

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Digitalizace a výroba klíčů

Jan Löbl

Bakalářská práce
2023

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan Löbl**
Osobní číslo: **I19200**
Studijní program: **B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Digitalizace a výroba klíčů**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je navrhnout a sestavit zařízení, které provede naskenování tvaru klíče a podle provedeného skenu vytvoří repliku původního klíče. Zařízení bude sestávat ze dvou částí. První provede skenování tvaru klíče a uloží data do souboru, druhá část bude na základě pokynů z datového souboru provádět frézování repliky klíče.

V teoretické části se student seznámí s možnostmi optických snímačů, řízením motorů a přenosem dat do PC.

V praktické části student navrhne a sestrojí systém, který bude skenovat a replikovat klíče.

Rozsah pracovní zprávy: **40**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. REJFEK, L., PESEK, J., BRAZDA, V. and FISER, O., 2014. Distrometer based on measurement of fall velocity, 2014 24th International Conference Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2014 – Proceedings 2014.
2. MATOUŠEK, David. Práce s mikrokontroléry ATMEL AT89C2051: [měření, řízení a regulace pomocí několika jednoduchých přípravků]. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ?C & praxe. ISBN 80-7300-174-8.
3. PIRKL, Josef. Řešené příklady v C#, aneb, C# skutečně prakticky. České Budějovice: Kopp, 2005. ISBN 80-7232-265-6.
4. DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-184-5.
5. NOVÁK, Petr. Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-141-1. 6. <https://www.timextrade.cz/polotovary-klicu/cylindricke/fab-profil-yjma>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luboš Rejfek, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2022**

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. ledna 2022

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 30. 08. 2023

Jan Löbl

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mým rodičům za jejich podporu během mého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku skenování a replikace klíčů. V teoretické části je popsána teorie skenování a frézování materiálu. A dále pak teorie řízení elektromotorů. Praktická část se zabývá návrhem a konstrukcí systému pro skenování a replikaci klíčů. Funkčnost zařízení byla ověřena pomocí testovacích replikací klíčů.

Klíčová slova

klíč, replikace klíčů, skenování tvaru klíče

Title

Digitalization and reproduction of the keys

Annotation

This bachelor thesis is focused on the issue of scanning and replication of keys. In the theoretical part, the theory of scanning and milling of a material is described. Then the theory of control of electric motors is described. The practical part deals with the design and construction of the system for scanning and replication of the keys. The functionality of the system has been verified by key replication test.

Keywords

key, key replication, key scanning

Obsah

1 Klíče	13
1.1 Historie klíčů.....	13
1.2 Druhy klíčů.....	13
1.2.1 Cylindrický.....	13
1.2.2 Tvarový.....	14
1.2.3 Dozický.....	14
1.2.4 Trezorový.....	15
1.2.5 Nábytkový.....	15
1.2.6 Autoklíč.....	16
2 Motory	17
2.1 Stejnosměrné (DC) motory kartáčové.....	17
2.1.1 Princip fungování.....	17
2.1.2 Zpětné EMF (ElectroMotive Force).....	19
2.1.3 Náběhový proud.....	20
2.1.4 PWM.....	21
2.1.5 Konstrukce PWM obvodu.....	22
2.2 Krokové motory.....	23
2.2.1 Dělení krokových motorů dle vinutí.....	24
2.2.2 Funkce hybridních krokových motorů.....	25
2.2.3 Ovládání krokových motorů.....	27
2.2.4 Mikrokrokování.....	29
2.3 Přenos pohybu krokovým motorem.....	30
2.3.1 Systém šroub-matice.....	30
2.3.2 Ozubený řemen.....	32
2.3.3 Upevnění objektu.....	33
3 Skenování klíče	35
3.1 Možnosti skenování.....	35
3.1.1 Reflexní optický sensor.....	35
3.1.2 Obrazový skener.....	35
3.1.3 Skenování za pomoci Fresnelových čoček.....	36
3.2 Navržené skenovací zařízení.....	37

3.3 Mechanická část skeneru.....	39
3.4 Zapojení.....	40
4 Frézování.....	42
4.1 Způsoby frézování.....	42
4.1.1 Nesousledné frézování.....	42
4.1.2 Sousledné frézování.....	42
4.1.3 Frézování čelními frézami.....	43
4.1.4 Rozdělení fréz.....	43
4.2 Úhlové frézy pro frézování klíčů.....	44
4.3 Řezné podmínky.....	44
5 Konstrukce výřezového zařízení.....	45
5.1 Pohyb po Z ose.....	45
5.2 Pohyb po X ose.....	45
5.3 Motor a řezný disk.....	46
6 Firmware.....	47
6.1 Přenos dat.....	47
6.2 Firmware skenovacího zařízení.....	49
6.2.1 Funkce.....	49
6.2.2 Pozicování klíče.....	52
6.3 Firmware výřezového přípravku.....	52
6.3.1 Definice konstant.....	52
6.3.2 Funkce.....	52
6.3.3 Pozicování materiálu při vyřezávání.....	55
7 Testování.....	56
7.1 Test nákresem.....	56
7.2 Test měřením zubů.....	57

Seznam zkratek

DC	Direct Current
AC	Alternating current
PWM	Pulse Width Modulation
EMF	Electromotive force
CNC	Computer numerical control

Seznam obrázků

Obrázek 1: Stroj na kopírování klíčů [5].....	12
Obrázek 2: Princip fungování stavítek [5].....	13
Obrázek 3: Zadlabávací zámek [4].....	14
Obrázek 4: Dózický klíč [4].....	14
Obrázek 5: Trezorový zámek s klíčem [3].....	15
Obrázek 6: Rozvorový zámek [5].....	15
Obrázek 7: Autoklíč [6].....	16
Obrázek 8: Jednotlivé kroky při točení kartáčového motoru [15].....	17
Obrázek 9: Rotor kartáčového motoru [15].....	18
Obrázek 10: Schématické zapojení paralelního motoru[15].....	18
Obrázek 11: Schématické zapojení sériového motoru [15].....	19
Obrázek 12: Výsledné EMF napětí.....	20
Obrázek 13: Náběhový proud v čase [16].....	21
Obrázek 14: Střída neboli duty cycle [17].....	21
Obrázek 15: Ideální PWM výstup (modrá–PWM, červená–převedené průměrné napětí) [17]	22
Obrázek 16: PWM obvod pro DC motor.....	23
Obrázek 17: Jednoduchý model krokového motoru [18].....	23
Obrázek 18: Unipolární krok. motory s různými počty vodičů [10].....	24
Obrázek 19: Schéma motoru 28BYJ-48 připojeného k řadiči ULN20033 [19].....	25
Obrázek 20: Bipolární krok. motor [10].....	25
Obrázek 21: Rotor hybridního krokového motoru [18].....	26
Obrázek 22: H-můstek [22].....	27
Obrázek 23: H-můstek při sepnutí Q2-Q3 [22].....	28
Obrázek 24: H-můstek při sepnutí Q1-Q4 [22].....	28

Obrázek 25: Časový diagram ovládnání H-můstků.....	29
Obrázek 26: Zapojení motoru s H-můstkem.....	29
Obrázek 27: Rozdíl průběhu mezi mikrokrokováním a full-step krokováním [18].....	30
Obrázek 28: Závitová matice (mosazná) [21].....	31
Obrázek 29: Závitová, bezvůlová matice (mosazná) [21].....	31
Obrázek 30: Kuličková matice s interním návratem [20].....	32
Obrázek 31: Kuličková matice s externím návratem [20].....	32
Obrázek 32: Ozubený řemen [21].....	33
Obrázek 33: Lineární kuličkové pouzdro [21].....	33
Obrázek 34: Schéma lineárního kuličkového vozíku na koleji [21].....	34
Obrázek 35: Vozík na hliníkovém profilu [21].....	34
Obrázek 36: Fungování reflektivního optického senzoru [23].....	35
Obrázek 37: Konstrukce obrazového skeneru [13].....	36
Obrázek 38: Funkce laserového distrometru [12].....	36
Obrázek 39: Transimpedanční zesilovač pro fotodiodu.....	37
Obrázek 40: Klíč v porovnání se skenem.....	38
Obrázek 41: Finální digitální kopie klíče.....	38
Obrázek 42: Konstrukce skeneru.....	39
Obrázek 43: Zařízení posunu klíče.....	40
Obrázek 44: Zdroj pro laser.....	40
Obrázek 45: Ovládací obvod pro krokový motor.....	41
Obrázek 46: Frézování sousledné a nesousledné [11].....	42
Obrázek 47: Frézování čelní frézou [11].....	43
Obrázek 48: Úhlová fréza klíčová [11].....	44
Obrázek 49: Výřezový přípravek – část X pohybu (zelená), část Y pohybu (červená).....	45
Obrázek 50: Motor R775 připevněný k desce s pohybovým zařízením.....	46
Obrázek 51: Možnost zachycení výstupu do složky.....	47

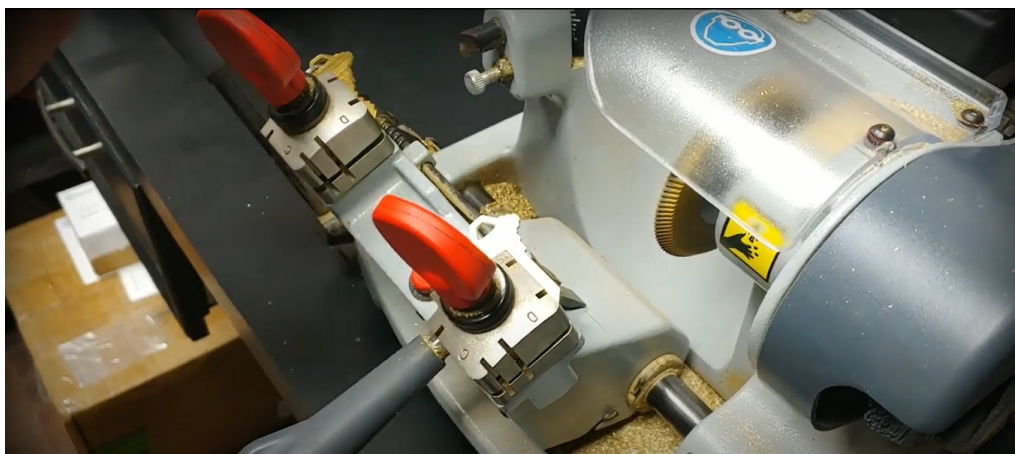
Obrázek 52: Možnost poslání dat do Arduina.....	48
Obrázek 53: Diagram funkce převodu přijatých dat.....	48
Obrázek 54: Diagram k funkci setState().....	49
Obrázek 55: Diagram k funkci stepClockwise().....	50
Obrázek 56: Diagram k funkcím stepUp() a stepDown().....	51
Obrázek 57: Diagram k funkci key_scan().....	51
Obrázek 58: Diagram k loop() smyčce.....	52
Obrázek 59: Diagram k funkcím one_step_left() a one_step_right().....	53
Obrázek 60: Diagram k funkci key_cut().....	54
Obrázek 61: Naznačení pohybu kotouče do materiálu.....	54
Obrázek 62: Diagram pro funkce pwm_ramp() a pwm_deramp().....	55
Obrázek 63: Test pohybu tužkou.....	56
Obrázek 64: Jednotlivé výřezy.....	57
Obrázek 65: Popis jednotlivých zubů.....	58
Obrázek 66: Absolutní chyba výrobků u každého zubu (zleva doprava – zub 1 až zub 5).....	59

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přehled zvažovaných fréz.....	43
Tabulka 2 - Hloubky zářezů výrobků (v mm).....	57
Tabulka 3 - Absolutní chyba výrobků oproti originálu (v mm).....	58

Úvod

Klíče jsou v dnešní době nedílnou součástí života. Používáme je na denní bázi k ochraně našeho majetku a neuvědomujeme si jak komplexní tyto zamykací mechanismy jsou. Klíče musí být velmi přesně zhotovené, aby pasovali do zámku a byla zaručena jejich funkčnost. Při zhotovování kopií klíčů je tedy potřeba zvolit vhodný postup, aby se zachoval tvar klíče s takovou precizností, která zajistí, že klíč bude správně fungovat. V dnešní době se používá několik takových způsobů. Asi tím nejrozšířenějším a nejčastějším je kopírování frézku, kdy originální klíč je upevněn na jedné straně a „prázdný“ polotovár na druhé. Originál má před sebou úzký, na kolmo ke klíči připevněný kus kovu a před nevybroušeným klíčem je umístěn frézovací kotouč. Přitlačením mechanismu směrem k frézce se tedy tvar originálu přenese na kopii, příklad takové frézy je na obrázku 1.



Obrázek 1: Stroj na kopírování klíčů [5]

Je tedy zřejmé, že zrovna u této metody je větší pravděpodobnost přenosu chyby na kopii, ať už špatnou kalibrací přístroje, nebo nesprávným umístěním klíčů. Tato chyba nemusí nutně znamenat, že klíč bude nefunkční. Pokud by ale byla zhotovena další kopie z tohoto klíče tato chyba by byla přenesena na novou kopii, v nejhorším případě by opět vznikla chyba, jež by se tedy sečetla s chybou předchozí. Byla by tedy kumulativní. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost originálu, v případě jeho poškození, či ztráty není možné klíč replikovat. Cílem práce je sestavit zařízení, které klíč zdigitalizuje a dle těchto dat i vyfrézuje kopii. Výhodami plánovaného přístupu jsou možnost replikovat klíč i v případě ztráty originálu a odstranění kumulativní chyby při vícenásobné replikaci klíče.

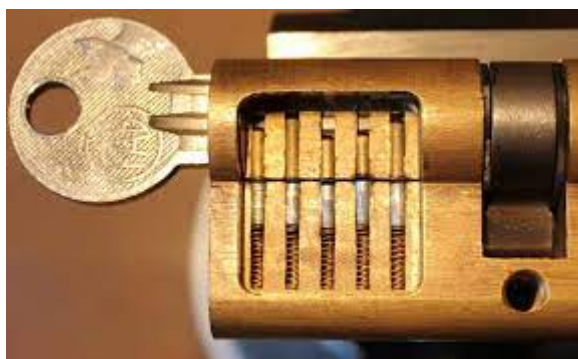
V teoretické části práce byl proveden rozbor možností skenování klíčů a možností jejich frézování. Na základě poznatků bylo v praktické části popsáno navržené a zkonstruované zařízení, jehož funkčnost byla ověřena na vybraných klíčích.

1 Klíče

Tato kapitola pojednává o dávné historii klíčů a jejich různých druzích využívaných v každodenním životě.

1.1 Historie klíčů

První nálezy klíčů a zámků sahají až do starověkého Egypta. Tedy již před 5000 lety používali lidé tato zařízení, aby ochránili svá obydlí. Nálezy potvrdili, že tyto prvotní konstrukce byly dřevěné. Samotné klíče avšak již byly z kovu. Otevírací mechanismus také nebyl velmi složitý: klíč pouze pootočil západku tak, aby blokovala a zamezila pohyb dveří. Vývoj zámečnictví se poté více posunul až ve středověku, kdy se zámky vyráběli již z kovu. Kováři zhotovují okrasné a umělecké zámky s rytinami a ozdobné klíče. Opravdový průlom nastal v 17. století kdy zámečník a vynálezce Robert Barron vynalezl stavítka: kovové části, které musí být nastaveny klíčem tak, aby zvedly zámek do správné polohy. Tento vynález byl později zdokonalen jiným vynálezem: cylindrickou vložkou, která se ve vylepšené formě využívá dodnes (5).



Obrázek 2: Princip fungování stavítek [5]

1.2 Druhy klíčů

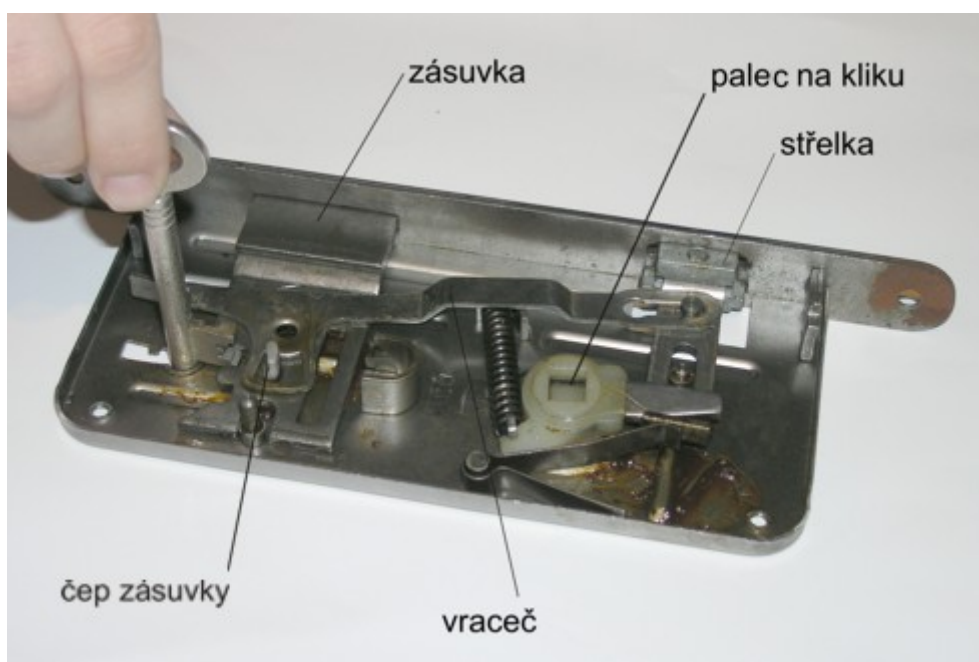
Klíče jsou děleny podle jejich aplikace, nejběžnějšími případy klíčů jsou klíče cylindrické, tvarové, trezorové, dózické, nábytkové, autoklíče a jiné [3]. Vybrané typy klíčů jsou popsány v následujících podkapitolách.

1.2.1 Cylindrický

Asi nejběžnější typ klíče/zámku. Tento systém se skládá ze tří částí: kování, vložka a klíč. Samotné kování je ovládáno skrz vložku, jejíž otočné tělíčko posouvá zásuvku do vhodné polohy. Klíč tedy neovládá zámek přímo, jako je tomu u dozického zámku/klíče. Tento zámek je na obrázku 2.

1.2.2 Tvarový

Tento klíč se nepoužívá pro zabezpečení celých objektů, ale spíše pro uzamykání domovních místností, jako například koupelny. Na rozdíl od klíče cylindrického, který odemyká zámek přes vložku, tvarový klíč odemyká zámek přímo bez vložky. Zabezpečovací mechanismus zadlabávacího zámku spočívá v tom, že tvar klíče musí odpovídat tvaru zámkové dírky. Není proto náročné zámek otevřít i jiným tělesem ve tvaru L a je tedy nevhodný pro zabezpečení objektů, jako je dům, či byt. Tento systém je ukázán na obrázku 3.



Obrázek 3: Zadlabávací zámek [4]

1.2.3 Dozický

Jedná se o bezpečnější nastavbu tvarového klíče. Zabezpečení je obohaceno o zoubky na klíči, které u zadlabávacího zámku (nyní již se stavítky), při otáčení zvedají stavítka tak, aby se zámek mohl pootočit a odemknout. Dózický klíč je na obrázku 4.



Obrázek 4: Dózický klíč [4]

1.2.4 Trezorový

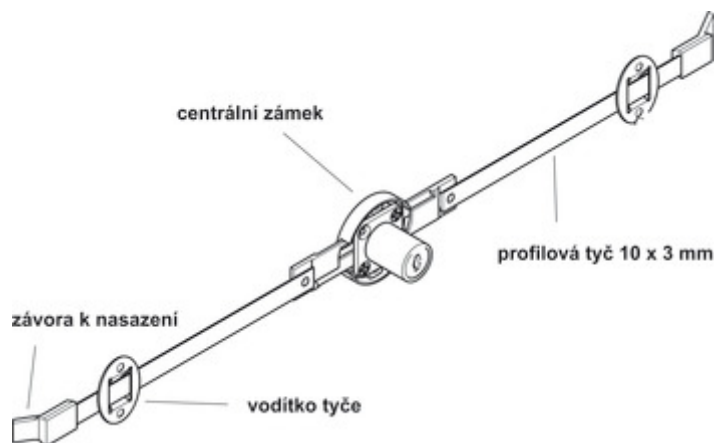
Jak již název napovídá, tento druh klíče a zámku se užívá primárně k zabezpečení trezoru. Často se pro zvýšení bezpečnosti instaluje s mechanickým kombinačním zámkem. Samotný zámek se skládá ze dvou částí: na sebe naskládaná, odpružená stavitka a srdce zámku, což je část zámku spojená se závorou. Pokud klíč do zámku vložíme a otočíme jím, na sebe vyskládaná stavitka se srovnají do jedné roviny a vpustí srdce do výřezu, a to posune závoru tak, aby se trezor otevřel. Tento princip zůstává u trezorových zámků do dnes. Příklad trezorového klíče je na obrázku 5.



Obrázek 5: Trezorový zámek s klíčem [3]

1.2.5 Nábytkový

Jedná se o klíče a zámky cylindrické, nebo dozické, upravené tak, aby je bylo možné uchytit na různé druhy nábytku a samozřejmě je zároveň zabezpečit před vniknutím. Zámky mohou být například: roletové, na posuvná dvířka, rozvorové, centrální, zásuvkové, určené pro zachycení na sklo, na posuvné vitríny . Princip je ukázán na obrázku 6.



Obrázek 6: Rozvorový zámek [5]

1.2.6 Autoklíč

Automobil není možné nastartovat jakýmkoliv nakopírovaným klíčem díky immobilizéru a transpondéru. Transpondér je zařízení schované v hlavě klíče, které v sobě uchovává unikátní kód. Ten je opatřen nevolatilní pamětí, jelikož nemá vlastní napájecí zdroj: energii na vyslání dat dostane elektromagnetickým pulsem. Pokud klíč umístíme do zapalování a otočíme jím, tak cívka která je umístěná právě okolo klíčové zdířky, vyšle elektromagnetický puls do transpondéru, ten se nabije a vyšle immobilizéru kód, který musí řídicí elektronika auta ověřit a až pokud se tyto kódy shodují auto nastartuje. Běžná praktika je také šifrování a změna tohoto kódu po každém vytažení klíče ze zapalování, což zaručuje mnohem větší bezpečnost (6). Příklad autoklíče je na obrázku 7.



Obrázek 7: Autoklíč [6]

2 Motory

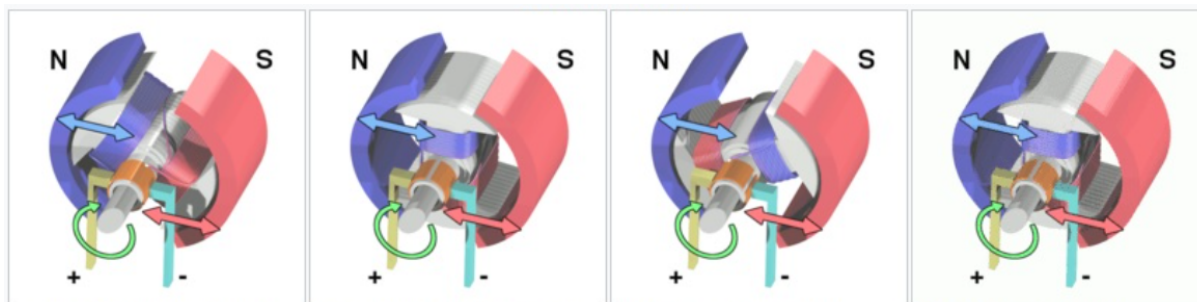
Tato část pojednává o teorii elektromotorů (krokových a stejnosměrných). Motory jsou v rámci práce využity jak k polohování klíče, tak k otáčení řezného kotouče. Popsány jsou i principy řízení těchto elektromotorů a jejich vlastnosti. Dále je proveden popis principu transformace otáčivého pohybu na pohyb přímočarý.

2.1 Stejnosměrné (DC) motory kartáčové

Pro otáčení řezného kotouče při frézování klíče byl zvolen DC motor. Z finančních důvodů a možnosti domácí výroby bylo rozhodnuto provést ověření navrhovaného systému frézováním klíče ze dřeva, proto bude použit slabší elektromotor. Tato podkapitola obsahuje princip fungování, druhy konstrukcí a ovládání kartáčových DC motorů.

2.1.1 Princip fungování

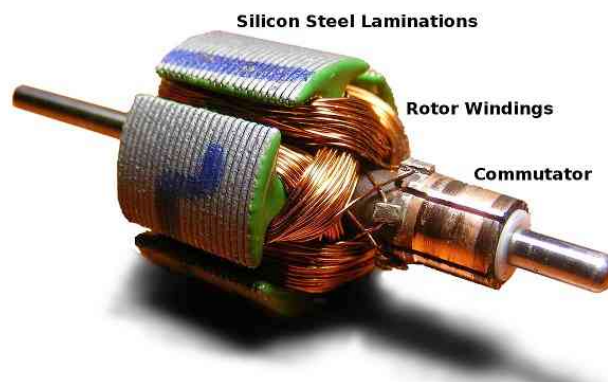
Motor se skládá ze tří částí: z rotoru tvořeným cívkami a komutátorem, statoru, který má dva silné permanentní magnety opačných pólů a kartáče, nejčastěji grafitové. Fungování lze nejlépe znázornit na nejjednoduším motoru, kde má motor pouze jednu cívku. Jakmile jsou kartáče připojeny ke zdroji napětí, začne proud téci cívkou a na tu začne působit síla dle Lorenzova zákona. Takto se stator točí až do pozice, kdy je na magnetický tok kolmý. Poté co překročí úhel otočení 180° , se kartáče spojí s opačnými deskami komutátoru a celý proces se tímto způsobem opakuje dokud je připojen zdroj napětí. Jednotlivé kroky při pohybu kartáčového motoru jsou na obrázku 8.



Obrázek 8: Jednotlivé kroky při točení kartáčového motoru [15]

Při použití tohoto modelu s pouze jednou cívkou vzniká problém, kdy pokud je rotor (příklad rotoru kartáčového motoru je na obrázku 9) kolmý na magnetický tok, točivý moment značně klesá a pohyb je tedy velmi nepravidelný. Tento problém má však velmi jednoduché řešení: přidání další cívky do rotoru, která je k té první natočena o 90° . Komutátor je proto rozdělen na čtyři části, místo dvou a vždy když je jedna cívka kolmá k magnetickému toku, je připojena cívka druhá, jež je k mag. toku rovnoběžná. Pohyb je takto mnohem více rovnoměrný. Reálný motor má cívek více pro zajištění co nejlepšího a nejrovnoměrnějšího

pohybu a všechny jsou zároveň vloženy do slotů vysoce permeabilní oceli, což zvýší interakci s magnetickým tokem.



Obrázek 9: Rotor kartáčového motoru [15]

Permanentní magnet na statoru se používá jen u menších a méně výkonných motorů. Velmi častěji je využíván elektromagnet. Cívky elektromagnetu jsou napájené ze stejného zdroje jako cívky rotoru (14).

Elektromagnet může být k rotoru připojen paralelně, či sériově.

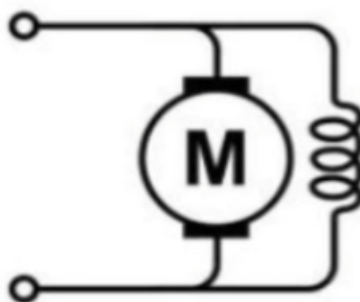
V případě paralelního připojení jde o zapojení zobrazené na obrázku 10, kde elektromagnet a rotor jsou k sobě připojeni paralelně. Jelikož je napětí na rotoru i elektromagnetu stejné je potřeba, aby cívka elektromagnetu měla větší odpor než vinutí rotoru. Pokud by tomu tak nebylo, maximální proud by tekla elektromagnetem a snížil by se točivý moment. Toho lze dosáhnout snížením průměru drátu a vysokým počtem vinutí. Zvýšený počet vinutí, zároveň také ovlivní intenzitu dle vztahu:

$$\Phi \propto N * I$$

kde Φ - je magnetický tok

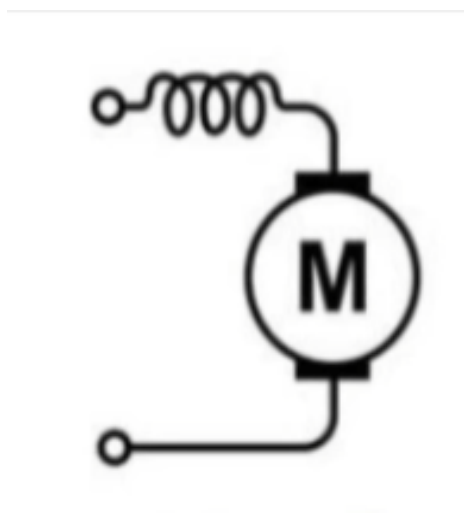
N - je počet vinutí

I - je proud cívkou



Obrázek 10: Schématické zapojení paralelního motoru[15]

V případě sériového zapojení, je elektromagnet zapojen v sérii s rotorem, jak lze vidět na obrázku 11 a tedy oběma prvky teče stejný proud, je potřeba aby mělo vinutí el.mag. nízký odpor. V opačném případě by proud rotorovým vinutím byl nízký a došlo by opět k poklesu točivého momentu. Snížení odporu je možné použitím vyššího průměrem drátu a snížením počtu vinutí (15).



Obrázek 11: Schématické zapojení sériového motoru [15]

2.1.2 Zpětné EMF (ElectroMotive Force)

Pokud bychom měly DC motor s permanentními magnety a otáčeli jeho rotorem, indukovalo by se na vstupu napětí dle zákona o elektromagnetické indukci:

$$U_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

kde: Φ - je magnetický indukční tok

t - je čas

To, že je napětí záporné, vychází z Lenzova zákona, který zní: “Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou”.

Obrázek 12 pak je pak velmi zjednodušeným schématem tohoto motoru.

Elektromotorické napětí vzniká, i při běžném provozu motoru. Nevzniká však napětí střídavé, jak by bylo možné si myslet, ale napětí stejnosměrné. Níže je zjednodušený model motoru, kde L je induktance vinutí, R je odpor drátu a zdroj střídavého napětí je zpětné EMF. Toto napětí záleží na rychlosti točení motoru, kdy při startu je $U_1=0$ a při zvyšování rychlosti se blíží téměř až k $U_1=U_{zdroj}$.

Jelikož se ale rotor při generování EMF točí a komutátor s kartáči zajišťuje, že proud teče stále stejným směrem, je takto napětí usměrňováno podobně jako můstkovým usměrňovačem.

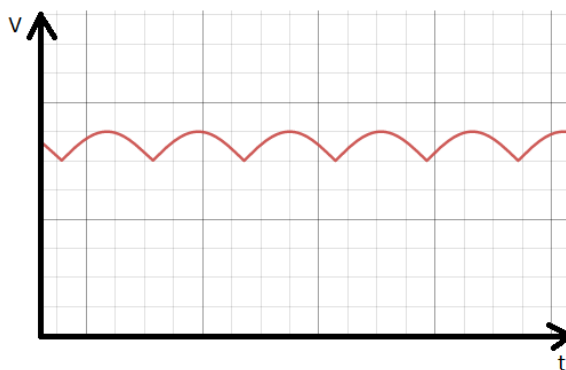
Výsledné napětí pak vypadá podle obrázku 12. Poté je tedy možné upravit zjednodušený model motoru se střídavým zdrojem napětí na model se stejnosměrným zdrojem napětí. Z toho lze vyvodit že kvalitně sestavený DC motor by měl mít velmi nízký vstupní proud pokud není nijak zatížen. Je to proto, že pokud zapneme motor bez zátěže je $V_{EMF}=0$ a se vzrůstající rychlostí motoru se zvyšuje až téměř k napětí vstupnímu proud je poté vyjádřen vztahem:

$$I_M = \frac{U_S - U_{EMF}}{R}$$

kde: U_S - je napětí zdroje

U_{EMF} - je zpětné EMF napětí

R - je odpor vodiče

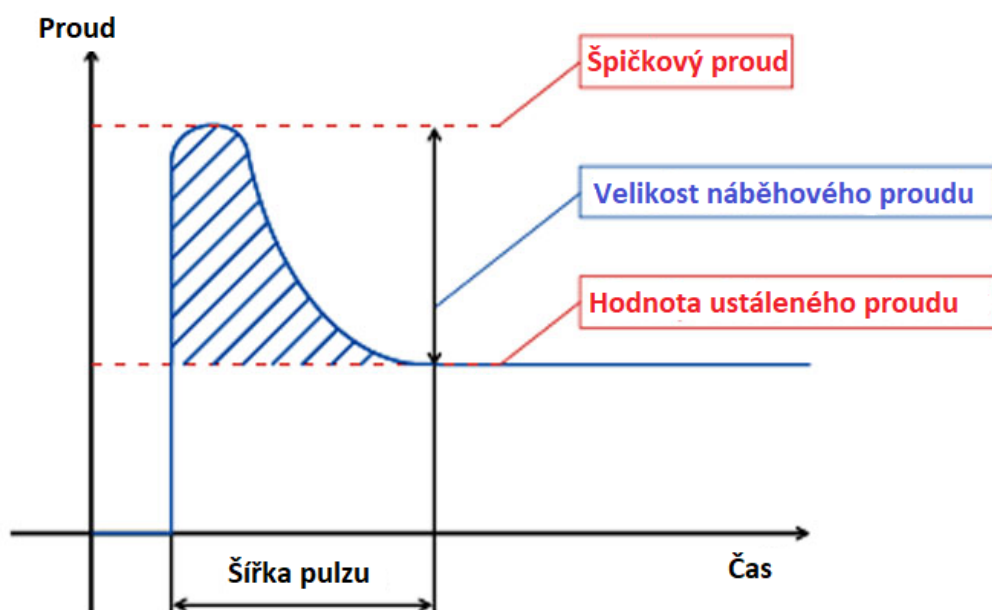


Obrázek 12: Výsledné EMF napětí

Jestliže takto běžící motor nějak zatížíme, rotor se zpomalí, což způsobí pokles U_{EMF} rozdíl napětí se zvýší a s ním i proud, což zapříčiní vznik silnějšího magnetického pole a zvýší se točivý moment, aby motor zvládnul ono zatížení. Stejně tak vzniká problém při okamžitém zastavení motoru. V tu chvíli by U_{EMF} kleslo na nulu a náhlý špičkový proud ho může poškodit.

2.1.3 Náběhový proud

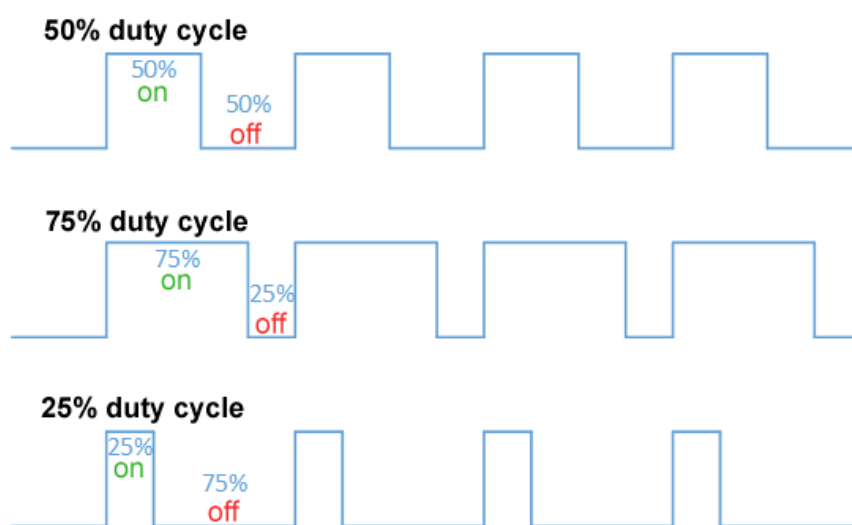
V moment kdy je motor připojen k napětí a U_{EMF} se ještě nemohlo utvořit, je proud vinutím velmi vysoký po krátkou chvíli než U_{EMF} sníží proud na ustálenou hodnotu. Ukázka průběhu takového proudu je na obrázku 13.



Obrázek 13: Náběhový proud v čase [16]

2.1.4 PWM

Řešením pro náběhový proud a zároveň způsobem jak ovládat rychlost motoru je PWM. Základním principem PWM je rychlé vypínání a zapínání elektrického spínače, jako je například MOSFET. Výstupem je tedy obdélníkový pulz velmi vysoké frekvence s proměnnou střídou (příklady pro 3 různé střídy jsou na obrázku 14), nebo anglicky často používaným: “duty cycle”. Ten lze ovládat buď ručně pomocí potenciometru, kdy změnou RC konstanty měníme zároveň střídu, anebo použitím mikrokontroleru, který spíná tranzistor. Příklad PWM signálu je na obrázku 15 (modře).



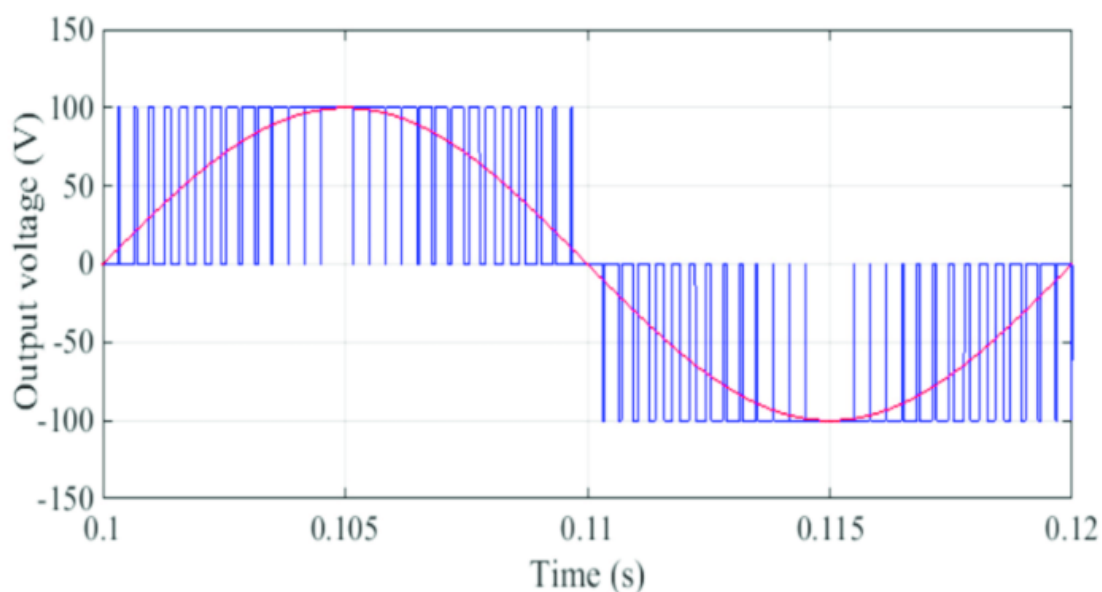
Obrázek 14: Střída neboli duty cycle [17]

Napětí v každém bodě (tedy za každou periodu) se vypočítá pomocí vzorce:

$$U = U_{max} * D$$

kde: U_{max} - je napětí zdroje

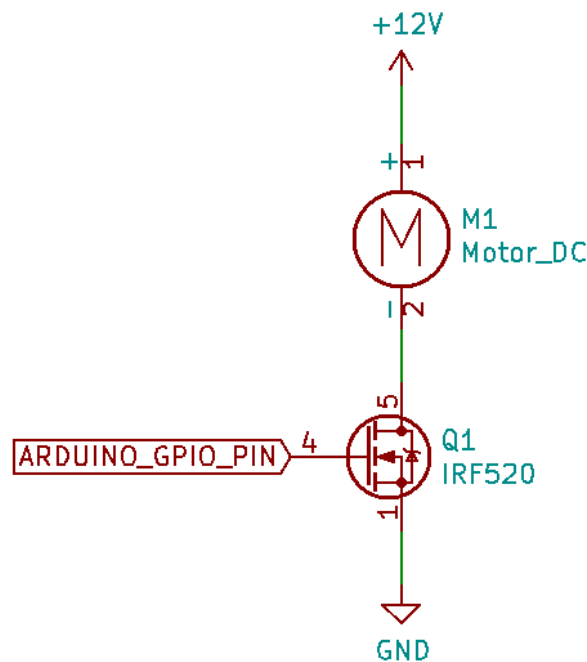
D - je střída a rovná se: $D = \frac{\tau}{T}$ (τ = délka pulzu, T = perioda)



Obrázek 15: Ideální PWM výstup (modrá–PWM, červená–převedené průměrné napětí) [17]

2.1.5 Konstrukce PWM obvodu

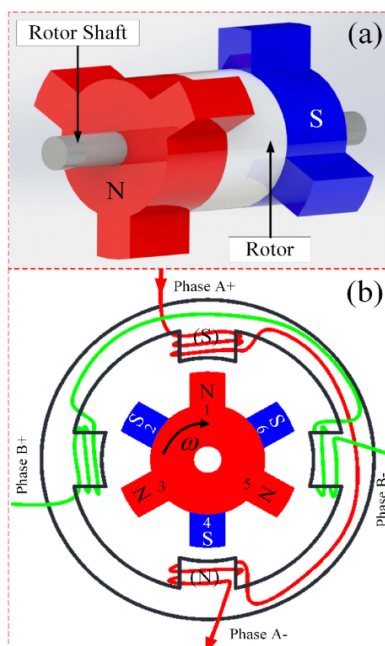
Pro vytvoření PWM signálu použiju Arduino NANO, které je zároveň řídicím prvkem celého přípravku na výřez klíče. Za účelem testování byl sestaven jednoduchý obvod (obrázek 16), skládající se z MOSFET tranzistoru typu N a právě Arduino NANO. Gate pin tranzistoru je připojen k GPIO pinu mikrokontroléru, Drain k motoru a Source k zemi. Tranzistor zde použitý je IRF520, který má $V_{GS(th)} = 2-4$ V, což je ideální pro spínání GPIO Arduino pinem, který má $V_{HIGH} = 5$ V.



Obrázek 16: PWM obvod pro DC motor

2.2 Krokové motory

Krokové motory, jejichž model lze vidět na obrázku 17, umožňují precizní lineární pohyb. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto použít pro polohování klíče krokové motory. Fungují na principu krokování, kdy stator je tvořen většinou čtyřmi páry cívek a rotor magnetizovanými ozubenými koly, střídajícími se v polaritě. Postupným, sekvenčním spínáním cívek je poté možno dosáhnout malých a přesných pohybů, neboli kroků. Další velkou výhodou motoru je, že v případě průtoku proudu pouze jednou cívkou, motor odolává vnějším pokusům o otočení rotoru, až do dané hodnoty, které se říká přídržný moment [N.m]



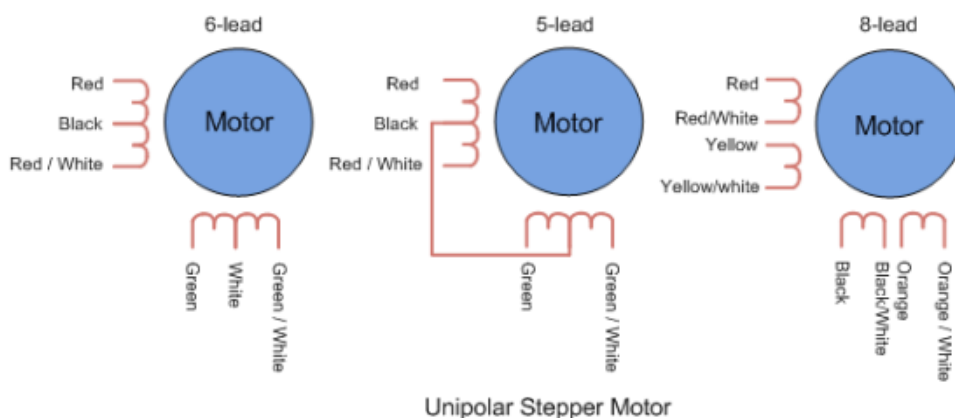
Obrázek 17: Jednoduchý model krokového motoru [18]

2.2.1 Dělení krokových motorů dle vinutí

Krokové motory se dle zapojení vinutí dělí na dvě skupiny: unipolární, který je jednodušší na ovládání, ale má nižší točivý moment a je méně efektivní. Bipolární má pak ovládání značně složitější, ale je mnohem silnější a efektivnější.

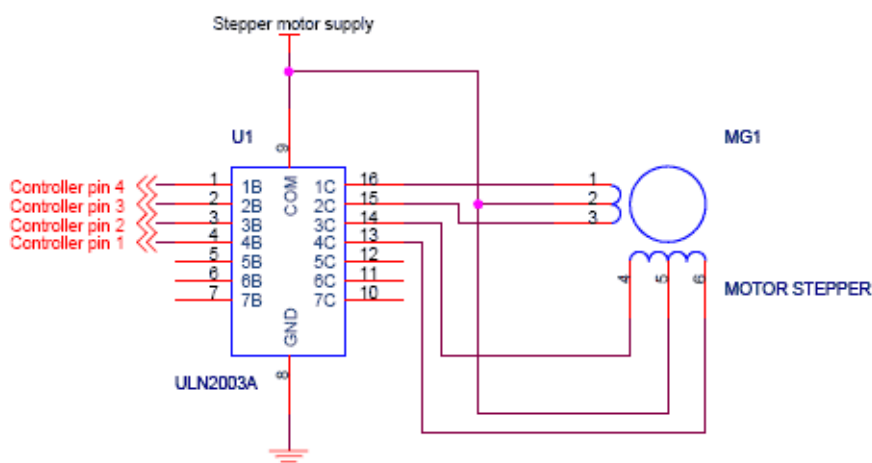
Unipolární motor má jedno vinutí se společným vodičem uprostřed na každou fázi. Každá část vinutí se tedy spíná pro jinou orientaci magnetického pole. Toto uspořádání umožňuje řídit motor beze změny směru toku proudu. Motor může mít následující počet vodičů (jak je také naznačeno na obrázku 18):

- 5, kdy jsou společné vodiče obou cívek spojeny
- 6, kde má každá cívka svůj vlastní společný vodič
- 8, kde jsou vlastně čtyři cívky



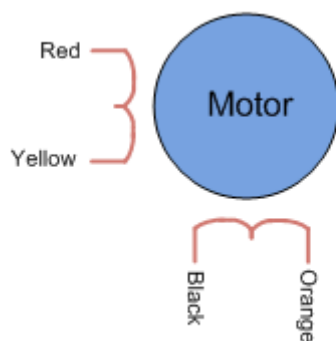
Obrázek 18: Unipolární krok. motory s různými počty vodičů [10]

Tyto motory lze tedy řídit pomocí jednoduchého obvodu jako je například ULN2003, který je vyráběn pro pěti-vodičové motory (nejčastěji 28BYJ-48, jeho zapojení je ukázáno na obrázku 19). Jedná se vlastně pouze o několik paralelně zapojených Darlingttonových párů, které se chovají jako invertory. Společný vodič je připojen na napětí a čtyři zbylé vodiče na výstupy ovládané mikrokontrolerem přes chip ULN2003. Ten v sekvenci spíná jednotlivé výstupy a tak jsou excitovány jednotlivé cívky ve statoru.



Obrázek 19: Schéma motoru 28BYJ-48 připojeného k řadiči ULN20033 [19]

Bipolární motory mají pouze 2 vývody na cívku, tedy 4 vodiče. Schéma tohoto druhu krokového motoru je na obrázku 20. Jejich řízení je komplikovanější oproti unipolárním, jelikož proud musí téct v obou směrech. To je řešeno obvodem nazývaným H-můstek, který je popsán v další kapitole. Tato varianta je také efektivnější a je silnější než unipolární, jelikož využívá vždy celou cívku a ne jen její polovinu.



Obrázek 20: Bipolární krok. motor [10]

2.2.2 Funkce hybridních krokových motorů

Hybridní krokové motory jsou prakticky nejvyužívanějším typem, nejčastěji využívaným ve 3D tiskárnách. Funkci si můžeme názorně ukázat na modelu YH42BYGH47-401A, jehož rotor je na obrázku 21.



Obrázek 21: Rotor hybridního krokového motoru [18]

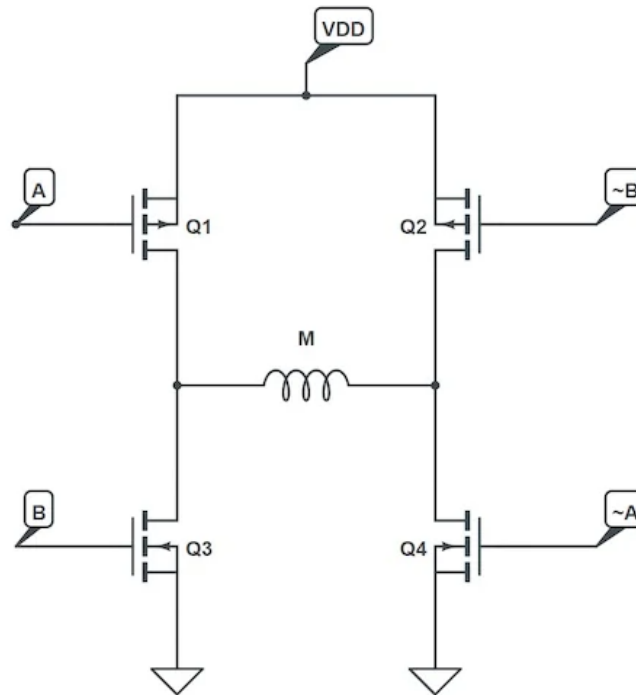
Jak je z obrázku patrné, rotor tvořen magnetizovanou hřídelí, hřídelovými ložisky a čtyřmi magnetizovanými ozubenými koly. V tomto případě má každé jedno kolo padesát zubů je posunutá k předchozímu o polovinu vzdálenosti mezi sousedícími zuby. Tyto kola jsou magnetizovaná střídavě: sever, jih, sever, jih. To znamená, že pokud bychom se tedy podívali na rotor ze strany, bylo by vidět, že zuby se střídají v polaritě po jednom. Toto ozubení nalezneme i ve statoru, avšak to není magnetizované. K tomu slouží osm fyzicky oddělených cívek. Vzhledem k tomu, že motor má pouze čtyři vodiče, cívky jsou ve skutečnosti pouze dvě, rozmístěné po 45° . Motor je tedy ovládán sekvenčním spínáním cívek a skládá se ze čtyř kroků:

1. Černý vodič je připojen k V_{CC} a zelený k zemi, což vytvoří jižní pól na 0° , zuby s opačnou orientací se vyrovnají ke statoru.
2. Modrý vodič je připojen k V_{CC} a červený k zemi. Na 45° je tedy severní pól a zuby se opět vyrovnají.
3. Zelený vodič je připojen k V_{CC} a černý k zemi. Na 90° je jižní pól. Zuby se znovu vyrovnají.
4. Červený vodič je připojen k V_{CC} a modrý k zemi. Na 135° je severní pól. S tímto krokem se zuby posunuli přesně o jednu délku sousedících zubů.

Jelikož ozubená kola mají padesát zubů, a každý krok se skládá ze čtyř podkroků, je úhel posuvu $1,8^\circ$, to vychází z počtu kroků na otáčku (200) a úhlu celé otáčky (360°). Počet kroků na otáčku vychází z počtu zubů (50) a počtu kroků na každý zub (4).

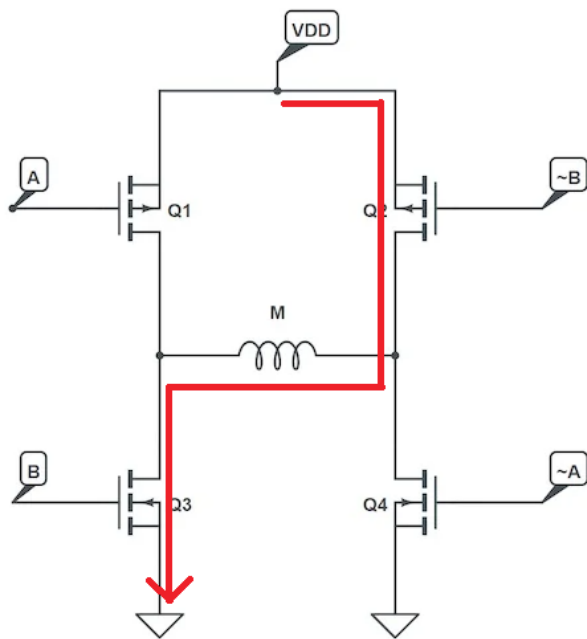
2.2.3 Ovládání krokových motorů

Motor samozřejmě nebude ovládán takto manuálně, takže je zapotřebí nějaký řadič. Nejběžnějším a nejrozšířenějším řadičem je takzvaný H-můstek. Ten se skládá ze čtyř MOSFETů pro každou cívku tedy osm tranzistorů celkově. Z toho jsou čtyři typu N a čtyři typu P. Zapojení pro jednu cívku je na obrázku 22.

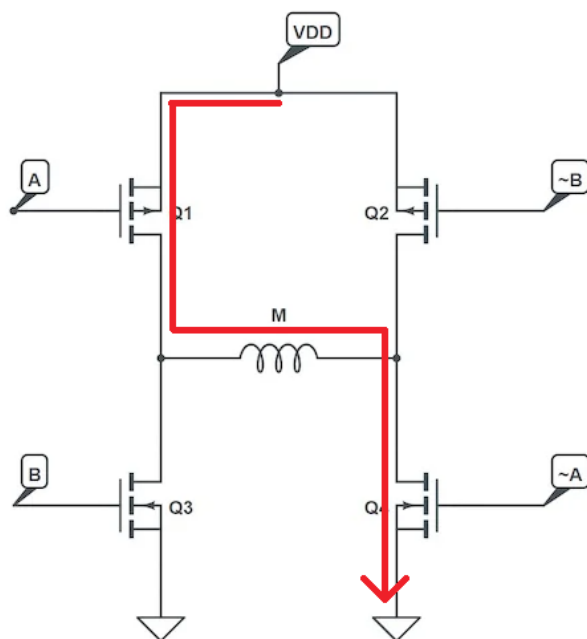


Obrázek 22: H-můstek [22]

Ze schématu obvodu je patrné, že sepnutím tranzistorových párů Q1-Q4 a Q2-Q3, je možné dosáhnout toku proudu cívkou v obou směrech, jak je ukázáno na obrázcích 23 a 24.

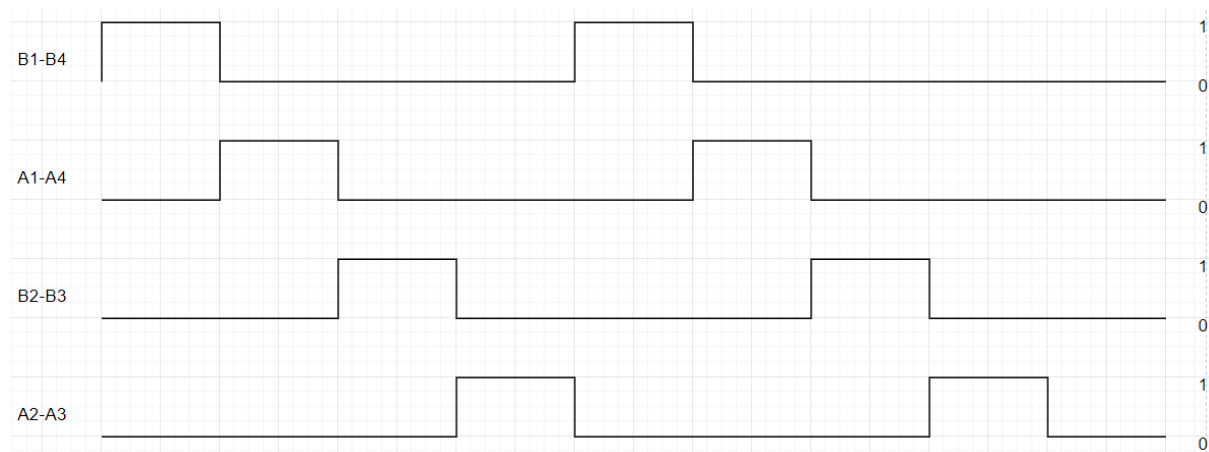


Obrázek 23: H-můstek při sepnutí Q2-Q3 [22]

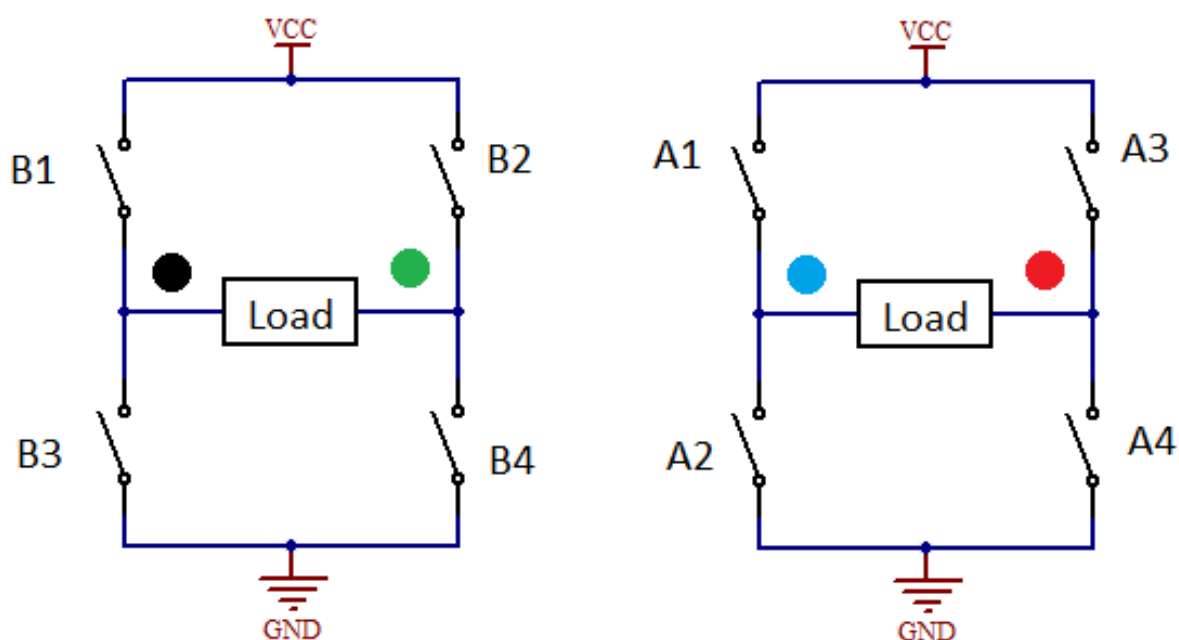


Obrázek 24: H-můstek při sepnutí Q1-Q4 [22]

Všechny vstupy jsou ovládány GPIO piny mikrokontroleru, který za pomoci jednoduchého programu zajistí správný chod krokového motoru. Obrázek číslo 25 znázorňuje časový průběh spínačů (v tomto případě MOSFETů), při zapojení z obrázku 26.



Obrázek 25: Časový diagram ovládání H-můstku

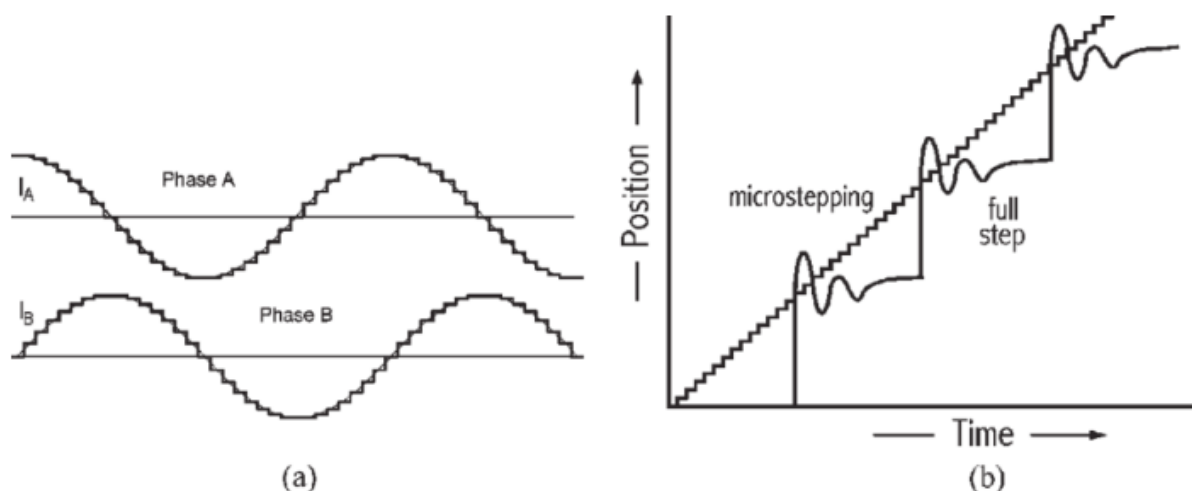


Obrázek 26: Zapojení motoru s H-můstkem

2.2.4 Mikrokrokování

Ovládání krokového motoru způsobem popsaným v kapitole 2.2.3 se nazývá wave řízení. Při tomto druhu řízení se používá vždy jen jedna cívka. Je tedy energeticky úspornější na úkor krouživé síly. Dalším druhem je full-step řízení. To využívá dvě cívky v každém jednom

kroku a dosahuje tak větší kroutivé síly, ale s dvojnásobnou energetickou náročností oproti wave řízení. Kombinací těchto metod ovládní motoru, můžeme dosáhnout většího počtu kroků na rotaci a zvýšit tak rozlišení. Těto metodě se říká half-step a zvyšuje počet kroků ze 200 na 400. Další mikrokrokovací metody jsou $\frac{1}{4}$ -step, $\frac{1}{8}$ -step a tak dále, kdy každá iterace zdvojnásobuje rozlišení jedné rotace. Abychom implementovali tuto funkci, nepoužije se konstantní napětí na cívkách, jako u H-můstku. Místo bude aplikován konstantní proud na cívkách, který můžeme měnit, abychom vytvořili jednotlivé kroky. Rozdíl lze vidět na obrázku 27.



Obrázek 27: Rozdíl průběhu mezi mikrokrokováním a full-step krokováním [18]

2.3 Přenos pohybu krokovým motorem

Aby bylo možné klíč polohovat je třeba transformovat točivý pohyb na lineární, v této kapitole jsou popsány způsoby jak točivý pohyb transformovat na lineární. Nejčastějším je kombinace závitové tyče a matice. Možné je ale také použít například řetěz, který je velmi hojně využíván v konstrukcích 3D tiskáren.

2.3.1 Systém šroub-matice

Tento druh přeměny pohybu točivého na lineární spočívá v použití čtyř komponent: šroubu, což je trapézová/závitová tyč, s proměnným stoupáním umožňujícím různou rychlost pohybu při stejné rychlosti otáčení rotoru, zároveň však ovlivňuje tření s maticí a zvyšuje tak potřebný točivý moment. Stoupání se pohybuje obvykle od 2mm do 12mm. Dále je použita matice, která je připevněná k objektu, který se má pohybovat. Tento objekt je nějakým způsobem zafixovaný, tak aby se mohl hýbat pouze v jedné ose a tím pádem se pomocí přenosu energie této matice pohybuje.

Třetím komponentem je uložení trapézové tyče, které snižuje nechtěný pohyb tyče a zvyšuje přesnost posuvu. Příkladem může být kuličkové uložení, které poskytuje minimální odpor pomocí ložiskových kuliček, jež jezdí mezi závity v konečné smyčce.

Matice závitová

Klasická matice pro závitovou tyč. Skládá se pouze ze závitu ke kterému je připojena příruba, což je zesílený okraj, sloužící ke spojení s jinou částí. Vyrábí se z různých materiálů, jakými jsou například mosaz, jako na obrázku 28, nebo POM, což je zkratka pro polyoxymetylen.



Obrázek 28: Závitová matice (mosazná) [21]

Speciálním druhem je matice bezvůlová (obrázek 29), ta je zhotovena z hlavní části, pružiny a vedlejší části. Hlavní a vedlejší část nejsou pevně spojeny a proto po nasunutí na trapézovou tyč na sebe navzájem tlačí, takže se vnitřní závit matice tlačí na vnější závit tyče. Zároveň to také způsobuje větší tření při pohybu.



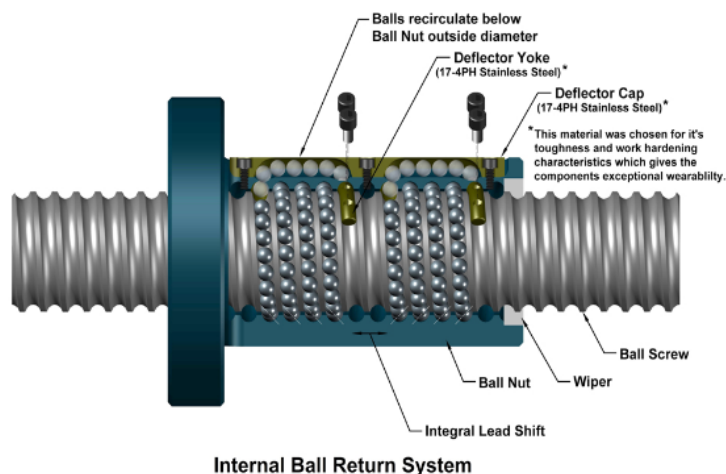
Obrázek 29: Závitová, bezvůlová matice (mosazná) [21]

Matice kuličková

Dalším typem matice je kuličková. Ač mnohem dražší než klasická, má své velké výhody. Tato matice má ve svých závitech kovové kuličky, které se točí mezi závity tyče a jsou tak to jediné co se jí přímo dytýká. To masivně snižuje tření a opotřebení jak tyče tak matice. Jak se

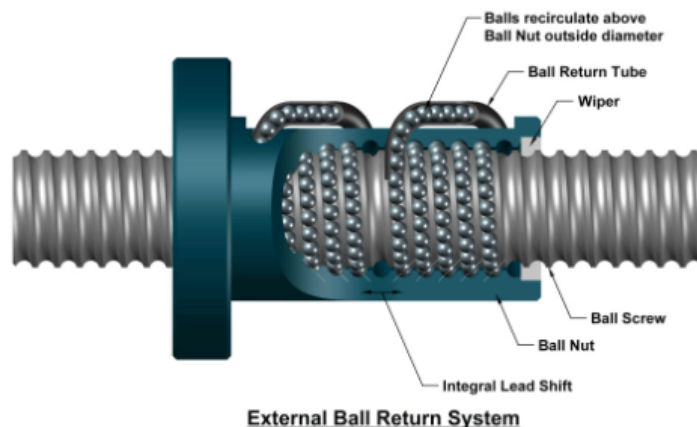
jednotlivé kule posunují, jsou odkloněny deflektorem do návratného systému, který je opět pošle na počátek takto uzavřené smyčky. Dle způsobu návratu kulí se dělí na dva druhy:

Prvním je interní, jehož mechanismus je znázorněn na obrázku 30, kdy se kule vrací skrze, nebo podél “zdi” matice, ale pod vnějším průměrem. Druhý je externí. Jak název napovídá kule se vrací po externí cestě, které je umístěno mimo tělo matice.



Obrázek 30: Kuličková matice s interním návratem [20]

Druhým je externí. Jak název napovídá, kule se vrací po externí cestě, která je umístěná mimo tělo matice, což lze vidět na obrázku 31.



Obrázek 31: Kuličková matice s externím návratem [20]

2.3.2 Ozubený řemen

Ozubené pásy, také zvané synchronní jsou jednou z dalších hojně využívaných nástrojů pro přenos pohybu motoru. Jsou vyráběné zejména z gumy (obrázek 32), ale mohou být i neoprénové, polyuretanové. Jedná se o typ pásu, který má na sobě rovnoměrně rozdělené

výstupky, umožňující zaseknutí do příslušného ozubeného kola. To zároveň zvyšuje přilnavost a snižuje požadované napětí pásu ke kolu.



Obrázek 32: Ozubený řemen [21]

2.3.3 Upevnění objektu

Pokud máme již vybraný způsob přenosu pohybu, je dále potřeba celý objekt který máme ovládat, upevnit tak, aby se mohl hýbat pouze v jedné rovině. Toho lze dosáhnout několika způsoby.

Vodící tyče

Hojně využívané například v CNC strojích jsou vodící tyče (obrázek 33). Jedná se o tyč s velmi hladkým povrchem v kombinaci s kuličkovým pouzdem. To není nepodobné šroubové matici. Má několik uzavřených smyček s kulemi, které jsou stejně jako u kuličkové matice to jediné co se dotýká povrchu tyče. Tyto pouzdra jsou často vyráběna s “domky”, tedy plochami sloužícími k připevnění objektu.

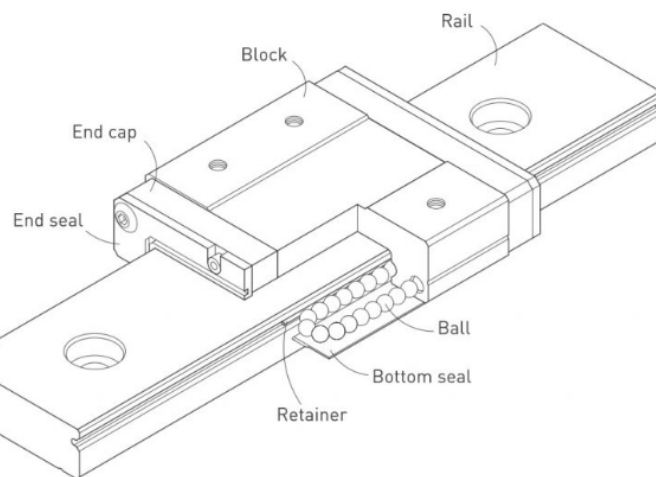


Obrázek 33: Lineární kuličkové pouzdro [21]

Vozíky

Jiným druhem upevnění jsou vozíky. Ty jsou využívány třeba u 3D tiskáren, kdy 2 pohybují hlavicí po ose Y a dalším vozíkem který s ní pohybuje po ose X. Použití mají také u kamerových posuvníků, umožňující hladký, jednolitý záběr. Vozíky dělíme na 2 hlavní druhy:

1. Je vozík lineární kuličkový, který je na obrázku 34, jehož obě strany jsou vybaveny kuličkami pohybující se v uzavřené smyčce. Používá též speciální kolejnici, která je dělaná pro tento druh vozíku. Tato konstrukce tak nabízí velmi nízké tření při pohybu, ale tím pádem nízkou přilnavost.



Obrázek 34: Schéma lineárního kuličkového vozíku na koleji [21]

2. Je vozík pro hliníkové profily (obrázek 35). Ten má namísto kuliček po stranách dvojici kol, která částečně pasují do výřezu profilu a fixují tak povoz. Oproti lineárnímu má tento větší tření s profilem, ale i větší přilnavost.



Obrázek 35: Vozík na hliníkovém profilu [21]

3 Skenování klíče

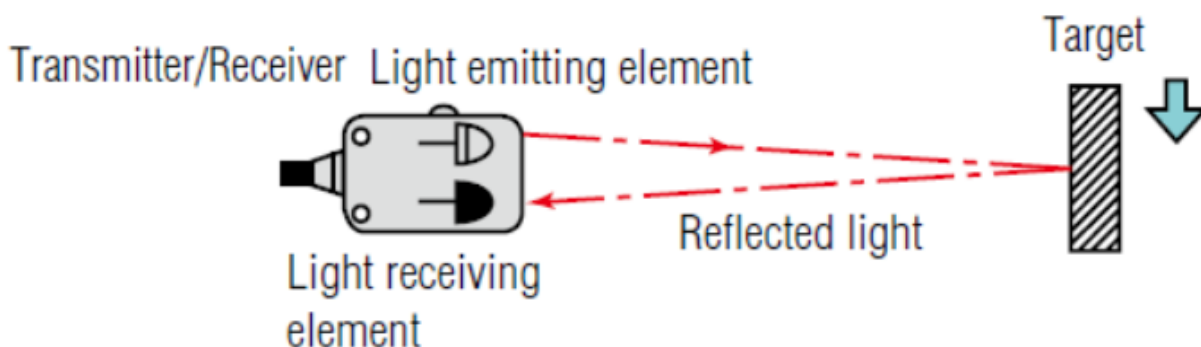
Tato kapitola se zaměřuje teorii různých způsobů skenování, konstrukci skenovacího a posunového zařízení, návrhu obvodů a výsledné porovnání klíče k vyskenovaným datům.

3.1 Možnosti skenování

Možností skenování je poměrně široká škála a patří mezi ně například skenování magnetické, skenování pomocí technologie CCD, nebo laserové skenování. Tato kapitola se pak zabývá skenováním reflektivním optickým senzorem, obrazovým skenerem a skenováním za pomoci Fresnelových čoček.

3.1.1 Reflexní optický sensor

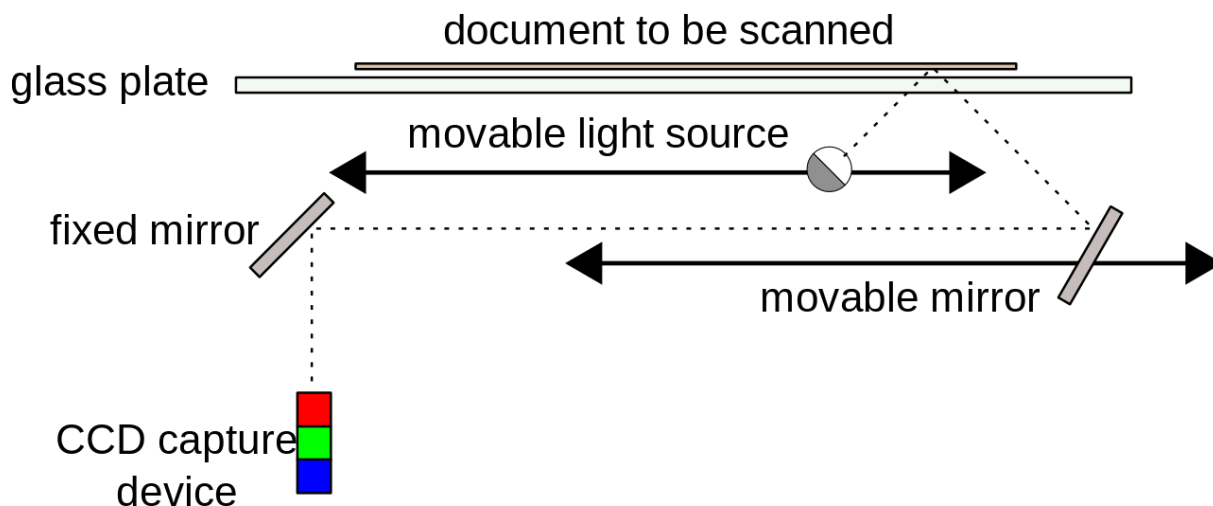
Reflexní optický sensor (obrázek 36) se skládá ze dvou částí: dioda vyzařující infračervené světlo a přijímač, který je báží fototranzistoru. Světlo vysílané diodou se po střetu s plochou částečně odrazí do přijímače a fototranzistor je tak sepnut. Dle síly signálu je dále možné určit například barvu odrazové plochy a vzdálenost. Specifický model je například TCRT5000. Ten má funkční vzdálenost do 8mm.



Obrázek 36: Fungování reflektivního optického senzoru [23]

3.1.2 Obrazový skener

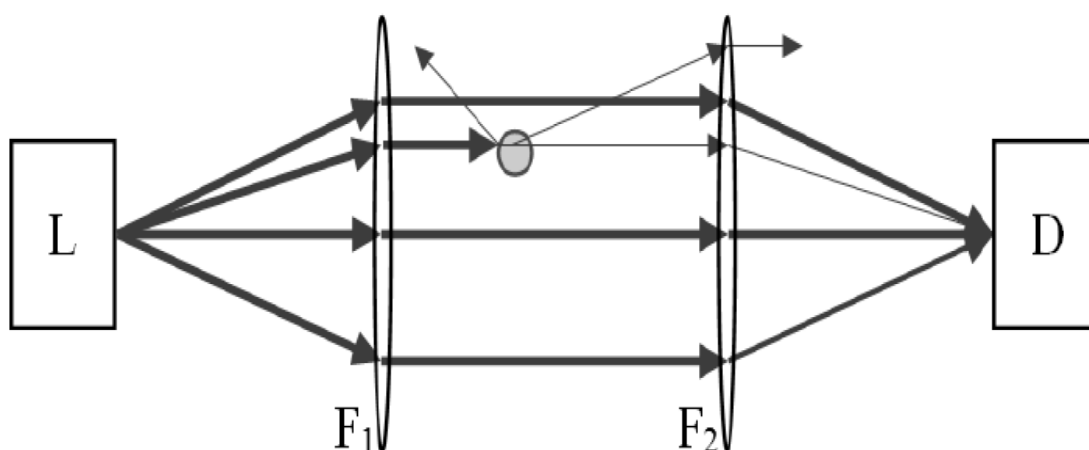
Obrazový skener se používá převážně k převedení dokumentů do elektronické podoby. Funguje takto: Předmět je umístěn na skleněnou desku a kryt se zavře. Vnitřní část krytu je buď bílá nebo černá, což poskytuje jednotné pozadí, které může skenovací software použít jako referenční bod na určení velikosti objektu/dokumentu. Ze spodu na dokument svítí lampa. Samotná skenovací hlavice se skládá ze zrcadel, čoček, filtru a CCD pole. Ta se pomalu pohybuje napříč dokumentem. Obraz dokumentu je odražen zrcadlem do jiného zrcadla a nakonec do CCD snímače. Konstrukce obrazového skeneru je na obrázku 37.



Obrázek 37: Konstrukce obrazového skeneru [13]

3.1.3 Skenování za pomoci Fresnelových čoček

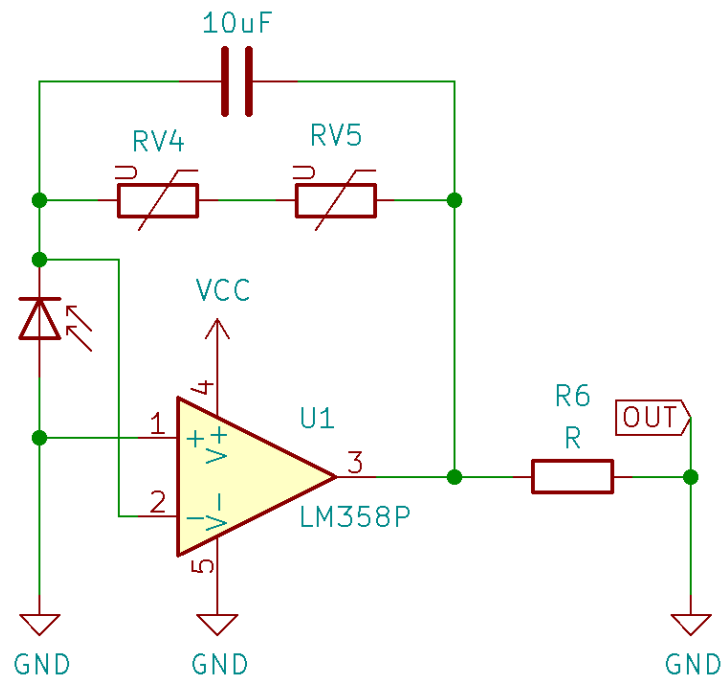
Laserový skener využívající Fresnelových čoček je ukázán na obrázku 38. Ten funguje na principu optických bariér. Dvě čočky (v tomto případě Fresnelovy), jsou umístěny naproti sobě. Zdrojem světla je červený laser s linkovým filtrem, který svítí do první čočky, kde vytvoří homogenní intenzitu světla, které se přes další čočku koncentruje do fotodiody. Pokud tedy mezi čočkami bude nějaký předmět (například. kapka), bude část paprsku odražena, nedostane se do fotodiody skrz druhou Fresnelovu čočku a proud generovaný fotodiou klesá. Čím větší je objekt, tím více paprsků se odrazí a pokles proudu bude větší. Pokud tedy bude procházet klíč postupně homogenním polem, a po každém kroku se zapíše výstupní hodnota, pak by měla řada těchto hodnot vytvořit jeho obrys. Tento princip byl vybrán pro navrhované zařízení, pro jeho jednoduchost.



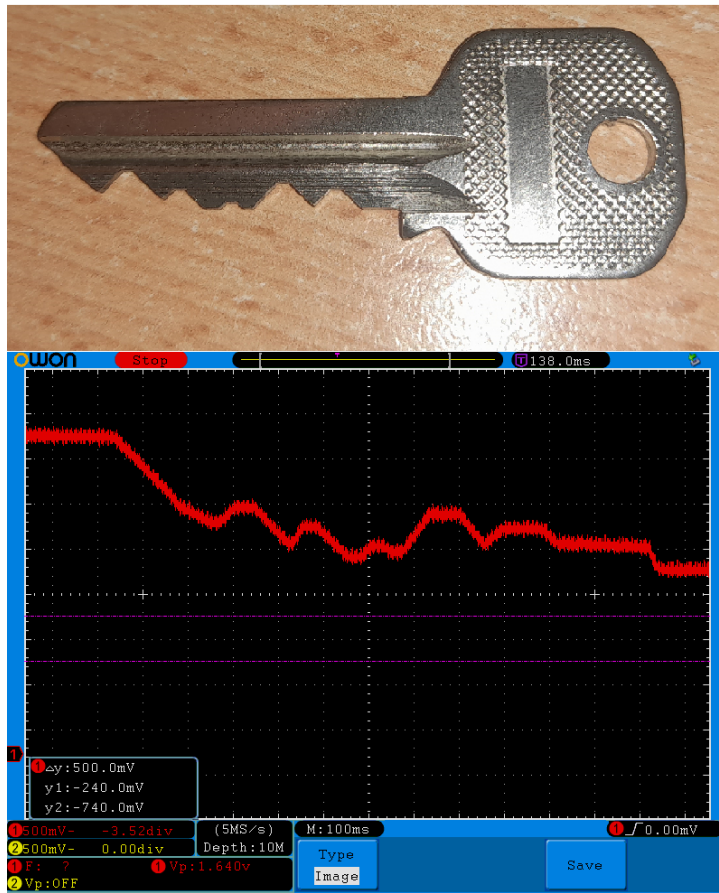
Obrázek 38: Funkce laserového distrometru [12]

3.2 Navržené skenovací zařízení

Pro účel naskenování tvaru klíče laserovým skenerem byl vytvořen jednoduchý přípravek, skládající se ze dvou držáků pro čočky, platformy pro laser s linkovým filtrem a pro fotodiodu. Výstup fotodiody je navíc připojen k transimpedančnímu zesilovači, jehož schéma je na obrázku 39. Ten převádí proud fotodiody na výstupní napětí. Funguje tak, že operační zesilovač má neinvertující vstup připojen na zem a invertující na potenciometr, který je připojen na výstup. Anoda fotodiody je připojena na zem a katoda k invertujícímu vstupu. Proud vytvořený světlem na fotodiodu teče do potenciometru. Jelikož je uzavřena záporná zpětná vazba musí být napětí mezi vstupy nula. To znamená, že výstup musí zvětšit napětí tak, aby vynechoval proud fotodiody. Rozsah je tedy měněn potenciometrem. Ověření funkce skeneru je ukázáno na obrázku 40.

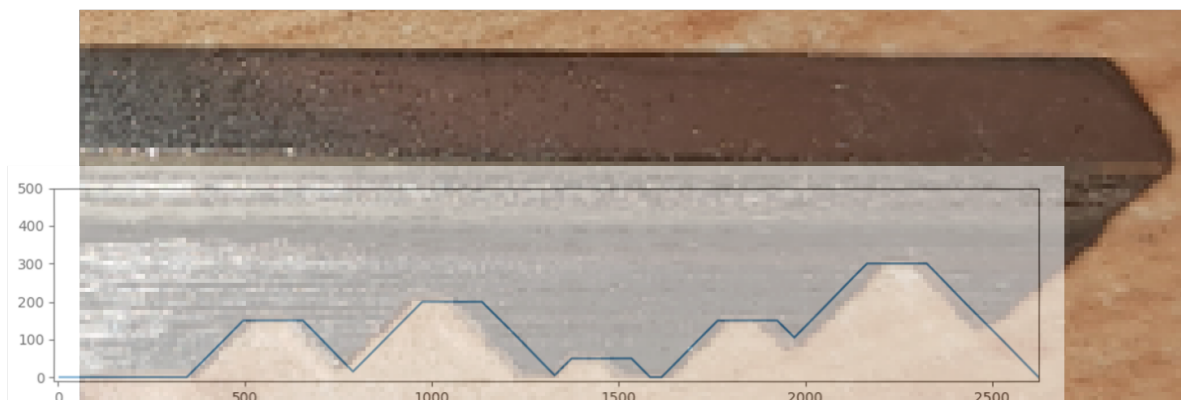


Obrázek 39: Transimpedanční zesilovač pro fotodiodu



Obrázek 40: Klíč v porovnání se skenem

Jak je tedy patrné, pro účely tohoto projektu je tento způsob skenu vhodný. Na obrázku 41 jsou data vyzobrazena v podobě grafu s přelínyným originálním klíčem.

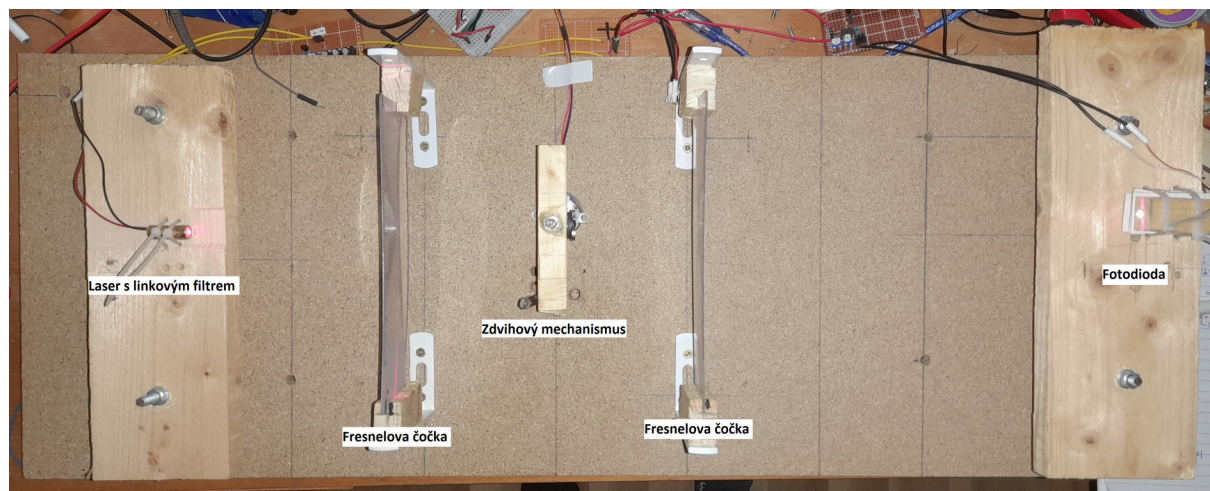


Obrázek 41: Finální digitální kopie klíče

Z průběhu je zřejmé, že definuje tvar lícovacího kusu, což znamená v tomto případě materiálu, který musí být odfrézován pro vytvoření klíče. Osy x a y jsou v jednotkách setin milimetru.

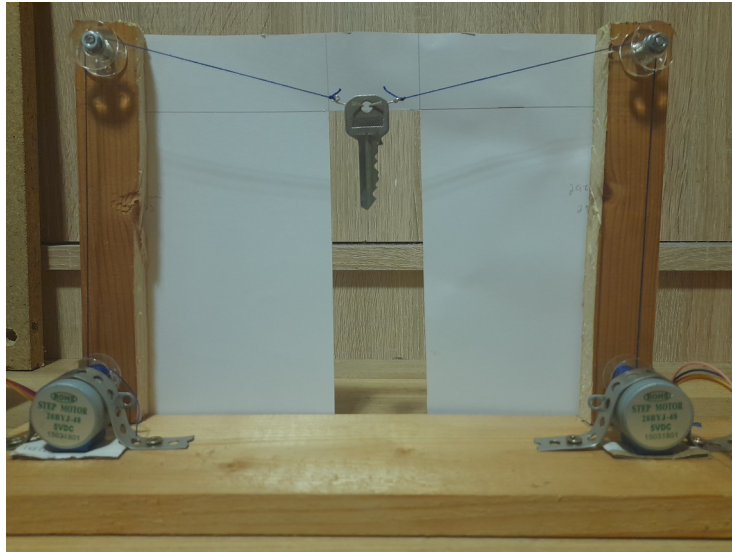
3.3 Mechanická část skeneru

Jak již bylo psáno v předchozí kapitole, přípravek se skládá z úchopů pro čočky a platformem pro linkový laser a fotodiodu. Navržený a sestavený skener je na obrázku 42.



Obrázek 42: Konstrukce skeneru

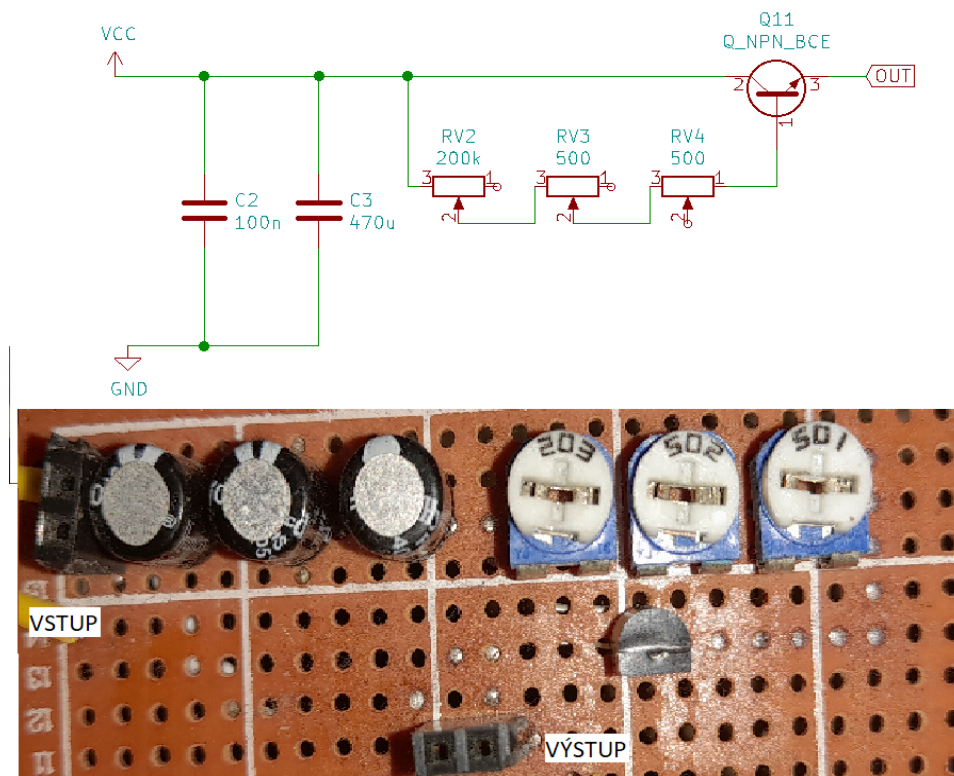
Zařízení, které pohybuje klíčem nahoru a dolů skrz laser je zkonstruováno ze dvou krokových motorů 28BYJ-48, platformy na které jsou upevněny a dvou latěk. Na motory jsou umístěné člunky s navinutým lankem a to dále vede na další, statické člunky (viz. Obrázek 43). Obě lanka jsou zakončeny háky, jež drží klíč. Rotací motorů v opačném směru, je pak dosaženo pohybu klíče nahoru, či dolů. Na tomto zařízení je také umístěna papírová clona. Ta má za úkol zvýšení rozlišení skenu klíče. Pokud by clona nebyla použita, zakrývaly by jednotlivé části klíče pouze malou část laseru a rozlišení by tedy bylo velmi nízké. S clonou je do čočky na straně fotodiody propouštěno mnohem méně záření a procentuální plocha, kterou klíč zakrývá poté značně stoupá a s ní i rozlišení.



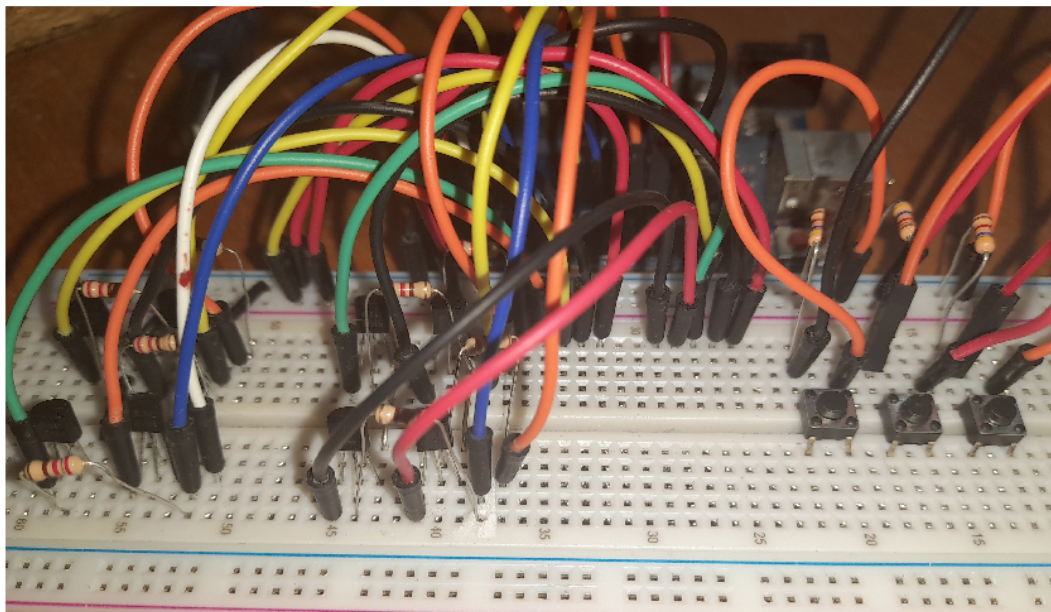
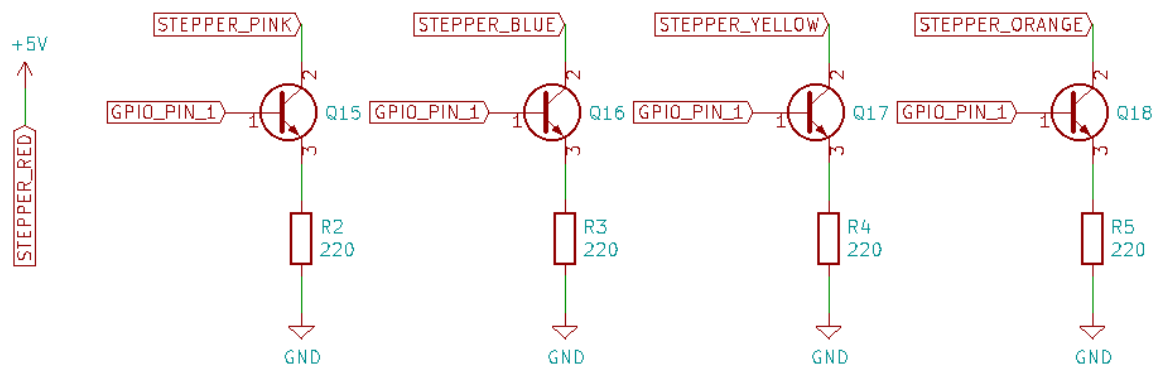
Obrázek 43: Zařízení posunu klíče

3.4 Zapojení

Obvod skeneru se skládá z čtyř částí: laserového zdroje (obrázek 44), u kterého je možné nastavovat intenzitu, transimpedančního zesilovače (obrázek 45), který převádí proud vyprodukovaný fotodiódou na změřitelné napětí. Tento výstup dále vede do analogového vstupu Arduina Una. Poslední částí pak tedy je kontrolér pro krokový motor 28BYJ-48. Ten je rovněž ovládán pomocí Arduina.



Obrázek 44: Zdroj pro laser



Obrázek 45: Ovládací obvod pro krokový motor

4 Frézování

Při replikaci klíče je potřeba odebrat přebytečný materiál z polotovaru. Jednou z možností jak toto provést je frézování. Tato metoda spočívá v použití fréz – vícebřítých nástrojů. Ty konají řezný pohyb otáčivý. Obráběný materiál – obrobek – je pevně zajištěn na povrchu a provádí řezný pohyb vedlejší. Dle směru osy frézy ke obráběcímu stolu také určujeme frézy čelní, které mají osu kolmou na obráběnou plochu a frézy válcové s osou rovnoběžnou k ploše. Spojením pohybu frézy a obrobku tedy vzniká pohyb nazývaný cykloida. Obrobek se také může hýbat po křivce, nebo se otáčet. Samotné řezání je přerušované, kdy zuby vniknou do materiálu, odeberou třísku a místo řezu opouští.

4.1 Způsoby frézování

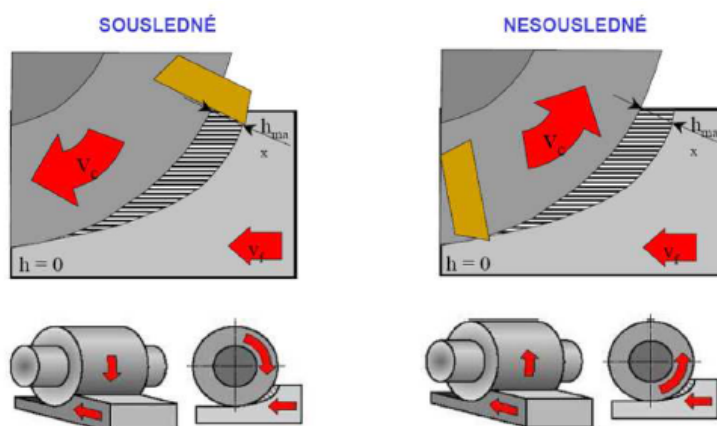
Dle orientace osy k pracovní ploše můžeme dělit způsoby frézování na několik poddruhů. V případě frézování frézou válcovou, kdy je materiál odebrán zuby na obvodě frézy. Podle otáčení frézy vzhledem k pohybu obrobku, dělíme frézování na sousledné a nesousledné.

4.1.1 Nesousledné frézování

Je způsob odebrání materiálu, při kterém se obrobek posouvá proti směru otáčení frézy. Na začátku frézování se zuby frézy kloužou po obráběné části vlivem pružných deformací materiálu. To způsobuje zahřívání a tupění zubů. Obráběná plocha má tedy ve výsledku horší jakost. Zároveň také působí fréza proti upínacím silám. Průběh nesousledného frézování lze vidět na obrázku 46.

4.1.2 Sousledné frézování

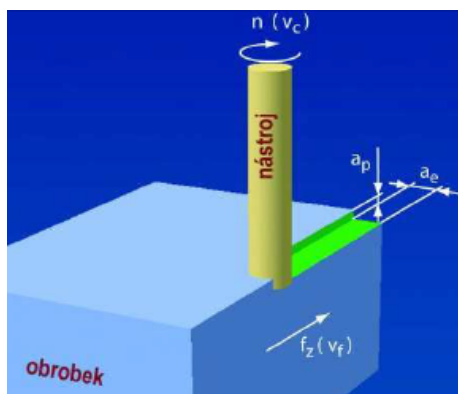
Oproti nesouslednému frézování se při tomto způsobu obrobek pohybuje ve směru otáčení frézy. Zuby odebírají třísku v maximálním průřezu a končí průřezem nulovým, oproti nesouslednému, kde se odebírá třísku v nejmenším průřezu až do maxima. Je tedy celkově kvalitnější i díky tomu, že síla řezu působí kolmo na plochu a obráběný materiál přitlačuje na opěrnou plochu. Tento proces je vyobrazen na obrázku 46.



Obrázek 46: Frézování sousledné a nesousledné [11]

4.1.3 Frézování čelními frézami

Jde o frézování efektivnější, oproti válcovým metodám. Jelikož je materiál zároveň odebrán zuby na obvodu i čele frézy a je tak využito více břitů najednou. Naznačení tohoto pohybu při tomto frézování je na obrázku 47.



Obrázek 47: Frézování čelní frézou [11]

4.1.4 Rozdělení fréz

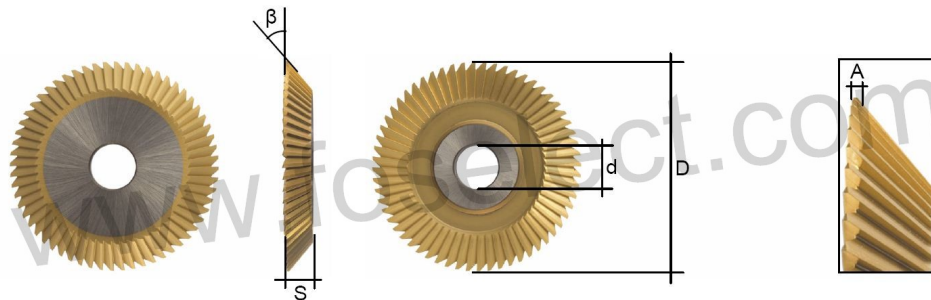
Jednotlivé frézy lze dělit do několika kategorií, jak je ukázáno v tabulce 1. Dělit můžeme podle umístění břitů, podle průběhu ostří zubů, nebo podle upínání.

Tab. 1 – Přehled zvažovaných fréz

Podle umístění břitů	Válcové frézy	Čelní frézy	Kotoučové frézy	Kuželové frézy	Tvarové frézy
	s břity na válcové ploše frézy.	s břity umístěnými na válcové ploše frézy.	s břity na válcové ploše a obou čelních plochách frézy.	s břity na jedné nebo dvou kuželových plochách frézy.	s břity umístěnými na tvarových plochách frézy.
Podle průběhu ostří zubů	Frézy s přímými zuby	Frézy se zuby ve šroubovici	---	---	---
	zuby frézy jsou umístěny rovnoběžně s osou nástroje.	zuby nástroje jsou umístěny na pravotočivé nebo	---	---	---

4.2 Úhlové frézy pro frézování klíčů

Pro tuto práci asi nejrelevantnější frézovací nástavec. Tato část je totiž hojně využívána ve strojích na kopírování klíčů. Na okraji jedné strany kotouče jsou břity, které odebírají materiál dle pohybu stroje po originálu klíče. Zobrazená je na obrázku 48.



Obrázek 48: Úhlová fréza klíčová [11]

4.3 Řezné podmínky

Pro efektivní frézování je potřeba zvolit správné parametry – podmínky. Těmi jsou řezná rychlost a posuv. Řezná rychlost udává dráhu, kterou urazí hrany břitu v metrech za minutu. Platí tedy vzorec:

$$v = \pi D n$$

kde: v = rychlost v m/min

D = průměr frézovacího nástavce

n = počet zubů na frézovacím nástavci

Posuv je pak parametr udávající posuv obrobku v mm na jeden zub. Udává se nejčastěji v milimetrech na rozteč zubů za sekundu.

5 Konstrukce výřezového zařízení

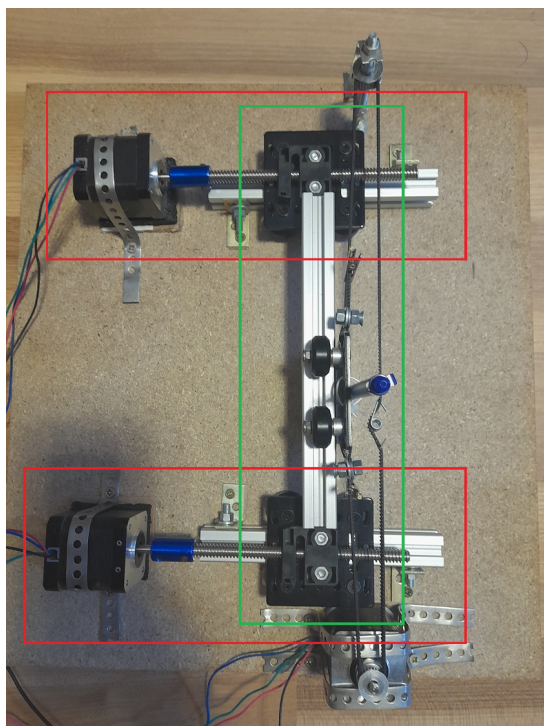
Samotný přípravek na výřez klíče má splňovat dvě základní funkce: pohyb po osách X- Z a být dostatečně stabilní při samotném vyřezávání natolik, aby neovlivnil finální kvalitu výrobku.

5.1 Pohyb po Z ose

Pohyb po ose Z (znázorněna na obrázku 49 červenou barvou) je zajištěn párem hliníkových profilů, na kterých je horizontálně umístěn vozík, posouvaný skrz matici a trapézovou tyč, jejíž točivý pohyb převedený na lineární je zajištěn krokovým motorem. Trapézové tyče zde použité mají stoupání 2mm, to znamená, že při kroku motoru 1,8° (200 kroků na celou rotaci), odpovídá krok motoru: $\frac{2}{200}\text{mm} = 0,01 \text{ mm}$. Vzhledem k tomu, že nejhlubší zub klíče je 3 mm, je tato přesnost naprosto dostačující.

5.2 Pohyb po X ose

Osa X (znázorněna na obrázku 49 zelenou barvou) je řešena příčným upevněním hliníkového profilu na dva vozíky posunující se po Z ose a vertikálním umístěním třetího vozíku na tuto osu. Pohyb tohoto vozíku je uskutečněn třetím krokovým motorem, umístěným vedle jedné Z-kolejnice, ozubeným řemenem, který je spojen právě vertikálním vozíkem a pasivním držákem tohoto řemenu, který se nachází naproti motoru vedle druhé Z-kolejnice.

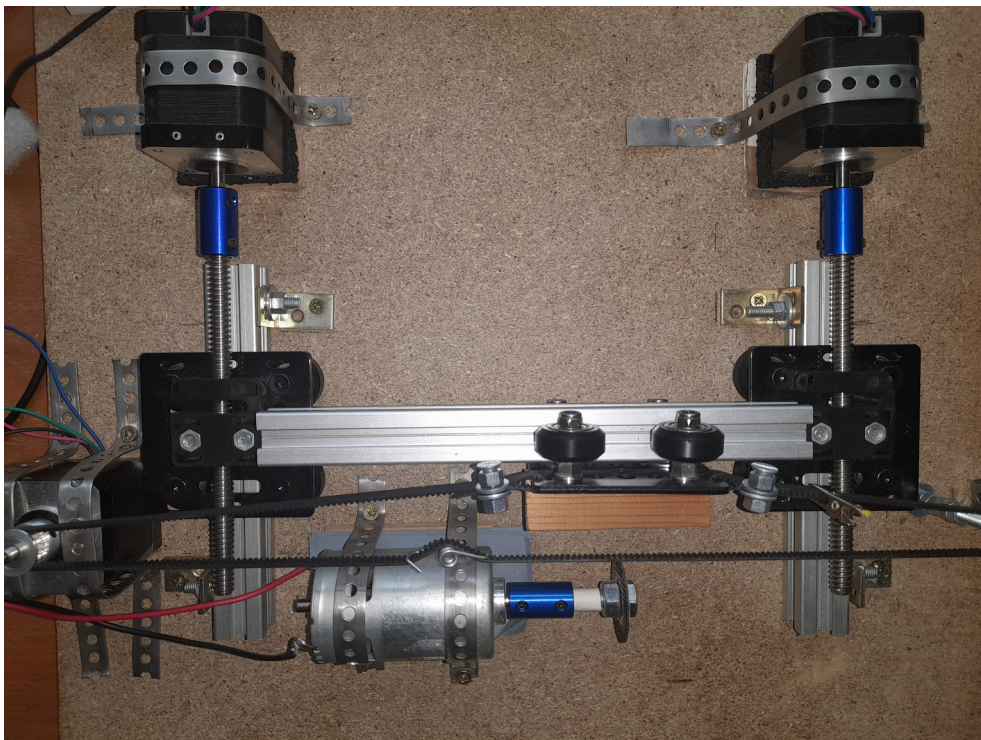


Obrázek 49: Výřezový přípravek – část X pohybu (zelená), část Y pohybu (červená)

Ačkoliv není řemen flexibilní, je možné díky malému rozsahu pohybu v Z ose (~ 6 mm) ho napínat a povolovat bez jeho poškození, či ztráty přesnosti pohybu. Zároveň je při každém kroku v ose x stejně napnutý, jelikož je řez prováděn vertikálně, takže nehrozí ovlivnění délky kroku v závislosti na napnutí.

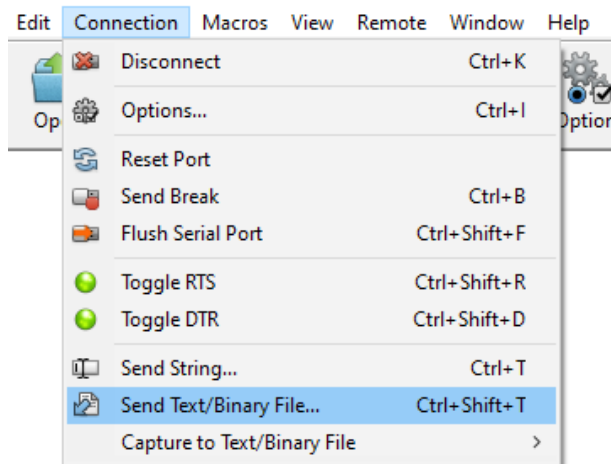
5.3 Motor a řezný disk

Jak již bylo zmíněno, testování je prováděno na dřevěném materiálu. Použitý řezný systém je ukázán na obrázku 50. Před vozíkem osy Y je upevněn kartáčový motor R775, který dosahuje rychlosti až devět tisíc otáček za minutu. To je dostačující, jelikož výřezovým materiálem je dřevo. Byl vybrán z důvodu jednak finančního, kdy pokud by materiálem byla například pro klíče obvyklá mosaz či ocel, musel by použitý motor být mnohem silnější a s ním i celá konstrukce. Jelikož jde především o demonstraci, byl vybrán tedy slabší motor a k němu sestaveno adekvátní posuvné zařízení. Pro úpravu materiálu byl zvolen řezný disk opět kvůli finanční nenáročnosti a jednoduché výměně.



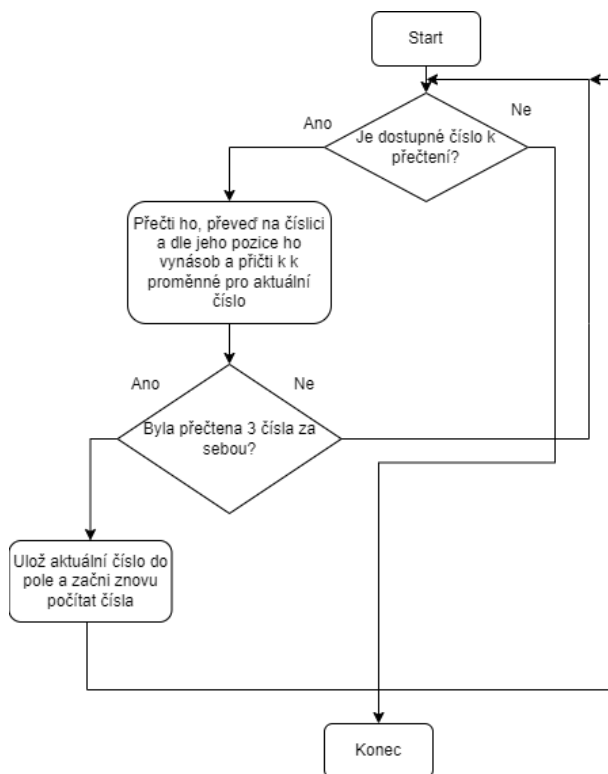
Obrázek 50: Motor R775 připevněný k desce s pohybovým zařízením

odpovídajících hodnot a jsou uložena do pole hodnot pro výřezové zařízení. Čísla jsou následně převedena z deseti bitových hodnot výstupu A/D převodníku na hodnotu v milimetrech.



Obrázek 52: Možnost posílání dat do Arduino

Převod těchto hodnot na použitelná čísla pak popisuje diagram na obrázku 53.



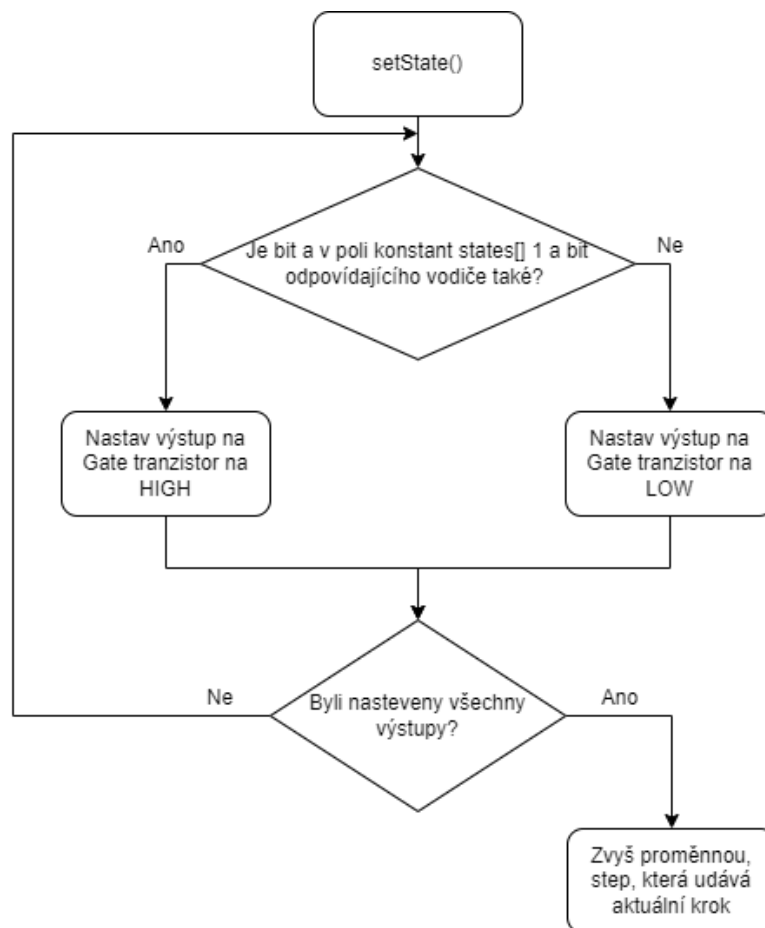
Obrázek 53: Diagram funkce převodu přijatých dat

6.2 Firmware skenovacího zařízení

Firmware skenovacího zařízení se stará o kontrolu dvou krokových motorů 28BYJ-48 a vyčítání dat z transimpedančního zesilovače.

6.2.1 Funkce

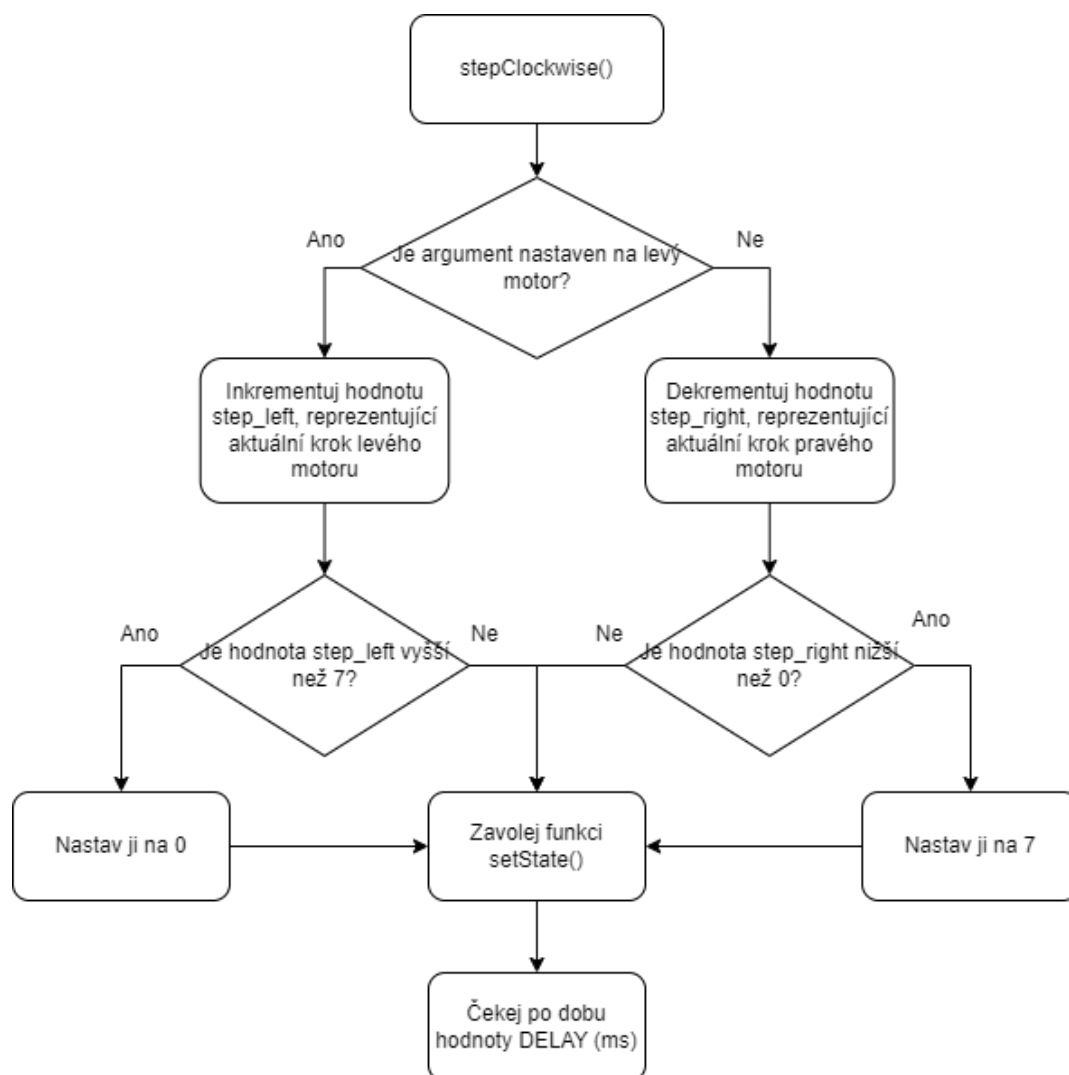
První funkcí je `setState()`, která nastavuje kterým vodičem bude procházet proud spínáním tranzistoru, dle pole konstant `states`. To obsahuje osm čtyřbitových hodnot reprezentujících jednotlivé zasedby jdoucí stavy, jejichž krokováním se dosáhne pohybu motoru. Funkce pak vždy obsahuje podmínku, která pomocí bitového operátoru `&`, rozhodne zda má být právě tento pin nastaven na logickou jedničku, či nulu. Podmínky jsou vždy po dvojicích pro levý a pravý motor, jelikož se vždy točí opačným směrem. Tato funkce je pak popsána digramem na obrázku 54.



Obrázek 54: Diagram k funkci `setState()`

Další funkce řídí pohyb motorů doleva a doprava. Funkce má jeden argument typu `bool`: `left_motor`. Pokud je hodnota argumentu “true”, rotace se uplatňuje na levý motor a pokud je “false”, tak na pravý. Dle vybraného motoru se poté zvolí inkrementace, či dekrementace

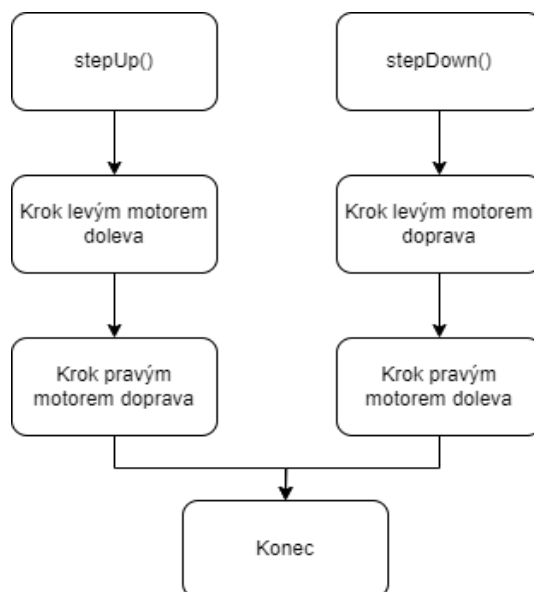
odpovídající proměnné, která je pak pomocí funkce *setState()* převedena na pohyb motoru. Princip popsané funkce je na obrázku 55.



Obrázek 55: Diagram k funkci *stepClockwise()*

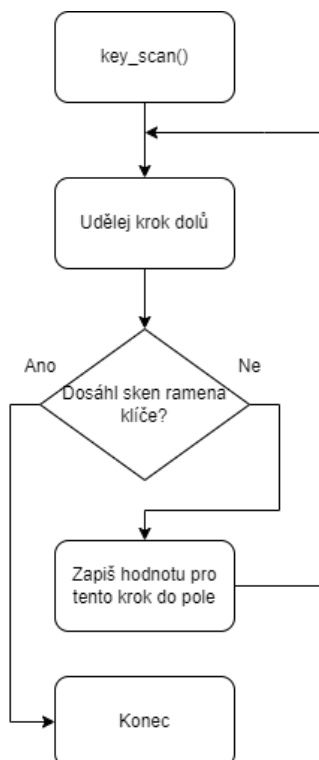
Funkce *stepCounterClockwise()* je pak pouze převrácená funkce *stepClockwise()*.

Funkce *step_up()* a *step_down()* jsou pak kombinacemi funkcí *stepClockwise()* a *stepCounterClockwise()*, kdy jejich spuštěním se klíč posouvá nahoru či dolů. Funkční diagram je na obrázku 56.



Obrázek 56: Diagram k funkcím stepUp() a stepDown()

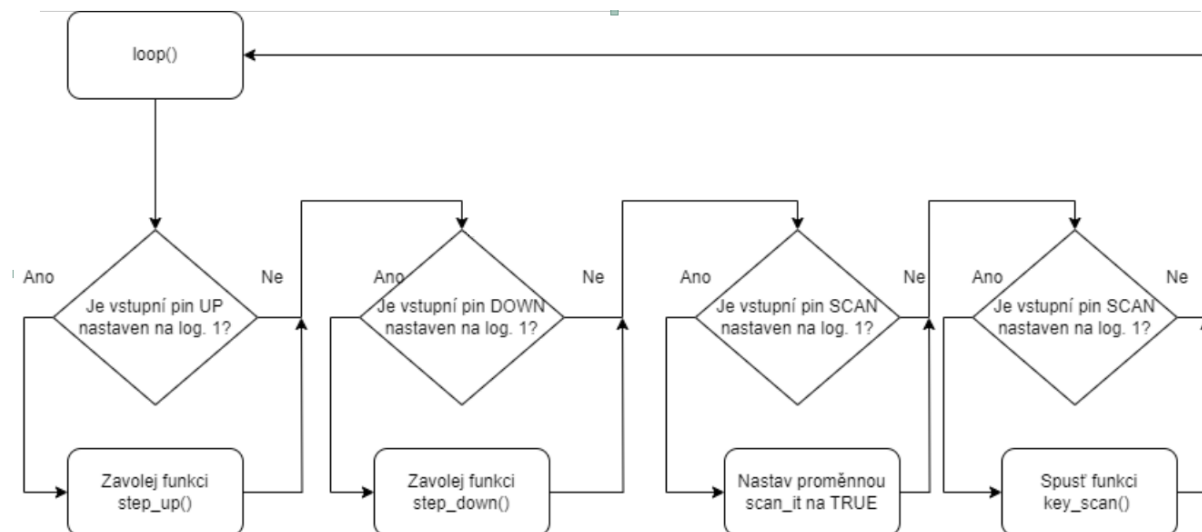
Funkce samotného skenování je pak pouze pohybem dolů a zapisováním hodnot do pole. Diagram k funkci je na obrázku 57.



Obrázek 57: Diagram k funkci key_scan()

6.2.2 Pozicování klíče

Smyčka `loop()` v sobě má čtyři `if` podmínky: dvě z nich kontrolují stisk tlačítka na manuální pozicování klíče, další kontrolují zda bylo stisknuto tlačítko skenu a pokud ano nastaví bool hodnotu a spustí se funkce `key_scan()`, která krokuje klíč zeshora dolů skrz laser a po každém kroku vyčítá vrácenou hodnotu (viz. obrázek 58).



Obrázek 58: Diagram k `loop()` smyčce

6.3 Firmware výřezového přípravku

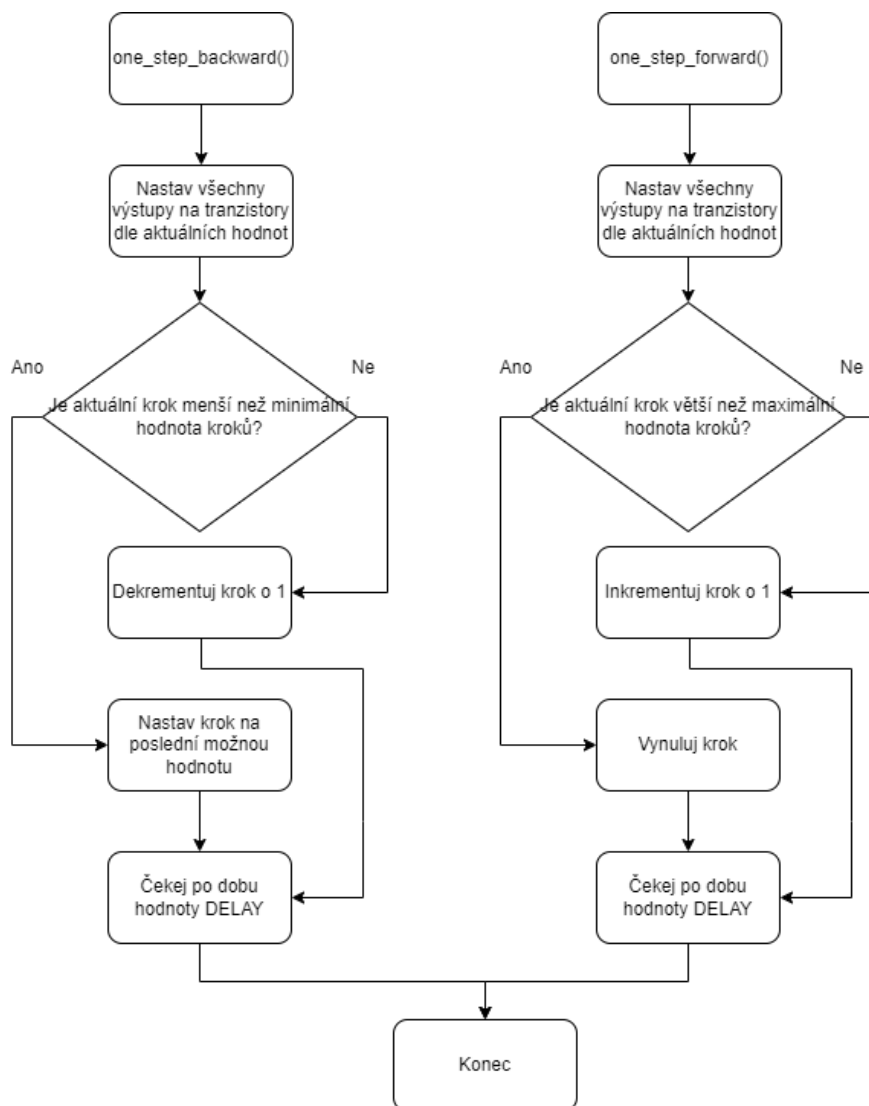
Program pro výřezové zařízení se stará o obsluhu DC motoru a tří krokových motorů: dva pro Z osu jeden pro X osu.

6.3.1 Definice konstant

První částí softwaru je definice konstant, jako například přiřazené piny k vývodům krokových motorů, zpoždění mezi kroky, nebo taky pořadí ve kterém se napájejí cívky motorů.

6.3.2 Funkce

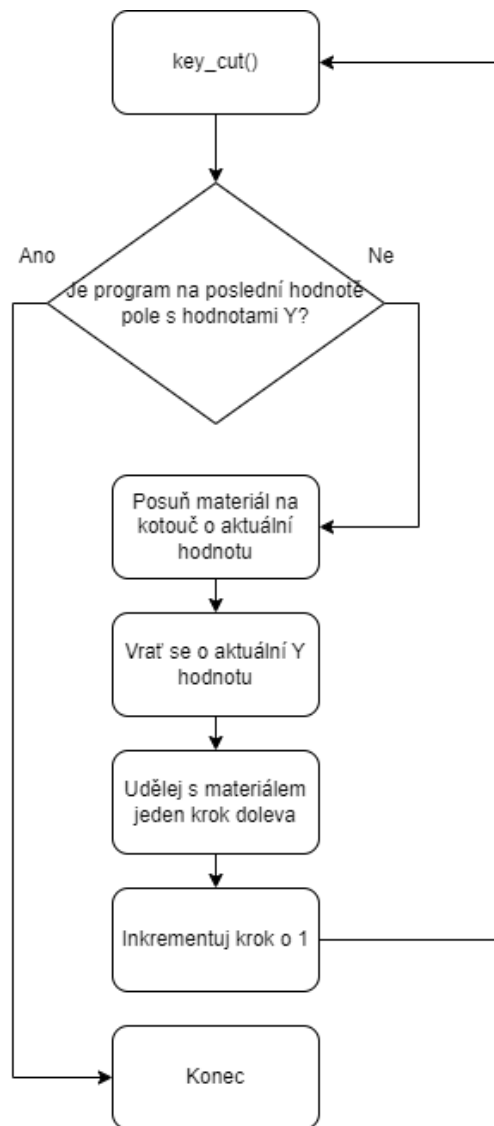
Funkce `one_step_forward()` a `one_step_backward()` (diagram funkce na obrázku 59) slouží k ovládní dvou krokových motorů, zodpovědných za pohyb v ose Y. Po každém zavolání se nastaví čtyři výstupy, které ovládají jednotlivé motory, pomocí pole konstant `step_order[]`. To má v sobě uložené všechny po sobě jdoucí, možné stavy pro definovaný počet kroků.



Obrázek 59: Diagram k funkcím `one_step_left()` a `one_step_right()`

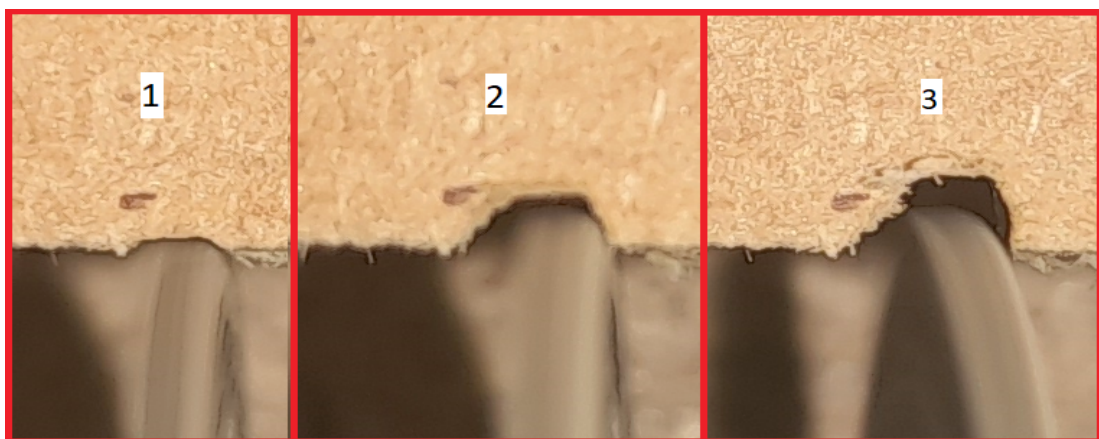
Funkce `one_step_left()` a `one_step_right()` dělá to samé, ale na ose X.

Asi nejdůležitější funkcí je `cut()`. Tato funkce využívá všechny předešlé k výřezu klíče. Prvně je pomocí dvou “for” smyček rozdělen na XY graf hodnot. S výřezovým materiálem je poté pohybováno tak, že po každém kroku je natlečen na výřezový kotouč do hloubky odpovídající Y hodnoty pro tento krok. Hodnota `x_step` poté určuje délku tohoto kroku. Principiální diagram je na obrázku 60.



Obrázek 60: Diagram k funkci key_cut()

Na obrázku 61 je možné vidět jakým způsobem se pohybuje vozík s výřezovým materiálem vzhledem ke kotouči.

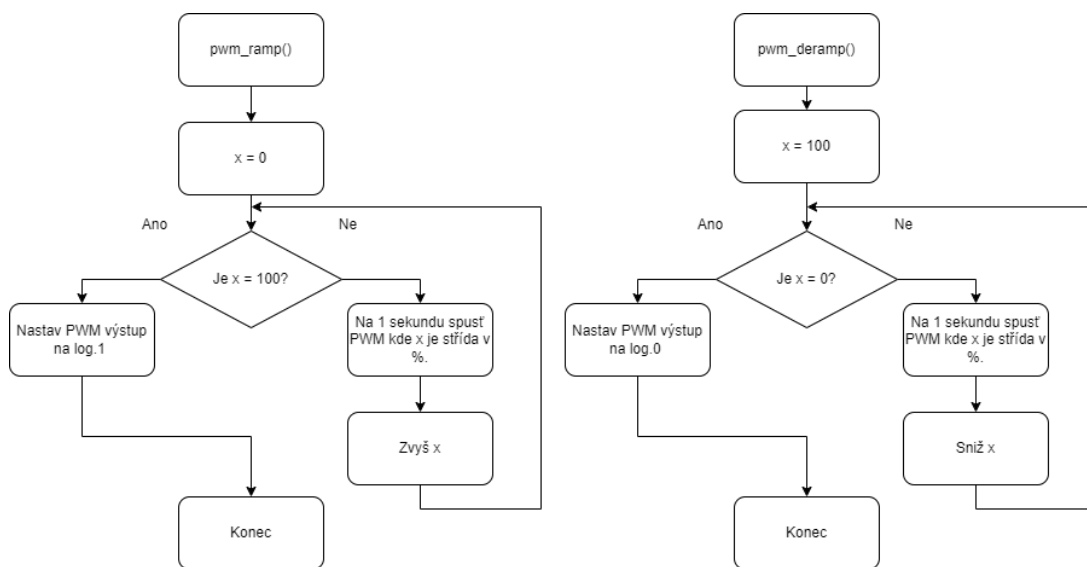


Obrázek 61: Naznačení pohybu kotouče do materiálu

Je tedy patrné, že maximální délka kroku v ose X musí být vždy menší, nebo přinejmenším stejná jako šířka výřezového kotouče.

6.3.3 Pozicování materiálu při vyřezávání

První v hlavní smyčce `loop()` je PWM kód pro spuštění DC motoru. V první for smyčce se nastaví, že `x` musí být menší, nebo rovno `stu`, to odpovídá procentům duty cyklu. Konstanta `PWM_STAGE_INCREMENT` pak definuje o kolik se bude procento duty cyklu zvyšovat s každým opakováním. Další for smyčka se stará o delay mezi jednotlivými stavy PWM. Po dosažení `x=100` je pin nastaven na logickou jedničku, tedy `HIGH` a proměná typu `bool pwm_ramp` je nastavena na `false`, tak aby se tato část programu neopakovala v další smyčce. Obě funkce jsou vysvětleny diagramem na obrázku 62.



Obrázek 62: Diagram pro funkce `pwm_ramp()` a `pwm_deramp()`

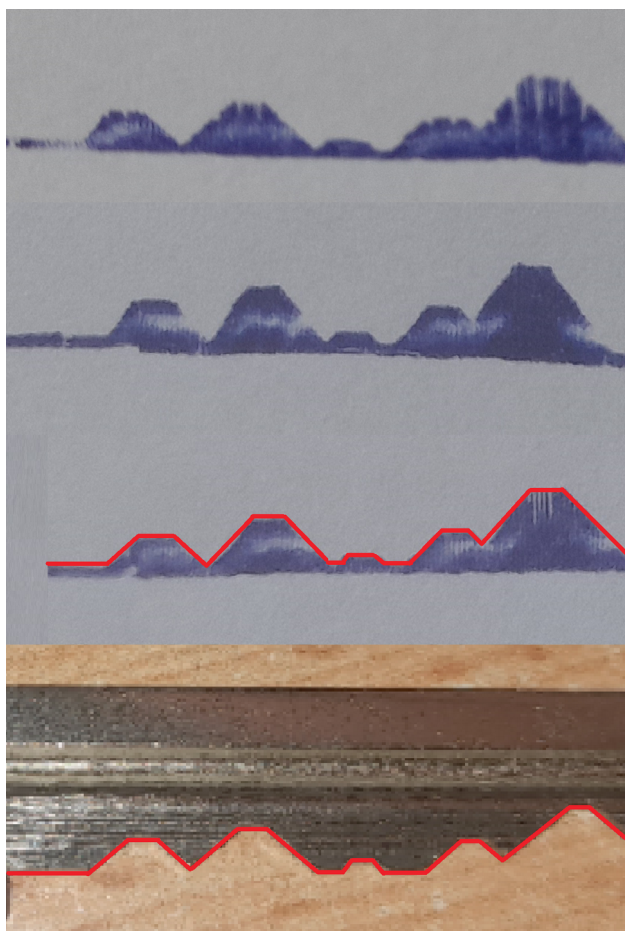
Funkce `pwm_deramp()` je obrácenou verzí PWM kódu ze začátku `loop()` smyčky. Zde je duty cycle postupně snižován a při `x = 0` je pin nastaven na logickou nulu tedy `LOW`.

7 Testování

Testování funkčnosti všech zařízení bylo provedeno několika způsoby: Pro skenovací přípravek je potřeba ověřit konzistenci snímání, stejně tak poté i kvalitu výřezu a pohyb samotného zařízení a nakonec porovnání kopií s originálem.

7.1 Test nákresem

První testování zahrnuje připevnění tužky k výřezovému zařízení a porovnání tohoto náčrtu k originálnímu klíči. Z této zkoušky nelze určit přesnou chybu, jedná se pouze o přibližné určení správnosti pohybu zařízení. Výsledek je na obrázku 63.



Obrázek 63: Test pohybu tužkou

Modrá „nakreslená“ část představuje část, která by byla vyříznuta a tedy tím pádem je přechod z modré na bílou naznačená hrana. Na úplně spodní části je vyfocen originální klíč. Z obrázku lze tedy vidět, že pohyb je konzistentní. Dalším krokem je vyříznutí materiálu a jeho měření.

7.2 Test měřením zubů

Klíčovou zkouškou je porovnat výsledný výrobek k originálu. Bylo tedy vyrobeno několik vzorků, které následně byly změřeny. Tabulka níže ukazuje jednotlivé výšky zubů a variaci mezi jednotlivými výřezy, které jsou vyfoceny na obrázku 64. Výsledné hodnoty měření jsou vidět v tabulce 2.



Obrázek 64: Jednotlivé výřezy

Tabulka 2 -Hloubky zářezů výrobků (v mm)

	1.zářez	2. zářez	3. zářez	4. zářez	5. zářez
1. výrobek	1,46	2,11	0,58	1,55	2,94
2. výrobek	1,45	2,09	0,49	1,6	3,02
3. výrobek	1,58	2,02	0,56	1,54	3,07

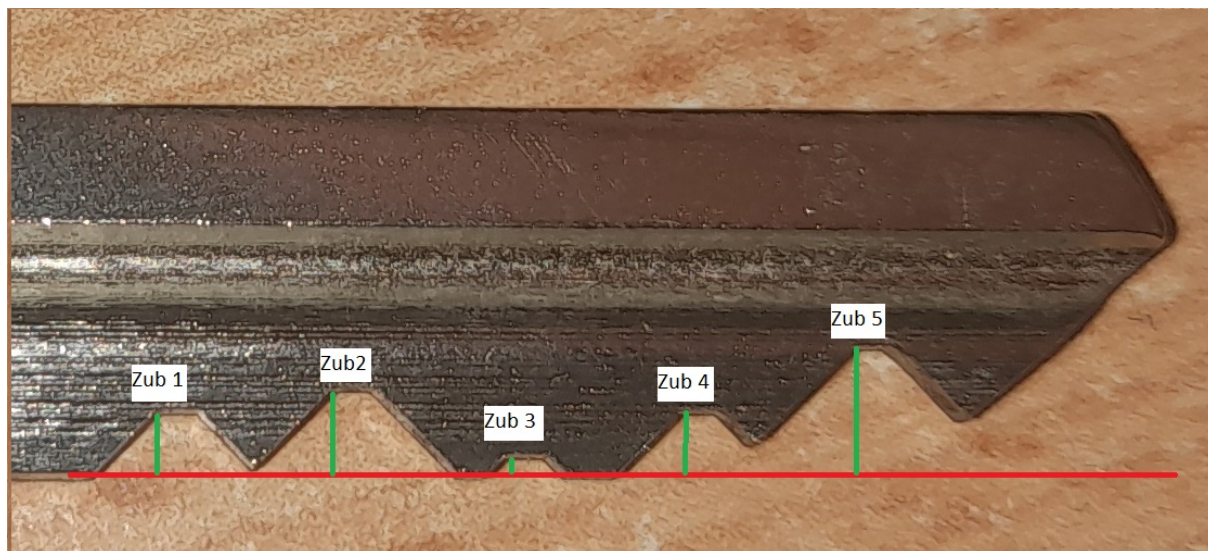
Porovnání bylo provedeno tím způsobem, že se výrobky porovnaly k originálnímu klíči a . Výsledná tabulka tedy ukazuje jak se liší výška zubů od originálu.

Z tabulky 3 lze vidět, že absolutní chyba se dosahuje maximální hodnoty okolo 0,1 milimetru.

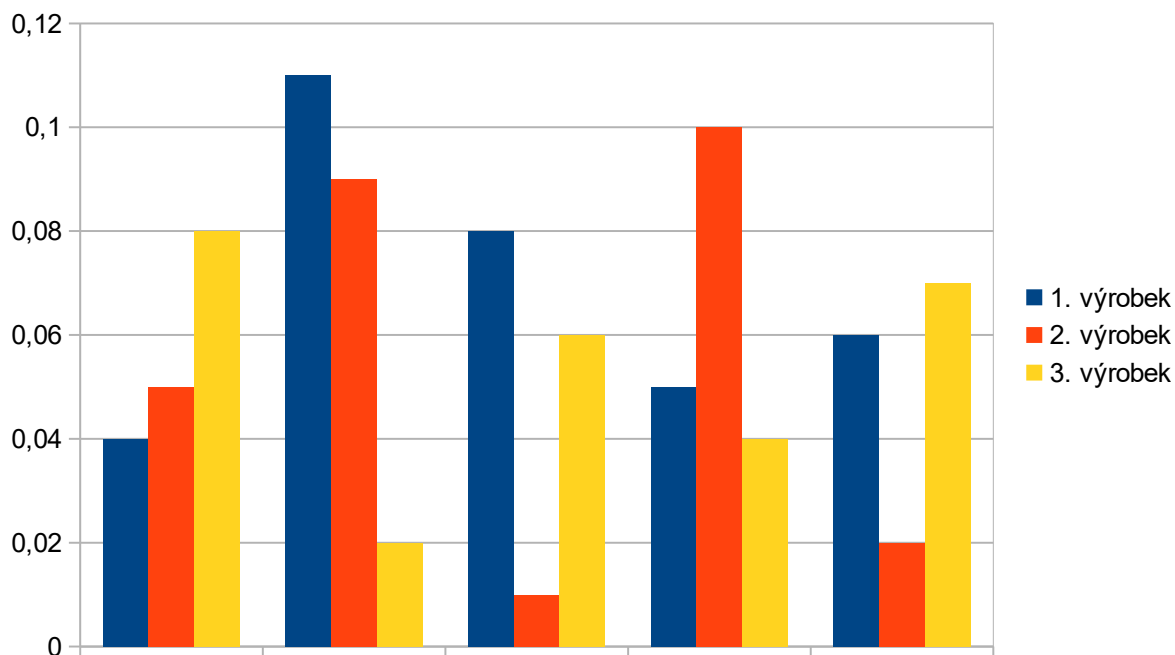
Obrázek 65 pak slouží k očíslování jednotlivých zubů pro graf na obrázku 66, který znázorňuje absolutní chybu výrobků u každého zubu.

Tabulka 3- Absolutní chyba výrobků oproti originálu (v mm)

	1. rozdíl	2. rozdíl	3. rozdíl	4. rozdíl	5. rozdíl
Hodnoty originálního klíče	1,5	2	0,5	1,5	3
1. výrobek	0,04	0,11	0,08	0,05	0,06
2. výrobek	0,05	0,09	0,01	0,10	0,02
3. výrobek	0,08	0,02	0,06	0,04	0,07



Obrázek 65: Popis jednotlivých zubů



Obrázek 66: Absolutní chyba výrobků u každého zubu (zleva doprava – zub 1 až zub 5)

Průměrnou celkovou procentuální chybu výřezu lze vypočítat pomocí vzorce:

$$\frac{\sum \left(\frac{A}{H * 0,01} \right)}{N}$$

kde: A – Absolutní chyba

H – Hodnota originálního klíče

N – Počet chyb

$$\text{Průměrná procentuální chyba 1. výrobku} = \frac{\frac{0,04}{0,015} + \frac{0,11}{0,02} + \frac{0,08}{0,005} + \frac{0,05}{0,015} + \frac{0,06}{0,03}}{5} = 5,9\%$$

$$\text{Průměrná procentuální chyba 2. výrobku} = \frac{\frac{0,05}{0,015} + \frac{0,09}{0,02} + \frac{0,01}{0,005} + \frac{0,10}{0,015} + \frac{0,02}{0,03}}{5} = 3,43\%$$

$$\text{Průměrná procentuální chyba 3. výrobku} = \frac{\frac{0,08}{0,015} + \frac{0,02}{0,02} + \frac{0,06}{0,005} + \frac{0,04}{0,015} + \frac{0,07}{0,03}}{5} = 4,66\%$$

Průměrná sečtená chyba na zubu je pak: $\frac{5,9+3,43+4,66}{3} = 4,663\%$

Chyba může být způsobena pohybem zařízení, vibracemi, ale i použitým materiálem. Dřevo použité pro výřez je poměrně měkké, aby i slabší motor byl schopný do něj řezat. Proto je možné si povšimnout u obrázku výrobků výše chybí pravý kus u třetího zubu. Tato část je příliš úzká a tenká a disk ji vždy uřízne.

Závěr

V rámci bakalářské práce bylo nutné nastudovat problematiku jak naskenovat tvar klíče a dále jak na základě změřených dat klíč replikovat. Za tímto účelem byla provedena rešerše optických skenerů a dále pak rešerše elektromotorů a řezných kotoučů. Na základě rešerše bylo navrženo skenovací zařízení, které odesílá informace o klíči do počítače, kde jsou ukládána. Uložená data jsou pak použita ve frézovacím zařízení k replikaci klíče. Z finančních a technických důvodů bylo rozhodnuto provést frézování na dřevě, nikoli na kovu.

Ověření funkce zařízení bylo provedeno testovacími frézováními, kdy podle originálního klíče byla vytvořena jeho elektronická kopie a tato kopie byla následně použita k vyfrézování testovacích vzorů. Tyto vzory byly porovnány s originálním klíčem. Z porovnání je zřejmé, že vyfrézovaný vzor se shoduje s předlohou.

Z výše zmíněného tedy vyplývá, že zadání bakalářské práce bylo splněno. Do budoucna by bylo vhodné upravit úchyt klíče pro frézování, dále pak provést celkovou konstrukci robustněji a využít silnějšího motoru pro řezný kotouč, aby bylo možné provést replikaci kovového klíče. Toto zatím nebylo provedeno z důvodu ceny řezného kotouče (cena kotouče může být až 10 000 Kč).

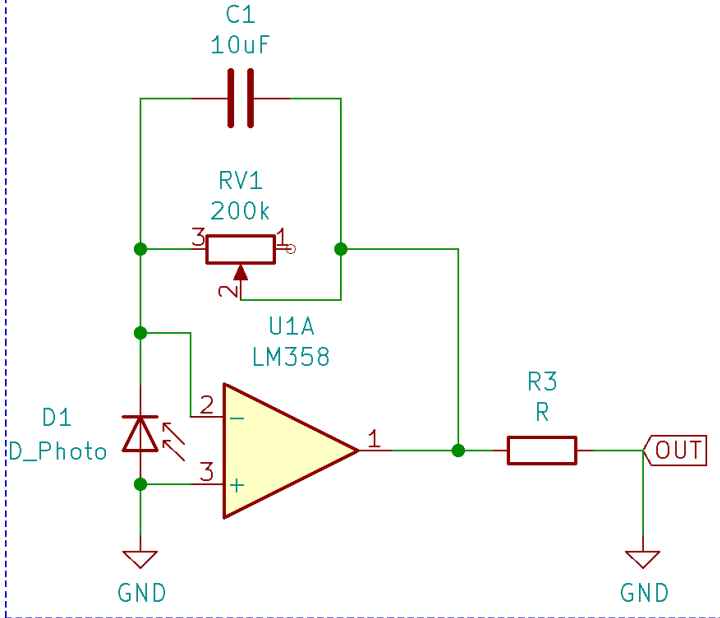
Literatura

- (1) HOROWITZ, Paul a Winfield HILL. *The art of electronics*. Third edition. New York: Cambridge University Press, 2015. ISBN 978-0-521-80926-9.
- (2) Operační zesilovač: LM358P [online]. In: . s. 64 [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsfpf-null-wwe&ts=1667838133591&ref>
- (3) Klíč. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kl%C3%AD%C4%8D>
- (4) Historie zámků a klíčů. *Next.cz* [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.next.cz/historie-system-zamku-a-klicu>
- (5) Historie zámků: Od starého Egypta až... po dogu pana Fáborského. *Https://www.technickytydenik.cz* [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/historie-zamku-od-stareho-egypta-az-po-dogu-pana-faborskeho_39242.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/historie-zamku-od-stareho-egypta-az-po-dogu-pana-faborskeho_39242.html)
- (6) Důležité informace. *Https://www.autoklice.com* [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.autoklice.com/auto-klice/dulezite-informace>
- (7) What Is A Car Key Transponder Chip And How Does It Work?<https://advanced-keys.co.uk/>. *Https://advanced-keys.co.uk/* [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: [https://advanced-keys.co.uk/index.php?route=news/article&news_id=20](https://advanced-keys.co.uk/index.php?route=news/article&news_id=20)
- (8) *LM358P Datasheet, PDF* [online]. [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22771/STMICROELECTRONICS/LM358P.html>
- (9) *28BYJ-48 Datasheet* [online]. [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/krokovy-motor-28byj-48/?gclid=Cj0KCQjw6KunBhDxARIsAKFUGs_YY17WGLgNmoxrlnLfyFkYWfhnXMDERQz7bMZQMrxedeIVpYLFgs8aArHZEALw_wcB#relatedFiles
- (10) The difference between unipolar and bipolar stepper motors [online]. [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: <https://techexplorations.com/blog/arduino/blog-the-difference-between-unipolar-and-bipolar-stepper-motors/>

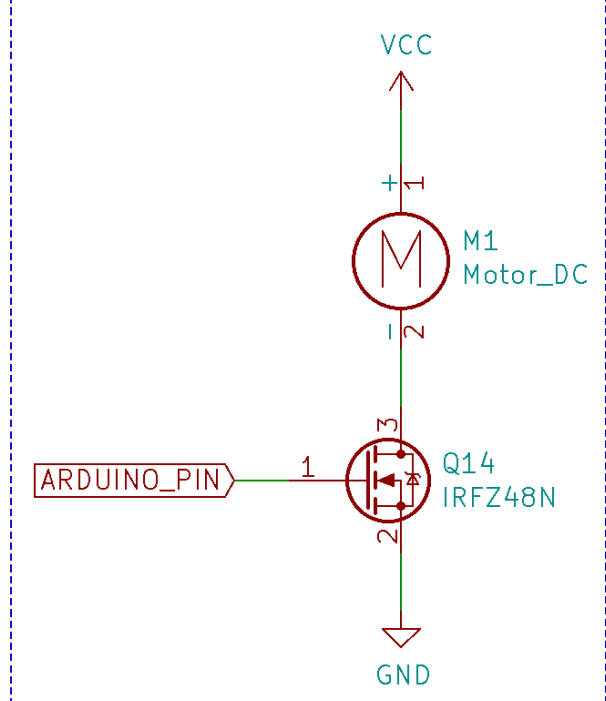
- (11) _Frézování_ [online]. [cit. 2023-08-29]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/STT2-10_Frezovani_RAJ.pdf
- (12) REJFEK, L., J. PEŠEK a V. BRÁZDA. <https://www.semanticscholar.org/paper/Distrometer-based-on-measurement-of-fall-velocity-RejfeK-Pesek/093cc3d9c5c8fad739f626df62ac476fe5b067ba> [online]. [cit. 2023-08-30].
- (13) DIGITAL SCANNER [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <https://web.mit.edu/2.972/www/reports/scanner/scanner.html>
- (14) Brushed DC Motor Working Principle and Applications [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <https://robu.in/brushed-dc-motor-working-principle-construction-applications/>
- (15) Brushed DC electric motor [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Brushed_DC_electric_motor
- (16) DC MOTORS —Against Back-EMF [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <https://medium.com/jungletronics/dc-motors-against-back-emf-589d8ed174cc>
- (17) Pulse-width modulation [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation
- (18) Stepper motor [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor
- (19) ULN2003 - Datasheet [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/25575/STMICROELECTRONICS/ULN2003.html>
- (20) HOW A BALL SCREW WORKS [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <http://www.barnesballscrew.com/how-a-ball-screw-works/>
- (21) Sharplayers [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <https://eshop.sharplayers.cz>
- (22) H-bridge DC Motor Control Using Complementary PWM, Shoot-through, and Dead-time [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/h-bridge-dc-motor-control-complementary-pulse-width-modulation-pwm-shoot-through-dead-time-pwm/>
- (23) H-bridge DC Motor Control Using Complementary PWM, Shoot-through, and Dead-time [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/sensor/sensorbasics/photoelectric/info/>

Příloha A – Schémata obvodů

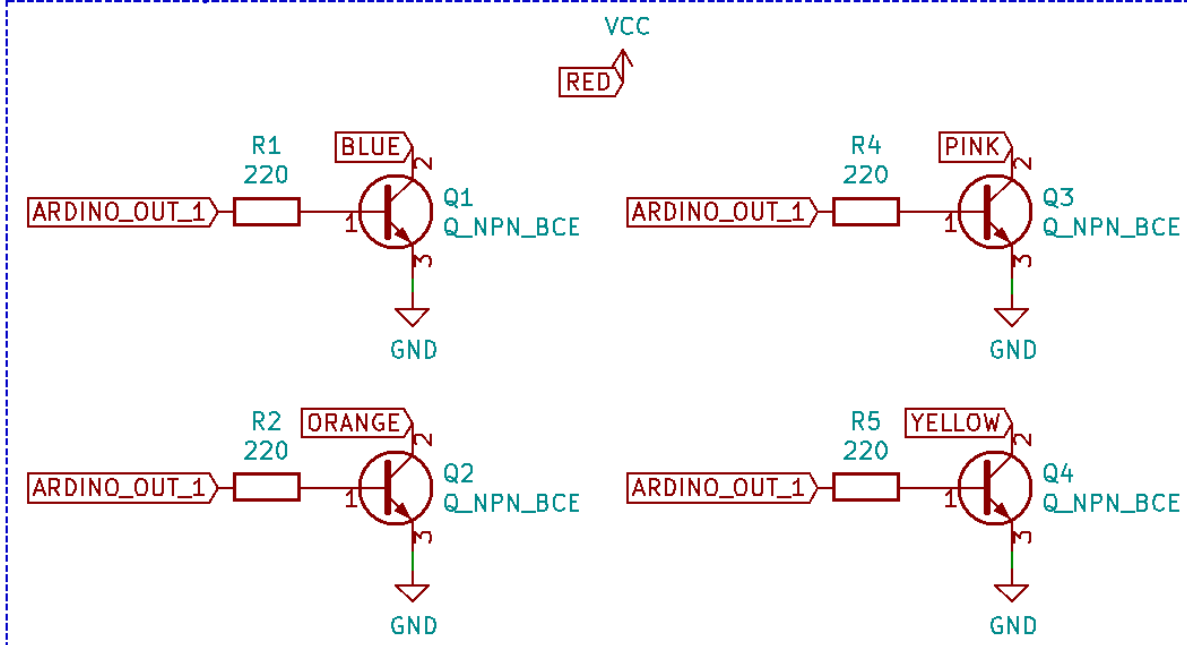
Transimpedanční zesilovač fotodiody



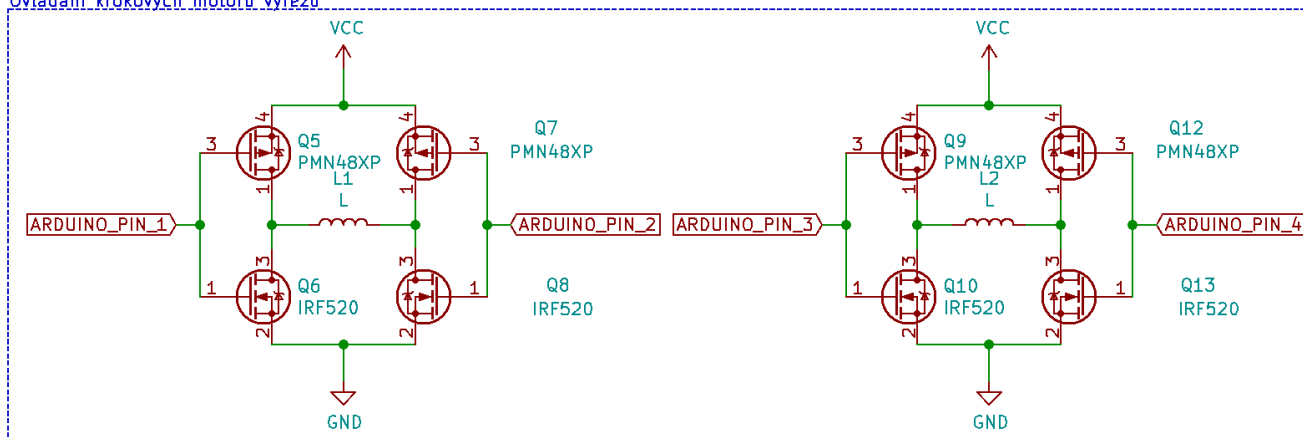
PWM obvod motoru



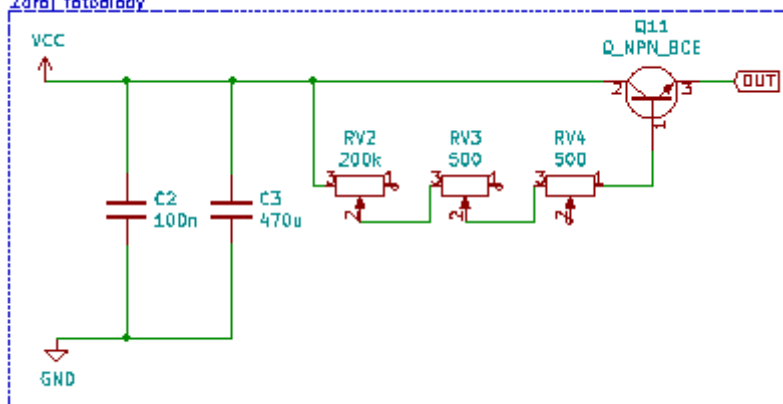
Ovládání krokových motorů skenu



Ovládání krokových motorů výřezu



Zdroj fotodiody



Příloha B – Firmware

Část skenu

```
#define ORANGE_LEFT 2
#define YELLOW_LEFT 4
#define PINK_LEFT 3
#define BLUE_LEFT 5

#define ORANGE_RIGHT 6
#define YELLOW_RIGHT 8
#define PINK_RIGHT 7
#define BLUE_RIGHT 10

#define UP 11
#define DOWN 12
#define SCAN 13

#define DELAY 3

bool cond = true;
bool scan_it = false;

int step_left = 0;
int step_right = 0;

//4 bits - O, Y, P, B
int states[8] = {0b0001,0b0011,0b0010,0b0110,0b0100,0b1100,0b1000,0b1001};

void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  pinMode(ORANGE_LEFT,OUTPUT);
  pinMode(YELLOW_LEFT,OUTPUT);
  pinMode(PINK_LEFT,OUTPUT);
  pinMode(BLUE_LEFT,OUTPUT);

  pinMode(ORANGE_RIGHT,OUTPUT);
  pinMode(YELLOW_RIGHT,OUTPUT);
  pinMode(PINK_RIGHT,OUTPUT);
  pinMode(BLUE_RIGHT,OUTPUT);

  pinMode(UP, INPUT);
  pinMode(DOWN, INPUT);
  pinMode(SCAN, INPUT);
  pinMode(A0, INPUT);
}

void setState()
{
  //ORANGE L
  if(states[step_left]&0b1000)
  {
```

```

    digitalWrite(ORANGE_LEFT, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(ORANGE_LEFT, LOW);
}

//ORANGE R
if(states[step_right]&0b1000)
{
    digitalWrite(ORANGE_RIGHT, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(ORANGE_RIGHT, LOW);
}

//YELLOW L
if(states[step_left]&0b0100)
{
    digitalWrite(YELLOW_LEFT, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(YELLOW_LEFT, LOW);
}

//YELLOW R
if(states[step_right]&0b0100)
{
    digitalWrite(YELLOW_RIGHT, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(YELLOW_RIGHT, LOW);
}

//PINK L
if(states[step_left]&0b0010)
{
    digitalWrite(PINK_LEFT, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(PINK_LEFT, LOW);
}

//PINK R
if(states[step_right]&0b0010)
{
    digitalWrite(PINK_RIGHT, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(PINK_RIGHT, LOW);
}

```



```

//BLUE L
if(states[step_left]&0b0001)
{
    digitalWrite(BLUE_LEFT, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(BLUE_LEFT, LOW);
}

//BLUE R
if(states[step_right]&0b0001)
{
    digitalWrite(BLUE_RIGHT, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(BLUE_RIGHT, LOW);
}
}

void stepCounterClockWise(bool left_motor)
{
    if(left_motor)
    {
        step_left=step_left+1;
        if(step_left>7)
        {
            step_left=0;
        }
    }
    else
    {
        step_right=step_right+1;
        if(step_right>7)
        {
            step_right=0;
        }
    }
    setState();

    delay(DELAY);
}

void stepClockWise(bool left_motor)
{
    if(left_motor)
    {
        step_left=step_left-1;
        if(step_left<0)
        {
            step_left=7;
        }
    }
    else
    {
        step_right=step_right-1;
        if(step_right<0)

```

```

    {
        step_right=7;
    }
}
setState();

delay(DELAY);
}

void step_up()
{
    stepCounterClockwise(true);
    stepClockwise(false);
}

void step_down()
{
    stepCounterClockwise(false);
    stepClockwise(true);
}

void key_scan()
{
    for(int x=0;x<=71;x++)
    {
        step_down();
        Serial.println(analogRead(A0));
    }
}

void loop() {
    if(digitalRead(UP))
    {
        step_up();
    }

    if(digitalRead(DOWN))
    {
        step_down();
    }

    while(digitalRead(SCAN))
    {
        step_down();
        Serial.println(analogRead(A0));
    }
}

```

Část výřezu

```

float y_values[] = {};

int key_length = 29;

bool cut_on = false;
bool testing = false;

```

```

//-----
// pin defs.
#define START 12
// X-motion motors
#define BLACK_PIN_X 2
#define GREEN_PIN_X 3
#define RED_PIN_X 4
#define BLUE_PIN_X 5

// Y-motion motor
#define BLACK_PIN_Y 6
#define GREEN_PIN_Y 7
#define RED_PIN_Y 8
#define BLUE_PIN_Y 10

#define OVERFLOW_STEP_FORWARD 3
#define OVERFLOW_STEP_BACKWARD 0

// delay in ms
#define DELAY_X 50
#define DELAY_Y_FORWARD 50
#define DELAY_Y_BACKWARD 25

//PWM
#define PWM_PIN 11
#define PWM_STAGE_DELAY 10000 //x * 0,0001s
#define PWM_STAGE_INCREMENT 10

// current step (as in step order below)
int current_step = 0;

// PWM related variables
bool pwm_ramp = false;
int pwm_on_time = 0;
int pwm_off_time = 100;

// order of powering the coils
// connected to mosfet h-bridge, meaning if HIGH, then N-channel MOSFET is connect
ed to GND and vice versa.
// inputs in order: BLACK | GREEN | RED | BLUE
int step_order [4][4] = {{LOW,HIGH,LOW,LOW},
                        {LOW,LOW,HIGH,LOW},
                        {HIGH,LOW,LOW,LOW},
                        {LOW,LOW,LOW,HIGH}};

// rotates motor by 1.8°
// thats 1/200 of full rotation | full rotation is 2mm
// rotates X-axis motors

void one_step_forward() {
    digitalWrite(BLACK_PIN_Y, step_order[current_step][0]);
    digitalWrite(GREEN_PIN_Y, step_order[current_step][1]);
    digitalWrite(RED_PIN_Y, step_order[current_step][2]);
    digitalWrite(BLUE_PIN_Y, step_order[current_step][3]);

    if(current_step!=OVERFLOW_STEP_FORWARD)

```

```

    {
        current_step += 1;
    }
    else
    {
        current_step = 0;
    }

    delay(DELAY_Y_FORWARD);
}

void one_step_backward() {
    digitalWrite(BLACK_PIN_Y, step_order[current_step][0]);
    digitalWrite(GREEN_PIN_Y, step_order[current_step][1]);
    digitalWrite(RED_PIN_Y, step_order[current_step][2]);
    digitalWrite(BLUE_PIN_Y, step_order[current_step][3]);

    if(current_step!=OVERFLOW_STEP_BACKWARD)
    {
        current_step -= 1;
    }
    else
    {
        current_step = 3;
    }

    delay(DELAY_Y_BACKWARD);
}

// rotates Y-axis motor

void one_step_right() {
    digitalWrite(BLACK_PIN_X, step_order[current_step][0]);
    digitalWrite(GREEN_PIN_X, step_order[current_step][1]);
    digitalWrite(RED_PIN_X, step_order[current_step][2]);
    digitalWrite(BLUE_PIN_X, step_order[current_step][3]);

    if(current_step!=OVERFLOW_STEP_FORWARD)
    {
        current_step += 1;
    }
    else
    {
        current_step = 0;
    }

    delay(DELAY_X);
}

void one_step_left() {
    digitalWrite(BLACK_PIN_X, step_order[current_step][0]);
    digitalWrite(GREEN_PIN_X, step_order[current_step][1]);
    digitalWrite(RED_PIN_X, step_order[current_step][2]);
    digitalWrite(BLUE_PIN_X, step_order[current_step][3]);

    if(current_step!=OVERFLOW_STEP_BACKWARD)
    {
        current_step -= 1;
    }
}

```

```

}
else
{
    current_step = 3;
}

delay(DELAY_X);
}

//bigger Y-steps (.1 mm)
void point_one_forward()
{
    for(int x = 0;x<=10;x++)
    {
        one_step_forward();
    }
}

void point_one_backward()
{
    for(int x = 0;x<=10;x++)
    {
        one_step_backward();
    }
}

//PWM functions

int set_duty_cycle(int percent_on)
{
    int duty_cycle_value = percent_on;
    if(duty_cycle_value>100)
    {
        duty_cycle_value = 100;
    }

    return duty_cycle_value;
}

//THE main cutting function

void new_cut()
{
    int x_step = 0;

    int last_step; //1-upward 2-downward 3-straight
    int next_step; //1-upward 2-downward 3-straight

    while(x_step!=122)
    {
        if(x_step<122)
        {
            //NEXT STEP
            if(y_values[x_step]<y_values[x_step+1])
            {
                next_step = 1;
            }
            else if(y_values[x_step]>y_values[x_step+1])

```

```

    {
      next_step = 2;
    }
    else if(y_values[x_step]==y_values[x_step+1])
    {
      next_step = 3;
    }
  }
  if(x_step>1)
  {
    //LAST STEP
    if(y_values[x_step-1]<y_values[x_step])
    {
      last_step = 1;
    }
    else if(y_values[x_step-1]>y_values[x_step])
    {
      last_step = 2;
    }
    else if(y_values[x_step]==y_values[x_step-1])
    {
      last_step = 3;
    }
  }

  //change side from tooth to side
  if((y_values[x_step]==y_values[x_step+4])&&(y_values[x_step]!=
=y_values[x_step+5]))
  {
    x_step=x_step+5;
  }
  //change side on V
  else if(last_step==2&&next_step==1)
  {
    for(int x=0;x<5;x++)
    {
      one_step_left();
    }
  }

  for(int y=0;y<=(y_values[x_step]/0.01);y++)
  {
    one_step_forward();
  }
  for(int y=0;y<=(y_values[x_step]/0.01);y++)
  {
    one_step_backward();
  }
  one_step_left();
  x_step=x_step+1;
}
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(BLACK_PIN_X,OUTPUT);

```

```

pinMode(GREEN_PIN_X,OUTPUT);
pinMode(RED_PIN_X,OUTPUT);
pinMode(BLUE_PIN_X,OUTPUT);

pinMode(BLACK_PIN_Y,OUTPUT);
pinMode(GREEN_PIN_Y,OUTPUT);
pinMode(RED_PIN_Y,OUTPUT);
pinMode(BLUE_PIN_Y,OUTPUT);

pinMode(PWM_PIN,OUTPUT);
pinMode(START, INPUT);
}

void loop() {
//ramp the PWM and then leave it at 100% duty cycle
if(pwm_ramp)
{
for(int x = 0;x<=100;x=x+PWM_STAGE_INCREMENT)
{
for(int y = 0;y<=PWM_STAGE_DELAY;y++)
{
digitalWrite(PWM_PIN, LOW);
delayMicroseconds(pwm_off_time);
digitalWrite(PWM_PIN, HIGH);
delayMicroseconds(pwm_on_time);
}
if(x!=100)
{
pwm_on_time = x;
pwm_off_time = 100-pwm_on_time;
}
else
{
digitalWrite(PWM_PIN,HIGH);
pwm_ramp = false;
}
}
}
//stepper movement code
if(digitalRead(START))
{
cut_on=true;
}

if(cut_on)
{
new_cut();
cut_on = false;
}
}
if (Serial.available())
{
incoming = Serial.read();
incoming = incoming - 48;
current_number = current_number + (incoming*(pow(10,digit)));
digit = digit - 1;
if(digit<0)

```

```
{
  values[current_value] = current_number+1;
  Serial.println(values[current_value]);
  current_number = 0;
  current_value = current_value+1;
  digit = 2;
}
}
```