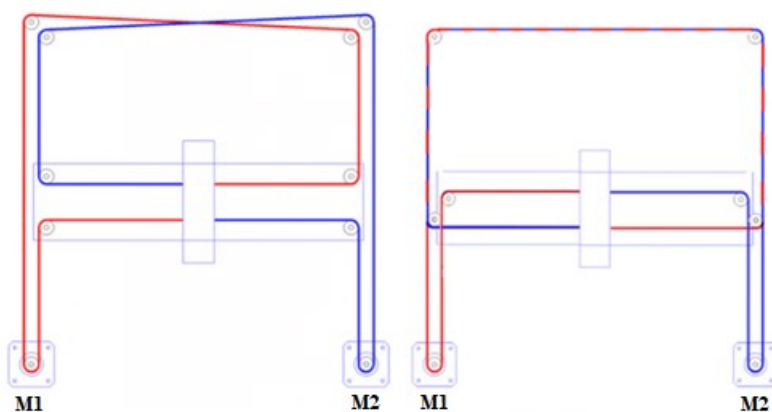
Na obrázku č. 30 jsou znázorněny dvě hlavní metody vedení řemenů v systému CoreXY: křížené (vlevo) a nekřížené (vpravo). Klíčové však je, aby vnitřní dráha řemenů byla přesně rovnoběžná s osami X a Y, což je zásadní pro správnou funkci a přesnost celého systému. Tabulka č. 1 potom vysvětluje, jak kombinace otáčení motorů ovlivňuje pohyb vozíku. [18]

Výhody:

- Díky optimalizované kinematice je možné dosahovat vyšších rychlostí při kreslení.
 - Tento mechanismus je velmi stabilní a přesný, což je ideální pro aplikace, kde je důležitá kvalita výstupu.
 - Motory jsou pevně uchyceny k rámu, což snižuje vibrace a zlepšuje stabilitu pohybu.
- [18]

Nevýhody:

- Tento systém je náročnější na konstrukci
- Řemeny musí být správně napnuté a seřízené, jinak může docházet k nepřesnostem. [18]



Obrázek 30: Kinematika Core XY [18]

Tabulka 1: Řízení směru pohybu CoreXY kinematiky [18]

Pohyb motorů	Směr
M1 po směru hodinových ručiček	Diagonálně doleva dopředu
M1 proti směru hodinových ručiček	Diagonálně doprava dozadu
M2 po směru hodinových ručiček	Diagonálně doleva dozadu
M2 proti směru hodinových ručiček	Diagonálně doprava dopředu
M1 a M2 po směru hodinových ručiček	Doleva
M1 a M2 proti směru hodinových ručiček	Doprava
M1 po směru a M2 proti směru hodinových ručiček	Dopředu
M1 proti směru a M2 po směru hodinových ručiček	Dozadu

3.3 H-bot

H-bot mechanismus je podobný CoreXY, ale s tím rozdílem, že místo dvou řemenů má pouze jeden řemen vedený do tvaru písmene „H“ (viz obrázek č. 31). Tento řemen je ovládán dvěma pevně uchycenými motory, které společně zajišťují pohyb v osách X a Y. [17]

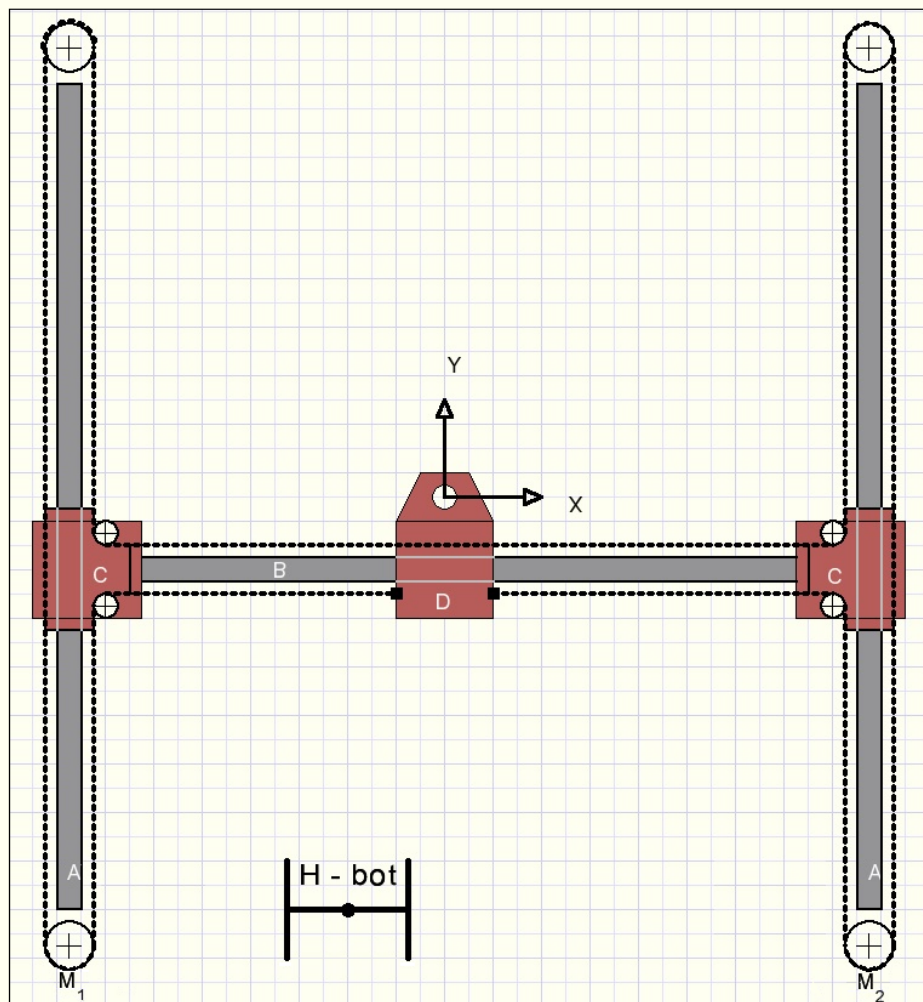
Použitím pouze jednoho řemene je systém jednodušší na montáž i údržbu a levnější na výrobu. Avšak kvůli způsobu, jakým je řemen rozložen mezi dva motory, může při pohybu docházet ke vzniku nežádoucích kroutivých momentů. [19] Tyto torzní síly mohou ovlivnit přesnost a stabilitu pohybu, zejména u větších a těžších částí nebo při vyšších rychlostech. Tento problém lze do určité míry kompenzovat zvýšením tuhosti rámu, použitím pevnějších lineárních vedení nebo softwarovou kompenzací v řídicím systému, která upravuje řízení motorů tak, aby se minimalizovalo zatížení rámu.

Výhody:

- Konstrukce je jednodušší než u CoreXY, což znamená nižší výrobní náklady a snadnější montáž.
- Motory jsou pevně uchyceny k rámu, což snižuje vibrace a zlepšuje stabilitu pohybu. [17]

Nevýhody:

- Použití pouze jednoho řemene může při pohybu způsobit kroutivé síly, což může ovlivnit výslednou kvalitu. [17]



Obrázek 31: Kinematika H-bot [48]

4 PROGRAMOVÁNÍ PLOTU

Programování CNC strojů využívá speciální jazyk nazývaný G-kód. Tento kód řídí pohyb nástroje v souřadnicovém systému, nejčastěji v osách X, Y a případně Z. Označení „G-kód“ pochází ze slova geometrický, protože jeho hlavní funkcí je zadávání geometrických trajektorií pohybu. [20]

G-kód je textový programovací jazyk, který se vykonává postupně po jednotlivých řádcích (tzv. blocích). Tento blok může obsahovat příkaz k pohybu, pomocnou funkci nebo jinou instrukci. [20]

4.1 Struktura bloku G-kódu

Příklad jednoho bloku v G-kódu může vypadat takto: **N10 G00 X100 Y50 Z-10.**

Tento příkaz říká stroji, aby se s nástrojem (zvednutým nebo vypnutým) rychle přesunul na pozici $X = 100$, $Y = 50$, $Z = -10$. Jednotlivé příkazy tohoto bloku mají následující význam:

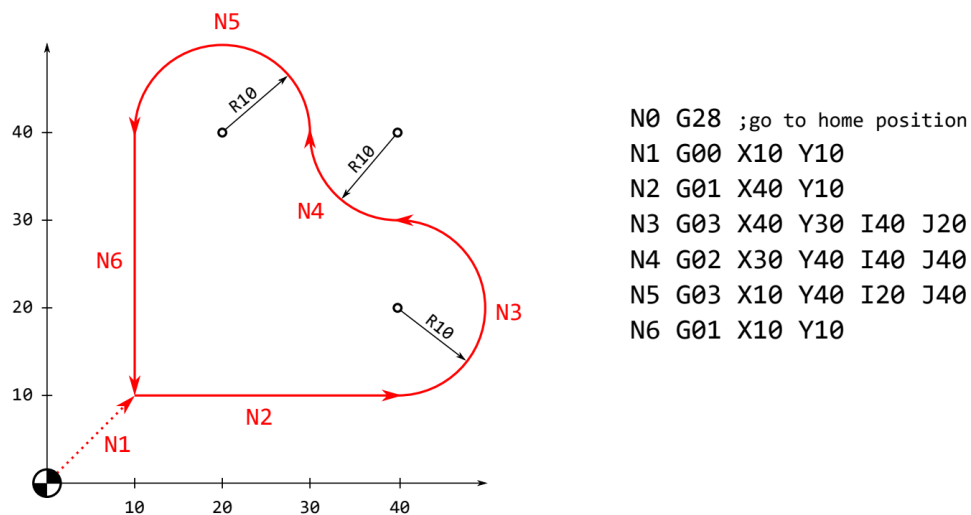
- N10 – číslo řádku
- G00 – rychlý pohyb nad pracovní plochou
- X100 Y50 Z-10 – souřadnice cílového bodu

V G-kódu se jednotlivé znaky nazývají adresy (např. N, G, X, Y, Z). Číslo u adres jako je N nebo G se nazývá významová část a číslo u souřadnicových adres se nazývá rozměrová část. [20]

G-kód však obsahuje i další písmena, které označují různé funkce. Tabulka č. 2 ukazuje další používané adresy.

Tabulka 2: Adresy používané v G-kódu [20]

Písmeno	Význam
X Y Z	Pohyb nástroje v základních osách
G	Hlavní (geometrické) příkazy pro pohyb
M	Pomocné (strojní) funkce
N	Číslo řádku (není povinné)
F	Rychlost pohybu
A B C	Rotace kolem základních os
I J K	Parametry kruhové interpolace
U V W	Pohyb podél základních os
R	Poloměr oblouku
T	Nástroj
D	Korekce nástroje
S	Otáčky vřetene
L	Volání podprogramu



Obrázek 32: Cesta pera podle G-kódu [49]

4.2 Základní G-kódy pro perový plotr

Perový plotr využije jen omezenou sadu G-kódů, které postačí pro vykreslení čar a oblouků v rovině XY a řízení pera nahoru a dolů. Níže je uveden výběr plotrem nejčastěji používaných G-kódů:

- G00 – Rychlý lineární posuv nad pracovní plochou (zvednuté pero)
- G01 – Pracovní lineární posuv (spuštěné pero)
- G02 – Kreslení oblouku po směru hodinových ručiček
- G03 – Kreslení oblouku proti směru hodinových ručiček
- G28 – Návrat do domovské pozice
- G90 – Absolutní programování, kde se souřadnice vztahují k výchozímu bodu
- G91 – Přírůstkové programování, kde souřadnice udávají pohyb od aktuální pozice

Pero se ovládá pohybem osy Z, případně v některých systémech se používají příkazy M300 S30 pro spuštění pera a M300 S50 pro zvednutí pera. [21]

II PRAKTICKÁ ČÁST

5 KONSTRUKCE

Tato kapitola se zabývá výběrem komponent pro sestavení plošného perového plotru s kinematikou CoreXY. Tato kinematika byla zvolena pro svou stabilitu i při rychlých pohybech nástroje.

5.1 Rám

Konstrukce rámu byla realizována z hliníkových profilů za účelem zajištění potřebné mechanické stability a spolehlivého uchycení komponent. Díky jejich přesné výrobě, vysoké tuhosti, jednoduché montáži a možnosti uchycení různých prvků ze všech stran představují ideální volbu pro konstrukci perového plotru, ovšem za cenu vyšších pořizovacích nákladů.

5.1.1 Montáž

Pro konstrukci byly použity hliníkové profily o rozměrech 20×40 mm ve dvou délkách: 2× 510 mm a 2× 550 mm. Z těchto profilů byl sestaven obdélníkový rám. Ke kolmému spojení byly použity hliníkové úhelníky 20×20 mm, kde do každého rohu byly použity dva tyto úhelníky. Pro spojení profilů a úhelníků byly použity šrouby M5×8 a T-matice kompatibilní s použitým profilem.



Obrázek 33: Stavba rámu z hliníkových profilů

5.2 Lineární vedení

Na základě informací uvedených v kapitole 2.2 bylo pro lineární vedení zvoleno kuličkové ložisko na profilované kolejnici MGN12 s prodlouženým vozíkem typu H. Toto vedení bylo zvoleno pro svou přesnost, tuhost a nízké tření. Ovšem oproti ostatním možnostem se jedná o dražší variantu lineárního vedení, které vyžaduje mazání a přesné uchycení.

5.2.1 Čištění lineárního ložiska

Před použitím nových lineárních ložisek je nutné odstranit případné nečistoty a ochranný olej z kolejnice. Tento olej neslouží k mazání, ale jen pro ochranu během skladování.

Nejprve byl vozík opatrně přesunut z kolejnice na pomocnou plastovou lištu, aby se předešlo ztrátě kuliček. Čištění bylo provedeno izopropylalkoholem, ve kterém byl vozík několik minut ponořen (viz obrázek č. 34). Během namáčení bylo občas pohybováno kuličkami, aby se čistící prostředek dostal do všech míst. Kolejnice byly také očištěny izopropylalkoholem za pomoci textilní utěrky. Po několika minutách namáčení byl vozík nasunut zpět na kolejnici. Několikrát se tímto vozíkem přejelo po celé délce kolejnice, aby se z něj dostaly zbylé nečistoty, které byly následně z kolejnice setřeny textilní utěrkou. Tento postup byl proveden pro všechny tři kolejnice. Nakonec se všechny nechaly řádě vyschnout.



Obrázek 34: Čištění lineárního ložiska

5.2.2 Mazání lineárního ložiska

Mazání se provádí za účelem snížení opotřebení kuliček a dosažení tichého a plynulého chodu bez zadrhování.

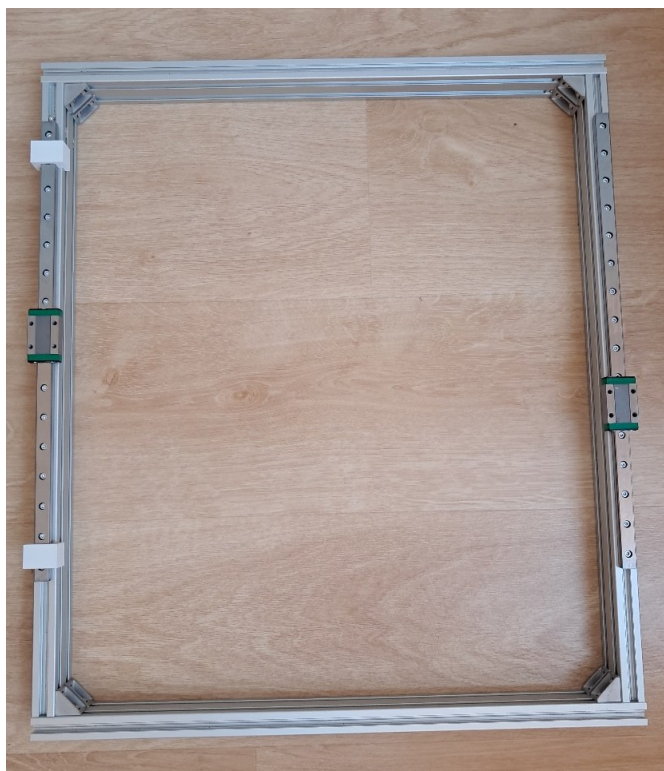
Vozík má na obou stranách otvory, kterými se mazivo dodává dovnitř. Pro mazání bylo použito mazivo Interflon Food Lube G220. Pomocí injekční stříkačky s jehlou bylo mazivo vstříknuto do obou otvorů (viz obrázek č. 35). Poté se vozíkem několikrát přejelo po celé délce kolejnice, aby se mazivo dostalo mezi kuličky. Tento proces byl opakován, dokud nebyl pohyb vozíku naprosto hladký.



Obrázek 35: Mazání lineárního ložiska

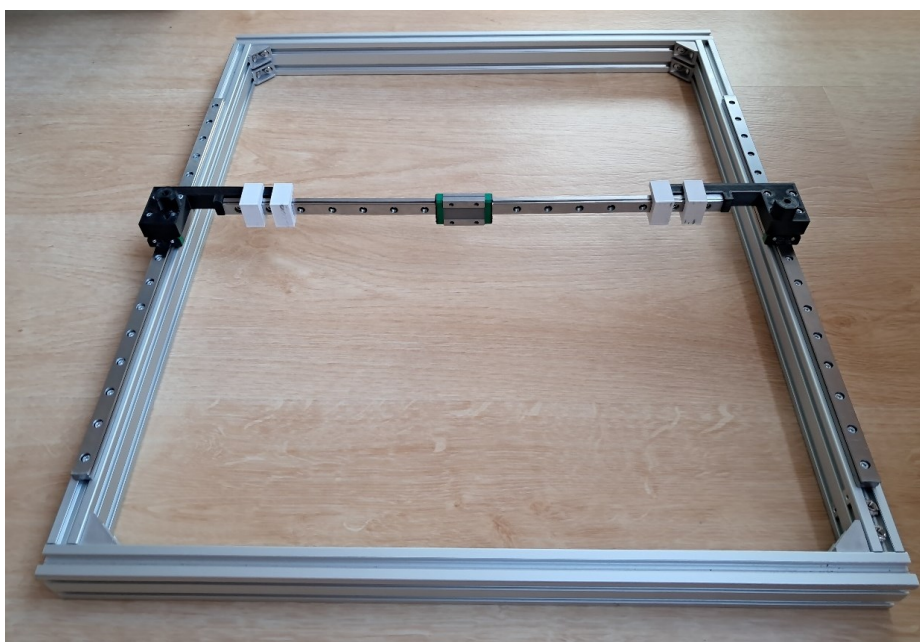
5.2.3 Montáž

Profilované lineární kolejnice pro osu Y byly připevněny z horní strany hliníkového profilu pomocí šroubů M3×8, které byly zasunuty do montážních děr v kolejnici, a T-matic kompatibilních s hliníkovým profilem. Před úplným dotažením šroubů byly obě kolejnice vyrovnány pomocí 3D tištěných vyrovnávacích přípravků (viz obrázek č. 36).



Obrázek 36: Vyrovnání a připevnění osy Y k rámu

Kolejnice pro osu X byla pomocí šroubů M3×15 a pojistných matic přišroubována na 3D tištěné díly (viz obrázek č. 40), které byly připevněny k vozíkům osy Y, a následně vyrovnána pomocí 3D tištěných vyrovnávacích přípravků.



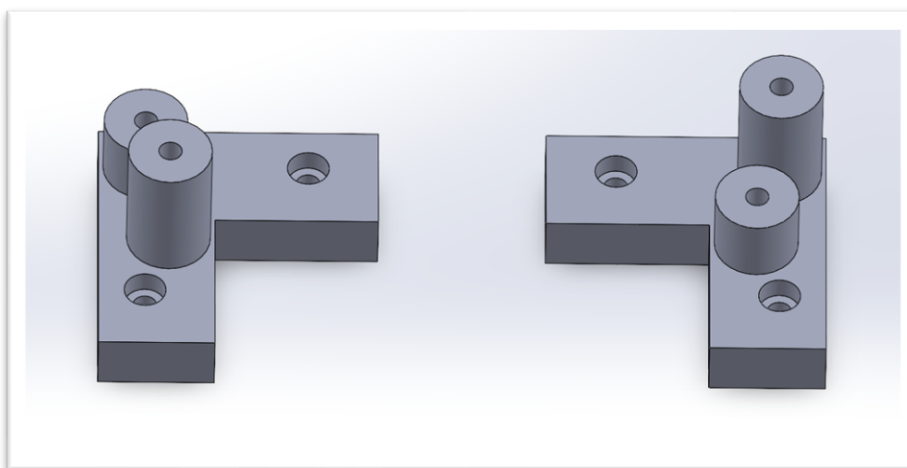
Obrázek 37: Vyrovnání a připevnění osy X k ose Y

5.3 Vytisknuté konstrukční díly na kladky

Pro speciální díly, které drží kladky pro ozubený řemen, byl využit 3D tisk. Tyto díly byly navrženy na míru tak, aby byla zajištěna rovnoběžnost řemenů. Zároveň slouží jako koncové dorazy pro vozíky na obou osách.

5.3.1 Návrh

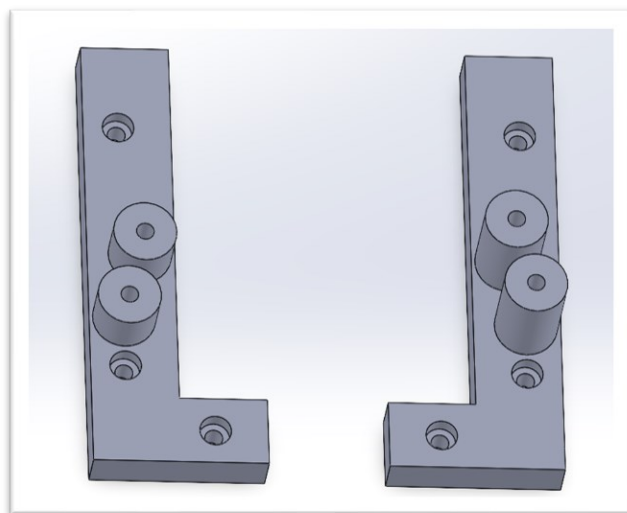
Na obrázku č. 38 jsou zobrazeny rohové díly sloužící k upevnění kladek. Každý díl obsahuje dvě podpěry s otvorem uprostřed pro usazení kladek GT2, které jsou umístěny ve dvou výškových úrovních. Vyšší podpěry slouží pro uchycení kladek horního řemenu, zatímco nižší podpěry pro spodní řemen. Na jednom dílu je vyšší podpěra vzadu, na druhém vpředu – toto rozložení je z důvodu křížení řemenů, jak bylo zmíněno v kapitole 3.2 (CoreXY). Každý díl dále obsahuje dva otvory pro upevnění k rámu.



Obrázek 38: Rohové díly pro uchycení kladek GT2

Rohové díly pro druhou stranu rámu se konstrukčně liší od předchozích (viz obrázek č. 39). Podpěry pro kladky jsou zde ve stejné výškové úrovni, protože každý z těchto dílů slouží pro uchycení kladek vedoucích řemen od jednoho motoru. Jeden díl podpírá kladky horního řemenu a druhý pak kladky spodního řemenu.

Podpěra umístěná blíže k vnitřní straně rámu slouží pro uchycení hladké kladky, zatímco podpěra blíže k vnější straně rámu je určena pro ozubenou kladku. Každý z těchto dílů má tři otvory, které umožňují pevné uchycení k rámu.



Obrázek 39: Rohové díly u motoru pro uchycení kladek GT2

Díly na obrázku č. 40 slouží nejen pro uchycení kladek, ale také k upevnění osy X. Každý díl obsahuje čtyři otvory pro montáž na vozík osy Y. V užší části dílu se nacházejí dva otvory pro uchycení kolejničice osy X. Obdélníkový výstupkek na této části slouží jako pevný doraz pro vozík osy X.

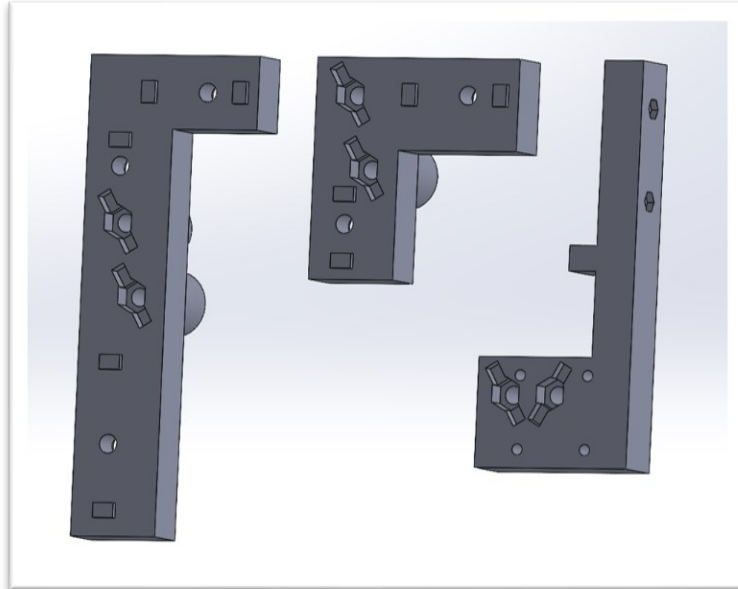
Na rozdíl od předchozích dílů má každý z těchto dílů pouze jednu vyvýšenou podporu pro kladku horního řemenu. Důvodem je dostatečná výška samotného dílu, díky níž lze kladku spodního řemenu umístit přímo na základnu. Otvory pro uchycení kladek jsou blízko sebe proto, aby řemeny připevněné k ose X byly přesně pod sebou.



Obrázek 40: Pohyblivé díly pro uchycení kladek GT2 a osy X

Spodní strana dílů má v místech šroubu, kterým se přichycuje kladka, pouzdro pro matici M5. Z bočních stran tohoto pouzdra je ponechán prostor pro úzké kleště, aby mohla být matice při utahování přichycena. V případě použití pojistné matice, je třeba vyvinout větší sílu při šroubování, což může způsobit protáčení matice, pokud by tištěné pouzdro nevydrželo zátěž.

Malé obdélníkové výstupky na spodní straně dílů slouží k přesnému zarovnání do drážky hliníkového profilu.



Obrázek 41: Spodní strana dílů pro uchycení kladek GT2

5.3.2 Montáž

Nejprve byly vloženy pojistné matice M5 do připravených pouzder na spodní straně dílů (do dílů připevněných k vozíku osy Y byly vloženy klasické matice M5). Poté byl z horní strany dílu našroubován šroub, na kterém byla nasunuta kladka GT2 mezi polyamidovými podložkami, tak jak je to vidět na obrázku č. 42. Tyto podložky byly zvoleny z toho důvodu, že kladka na nich lépe klouže než na kovových podložkách.

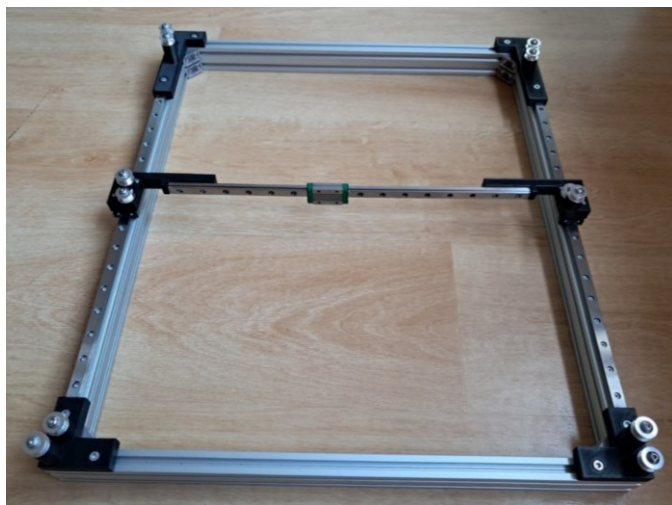
Rozměry šroubů byly zvoleny podle potřebné délky průchodu skrz díl:

- Pro horní kladku rohových dílů byl použit šroub M5×50.
- Pro spodní kladku rohových dílů a horní pohyblivou kladku na vozíku šroub M5×40, který byl zkrácen na délku 38 mm.
- Pro spodní pohyblivou kladku na vozíku šroub M5×25.



Obrázek 42: Kladka mezi polyamidovými podložkami

Uchycení dílů k rámu bylo provedeno pomocí šroubů $M5 \times 12$ a T-matic. Díky malým výstupkům na spodní straně (viz obrázek č. 41) bylo možné díl přesně zarovnat do drážky hliníkového profilu. Pohyblivé díly byly k vozíku připevněny šrouby $M3 \times 14$.



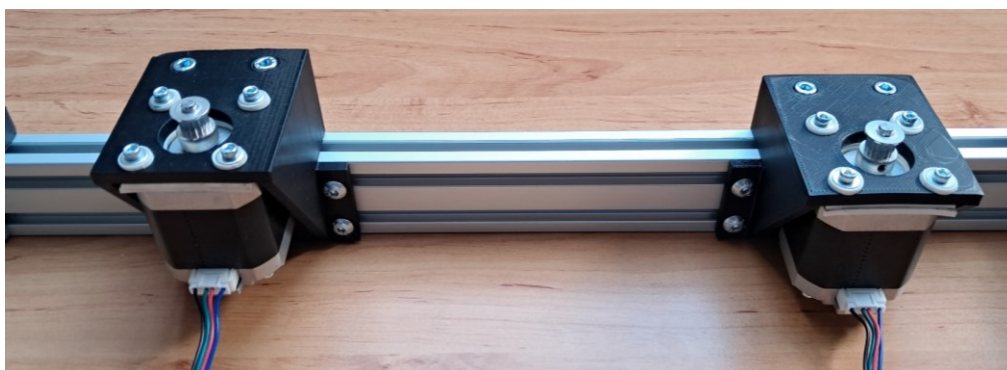
Obrázek 43: Rám osazený 3D tištěnými díly s kladkami

5.4 Krokové motory

Pro převod elektrické energie na mechanickou byly zvoleny bipolární krokové motory NEMA17 s hybridním rotorem, model 42HD6021-03. Tento motor má 200 kroků na otáčku, tedy každým krokem se pootočí o $1,8^\circ$. Jmenovitý proud je 1,5 A a statický moment 0,5 Nm. [22]

5.4.1 Držák na motor

Pro uchycení motoru k rámu byl navržen a vytištěn 3D tištěný držák. K tomuto držáku byl motor přichycen šrouby $M3 \times 14$ přes silikonovou podložku, která omezuje vibrace. Celý držák byl upevněn k hliníkovému profilu pomocí čtyř šroubů $M5 \times 10$, dvou šroubů $M5 \times 30$ (u motoru pohánějící horní řemen byly použity šrouby $M5 \times 45$) a T-matic.



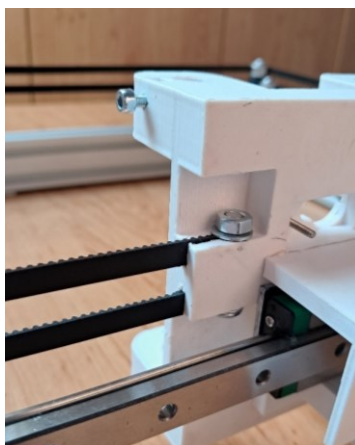
Obrázek 44: Motory uchycené k rámu pomocí 3D tištěných držáků

5.5 Ozubený řemen

Pro přenos přímého pohybu byl zvolen pryžový ozubený řemen GT2 o šířce 6 mm a rozteči zubů 2 mm, vyztužený skelnými vlákny. Byly použity dva samostatné řemeny, každý pro jeden motor, jelikož se jedná o kinematiku CoreXY.

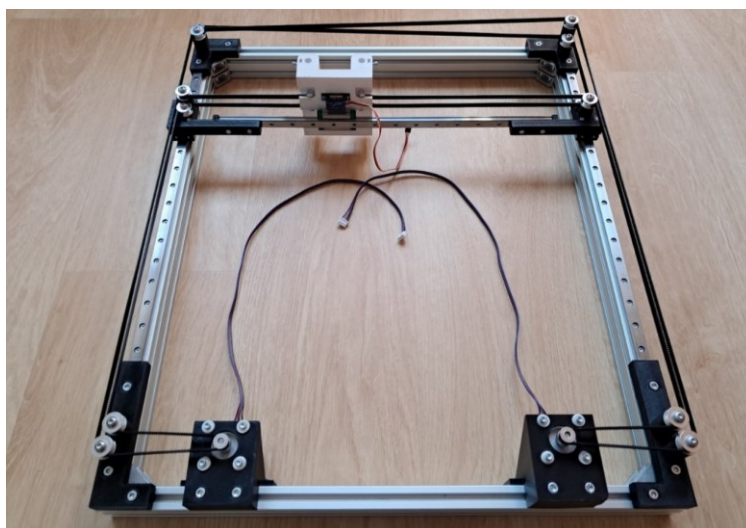
5.5.1 Vedení a napínání ozubeného řemene

Řemeny byly nejprve pomocí šroubů M5×25, podložek a matic uchyceny z obou stran do 3D tištěného držáku, který byl přišroubován na vozík osy X pomocí šroubů M3×12. Pro dosažení rovnoběžnosti řemenů s osou X byl držák podložen 3D tištěnou podložkou o tloušťce 2 mm. Tento držák také slouží jako statický díl pro zvedací mechanismus.



Obrázek 45: Uchycení řemenů

Následně byly řemeny vedeny po kladkách, tak, jak je to popsáno v kapitole 3.2 (CoreXY). Napnutí řemenů bylo provedeno posunem obou krokových motorů po hliníkovém profilu směrem k sobě. Oba řemeny byly napínány současně, aby nedošlo ke kroucení osy X. Na obrázku č. 46 je vidět vedení řemenu.



Obrázek 46: Vedení řemenů

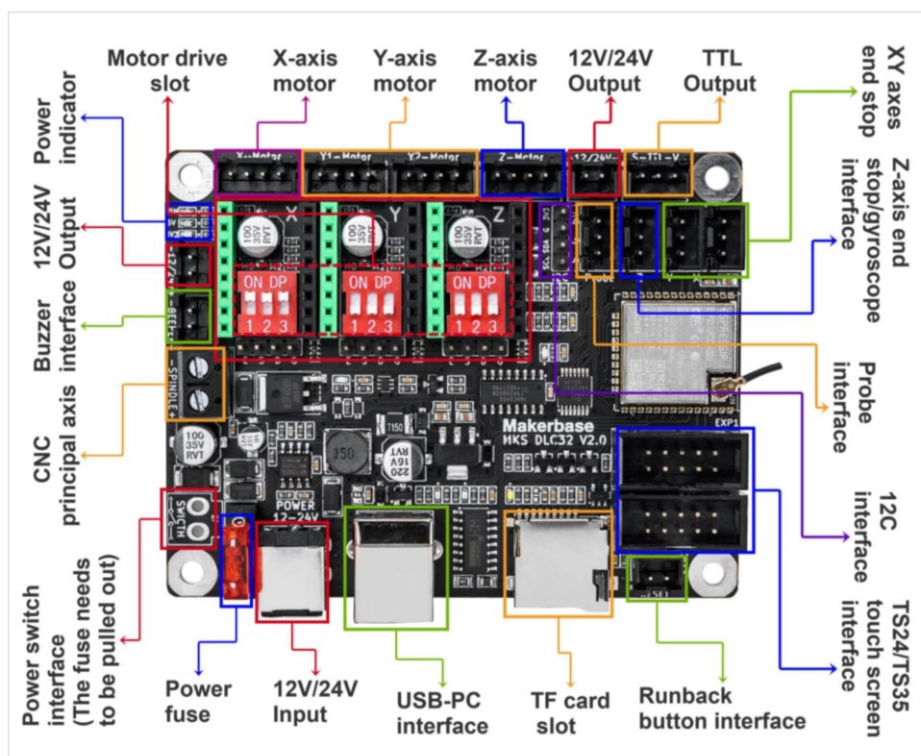
5.6 Řídicí deska

Řídicí deska MKS DLC32 V2.1 byla vybrána pro svou flexibilitu a jednoduché propojení všech elektrických komponentů. Umožňuje napájení 12 V nebo 24 V podle potřeby a obsahuje USB port pro přímé připojení k počítači. [23]

Hlavní řídicí jednotkou je 32bitový mikropočítač ESP32-WROOM-32U od firmy Espressif, který má v sobě zabudovanou Wi-Fi a Bluetooth, což umožňuje ovládání na dálku bez nutnosti fyzického připojení kabelem. [23]

Součástí jsou tři sloty pro ovladače motorů (motor drivers) a vývody pro čtyři motory – jeden pro osu X a Z a dva pro osu Y. Dále jsou k dispozici piny pro koncové spínače jednotlivých os, které zajišťují správné určení koncových pozic. [23]

Na desce je též umístěn slot pro SD kartu, na kterou je možné ukládat G-kód, pomocí kterého stroj vykonává požadovaný pohyb. K dispozici je také připojení dotykového displeje pro off-line řízení či monitorování. Pro budoucí rozšíření je tu možnost připojení laseru či frézy. [23]



Obrázek 47: Řídicí deska MKS DLC32 V2.1 [23]

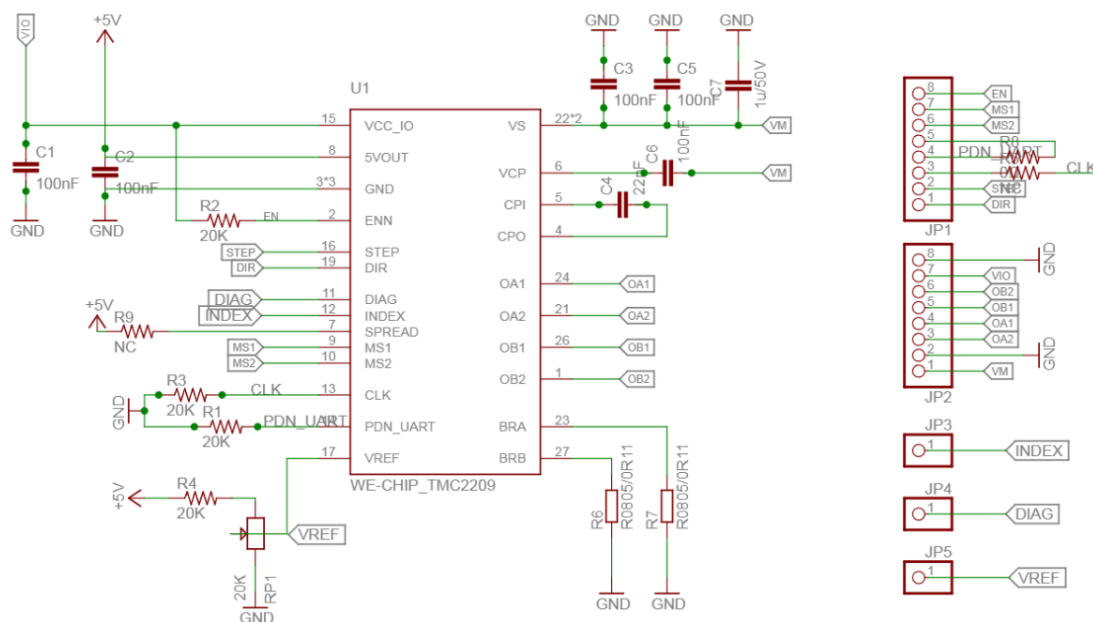
5.7 Motor drivery (ovladače motorů)

Pro řízení krokových motorů byly zvoleny drivery MKS TMC2209 V2.0, které umožňují přesné a tiché ovládání. Jsou určeny pro řízení 2fázových krokových motorů s proudem až 2 A na cívku (krátkodobě až 2,8 A) a pracují v rozsahu napájení 4,75 až 29 V DC. [25]

Ovládání probíhá přes rozhraní STEP/DIR, s možností nastavení mikrokrokování na 2, 4, 8 nebo 16 mikrokroků [26], které jsou následně interpolovány až na 256 mikrokroků pomocí technologie MicroPlyer™. To zajišťuje velmi tichý a hladký chod motoru. [25]

Technologie StealthChop2™ dále přispívá k tichému provozu, zatímco SpreadCycle™ umožňuje dynamické řízení proudu pro vyšší výkon. Funkce StallGuard4™ umožňuje detekovat zvýšení zátěže (např. při nárazu na konec osy), čímž dokáže detekovat konec osy bez použití koncového spínače. CoolStep™ je technologie pro inteligentní řízení proudu podle potřeby, což výrazně snižuje spotřebu energie (až o 75 %) a tak omezuje přehřívání. Driver též obsahuje ochranu proti přehřátí, přepětí a zkratu. [25]

Pro pokročilé řízení a nastavování parametrů je k dispozici komunikační rozhraní UART. Avšak podle FluidNC wiki [24] deska MKS DLC32 V2.1 komunikaci UART s chytrými drivery nepodporuje. Proto byl proud do motoru nastaven ručně pomocí trimru na driveru a mikrokrokování bylo nastaveno pomocí přepínačů na desce. Některé funkce tak nebyly využity.



5.7.1 Nastavení proudu motoru

Jelikož perový plotr nevyžaduje vysokou sílu, tak byl zvolen proud s bezpečnostní rezervou 15 % pod jmenovitým proudem motoru, který je 1,5 A.

$$I_{RMS} = 1,5 * 0,85 = 1,275 \text{ A} \quad (1)$$

Hodnota V_{REF} , kterou je potřeba nastavit pomocí trimru na driveru, byla vypočtena podle rovnice uvedené ve specifikaci driveru TMC2209 [25]:

$$I_{RMS} = \frac{325mV}{R_{SENSE} + 20m\Omega} * \frac{1}{\sqrt{2}} * \frac{V_{REF}}{2,5V} \quad (2)$$

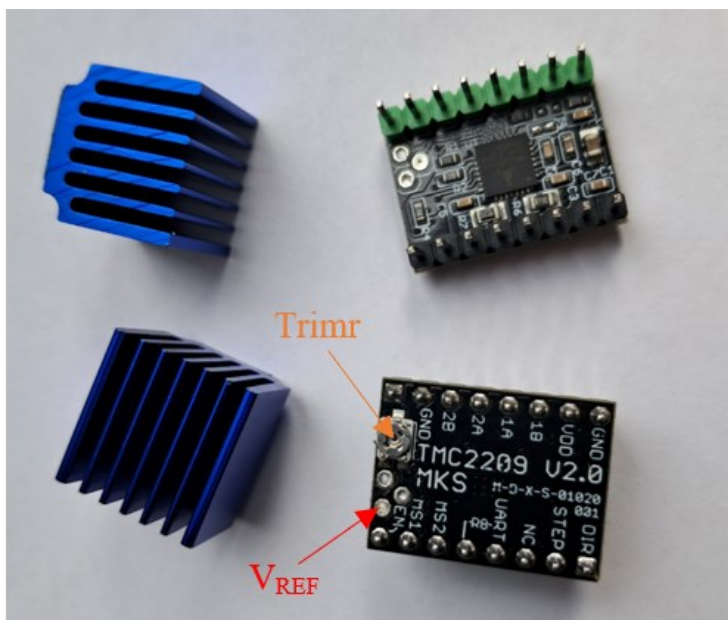
Při hodnotě odporu snímacího rezistoru $R_{SENSE} = 0,110 \Omega$, který je na tomto driveru se vzorec zjednodušil:

$$I_{RMS} = \frac{\sqrt{2}}{2} * V_{REF} \quad (3)$$

Z čehož bylo spočítáno potřebné V_{REF} :

$$V_{REF} = \frac{2}{\sqrt{2}} * I_{RMS} = \frac{2}{\sqrt{2}} * 1,275 \approx 1,8 \text{ V} \quad (4)$$

Napětí V_{REF} bylo nastaveno pomocí trimru (viz oranžová šipka na obrázku č. 49). Otáčením po směru hodinových ručiček se napětí snižovalo, při otáčení proti směru naopak rostlo. Napětí se měřilo mezi pinem GND a pinem V_{REF} , na který ukazuje červená šipka. Při měření bylo nutné dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo ke zkratu mezi piny.



Obrázek 49: Drivery TMC2209 s chladičem

5.7.2 Nastavení mikrokrokování

Mikrokrokování se nastavilo na 16 mikrokroků pomocí přepínačů na základní desce podle následující tabulky:

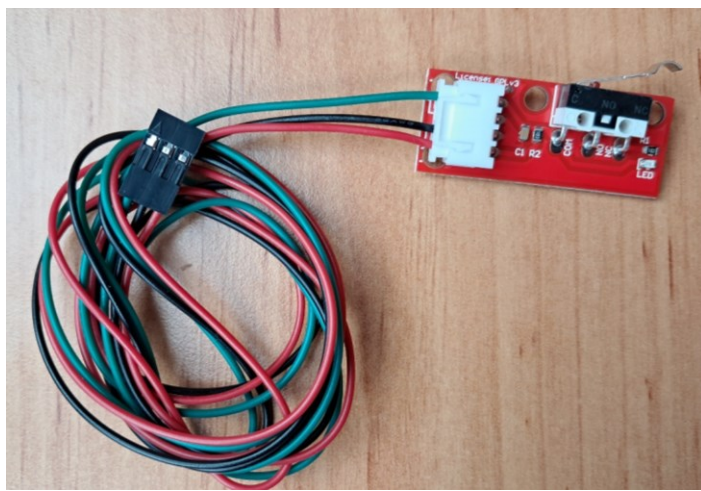
Tabulka 3: Nastavení mikrokrokování pro drivery TMC2209 [26]

MS1	MS2	Mikrokroky
L	L	8
L	H	4
H	L	2
H	H	16

Poznámka: Díky technologii MicroPlyer™ drivery TMC2209 interpolují přijímané mikrokroky až na 256 mikrokroků, takže i při nastavení na 16 mikrokroků pracuje driver s plynulostí 256 mikrokroků.

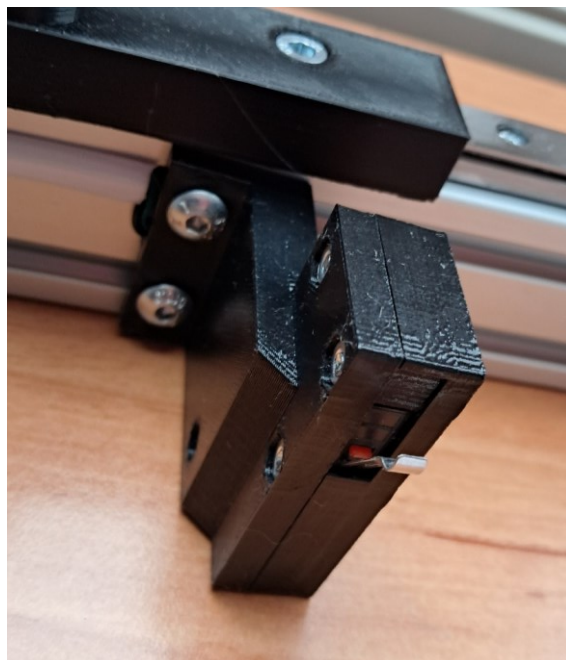
5.8 Koncové spínače

Zajištění koncových pozic os X a Y obstarávají běžné mechanické koncové spínače. Modul osazený tímto koncovým spínačem obsahuje tři vodiče: červený (+5 V), černý (GND) a zelený, který slouží jako signálový vodič (viz obrázek č. 50). Modul při nestisknutém stavu přivádí přes pull-up rezistor na signálový vodič napětí +5 V a při stisku je signálový vodič spojen s GND. Vývojová deska již obsahuje pull-up rezistor na 3,3 V, proto stačí připojit pouze signálový vodič a vodič GND.



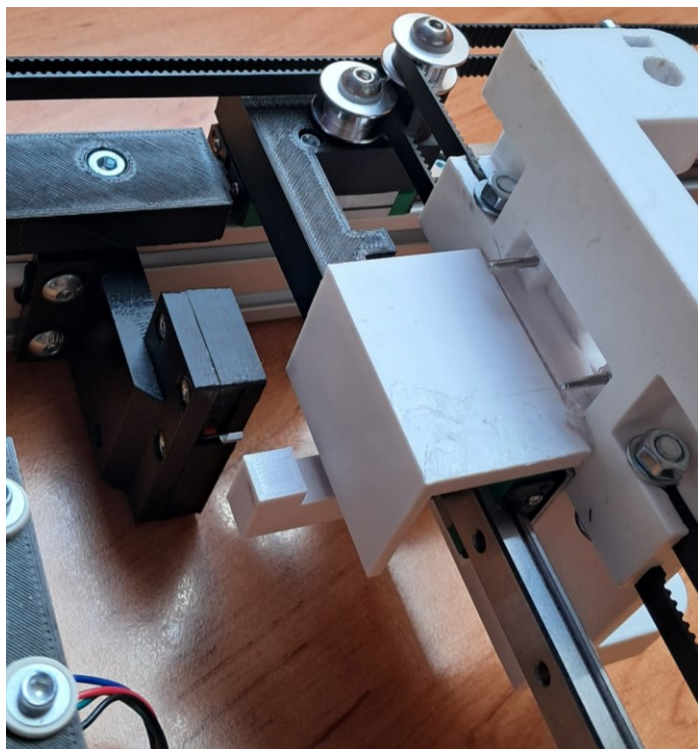
Obrázek 50: Modul mechanického koncového spínače

Pro uchycení koncových spínačů k rámu byla navržena a vytištěna pouzdra, do kterých byly vsazeny moduly koncových spínačů. Tyto moduly byly zajištěny šrouby M3×12 a maticemi M3. Samotná pouzdra byla k rámu připevněna pomocí šroubů M5×10 a T-matic.



Obrázek 51: Pouzdro s koncovým spínačem pro osu X připevněné k rámu

K držáku řemene byl lepidlem přilepen díl pro stisk koncového spínače na ose X a též krycí díl vozíku osy X před případnými nečistotami. Oba díly jsou vidět na obrázku č. 52.



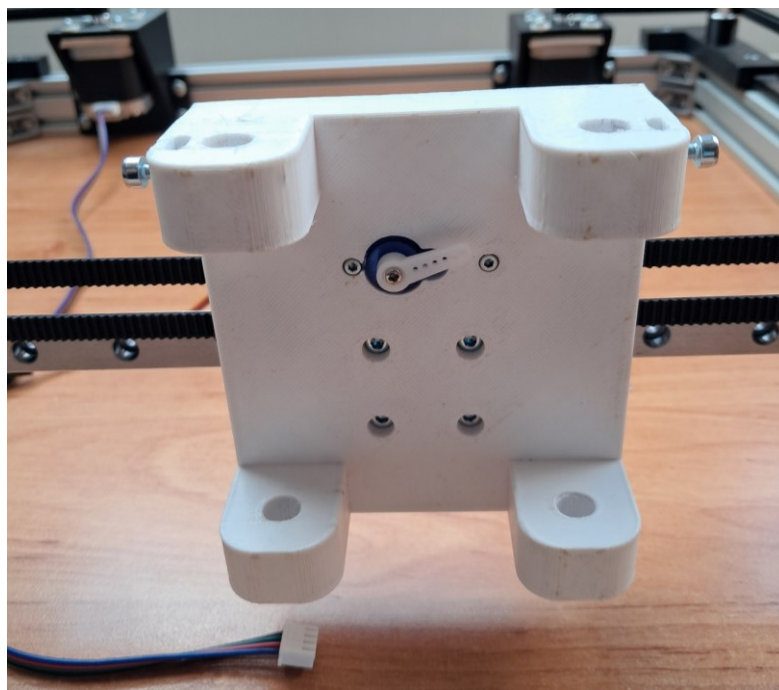
Obrázek 52: Přilepené díly k držáku řemene

5.9 Zvedací mechanismus pera

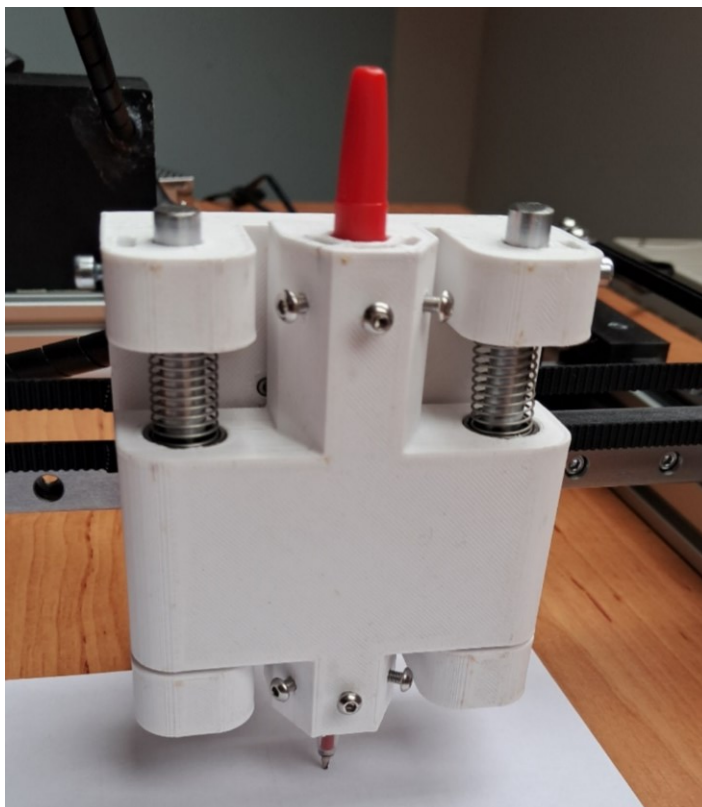
Základní konstrukci zvedacího mechanismu tvoří dva 3D tištěné díly. První je statický – již zmíněný držák řemene a slouží jako pevná základna pro zvedací mechanismus. V tomto dílu jsou nasunuty dvě kovové vodicí tyče o průměru 8 mm a délce 90 mm, které jsou na horní straně zajištěny šrouby M3×10. Druhý díl sloužící jako držák pera, který se po těchto tyčích pohybuje vertikálně díky dvěma zapuštěným kuličkovým ložiskům.

Držák pera umožňuje rychlou výměnu psacího nástroje – pero se upíná šesti šrouby M3×12. V místech těchto šroubů byly v plastovém dílu vytvořeny kapsy pro matice, aby se šrouby při dotahování neprotáčely.

Vertikální pohyb držáku nahoru zajišťuje malý servomotor, který je ze zadní strany statického dílu připevněn šrouby M2×15. Na servomotor je nasazena plastová páka, která zvedá pohyblivý díl. Tato páka byla později zkrácena, aby váha zvedaného dílu na servomotor nepůsobila tak velkou silou. Pokud servomotor není v horní pozici, tak držák pera klesne dolů a je přitlačen dvěma pružinami navlečenými na vodicí tyče. Tyto pružiny vyrovnávají drobné nerovnosti povrchu a zajišťují dostatečný přitlak pera na podložku při kreslení.



Obrázek 53: Statický díl se servomotorem



Obrázek 54: Zvedací mechanismus pera

5.9.1 Servomotor a napájení

Pro zvedací mechanismus bylo zvoleno mikroservo SG90, které pracuje na napětí 5 V a při pohybu může odebírat proud v řádu několika set miliampér. Aby nedocházelo k poklesům napětí, které by mohly způsobit nepředvídatelné chování servomotoru, bylo zvoleno samostatné napájení. Z výstupního napětí 24 V na řídicí desce je pomocí step-down měniče XL4015 (s maximálním výstupním proudem až 5 A) generováno stabilní napětí 5 V pro napájení servomotoru.



Obrázek 55: Plastové mikroservo SG90 [50]

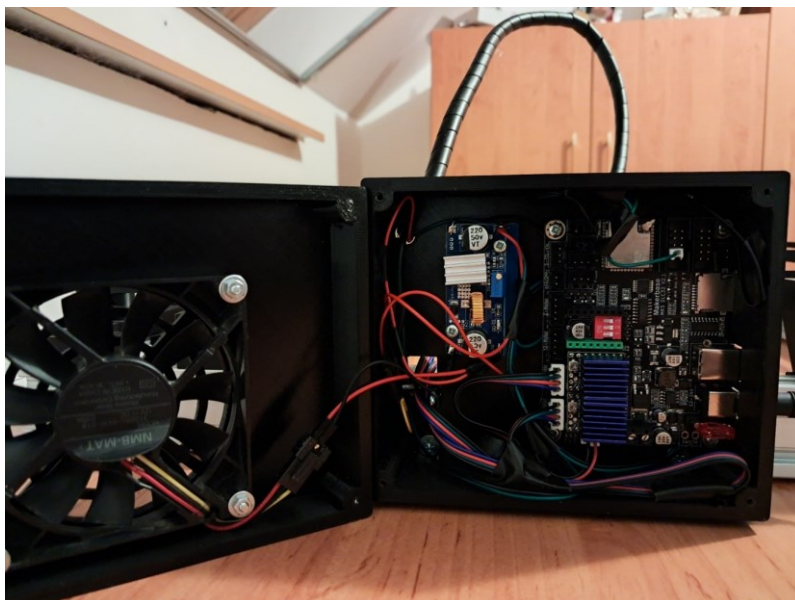
5.10 Montáž elektroniky a kabeláž

Řídicí deska MKS DLC32 a step-down měnič XL4015 byly uchyceny pomocí vrtů 3×8 mm do plastového boxu, který slouží jako centrální rozvodná jednotka celého zařízení. Z tohoto boxu jsou vedeny všechny potřebné vodiče – ke koncovým spínačům (GND a signál), krokovým motorům (A+, A-, B+, B-) a k servomotoru (5 V, GND, PWM signál). Kompletní blokové schéma zapojení je vidět na obrázku č. 57.

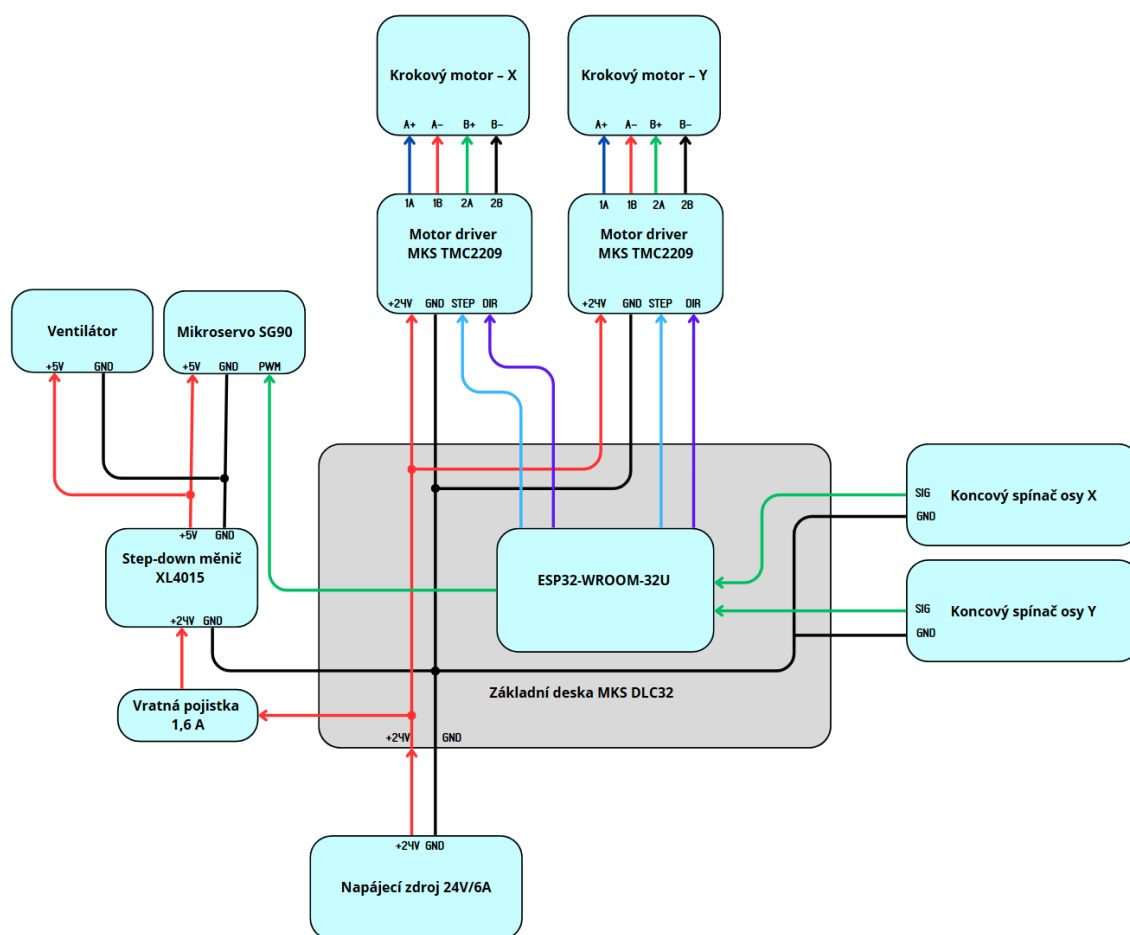
Vzhledem k tomu že se servomotor pohybuje po celé pracovní ploše, byly jeho kabely vedeny ve spirálovém plastovém chrániči. Společně s nimi je zhruba do poloviny veden silný ocelový drát, který zajišťuje nadzvednutí svazku vodičů tak, aby nepřekáženy pohybu os a nenaráženy do řemenů.

K chlazení elektroniky byl použit ventilátor ze starého počítače pro napětí 12 V. Pro jeho provoz by bylo potřeba použít další modul pro úpravu napětí. Po otestování však bylo zjištěno, že i při napájení 5 V ventilátor dostatečně chladí a zároveň je velmi tichý. Z toho důvodu byl připojen na výstup step-down měniče XL4015, který již napájí servomotor. Pro ochranu napájecího obvodu proti proudovému přetížení nebo zkratu byla mezi pin 24 V a vstup step-down měniče připojena vratná pojistka typu PolySwitch s proudovým omezením na 1,6 A. Ventilátor byl připevněn k víku boxu šrouby M3×25 se zápusťnou hlavou.

Celý box byl připevněn k rámu konstrukce pěti šrouby M5×10 se zápusťnou hlavou a jedním šroubem M5×12, který zároveň drží výše zmíněný silný drát. Nakonec byl box uzavřen víkem a zajištěn čtyřmi vrtuty 3×30 mm.



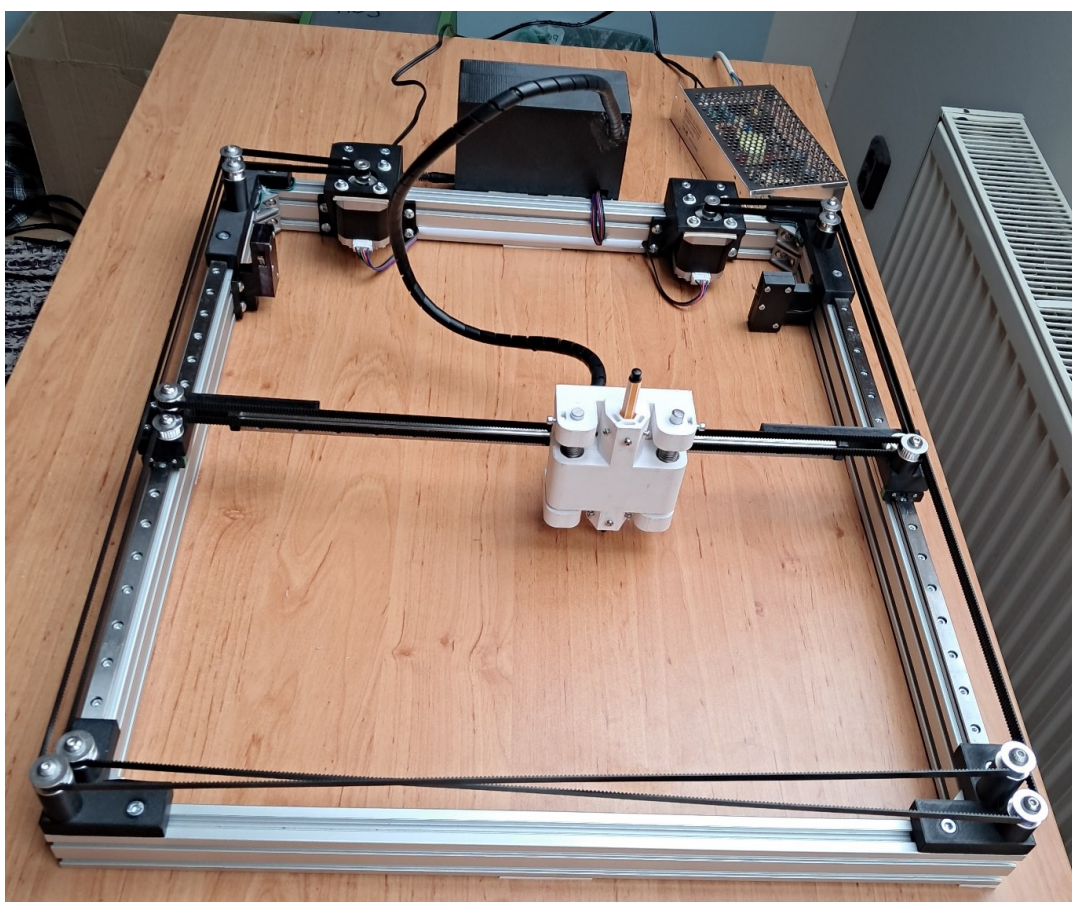
Obrázek 56: Centrální rozvodná jednotka celého zařízení



Obrázek 57: Návrh propojení řídicí jednotky se všemi komponenty

5.11 Výsledná konstrukce

Na obrázku č. 58 je vidět, jak vypadá kompletní konstrukce plotru. Seznam všech použitých komponent a jejich cen je v příloze P I, kde většina komponentů byla pořízena z internetových obchodů: Aliexpres.com, Dratek.cz a Laskakit.cz. Do cen komponentů však nebyly započítány náklady na dopravu. Seznam použitého spojovacího materiálu je v příloze P II. V příloze P III je potom přehled všech 3D tištěných dílů, u kterých však není uvedena cena, jelikož většina dílů byla vytištěna v laboratoři fakulty, v rámci školních možností. Rozměry zařízení jsou v příloze P IV.



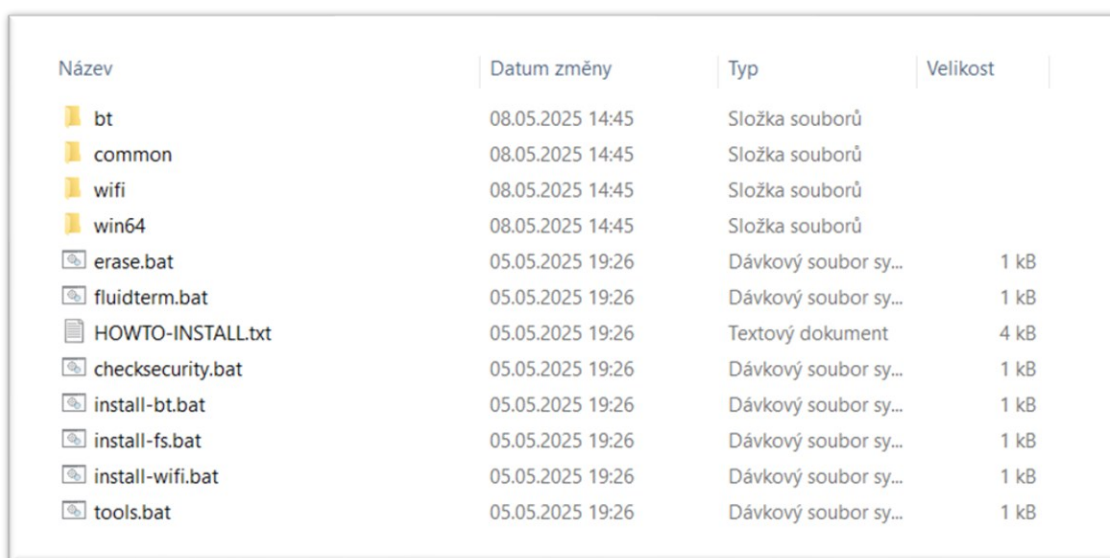
Obrázek 58: Kompletní konstrukce plotru

6 PROGRAM

Firmware, který řídí veškeré pohyby stroje, byl zvolen FluidNC. Je to flexibilní open-source firmware určený pro mikropočítače ESP32. Díky přehlednému webovému rozhraní představuje pohodlnou volbu pro práci s různými typy CNC strojů. Umožňuje ovládat až dvanáct motorů na šesti osách a nabízí širokou podporu ze strany aktivní uživatelské komunity. FluidNC má také vlastní wiki stránky, na kterých jsou podrobně popsány důležité informace a návody. [27]

6.1 Nahrání firmware do mikropočítače

Jako první byl z oficiálního zdroje na GitHubu stažen firmware – poslední vydaná verze. [28] Stažený archiv byl rozbalen. Pote byla řídicí deska MKS DLC32 připojena k napájecímu zdroji a k počítači pomocí USB kabelu. V rozbalené složce byl následně spuštěn soubor s názvem **install-wifi.bat**. (Pravým kliknutím na tento soubor a volbou „Upravit“ je možné nahlédnout, jaké konkrétní příkazy tento skript provádí). Tento skript po spuštění automaticky nahraje firmware do mikropočítače a povolí Wi-Fi komunikaci.

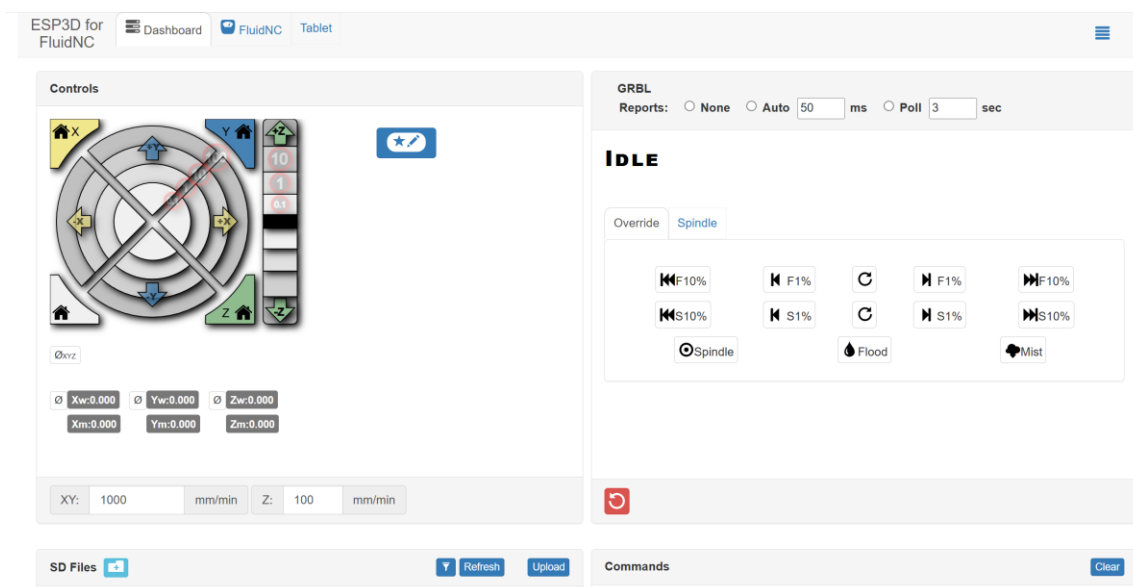


Název	Datum změny	Typ	Velikost
bt	08.05.2025 14:45	Složka souborů	
common	08.05.2025 14:45	Složka souborů	
wifi	08.05.2025 14:45	Složka souborů	
win64	08.05.2025 14:45	Složka souborů	
erase.bat	05.05.2025 19:26	Dávkový soubor sy...	1 kB
fluidterm.bat	05.05.2025 19:26	Dávkový soubor sy...	1 kB
HOWTO-INSTALL.txt	05.05.2025 19:26	Textový dokument	4 kB
checksecurity.bat	05.05.2025 19:26	Dávkový soubor sy...	1 kB
install-bt.bat	05.05.2025 19:26	Dávkový soubor sy...	1 kB
install-fs.bat	05.05.2025 19:26	Dávkový soubor sy...	1 kB
install-wifi.bat	05.05.2025 19:26	Dávkový soubor sy...	1 kB
tools.bat	05.05.2025 19:26	Dávkový soubor sy...	1 kB

Obrázek 59: Rozbalený archiv z GitHubu v3.9.7

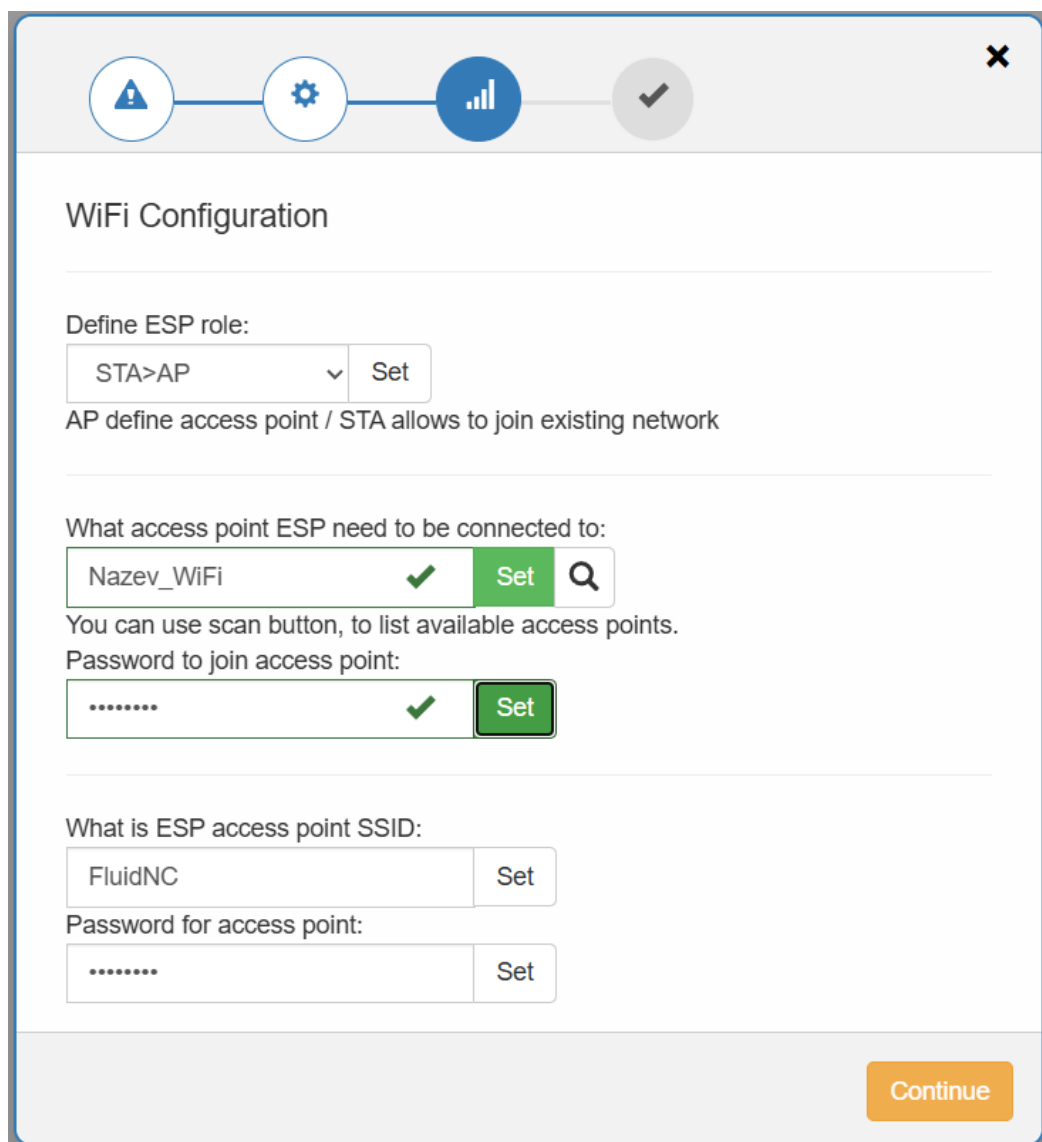
Po nahrání firmwaru bylo nutné mikropočítač restartovat odpojením a opětovným připojením napájecího kabelu řídicí desky. Tím se aktivovalo Wi-Fi připojení. Webové rozhraní však nebylo funkční, protože ještě nebyl nahrán k tomu potřebný soubor. Pro jeho nahrání bylo třeba spustit soubor z rozbaleného archivu pod názvem **fluidterm.bat**, čímž se otevřel terminál pro komunikaci s mikropočítačem. Po stisku klávesové zkratky Ctrl+U byl vybrán soubor **index.html.gz**, ze složky **wifi** a odeslán klávesou Enter. Po nahrání tohoto souboru již komunikační rozhraní fungovalo správně.

Poznámka: Po připojení k Wi-Fi mikropočítače by se mělo okno s webovým rozhraním načíst automaticky, případně na webové adrese <http://www.msftconnecttest.com/>.



Obrázek 60: Webové rozhraní FluidNC

Aby nebylo nutné se stále odpojovat od domácí Wi-Fi a připojovat k Wi-Fi síti vysílané deskou, byla deska nastavena tak, aby se připojovala přímo k domácí Wi-Fi síti. Postup byl následující: v rozhraní se kliklo na ikonu čtyř čárek, která je vidět na obrázku č. 60 vpravo nahoře. Následně byla zvolena možnost Setup, poté tlačítko Start setup a Continue, až se objevilo nastavení Wi-Fi, jak je vidět na obrázku č. 61. Zde se zadal název Wi-Fi sítě, ke které měla být deska připojena a potvrdil se tlačítkem Set. V kolonce níže se zadalo heslo k této síti a rovněž se potvrdilo tlačítkem Set. Nakonec se vše potvrdilo tlačítkem Continue a restartovala se deska, aby se nové změny v nastavení projevíly. Díky tomu bylo možné se k desce připojit prostřednictvím domácí Wi-Fi sítě po zadání webové adresy **fluidnc.local/** nebo IP adresy desky do internetového prohlížeče.



The image shows a 'WiFi Configuration' window with a progress bar at the top containing four icons: a warning triangle, a gear, a signal tower, and a checkmark. The window is titled 'WiFi Configuration' and contains several sections for configuring an ESP role and connecting to a WiFi network.

WiFi Configuration

Define ESP role:

STA>AP

AP define access point / STA allows to join existing network

What access point ESP need to be connected to:

Nazev_WiFi ☒

You can use scan button, to list available access points.

Password to join access point:

..... ☒

What is ESP access point SSID:

FluidNC

Password for access point:

.....

Obrázek 61: Nastavení Wi-Fi připojení

6.2 Konfigurační soubor

Dalším krokem bylo sestavení konfiguračního souboru, který slouží pro nastavení parametrů celého systému. Jako výchozí byl použit předpřipravený soubor pro desku MKS DLC32 V2.1. [29] V tomto souboru bylo upraveno několik důležitých parametrů tak aby odpovídaly zrealizovanému zařízení. Při konfiguraci bylo postupováno podle pokynů Fluid NC wiki. [27]

- **Typ kinematiky:** Kinematika byla nastavena na CoreXY, aby byly motory řízeny dle zvolené kinematiky.
- **Řízení motorů:** Byl použit režim I2S_STATIC, který umožňuje generování přesných krokových signálů přes I2S rozhraní. Délka krokového impulsu byla nastavena na 4 μ s, zpoždění při změně směru na 1 μ s. Motory se deaktivují ihned po ukončení pohybu.
- **Osy X a Y:** Obě osy mají nastavených 100 kroků/mm, maximální rychlost na 8000 mm/min a zrychlení 1000 mm/s². Koncová poloha se detekuje pomocí koncových spínačů připojených na pinech gpio.36 pro osu X a gpio.35 pro osu Y.

Výpočet kroků/mm [30]:

$$\frac{\text{kroky}}{\text{mm}} = \frac{\text{kroky na otáčku} * \text{mikrokroky}}{\text{rozteč řemene} * \text{počet zubů kladky}} = \frac{200 * 16}{2 * 16} = 100 \frac{\text{kroků}}{\text{mm}} \quad (5)$$

- **Osa Z (pero):** Osa Z se ovládá pomocí servo motoru přes PWM výstup na pinu gpio.25, s impulsy v rozsahu 1100–1900 μ s pro pohyb pera nahoru a dolů.
- **Limity:** Byly aktivovány tzv. soft-limity, které omezují pohyb, podle rozměrů zařízení. Pro osy X a Y bylo nastaveno 310 mm a pro osu Z 6 mm.
- **I2S rozhraní:** Bylo použito pro generování krokových signálů – piny gpio.16, gpio.17 a gpio.21.
- **SPI rozhraní a SD karta:** SD karta je připojena přes SPI sběrnici na pinech gpio.12, gpio.13, gpio.14, gpio.15 a složí pro nahrávání a spouštění G-kódu.
- **Nastavení výchozí polohy:** Nejprve se do výchozí (referenční) polohy nastaví osa Z, poté osa Y a nakonec osa X. Po prvním sepnutí koncového spínače vozík mírně poodjede a poté na spínač najede zpět sníženou rychlostí. Po druhém sepnutí vozík opět poodjede (pro osu X 10 mm, pro osu Y 2 mm) od spínače, aby nezůstal sepnutý.
- **Chování po startu:** Po startu prozatím nebyla nastavena žádná funkce.

6.3 Spuštění G-kódu

V programu Inkscape [31] byl požadovaný obraz převeden na vektorovou cestu, následně byla zadána velikost daného objektu, velikost nástroje a požadovaná rychlost pohybu. Na základě těchto parametrů byl vygenerován G-kód.

Pokud je v řídicí desce vložena SD karta, tak je možné na ni vygenerovaný G-kód nahrát přímo přes webové rozhraní. To se provádí kliknutím na tlačítko „Upload“ v sekci „SD Files“, kde lze následně vybrat požadovaný G-kód.

Po úspěšném nahrání G-kódu na SD kartu lze daný soubor spustit ve webovém rozhraní kliknutím na tlačítko „Play“ umístěné u příslušného souboru.

7 OVĚŘENÍ FUNKCE A ZHODNOCENÍ VLASTNOSTÍ PLOTU

Po dokončení konstrukce a nastavení firmwaru byly otestovány základní parametry plotru. Byla zjištěna maximální pracovní dráha nástroje v jednotlivých osách – $X = 342$ mm a $Y = 348$ mm. Pro běžný provoz však byly obě osy nastaveny na maximální vzdálenost 310 mm.

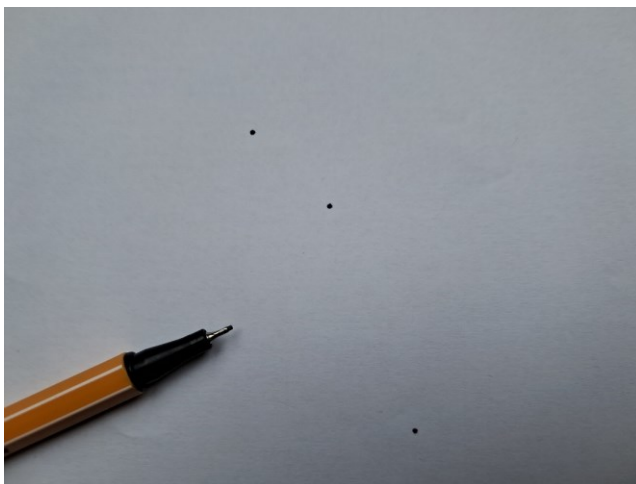
V této kapitole byly provedeny testy opakovatelnosti, rychlosti a zrychlení. Dále bylo pozorováno, při jaké rychlosti dochází k výskytu vibrací. Na závěr byl vykreslen složitější obrázek, aby se ověřila schopnost detailního a dlouhodobého kreslení.

7.1 Test opakovatelnosti

Cílem tohoto testu bylo ověřit, zda je plotr schopen se opětovně navracet do stejného bodu. Pro testování byl náhodně vybrán cílový bod, do kterého měl plotr dorazit z deseti náhodně vybraných bodů z celé pracovní plochy v různých rychlostech. Test byl proveden celkem třikrát pro různé cílové a startovní body.

Z výsledků, které jsou vidět na obrázku č. 62 je patrné, že zařízení bylo pokaždé schopné najet na zadanou souřadnici s vysokou přesností. Je třeba poznamenat že z důvodu vizualizace výsledků byl papír pokaždé před testem umístěn do pozice cílového bodu. Ve skutečnosti však byly vzdálenosti mezi cílovými body větší, jak je zmíněno níže.

- První test měl souřadnice cílového bodu $X = 85,00$ a $Y = 65,00$.
- Druhý test měl souřadnice cílového bodu $X = 120,00$ a $Y = 100,00$.
- Třetí test měl souřadnice cílového bodu $X = 200,00$ a $Y = 230,00$.



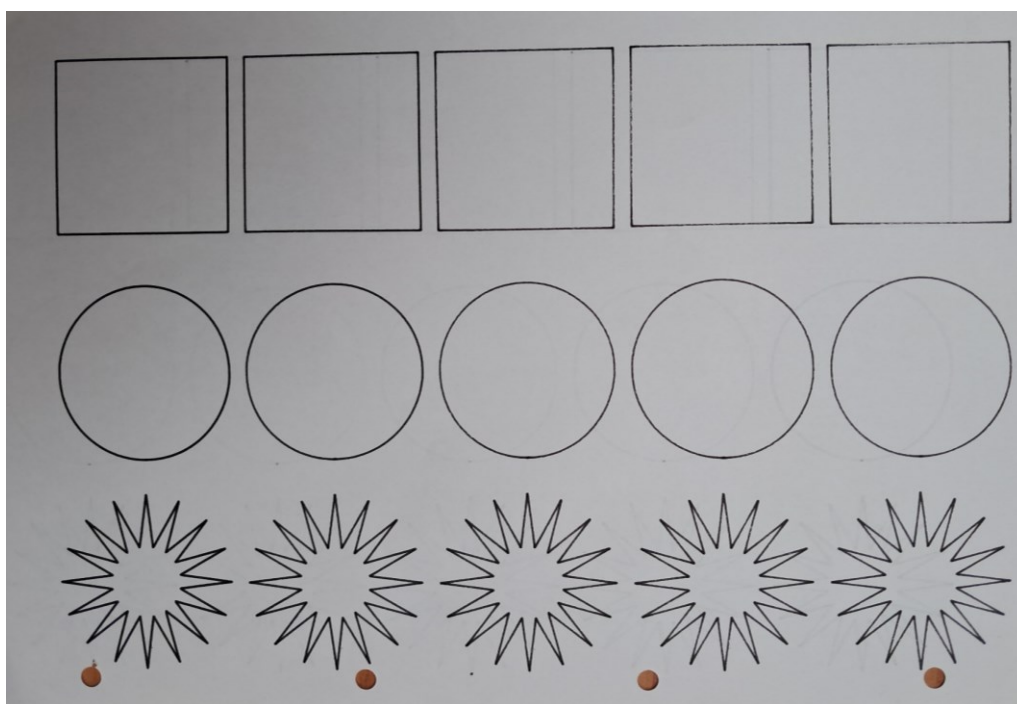
Obrázek 62: Test opakovatelnosti

7.2 Test přesnosti

Test přesnosti byl proveden tak, že měl plotr za úkol nakreslit čtverec o délce strany 50 mm, kružnici o průměru 50 mm a šestnáctícípou hvězdu, u které vzdálenost dvou protilehlých cípů činila 50 mm. Tyto geometrické útvary byly vykresleny v rychlostech 1000 mm/min, 3000 mm/min, 6000 mm/min, 9000 mm/min a 12000 mm/min. Test byl proveden celkem třikrát pro tři různé hodnoty zrychlení: 600 mm/s², 1000 mm/s², 2000 mm/s².

Při následném přeměření posuvným měřítkem bylo zjištěno, že všechny rozměry odpovídaly zadaným hodnotám, a to i při vyšších hodnotách rychlosti a zrychlení. Byla tak potvrzena přesnost za daných podmínek.

Bylo však pozorováno že při vyšších rychlostech byla stopa pera méně sytá ve srovnání s nižšími rychlostmi. Dále bylo zjištěno, že při vyšších rychlostech dochází k vibracím zařízení, což poukazuje na limity mechanické stability konstrukce.



Obrázek 63: Test přesnosti pro zrychlení 1000 mm/s²

7.3 Test vibrací

Na základě zjištění z předešlého testu, kde bylo pozorováno, že při vyšších rychlostech docházelo k vibracím, byl proveden samostatný test vibrací. Cílem testu bylo zjistit maximální rychlost kdy ještě nedocházelo k vibracím. Test probíhal tak, že byl plotr posílán přes celou pracovní plochu při různých rychlostech.

Bylo vypořádováno, že maximální rychlost, kde nedocházelo k vibracím bylo v diagonálním směru 8000 mm/min a v přímém směru jednotlivých os 10000 mm/min.

7.4 Test dlouhodobého běhu

V posledním testu byl pozorován výkon plotru při dlouhodobém běhu a detailní kresbě. Do zařízení byl zadán složitý a vysoce detailní obrázek. Rychlost kreslení byla nastavena na 4000 mm/min a zrychlení na 1000 mm/s².

Výstup z plotru vypadal velmi přesně a detailně. V některých místech se objevila dvojité čáry, což je však zcela normální, jelikož vygenerovaný G-kód počítá s obrysem čar. Pokud je čára širší, tak je obtažení z obou stran více viditelné.

Zhruba po 30 minutách kresby bylo pozorováno výraznější zahřívání motorů a driverů. Celková doba kresby byla přibližně 43 minut. Delší provoz bez přestávky by mohl vést k přehřátí driverů, což by znamenalo dočasné přerušení chodu.



Obrázek 64: Detailní obrázek vykreslený plotrem

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit plošný perový plotr s důrazem na přesnost a rychlost. Na základě získaných informací z oblasti konstrukce a řízení plotrů byly zvoleny komponenty, které odpovídaly požadovaným vlastnostem. Mechanická konstrukce byla realizována z hliníkových profilů a 3D tištěných dílů. Pohyb v osách zajišťuje lineární vedení MGN12H v kombinaci s ozubenými řemeny GT2 a kladkami poháněnými dvěma krokovými motory typu NEMA17. Tyto motory jsou řízeny 32bitovým mikropočítačem ESP32-WROOM-32U pomocí driverů MKS TMC2209 V2.0.

Zvolený mikropočítač je integrován na základní desce MKS DLC32 V2.1, která umožňuje propojení všech elektrických komponent. Mezi tyto komponenty patří drivery, motory, koncové spínače os X a Y, step-down měnič XL4015 a z něho napájený ventilátor a mikroservo SG90, které se stará o zdvih pera. Díky možnosti komunikace přes Wi-Fi síť není nutné být k zařízení připojen kabelem, což zvyšuje uživatelský komfort.

Výsledkem je stabilní konstrukce, která bez vibrací zvládá pohyb až do rychlosti 8000 mm/min (133 mm/s). I při této rychlosti je plotr schopen poskytnout velmi přesný výstup, což bylo potvrzeno během testování. Výkresy s nižšími nároky na složitost dokáže plotr vykreslit během několika desítek sekund až jednotek minut, což potvrzuje vysokou efektivitu zařízení.

Během dlouhodobého provozu byl však vyzorován problém s vyšší provozní teplotou motorů a driverů, což by při delším používání bez přestávky mohlo způsobit výpadek driverů nebo jejich poškození. Jednoduchým řešením by mohlo být připojení ventilátoru na vyšší napětí pro intenzivnější chlazení, případně pořízení ventilátoru na 24 V, který by mohl být řízen přímo z výstupu pro ventilátor na řídicí desce. Dalším řešením by bylo použití řídicí desky, která podporuje komunikaci s chytrými drivery přes rozhraní UART. To by umožnilo řídit proud do motoru softwarově a tím výrazně snížit přehřívání jak motorů, tak samotných driverů.

Celková cena navrženého a zkonstruovaného zařízení byla vyčíslena na 4999 Kč (viz příloha P I). Do této částky však nebyly započítány náklady na 3D tisk a drobné komponenty, jako jsou pružiny, spirálový chránič, vodiče a další součásti, které byly k dispozici zdarma. Ve výsledku se tak podařilo sestavit přesný a rychlý plotr s příznivým poměrem cena/výkon.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ROWE AUSTRALIA. *Types of Plotter Printers: A Comprehensive Guide*. Online. Roweaustralia. 2024. Dostupné z: <https://roweaustralia.com.au/types-of-plotter-printers-a-comprehensive-guide/>. [cit. 2025-04-18].
- [2] GEEKSFORGEES. *What is a Plotter*. Online. GEEKSFORGEES. Geeksforgeeks. 2023. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/what-is-a-plotter/>. [cit. 2025-04-18].
- [3] FOLEY, James D. *Computer graphics: principles and practice*. 2nd ed. Boston: Addison-Wesley, 1996. ISBN 02-018-4840-6.
- [4] *Rozdíl mezi tiskovým plotrem a tiskárnou – v čem se liší a kdy je využijete*. Online. Techzon.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.techzon.cz/rozdil-mezi-tiskovym-plotrem-a-tiskarnou-v-cem-se-lisi-a-kdy-je-vyuzijete/>. [cit. 2025-04-18].
- [5] HP. *Plotter vs Printer: What Is The Difference In Their Applications?* Online. HP. 2024. Dostupné z: <https://largeformat.hp.com/in/blog/plotter-v-s-printer-what-is-the-difference#difference-between-plotters-and-printers-which-is-right-for-you>. [cit. 2025-04-18].
- [6] MYŠKA, Karel a MUNZAR, Michal. *Grafika a základy videotvorby*. Vydání: první. Texty k sociální práci. Vybrané kapitoly z teorií a metod sociální práce. Hradec Králové: Gaudeamus, 2014. ISBN 978-80-7435-457-1.
- [7] PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0110-1.
- [8] *Arduino*. Online. C2025. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>. [cit. 2025-04-18].
- [9] *Espressif*. Online. C2025. Dostupné z: www.espressif.com. [cit. 2025-04-18].
- [10] *Raspberry pi*. Online. C2025. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/>. [cit. 2025-04-18].
- [11] *Raspberry Pi Pico W Datasheet: An RP2040-based microcontroller board with wireless*. Online. Raspberry pi. 2024. Dostupné z: <https://datasheets.raspberrypi.com/picow/pico-w-datasheet.pdf>. [cit. 2025-04-18].
- [12] *Linear Bearing Selection Guide*. Online. PCB linear. C2025. Dostupné z: <https://pages.pbclinear.com/rs/909-BFY-775/images/ebook-PBC-Linear-Bearing-Selection-Guide.pdf>. [cit. 2025-04-18].
- [13] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. 3. vydání. MM speciál. Praha: MM publishing, 2014. ISBN 978-80-260-6780-1. Dostupné také z: <http://kramerusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:3af97840-7e1c-11e5-ac67-005056827e51>.
- [14] *What is Better-Linear Bearings vs. V Wheels for 3D Printers?* Online. Kingroon. C2024. Dostupné z: <https://kingroon.com/blogs/3d-print-101/better-linear-bearings-vs-v-wheels>. [cit. 2025-04-18].
- [15] BROŽ, Ing. Václav. *Řemeny pro přímočarý pohyb*. Online. Uzimex. C2006. Dostupné z: https://www.uzimex.cz/soubory/20080513_tat_2008-05.pdf. [cit. 2025-04-18].

- [16] FIORE, Carmine. *Stepper Motors Basics: Types, Uses, and Working Principles*. Online. Monolithic Power Systems. C2025. Dostupné z: https://media.monolithicpower.com/mps/cms_document/2/0/2020-stepper-motors-basics-types-uses-and-working-principles_r1.0_1.pdf. [cit. 2025-04-18].
- [17] O'CONNELL, Jackson. *The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY & More*. Online. All3DP. 2023. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scarab-belt-corexy-polar/>. [cit. 2025-04-19].
- [18] *Kinematika CoreXY*. Online. 3D DISTRIBUTED. C2025. Dostupné z: <https://3ddistributed.com/corexy-3d-printer/corexy-kinematics/>. [cit. 2025-04-19].
- [19] *Drawbacks of the H-Bot*. Online. Doublejumelectric. C2025. Dostupné z: https://www.doublejumelectric.com/projects/core_xy/2014-07-15-core_xy/. [cit. 2025-04-22].
- [20] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada Publishing, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [21] *Polar CNC Plotter*. Online. Instructables. C2025. Dostupné z: <https://www.instructables.com/Polar-CNC-Plotter/>. [cit. 2025-05-14].
- [22] *Krokový motor NEMA17 - 47 mm, 42HD6021-03*. Online. Dratek.cz. C2025. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/48394-krokovy-motor-nema17-47mm-42hd6021-03.html?gl=1*15mg4uu*up*MQ..*gs*MQ..&gclid=Cj0KCQjws-S-BhD2ARIsALssG0ZleIakzZr-azBWVqtvu2JUz3PbWv7PB5Wa_vcSBPKgMq-yIQy6JJsaA19_EALw_wcB. [cit. 2025-05-22].
- [23] *MKS DLC32 V2 Wiring Manual*. Online. GitHub. 2024. Dostupné z: <https://github.com/makerbase-mks/MKS-DLC32/blob/main/MKS-DLC32-main/doc/DLC32%20wiring%20manual.pdf>. [cit. 2025-05-12].
- [24] *MakerBase MKS DLC32*. Online. Wiki FluidNC. 2025. Dostupné z: http://wiki.fluidnc.com/en/hardware/3rd-party/MKS_DLC32. [cit. 2025-05-14].
- [25] *TMC2209 Datasheet*. Online. Analog Devices. C2025. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/tmc2209_datasheet_rev1.09.pdf. [cit. 2025-05-14].
- [26] *MKS TMC2209 V2.0_001 SCH*. Online. GitHub. C2025. Dostupné z: https://github.com/makerbase-mks/MKS-StepStick-Driver/blob/master/MKS%20TMC2209/MKS%20TMC2209%20V2.0_001/MKS%20TMC2209%20V2.0_001%20SCH.pdf. [cit. 2025-05-14].
- [27] *FluidNC Wiki*. Online. 2025. Dostupné z: <http://wiki.fluidnc.com>. [cit. 2025-05-12].
- [28] *bdring Releases*. Online. GitHub. C2025. Dostupné z: <https://github.com/bdring/FluidNC/releases>. [cit. 2025-05-12].
- [29] *Skorpi. MKS_DLC32_21_XYZ.yaml*. Online. GitHub. 2022. Dostupné z: https://github.com/bdring/fluidnc-config-files/blob/main/official/MKS_DLC32_21_XYZ.yaml. [cit. 2025-05-14].
- [30] *Steps per mm calculator - lead screw & GT2 timing belt*. Online. Circuitist. C2023. Dostupné z: <https://www.circuitist.com/how-to-calculate-steps-per-mm-lead-screw-and-gt2-timing-belt/>. [cit. 2025-05-14].
- [31] *Inkscape*. Online. Dostupné z: <https://inkscape.org/>. [cit. 2025-05-20].
- [32] *FCX2000-180VC Flatbed Cutting Plotter*. Online. In: Graphtec. C2025. Dostupné z: <https://graphtec europe.eu/fcx2000-180vc-flatbed-cutting-plotter.html>. [cit. 2025-04-18].

- [33] SOMMA, Ryan. *Calcomp drum plotter (1966)*. Online. Flickr. 2009. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/ideonex/3241969807/>. [cit. 2025-04-18].
- [34] *Top 10 Best Pen Plotters for Bulk Writing*. Online. Uuna tek. 2024. Dostupné z: <https://uunatek.com/blogs/tips-and-tricks/top-10-best-pen-plotter-for-bulk-writing-2024>. [cit. 2025-04-18].
- [35] *Axidraw*. Online. C2016-2023. Dostupné z: <https://axidraw.com/>. [cit. 2025-04-18].
- [36] *Epson SureColor SC-T3100*. Online. Alza.cz. C1994-2025. Dostupné z: <https://www.alza.cz/epson-surecolor-sc-t3100-d5471635.htm>. [cit. 2025-04-18].
- [37] computerthesaurus. *Electrostatic Plotter*. Online. Wordpress.com. 2016. Dostupné z: <https://computerthesaurus.wordpress.com/2016/05/29/electrostatic-plotter/>. [cit. 2025-04-18].
- [38] *CE8000-130 Cutting Plotter with ST0123 Stand*. Online. In: Graphtec. C2025. Dostupné z: <https://graphteceurope.eu/ce8000-130-cutting-plotter-st0123-stand.html>. [cit. 2025-04-18].
- [39] *Laserový plotr - gravírka Atomstack A10 Pro 40x40cm*. Online. Cncworld.cz/. -. Dostupné z: <https://www.cncworld.cz/laserov-plotr-gravirka-atomstack-a10-pro-40x40cm-distribuce-v-cz-p-290.html>. [cit. 2025-04-18].
- [40] BADA, Tomáš. *Jaký je rozdíl mezi rastrovou a vektorovou grafikou*. Online. Vektorova grafika. 2018. Dostupné z: <https://vektorova-grafika.cz/rastrova-a-vektorova-grafika-jaky-je-rozdil/>. [cit. 2025-04-18].
- [41] tm6blogict. *Bézierova křivka*. Online. In: Wordpress.com. 2016. Dostupné z: <https://tm6blogict.wordpress.com/2016/12/23/grafika/>. [cit. 2025-04-18].
- [42] *ESP32-S2-DevKitM-1*. Online. Espressif. C2025. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32s2/esp-dev-kits-en-master-esp32s2.pdf>. [cit. 2025-05-12].
- [43] *Linear Motion Tips*. Online. <https://www.linearmotiontips.com/>. C2025. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/what-causes-plain-bearing-wear/>. [cit. 2025-04-18].
- [44] *What Is a Linear Guide (Linear Motion Guide)?* Online. Thk. C2025. Dostupné z: <https://www.thk.com/opm/jp/en/linear/thklinearguide/>. [cit. 2025-04-18].
- [45] *Hin Wall Linear Ball Bearing KHP40 40mm ISO Metric Closed*. Online. PCB linear. C2025. Dostupné z: <https://shop.pbclinear.com/products/khp40>. [cit. 2025-04-18].
- [46] *Ozubený řemen GT2 6 mm se skelnými vlákny - Otevřený*. Online. Drátek.cz. C2025. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/149680-ozubený-remeny-gt2-6mm-se-skelnými-vlakny-otevreny-1m.html?_gl=1*5ghqb8*_up*MQ..*_gs*MQ..&gclid=CjwKCAjw8IfABhBXEiwAxRHlsDjWZrh6vBrFj16KDLXHFcza1Msok5XpLBOcFTIz0WVn2HkyEvW5kxoCs3EQA_vD_BwE. [cit. 2025-04-18].
- [47] *Krokový motor - Hybridní krokový motor*. Online. Servo-drive. 2012. Dostupné z: https://www.servo-drive.cz/%C4%8Dasto_pokl%C3%A1dan%C3%A9_ot%C3%A1zky_o_krokov%C3%BDch_motorech.php. [cit. 2025-04-18].
- [48] DIRKSE, David. *The Hbot*. Online. DavData. Dostupné z: <https://www.davdata.nl/math/hbot-eng.html>. [cit. 2025-04-19].
- [49] Ondřej Švanda. *Software for Efficient Use of Material in 2D Machining | Software pro Efektivní Využití Materiálu při 2D Obrábění*. Diplomová práce. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2020.

- [50] *Plastové micro servo SG90 9g, 180°*. Online. Láska kit. C2025. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/plastove-micro-servo-sg90-9g--180/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=2_SEA_DSA_%5BCZ%5DtROAS490%2F370&utm_id=1371577095&gad_source=1&gad_campaignid=1371577095&gbraid=0AAAAADPjitlkPx203wscsBOfLAhx9SDAb&gclid=Cj0KCQjw0LDBBhCnARIsAMpYlArDlamEmG2r6JpsWxkGkPiUYpY_4mbtiREylOkNH0Wm4pNe5Yfs6EYaAj8dEALw_wcB. [cit. 2025-05-20].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Stolní řezací plotr [32]	16
Obrázek 2: Historický bubnový plotr Calcomp (1966) [33].....	17
Obrázek 3: Moderní bubnový plotr [34].....	17
Obrázek 4: Perový plotr AxiDraw V3 [35]	18
Obrázek 5: Inkoustový plotr [36].....	18
Obrázek 6: Elektrostatický plotr [37]	19
Obrázek 7: Bubnový řezací plotr [38]	19
Obrázek 8: Laserový plotr [39].....	20
Obrázek 9: Porovnání – rastrový obrázek vlevo a vektorový obrázek vpravo [40]	21
Obrázek 10: Bézierova křivka [41].....	22
Obrázek 11: Zjednodušené schéma počítače [7]	25
Obrázek 12: Vývojová deska Arduino Uno R3 [8]	26
Obrázek 13: Vývojová deska ESP32-S2-DevKitM-1 [42].....	26
Obrázek 14: Vývojová deska Raspberry Pi Pico W [11].....	27
Obrázek 15: Kluzné ložisko na vodící tyči [43]	28
Obrázek 16: Porovnání rotačního a lineárního ložiska [44]	29
Obrázek 17: Kuličkové ložisko na kulatý hřídel [45].....	29
Obrázek 18: Řez vozíkem na profilované lineární kolejnici [44].....	30
Obrázek 19: Válečková ložiska (V-kolečka) na hliníkovém profilu [14]	31
Obrázek 20: Uspořádání převodu na přímočarý pohyb s vratnou větví [15].....	32
Obrázek 21: Ozubený řemen GT2 [46]	32
Obrázek 22: Princip funkce krokového motoru [16]	33
Obrázek 23: Konstrukce dvojfázového hybridního krokového motoru [47].....	34
Obrázek 24: Základní schéma řízení krokového motoru [16]	36
Obrázek 25: Kroky ve vlnovém režimu [16]	37
Obrázek 26: Kroky v režimu plného kroku [16].....	37
Obrázek 27: Kroky v režimu polovičního kroku [16]	38
Obrázek 28: Princip mikrokrokování [16].....	38
Obrázek 29: Jednoduchá kartézská kinematika	39
Obrázek 30: Kinematika Core XY [18]	40
Obrázek 31: Kinematika H-bot [48]	42
Obrázek 32: Cesta pera podle G-kódu [49]	44
Obrázek 33: Stavba rámu z hliníkových profilů	47
Obrázek 34: Čištění lineárního ložiska	48

Obrázek 35: Mazání lineárního ložiska	49
Obrázek 36: Vyrovnání a připevnění osy Y k rámu	50
Obrázek 37: Vyrovnání a připevnění osy X k ose Y	50
Obrázek 38: Rohové díly pro uchycení kladek GT2.....	51
Obrázek 39: Rohové díly u motoru pro uchycení kladek GT2	52
Obrázek 40: Pohyblivé díly pro uchycení kladek GT2 a osy X.....	52
Obrázek 41: Spodní strana dílů pro uchycení kladek GT2	53
Obrázek 42: Kladka mezi polyamidovými podložkami	53
Obrázek 43: Rám osazený 3D tištěnými díly s kladkami	54
Obrázek 44: Motory uchycené k rámu pomocí 3D tištěných držáků	54
Obrázek 45: Uchycení řemenů.....	55
Obrázek 46: Vedení řemenů	55
Obrázek 47: Řídicí deska MKS DLC32 V2.1 [23]	56
Obrázek 48: Schéma MKS TMC2209 V2.0 [26]	57
Obrázek 49: Drivery TMC2209 s chladičem.....	58
Obrázek 50: Modul mechanického koncového spínače.....	60
Obrázek 51: Pouzdro s koncovým spínačem pro osu X připevněné k rámu	60
Obrázek 52: Přilepené díly k držáku řemene	61
Obrázek 53: Statický díl se servomotorem	62
Obrázek 54: Zvedací mechanismus pera	63
Obrázek 55: Plastové mikroservo SG90 [50]	63
Obrázek 56: Centrální rozvodná jednotka celého zařízení	64
Obrázek 57: Návrh propojení řídicí jednotky se všemi komponenty	65
Obrázek 58: Kompletní konstrukce plotru.....	66
Obrázek 59: Rozbalený archiv z GitHubu v3.9.7	67
Obrázek 60: Webové rozhraní FluidNC	68
Obrázek 61: Nastavení Wi-Fi připojení.....	69
Obrázek 62: Test opakovatelnosti.....	72
Obrázek 63: Test přesnosti pro zrychlení 1000 mm/s^2	73
Obrázek 64: Detailní obrázek vykreslený plotrem	75

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Řízení směru pohybu CoreXY kinematiky [18].....	41
Tabulka 2: Adresy používané v G-kódu [20]	44
Tabulka 3: Nastavení mikrokrokování pro drivery TMC2209 [26]	59

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A/D	Analog to Digital
BMP	Bitmap Image
CNC	Computer Numerical Control
D/A	Digital to Analog
EPS	Encapsulated PostScript
GIF	Graphics Interchange Format
GND	Ground
GPIO	General Purpose Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
I2S	Inter-IC Sound
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LED	Light Emitting Diode
MCU	Microcontroller Unit
MKS	Makerbase
PDF	Portable Document Format
PNG	Portable Network Graphics
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
ROM	Read-Only Memory
SD	Secure Digital
SPI	Serial Peripheral Interface
SVG	Scalable Vector Graphics
TIFF	Tagged Image File Format

TMC	Trinamic Motion Control
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus
Wi-Fi	Wireless Fidelity

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Použité komponenty a jejich cena

Příloha P II: Použitý spojovací materiál

Příloha P III: Přehled 3D tištěných dílů

Příloha P IV: Rozměry perového plotru

PŘÍLOHA P I: POUŽITÉ KOMPONENTY A JEJICH CENA

Název	Velikost (typ)	Počet [ks]	Cena [Kč]
Hliníkový profil 20x40	510 mm	2	351
Hliníkový profil 20x40	550 mm	2	372
Hliníkový úhelník	20×20 mm	8	48
Lineární vedení MGN12H	400 mm	3	1343
Kladka GT2 pro řemen 6 mm	20 zubů	8	360
Kladka GT2 pro řemen 6 mm	hladká	4	180
Řemenice GT2 pro řemen 6 mm	16 zubů	2	70
Řemen GT2 6 mm	5 m	1	152
Krokový motor NEMA17 – 42HD6021-03	47 mm	2	618
Řídicí deska MKS DLC32	V2.1	1	340
Průmyslový napájecí (spínaný) zdroj	24 V; 6 A; 144 W	1	330
SD karta	16 GB	1	61
Motor driver MKS TMC2209	V2.0	2	190
Koncový spínač	-	2	45
Kovová vodicí tyč (průměr 8 mm)	200 mm	1	49
Prodloužené kuličkové ložisko LM8LUU	8 mm	2	102
Servomotor SG90	mikro servo - 180°	1	58
DC/DC Step-down měnič XL4015	1,25-30 V; 5 A	1	59
Ventilátor 12 V (ze starého PC)	80×80×15	1	0
Vratná pojistka PolySwitch	60 V; 1,6A	1	10
Spojovací materiály (viz příloha P II)	-	-	261
Celková cena:			4999

PŘÍLOHA P II: POUŽITÝ SPOJOVACÍ MATERIÁL

Název	Typ	Velikost	Počet	Cena [Kč]
Šroub	půlkulatá hlava	M3×12	6	2,88
Šroub	půlkulatá hlava	M5×8	16	13,12
Šroub	půlkulatá hlava	M5×10	12	8,88
Šroub	půlkulatá hlava	M5×12	1	0,76
Šroub	půlkulatá hlava	M5×25	4	4,92
Šroub	půlkulatá hlava	M5×40 (38)	6	12,90
Šroub	půlkulatá hlava	M5×50	4	8,36
Šroub	válcová hlava	M2×15	2	2,20
Šroub	válcová hlava	M3×8	32	23,04
Šroub	válcová hlava	M3×10	2	1,54
Šroub	válcová hlava	M3×12	12	8,88
Šroub	válcová hlava	M3×14	16	19,68
Šroub	válcová hlava	M3×15	4	4,44
Šroub	válcová hlava	M5×12	10	7,70
Šroub	válcová hlava	M5×30	2	2,54
Šroub	válcová hlava	M5×45	2	3,62
Šroub	zápustná hlava	M3×25	4	7,04
Šroub	zápustná hlava	M5×10	5	3,85
Vrut	půlkulatá hlava	3×8 mm	6	0,96
Vrut	půlkulatá hlava	3×30 mm	4	1,00
T-matice	hladká	M3	32	53,76
T-matice	kladívková	M5	42	50,40
Matice	-	M2	2	0,44
Matice	-	M3	16	2,08
Matice	-	M5	6	1,26
Matice	pojistná	M3	4	0,88
Matice	pojistná	M5	8	2,16
Podložka	kovová	M3	8	1,28
Podložka	kovová	M5	4	1,64
Podložka	polyamidová	M5	24	8,88
Celková cena:				261,09

PŘÍLOHA P III: PŘEHLED 3D TIŠTĚNÝCH DÍLŮ

Název	Varianta
Vyrovnávací přípravek	pro osu X, pro osu Y
Podpěra pro kladky (rohová)	levá a pravá
Podpěra pro kladky (rohová u motoru)	levá a pravá
Podpěra pro kladky (pohyblivá)	levá a pravá
Držák řemene (statický díl zvedacího mechanismu)	-
Podložka pod držák řemene	-
Krycí díl vozíku na ose X	-
Doraz na spínač osy X	-
Držák pera	-
Držák motoru	nízká a vysoká
Pouzdro pro koncový spínač (spodní díl)	pro osu X, pro osu Y
Pouzdro pro koncový spínač (horní díl)	-
Box na elektroniku	box a víko

PŘÍLOHA P IV: ROZMĚRY PEROVÉHO PLOTRU

