



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MALÉ CNC ŘEZACÍ ZAŘÍZENÍ

SMALL CNC CUTTING MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Juraj Golej

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Petyovský, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Juraj Golej

ID: 195302

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Malé CNC řezací zařízení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout a realizovat malé CNC řezací zařízení.

1. Seznamte se s řešenými CNC řezacími zařízeními určenými pro řezání kartonu, které jsou dostupné na trhu.
2. Navrhněte vhodnou mechanickou konstrukci zařízení. Zvolte vhodné komponenty pohonů, snímačů polohy, elektroniky a mechaniky. Uvažte také požadavky na bezpečnost práce se zařízením.
3. Navrhněte nebo zvolte vhodnou řídicí jednotku s MCU, která by komunikovala s PC pomocí vhodného rozhraní a umožnila obsluhu ovládat a kontrolovat správnou funkci zařízení (displej, ovládací prvky).
4. Realizujte a oživte jednotlivé HW komponenty.
5. Navrhněte a vytvořte základní firmware pro MCU, který umožní manuální ovládání řezacího zařízení a bude sloužit k otestování mechanických parametrů CNC zařízení.
6. Rozšiřte firmware pro MCU, tak aby ovládal řezací zařízení pomocí načítaných dat a zobrazoval aktuální stav obráběcího procesu (např. požadavek na výměnu pracovního nástroje).
7. Zvolte vhodnou úlohu, která demonstruje funkci zařízení.
8. Zhodnoťte dosažené výsledky. Navrhněte další možná vylepšení SW i HW částí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Everett, H.,R.: Sensors for Mobile Robots theory and application, CRC Press 1995, ISBN

1568810482

[2] Virius, M.: Jazyky C a C++: kompletní průvodce. 2., aktualiz. vyd. Praha: Grada, 2011. ISBN 9788024739175.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 20.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Petr Petyovský, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom a realizáciou veľkoformátového 2D CNC zariadenia, určeného na rezanie tenkých mäkkých materiálov, najmä kartónu. V prvej kapitole sa venujem dostupným riešeniam na trhu, ich vlastnostiam a parametrom vrátane používaných nástrojov. V druhej kapitole vytváram samotný návrh mechanickej konštrukcie zariadenia. Dôraz je kladený na jednoduchú modulárnu štruktúru použitím hliníkových stavebnicových profilov V-slot. Tretia kapitola popisuje návrh riadiacej elektroniky, kde hlavnú úlohu zohráva radič krokového motoru s integrovaným obvodom TB6600HG a mikrokontrolér ARM Cortex-M7 od firmy Microchip, na ktorom beží hlavný riadiaci program. Výsledné zariadenie je schopné načítavať dáta z SD karty a vykonávať automatický proces rezania bez zložitej obsluhy.

Kľúčové slová

CNC, vlečný rezací nôž, SD karta, AVR, ARM, TB6600HG, V-slot

Abstract

This bachelor thesis deals with design and realization of a large format 2D CNC machine for cutting thin soft materials, especially the cardboard. In the first chapter I describe the available solutions on the market, their properties and parameters, including the tools. In the second chapter I create a design of the mechanical construction. The emphasis is on a simple modular structure using V-slot aluminum profiles. The third chapter describes the design of control electronics, where the main role has stepper motor driver with chip TB6600HG and microcontroller ARM Cortex-M7 from Microchip, where the main program is running. The final device can read data from SD card and perform an automatic cutting process without complicated user operations.

Keywords

CNC, drag knife, SD card, AVR, ARM, TB6600HG, V-slot

Bibliografická citácia:

GOLEJ, Juraj. *Malé CNC řezací zařízení*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119238>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Petr Petyovský.

Vyhlásenie

Vyhlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Malé CNC řezací zařízení“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce. Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. Díl 4 Trestného zákonníku Českej republiky č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa:

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Petrovi Petyovskému, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa:

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Dostupné riešenia CNC zariadení	2
2.1	Zariadenie Hopetool DCZ50	2
2.2	Zariadenie Cutter SPEEDY.....	3
2.3	Zariadenie Trotec Speedy400.....	4
2.4	Používané nástroje.....	5
2.4.1	Tangenciálny nôž	6
2.4.2	Oscilačný nôž	7
2.4.3	Ultrazvukový nôž	8
2.4.4	Vlečný nôž.....	8
2.5	<i>Zhrnutie kapitoly</i>	<i>10</i>
3	Návrh mechanickej konštrukcie	11
3.1	Lineárne vedenie	12
3.2	Realizácia posunu	14
3.3	Krokové motory pre pohyb nástroja.....	14
3.3.1	Výpočet momentu motora.....	15
3.4	Konštrukcia a montáž	21
3.5	Konštrukcia vlečného noža	26
3.6	<i>Zhrnutie kapitoly</i>	<i>27</i>
4	Návrh elektroniky.....	28
4.1	Ovládač krokového motora.....	29
4.1.1	Obvodové riešenie	32
4.1.2	DPS a konštrukčné usporiadanie	37
4.2	Prepojovacia doska	38
4.3	LCD displej.....	38
4.4	Senzory nástroja	39
4.5	Napájací zdroj	42
4.6	Manuálne riadenie.....	43
4.7	Riadiaca jednotka	43
4.8	Interface modul	45
4.9	Bezpečnosť zariadenia	46
4.10	<i>Zhrnutie kapitoly.....</i>	<i>46</i>
5	Firmware pre MCU	48
5.1	Vrstvová štruktúra pre firmware	48
5.1.1	Zobrazovanie textu a grafiky na LCD displej.....	50
5.1.2	Klávesnica pre manuálne riadenie	51
5.1.3	Implementácia súborového systému FAT32.....	51

5.1.4	Implementácia lineárneho pohybu	53
5.2	Hlavný program.....	57
5.3	<i>Zhrnutie kapitoly</i>	59
6	Realizácia a oživenie HW	60
6.1	Demonštrácia funkcie zariadenia.....	62
	Záver.....	63
	Literatúra	65
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek.....	70
	Zoznam príloh.....	71

Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Používané techniky spracovania kartónu	2
Obrázok 2: Zariadenie Hopetool DCZ50 [2]	3
Obrázok 3: Zariadenie Cutter SPEEDY [3]	4
Obrázok 4: Zariadenie Speedy400 [4]	5
Obrázok 5: Základné členenie používaných nástrojov	6
Obrázok 6: Tangenciálny nôž	7
Obrázok 7: Oscilačný nôž	7
Obrázok 8: Ultrazvukový nôž	8
Obrázok 9: Vlečný nôž	9
Obrázok 10: Rezanie pravého uhlu pomocou vlečného noža [9]	9
Obrázok 11: Zostava CNC rezačky	11
Obrázok 12: Prizmické vedenie (vľavo) a podoprená tyč [10]	12
Obrázok 13: Hliníkový systém OpenRail [12] (vľavo) a V-slot [11] (vpravo)	12
Obrázok 14: Rôzne rozmery V-slot profilov [14]	13
Obrázok 15: Základné usporiadanie remeňového pohonu	15
Obrázok 16: Základné usporiadanie skrutkového pohonu	18
Obrázok 17: Podstava CNC rezačky	22
Obrázok 18: T-matica, dištančný stĺpik obyčajný a excentrický [14]	22
Obrázok 19: Ľavá a pravá bočnica	23
Obrázok 20: Dve veľkosti vodiacich koliesok ($\Phi 15$ a $\Phi 24$)	23
Obrázok 21: Izometrický a bočný pohľad na jazdca	24
Obrázok 22: Energetická reťaz [21] a koncový spínač Omron V-152-1C25 [20]	24
Obrázok 23: Napínač remeňa (vľavo) a rohová spojka	25
Obrázok 24: Mosadzné matice do plastu	25
Obrázok 25: Dimetrický pohľad na zostavu nástroja	27
Obrázok 26: Predný pohľad na zostavu nástroja s otvoreným krytom	27
Obrázok 27: Základná bloková schéma riadiacej elektroniky	29
Obrázok 28: Vnútna štruktúra a základné obvodové zapojenie čipu TB6600HG30	
Obrázok 29: Typy 4-kanálových digitálnych izolátorov od firmy Analog Devices..	33
Obrázok 30: a) Schéma zapojenia komparátora b) náhradné schémy	36
Obrázok 31: Grafický LCD displej	39
Obrázok 32: Sériová komunikácia s AD prevodníkom HX711 [34]	40
Obrázok 33: Modul s analógovým prevodníkom HX711 [35]	41
Obrázok 34: Optický inkrementálny enkóder s diskom	41
Obrázok 35: Usporiadanie vývojovej dosky SAME70-XPLD [38]	45
Obrázok 36: Kompletná bloková schéma riadiacej elektroniky	47
Obrázok 37: Pohľad na zrealizované časti riadiacej elektroniky	47

Obrázok 38: Vrstvová štruktúra firmware.....	48
Obrázok 39: Základná programová štruktúra ovládača periférie.....	49
Obrázok 40: Základná programová štruktúra modulu aplikácie	50
Obrázok 41: Časový diagram sériovej komunikácie s radičom ST7920 [33]	50
Obrázok 42: Usporiadanie pinov SD karty [41]	52
Obrázok 43: Dátová štruktúra premenných pre jednu os.....	54
Obrázok 44: Približná bloková schéma frekvenčnej a polohovej regulácie v MCU. 54	
Obrázok 45: Všeobecný rýchlostný profil s konštantným zrýchlením.....	55
Obrázok 46: Základná bloková schéma riadiaceho programu	57
Obrázok 47: Prechodový diagram pre manuálny režim	57
Obrázok 48: Prechodový diagram pre výber programu	58
Obrázok 49: Prechodový diagram pre automatický režim	58
Obrázok 50: Pohľad na mechanickú časť CNC rezačky.....	61

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Základné parametre Hopetool DCZ50 [2]	3
Tabuľka 2: Základné parametre Cutter SPEEDY [3]	4
Tabuľka 3: Základné parametre Speedy400 [4]	5
Tabuľka 4: Požadované parametre CNC rezačky.....	11
Tabuľka 5: Parametre remeňa GT3 [15]	14
Tabuľka 6: Veličiny potrebné na výpočet momentu pre remeňový pohon.....	16
Tabuľka 7: Výsledný moment krokového motoru pre remeňový pohon.....	18
Tabuľka 8: Veličiny potrebné na výpočet momentu pre skrutkový pohon.....	19
Tabuľka 9: Výsledný moment krokového motoru pre skrutkový pohon.....	21
Tabuľka 10: Základné parametre vybraných ovládačov krokových motorov	30
Tabuľka 11: Nastavenie mikrokrokovania.....	31
Tabuľka 12: Základné parametre meniča LM2596-12 [32]	38
Tabuľka 13: Popis pamätí v LCD kontroléri ST7920.....	39
Tabuľka 14: Kódové označenie príkazov pre senzory nástroja	42
Tabuľka 15: Základné parametre zdroja S-400-36.....	43
Tabuľka 16: Vybrané parametre MCU ATSAME70Q21 [37]	44
Tabuľka 17: Požadované a aktuálne parametre CNC rezačky	60

1 ÚVOD

Táto práca sa zaoberá návrhom a následnou realizáciou CNC zariadenia, určeného na rezanie papiera, kartónu a podobných ľahko-rezateľných materiálov. Cieľom bakalárskej práce je navrhnuť, oživiť a rozbehať jednotlivé časti mechaniky, elektroniky a hlavného riadiaceho programu.

Požiadavka na zostrojenie takéhoto zariadenia vznikla od jedného živnostníka, ktorý pracuje so sklom (brúsenie a gravírovanie) a potreboval by jednoducho a rýchlo vyrobiť krabice pre svoje výrobky na následnú expedíciu. Vzhľadom na to, že sa jedná najmä o kusovú výrobu, je výroba krabíc u inej firmy veľmi nepraktická a časovo a finančne náročná.

Bakalárska práca je rozdelená do 7 kapitol vrátane úvodu a záveru. V druhej kapitole sa chcem venovať dostupnými riešeniami v oblasti CNC rezania, spolu s rôznymi typmi používaných nástrojov. Dôležité je určiť si potrebné základné vlastnosti budúceho zariadenia a vybrať vhodný pracovný nástroj.

V tretej kapitole je návrh konštrukcie, do ktorej je zaradený výber lineárneho vedenia, dimenzovanie krokových motorov, výber koncových spínačov, návrh rezacieho nástroja a ich celková montáž do jedného celku. Mechanická konštrukcia by mala spĺňať základné vlastnosti nadefinované z predošlej kapitoly vrátane požadovaných parametroch ako veľkosť pracovnej plochy, rýchlosť pohybu atď.

Štvrtá kapitola sa venuje návrhu riadiacej elektroniky. Konkrétne sa jedná o návrh manuálneho riadenia, pomocných elektronických obvodov a ovládača krokového motoru, ktorý by mal čo najjednoduchšie a najspoľahlivejšie riadiť rýchlosť krokových motorov. Ďalej bude popísaný výber mikrokontroléru, ktorý tvorí „mozog“ celého zariadenia a dokáže načítať riadiace dáta z externého média (SD karty), prípadne môže komunikovať s PC pomocou vhodnej zbernice. Samostatná kapitola je venovaná bezpečnosti práce s daným zariadením, ktorá je potrebná, keďže sa jedná o zariadenie pracujúce takmer bez zásahu obsluhy.

V piatej kapitole je rozpísaný firmware aplikovaný na vybranom MCU. V zadaní je táto kapitola rozdelená na dva body, základy a rozšírený firmware. Ako základný firmware by som chcel napísať interface k jednotlivým perifériám a postupne oživiť a vyladiť samostatné programové časti. Následne v hlavnom programe, ktorý beriem ako rozšírený firmware, by som tieto časti pospájal do jedného kompletného funkčného programového celku.

V šiestej kapitole a závere je rozpísané, ako som oživoval jednotlivé komponenty, na ktoré problémy som narazil a ako sa mi ich podarilo vyriešiť. Jednu časť záveru venujem možným vylepšeniam HW a SW časti, ktoré by som chcel v budúcnosti zrealizovať a rozšíriť tak funkčnosť rezačky.

2 DOSTUPNÉ RIEŠENIA CNC ZARIADENÍ

Na trhu existuje veľké množstvo CNC zariadení, ktoré sa používajú v mnohých výrobných sférach. Firmy, zaoberajúce sa výrobou kartónových krabíc a všeobecne výrobkov z kartónu, používajú zariadenia založené na dvoch metódach spracovania kartónu, vysekávanie a rezanie.



Obrázok 1: Používané techniky spracovania kartónu

Pri vysekávaní sa kartónová doska zo zásobníku presunie pod lis (alebo valec) na ktorom je forma, ktorá následne vyrazí vzor do dosky. Táto metóda sa používa pri veľkosériovej výrobe. [1]

Pri rezacej metóde sa kartónová doska pevne uloží na veľkoplošný stôl CNC zariadenia a následne sa spustí program, ktorý pomocou pohybu vhodného nástroja vyreže vzor do kartónu. U týchto zariadení je dôležité, aby mali čo najväčšiu pracovnú plochu a aby bol pohyb rezacieho nástroja čo najrýchlejší. Táto metóda sa používa pri malosériovej alebo kusovej výrobe. [2] Používané nástroje sú popísané v samostatnej kapitole. V tejto práci sa budem venovať práve rezacej metóde.

2.1 Zariadenie Hopetool DCZ50

Hopetool DCZ50 je veľkoformátové, 4-osé CNC zariadenie, určené na rezanie kartónu, drevotriesky, plastovej dosky, kože, tkaniny a podobných materiálov až do hrúbky 15 mm (záleží od tvrdosti daného materiálu). Do hlavy sa dajú upevniť až 4 nástroje, z ktorých sa najčastejšie používa oscilačný nôž, vlečný nôž, koliesko na ryhovanie a pero. Kvôli tejto vymoženosti nie je potreba prerušovať rezací cyklus, aby sme vymenili nástroj. Používa sa hlavne na malosériovú výrobu a výrobu rôznych vzoriek. Predáva sa v troch rozmeroch (v tabuľke 1 uvádzam parametre pre najväčší stroj) [2]

Tabuľka 1: Základné parametre Hopetool DCZ50 [2]

Rezacia plocha	2500 x 1600 mm
Max. rýchlosť	1000 mm/s
Presnosť	≤ 0,1 mm
Max. hrúbka materiálu	15 mm
Rozmery	3165 x 2545 x 1250 mm



Obrázok 2: Zariadenie Hopetool DCZ50 [2]

2.2 Zariadenie Cutter SPEEDY

Cutter SPEEDY je veľkoformátové univerzálne CNC zariadenie od českého výrobcu. Výhoda takéhoto zariadenia spočíva v tom, že má univerzálnu hlavu do ktorej môžeme uchytiť rôzne druhy nástrojov a tým úplne zmeniť funkciu daného zariadenia. K tomuto konkrétnemu modelu výrobca dodáva oscilačný, rotačný a vlečný nôž, vŕtačku, frézu a pero. Nevýhoda je, že môžeme pripevniť len jeden nástroj (je nutné pozastavenie programu a následne vymenenie nástroja).

Cutter SPEEDY dokáže rezať a frézovať veľa druhov mäkkých (nie kovových) materiálov, ako napr. textíliu, kožu, gumu, kartón, laminát, drevo, plasty, lepiace fólie atď. [3]

Tabuľka 2: Základné parametre Cutter SPEEDY [3]

Rezacia plocha	≤ 2210 x 3410 mm
Max. rýchlosť	1000 mm/s
Presnosť	0,01 mm
Max. hrúbka materiálu	96 mm
Rozmery	≤ 2700 x 3700 mm



Obrázok 3: Zariadenie Cutter SPEEDY [3]

2.3 Zariadenie Trotec Speedy400

Okrem kontaktného mechanického rezania sú v súčasnej dobe stále viac populárnejšie zariadenia, ktoré používajú laser. Jedným z takých zariadení je *Speedy400* od firmy *Trotec*.

Celé zariadenie má tvar hranatého boxu s odklápacím horným bezpečnostným krytom, pod ktorým sa nachádza stôl na uloženie spracovaného materiálu a pohybová aparátúra s laserom. Na výber sú rôzne veľkosti pracovnej plochy, ako aj dva druhy laseru, CO₂ a fiber (LED) laser, s ktorými sa môžu gravírovať a rezať rôzne druhy materiálov, ako napr. plexisklo, sklo, lamináty, papier, kožu, plasty drevo textílie apod. Výkon laseru sa pohybuje od 12 do 120 W pre CO₂ laser, a od 10 do 50 W pre fiber laser. Nevýhoda spočíva v opálených rezných hranách, čo je výrazné hlavne u drevených a papierových materiálov. [4]

Tabuľka 3: Základné parametre Speedy400 [4]

Rezacia plocha	1000 x 610 mm
Max. rýchlosť	3550 mm/s
Presnosť	0,01 mm
Max. hrúbka materiálu	296 mm
Rozmery	1408 x 960 x 1070 mm



Obrázok 4: Zariadenie Speedy400 [4]

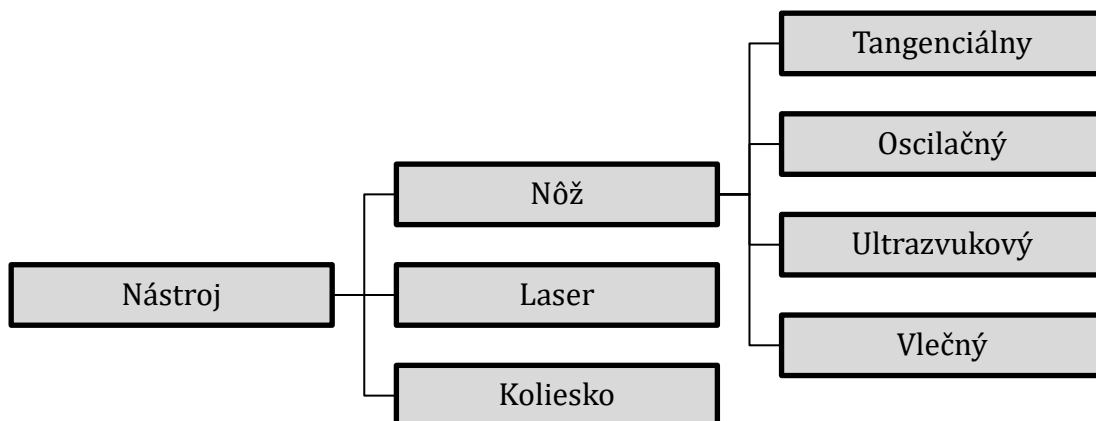
2.4 Používané nástroje

Nástroje, používané na opracovanie mäkkých tenkých materiálov (v mojom prípade kartónu), sa dajú rozdeliť na dve základné kategórie, rezacie a pomocné.

Rezacie nástroje sú určené na úplné prerezanie materiálu cez celú jeho hrúbku za účelom oddelenia požadovaného výrobku od základnej dosky. Používajú sa rôzne druhy nožíkov, ktoré sa môžu pohybovať voľne po ceste rezu (vlečné), alebo majú vlastný otáčací mechanizmus (tangenciálne), prípadne môžu mať aj dodatočný periodický pohyb vo zvislom smere (oscilačné, ultrazvukové). Okrem nožíkov sa používa aj stále viac populárnejší laser, ktorý si poradí aj s materiálmi, kde nemôžeme použiť nôž (drevo, plast).

Pomocné nástroje sa používajú na dodatočnú úpravu výrobku. V prípade kartónu a papiera sa často používa koliesko, ktoré pri dostatočnom prítlaku dokáže

spraviť rovnú ryhu (oslabenú časť), na ktorej sa dá jednoducho spraviť ohyb. Taktiež aj laser dokážeme využiť napr. na vypálenie firemného loga. Základné členenie nástrojov je na obrázku 5.



Obrázok 5: Základné členenie používaných nástrojov

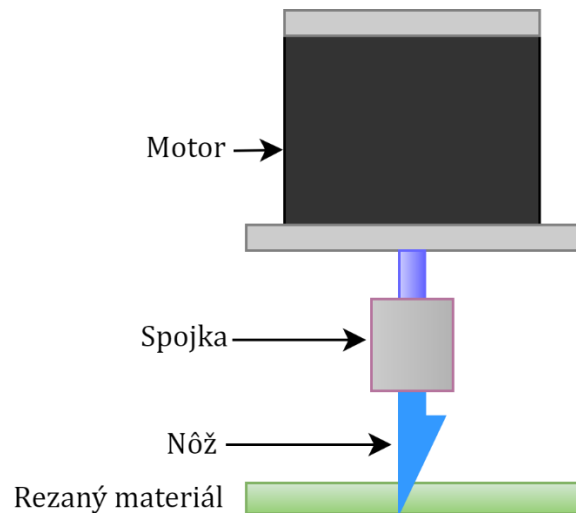
2.4.1 Tangenciálny nôž

Tangenciálny nôž má samostatný otočný mechanizmus (najčastejšie krokový motor), ktorý natáča čepel' noža tak, aby rezná hrana a smer rezu boli vždy v jednej rovine. Geometricky sa to dá vyjadriť tak, že čepel' noža tvorí dotyčnicu (tangentu) ku krivke rezu.

Pri rezaní sa nôž najskôr presunie na začiatok rezu, nastaví sa potrebný smer natočenia čepele, spustí sa do rezaného materiálu a začne rezať. Pri nespojitej trajektórii rezu (ostrá zmena rezu, pravé uhly) sa musí nôž najskôr vytiahnuť, natočiť sa a znova sa spustiť do materiálu. Zaberie to nejaký čas, ale je to potrebné z dôvodu, že materiál by sa otočením noža zdeformoval.

Výhoda tohto rezania spočíva hlavne v čistote rezu a nedeformovaní materiálu (v porovnaní s vlečným nožom). Nevýhoda je potreba mať ďalšiu riadiacu jednotku pre natáčanie, označovanú ako 4. osa.

Tangenciálny nôž sa používa na rezanie mäkkých materiálov, hrubých rádovo niekoľko milimetrov. [5]

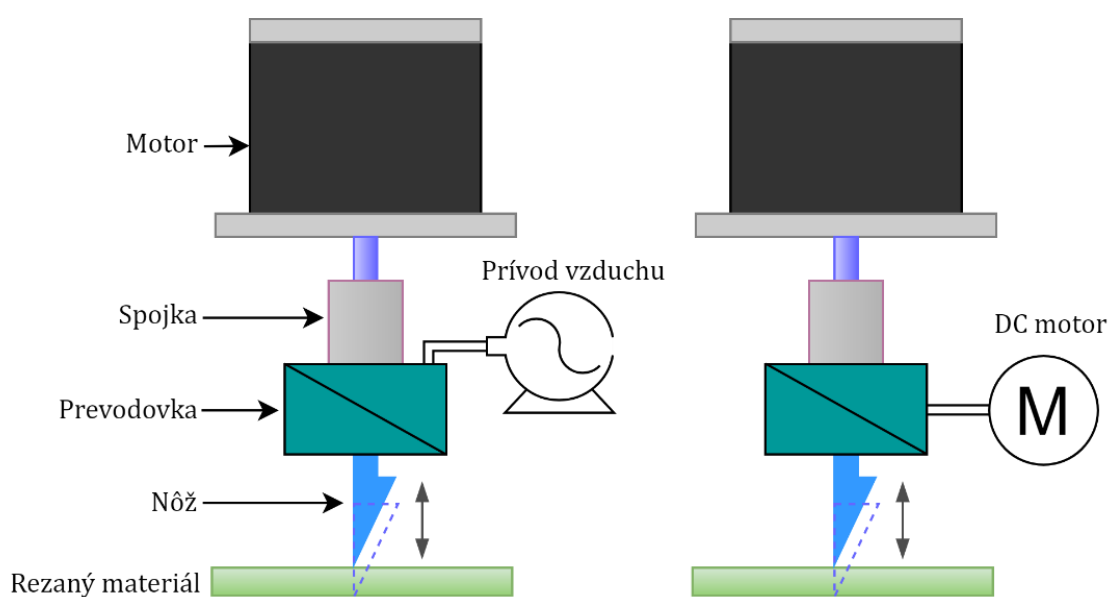


Obrázok 6: Tangenciálny nôž

2.4.2 Oscilačný nôž

Oscilačný nôž je podobný tangenciálnemu, ale počas rezu vykonáva periodický pohyb vo vertikálnom smere s frekvenciou cca. 150 Hz a s amplitúdou niekoľko mm (2 až 7 mm, závisí od výrobcu). Rapídne sa tak zníži odpor kladený rezaným materiálom. Oscilácie sa dajú vytvoriť dvoma spôsobmi. Prvý spôsob je zavedenie prúdu stlačeného vzduchu, ktorý sa cez vnútorný mechanizmus premení na lineárny oscilačný pohyb. U druhého spôsobu sa vibrácie vytvoria DC motorom, ktorého rotačný pohyb sa tiež zmení na lineárny oscilačný.

Oscilačný nôž dokáže rezať materiály s penovou štruktúrou (molitan, polystyrén), ktoré obyčajný tangenciálny nôž nedokázal rezať, a s hrúbkou až 100 mm (závisí na dĺžke čepele). [6]



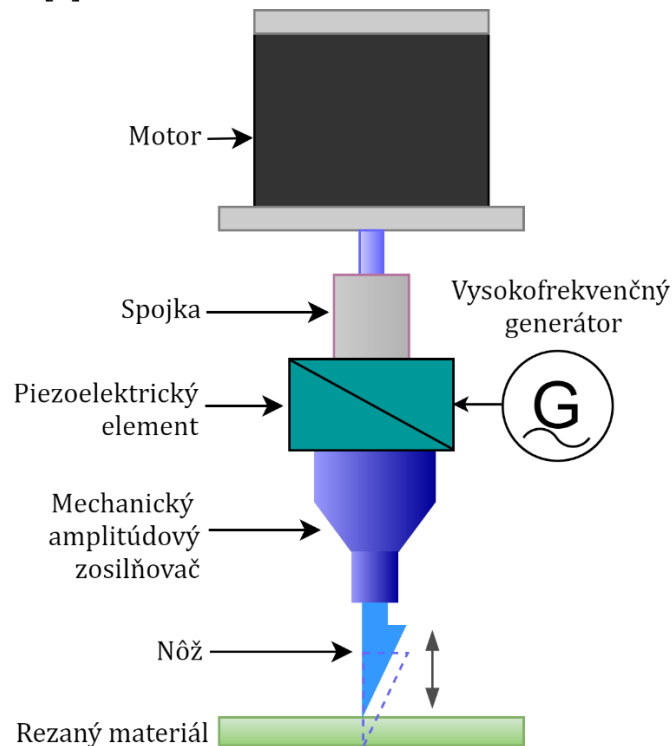
Obrázok 7: Oscilačný nôž

2.4.3 Ultrazvukový nôž

Ultrazvukový nôž funguje na princípe piezoelektrického javu. Vysokofrekvenčný generátor vytvorí elektrický signál s frekvenciou 20 až 40 kHz a napätím 800 až 1000 V. Signál sa následne pripojí na piezoelektrický element, ktorý ho premení na mechanické vibrácie. [7]

Pripojenie noža priamo k piezoelektrickému elementu by nemalo veľký zmysel. Amplitúda a energia takýchto kmitov nie je dostatočná na rozkmitanie noža. Preto je potrebné použiť amplitúdový zosilňovač (*sonotrode*), ktorý má špeciálny a rozmerovo presne daný kužeľový tvar a dokáže zvýšiť amplitúdu kmitov na dostatočnú úroveň. [8]

Podobne ako s oscilačným nožom, dokáže ultrazvukový nôž rezať penové a vláknové materiály takmer bez rezacieho odporu. Hrúbka materiálu je závislá na dĺžke čepele, ktorá musí mať špeciálny symetrický tvar, aby nedochádzalo k utlmeniu vibrácií. [7]



Obrázok 8: Ultrazvukový nôž

2.4.4 Vlečný nôž

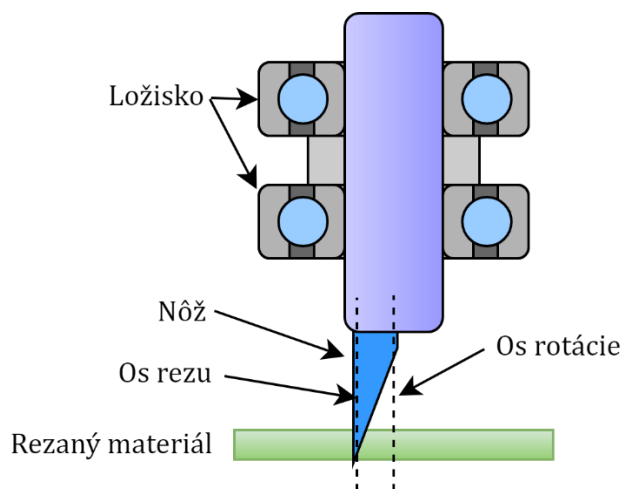
Vlečný nôž, na rozdiel od predchádzajúcich, nemá otáčanie riadené motorom. Jeho natočenie do správneho smeru zaisťuje samotný pohyb hlavy CNC zariadenia. Uloženie takéhoto noža musí byť úplne voľné, najlepšie v guľôčkových ložiskách.

Princíp činnosti je podobný, ako pri koliesku kancelárskej stoličky. Os rotácie a os rezu musia byť od seba vzdialené o D mm. Čepel' noža bude v tom prípade unášaná (vlečená, ťahaná) samotným pohybom po reznej trajektórii.

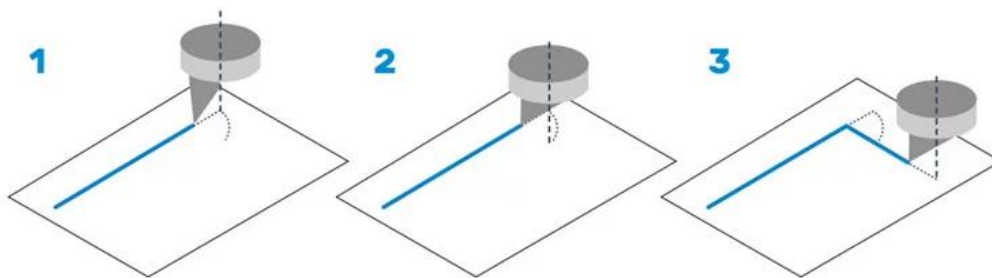
Problém nastáva pri prudkej zmene reznej trajektórie, napr. pravé uhly. V takýchto prípadoch sa musí nôž najskôr správne natočiť a to tak, že os rotácie spraví oblúk o polomere D a koncovom bode v smere pokračujúcej trajektórie. Špička noža sa tak otočí na mieste, avšak musí byť celý čas zapichnutá v rezanom materiáli (obr. 10). Podobné je to pri nespojitej trajektórii, kedy sa musí nôž zdvihnúť, premiestniť na iné miesto, zapichnúť a správne natočiť.

Vlečný nôž sa používa hlavne na rezanie tenkých nepenových materiálov, ako papier, kartón, samolepiaca fólia atď. Pri hrubších materiáloch vzniká výrazné deformovanie pri otáčaní na mieste, keďže nôž musí byť stále zapichnutý v materiáli.

Výhoda tohto typu noža je v jeho nenáročnosti na riadenie (nie je potreba ďalšia riadiaca jednotka na otáčanie), jednoduchej a ľahkej konštrukcii. Ako nevýhody môžeme uviesť nevhodnosť rezania hrubých materiálov, veľký odpor pri rezaní (bez oscilácií), zložitejšia trajektória a prvotné manuálne nastavenie natočenia. [9]



Obrázok 9: Vlečný nôž



Obrázok 10: Rezanie pravého uhlu pomocou vlečného noža [9]

2.5 Zhrnutie kapitoly

Všetky mnou vybrané CNC zariadenia, ale aj ostatné používané zariadenia pre rezanie tenkých materiálov sú profesionálne stroje schopné spoľahlivo a rýchlo rezať rôzne druhy materiálov. Zaobstaranie takejto mašiny by bolo ideálne, avšak cena, ktorá sa pohybuje v státisícoch korún je neprijateľná. Preto som sa rozhodol vytvoriť vlastnú mechanickú konštrukciu, ktorá sa nachádza v nasledujúcej kapitole. Táto konštrukcia musí spĺňať dve základné vlastnosti: veľkú pracovnú plochu a možnosť rýchleho pohybu nástroja.

Z viacerých druhov rezných nástrojov som si vybral vlečný nôž, keďže je nenáročný na riadenie a všetky popísané nevýhody v kapitole 2.4.4 môžem tolerovať. Okrem noža použijem aj ryhovacie koliesko a preto je potrebné vymyslieť spôsob rýchlej výmeny nástroja.

3 NÁVRH MECHANICKEJ KONŠTRUKCIE

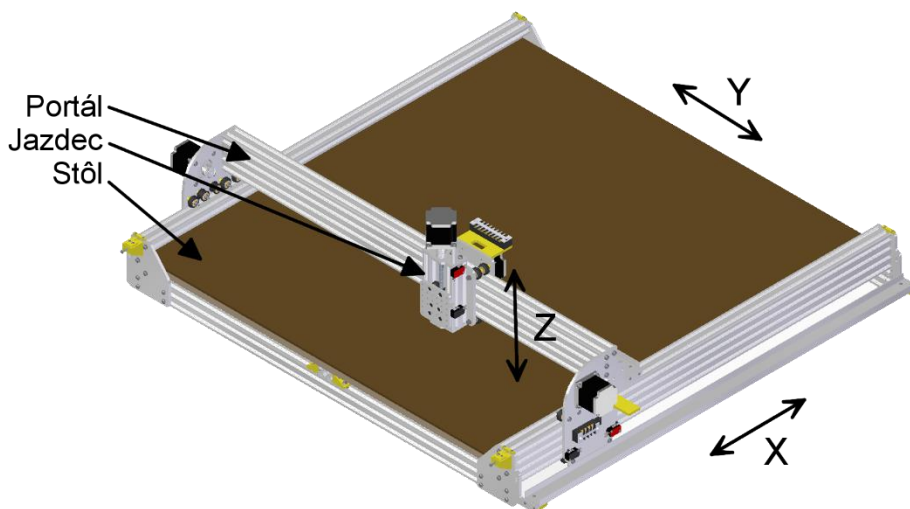
Súčasťou bakalárskej práce je návrh mechaniky úplne „od nuly“. Jednotlivé parametre som si tak mohol určiť podľa potreby.

CNC zariadenie bude primárne určené na rezanie dvojvrstvových vlnitých kartónových dosiek o hrúbke maximálne 3 mm. Keďže sa jedná o veľkoplošné rezanie, tak pracovná plocha by mala byť čo najväčšia. Taktiež by bolo dobré, aby pracovný nástroj nebol napevno uchytený k zariadeniu ale mal by sa dať jednoducho vymeniť. Ďalším dôležitým aspektom (dalo by sa povedať najdôležitejším) je cena. Nemá zmysel konštruovať niečo, čo sa dá kúpiť na európskom trhu lacnejšie. Požadované parametre sa nachádzajú v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 4: Požadované parametre CNC rezačky

Názov	Hodnota
Pracovná plocha	min. 600x600 mm
Výška zdvihu	min. 20 mm
Presnosť polohovania v ose x, y	< 0,5 mm
Presnosť polohovania v ose z	< 0,1 mm
Maximálna rýchlosť v ose x, y	400 mm/s
Rýchla výmena nástroja	áno
Základné bezpečnostné prvky	áno
Cena	max. 15 000 CZK (~600 €)

Celá mechanická konštrukcia je navrhnutá v študentskej verzii programu *SolidEdge ST9*. Výsledná dokumentácia sa nachádza v prílohe 7. Na obrázku 11 je pohľad na celkovú zostavu spolu so základnou terminológiou.



Obrázok 11: Zostava CNC rezačky

3.1 Lineárne vedenie

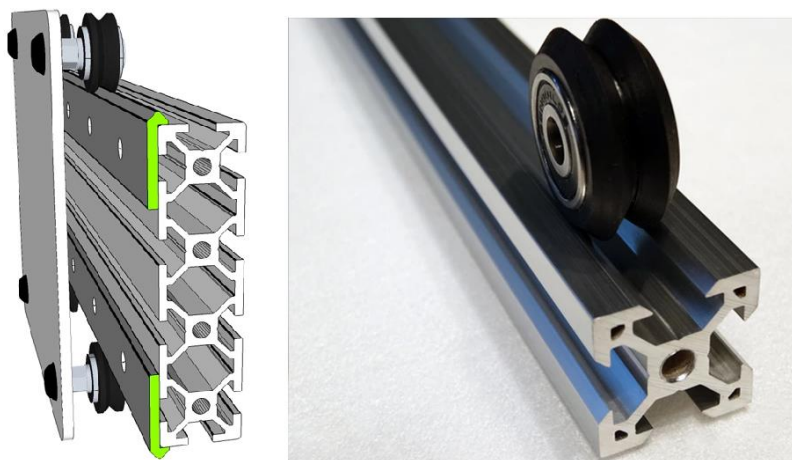
Na trhu sa nachádza viacero prevedení lineárneho vedenia, ktoré sa líšia presnosťou polohovania, menovitým zaťažením a cenou. Najpoužívanejšie sú prizmatické lineárne vedenia a kruhové vodiace tyče, ktoré môžu byť bez podpery alebo s podperou.



Obrázok 12: Prizmatické vedenie (vľavo) a podoprená tyč [10]

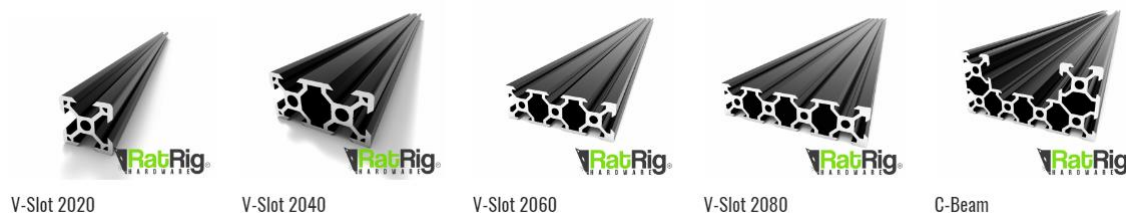
Pre moje CNC zariadenie som si ale zvolil odlišnú koncepciu lineárneho vedenia s názvom *V-slot* [11]. Jedná sa konkrétne o hliníkové extrahované profily, ktoré sa v hojnej miere využívajú ako stavebnicový systém na konštrukciu pracovných stolov, regálov apod. Jediný rozdiel je v drážke, ktorá nemá tvar písmena T, ale V (hrany sú skosené o 45°). V drážkach sa následne pohybujú plastové alebo oceľové kolieska s guľôčkovými ložiskami, ktorých hrany sú tiež zrazené o 45° aby presne zapadli. Šírka drážok je 6 mm.

Tento koncept sa prvý krát objavil na portáli www.kickstarter.com pod názvom *OpenRail* [12], z ktorého sa neskôr vyvinul *V-slot* (*OpenRail* používal ešte klasické profily s T-drážkami, na ktorých boli pripevnené kovové pláty so skosenou hranou). Na svete sú dve firmy, ktoré vyrábajú takéto profily, *OpenBuilds* [13] (USA, pôvodný zakladateľ z *kickstarter*) a *RatRig* [14] (Portugalsko).



Obrázok 13: Hliníkový systém OpenRail [12] (vľavo) a V-slot [11] (vpravo)

Profily sa vyrábajú v rôznych rozmeroch, ktoré sú násobkom 20 mm a môžu dosahovať dĺžku až 1500 mm. Z každej strany sú V-drážky s rozstupom tiež 20 mm. Profily sa spájajú pomocou T-matic, ktoré sa zasunú do drážky a so skrutkami sa priskrutkujú k ďalšiemu profilu, alebo k nejakej inej časti (rohy, spojovacie pláty). Na odrezaných koncoch je možné vyrezať závit a vytvoriť tak spojenie, kde nebolo možné použiť maticu. Všetky závity majú rozmer M5.



Obrázok 14: Rôzne rozmery V-slot profilov [14]

Výhody:

- súčasne je hotová už aj samotná konštrukcia zariadenia
- rôzne rozmery a dĺžky profilov
- každá strana profilu sa môže použiť ako lineárne vedenie
- normalizované časti
- kompatibilita spojovacieho materiálu s klasickými T-drážkami
- minimálny počet nástrojov potrebných na montáž
- jeden typ závit (M5)
- priaznivá cena

Nevýhody:

- menšia presnosť, ktorá môže byť spôsobená nepresnosťou pri výrobe profilov a koliesok
- menšie menovité zaťaženie oproti prizmatickým vedeniam a podopretým tyčiam, na väčšie zaťaženie je potrebné použiť viac vodiacich koliesok, čo má za následok predĺženie vodiaceho aparátu
- plastové kolieska sa môžu časom opotrebovať

Do vlastného návrhu som použil profily o rozmeroch 20x40 mm (V-slot 2040) a 40x80 mm (profil v tvare C, *C-beam*). Profil *C-beam* som použil zároveň ako lineárne vedenie na všetky osi. Podrobnejšie informácie sa nachádzajú v kapitole 3.4 (*Konštrukcia a montáž*).

3.2 Realizácia posunu

Na prevod rotačného pohybu motorov na lineárny sa v tomto type CNC zariadení využívajú najčastejšie posuvné skrutky (trapézové, guľôčkové) a remene. Vzhľadom na veľkú pracovnú plochu a rýchlosť posuvu som si na osu X a Y zvolil posuv pomocou remeňa typu *PowerGrip® GT3* [15], ktorý je priamo určený na aplikácie s rýchlou akceleráciou a častými zmenami pohybu. Polkruhový tvar zubu lepšie prenáša silu pri akcelerácií oproti trapézovému typu. Jeho parametre sú v tab. 5. Na motoroch sú uchytené hliníkové remenice s priemerom 18 mm pre remeň.

Na osu Z použijem trapézovú skrutku so stúpaním 8 mm (4-závit s rozstupom 2 mm), ktorá má jemnejšie a presnejšie polohovanie oproti remeňom. Po nej sa bude pohybovať plastová matica s vymedzením vôle.

Tabuľka 5: Parametre remeňa GT3 [15]

Názov	Hodnota
Materiál/výstuha	guma/sklenené vlákna
Stúpanie	3 mm
Šírka	6 mm
Hrúbka (celková)	2,41 mm
Výška zubu	1,12 mm
Tvar zubu	polkruh

3.3 Krokové motory pre pohyb nástroja

Pre pohon všetkých osí budú použité hybridné krokové motory rady Nema 23. Statický krútiaci moment sa pri tomto type motoru pohybuje od 0,5 Nm do 3 Nm, čo je dostatočný výkonový rozsah pre môj návrh CNC rezačky.

Krokové motory boli zvolené z dôvodu relatívne jednoduchého ovládania (pri správnom nadimenzovaní nie je potreba spätná väzba snímania polohy) a nízkej ceny. Treba ale počítať s viacerými problémami, ktoré sa môžu objaviť pri prevádzke tohto typu motorov. Jedným z nich je strata kroku, ktorá vzniká pri prekročení maximálneho zaťažovacieho momentu motora (rýchla akcelerácia, zle nadimenzovaný motor).

Ďalší problém sú vlastné rezonančné frekvencie motora, ktoré sú najvýraznejšie pri nízkych rýchlostiach. Nastáva prudký pokles momentu a strata kroku, ktorá môže viesť až k rozsynchronizovaniu pohybu (motor trhá, netočí sa). Tento problém sa dá relatívne dobre eliminovať mikrokrokováním alebo pridaním momentu zotrvačnosti, ktorý posunie rezonančnú frekvenciu na čo najnižšie hodnoty, ale za cenu zvýšenia požadovaného momentu.

Posledným problémom je teplota motora. Teplo je generované parazitným odporom vinutia a je preto závislé na pretekajúcom prúde. Riešenie sa ale naskytlo samo, keďže motory budú umiestnené na hliníkových doskách, ktoré tvoria konštrukciu zariadenia a budú tak zároveň plniť aj funkciu chladiča.

Do návrhu boli zvažované aj servo motory. Vzhľadom na vysokú cenu, ktorá by prekročila rozpočet, som ich nevybral.

3.3.1 Výpočet momentu motora

V zariadení budú použité dva druhy pohonu, remeňový a skrutkový. Potrebný moment pre každý typ sa počíta rozdielne, ale základnú momentovú rovnicu (3.1) majú rovnakú. [16]

$$M_m = (M_s + M_D) \cdot S_f \quad [\text{Nm}] \quad (3.1)$$

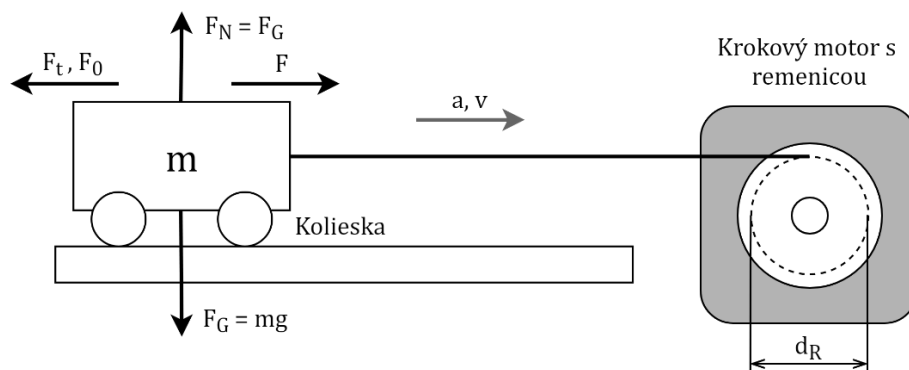
Minimálny krútiaci moment krokového motora vypočítam ako súčet statického momentu M_s [Nm] a dynamického momentu M_D [Nm], vynásobený bezrozmerným bezpečnostným faktorom S_f [-].

Statický moment je potrebný na prekonanie trecích síl medzi kolieskami a koľajnicou resp. medzi skrutkou a maticou. K nemu je započítaný aj odpor noža pri rezaní. Dynamickým momentom sa rozbieha hmota s určitým momentom zotrvačnosti. Jeho veľkosť je závislá na požadovanom maximálnom zrýchlení.

Keďže nedokážem číselne vypočítať všetky silové pôsobenia v sústave (trecia sila a viskózne trenie v ložiskách, nerovnomernosť rozloženia hmotnosti atď.), tak sa výsledný moment násobí bezpečnostným faktorom S_f , ktorého veľkosť je väčšia ako 1.

V nasledujúcom texte je popísaný výpočet pre oba typy pohonu. V hlavnom texte sú len uvedené a odvodené všeobecné rovnice. Konkrétny výpočet s dosadenými hodnotami sa nachádza v prílohe 2.

3.3.1.1 Remeňový pohon



Obrázok 15: Základné usporiadanie remeňového pohonu

Tabuľka 6: Veličiny potrebné na výpočet momentu pre remeňový pohon

Veličina	Hodnota		Jednotka	Popis veličiny
	Osa X	Osa Y		
a	2		m.s ⁻²	maximálne lineárne zrýchlenie
m	12	5	kg	prenášaná hmotnosť
ξ	0,002		m	rameno valivého odporu [17]
m _R	0,012		kg	hmotnosť remenice
d ₁	22		mm	vonkajší priemer remenice
d ₂	6,35		mm	vnútorný priemer remenice
d _R	18		mm	priemer remenice pre remeň
d _K	24		mm	priemer kolieska lin. vedenia
J _m	3,0E-05		kg.m ²	moment zotrvačnosti motora [18]
F ₀	20		N	odporová sila noža
N _M	2	1	-	počet motorov na osu
S _f	2		-	bezpečnostný faktor

Veličina m je v prípade osy X hmotnosť celého portálu aj s jazdcom, u osy Y je to len hmotnosť jazdca. Do m sa ráta aj predpokladaná hmotnosť motorov a nástroja. Približné hodnoty boli zistené z výsledného modelu v programe *SolidEdge ST9*. Odporová sila noža F_0 bola zistená experimentálne pre kartón s hrúbkou 3 mm.

Pri konštantnej rýchlosti v pôsobia na hmotnosť dve sily, valivá trecia sila F_t a odporová sila kladená pri rezaní F_0 . Trecia sila pôsobiaca na jedno koliesko je

$$F_{tk} = \xi \cdot \frac{F_N}{k} \cdot \frac{1}{r_K} = \xi \cdot \frac{m \cdot g}{k} \cdot \frac{2}{d_K} \quad [\text{N}] \quad (3.2)$$

kde k [-] je počet koliesok pohybujúcich sa v drážkach *V-slot* profilu a F_N [N] je normálová sila. Celková trecia sila je k -násobok F_{tk} , takže počet koliesok nemá na ňu vplyv.

$$F_t = k \cdot F_{tk} = \xi \cdot m \cdot g \cdot \frac{2}{d_K} \quad [\text{N}] \quad (3.3)$$

Statický moment pôsobiaci na jeden motor potom bude

$$M_S = \frac{1}{N_m} \cdot (F_t + F_0) \cdot r_R = \frac{1}{N_m} \cdot (F_t + F_0) \cdot \frac{d_R}{2} \quad [\text{Nm}] \quad (3.4)$$

Pre určenie dynamického momentu je potrebné vedieť momenty zotrvačnosti celej sústavy prepočítané na hriadel' motora. Moment zotrvačnosti motora J_m zistím z katalógového listu. Avšak pri konkrétnom výpočte ešte nepoznám motor, takže použijem určitú predpokladanú hodnotu, ktorá sa aspoň rádoovo pohybuje v danej oblasti. Po výbere motora ju určím presne a skontrolujem výpočet. Moment zotrvačnosti remenice je

$$J_R = \frac{1}{8} \cdot m_R \cdot (d_1^2 + d_2^2) \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (3.5)$$

Moment zotrvačnosti záťaže je

$$J_Z = m \cdot r_R^2 = m \cdot \frac{d_R^2}{4} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (3.6)$$

Celkový moment zotrvačnosti vznikne ako ich súčet, ale J_Z je ešte podelený počtom motorov na jednej osi.

$$J = J_m + J_R + \frac{J_Z}{N_m} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (3.7)$$

Dynamický moment vypočítam ako súčin celkového momentu zotrvačnosti J a uhlového zrýchlenia ε [rad/s].

$$M_D = J \cdot \varepsilon = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{J}{r_R} \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{2 \cdot J}{d_R} \cdot a(t) \quad [\text{Nm}] \quad (3.8)$$

M_S a M_D dosadím do (3.1) a vypočítam celkový krútiaci moment motora. Výsledné hodnoty sa nachádzajú tabuľke 7.

Funkcia $a(t)$ z (3.8) definuje zrýchlenie. Najjednoduchší typ je konštantné zrýchlenie, na ktoré dimenzujem krokový motor. Existujú aj zložitejšie funkcie $a(t)$, ktoré dokážu efektívnejšie pracovať s momentom krokového motora a môžu dosahovať väčšie rýchlosti. Ja budem pracovať s konštantným zrýchlením.

Ako vhodného kandidáta na osu X aj Y som si vybral krokový motor 23HS22-3008D od firmy OMC-StepperOnline [18]. Tento typ motora má 8 vývodov pre zapojenie do unipolárneho, ako aj bipolárneho režimu. Ja budem využívať bipolárne sériové zapojenie. Motor má dobrý pomer cena-výkon a dvojitú hriadel' pre možnosť pripojenia inkrementálneho polohového snímača.

V prílohe 1 sa nachádza momentová charakteristika vybraného motoru spolu s vypočítanými momentovými charakteristikami pre osu X a Y. Maximálne otáčky vypočítam z maximálnej rýchlosti zadanej v tabuľke 4.

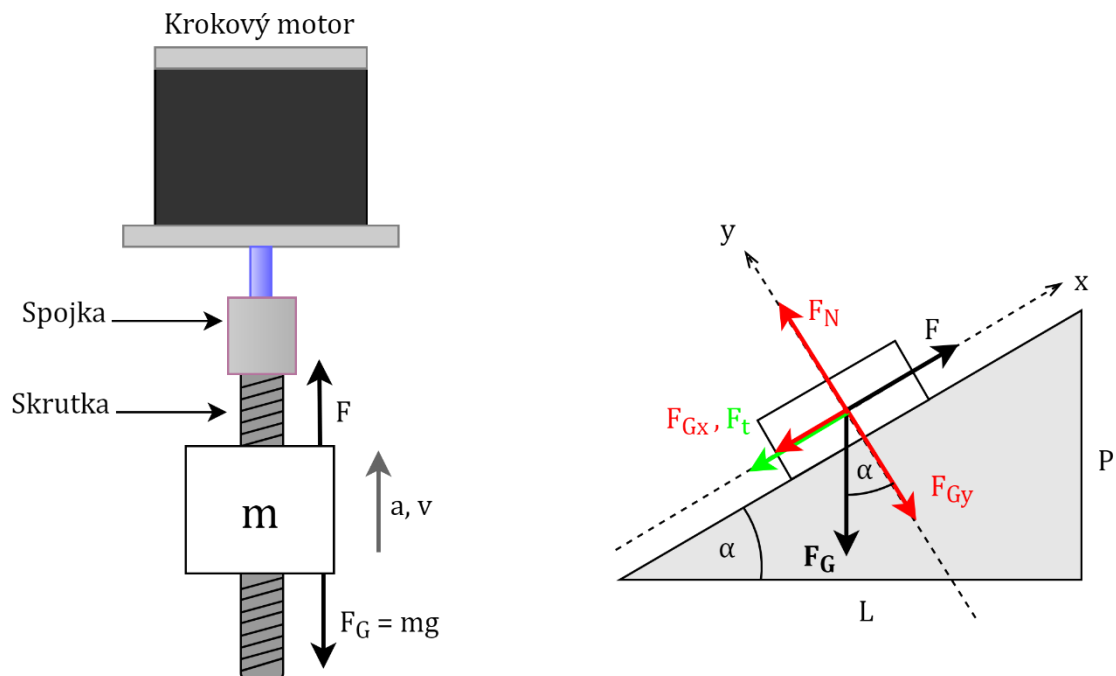
$$n_{max} = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega_{max} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{2 \cdot v_{max}}{d_R} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{2 \cdot 0,4}{0,018} = 424 \quad [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3.9)$$

Vypočítané momentové charakteristiky **nepretínajú** momentovú charakteristiku motoru v bipolárnom sériovom zapojení v rozsahu $n \in \langle 0, n_{max} \rangle$, tzn. že tento motor je možné použiť na pohon v osi X a Y.

Tabuľka 7: Výsledný moment krokového motoru pre remeňový pohon

Veličina	Hodnota		Jednotka	Popis veličiny
	Osa X	Osa Y		
M_S	0,18	0,25	Nm	statický moment
M_D	0,11	0,10		dynamický moment
M_m	0,59	0,70		celkový moment jedného motoru

3.3.1.2 Skrutkový pohon



Obrázok 16: Základné usporiadanie skrutkového pohonu

Tabuľka 8: Veličiny potrebné na výpočet momentu pre skrutkový pohon

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis veličiny
	Osa Z		
a	5	m.s ⁻²	maximálne lineárne zrýchlenie
m	2	kg	prenášaná hmotnosť
m _S	0,015	kg	hmotnosť spojky
m _T	0,062	kg	hmotnosť trapézovej skrutky
d ₁	19	mm	vonkajší priemer spojky
d ₂	7	mm	vnútorný priemer spojky
d _{T1}	8	mm	veľký priemer trapézového závit
d _{T2}	7	mm	stredný priemer trapézového závit
P	8	mm	stúpanie závit
μ	0,45	-	súčiniteľ dynamického trenia matica-závit [19]
η	0,65	-	efektivita prevodu [16]
J _m	3,0E-05	kg.m ²	moment zotrvačnosti motora [18]
S _f	2	-	bezpečnostný faktor

Jednotlivé rozmery a hmotnosti sú zistené z modelov v programe *SolidEdge*, prípadne zo strojnícckych tabuliek [19]. Odporovú silu noža vo vertikálnom smere som zanedbal, pretože je kompenzovaná gravitačnou silou pôsobiaceou na hmotu celého pohybového aparátu osi Z.

Na obrázku 16 je zjednodušený náčrt vertikálneho pohonu. Predpokladám prípad, kedy motor vyťahuje hmotnosť m nahor. Vtedy musí vynaložiť najväčší výkon, aby prekonal gravitačnú silu. Hmotnosť m sa pohybuje po šikmej rovine, ktorú predstavuje jeden rozvinutý závit (obrázok 16 vpravo). Rozmer L [mm] je obvod strednej kružnice trapézového závit ($L = \pi \cdot d_{T2}$). Uhol stúpania α je:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{P}{\pi \cdot d_{T2}}\right) \quad [^\circ] \quad (3.10)$$

Gravitačnú silu rozložím do zložiek:

$$F_{Gx} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}] \quad (3.11)$$

$$F_{Gy} = F_N = m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad [\text{N}] \quad (3.12)$$

Výsledný súčet síl pôsobiacich v smere šikmej roviny:

$$F = F_{Gx} + F_t = F_{Gx} + \mu \cdot F_N = m \cdot g \cdot (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha) \quad [\text{N}] \quad (3.13)$$

Statický moment:

$$M_S = F \cdot \frac{P}{2\pi} \cdot \frac{1}{\eta} \quad [\text{Nm}] \quad (3.14)$$

Matica disponuje nastavením vymedzenia vôle, ktoré by zvýšilo celkovú silu F o „preload force“. Keďže sa ale jedná o vertikálny smer, kedy je vôľa medzi maticou a skrutkou eliminovaná gravitačnou silou, tak táto možnosť nebude využitá.

Nasleduje výpočet dynamického momentu, ktorý je podobný ako pri remeňovom pohone. Moment zotrvačnosti spojky je

$$J_S = \frac{1}{8} \cdot m_S \cdot (d_1^2 + d_2^2) \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (3.15)$$

Moment zotrvačnosti trapézovej skrutky je

$$J_T = \frac{1}{8} \cdot m_T \cdot d_{T1}^2 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (3.16)$$

Moment zotrvačnosti záťaže je

$$J_Z = m \cdot \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2 \quad (3.17)$$

Dynamický moment je

$$M_D = (J_m + J_S + J_T + J_Z) \cdot \varepsilon = (J_m + J_S + J_T + J_Z) \cdot \frac{2\pi}{P} \cdot a(t) \quad [\text{Nm}] \quad (3.18)$$

M_S a M_D dosadím do (3.1) a vypočítam celkový krútiaci moment motora. Výsledné hodnoty sa nachádzajú v tabuľke 9.

Celkový požadovaný krútiaci moment motora je relatívne nízky, čo ma viedlo k myšlienke použiť nižšiu modelovú radu krokových motorov *Nema 17*. Avšak momentové charakteristiky viacerých dostupných typov motorov neboli dostatočné. U tých silnejších (statický krútiaci moment $>0,5 \text{ Nm}$) bola zase cena porovnateľná s *Nema 23*. Preto som sa rozhodol použiť rovnaký motor, ako na osu X a Y, *23HS22-3008D*. Jeho cena bola ešte nižšia, ako niektoré slabšie ponúkané modely motorov *Nema 23*. Toto predimenzovanie mi zároveň umožňuje použiť rýchlejšiu akceleráciu a získať tak rýchlostnú krivku podobnú obdĺžniku.

Krivka požadovaného momentu motora sa nachádza opäť v prílohe 1. Maximálnu rýchlosť som si v tomto prípade nezadal, ale ako je vidieť, tak krivky sa nepretínajú na celom rýchlostnom rozsahu.

Tabuľka 9: Výsledný moment krokového motora pre skrutkový pohon

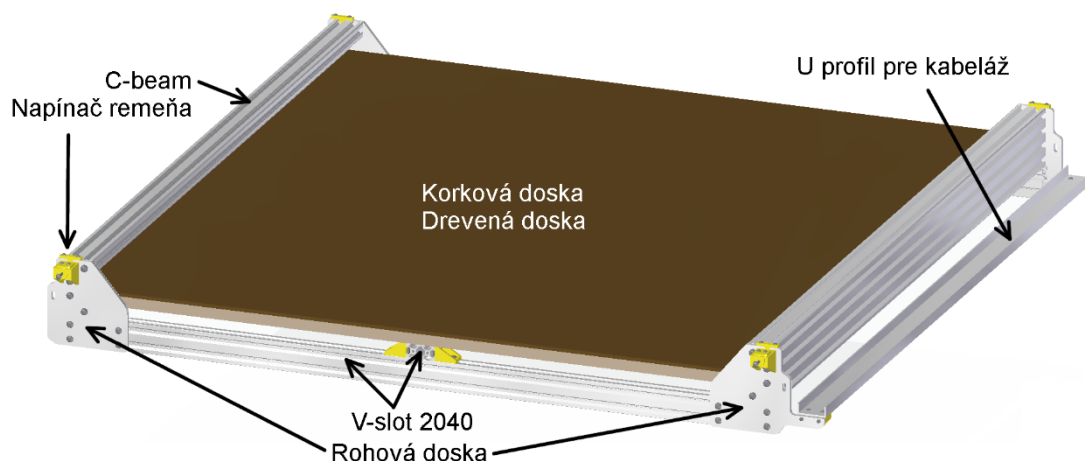
Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis veličiny
	Osa Z		
M_S	0,03	Nm	statický moment
M_D	0,14		dynamický moment
M_m	0,33		celkový moment motora

3.4 Konštrukcia a montáž

Celý návrh je spravený stavebnicovým štýlom, aby som čo najviac predišiel použitiu sústruhu a frézy pre určité jedinečné časti. Jednotlivé komponenty môžem rozdeliť do štyroch kategórií:

1. **Profily V-slot:** tvoria hlavnú nosnú konštrukciu a zároveň slúžia ako lineárne vedenie. K nim prislúchajú aj vodiace kolieska dvoch priemerov, $\Phi 15$ (osa Z) a $\Phi 24$ mm.
2. **Duralové dosky:** sú vypálené laserom do duralového plechu s hrúbkou 6 mm. Zároveň sú to jediné komponenty, ktoré som musel dať vyrobiť firme. V konštrukcii slúžia ako rôzne podporné prvky (dosky na uchytenie motorov, koliesok atď.). Pôvodne som uvažoval o plexiskle s hrúbkou 8 mm, ku ktorému by som mal jednoduchý prístup, avšak mechanické vlastnosti, hlavne krehkosť a tepelná odolnosť by bola nedostačujúca. Duralové dosky majú tú výhodu, že aj pri hrúbke 6 mm sú veľmi pevné, ľahké, dajú sa do nich rezať závity a veľmi dobre odvádzajú teplo z pripevnených motorov.
3. **3D tlač:** v súčasnej dobe je 3D tlač stále viac populárnejšia vzhľadom na relatívne nízku cenu tlačiarňí. Preto som niektoré komponenty, ktoré majú zložitejší tvar ale nevyžadujú veľkú presnosť rozmerov, vytlačil na 3D tlačiarňi z materiálu PLA.
4. **Spojovací materiál:** dôležitým aspektom je použitie čo najmenej druhov spojovacieho materiálu. Použité skrutky sú typu ISO 7380 (pologul'atá hlava), DIN 912 (valcová hlava) a špeciálne skrutky s nízkou hlavou s rozmermi M5, M4 a M3. Matice sú len dva druhy, samoistiaca matica M5 s nylonovým krúžkom a T-matica do drážok V-slot profilov (obr. 18). Podložky sú tiež len dva druhy a to klasická plochá podložka a pružná podložka pre skrutky s rozmerom M5.

Podstava CNC rezačky je poskladaná z dvoch *C-beam* profilov o dĺžke 1000 mm, ktorých konce sú položené na dvoch profiloch *V-slot 2040* tiež dĺžky 1000 mm. Spolu tvoria základ štvorcovej konštrukcie. Profily sú spojené pomocou duralových dosiek. Do výrezov v *C-beam* je vložená drevená doska s hrúbkou 18 mm, ktorá je ešte podoprená profilom 2040, aby nedochádzalo k jej prehýbaniu. Počas rezania sa špička noža pohybuje pod rezaným materiálom. Aby nedošlo k jeho poškodeniu, tak na drevenej doske je ešte pripevnená korková doska s hrúbkou 4 mm (obr. 17).



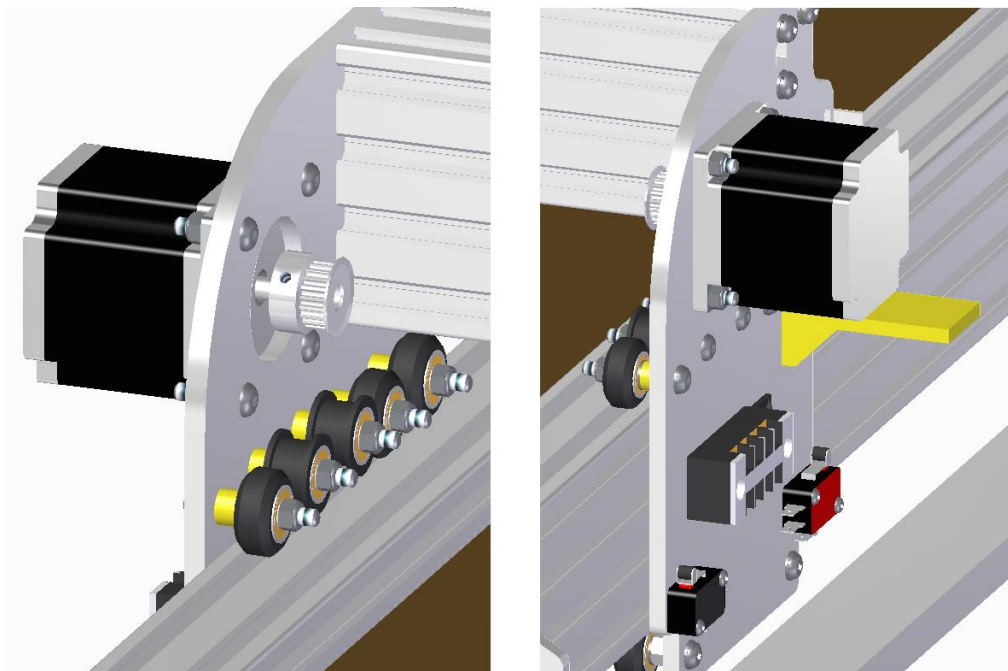
Obrázok 17: Podstava CNC rezačky

Bočnice tvoria základ portálu. Sú na nich uchytené vodiace kolieska a motor. (obr. 19). V tomto návrhu sa motory pohybujú spolu s portálom, resp. jazdcom a remeň je fixovaný, nepohybuje sa. V hornej drážke sa pohybujú tri a v dolnej dve kolieska. Tie sú od bočnice vzdialené o výšku dištančného krúžku a podložky (6+1 mm). Zaisť sa tak dostatočná medzera 2 mm medzi profilom a duralovou doskou. Spodné kolieska majú špeciálny excentrický dištančný stĺpik, ktorým dokážem nastaviť prítlak a vôľu medzi kolieskami a vodiacou drážkou.



Obrázok 18: T-matica, dištančný stĺpik obyčajný a excentrický [14]

Medzi bočnicami je umiestnený ďalší *C-beam* profil, po ktorom sa pohybuje jazdec. Na pravej bočnici sú umiestnené koncové spínače. Kvôli jednoduchosti a spoľahlivosti som vybral miniatúrny mechanický spínač *V-152-1C25* od firmy *Omron* [20] (obr. 21b). Má tri vývody, jeden spoločný a dva prepínacie (SPDT) Použitý je na všetkých osiach.

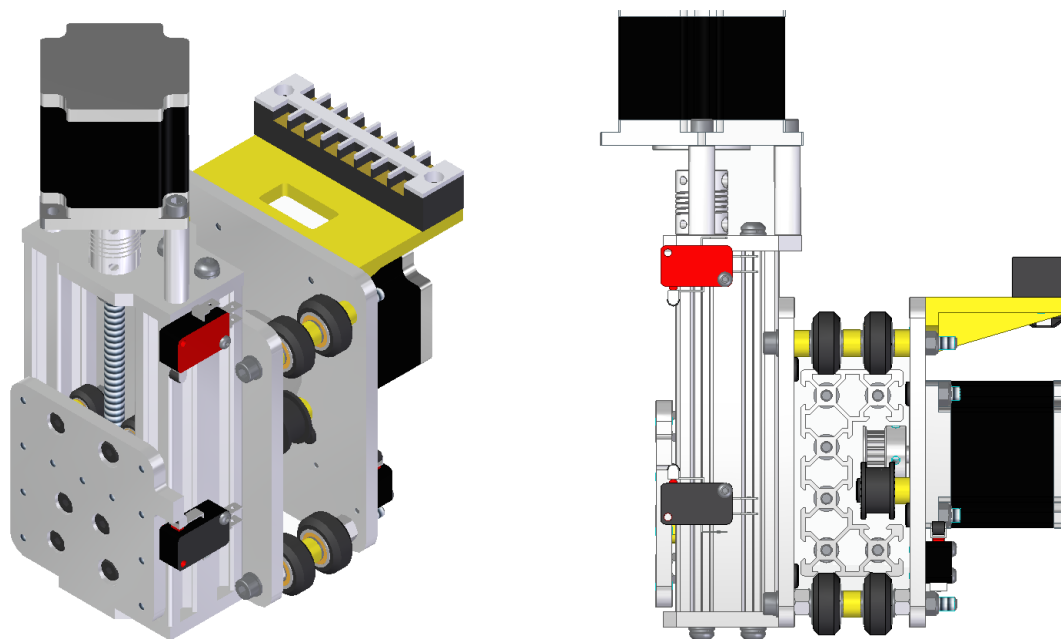


Obrázok 19: Ľavá a pravá bočnica

Konštrukcia jazdca sa skladá z dvoch hliníkových dosiek, ktoré sú spojené pomocou štyroch skrutiek rozmeru M5 (obr. 21). Na týchto skrutkách sú navlečené kolieskové páry v presne určenej vzdialenosti pomocou dištančných krúžkov. Na zadnej doske je pripevnený krokový motor spolu s koncovými spínačmi. Na prednej doske je uchytená osa Z, ktorá je tvorená *C-beam* profilom o dĺžke 160 mm. V nej sa nachádza trapézová skrutka so závitom T8. Po skrutke sa posúva plastová matica priskrutkovaná k duralovej doske, na ktorú sa primontuje nástroj. Kolieska sa tentokrát pohybujú po vnútorných drážkach *C-beam* profilu. Aby sa tam zmestili, majú menší vonkajší priemer (obr. 20 vľavo). Doska pre primontovanie nástroja má viacero dier veľkosti M4 aby sa zaistila univerzálnosť použitia rôznych typov obrábacích nástrojov. Krokový motor je s trapézovou skrutkou spojený pomocou hliníkovej pružnej spojky. Docieli sa tak zníženie počiatočného nárazu pri rozbehu a eliminovanie novej nepresnej súosovosti medzi skrutkou a hriadeľom motora.

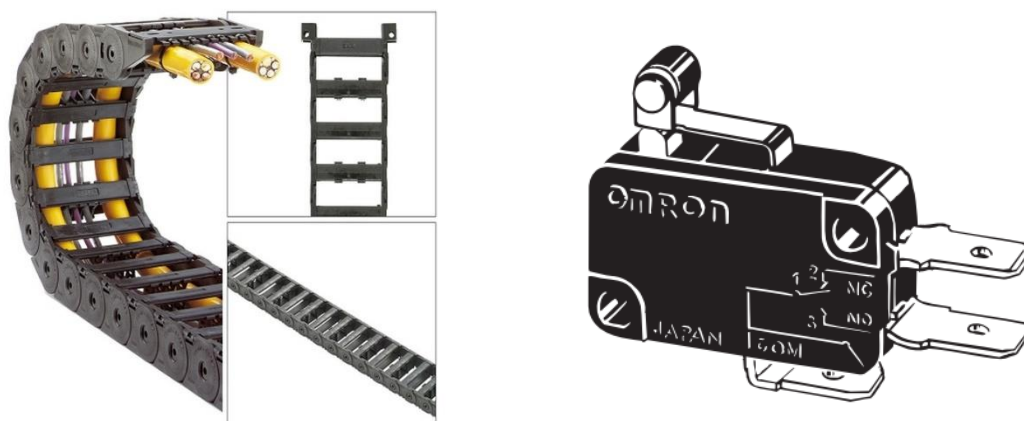


Obrázok 20: Dve veľkosti vodiacich koliesok ($\Phi 15$ a $\Phi 24$)



Obrázok 21: Izometrický a bočný pohľad na jazdca

Celá kabeláž sa nachádza v plastových energetických reťaziach, ktoré sú uložené v hliníkových profiloch tvaru U (obr. 22). Pre os Y sa nachádza zo zadnej strany portálu. Hliníkový profil je pripevnený k bočniciam. Na ose X sa táto reťaz nachádza na pravej strane (obr. 17). Výstup kabeláže je pri pravom prednom rohu.

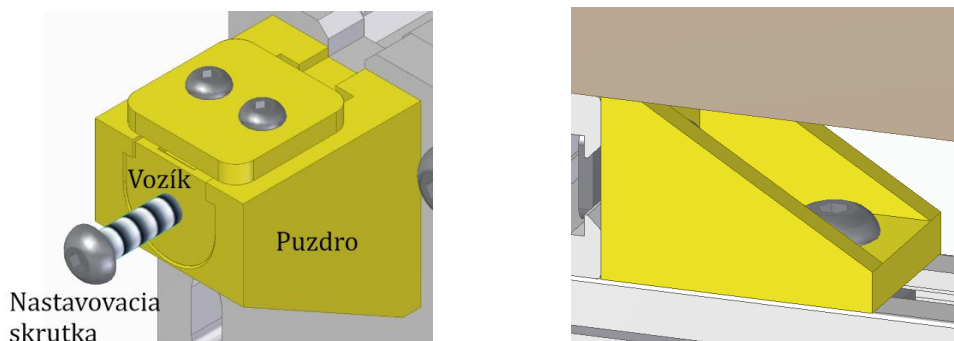


Obrázok 22: Energetická reťaz [21] a koncový spínač Omron V-152-1C25 [20]

Niektoré konštrukčné prvky, ktoré majú zložitejší tvar a museli by sa vyrobiť pomocou sústruhu a frézy, som vytlačil na 3D tlačiarňi. Sú to hlavne napínače remeňov, rohové spojky a rôzne podpery. Ako materiál som použil PLA vzhľadom na jednoduchú a takmer bez zápachovú tlač. Počítam ale s rizikom, že tento plast nie je určený na pevné konštrukčné prvky ale skôr na rôzne dekorácie. Taktiež ho

nemôžem použiť pri zdrojoch veľkého tepla (motoroch), pretože by mohol zmäknúť a zmeniť tvar. Ak sa počas prevádzky vyskytnú problémy s týmito prvkami z PLA, vytlačím ich znova z materiálu ABS a nahradím ich.

Napínač remeňa funguje nasledujúcim spôsobom. Nastavovacia skrutka je opretá o zadnú stenu puzdra. Koniec remeňa je pripevnený k vozíku, ktorý sa môže voľne pohybovať v puzdre. Ak otáčam skrutkou, tak vozík sa začne vyťahovať smerom von a remeň sa tak naťahuje a napína. Je dôležité, aby remene boli napnuté, pretože inak by mohli vzniknúť oneskorenia pri rozbehu, avšak nemôžu byť napnuté príliš, aby nedochádzalo k zbytočnému namáhaniu remeňa a možnému roztrhnutiu.



Obrázok 23: Napínač remeňa (vľavo) a rohová spojka

Do niektorých plastových prvkov som potreboval spraviť metrický závit M3 a M4. Použil som špeciálne mosadzné matice, ktoré majú na vonkajšej strane drážky a po zahriatí sa zalisujú do plastu (obr. 23).



Obrázok 24: Mosadzné matice do plastu

Remene, keďže majú šírku 6 mm, sú vhodne uložené v drážke V-slot profilu. Na ose X sú uložené v rovnakej drážke, po ktorej sa pohybujú kolieska. Na ose Y je remeň relatívne dobre skrytý, keďže sa nachádza vo výreze C-beam profilu spolu s remenicou na hriadieli motora (obr. 21). Aby sa dosiahlo čo najväčšie opásanie remenice, sú použité vodiace kolieska.

3.5 Konštrukcia vlečného noža

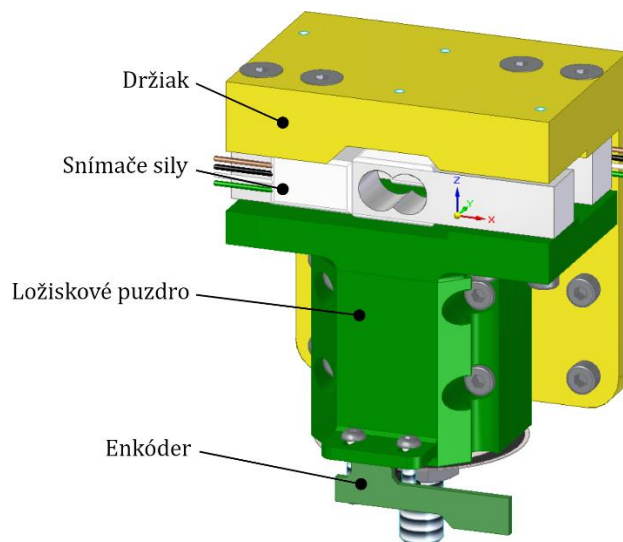
Základné usporiadanie vlečného noža sa nachádza na obrázku 9. Pevná, nepohyblivá časť je tvorená dvomi ložiskami v ktorých sa otáča hriadel' na ktorom je pripevnený nástroj. Túto základnú koncepciu som rozšíril o nasledujúce veci:

1. **Vymeniteľný nástroj:** okrem noža bude potrebné použiť aj ryhovacie koliesko a to behom vykonávania programu. To znamená, že nástroj sa dá jednoducho a rýchlo vymeniť pri nútenej prestávke v programe.
2. **Meranie prítlaku:** je robené pomocou dvojice hliníkových blokov s nalepenými tenzometrami. Spracovanie údajov je popísané v kapitole *Senzory nástroja*. Meranie prítlaku je dôležité hlavne pri ryhovaní ale okrem toho dokážem detegovať prekážky a prípadné narazenie nástroja do dosky podstavy.
3. **Snímanie natočenia:** klasická koncepcia vlečného nástroja sa spolieha na „slepé“ natáčanie bez jeho snímania. V ideálnych podmienkach by problém nemal nastať. Avšak môže sa stať, že nožík sa nemusí správne otočiť a začne ničiť rezaný materiál prípadne sa zlomí a riadiaca jednotka nebude mať o tom žiadnu informáciu. Preto som použil optický inkrementálny enkóder s plastovým kotúčom, ktorý som vybral z atramentovej tlačiarne.

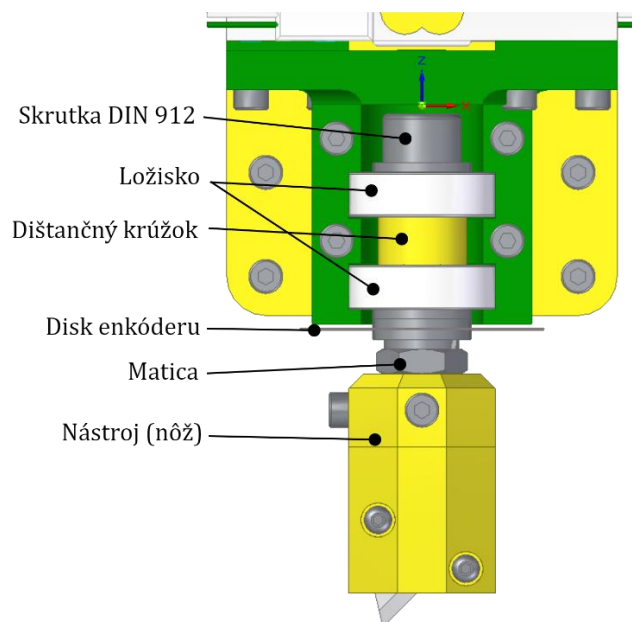
Celá konštrukcia sa nachádza na nasledujúcich obrázkoch. Väčšina častí je vytlačená na 3D tlačiarňi z materiálu PLA. *Držiak* (najväčšia vytlačená časť) je z jeho dlhšej časti pripevnený priamo na osu Z (dosku jazdca) a na kratšiu časť sú pripevnené pevné konce snímačov sily. Použité sú dva, aby sa docielila symetria. Na vrchnej strane držiaku sú pripravené diery so závitmi pre uchytenie DPS snímačov nástroja. K nej budú pripojené snímače sily a enkóder. Zo spodnej strany na „pohyblivých“ koncoch snímačov je pripevnený *ložiskový domček*. V ňom sa nachádzajú dve ložiská s označením 6200 v ktorých sa voľne otáča skrutka DIN 912 so závitom M10. Zo spodnej strany je všetko zaistené maticou s pružnou podložkou. Medzi dvomi podložkami je aj enkóderový disk. Na zvyšnú časť skrutky (asi 15 mm) sa pripevní puzdro s nástrojom (nôž, koliesko).

Gul'ôčkové ložiská rady 6xxx nie sú vhodné na prenos axiálnej sily. Pri utiahnutí matice by sa vôbec netočili, preto je medzi nimi dištančný krúžok, ktorý kompenzuje axiálnu silu.

Ako nástroj mám zatiaľ navrhnutý nožík (obr. 26). Obal sa skladá z dvoch spojených častí, medzi ktorými je čepeľ. Os rotácie a špička čepele sú od seba vzdialené 8 mm. Puzdro sa nasunie na hriadel' a zaistí sa pomocou dvoch skrutiek. V prípade ryhovacieho kolieska bude mať puzdro rovnaký tvar, len bude treba spraviť uchytenie kolieska.



Obrázok 25: Dimetrický pohľad na zostavu nástroja



Obrázok 26: Predný pohľad na zostavu nástroja s otvoreným krytom

3.6 Zhrnutie kapitoly

Pri návrhu mechanickej konštrukcie sa mi podarilo aplikovať myšlienku stavebnicovej štruktúry s čo najviac normalizovanými časťami. Ostatné komponenty som vytlačil na 3D tlačiarňi. Celková pracovná plocha je približne 830x850 mm a zdvih 50 mm, čím som splnil požadované hodnoty zo začiatku návrhu. Ďalší krok je návrh elektroniky, aby som dokázal rozhýbať motory a spracovávať signály zo snímačov. Ten je popísaný v nasledujúcej kapitole.

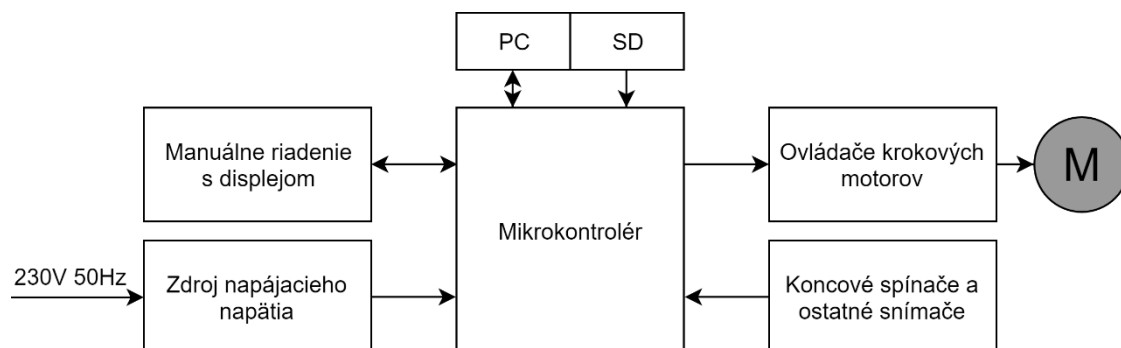
4 NÁVRH ELEKTRONIKY

Ešte pred začatím samotného návrhu je vhodné si na začiatku stanoviť určité požiadavky, čo všetko by mala elektronika obsahovať a čo by som chcel dosiahnuť:

1. **Počítač slúži ako interface** medzi užívateľom a hlavnou riadiacou jednotkou. Užívateľ na ňom tvorí riadiaci program a môže sledovať aktuálny stav procesu.
2. **Počítač nebude riadiť periférie CNC zariadenia**, ani nebude spracovávať snímané signály, ako to bolo zvykom pri starších typoch zariadení, ktoré sa riadili cez paralelný port. Túto činnosť bude vykonávať samostatné riadiaca jednotka tvorená mikrokontrolérom.
3. Riadiaca jednotka bude komunikovať s počítačom cez vhodné sériové rozhranie.
4. Tok dát nie je jednosmerný. CNC rezačka bude disponovať rôznymi snímačmi, ktoré dávajú informáciu o aktuálnom stave prebiehajúceho procesu ako aj zachytávanie rôznych chýb, ktoré sa môžu objaviť a mali by za následok poškodenie alebo úplné zničenie niektorých častí zariadenia. Riadiaca jednotka musí tieto signály spracovať a informovať užívateľa cez displej, prípadne na obrazovke PC.
5. Zariadenie bude mať aj **manuálny režim** s displejom.
6. Okrem posielania programu z PC by bolo vhodné implementovať iný typ načítania programu, napr. USB flash disk, SD karta...
7. Každý motor by mal mať samostatný výkonový riadiaci modul, ktorý by sa dal v prípade poruchy jednoducho vymeniť.
8. Mikrokontrolér musí mať dostatočný výpočtový výkon a najlepšie obsahovať inštrukcie pre prácu s desatinnými číslami.
9. Kabeláž musí byť vhodne navrhnutá, aby nevznikal elektromagnetický šum a naopak, aby signály neboli týmto šumom ovplyvňované.
10. Zabezpečiť **ochranu zdravia užívateľa** ako aj ochranu pred poškodením alebo zničením rôznych častí CNC zariadenia.
11. Nechať si „otvorené dvere“ prípadným ďalším vylepšeniam. To znamená, nevytvoriť elektroniku len na jeden špecifický prípad zariadenia (možné zapojenie laseru, vretena, diaľkové riadenie atď.)

Na obrázku 27 sa nachádza základná koncepcia elektroniky ešte pred samotným konkrétnym návrhom. Centrálnu jednotku bude tvoriť mikrokontrolér, ktorý bude spracovávať dáta z PC alebo externého média (najlepšie SD karta) a bude posilať signály do ovládačov krokových motorov. K dispozícii bude aj manuálne

riadenie vrátane LCD displeja ako zobrazovacieho prvku. V rámci bezpečnosti a správneho fungovania zariadenia je nutné zapojiť koncové spínače a prípadne ďalšie snímače ako napr. inkrementálny enkóder a tenzometre u nástroja.



Obrázok 27: Základná bloková schéma riadiacej elektroniky

4.1 Ovládač krokového motora

Je potrebný na riadenie rýchlosti a smeru otáčania krokového motora. Vlastnú konštrukciu takéhoto ovládača môžem robiť dvomi spôsobmi:

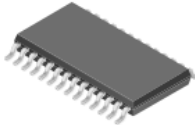
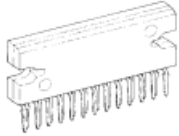
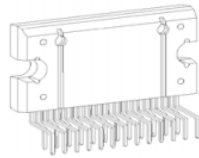
1. Najnižšia úroveň, tranzistorové riešenie
2. Integrované riešenie

U prvej možnosti by sa jednotlivé cievky motoru spínali cez dve štvorice tranzistorov (H-mostík). Takéto riešenie by bolo zbytočne veľké „objavovanie Ameriky“ a viedlo by to k zbytočným problémom. Preto som vybral možnosť integrovaného riešenia.

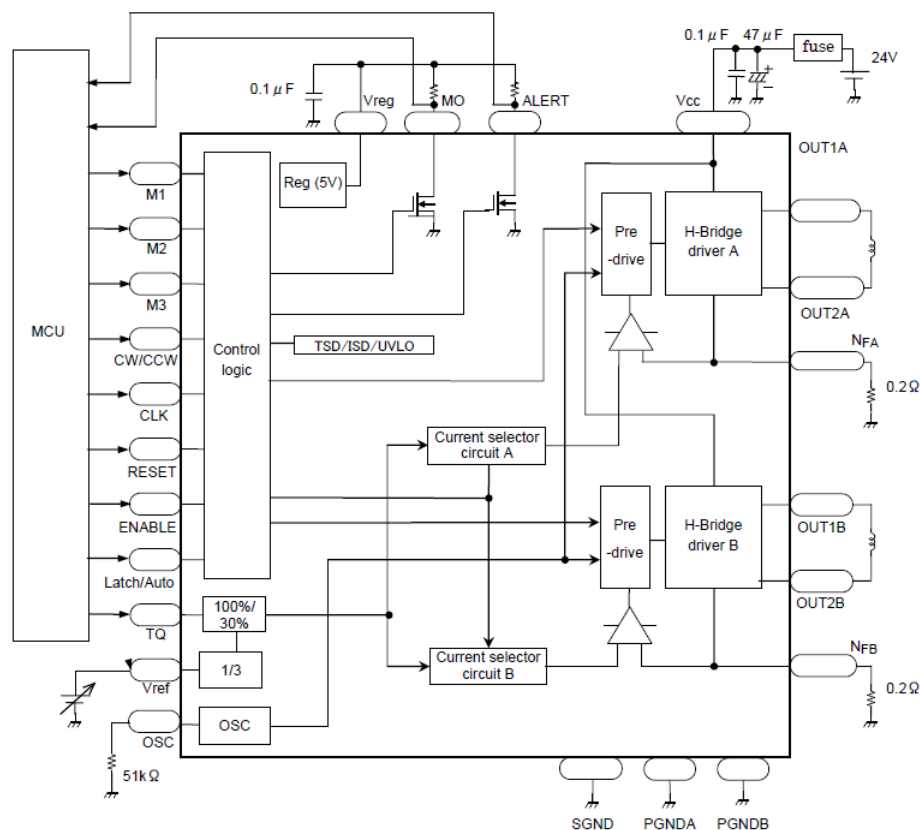
Väčšina integrovaných ovládačov bipolárnych krokových motorov má základ spravený pomocou dvoch H-mostíkov, ktoré tvoria výkonový prvok. Avšak okolo toho sa nachádza množstvo logiky. Tá môže riadiť mikrokrokovanie, nastavenie veľkosti prúdu, obmedzenie prúdu pri nečinnosti atď. Taktiež vstupné riadiace signály sú relatívne jednoduché. Pre otáčanie (rýchlosť, krok) sa používa obdĺžnikový signál s premennou frekvenciou. Smer otáčania sa zase mení privedením *log.0* alebo *log.1* na konkrétny pin integrovaného obvodu.

Na trhu sa nachádza veľké množstvo takýchto čipov. Odlišujú sa hlavne v hodnote maximálneho prúdu, ktorý môžu poslať do cievky motoru, veľkosťou mikrokrokovania a pravdaže cenou. Nasledujúca tabuľka ukazuje porovnanie základných parametrov niektorých vybraných typov integrovaných riešení. Pri výbere bol rozhodujúci faktor maximálny prúd, ktorý musí byť väčší ako je nominálny prúd cievkou motoru (2,12A).

Tabuľka 10: Základné parametre vybraných ovládačov krokových motorov

Parameter	Integrovaný obvod [22; 23; 24]		
	A5977	TB6560AHQ	TB6600HG
Max. výstupný prúd [A]	2,8	3	4,5
Max. napájacie napätie [V]	40	34	42
Mikrokrokovanie	1/8	1/8	1/16
Plynulé nastavenie prúdu	áno	nie	áno
Zníženie prúdu pri nečinnosti	áno	áno	áno
Približná cena [CZK]	135	225	205
Tvar puzdra			

Z tejto trojice som vybral čip *TB6600HG*, keďže má vysoký maximálny prúd a najväčšie mikrokrokovanie. Vnútna štruktúra a základné zapojenie sú na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 28: Vnútna štruktúra a základné obvodové zapojenie čipu TB6600HG

Mikrokrokovanie

Pri použití mikrokrokovania dokáže ovládač rozdeliť jeden krok na viacero menších krokov vhodným riadením prúdu cievkami. Docieli sa tak jemnejšie polohovanie a zníženie vibrácií. Nastavenie spočíva privedením vhodnej kombinácie *log.0* alebo *log.1* na piny *M1*, *M2* a *M3*.

Tabuľka 11: Nastavenie mikrokrokovania

M1	M2	M3	Delenie kroku	Poznámka
0	0	0	-	Odpojené cievky motoru (Standby mode)
0	0	1	1/1	Bez mikrokrokovania
0	1	0	1/2	0-71-100 % nastavovanie prúdu
0	1	1	1/2	0-100 % nastavovanie prúdu
1	0	0	1/4	
1	0	1	1/8	
1	1	0	1/16	
1	1	1	-	Odpojené cievky motoru (Standby mode)

Maximálny prúd

Nastavenie maximálneho prúdu sa riadi referenčným napätím U_{ref} [V] privedeným na pin V_{ref} . Platí nasledujúca rovnica:

$$I_{max} = \frac{U_{ref}}{3 \cdot R_{NF}} \quad \left[\frac{V}{\Omega}, A \right] \quad (4.1)$$

Obmedzenie prúdu

Vykonáva sa pripojením *log.0* na pin *TQ*, kedy sa prúd zmenší zo 100% na 30% maximálneho prúdu. Je to z dôvodu zastaveného motora, kedy nie je potrebný maximálny zádržný moment, pri ktorom by zbytočne pretekal maximálny prúd a dochádzalo by k veľkému zohrievaniu.

Vstupné riadiace signály

- CLK krokovanie motora, STEP (reakcia na nábežnú hranu)
- CW/CCW smer otáčania, DIR (*log.0* a *1*)
- ENABLE povolenie činnosti výkonovej časti (*log.0* a *1*)

Ochrany

Ovládač disponuje tromi automatickými ochrannými mechanizmami. Tepelná ochrana (TSD) zastaví činnosť ovládača pri prekročení teploty čipu 160 °C. Teplota musí následne klesnúť pod 90 °C, aby sa obnovila činnosť. Obnovenie činnosti závisí na pine *LA*. Ak má privedenú *log.0*, tak je manuálne (1-0-1 na *ENABLE*). V opačnom prípade je automatické.

Ochrana proti nadprúdom (ISD) zareaguje pri prekročení hranice odoberaného prúdu 6,5A. Obnovenie činnosti je v tomto prípade len manuálne.

Posledná ochrana je proti nízkemu napájaciemu napätiu (UVLO), ktoré ak klesne pod 5,5V, tak sa odpoja výstupy na motor. Ovládač prejde do normálnej činnosti automaticky po prekročení 6V.

Počas aktivovanej akejkoľvek ochrany sa výstupný pin *ALERT* nastaví do *log.0*. Riadiaca jednotka tak môže dostávať informáciu o poruche.

4.1.1 Obvodové riešenie

Základné zapojenie z obrázku 28 som rozšíril o viaceré pomocné obvody. Hodnoty a názvy súčiastok sú odkazované na schému z prílohy 3.

Ochrana proti prepólovaniu

Je tvorená MOSFET tranzistorom s P kanálom *IRF5305*. Vstup *drain* je pripojený na kladnú svorku, *gate* na zápornú svorku napájacieho konektoru cez 100k Ω rezistor. V normálnom režime je napätie U_{GS} záporné a tranzistor je tak otvorený (zenerová dióda D_1 obmedzuje napätie U_{GS} na max. hodnotu -10V). Pri prepólovaní bude tranzistor zavretý. Výhoda oproti použitiu sériovo zapojenej diódy je vo výkonovej strate. Tranzistor *IRF5305* má pri úplnom otvorení odpor *drain-source* len 0,06 Ω . Pri predpokladanom prúde 3A bude stratový výkon len 0,54W, kde u diódy by to bolo 1,8W (ak počítam $U_D = 0,6V$). [25]

Ochrana proti vysokému napätiu

Podobne ako pri prepólovaní, aj tu je použitý tranzistor *IRF5305* spolu s viacerými pomocnými súčiastkami. Zenerová dióda D_2 určuje maximálne vstupné napätie. Pri normálnej činnosti je na tranzistore Q_3 nulové napätie U_{GS} a Q_2 je tak otvorený. Ak zväčšíme napätie nad 39V, dióda D_2 sa otvorí a drží si svoje zenerové napätie. U_{GS} tranzistoru Q_3 bude tak záporné. Na vstup *gate* tranzistoru Q_2 sa zrazu objaví rovnaké napätie, ako na výstupe *source* a preto sa zatvorí. Zenerové diódy D_3 a D_4 majú rovnakú funkciu ako D_1 . [25]

Zdroj 5V napätia

Logická časť ovládača pracuje s 5V napäťovou úrovňou. Vytvorenie tohto napätia z napájacieho, ktoré môže byť až 39V, by bolo veľmi neefektívne. V prípade lineárneho stabilizátoru by sa veľká časť výkonu premenila na teplo. Lepšie by bolo použiť integrovaný *step-down* menič, avšak ten potrebuje k svojej činnosti tlmivku, kondenzátory a iné pomocné súčiastky. Výstupné napätie by malo určité zvlnenie a ani cena nie je priaznivá. Preto je použité externé napätie 12V, ktoré sa lineárnym stabilizátorom 7805 zmenší na 5V. Použitý stabilizátor má maximálny menovitý

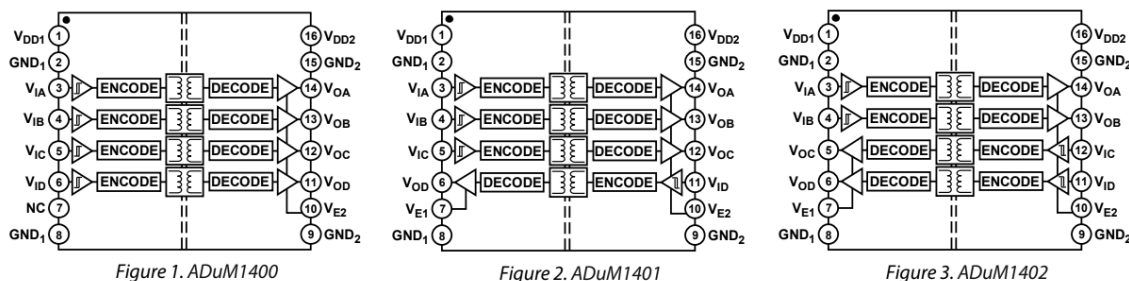
prúd 500mA, ktorý je až predimenzovaný vzhľadom na použitie pri napájaní len logických integrovaných obvodov a dvoch LED diód.

Digitálne vstupy a výstupy

Na galvanické oddelenie riadiacich IO je použitý digitálny izolátor *ADUM1401* od firmy *Analog Devices* [26]. Má 4 kanály, z toho 3 sú použité ako vstupné a jeden je výstupný (obrázok 29, figure 2) Na vstupné kanály sú pripojené signály CLK, DIR (CW/CCW) a ENABLE. Výstupným kanálom dáva ovládač informáciu o poruche.

Oproti klasickým optočlenom funguje izolátor na princípe indukčnej transformátorovej väzby. Vnúterná elektronika rozpozná hranu vstupného signálu. Následne vyšle vysokofrekvenčný signál do primárnej cievky transformátora. Sekundárna cievka je napojená na dekodér, ktorý z tohto signálu dokáže zrekonštruovať vstupný signál. [27]

Výhoda je hlavne v nízkych reakčných časoch (2ns), vysokej vstupnej impedancii a neinvertujúcom výstupnom signáli. Hlavná nevýhoda je v možnom rušení, ak sa čip nachádza blízko silného elektromagnetického poľa. V mojom prípade bude elektronika umiestnená v dostatočnej vzdialenosti od hlavného zdroja takéhoto rušenia, krokových motorov, takže túto negatívnu vlastnosť dokážem eliminovať.



Obrázok 29: Typy 4-kanálových digitálnych izolátorov od firmy Analog Devices

Nastavenie mikrokrokovania

Je spravené cez prepínač typu DIP-SWITCH so štyrmi sekciami, ktorý privedie *log.1* na piny *M1*, *M2* a *M3*. Štvrtá sekcia je pripojená na *LA* pin. Softvérovo nebude možné toto nastavenie meniť.

Nastavenie maximálneho prúdu

Hodnota prúdu sa nastaví privedením určitého napätia na pin V_{ref} . Platí rovnica (4.1) spolu s nasledujúcimi podmienkami [24]:

$$0,11 \leq R_{NF} \leq 0,5 \quad [\Omega] \quad (4.2)$$

$$0,3 \leq U_{ref} \leq 1,95 \quad [V] \quad (4.3)$$

$R_{NF} [\Omega]$ je snímací rezistor prúdu (jeden zo vstupov interného napäťového komparátora) a je poskladaný z troch paralelne pripojených rezistorov s hodnotou $0,4\Omega$. Výsledná hodnota je $R_{NF} = 0,133\Omega$

Referenčné napätie $U_{ref} [V]$ bude vytvárať odporový delič s potenciometrom, napájaným zdrojom referenčného napätia LM4040 (D5), ktoré má hodnotu $U_{LM} = 2,5V$. Hodnotu potenciometra so si zvolil $10k\Omega$.

V krajných polohách potenciometra R_{10} musia byť na výstupe hraničné hodnoty z (4.3). Platia nasledujúce rovnice pre napäťový delič:

$$U_{refMin} = U_{LM} \cdot \frac{R_7}{R_6 + R_7 + R_{10}} \quad [V] \quad (4.4)$$

$$U_{refMax} = U_{LM} \cdot \frac{R_7 + R_{10}}{R_6 + R_7 + R_{10}} \quad [V] \quad (4.5)$$

Ak dám tieto dve rovnice do rovnosti podľa U_{LM} , tak po úpravách dostanem

$$\frac{U_{refMin}}{U_{refMax}} = \frac{R_7}{R_7 + R_{10}} \quad [-] \quad (4.6)$$

Z (4.6) vypočítam R_7

$$R_7 = \frac{R_{10} \cdot \frac{U_{refMin}}{U_{refMax}}}{1 - \frac{U_{refMin}}{U_{refMax}}} = \frac{10 \cdot \frac{0,3}{1,95}}{1 - \frac{0,3}{1,95}} = 1,818 \quad [k\Omega] \quad (4.7)$$

Z rovnice (4.4) si vyjadrím R_6 a vypočítam

$$R_6 = \frac{U_{LM}}{U_{refMin}} \cdot R_7 - R_7 - R_{10} = \frac{2,5}{0,3} \cdot 1,818 - 1,818 - 10 = 3,332 \quad [k\Omega] \quad (4.8)$$

Z odporovej rady E12 vyberiem najbližšie hodnoty, ktoré sú $R_6 = 3,3k\Omega$, $R_7 = 18k\Omega$.

Za odporovým deličom sa nachádza dvojstupňový RC člen, ktorý ma za úlohu odfiltrovať prípadné rušivé pulzy a vysokofrekvenčný šum.

Obvod pre zníženie prúdu

Je tvorený integrovaným obvodom 74HC123 [28] (2x monostabilný klopný obvod s resetom). Ja budem využívať len jeden klopný obvod, druhý ostane nezapojený. Vstup A je pripojený trvalo na zem, na vstup B je pripojený CLK signál.

Pri nábežnej hrane na vstupe B sa výstup Q preklopí do *log.1* a po určitom čase sa vráti späť do *log.0*. Tento čas je určený RC členom pripojeným na pin R/C. Pre zvolenú kombináciu rezistor-kondenzátor to bude:

$$t_{TQ} = 0,28 \cdot R_{13} \cdot C_{14} \cdot \left(1 + \frac{0,7}{R_{13}}\right) =$$

$$0,28 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 4,7 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 + \frac{0,7}{220 \cdot 10^3}\right) = 0,29 \quad [s] \quad (4.9)$$

Ak počas tohto času príde ďalšia nábežná hrana na vstup B, kondenzátor sa vybijie a počíta sa odznova. Výstup Q je pripojený na vstup TQ čipu TB6600HG.

Chybový signál

Jeden kanál v digitálnom izolátore vedie smerom z ovládača do riadiacej jednotky a je tak využitý na posielanie chybového hlásenia. Po vzniku nasledujúcich udalostí sa výstup izolátora nastaví do *log.1*:

1. Aktivovanie tepelnej ochrany TSD
2. Aktivovanie nadprúdovej ochrany ISD
3. Odpojenie napájacieho napätia
4. Odpojenie 12V napájania

Prvé dve udalosti vyvoláva TB6600HQ. Spolu s tretou udalosťou sú napojené na hradlo NAND, ktorého výstup je pripojený na izolátor. Štvrtá udalosť vzniká automaticky na digitálnom izolátore. Ak jedna polovica izolátoru nie je napájaná, tak výstupy druhej polovice sú v *log.1*.

Spínanie ventilátora

Na čip TB6600HQ je pripevnený chladič spolu s ventilátorom, ktorý je pripojený cez spínací tranzistor BC817 na 12V. Vybraný ventilátor odoberá prúd maximálne 100mA, čo je 8-krát menej ako maximálny kolektorový prúd tranzistora.

Na bázu je pripojený výstup komparátora, ktorý porovnáva referenčné napätie z odporového deliča s výstupným napätím snímača teploty chladiča. Komparátor AZV3001 [29] je typu *push-pull*. Snímanie teploty je spravené pomocou lineárneho aktívneho termistora MCP9701 [30] od firmy Microchip. Má tri vývody: napájanie, zem a analógový výstup, ktorého napätie je priamo úmerné teplote. Platí nasledujúca rovnica:

$$U_{OUT} = k \cdot T_a + U_0 \quad [V] \quad (4.10)$$

U_{OUT} výstupné napätie snímača

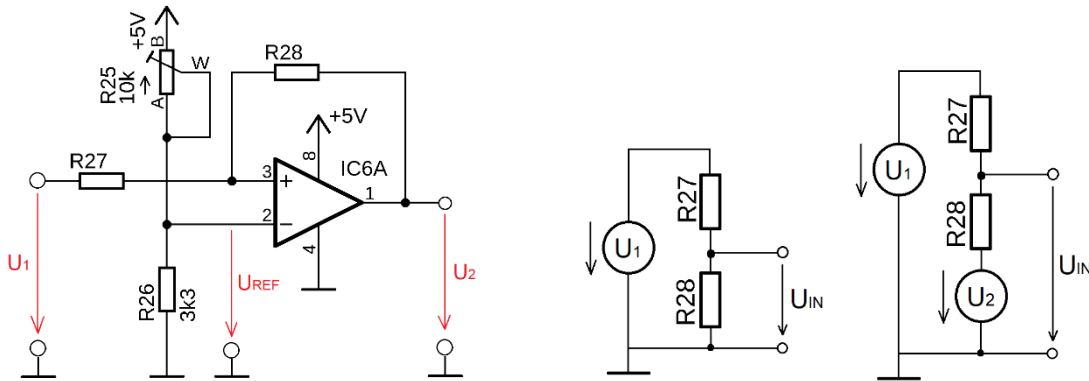
k	citlivosť snímača (19,5 mV/°C)
T_a	snímaná teplota [°C]
U_0	napätie pri 0°C (0,4 V)

Spínaciu teplotu som si zvolil 50°C. Po dosadení do (4.10) vypočítam $U_{OUT} = 1,375V$. Vzhľadom na možné rušenie je zavedená externá hysteréza $H = 10^\circ C$, ktorá zodpovedá napäťovému rozsahu $U_H = 0,195V$. Komparátor síce disponuje internou hysterézou 9mV, avšak vzhľadom na pomalú zmenu U_{OUT} som ju nepovažoval za dostatočnú.

Schéma zapojenia je na obr. 30a. Pre výstupné napätie U_2 platí:

$$U_2 = \begin{cases} 0, & U_1 < U_{REF} + 0,5U_H \wedge U_2 = 0 \\ 5, & U_1 > U_{REF} - 0,5U_H \wedge U_2 = 5 \end{cases} [V] \quad (4.11)$$

Zapojenie si môžem prekresliť na dve schémy (obr. 30b) s uvažovaním podmienok v (4.11). Napätie U_{IN} [V] je na neinvertujúcom vstupe komparátora. Keďže u nasledujúcich rovníc budem riešiť prípady preklápania komparátora, tak U_{IN} bude rovné U_{REF} [V].



Obrázok 30: a) Schéma zapojenia komparátora b) náhradné schémy

$$U_{IN} = U_1 \cdot \frac{R_{28}}{R_{27} + R_{28}} [V] \quad (4.12)$$

$$U_{IN} = U_2 + (U_1 - U_2) \cdot \frac{R_{28}}{R_{27} + R_{28}} [V] \quad (4.13)$$

V prvej rovnici (4.12) napätie U_1 reprezentuje horný zapínací prah a má veľkosť $U_1 = U_{IN} + 0,5U_H$. V druhej rovnici (4.13) sa jedná o dolný vypínací prah $U_1 = U_{IN} - 0,5U_H$. Rovnice následne porovnam, upravím a dosadím $U_2 = 5V$ a $U_H = 0,195V$.

$$(U_{IN} + 0,5U_H) \cdot \frac{R_{28}}{R_{27} + R_{28}} = U_2 + (U_{IN} - 0,5U_H - U_2) \cdot \frac{R_{28}}{R_{27} + R_{28}} \quad (4.14)$$

$$\frac{R_{28}}{R_{27} + R_{28}} = \frac{U_2}{U_2 + U_H} = 0,9625 \quad (4.15)$$

Odpor R_{27} si zvolím 3,9kΩ. Dosadím do (4.15) a po úprave vypočítam $R_{28} = 100,1\text{k}\Omega$. Najbližšia normalizovaná hodnota je 100kΩ. Referenčné napätie dopočítam späť dosadením do (4.12).

$$U_{REF} = U_{IN} = U_1 \cdot \frac{R_{28}}{R_{27} + R_{28}} = 1,4725 \cdot \frac{84,7}{3,3 + 84,7} = 1,42 \quad [V] \quad (4.16)$$

4.1.2 DPS a konštrukčné usporiadanie

Môj návrh som prispôbil čipu *TB6600HG*, ktorý je určený na obojstrannú DPS. Použité súčiastky sú SMD aj THT. Rezistory a kondenzátory (okrem elektrolytických) sú SMD s puzdrami 0805 a 1206. Výkonové snímacie rezistory, ktoré sú pripojené na *TB6600HG* piny N_{FA} a N_{FB} majú SMD puzdro 2512 a výkon 1W. Potenciometer na nastavenie prúdu, DIP spínač na nastavenie mikrokrokovania a konektory pre pripojenie motora a napájania sa nachádzajú na krajoch dosky pre čo najjednoduchší prístup. Na spodnej strane dosky sa nachádza konektor vytvorený priamo na DPS, ktorý je určený pre riadiace signály a 12V napájanie. Na pravej strane sú ochranné obvody s oddelenou zemou a 5V zdroj. Samotný čip *TB6600* je v spodnej časti DPS. Jedna skupina vývodov je prestrčená cez obdĺžnikový výrez v doske a prileťovaná na spodnú vrstvu. Puzdro čipu je spolu s chladičom o veľkosti 40x40 mm pripevnené k doske. Nad chladičom je umiestnený 12V radiálny ventilátor, ktorý vyfukuje zohriaty vzduch smerom von z krabíčky. Pre vykompenzovanie nárazového prúdového odberu sa čo najbližšie k napájacím pinom čipu *TB6600HG* nachádzajú dva elektrolytické kondenzátory spolu s SMD kondenzátormi. Výkonová a signálová zem je oddelená a spojená v jednom bode (vstupný napájací pin GND).

Doska bola vyrobená čínskou firmou *PCBWay* [31], ktorá ponúka výhodné ceny pri kusovej výrobe o maximálnom rozmere 100x100 mm. Jedná sa o profesionálnu výrobu spolu s prekovmi, ochrannou maskou, jednostrannou potlačou a vyvrtaním dier a rôznych otvorov.

Krabíčka sa skladá z dvoch častí. Na spodnej časti je pripevnená DPS pomocou dištančných stĺpikov, na ktoré sa priskrutkuje vrchná časť. V nej sa nachádzajú konštrukčné otvory na konektory, signalizačné LED diódy a vetranie.

Celá krabička je vytlačená na 3D tlačiarňi z materiálu PLA. V prípade, že by sa dosahovali vysoké vnútorné teploty, tak ich znovu vytlačím z materiálu ABS.

4.2 Prepojovacia doska

Ovládače krokových motorov sa budú pripájať na riadiacu jednotku prostredníctvom prepojovacej dosky s konektormi typu *card edge*.

Výhoda takéhoto riešenia spočíva vo flexibilitě. V prípade poruchy môžem ovládač jednoducho vymeniť za iný alebo rovno použiť nejakú novšiu verziu. Ak by som v zariadení chcel použiť iný nástroj (vŕtačka, frézka, laser), tak stačí navrhnuť potrebný riadiaci modul s rovnakými vstupnými riadiacimi signálmi a napojiť ho na prepojovaciu dosku.

Na doske sa nachádza 5 konektorov a každý má k dispozícii 3 riadiace signály (jeden PWM a dva obyčajné IO), 1 poruchový signál a napájacie napätie privádzané priamo z riadiacej jednotky (5V alebo 3,3V podľa použitého mikrokontroléru).

V prípade periférií ktoré majú galvanicky oddelené riadiace signály je na doske vytvorený spoločný 12V zdroj. Použil som *step-down* napäťový regulátor *LM2596-12*. Jeho parametre sa nachádzajú v tabuľke 12. Hodnoty obvodových súčiastok som zvolil podľa katalógového listu. Je dôležité, aby elektrolytické kondenzátory mali nízku hodnotu sériového odporu (low ESR capacitors).

Tabuľka 12: Základné parametre meniča LM2596-12 [32]

Parameter	Hodnota
Max. výstupný prúd	3 A
Max. vstupné napätie	40 V
Frekvencia spínania	150 kHz
Efektivita	90 %
Fyzické puzdro	TO-220 (THT), TO-263 (SMD)
Iné konfigurácie	3,3V 5V nastaviteľný

4.3 LCD displej

Ako zobrazovací prvok som vybral grafický monochromatický LCD displej s rozlíšením 128x64 pixelov a LED podsvietením. Zobrazovanie dát a komunikáciu s nadradeným systémom obstaráva LCD kontrolér *ST7920* [33], ktorý podporuje tri typy komunikácie:

1. Paralelná 8-bitová
2. Paralelná 4-bitová
3. Sériová

Cez komunikačnú zbernicu sa posielajú 8-bitové riadiace inštrukcie (vymaž displej, nastav adresu, zobraz znak atď.). a zobrazovacie dáta. Paralelné zbernice majú jednoduchšie riadenie, avšak zaberať väčšie množstvo dátových vodičov. Preto som sa rozhodol použiť sériovú zbernicu, ktorá využíva len dva vodiče, dátový a hodinový. Kontrolér obsahuje pamäte typu ROM a RAM, ktoré sú ešte rozdelené do viacerých sekcií, vid' nasledujúca tabuľka.

Tabuľka 13: Popis pamätí v LCD kontroléri ST7920

Pamäť	Popis
CGROM	8192 16x16bit čínskych znakov
HCGROM	127 16x8bit ASCII znakov
GDRAM	64x256bit grafický displej
CGRAM	4 16x16bit užívateľské znaky
DDRAM	Zobrazovacia pamäť

Výhoda grafického displeja oproti klasickému riadkovému spočíva vo voľnejšom zobrazovaní znakov a používaní rôznej užívateľsky vytvorenej grafiky.

V priebehu vykonávania rezacieho programu by mal displej zobrazovať aktuálnu polohu nástroja v súradnicovom systéme, prípadne hodnoty niektorých snímačov (prítlak, uhol natočenia nástroja, vid' nasledujúca kapitola). U poruchového stavu bude zobrazovať chybové správy.



Obrázok 31: Grafický LCD displej

4.4 Senzory nástroja

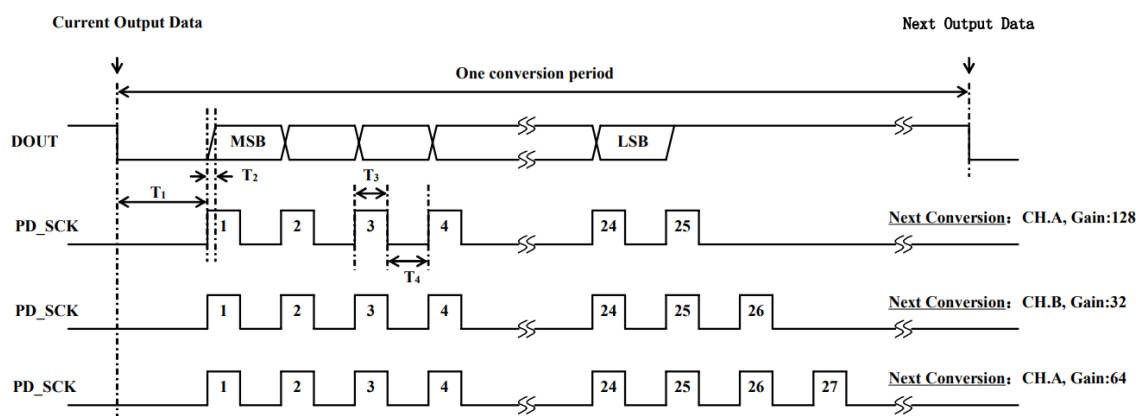
Ako som už napísal v kapitole 3.5, klasickú koncepciu vlečného noža som rozšíril o meranie prítlaku a uhlu natočenia.

Meranie prítlaku

Ložiskový domček je k ose Z prichytený cez dva hliníkové bloky, kde na každom sú prilepené štyri odporové tenzometre zapojené do mostíka. Jeden takýto snímací blok má štyri vodiče, dva sú na napájanie mostíka, dva na diferenciálne snímanie napätia. Tie sa pripájajú do kúpeného modulu s 24-bitovým analógovým prevodníkom *HX711* [34], ktorý je priamo navrhnutý na meranie signálu z tenzometrických silomerov.

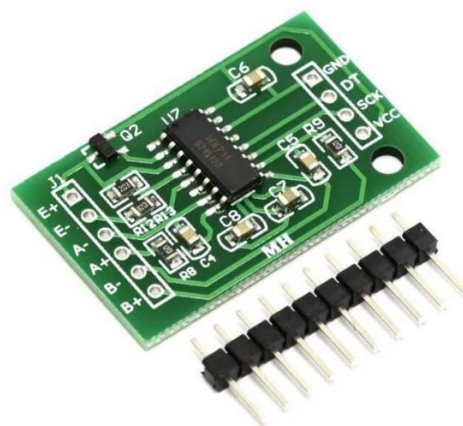
Má dva vstupné meracie kanály, ktoré sú pripojené na nízkošumový zosilňovač. U prvého kanálu sa môže nastaviť 128 alebo 64 násobné zosilnenie. Druhý kanál má fixované zosilnenie 32.

Získavanie nameranej hodnoty je spravené cez sériové rozhranie a prebieha nasledovne. Na začiatku komunikácie sa dátový pin *DT* (resp. *DOUT*) nastaví do *log.0* čo signalizuje ukončenie analógového prevodu. Vonkajšia riadiaca jednotka (napr. mikrokontrolér) následne pošle 24 hodinových impulzov na pin *SCK*, pri ktorých sa postupne vysunie 24 bitová zmeraná hodnota na výstup *DT* (MSB bit ide ako prvý). Ďalšie tri hodinové impulzy nastaví nasledujúci prevod. Jeden impulz navyše znamená snímanie z kanálu A (128x zosilnenie), dva impulzy snímanie z kanálu B (32x zosilnenie), ale tri impulzy znova kanál A, ale 64x zosilnenie (obrázok 32).



Obrázok 32: Sériová komunikácia s AD prevodníkom HX711 [34]

Prevodník je nastavený na 10 prevodov za sekundu. Pri experimentovaní som zapojil jeden mostík na kanál A, druhý na kanál B. Najskôr som čítal dáta len z kanálu A s uvedenou frekvenciou. Avšak keď som začal striedavo čítať z kanálu A a B (striedavo 25 a 26 hodinových impulzov), tak sa výsledné čítanie dát veľmi spomalilo na asi 1 prevod za sekundu, čo je veľmi nedostačujúce. Preto som musel použiť dva rovnaké moduly s *HX711*.

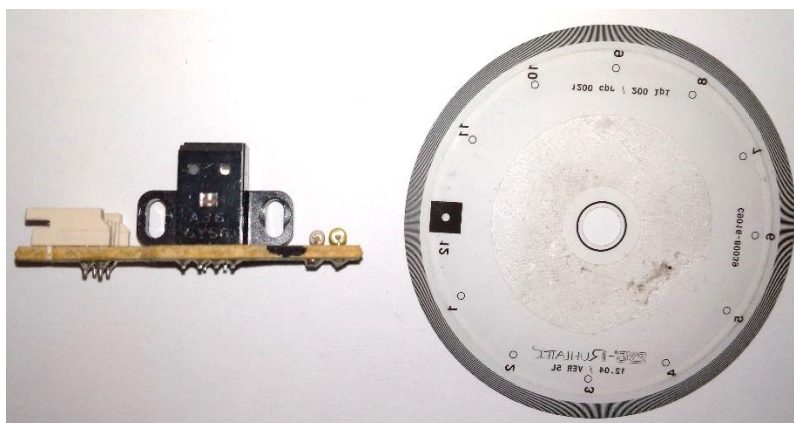


Obrázok 33: Modul s analógovým prevodníkom HX711 [35]

Snímanie uhlu natočenia

Je spravené pomocou optického inkrementálneho enkóderu s plastovým priesvitným diskom s rozlíšením 200 LPI, vybratých z laserovej tlačiarne. Je mi jasné, že takéto veľké rozlíšenie je pri mojej konkrétnej aplikácii zbytočné. Pri priemere kotúča 50 mm vychádza jeden impulz na približne $0,3^\circ$. Preto som sa pokúsil si vytlačiť vlastné enkóderové kotúče s rozlíšením 1° a 5° , avšak kvalita tlače asi nebola dostatočná, pretože pri 5° rozlíšení mi to niekedy započítalo impulzy navyše, resp. menej a pri 1° rozlíšení to bol dokonca dvojnásobok. Z toho dôvodu zatiaľ ostávam pri originálnom kotúči.

Samotný enkóder je priletovaný na malú DPS s blokovacím kondenzátorom, sériovým rezistorom k LED dióde a 4-pinovým konektorom. K enkóderu som nemohol na internete nájsť žiadny katalógový list, avšak zo všeobecnej znalosti sa mi podarilo „rozšifrovať“ jednotlivé konektorové piny. Dva sú vstupné napájacie (5V, GND) a dva výstupné signálové.



Obrázok 34: Optický inkrementálny enkóder s diskom

Výsledná DPS musí byť uložená čo najbližšie k nástroju, to znamená že na komunikáciu by som musel použiť asi 8 vodičov s dĺžkou približne 2,5 metra a napájacím napätím 5V, čo je neefektívne. Preto je na spracovanie signálov z enkóderu a prevodníkov *HX711* použitý 8-bitový mikrokontrolér *ATtiny4313* od firmy *Atmel/Microchip*. Snažil som sa použiť najjednoduchší mikrokontrolér ktorý má UART perifériu. Tá je použitá na komunikáciu s nadradenou riadiacou jednotkou cez zbernicu *RS-232* pri použití známeho prevodníku *MAX3232* (mierne vylepšená verzia *MAX232*), ktorého výstup pracuje s napätím $\pm 10V$ a je tak odolnejší voči rušeniu.

Program prebieha v cyklickom režime. Ak sú k dispozícii dáta z prevodníkov *HX711*, tak sa prečítajú a okamžite pošlú na *UART* vo formáte "*Y:X\n*" kde *Y* je číslo kanálu (1 alebo 2) a *X* predstavuje číslo už prevedené na gramy v hexadecimálnom tvare. Podobné je to aj s uhlom natočenia, ktorý sa posiela s periódou približne 40ms (*Y* je 3). Kanál enkóderu *A* vyvoláva externé prerušenie pri nábežnej hrane a podľa logickej hodnoty kanálu *B* sa pripočíta resp. odpočíta hodnota čítača. Tá sa prevedie na uhol.

Riadiaca jednotka dokáže zvonku vynulovať hodnotu čítača a snímačov tlaku. Okrem toho môže zakázať resp. povoliť posielanie jednotlivých údajov. To je spravené pomocou posielania kódového označenia podľa tabuľky 14. Jednotlivé písmená je možné zapísať za sebou v jednom slove. Väčšiu prioritu majú malé písmená.

Tabuľka 14: Kódové označenie príkazov pre senzory nástroja

Kód	Funkcia
A	Povolí meranie sily z prvého snímača
B	Povolí meranie sily z druhého snímača
C	Povolí snímanie uhlu natočenia
a	Zakáže meranie sily z prvého snímača
b	Zakáže meranie sily z druhého snímača
c	Zakáže snímanie uhlu natočenia
X	Vynuluje čítač a hodnoty prítlaku (nastaví referenčné hodnoty)

4.5 Napájací zdroj

Na napájanie celej elektroniky som vybral spínaný zdroj *S-400-36* [36] od firmy *OMC-StepperOnline*, od ktorej mám už kúpené krokové motory. Jeho parametre sú v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 15: Základné parametre zdroja S-400-36

Parameter	Hodnota
Výstupné napätie	36 V
Maximálny prúd	11 A
Výkon	400 W
Efektivita	85 %
Výstupný šum	150 mV _{p-p}

4.6 Manuálne riadenie

Pozostáva z klávesnice zapojenej do matice 4x4 a jednoduchého analógového joysticku. Klávesnica potrebuje na svoju obsluhu 8 vodičov (4 riadky a 4 stĺpce). Obsahuje nasledujúce tlačidlá:

- Manuálny pohyb pre všetky osi (X+, X-, Y+, Y-, Z+, Z-)
- HOME na prechod do začiatku súradnicového systému
- START, PAUSE, ABORT na spustenie resp. prerušenie programu
- Ostatné (MENU, ESC, ENTER, FILES...)

4.7 Riadiaca jednotka

Základom riadiacej jednotky je mikrokontrolér, ktorý riadi ovládače krokových motorov, spracováva údaje zo snímačov a komunikuje s nadradeným systémom (PC). Na trhu sa nachádza veľké množstvo MCU od viacerých firiem ktoré sa odlišujú rôznym výkonom, integrovanými perifériami, počtom IO, typom CPU atď. Vzhľadom na naozaj veľký výber je potrebné si nadefinovať určité parametre, ktoré od neho požadujem:

1. Dostatočný počet IO
2. Vysoký výpočtový výkon, taktovacia frekvencia (ideálne PLL)
3. Floating Point Unit (FPU)
4. Integrované potrebné periférie
5. Vývojové prostredie pre programovanie v jazyku C

Ako vhodný MCU som vybral 32 bitový *ARM Cortex M7* od firmy Atmel (resp. Microchip) s kódovým označením *ATSAME70Q21* [37]. Tento výber obhajujem tým, že už mám skúsenosti s MCU od firmy Atmel a dobre poznám ich vývojové prostredie *Atmel Studio*. Okrem toho sa tento mikrokontrolér nachádza aj na relatívne lacnej vývojovej doske s názvom *SAME70-XPLD* [38], ktorú použijem v

mojom projekte. Do nasledujúcej tabuľky som vybral niektoré parametre mikrokontroléru *ATSAME70Q21*.

Tabuľka 16: Vybrané parametre MCU ATSAME70Q21 [37]

Parameter	Hodnota
Max. taktovacia frekvencia	300 MHz (PLL)
Pamäť FLASH	2048 kB
Pamäť SRAM	384 kB (rozšíriteľná na 256 MB)
Puzdro	LQFP144
Počet IO pinov	114
Napät'ová logická úroveň	3,3V
Memory Protection Unit (MPU)	Áno
Floating Point Unit (FPU)	Áno
Direct Memory Access (DMA)	Áno
Komunikačné periférie	UART, USART, TWI, SPI, QSPI,
Analógové periférie	AD a DA prevodníky
Riadiace periférie	Čítače/časovače, PWM, RTC

Veľa periférií zostane nevyužitých, avšak po skončení bakalárskej práce chcem pokračovať vo vývoji, preto je tento mikrokontrolér najvhodnejší vývojový nástroj, keďže obsahuje naozaj všetko.

Vývojová doska *SAME70-XPLD* okrem samotného mikrokontroléru a pripojovacích konektorov obsahuje aj zabudovaný programátor a debugger, konektory na SD kartu a Ethernet, 16 MB SDRAM a mnoho ďalšieho (obr. 35). Na základné ovládanie je k dispozícii jedno užívateľské tlačidlo a LED dióda.

Okrem pripojovacích konektorov umiestnených na krajoch dosky sú k dispozícii voľné miesta pre jednoradové konektory, určené na pripojenie *Arduina*. Tie budú využité na prepojenie s interface modulom, na ktorom sa budú nachádzať konektory pre pripojenie ovládačov krokových motorov, koncových snímačov, nástrojového modulu, manuálneho riadenia, atď.



Obrázok 35: Usporiadanie vývojovej dosky SAME70-XPLD [38]

4.8 Interface modul

Slúži na prepojenie vývojového kitu *SAME70-XPLD* s perifériami CNC zariadenia. Celá schéma je opäť v prílohe 3.

Nachádza sa na ňom zdroj 5V napájacieho napätia tvorený lineárnym stabilizátorom *L7805*. Vstupné napätie je 12V. Zvolil som typ s 500mA maximálnym výstupným prúdom, ktorý dostatočne a s rezervou pokrýva teoretickú spotrebu použitých súčiastok. Dióda *D2* je potrebná na napäťové vyrovnanie vstup-výstup v prípade napájania z USB konektora na vývojom kite (debug mód).

Koncové spínače pracujú s 12V napätím, kvôli zmenšeniu možného rušenia. Na prevod medzi 12V a 3,3V sú použité veľmi populárne jednoduché optočleny typu *PC817*. Koncové spínače sú typu SPDT, takže dokážu pracovať v dvoch stabilných režimoch, trvalo rozpojené alebo trvalo zopnuté. V prvom prípade šetrím elektrickú energiu, keďže prúd netečie neustále cez LED diódu v optočlene. Ja ale používam druhý prípad, ktorým dokážem detegovať prerušenie pripojovacieho vodiča alebo poruchu samotného koncového spínača, keďže v tom prípade sa bude chovať ako by bol aktivovaný.

Na komunikáciu so senzormi nástroja je znova použitý integrovaný obvod *MAX3232* s minimom externých súčiastok v základnom katalógovom zapojení.

Na súčasných moderných PC sa už prakticky nepoužíva klasický sériový port, avšak stále ho je možné nájsť pod označením virtuálny sériový port, ktorý používa na komunikáciu USB zbernicu. Aby som dokázal previesť diferenčný signál z USB portu na 3,3V asynchrónny signál spracovávaný pomocou UART, potreboval som použiť integrovaný obvod *FT232RL* od firmy *FTDI* [39]. Jumper *SJ₁* a *SJ₂* slúžili na prvotné prekonfigurovanie s 5V režimu na 3,3V režim. Čip je napájaný z interného zdroja. Napätie z USB konektora je použité len na zresetovanie čipu.

4.9 Bezpečnosť zariadenia

Každé automatizované priemyselné zariadenie má určitý stupeň bezpečnostného rizika, ktoré je dôležité eliminovať na čo najmenšiu možnú hodnotu, ideálne na nulu. Takéto zariadenia majú rôzne rýchlo sa pohybujúce, rotujúce, ostré časti, ktoré pri kontakte s pracovníkom môžu viesť k vážnym zraneniam.

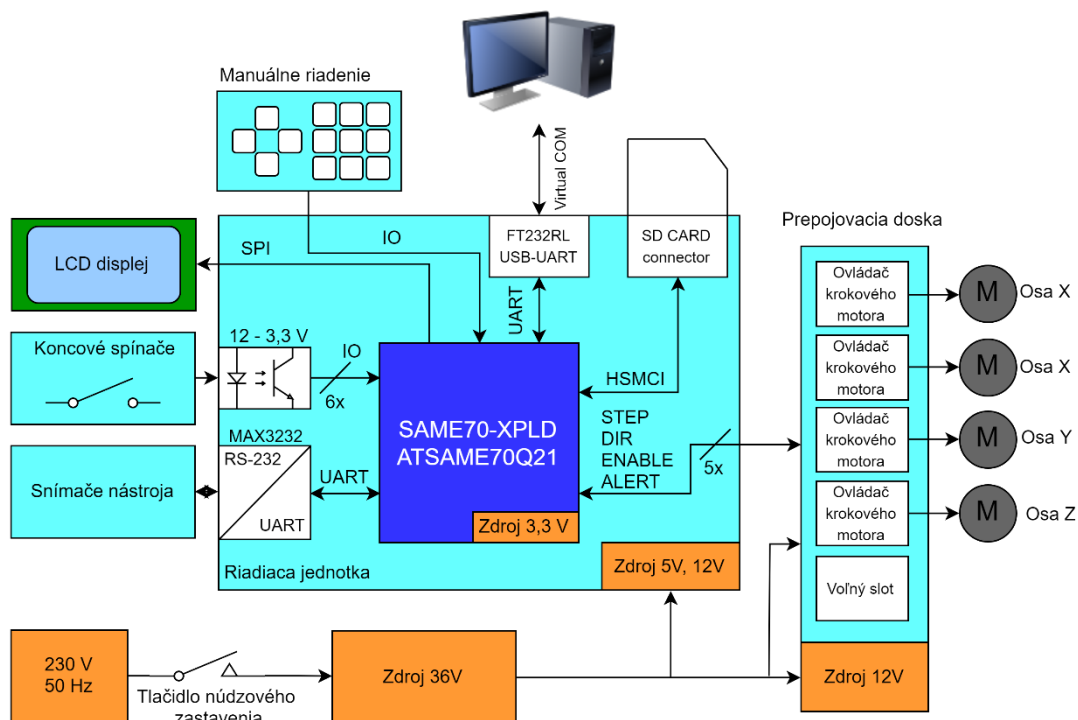
U mojej CNC rezačky je potrebné si na začiatku spraviť zoznam možných miest, kde môže vzniknúť úraz:

1. Spodná časť nástroja, čepel' noža
2. Medzi vodiacimi kolieskami a drážkami
3. Medzi remeňom a remenicou

U bodu 2 a 3 sa jedná hlavne o pricviknutie prstov a riešenie by bolo meranie aktuálnej polohy enkódermi (pri kontakte by došlo k rýchlemu spomaleniu a zastaveniu pohybu), prípadne použitie svetelnej závory okolo celého zariadenia. Bod 1 môže nastať vtedy, ak operátor nechá ruku na pracovnej doske (pravdepodobnosť asi rovnako malá ako u bodu 2 a 3) alebo začne vyberať vyrezaný materiál ešte pred dokončením automatizovaného programu (väčšia pravdepodobnosť). Riešenie by bolo použitie už spomínanej svetelnej závory, avšak v tomto prípade bezpečnosť obstaráva tenzometrické meranie sily (prítlaku) nástroja, ktoré by pri kontakte zaznamenalo nárast pôsobiaceho tlaku a tým detekciu prekážky a zariadenie zastaví. Okrem toho je použité tlačidlo núdzového zastavenia, ktoré po stlačení odpojí hlavný prívod elektrickej energie do systému.

4.10 Zhrnutie kapitoly

Kompletná bloková schéma elektronickej časti zariadenia sa nachádza na obrázku 36. V tomto momente dokážem realizovať a oživiť jednotlivé hardvérové komponenty a zistiť tak možné nedostatky ešte pred písaním firmvéru.



Obrázok 36: Kompletná bloková schéma riadiacej elektroniky



Obrázok 37: Pohľad na zrealizované časti riadiacej elektroniky

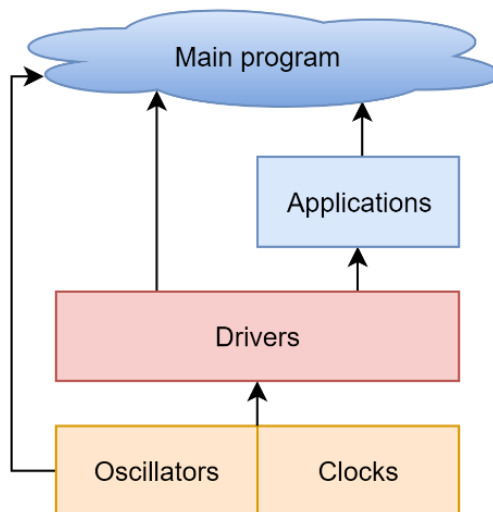
5 FIRMWARE PRE MCU

V kapitole 4.7 som pre môj projekt vybral 32 bitový mikrokontrolér typu *ARM Cortex-M7* s kódovým označením *ATSAME70Q21*. Je to MCU od bývalej firmy *Atmel*, ktorú odkúpila firma *Microchip Technology*. Celý firmware je napísaný vo vývojovom prostredí *Atmel Studio 7*. Ako programovací jazyk som si zvolil C.

Zo začiatku som sa pokúšal používať framework s názvom *Atmel START* [40]. Je to nová generácia *Atmel Software Framework v.4* (ASF4), ktorý vyvíja už samotný *Microchip*. Konfigurácia periférií, mapovanie pinov ako aj nastavenie hodinových signálov prebieha cez webové rozhranie s následnou generáciou projektu. Postupom času som ale narazil na limity spôsobené jeho vysokou univerzálnosťou (napr. pri periférii čítača/časovača dokázal nakonfigurovať len jeden kanál z troch nezávislých, podobne aj pri PWM periférii). Preto som sa rozhodol vytvoriť si svoj vlastný framework, ktorý je rozpísaný v nasledujúcej kapitole.

5.1 Vrstvová štruktúra pre firmware

Celý framework je rozdelený do troch vrstiev, ku každej môžem pristupovať z hlavného programu. Ich grafické znázornenie sa nachádza na nasledujúcom obrázku.

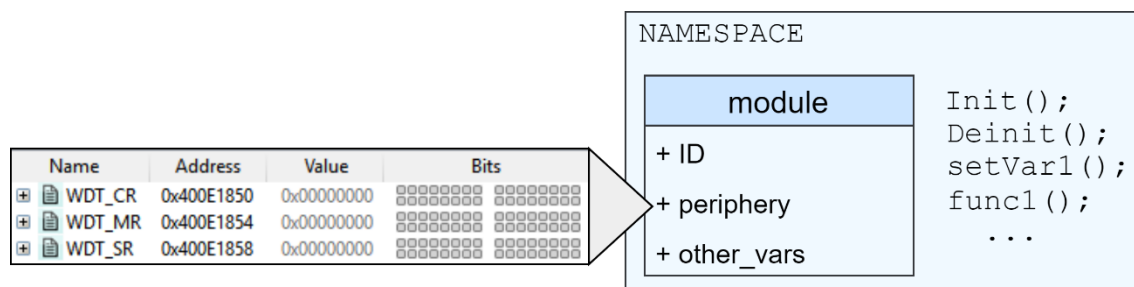


Obrázok 38: Vrstvová štruktúra firmware

Najnižšiu vrstvu tvoria dva bloky, ktoré medzi sebou veľmi úzko súvisia, a to oscilátory a generátory hodinových signálov pre MCU. V prípade oscilátorov sa jedná o funkcie pre nastavenie základných oscilačných kmitočtov, ako je Slow clock (32 kHz), Main clock a PLL. Tieto kmitočty sú použité ako vstup na vytvorenie hodinových signálov pre MCU, periférie, zbernice atď. O tie sa starajú funkcie z bloku Clocks.

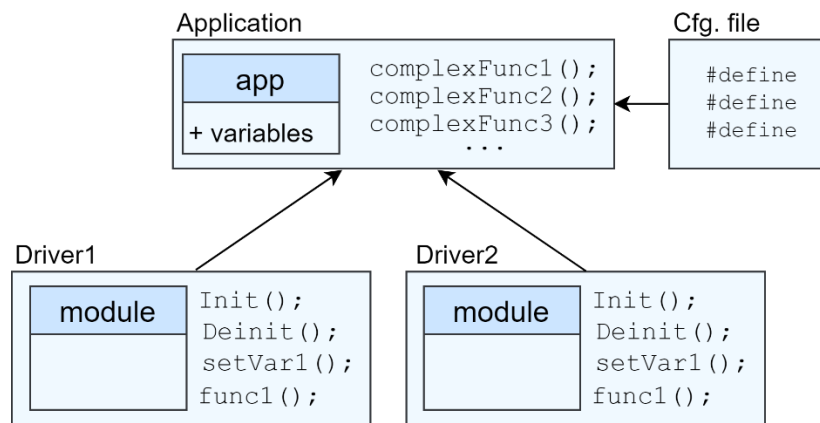
Každá periféria má svoje riadiace, stavové a dátové registre. Vhodným nastavením bitov riadiacich registrov dokážem uviesť danú perifériu do požadovaného funkčného stavu. Pomocou stavových registrov sledujem aktuálny stav periférie a môžem aktivovať príslušné prerušenia. A nakoniec dátové registre sú potrebné pri rôznych komunikačných perifériách pri výmene dát. Obsluha týchto registrov z hlavného programu by bola veľmi neprehľadná a neefektívna, preto som k potrebným perifériám vytvoril interface, ktorý som nazval ovládač (driver) a v mojej vrstvovej štruktúre sa nachádza na prostrednom mieste.

Driver pozostáva zo štruktúry s názvom `NAMESPACE_module{}`, ktorá obsahuje inicializačnú premennú, ukazateľ na registre periférie a ostatné pomocné premenné. Pomocou inicializačnej funkcie `NAMESPACE_init(args)`; sa nastaví ukazateľ na registre, ktoré sa zároveň nakonfigurujú do určitého funkčného stavu. Okrem toho sa nastaví inicializačná premenná na hodnotu rozdielnu od nuly, bez ktorej by som nemohol použiť ostatné funkcie. Hodnota tejto premennej nie je náhodná, ale je odvodená od poradového čísla periférie (napr. MCU obsahuje 4 rovnaké PWM periférie, takže táto hodnota môže byť 1 až 4) a používa sa ďalej na identifikáciu prerušenia, ale to už zachádzam moc do hĺbky. Ku každému modulu môžem priradiť konkrétnu perifériu len raz, systém má na to vytvorenú ochranu. Po inicializácii už môžem používať ostatné funkcie pre prácu s ovládačom. Názvy všetkých funkcií, štruktúr, enumerácií a definícií sú odvodené od názvu ovládača, ktorý tvorí menný priestor (namespace). Napríklad, periféria SPI má súbory s názvom *spi.h* a *spi.c* a všetky deklarácie začínajú reťazcom `SPI_`.



Obrázok 39: Základná programová štruktúra ovládača periférie

S ovládačom už môžem priamo pracovať v hlavnom programe, avšak na komplexnejšie riešenia mi nemusí stačiť. Niektoré úlohy potrebujú k svojej činnosti viacero periférií so zložitejším rozhraním. Kvôli tomu som do modelu zahrnul ďalšiu vrstvu, najvyššiu, s názvom aplikačná. Jednotlivé moduly aplikačnej vrstvy sú jedinečné, tzn. nemôžem vytvoriť viacero inštancií daného modulu, ako to bolo pri ovládačoch. Pribudol aj konfiguračný súbor, v ktorom sa nachádzajú potrebné parametre pre nakonfigurovanie daného aplikačného modulu. Ich podrobnejší popis je rozpísaný na nasledujúcich podkapitolách.



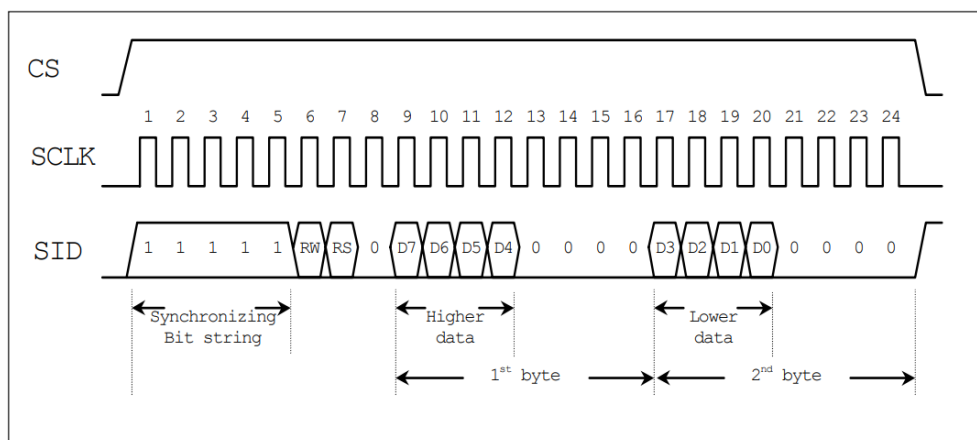
Obrázok 40: Základná programová štruktúra modulu aplikácie

5.1.1 Zobrazovanie textu a grafiky na LCD displej

V kapitole 4.3 bol vybraný grafický LCD displej s radičom ST7920 [33], ktorý podporuje 17 8-bitových inštrukcií rozdelených do dvoch skupín, základné (text) a rozšírené (grafika). Medzi základné inštrukcie patrí vymazanie displeja, návrat kurzora na začiatok displeja, prepínanie medzi textovým a grafickým módom a samozrejme posielanie zobrazovacích dát.

Komunikácia je sériová, jej časový diagram sa nachádza na obrázku 41. Jeden dátový packet pozostáva z troch bajtov. Prvý je synchronizačný a obsahuje informáciu o smere prenosu (RW) a type posielaných dát (RS). Keďže radič ST7920 nepodporuje čítanie v sériovom móde, tak bit RW je vždy *log.0*. Posielaný packet môže mať formu inštrukcie (RS = 0) alebo zobrazovacích dát (RS = 1). Posielaná inštrukcia/dátový bajt je rozdelený do dvoch zvyšných bajtov podľa diagramu.

Signál CS značí „Chip Select“ a má význam len v prípade, ak komunikujem s viacerými radičmi cez jedno rozhranie. V mojom prípade je pin CS pevne pripojený do *log. 1*.



Obrázok 41: Časový diagram sériovej komunikácie s radičom ST7920 [33]

Sériovú komunikáciu zaisťuje periféria SPI prostredníctvom vytvoreného ovládača rovnakého názvu. Keďže nedokážem zaistiť kontinuálny prenos 24 bitov (max. 16), musím packet posilať formou troch bajtov. Okrem SPI som musel použiť aj perifériu čítača/časovača s navrhnutým ovládačom *TIMER*. Ten je potrebný na vytváranie časových medzier medzi dvoma odosielanými údajmi, keďže radič nemá interný buffer a potrebuje určitý čas na spracovanie inštrukcie. Väčšina inštrukcií potrebuje 75 µs, inštrukcia na vymazanie displeja 1,6 ms.

Komunikácia začína funkciou `LCD_init()`, ktorou nastavím ovládače periférií, interné premenné a zahájim inicializačný proces pre LCD displej. Táto funkcia sa volá iba raz (najlepšie po resete MCU) a po jej dokončení je možné začať zapisovať text na displej. K dispozícii mám 4 riadky po 16 znakov. S funkciami `LCD_home()` a `LCD_goto(row, column)` premiestňujem kurzor po displeji. Posielať znaky môžem jednotlivo (`LCD_putc(char)`) alebo ako reťazec (`LCD_puts(char*)`). Aplikácia má vytvorený interný FIFO kruhový buffer, takže nemusím čakať na odoslanie celého reťazca. V grafickom režime môžem cez funkciu `LCD_show_image(image)` zobrazit' obrázok s rozlíšením 128x64 pixelov, uložený vo forme pol'a o rozmere 1024 bajtov.

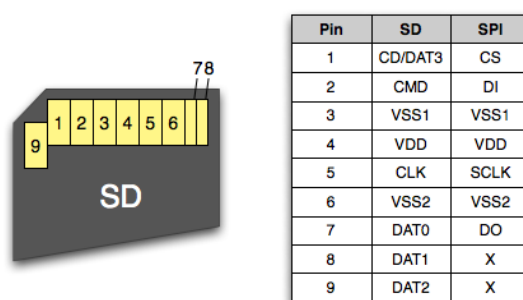
5.1.2 Klávesnica pre manuálne riadenie

Klávesnica je zapojená do matice 4 riadkov a 4 stĺpcov, dohromady tak 16 tlačidiel. Riadky sú pripojené na výstupné piny MCU nastavené do *log.0*. Stĺpce sú pripojené na vstupné piny MCU s nastaveným interným pull-up rezistorom a nakonfigurované na externé prerušenie.

Po stlačení tlačidla dôjde k vyvolaniu prerušenia, v ktorom sa zistí číslo stĺpca. Následne sa riadky postupne nastavujú do *log.1* a kontroluje sa, či na príslušnom stĺpci nastala zmena logickej úrovne. Po identifikácii tlačidla sa zavolá užívateľský zadaná callback funkcia, ktorá predá dva parametre. Prvý parameter je stav stlačenia tlačidla, *press* alebo *release*. Druhý parameter je samotný kód tlačidla.

5.1.3 Implementácia súborového systému FAT32

Ako hlavné médium na načítanie dát pre rezanie som si vybral SD kartu vzhľadom na to, že vývojový kit *SAME70-XPLD* má pre ňu slot. Na komunikáciu s kartou som napísal ovládač *SDCARD*, ktorý tvorí základný interface pre perifériu MCU s názvom HSMCI (High Speed Multimedia Card Interface). Použiť môžem SD karty do verzie 2.0 [37]. Princíp komunikácie spočíva v posielaní príkazov s následným čítaním odpovedí z karty na vodiči CMD a posielaním dát na vodičoch DAT[0..3].



Obrázok 42: Usporiadanie pinov SD karty [41]

Ovládač dokáže z SD karty len čítať dáta vo forme blokov s fixovanou veľkosťou 512 bajtov. Prvá funkcia, ktorá sa musí zavolať pred začatím transferu, najlepšie pri vložení SD karty, je `SDCARD_identify()`. Tá identifikuje typ karty a nastaví ju do *transfer* režimu. Následne môžem začať čítať bloky dát pomocou funkcie `SDCARD_read(address, *buffer)` z určitej adresy a na výstupný buffer. Ďalšie funkcie slúžia na získavanie údajov z odpovedí na príkazy a zisťovanie chybových stavov (viď príloha 8). Podrobný popis komunikácie je rozpísaný v SD špecifikácii fyzickej vrstvy, z ktorej som čerpal [42].

Väčšina SD kariet a USB flash diskov používa v súčasnosti súborový systém FAT32 (alebo exFAT pre väčšie kapacity), ktorý je tu už s nami od operačných systémov MS-DOS (konkrétne jeho staršie verzie FAT12 a FAT16). Preto som si napísal aplikáciu pre tento konkrétny systém, ktorá je ale značne okresaná kvôli jednoduchosti. Súbory dokážem len čítať z prvej partície a len z *root* adresára (nedokážem sa vnoriť do podadresárov). Pre moje potreby je to ale dostačujúce.

Prvý krok je získať údaje, kde sa nachádzajú dôležité sektory (sektor = 512 bajtov). Od toho je funkcia `FAT32_init()`, ktorá prečíta úplne prvý sektor s informáciou o partíciách (MBR). Z prvej partície získa typ súborového systému (musí byť FAT32, inak nepustí ďalej) a adresu jej *boot* sektoru. Po načítaní *boot* sektoru vyčítam údaj o veľkosti sektorov (musí byť 512 bajtov, inak nepustí ďalej) a údaj o veľkosti alokačnej jednotky (cluster), ktorý je potrebný pre pohyb v adresovom poli SD karty, keďže adresový systém je logický a pracuje s násobkami alokačných jednotiek. Okrem toho identifikujem zvyšné dôležité adresy (alokačná tabuľka, dátová oblasť, *root* cluster).

Po tejto inicializácii môžem začať čítať súbory. Cez funkciu `FAT32_goToRoot()` si načítam prvý sektor *root* adresára, z ktorého môžem pomocou funkcie `FAT32_nextFile(extension, *FILE)` zistiť názov a počiatočnú adresu súboru. Parametrom `extension` definujem koncovku súboru. Parameter `FILE` je ukazateľ na štruktúru, do ktorej sa uloží názov, koncovka, veľkosť v bajtoch a začiatková adresa súboru. Prvý sektor súboru sa načíta funkciou

`FAT32_file_open(*FILE)`, ktorého parameter je získaná štruktúra z predošlej funkcie. Následne môžem začať čítať dáta pomocou `FAT32_read(*str, maxlen)`.

Vnútrotný mechanizmus aplikácie zaisťuje automatické načítanie ďalšieho sektoru v poradí. V prípade, že už som prečítal celú alokačnú jednotku, je adresa ďalšej jednotky získaná z FAT.

5.1.4 Implementácia lineárneho pohybu

Pohyb v osiach X, Y a Z som rozdelil na dve aplikácie, TOOL (*tool.c, tool.h*) pre zvislý pohyb nástroja v ose Z a PATH (*path.c, path.h*) pre vodorovný pohyb v osiach X a Y. Toto rozdelenie som spravil kvôli tomu, že zdvih nástroja nie je potrebné synchronizovať s plošným pohybom v osiach X a Y a tým pádom je jeho riadenie jednoduchšie. Aplikácií TOOL sa na nasledujúcich riadkoch venovať nebudem, keďže to je len odvodený, značne zjednodušený variant aplikácie PATH.

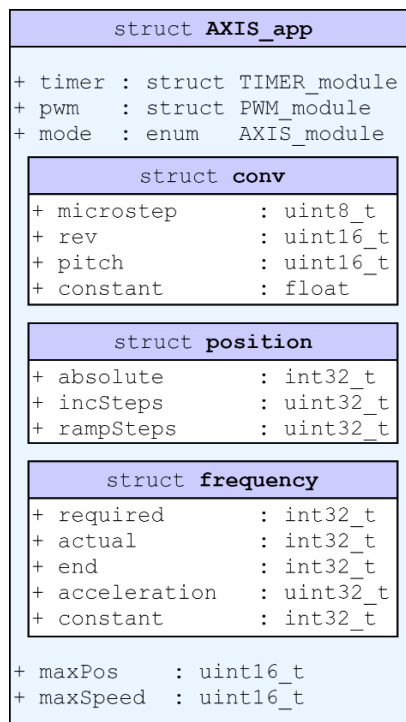
Osa X aj Y má priradenú dátovú štruktúru `struct AXIS_app` (obrázok 43), v ktorej sa nachádzajú potrebné premenné rozdelené do skupín ako lokálne deklarované štruktúry (pre prehľadnosť). V samotnej aplikácii sa následne nachádzajú funkcie:

- `PATH_moveFree(axis, speed)` : voľný pohyb v požadovanej ose (X alebo Y) pri zadanej rýchlosti. Ukončenie pohybu pri `speed = 0`.
- `PATH_moveToAbs(x, y, speed, endSpeed)` : presun na požadovanú absolútnu pozíciu danú súradnicami `x` a `y` rýchlosťou `speed` a ukončenú rýchlosťou `endSpeed` (niekedy nie je potrebné zastaviť na nulovú rýchlosť, ak ďalší vyrezávaný tvar nadväzuje na seba, použitie najmä pri oblúkoch).
- `PATH_moveToInc(x, y, speed, endSpeed)` : podobne ako predchádzajúca, ale posun sa vykonáva o relatívnu vzdialenosť danú parametrami `x` a `y`, ktoré tentokrát môžu byť aj záporné.

Vstupné parametre funkcií sa najskôr prekonvertujú z dĺžkových do frekvenčných jednotiek cez konverznú konštantu. Tú vypočítam ako:

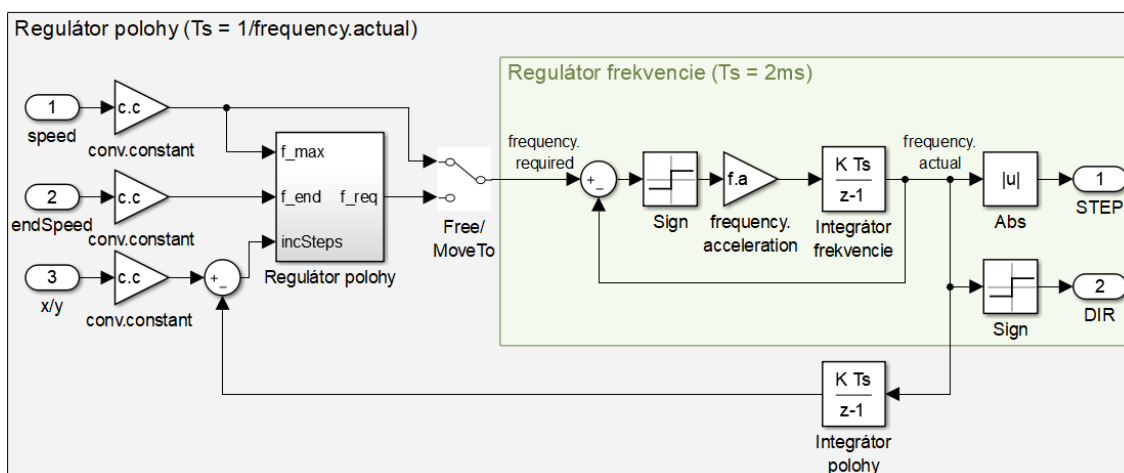
$$conv.constant = \frac{conv.rev \cdot conv.microstep}{conv.pitch} \quad [-] \quad (5.1)$$

Kde *conv.rev [-]* je počet krokov na otáčku motora (v mojom prípade 200), *conv.microstep [-]* je nastavené mikrokrokovanie (1, 2, 4, 8, alebo 16) a *conv.pitch [mm]* značí prejdenú vzdialenosť na jednu otáčku.



Obrázok 43: Dátová štruktúra premenných pre jednu os

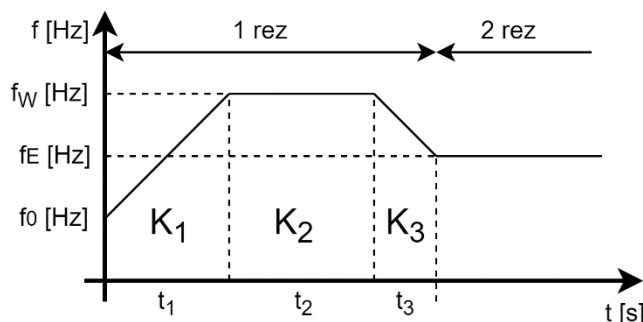
Pre voľný pohyb pomocou funkcie `PATH_moveFree()` nie je potrebné poznať polohu, preto môžeme okamžite začať vnútornú reguláciu výstupnej frekvencie podľa obrázku 44. Vzorkovaciu frekvenciu generuje timer a jej hodnota je 2 ms. V prerušení časovača sa porovnáva aktuálna frekvencia s požadovanou a podľa znamienka sa výstupná frekvencia postupne lineárne zvyšuje/znižuje. Ak dosiahnem nulový rozdiel, resp. rozdiel blízky nule, tak časovač sa zastaví a šetrí sa tak výpočtový výkon a obsluhy prerušenia. Opätovné spustenie časovača sa vykoná pri zapísaní novej požadovanej frekvencie. Strmosť rampy je určená akceleráciou.



Obrázok 44: Približná bloková schéma frekvenčnej a polohovej regulácie v MCU

Pri posune na požadovanú pozíciu je potrebné vypočítať celkový počet krokov (`position.incSteps`) ako rozdiel aktuálnej absolútnej polohy (`position.absolute`) a požadovanej absolútnej polohy zo skonvertovaného parametru funkcie. Tento výpočet spravím pre osu X aj Y a podľa toho, na ktorej osi potrebujem spraviť viac krokov, nastavím jednu osu ako referenčnú (výstup priamo z PWM) a kroky na druhej, sekundárnej osi budem dopočítavať.

Pre výpočet krokov potrebných na spomalenie (`position.rampSteps`) použijem všeobecný rýchlostný profil s počiatočnou aj koncovou rýchlosťou:



Obrázok 45: Všeobecný rýchlostný profil s konštantným zrýchlením

Na začiatku môžem vychádzať z určitej počiatočnej frekvencie f_0 [Hz] a potrebujem sa dostať na požadovanú frekvenciu f_W [Hz] pri akcelerácii a_A [s^{-2}]. Na konci pohybu sa musím dostať na koncovú rýchlosť f_E [Hz] rovnakou, ale zápornou akceleráciou a_D [s^{-2}]. Mojm cieľom je vypočítať počet krokov K_3 .

Pre obsah pod krivkou platí nasledujúca rovnica:

$$K_3 = f_W \cdot t_3 + \frac{(f_E - f_W) \cdot t_3}{2} = \frac{1}{2} \cdot t_3 \cdot (f_W + f_E) \quad [-] \quad (5.2)$$

Čas t_3 nepoznám, avšak určiť ho môžem z rovnice (a je záporné):

$$f_E = f_W + a_D \cdot t_3 \Rightarrow t_3 = \frac{f_E - f_W}{a_D} \quad [s] \quad (5.3)$$

Po dosadení (5.3) do (5.2) a upravení dostanem rovnicu:

$$K_3 = \frac{f_E^2 - f_W^2}{2 \cdot a_D} \quad [-] \quad (5.4)$$

V rovnici (5.4) už poznám všetky veličiny. Táto rovnica sa dá ale použiť len v prípadoch, kedy dosiahnem požadovanú frekvenciu f_W , tzn. počet krokov K_2 je väčší alebo rovný nule.

$$K_2 = K - K_1 - K_3 = K - \frac{f_W^2 - f_0^2}{2 \cdot a_A} - \frac{f_E^2 - f_W^2}{2 \cdot a_D} \geq 0 \quad [-] \quad (5.5)$$

V ostatných prípadoch musím počítať s tým, že požadovaná frekvencia f_W je neznáma a platí nasledujúca rovnica:

$$K_3 = K - K_1 = K - \frac{f_W^2 - f_0^2}{2 \cdot a_A} \quad [-] \quad (5.6)$$

Na odstránenie f_W potrebujem ďalšiu rovnicu ($a_D = -a_A = a$):

$$K = K_1 + K_3 = \frac{f_W^2 - f_0^2}{2 \cdot a} - \frac{f_E^2 - f_W^2}{2 \cdot a} = \frac{f_W^2}{a} - \frac{f_0^2 + f_E^2}{2 \cdot a} \quad [-] \quad (5.7)$$

$$f_W^2 = K \cdot a + \frac{f_0^2 + f_E^2}{2} \quad [Hz] \quad (5.8)$$

Po následnom dosadení (5.8) do (5.6) a upravení dostanem rovnicu:

$$K_3 = \frac{K}{2} + \frac{f_0^2 - f_E^2}{4 \cdot a} \quad [-] \quad (5.9)$$

Všetky predchádzajúce výpočty (5.4 alebo 5.9) sa vykonajú len raz, pri zavolaní funkcie `PATH_moveToAbs()` alebo `PATH_moveToInc()`.

Polohová regulácia sa vykonáva v strede PWM periódy (PWM je zarovnaná na stred) v rutine prerušenia. Je to kvôli tomu, aby sa zmeny stihli vykonať ešte pred skončením aktuálnej periódy a nevzniklo tak dopravné oneskorenie. U referenčnej osi sa dekrementuje hodnota `position.incSteps` a v momente, keď sa bude rovnať hodnote `position.rampSteps` sa spustí regulátor frekvencie s požadovanou hodnotou `frequency.endFreq` (spomaľovanie). Po vykonaní potrebného počtu krokov sa PWM zastaví a prípadne sa zavolá užívateľsky definovaná callback funkcia.

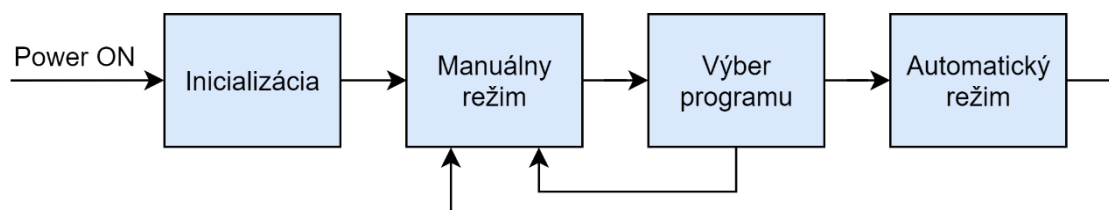
Pri dopočítavaní krokov na sekundárnej osi vychádzam zo základnej rovnice priamky prechádzajúcej cez počiatok $y = kx$. Konštanta k je pomer medzi počtom krokov na sekundárnej a referenčnej osi získaný ešte pri prvom výpočte vo funkcií `PATH_moveToXXX()`. Vypočítam dve hodnoty y :

$$\begin{aligned} y_1 &= k \cdot position.incSteps & [-] \\ y_2 &= k \cdot (position.incSteps + 1) & [-] \end{aligned} \quad (5.10)$$

Keďže všetky veličiny sú celočíselné (konštanta k nie je vypočítaná, ale stále používam pomer dvoch hodnôt), tak dochádza k orezaniu desatinnej časti a v momente kedy sa $y_1 \neq y_2$ dochádza k vykonaniu kroku.

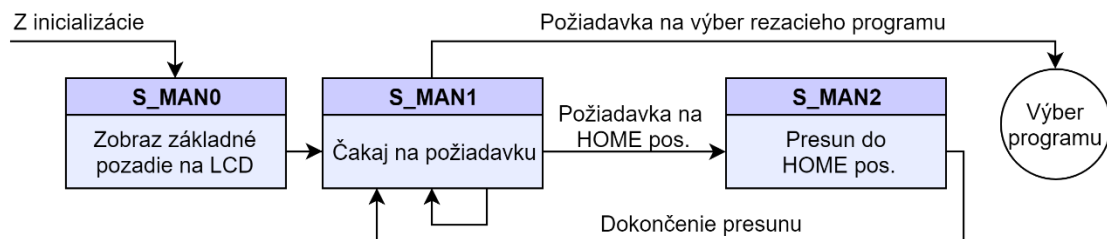
5.2 Hlavný program

Základná bloková schéma hlavného riadiaceho programu sa nachádza na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 46: Základná bloková schéma riadiaceho programu

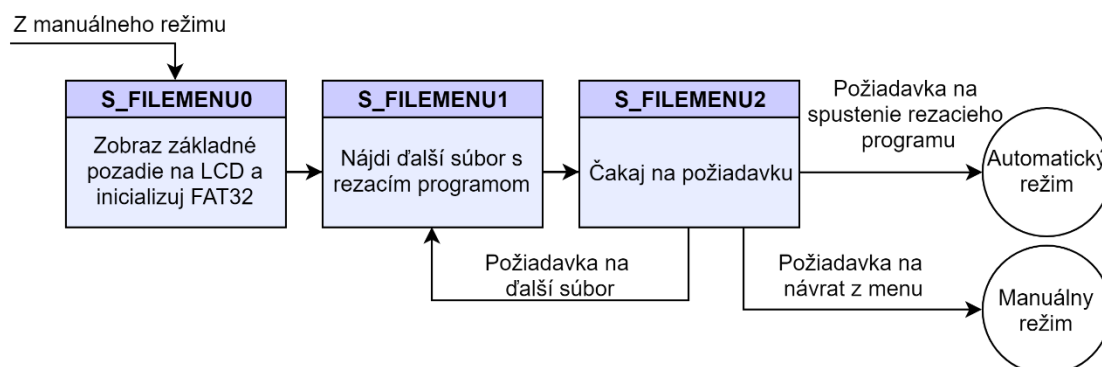
Po spustení napájania prebehne inicializačný proces, v ktorom sa nastaví I/O piny MCU, nakonfigurujú sa potrebné periférie (resp. ich ovládače a aplikácie) a na LCD displej sa na 1 sekundu zobrazí logo firmy (v tomto prípade logo VUT). Následne sa začne vykonávať sekvenčný program vo forme stavového automatu, začínajúci manuálnym režimom.



Obrázok 47: Prechodový diagram pre manuálny režim

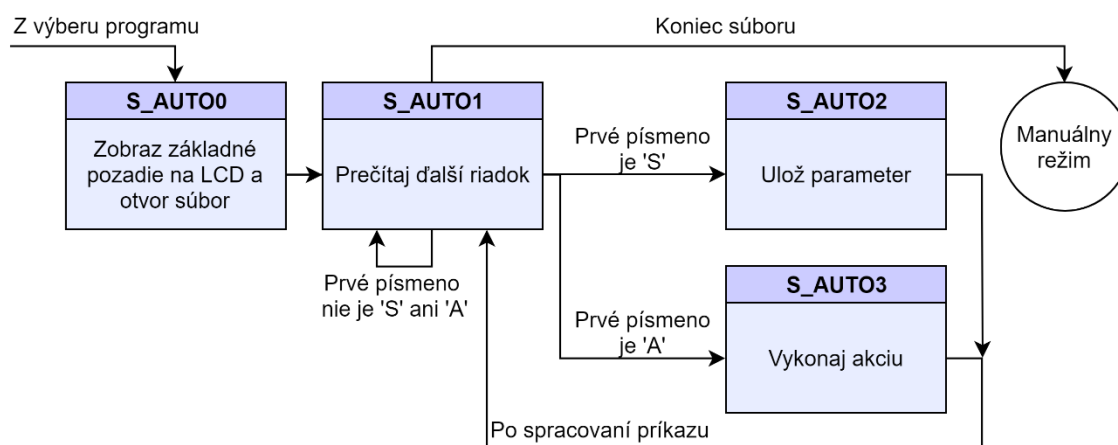
V stave S_MAN0 sa nastaví pozadie LCD displeja určené na zobrazovanie aktuálnych súradníc vo všetkých osiach. Následne sa bez žiadnej prechodovej podmienky prejde do stavu S_MAN1 , kedy sa čaká na externé požiadavky z klávesnice. Počas celého bloku manuálneho riadenia sa na displeji každých 100 ms aktualizuje údaj o polohe a pomocou joystika (hrubé polohovanie) a klávesnice (jemné polohovanie) môžem manuálne pohybovať nástrojom vo všetkých osiach. Po stlačení tlačidla *HOME* sa nástroj presunie na nulový bod CNC zariadenia,

nachádzajúci sa v ľavom dolnom rohu a hornej pozícií osi Z. Ten sa definuje pri náraze na koncové spínače s nasledujúcim opačným posunutím o určitú vzdialenosť, aby sa osi odtiahli od koncových spínačov (stav *S_MAN2*). Ak chceme vybrať rezací program, stlačím tlačidlo *FILE* a prejdem do menu pre výber programu.



Obrázok 48: Prechodový diagram pre výber programu

V prvom stave sa nastaví jednoduché pozadie LCD displeja s popisom „Choose file:“, identifikuje sa SD karta (ak ešte nebola), inicializuje sa aplikácia FAT32 a prejde sa do *root* adresára. Bez prechodovej podmienky sa prejde do stavu *S_FILEMENU2*, v ktorom sa získa súbor s programom a jeho názov sa zobrazí na displej. Následne sa čaká na požiadavku. Ak stlačím tlačidlo *ESC*, prejdem naspäť do manuálneho režimu. V prípade stlačení tlačidla *ŠTART* sa začne vykonávať rezací program z vybraného súboru.



Obrázok 49: Prechodový diagram pre automatický režim

Na začiatku automatického režimu sa nastaví podobná obrazovka ako pri manuálnom režime, zobrazujúca aktuálne súradnice aktualizované každých 100 ms.

Následne sa v stave *S_AUTO1* prečíta jeden riadok zo súboru. Ak som na konci súboru, prejdem do man. režimu. V ostatných prípadoch spracujem daný riadok.

Súbor s rezacím programom je textový a je poskladaný zo sekvenčných príkazov. Tie sú definované nasledujúcim predpisom:

- Parameter: SX 1234.56
- Akcia: AX

Parameter môže byť súradnica v ose X, Y, Z, rýchlosť pohybu, časový interval atď. Akcia znamená napr. vykonanie pohybu, presun do referenčnej pozície atď. Na mieste písmena ,X' sa nachádza kódové označenie príkazu (zoznam je v prílohe 4).

Tento systém som si zvolil kvôli jednoduchosti spracovania. Jednotlivé parametre sú usporiadané za sebou v poli, rovnako aj akcie v poli ukazateľov na príslušné funkcie. Po prečítaní riadku skontrolujem prvé písmeno a podľa neho prejdem do príslušného stavu. Následne od druhého písmena odčítam znak ,A' a dostanem sa tak na úroveň indexu pol'a. Ak sa jedná o parameter, skonvertujem číselnú hodnotu na danom riadku a uložím ju. V prípade akcie zavolám príslušnú funkciu. Po dokončení prečítam ďalší riadok a proces sa opakuje.

Pri spracovaní platia nasledujúce pravidlá:

1. Jeden príkaz na jeden riadok súboru, zakončený ,\n' alebo ,\r'
2. Riadky začínajúce inými znakmi ako ,S' a ,A' sú ignorované
3. Všetky znaky za príkazom (resp. za číselnou hodnotou) sú ignorované. Vytvorený priestor pre možné komentáre.
4. Ak nepoznám kódové označenie, ignorujem príkaz.
5. Ignorované sú aj medzery.
6. Parametre musím nastaviť pred začatím akcie (ak je potreba). Vždy sa pamätajú posledné zadané hodnoty.

Počas celého priebehu hlavného programu sú aktívne prerušenia od koncových spínačov. V prípade nárazu dôjde k zastaveniu všetkých pohybov a program prejde do chybového stavu, v ktorom nie je možné vykonávať žiadne akcie. Po stlačení tlačidla *ŠTART* sa z chybového stavu dostanem do manuálneho režimu.

5.3 Zhrnutie kapitoly

V tejto kapitole som sa venoval návrhu riadiaceho programu. Zariadenie je v tomto bode schopné načítavať rezacie dáta z SD karty a vykonávať automatický program. V nasledujúcej kapitole je rozpísané celkové oživovanie s demonštráciou funkcie.

6 REALIZÁCIA A OŽIVENIE HW

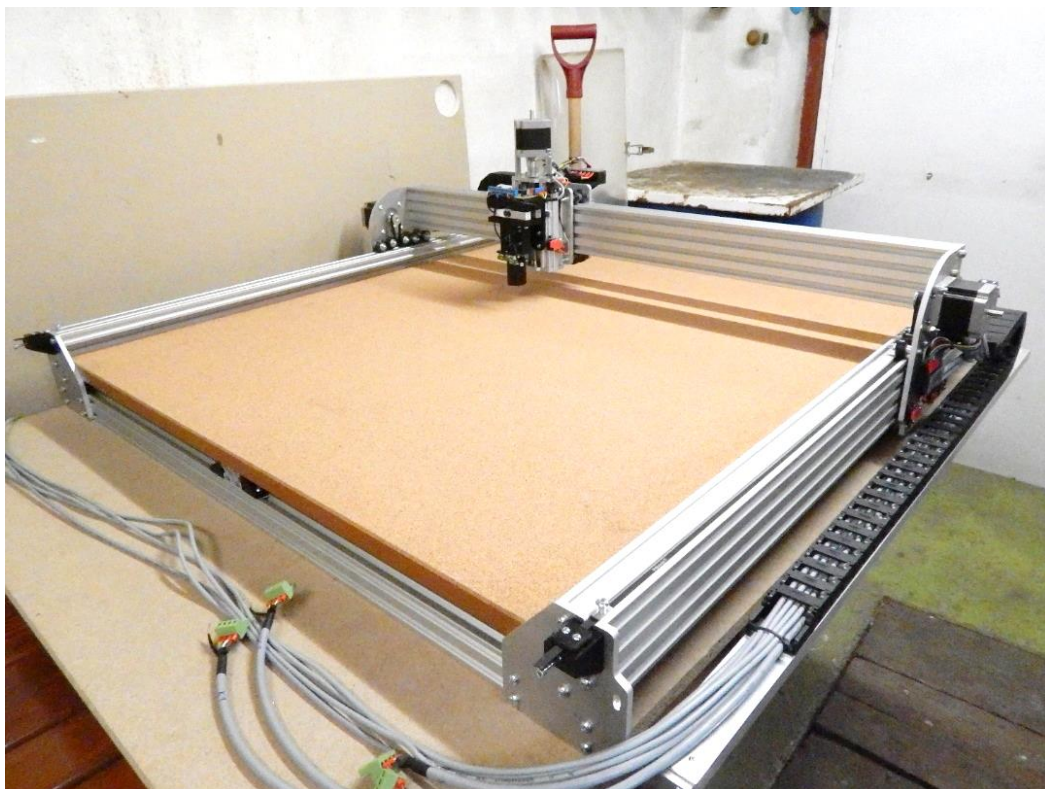
Montáž mechanickej časti rezačky bola veľmi jednoduchá, keďže sa prakticky jedná o „skladačku“ a prebiehala bez väčších problémov. Na konce niektorých *V-slot* profilov som musel vyrezať M5 závit pre uchytenie hliníkových dosiek. Asi najväčší problém bol nastaviť vodiace kolieska. Vzhľadom na nepresnosti pri montáži sa niekedy stane, že niektoré kolieska sa pri pohybe netočia. Excentrickými dištančnými stĺpkami dokážem nastaviť vôľu medzi kolieskami a vodiacou drážkou, avšak pri veľkom dotlačení vznikol vysoký pohybový odpor, preto som zvolil určitý kompromis. Rovnomernosť pracovnej plochy bola zameraná a maximálna odchýlka bola na úrovni 0,3 mm. Vzhľadom na to, že na základnej doske je ešte korková doska a nástroj bude pri rezaní prečnievať popod kartón, tak túto nepresnosť môžem tolerovať. Samotný nástroj je takmer celý vytlačený na 3D tlačiarňi. Otáčanie je plynulé, odpor kladú len valivé ložiská. Zatiaľ mám vyrobený nástavec s nožíkom. Os rotácie a os špičky čepele sú od seba vzdialené 8 mm. Pri testovaní sa nôž sám natáčal po smere pohybu bez nejakých neočakávaných problémov. Čepel' noža je použitá z vysúvacieho odlamovacieho nožika šírky 9 mm. Porovnanie aktuálnych parametrov rezačky s požadovanými je v nasledujúcej tabuľke:

Tabuľka 17: Požadované a aktuálne parametre CNC rezačky

Názov	Hodnota	
	Požadovaná	Aktuálna
Pracovná plocha	min. 600x600 mm	830x850 mm
Výška zdvihu	min. 20 mm	50 mm
Presnosť v ose x, y	< 0,5 mm	< 0,3 mm
Presnosť v ose z	< 0,1 mm	-
Max. rýchlosť v ose x, y	400 mm/s	400 mm/s (vyššie rýchlosti neboli skúšané)
Rýchla výmena nástroja	áno	áno (manuálna)
Základné bezpečnostné prvky	áno	áno (koncové spínače, tlačidlo núdzového zastavenia)
Cena	max. 15 000 CZK	< 15 000 CZK

Celková cena je vrátane elektroniky a je len odhadnutá. Presná kalkulácia nebola možná (alebo by bola veľmi náročná), keďže veľa elektronických súčiastok som už mal doma a aj niektoré časti mechaniky boli vyrobené „po známosti“ (hliníkové dosky rezané laserom a hlavná drevená doska podstavy).

Presnosť polohovania je len odhadnutá z testovacích meraní (kapitola 6.1).



Obrázok 50: Pohľad na mechanickú časť CNC rezačky

Pri oživovaní jednotlivých modulov elektrických zapojení som nezaznamenal výraznejšie problémy, okrem modulu interface, kde bolo potrebné zmeniť niektoré prepojenia a tak si to vyžadovalo vytvoriť novú DPS. U LCD displeja bol problém s podsvietením (veľmi slabé), keďže z výroby je nastavený na 5V, ale ja používam 3,3V napäťové úrovne. Na internete sa nenachádzajú žiadne schémy od neho a tak som „reverzným inžinierstvom“ dospel k tomu, že som priletoval zopár rezistorov a kondenzátorov pre interný napäťový step-up menič a momentálne funguje bez problémov.

Jednostranné dosky plošných spojov som si vyrábal sám metódou fotocesty. Na polotovare pre výrobu plošného spoja (FR-4 s medenou vrstvou 35 μ m) bola nalaminovaná vrstva negatívneho fotorezistu, ktorý sa osvietil ultrafialovým žiarením cez predlohu plošného spoja. Následne sa vyvolal v roztoku uhličitanu sodného (Na₂CO₃), vyleptal v roztoku chloridu železitého (FeCl₃) a zvyšná vrstva fotorezistu sa zmyla v hydroxide sodnom (NaOH). Dvojstranné DPS na ovládače krokových motorov som si dal vyrobiť do Číny firmou *PCBWay*.

Na všetky DPS sú vytvorené rôzne krabičky vytlačené na 3D tlačiarňi z materiálu PLA. Modul manuálneho riadenia (klávesnica, LCD, joystick), interface modul a vývojový kit *SAME70-XPLD* sa nachádzajú v jednej krabičke, ktorá je vybavená všetkými potrebnými konektormi na pripojenie ostatných modulov a koncových snímačov. Na krabičke sa nachádza aj otvor pre micro USB konektor,

používaný na programovanie a debug MCU, ktorý nebude používaný behom bežnej prevádzky.

6.1 Demonštrácia funkcie zariadenia

Na overenie funkčnosti zariadenia boli spravené tri automatizované úlohy. Video z testovania sa nachádza v prílohe 9. Prvou úlohou som zisťoval presnosť polohovania na krátke vzdialenosti. V ose X aj Y som vykonal desať krátkych (10 mm) pohybov s návratom do počiatku, počas ktorých som robil bodky s fixkou pripevnenou ku konštrukcii nástroja. Kontroloval som rozostupy medzi jednotlivými bodmi. S výsledkom tohto testu som spokojný, keďže som nezaznamenal žiadne viditeľné odchýlky.

V druhej úlohe som spravil niekoľko pohybov maximálnou rýchlosťou 400 mm.s^{-1} pri akcelerácii 500 mm.s^{-2} z určitého bodu a s návratom na ten konkrétny bod (znova vyznačený fixkou). Kontroloval som prekrytie tých dvoch bodov, ktoré bolo z pohľadu identické.

V tretej úlohe som napísal program pre vyrezanie obdĺžnika do kartónu s hrúbkou 2,5 mm. V čase testovania som ešte nemal k dispozícii funkčnú kruhovú interpoláciu, takže nemôžem otestovať rezanie oblúkov. Nôž bez problémov prekonal odporovú silu kladenú materiálom pri max. reznej rýchlosti 300 mm/s bez viditeľnej odchýlky. Jediný problém bolo mierne ohýbanie konštrukcie noža vplyvom rezného odporu. Riešenie spočíva v lepšom uchytení na dosku osy Z (viac skrutiek na väčšej ploche), prípadne výmenu niektorých nosných PLA častí konštrukcie nástroja za hliníkové diely.

ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo navrhnuť CNC zariadenie určené na rezanie kartónových dosiek. Práca je rozdelená do viacerých kapitol, ktoré na seba nadväzujú a postupne vytvárajú návrh rezačky aj so samotnou fyzickou realizáciou. Všetky body zadania sa mi podarilo splniť bez väčších problémov

V druhej kapitole som sa venoval dostupným riešeniam na trhu. Zistil som, že vo veľkosériovej výrobe sa používajú vysekávanie automaty. Pre mňa bola ale zaujímavejšia iná skupina, a to veľkoformátové CNC rezačky určené na malosériovú a kusovú výrobu. Ich princíp fungovania spočíva vo vyrezaní vzoru do kartónovej dosky pomocou rezacieho noža pohybujúceho sa po reznej trajektórii. Ich cena bola ale príliš vysoká a preto ma to viedlo k myšlienke vlastného návrhu takéhoto zariadenia. Určil som si dve základné vlastnosti, spoločné s už dostupnými riešeniami: veľkú pracovnú plochu a vysokú rýchlosť pohybu. Okrem toho som chcel, aby konštrukcia bola čo najjednoduchšia a zároveň spoľahlivá. Z viacerých druhov rezných nástrojov som si vybral vlečný nôž, ktorý nepotrebuje na svoje otáčanie externý mechanizmus vo forme krokového alebo servo motora a je tak nenáročný na riadenie (nôž len nasleduje reznú trajektóriu).

Návrh mechanickej konštrukcie je rozpísaný v kapitole 3. Základ konštrukcie tvoria hliníkové stavebnicové profily V-slot, ktoré majú špeciálne upravené drážky do tvaru písmena V. V nich sa následne valia kolieska prichytené na pohyblivú časť konštrukcie. Výhoda takéhoto riešenia je v zlúčení nosnej konštrukcie a lineárneho vedenia do jedného veľmi modulárneho a jednoduchého riešenia, ktoré sa v súčasnej dobe začína hojne rozširovať s príchodom lacných 3D tlačiarňí. Podstava rezačky je tvorená drevenou doskou o rozmere 956x1000 mm spolu s korkovou doskou, ktorá tvorí mäkký podklad pre rezací nôž. Aktívna pracovná plocha má rozmery 850x830mm a výška zdvihu je 50mm. Na prevod rotačného pohybu motorov na lineárny som si pre plošný pohyb zvolil posuv pomocou remeňa a na osu Z (zvislý pohyb) som použil trapézovú skrutku, ktorá má jemnejšie polohovanie oproti remeňom. Ďalším krokom bol výber motorov. Tu som mal na výber servo motory alebo krokové motory. Kvôli jednoduchosti riadenia a cene som vybral krokové. V tomto momente som už mal navrhnutú väčšinu konštrukcie v programe SolidEdge ST9, takže som mohol získať celkom presné hodnoty hmotností, ktoré som použil na výpočet minimálneho krútiaceho momentu. Vo výsledku som zvolil motor od firmy OMC-StepperOnline s kódovým označením 23HS22-3008D so statickým krútiacim momentom 1,26 Nm. Je použitý na všetky osi. Každý motor je minimálne 2-krát predimenzovaný, čo je v prípade riadenia bez spätnej väzby nutnosť. Ako základný bezpečnostný prvok je použité tlačidlo núdzového zastavenia.

Štvrtá kapitola sa venuje riadiacej elektronike. Na začiatku som si určil približné usporiadanie elektronických obvodov a následne som sa pustil do návrhu. Na riadenie krokových motorov som si vybral čip TB6600HG od firmy Toshiba, ktorý je veľmi populárny v oblasti hobby CNC a má dobrý pomer cena/výkon. Štyri takéto ovládače sú zapojené na konektorovú zbernicu a pripojené do hlavnej riadiacej jednotky, ktorú tvorí 32 bitový mikrokontrolér ARM Cortex-M7 s označením ATSAME70Q21 od firmy Microchip. Vybral som ho hlavne z dôvodu jeho vysokej výpočtovej výkonnosti (max. taktovacia frekvencia je 300 MHz), veľkým počtom I/O a integráciou FPU. Medzi ďalšie časti elektroniky patrí klávesnica 4x4, joystick pre manuálne riadenie, grafický monochromatický LCD displej s rozlíšením 128x64 pixelov, mechanické koncové spínače a modul snímačov nástroja. Práve týmto modulom som rozšíril stávajúcu základnú funkciu vlečného noža, keď som pridal inkrementálny enkóder na kontrolné snímanie uhlu natočenia a odporové tenzometrické snímače na meranie prítlaku. DPS som si vyrábal sám metódou fotocesty, okrem tej pre ovládač krokového motoru, ktorá je dvojvrstvová a vyrobená profesionálne.

V kapitole 5 som rozpísal návrh firmware pre MCU. Programovací jazyk som si zvolil C. Ešte pred samotnou tvorbou hlavného programu som si musel napísať vlastný framework pre prácu s perifériami, keďže dodávané riešenie od firmy Microchip s názvom Atmel START bolo veľmi obmedzujúce vzhľadom na jeho beta verziu (nedostatočná konfigurácia periférií, nedostatok potrebných funkcií apod.). Jednotlivé programové moduly som otestoval každý zvlášť ešte pred písaním hlavného programu. Ten pozostáva z inicializácie, manuálneho režimu pre voľný pohyb nástroja a automatizovaného režimu, v ktorom MCU načítava rezací program z SD karty a vykonáva príslušné príkazy. Flash a RAM pamäť MCU je zaplnená minimálne (menej ako 2%), to mi dáva obrovskú rezervu pre budúce vylepšenia. Pri vývoji prototypu je tento MCU vhodný, avšak v prípade sériového výrobného nasadenia by som uvažoval o nižších a lacnejších verziách MCU, ktoré by neobsahovali zbytočné nepoužívané súčasti.

Výsledné CNC zariadenie má veľký potenciál na aplikovanie možných vylepšení, ktoré by ale zabrali ďalšie hodiny práce, preto tu nie sú zahrnuté. U mechanickej konštrukcie je možné jednoducho vymeniť krokové motory za silnejšie a keďže upevnenie nástroja je univerzálne, tak by som mohol použiť napr. frézku. Hlavné vylepšenia sa ale budú robiť na softvérovej časti. Na tvorbu rezacích programov budem potrebovať aplikáciu, ktorá bude konvertovať vektorový formát na formát pre rezačku. Ďalej by som chcel rozšíriť možnosti komunikácie o USB (virtual COM port) a Ethernet pre možné pripojenie do lokálnej siete.

Literatúra

- [1] Vysekávací automat YOCO SUMO JY-1650E. *O nás* [online]. Košice: HAGEL, 2003 [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: http://www.hagel.sk/index.php?page=shop.product_details&flypage=shop.flypage&product_id=1393&category_id=30&option=com_virtuemart&Itemid=66&lang=sk.
- [2] DCZ50 Carton Box Cutting Machine. *Hopetool* [online]. Jinan: Jinan Hopetool CNC Equipment Co.,Ltd, b.r. [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <http://www.htcnclasers.com/digital-cutting-machine/carton-box-cutting-machine/dcz50-carton-box-cutting-machine.html>
- [3] *Cutter SPEEDY* [online]. Praha: 3DSolid, b.r. [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <https://www.3dsolid.cz/>
- [4] Laser Engravers and Cutters | Speedy Series of Trotec Laser. *Trotec laser engravers and laser cutters* [online]. Marchtrenk: Trotec Laser, c1998-2016 [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <https://www.troteclaser.com/en/laser-machines/laser-engravers-speedy-series/>
- [5] Tangential Knife Cutters. *Edward Mathias Home Page* [online]. Frodsham: Mathias, 2015 [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <https://www.edwardmathias.com/tangentialknifecutters.html>
- [6] Oscilační nůž. *Cutter SPEEDY* [online]. Praha: 3DSolid, b.r. [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <https://www.3dsolid.cz/en/cutter-speedy/oscillating-knife>
- [7] How does ultrasonic technology work. *The specialist in continuous ultrasonic cutting & welding | Ultrasonics, cutting machines - ultrasonic sealing, ultrasonic welding* [online]. Roche la Molière: SPOOLEX, 2002 [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <http://www.decoup.com/en/content/how-does-it-work>
- [8] ISM Provides High-Amplitude Industrial Ultrasonic Horns. *High-Power Ultrasonic Technology: Sonicators, Homogenizers* [online]. New York: WebDevTM, b.r. [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: http://sonomechanics.com/technology/ultrasonic_horn_designs_and_properties/
- [9] Difference between A & B / Drag Knife Technology versus Tangential Knife Technology. *Summa / Vinyl Cutters / Flatbed Systems* [online]. Gistel: Summa, b.r. [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <https://www.summa.eu/en/blog/DragsVsTangential>
- [10] *4ISP - lasery, laserové gravírky, CNC frézy a komponenty* [online]. b.r. [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <https://cnc.inshop.cz/>

- [11] OpenBuilds V-Slot Aluminum Extrusion by Mark Carew - Kickstarter. *Kickstarter* [online]. Kickstarter, 2018 [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: https://www.kickstarter.com/projects/openrail/openbuilds-v-slot?ref=nav_search&result=project&term=openbuilds
- [12] OPEN RAIL Open Source Linear Bearing System by Mark Carew - Kickstarter. *Kickstarter* [online]. Kickstarter, 2018 [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: https://www.kickstarter.com/projects/openrail/openrail-open-source-linear-bearing-system?ref=nav_search&result=project&term=openbuilds
- [13] *Build List / OpenBuilds* [online]. OpenBuilds Design, b.r. [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <https://openbuilds.com/>
- [14] *Rat Rig Online Store* [online]. Rat Rig, 2017 [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <http://www.ratrig.com/>
- [15] PowerGrip® GT3. *The world's most trusted name in belts, hose and hydraulics* [online]. Gates, c1999-2018 [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: https://ww2.gates.com/europe/brochure.cfm?brochure=12779&location_id=19466#
- [16] *Selecting the SureStep™ Stepping System* [online]. 2018, s. 2-18 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <https://cdn.automationdirect.com/static/manuals/surestepmanual/appxc.pdf>
- [17] Coefficients Of Friction. *RoyMech Index page* [online]. 2013 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm#Rolling
- [18] Dual Shaft Nema 23 Uni/Bipolar 1.8deg 1.26Nm. *Stepper Motor & Stepper Motor Driver - STEPPERONLINE* [online]. Nanjing City: STEPPERONLINE, c2005-2018 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <https://www.omc-stepperonline.com/dual-shaft-nema-23-unibipolar-18deg-126nm-1784ozin-3a-57x56mm-8wires-23hs22-3008d.html?search=Dual%20Shaft%20Nema%2023%20Uni%20Bipolar%201.8deg%201.26Nm%20%28178.4oz.in%29%203A%2057x56mm%208%20Wires%20>
- [19] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-7361-033-7.
- [20] *Miniature Basic Switch that Offers High Reliability and Security* [online]. OMRON Corporation, b.r. [cit. 2018-11-26]. B010-E1-15. Dostupné z: <https://www.mouser.sk/datasheet/2/307/en-v-952614.pdf>
- [21] Komponenty žeriavov. *Žeriavy a žeriavová technika | DROBEC - ŽERIAVY* [online]. Snina: DROBEC ŽERIAVY, 2011 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z:

- <http://www.drobec-zeriavy.sk/wp-content/gallery/kabelove-bubny-a-energeticke-retaze/energeticka-retaz-2.jpg>
- [22] Microstepping DMOS Driver *with Translator* [online]. Allegro MicroSystems, 2016 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/en/Document/6f0fb51cbb54fa8897537d4eab77da55/A5977.pdf>
- [23] TB6560AHQ, TB6560AFG: *PWM Chopper-Type Bipolar Driver IC for Stepping Motor Control* [online]. Toshiba Corporation, 2014 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=28726&prodName=TB6560AHQ>
- [24] TB6600HG: *PWM Chopper-Type bipolar Stepping Motor Driver IC* [online]. Toshiba Corporation, 2016 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=14683&prodName=TB6600HG>
- [25] Zener + MOSFET *overvoltage protection* [online]. In: . 2017 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/121670/zener-mosfet-overvoltage-protection>
- [26] Quad-Channel Digital Isolators: *ADuM1400/ADuM1401/ADuM1402* [online]. Analog Devices, c2003–2016 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adum1400_1401_1402.pdf
- [27] Inside iCoupler® Technology [online]. Analog Devices, 2019 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/inside-icoupler-technology.html>
- [28] RETRIGGERABLE MONOSTABLE MULTIVIBRATORS [online]. Texas Instruments, 2018 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn54ls123.pdf>
- [29] Single/Dual Channel *Low Voltage Push-Pull Output Comparators* [online]. Diodes Incorporated, 2015 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AZV3001.pdf>
- [30] Low-Power Linear Active *Thermistor ICs* [online]. Microchip Technology, c2005–2016 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/20001942g.pdf>
- [31] China PCB Prototype & *Fabrication Manufacturer - PCB Prototype the Easy Way* [online]. HK Weiku information & Technology, b.r. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.pcbway.com/>

- [32] LM2596 SIMPLE SWITCHER® *Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator* [online]. Texas Instruments, 1999 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
- [33] ST7920: *Chinese Fonts built in LCD controller/driver* [online]. Sitronix, 2002 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: https://www.lcd-module.de/eng/pdf/zubehoer/st7920_chinese.pdf
- [34] HX711: *24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales* [online]. AVIA Semiconductor, b.r. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: https://www.mouser.com/ds/2/813/hx711_english-1022875.pdf
- [35] HX711 Module *Load Cell Voltage Amplifier* [online]. JSUMO, 2012-2018 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.jsumo.com/hx711-module-load-cell-voltage-amplifier>
- [36] 400W 36V 11A 115/230V *Switching Power Supply Stepper Motor CNC Router Kits* [online]. STEPPERONLINE, 2005-2019 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.omc-stepperonline.com/400w-36v-11a-115230v-switching-power-supply-stepper-motor-cnc-router-kits-s-400-36.html?search=S-400-36>
- [37] SAM E70/S70/V70/V71 *Family: 32-bit ARM Cortex-M7 MCUs with FPU, Audio and Graphics Interfaces, High-Speed USB, Ethernet, and Advanced Analog* [online]. Microchip Technology, 2018 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-E70S70V70V71-Family-DataSheet-DS60001527C.pdf>
- [38] SAME70-XPLD: *User Guide* [online]. Atmel Corporation, 2015 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2007959.pdf>
- [39] Katalógový list: FT232R USB UART IC [online]. FTDI, 2005 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf
- [40] Atmel START [online]. Microchip Technology, 2018 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://start.atmel.com/>
- [41] SD MicroSD Card pinout. *Electronic Circuits Design* [online]. ElectronicCircuitsDesign.com, 2018 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://www.electroniccircuitsdesign.com/pinout/sd-microsd-card-pinout.html>
- [42] SD Specifications: *Physical Layer Simplified Specification Version 2.00* [online]. SD Group (Panasonic, SanDisk, Toshiba) and SD Card Association, c2001-2006 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: http://users.ece.utexas.edu/~valvano/EE345M/SD_Physical_Layer_Spec.pdf

- [43] Everett, H.,R.: Sensors for Mobile Robots theory and application, CRC Press 1995, ISBN1568810482
- [44] Virius, M.: Jazyky C a C++: kompletní průvodce. 2., aktualiz. vyd. Praha: Grada, 2011. ISBN 9788024739175.

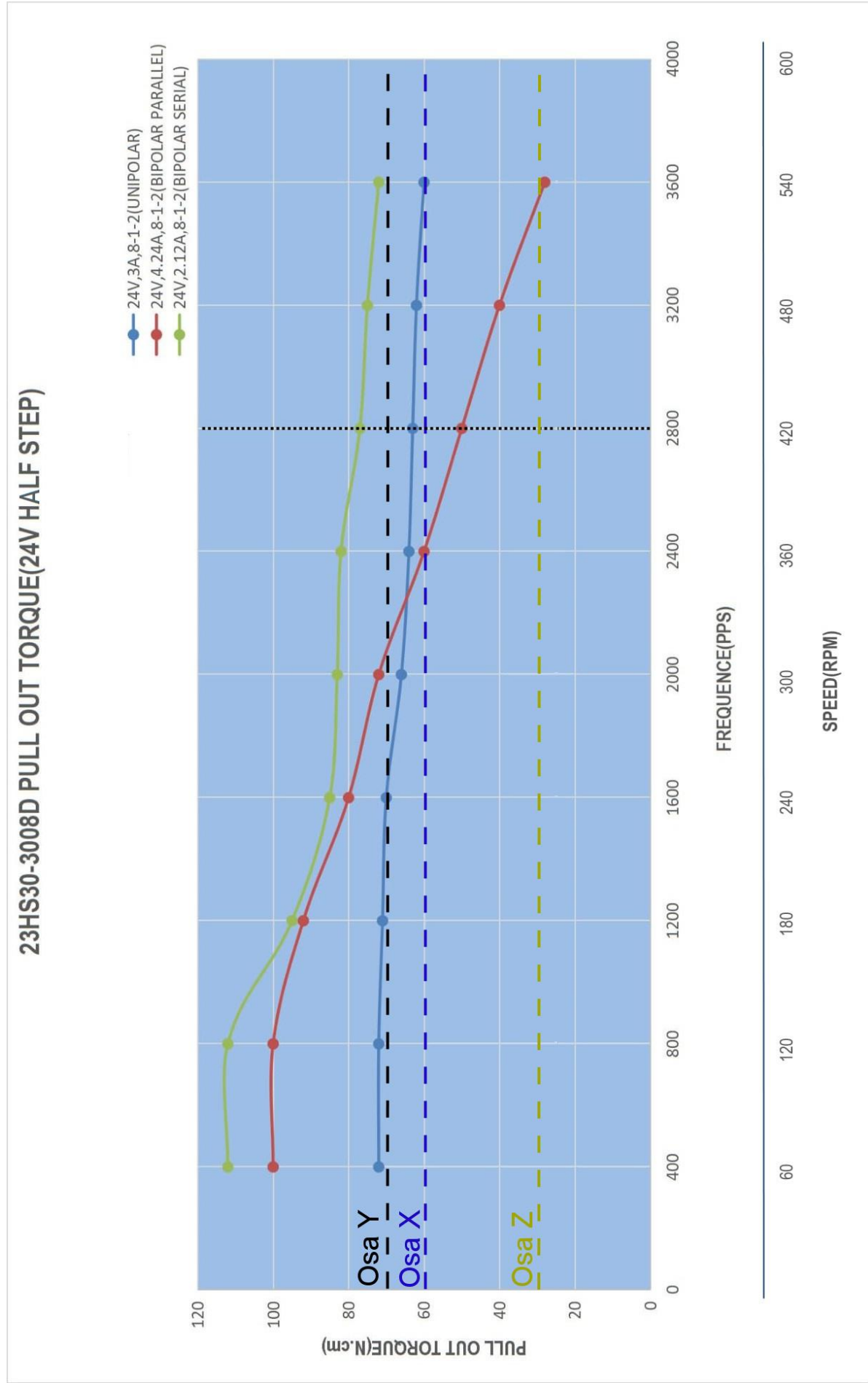
Zoznam symbolov, veličín a skratiek

ABS	-	Akrylonitrilbutadiénstyrén
CNC	-	Computer numerical control
DIN	-	Deutsche Industrie-Normen
DPS	-	Doska plošných spojov
ESR	-	Equivalent series resistance
FAT	-	File Allocation Table
FEKT	-	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
IO	-	Input/output
ISD	-	Over current detection
LCD	-	Liquid Crystal Display
LED	-	Light Emitting Diode
LPI	-	Lines per inch
MBR	-	Master Boot Record
MSB	-	Most Significant Bit
PLA	-	Poly lactide
PLL	-	Phase-Locked Loop
PWM	-	Pulse Width Modulation
RAM	-	Random-Access Memory
ROM	-	Read-Only Memory
SD	-	Secure Digital
SMD	-	Surface Mount Device
SPDT	-	Single Pole, Double Throw
THT	-	Through Hole Technology
TSD	-	Thermal Shut-Down circuit
UART	-	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
UVLO	-	Under Voltage Lock Out
VUT	-	Vysoké učení technické v Brně

Zoznam príloh

- Príloha 1: Momentová charakteristika motoru 23HS22-3008D
- Príloha 2: Výpočet minimálneho krútiaceho momentu krokových motorov
- Príloha 3: Schémy, vzory DPS a osadzovacie plány
- Príloha 4: Zoznam kódov riadiaceho programu
- Príloha 5: Schémy a dosky plošných spojov pre EAGLE v9.0.1 Education
- Príloha 6: Fotodokumentácia (len na CD)
- Príloha 7: Výkresy zostavy
- Príloha 8: Zdrojové kódy pre firmware, zdokumentované pre Doxygen
- Príloha 9: Demonštračné video (len na CD)

Príloha 1: Momentová charakteristika motoru 23HS22-3008D



Príloha 2: Výpočet minimálneho krútiaceho momentu krokových motorov

Osa X:

$$F_t = k \cdot F_{tk} = \xi \cdot m \cdot g \cdot \frac{2}{d_K} = 0,002 \cdot 12 \cdot 9,81 \cdot \frac{2}{0,024} = 19,62 \text{ N} \quad (3.3)$$

$$M_S = \frac{1}{N_m} \cdot (F_t + F_0) \cdot r_R = \frac{1}{N_m} \cdot (F_t + F_0) \cdot \frac{d_R}{2} = \frac{1}{2} \cdot (19,62 + 20) \cdot \frac{0,018}{2} = 0,18 \text{ Nm} \quad (3.4)$$

$$J_R = \frac{1}{8} \cdot m_R \cdot (d_1^2 + d_2^2) = \frac{1}{8} \cdot 0,012 \cdot (0,022^2 + 0,00635^2) = 0,786 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2 \quad (3.5)$$

$$J_Z = m \cdot r_R^2 = m \cdot \frac{d_R^2}{4} = 12 \cdot \frac{0,018^2}{4} = 0,972 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2 \quad (3.6)$$

$$J = J_m + J_R + \frac{J_Z}{N_m} = 30 \cdot 10^{-6} + 0,786 \cdot 10^{-6} + \frac{0,972 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,517 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2 \quad (3.7)$$

$$M_D = J \cdot \varepsilon = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{J}{r_R} \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{2 \cdot J}{d_R} \cdot a(t) = \frac{2 \cdot 0,517 \cdot 10^{-3}}{0,018} \cdot 2 = 0,115 \text{ Nm} \quad (3.8)$$

$$M_m = (M_S + M_D) \cdot S_f = (0,18 + 0,115) \cdot 2 = \underline{0,59 \text{ Nm}} \quad (3.1)$$

Osa Y:

$$F_t = k \cdot F_{tk} = \xi \cdot m \cdot g \cdot \frac{2}{d_K} = 0,002 \cdot 5 \cdot 9,81 \cdot \frac{2}{0,024} = 8,18 \text{ N} \quad (3.3)$$

$$M_S = \frac{1}{N_m} \cdot (F_t + F_0) \cdot r_R = \frac{1}{N_m} \cdot (F_t + F_0) \cdot \frac{d_R}{2} = \frac{1}{1} \cdot (8,18 + 20) \cdot \frac{0,018}{2} = 0,25 \text{ Nm} \quad (3.4)$$

$$J_R = \frac{1}{8} \cdot m_R \cdot (d_1^2 + d_2^2) = \frac{1}{8} \cdot 0,012 \cdot (0,022^2 + 0,00635^2) = 0,786 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2 \quad (3.5)$$

$$J_Z = m \cdot r_R^2 = m \cdot \frac{d_R^2}{4} = 5 \cdot \frac{0,018^2}{4} = 0,405 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2 \quad (3.6)$$

$$J = J_m + J_R + \frac{J_Z}{N_m} = 30 \cdot 10^{-6} + 0,786 \cdot 10^{-6} + \frac{0,405 \cdot 10^{-3}}{1} = 0,438 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2 \quad (3.7)$$

$$M_D = J \cdot \varepsilon = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{J}{r_R} \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{2 \cdot J}{d_R} \cdot a(t) = \frac{2 \cdot 0,233 \cdot 10^{-3}}{0,018} \cdot 2 = 0,10 \text{ Nm} \quad (3.8)$$

$$M_m = (M_S + M_D) \cdot S_f = (0,18 + 0,115) \cdot 2 = \underline{0,70 \text{ Nm}} \quad (3.1)$$

Osa Z:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{P}{\pi \cdot d_{T2}}\right) = \arctan\left(\frac{8}{\pi \cdot 7}\right) = 20^\circ \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} F &= F_{Gx} + F_t = F_{Gx} + \mu \cdot F_N = m \cdot g \cdot (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha) = \\ &= 2 \cdot 9,81 \cdot (\sin 20 + 0,45 \cdot \cos 20) = 15 \text{ N} \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$M_S = F \cdot \frac{P}{2\pi} \cdot \frac{1}{\eta} = 15 \cdot \frac{8}{2\pi} \cdot \frac{1}{0,65} = 0,03 \text{ Nm} \quad (3.14)$$

$$J_S = \frac{1}{8} \cdot m_S \cdot (d_1^2 + d_2^2) = \frac{1}{8} \cdot 0,015 \cdot (0,019^2 + 0,007^2) = 0,769 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.15)$$

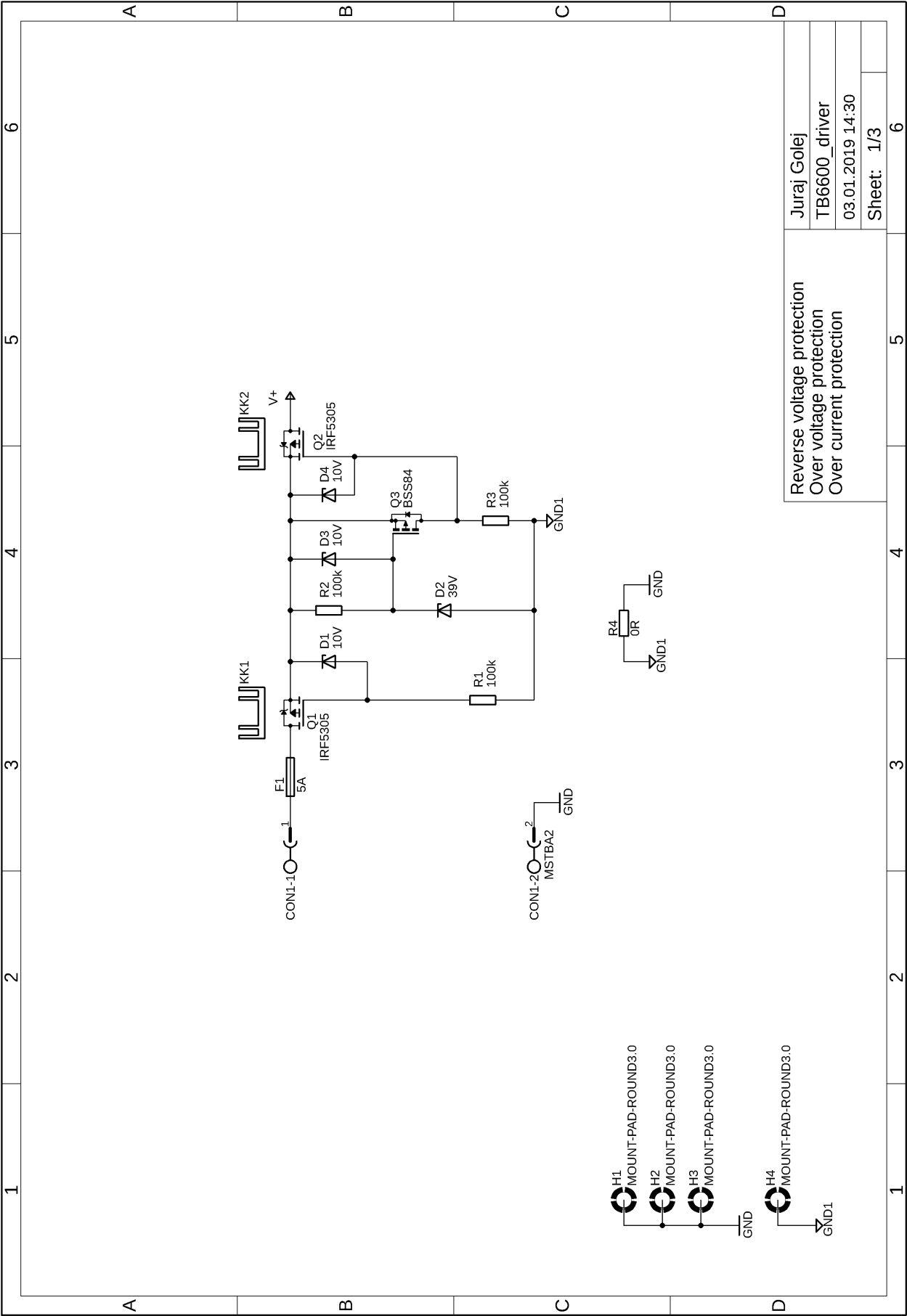
$$J_T = \frac{1}{8} \cdot m_T \cdot d_{T1}^2 = \frac{1}{8} \cdot 0,062 \cdot 0,008^2 = 0,496 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.16)$$

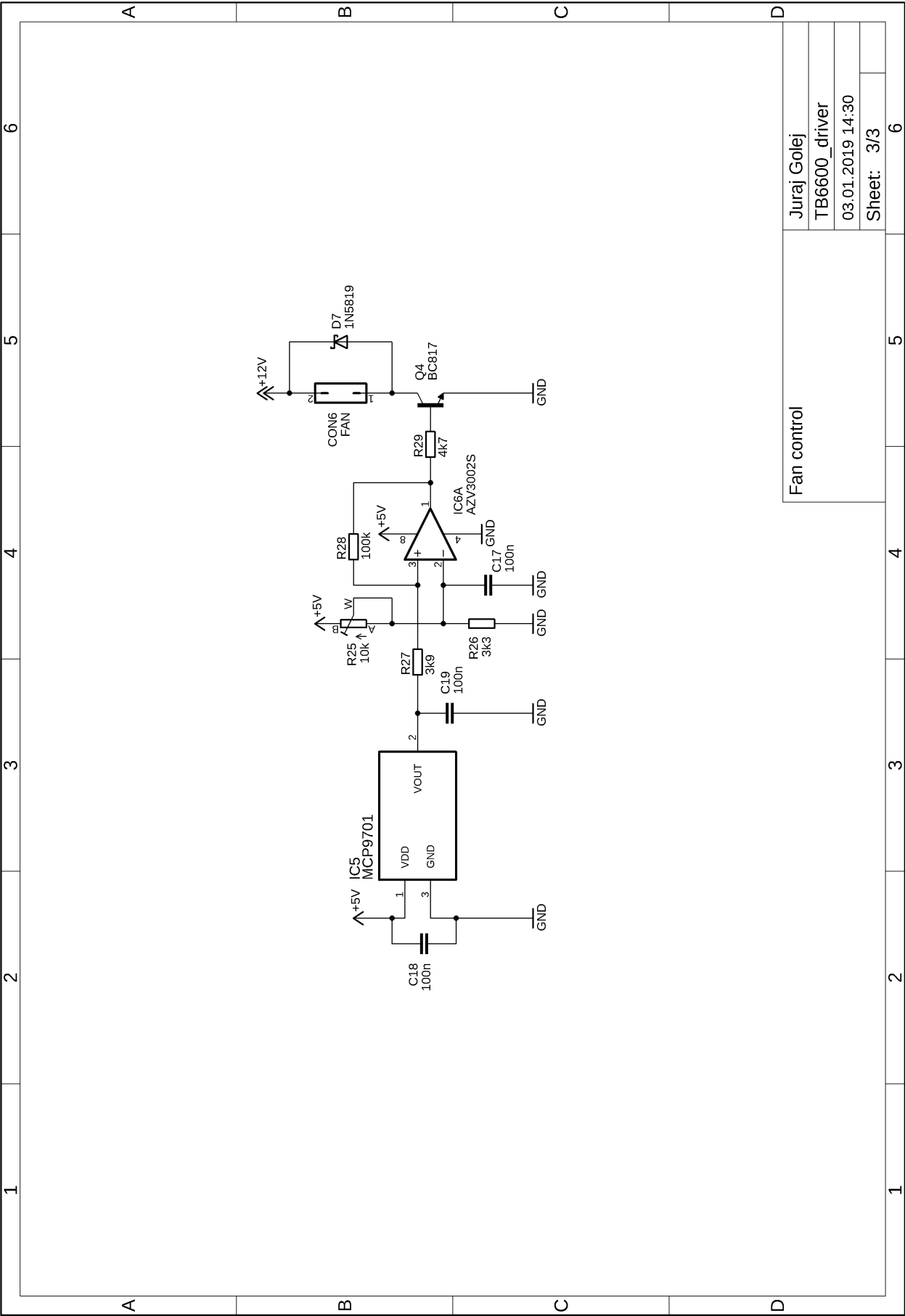
$$J_Z = m \cdot \left(\frac{P}{2\pi}\right)^2 = 2 \cdot \left(\frac{0,008}{2\pi}\right)^2 = 3,24 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} M_D &= (J_m + J_S + J_T + J_Z) \cdot \frac{2\pi}{P} \cdot a(t) = \\ &= (30 \cdot 10^{-6} + 0,769 \cdot 10^{-6} + 0,496 \cdot 10^{-6} + 3,24 \cdot 10^{-6}) \cdot \frac{2\pi}{0,008} \cdot 5 = 0,14 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$M_m = (M_S + M_D) \cdot S_f = (0,03 + 0,14) \cdot 2 = \underline{0,33 \text{ Nm}} \quad (3.1)$$

Príloha 3.1.1: Schéma ovládača krokového motora





Fan control

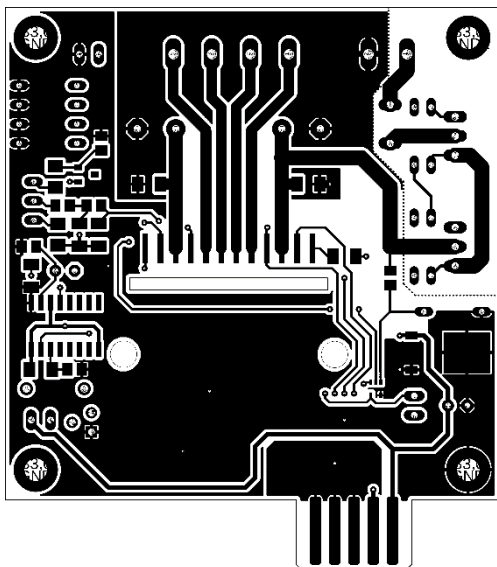
Juraj Golej

TB6600_driver

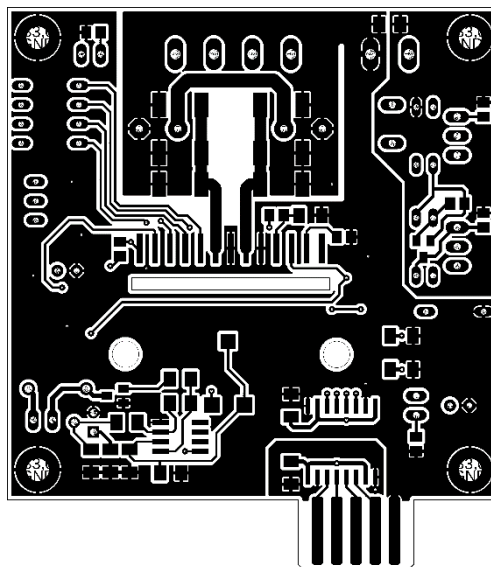
03.01.2019 14:30

Sheet: 3/3

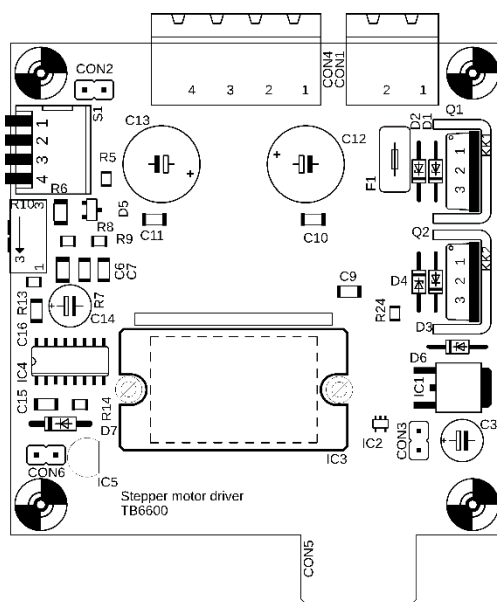
Príloha 3.1.2: Predloha plošných spojov a osadzovací plán



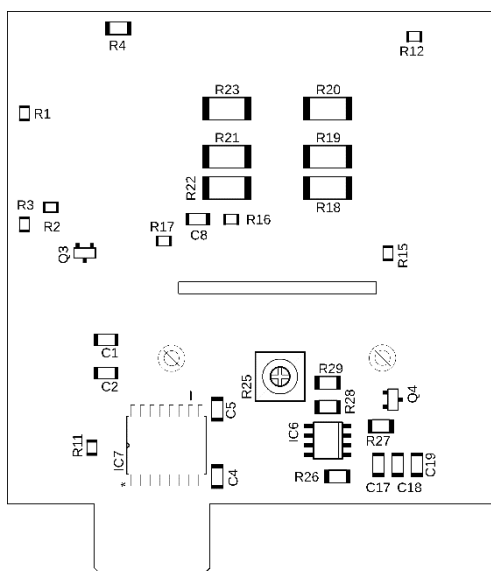
Vrstva TOP



Vrstva BOTTOM

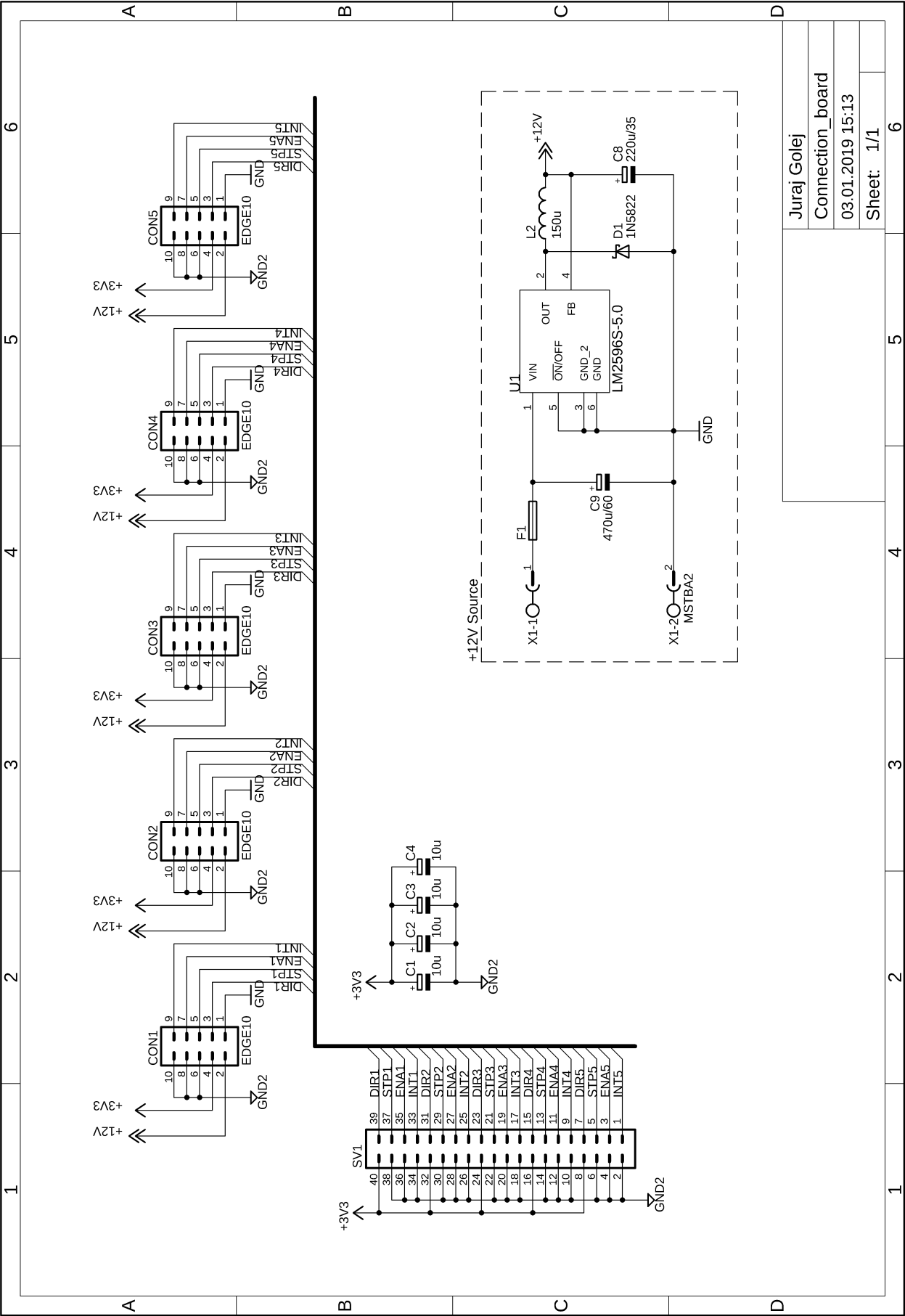


Osadzovací plán TOP

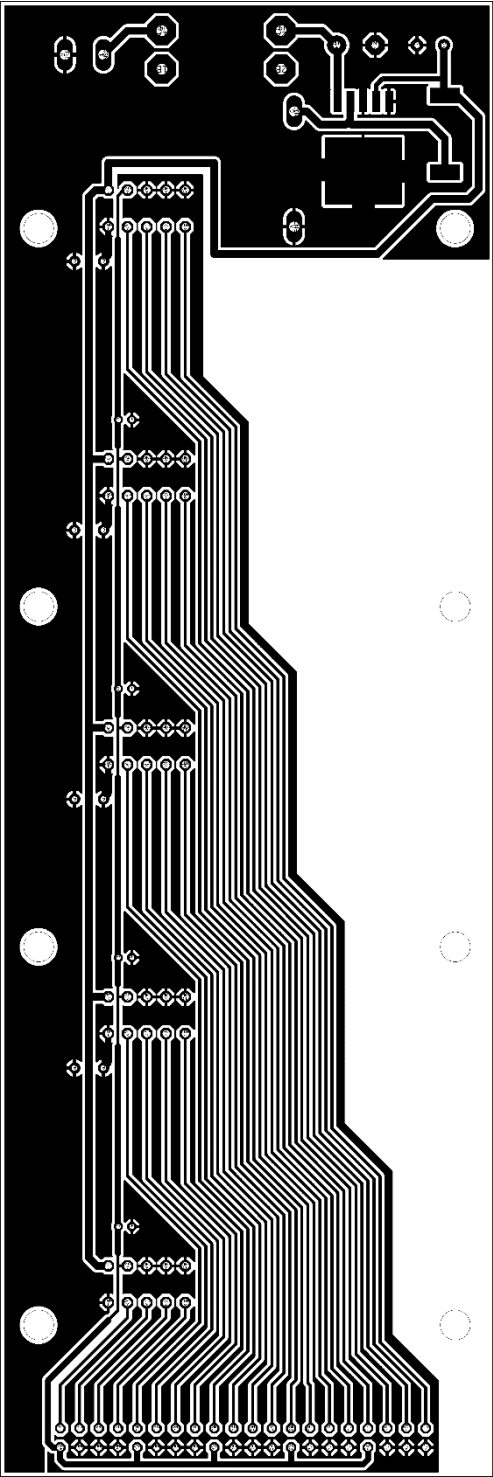


Osadzovací plán BOTTOM (zrkadlený)

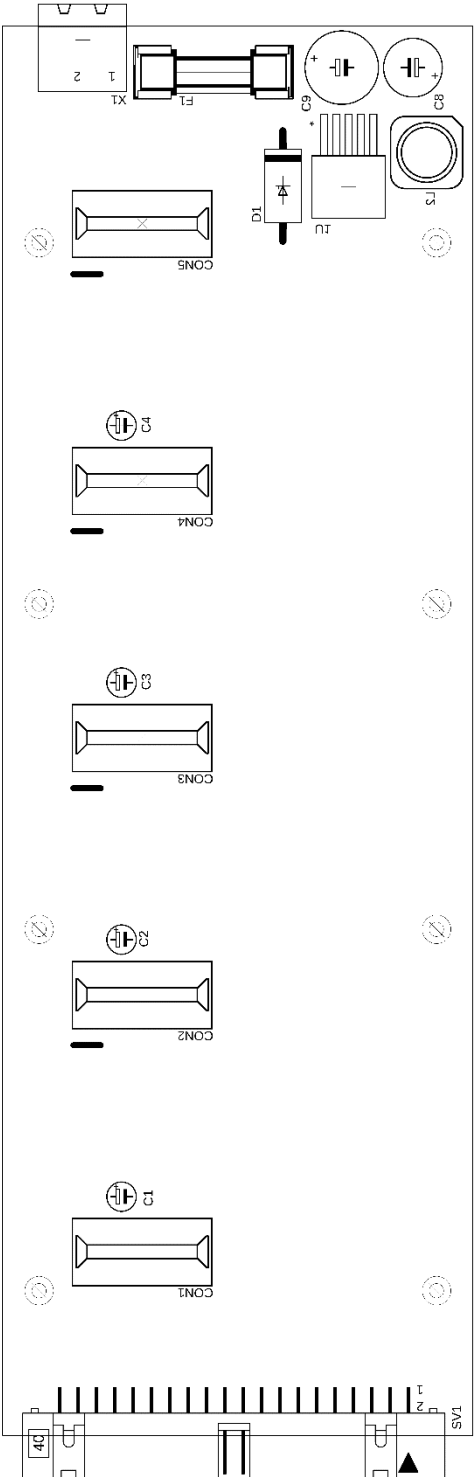
Príloha 3.2.1: Schéma prepojovacej dosky



Príloha 3.2.2: Predloha plošných spojov a osadzovací plán

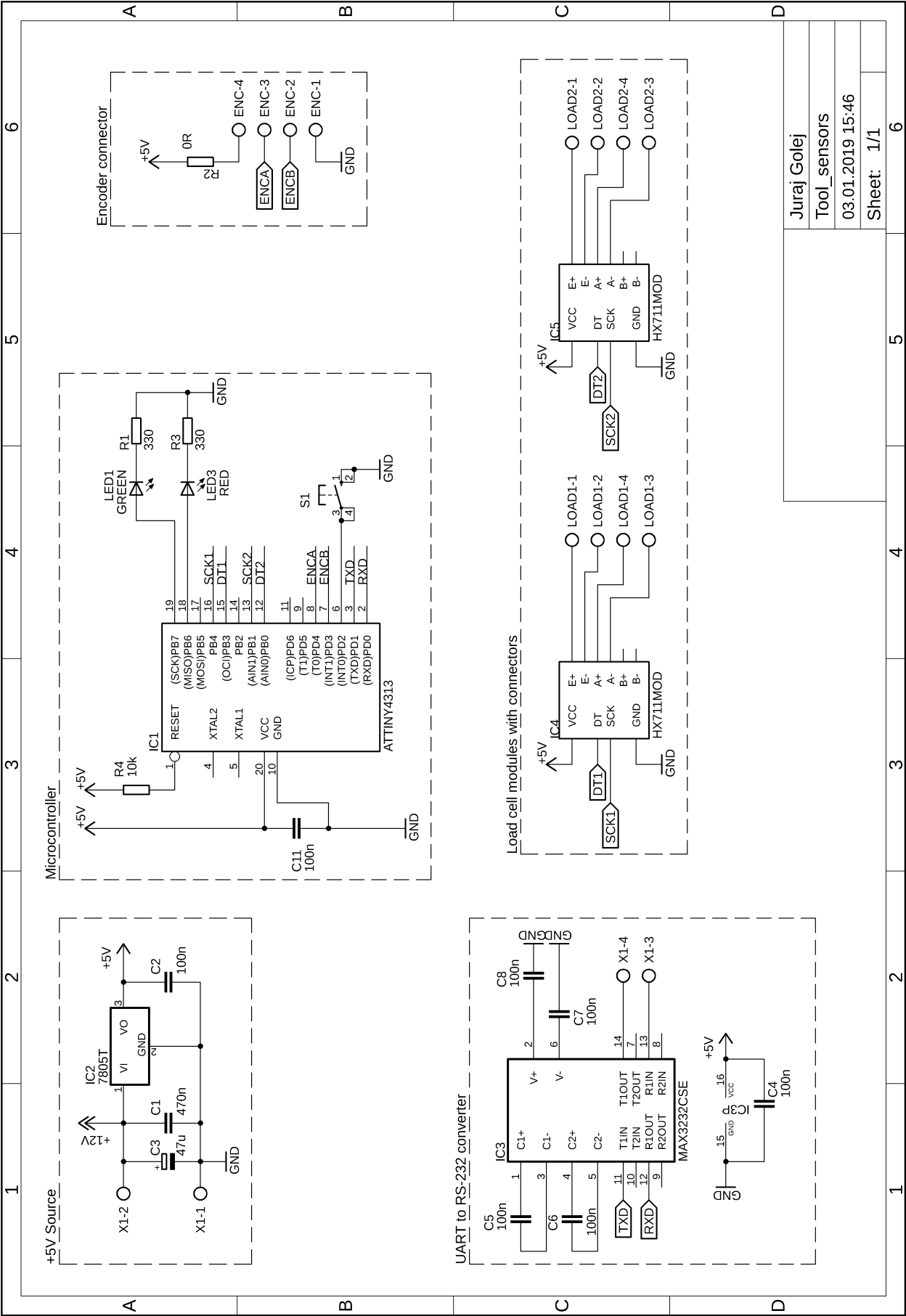


Vrstva **BOTTOM**



Osadzovací plán **TOP** a **BOTTOM**

Príloha 3.3.1: Schéma senzorov nástroja



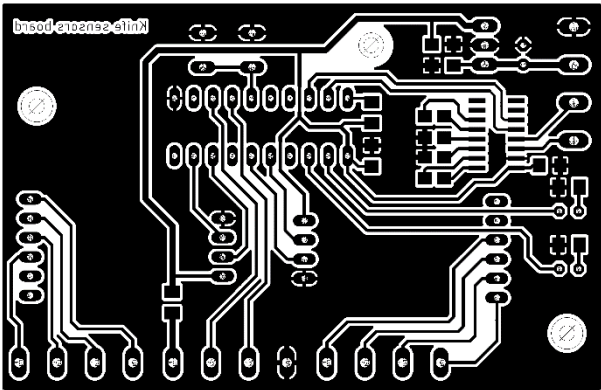
Juraj Golej

Tool_sensors

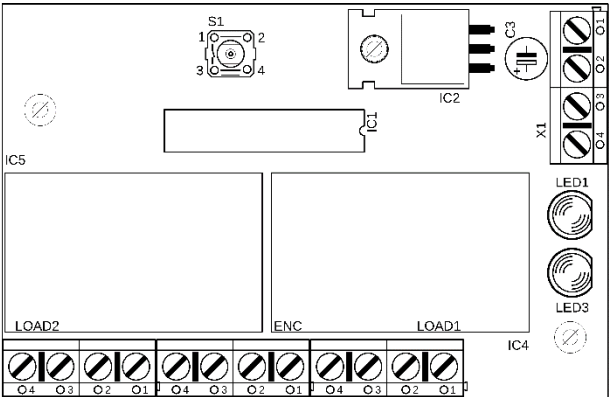
03.01.2019 15:46

Sheet: 1/1

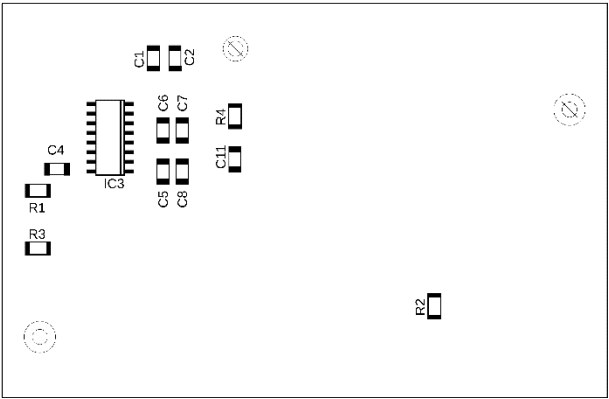
Príloha 3.3.2: Predloha plošných spojov a osadzovací plán



Vrstva **BOTTOM**

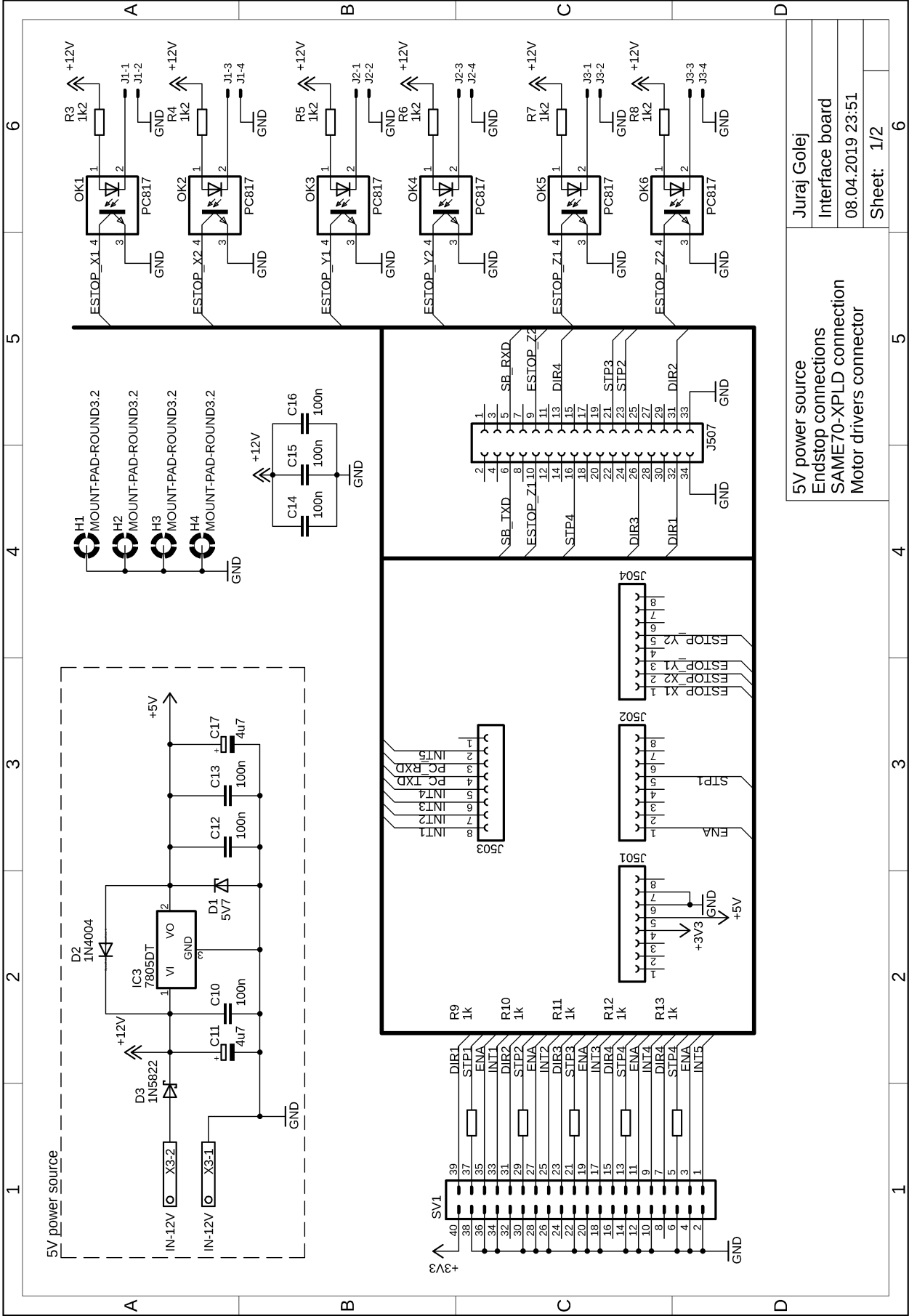


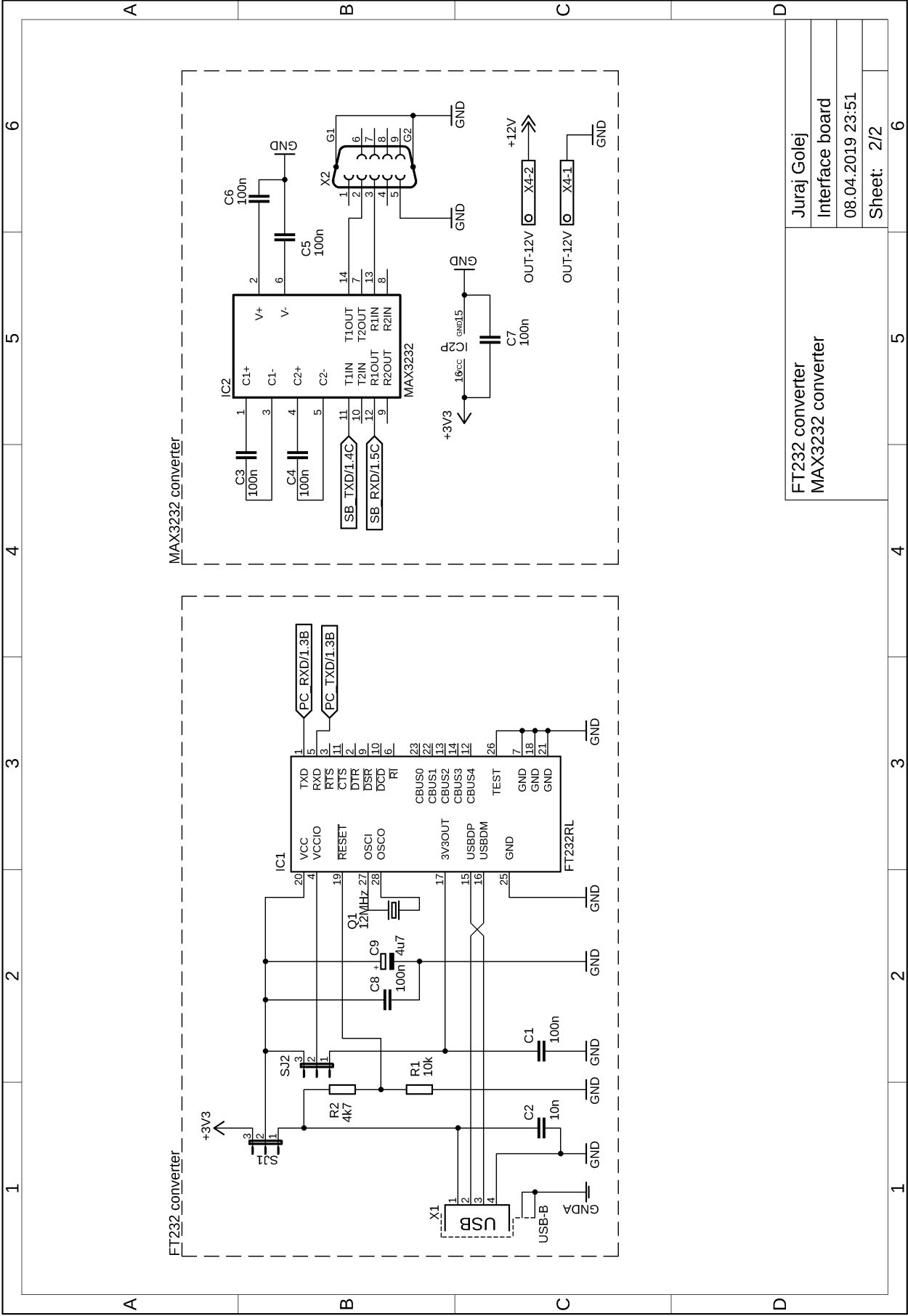
Osadzovací plán **TOP**



Osadzovací plán **BOTTOM** (zrkadlený)

Príloha 3.4.1: Schéma interface modulu





FT232 converter
MAX3232 converter

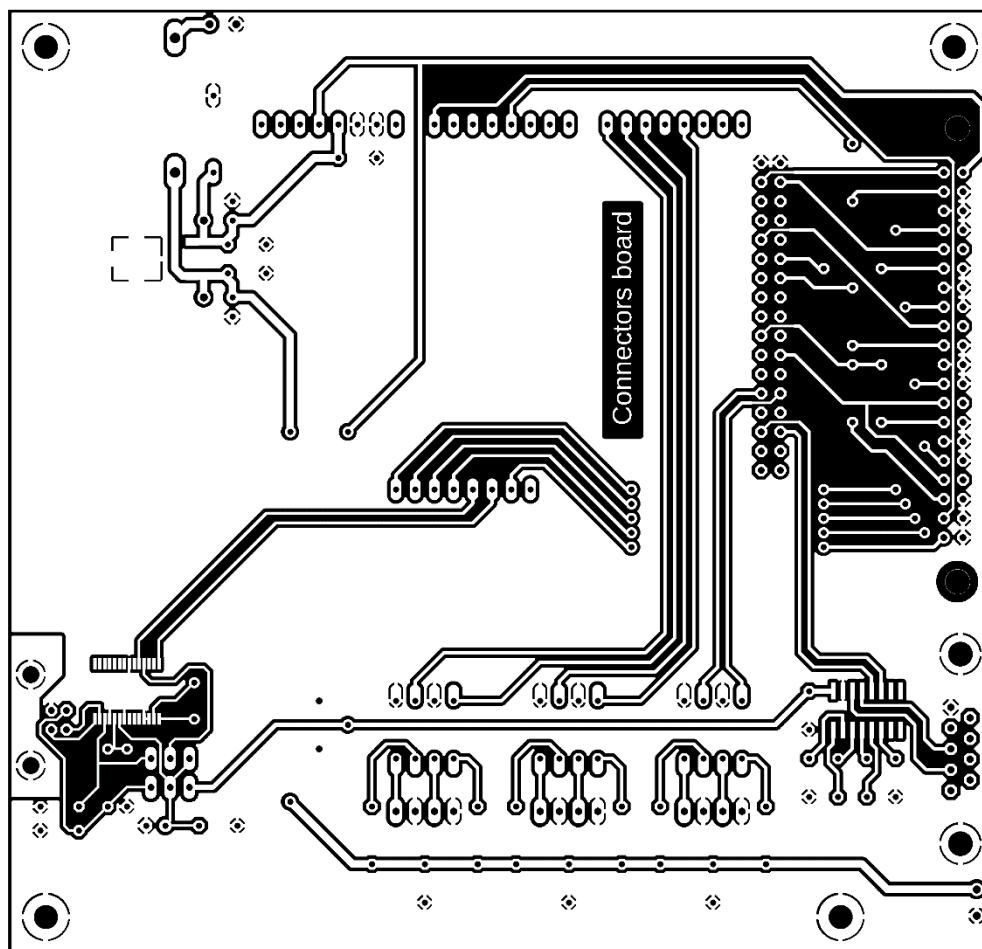
Juraj Golej

Interface board

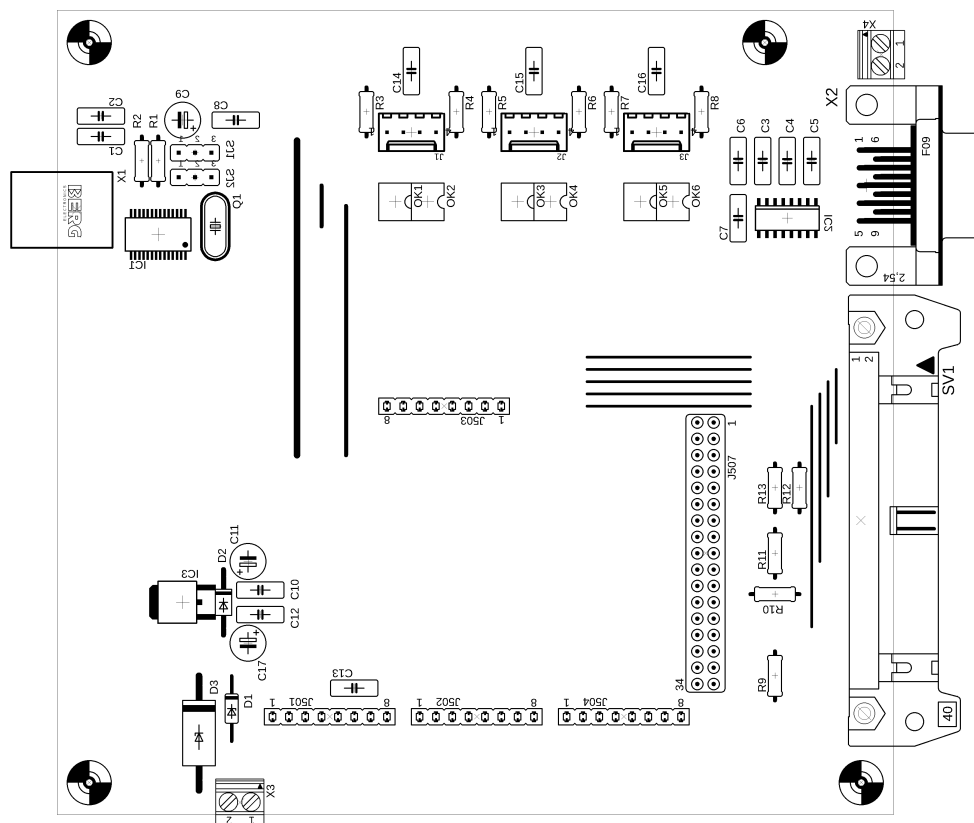
08.04.2019 23:51

Sheet: 2/2

Príloha 3.4.2: Predloha plošných spojov a osadzovací plán



Vrstva **BOTTOM**



Osadzovací plán **TOP + BOTTOM**

Príloha 4: Zoznam kódov riadiaceho programu

Tab. 1: Zoznam funkcií		
č.	Funkcia	Popis
0	AA	Lineárna interpolácia
1	AB	Kruhová interpolácia v smere hod. ruč.
2	AC	Kruhová interpolácia proti smeru hod. ruč.
3	AD	Presun do referenčného bodu stroja (home)
4	AE	Presun do referenčného bodu obrobku
5	AF	Zatlačiť po požadovaný prítlak
6	AG	Nastavenie súradnicového systému stroja
7	AH	Nastavenie súradnicového systému obrobku
8	AI	Absolútny súradnicový systém
9	AJ	Inkrementálny súradnicový systém
10	AK	Pauza
11	AL	Výmena nástroja

Tab. 2: Zoznam parametrov			
č.	Parameter	Popis	Jednotka
0	SA	X-ová súradnica	mm
1	SB	Y-ová súradnica	mm
2	SC	Z-ová súradnica	mm
3	SD	Stred oblúka v X smere	mm
4	SE	Stred oblúka v Y smere	mm
5	SF	Polomer oblúka	mm
6	SG	Rýchlosť lineárneho pohybu v ose X/Y	mm/s
7	SH	Rýchlosť lineárneho pohybu v ose Z	mm/s
8	SI	Prítlak	g
9	SJ	Časový interval	ms