

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

OVĽADACÍ ROZHRANÍ CNC FRÉZKY

CNC MILLING MACHINE DRIVING INTERFACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DANIEL MITÁŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL PAVLÍK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Daniel Mitáš

ID: 106648

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Ovládací rozhraní CNC frézky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte kontroler krokových motorů se třemi nezávislými výstupy. Kontroler musí být ovládatelný osobním počítačem pomocí G-kódu skrze USB. Pro tyto účely naprogramujte odpovídající uživatelské rozhraní. Navrhněte a začněte realizovat mechanické provedení frézky. Součástí návrhu bude vytvoření technické dokumentace použitelné pro výrobu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Michal Pavlík, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a stavbou portálové CNC frézky určené primárně pro obrábění součástí z lehkých kovů a jejich slitin. V tomto dokumentu je popsán výběr mechanických komponent, návrh rámu frézky a průběh její stavby, návrh a stavba USB interpolační jednotky a vytvořený ovládací software.

ABSTRACT

This project deals with portal-type CNC milling machine design and construction. CNC milling machine should be able to machining light metals and alloys. This document contains description of mechanical components selection, machine frame design and building, design and construction of USB motion control unit and also contains control software description and user manual.

KLÍČOVÁ SLOVA

CNC frézka, krokový motor, spínaný napájecí zdroj, USB, Interpolátor, AVR, FTDI

KEYWORDS

CNC milling machine, stepper motor, switched-mode power supply, USB, motion control device, AVR, FTDI

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MITÁŠ, D. *Ovládací rozhraní CNC frézky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Pavlík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI DÍLA

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení.

V Brně dne 24.5.2012

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mě při tomto projektu jakýmkoli způsobem podporovali, především vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Pavlíkovi, Ph.D. za vstřícnost, čas který mi věnoval, cenné rady a poskytnutí přístupu k měřicí technice.

OBSAH

1	VÝBĚR TYPU RÁMU A MECHANICKÝCH KOMPONENT	4
1.1	LINEÁRNÍ VEDENÍ	7
1.1.1	KLUZNÁ VEDENÍ	7
1.1.2	VALIVÁ VEDENÍ	7
1.2	ŠROUBY	10
1.3	VÝROBA VZORKU VÁLEČKOVÉHO ŠROUBU	12
1.4	POHONY	13
2	NÁVRH A VÝROBA MECHANIKY FRÉZKY	15
2.1	VÝROBA RÁMU	16
2.1.1	VŠUVKA - PŘÍPRAVEK PRO KONTROLU KOLMOSTI RUČNÍ VRTAČKY	17
2.2	MONTÁŽ KOMPONENT FRÉZKY	20
2.2.1	LINEÁRNÍ VEDENÍ A POHYBOVÝ ŠROUB OSY X	20
2.2.2	LINEÁRNÍ VEDENÍ A POHYBOVÝ ŠROUB OSY Z	21
2.2.3	LINEÁRNÍ VEDENÍ A POHYBOVÝ ŠROUB OSY Y	21
2.2.4	KROKOVÉ MOTORY A PRUŽNÉ SPOJKY	21
2.2.5	KONCOVÉ SPÍNAČE	22
2.2.6	ZAKRYTOVÁNÍ	23
2.2.7	KABELY A VLEČNÉ ŘETĚZY	23
3	INTERPOLAČNÍ JEDNOTKA	25
3.1	PARAMETRY	27
3.2	BLOKOVÉ SCHÉMA	28
3.3	POPIS KONEKTORŮ	29
3.4	KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL	32
3.5	POPIS OBVODU	36
3.5.1	NAPÁJECÍ ZDROJE	36
3.5.2	DRIVER KROKOVÝCH MOTORŮ S TB6560AHQ	38
3.5.3	MIKROŘADIČ	40
3.5.4	PŘEVODNÍK USB <-> FIFO	41
3.5.5	USB IZOLÁTOR	42
3.5.6	OPTICKY IZOLOVANÉ VSTUPY A VÝSTUPY	43
3.6	NAVÍJECÍ PŘEDPISY PRO TRANSFORMÁTORY	44
3.6.1	TRANSFORMÁTOR PRO STANDBY ZDROJ	44
3.6.2	GDT TRANSFORMÁTOR	46

3.6.3	TRANSFORMÁTOR VÝKONOVÉHO ZDROJE	46
3.6.4	PROUDOVÝ TRANSFORMÁTOR	48
3.7	POSTUP OSAZENÍ DESKY A MECHANICKÉ USPOŘÁDÁNÍ KRABICE	49
3.8	DOPORUČENÝ POSTUP OŽIVENÍ MODULU	50
4	<u>OVLÁDACÍ SOFTWARE</u>	53
4.1	POPIS FUNKCE PROGRAMU	53
4.1.1	GRAFICKÁ KNIHOVNA OPENGL	54
4.2	POPIS GRAFICKÉHO UŽIVATELSKÉHO ROZHRAŇÍ	58
4.3	REŽIMY PROGRAMOVÁNÍ STROJE	62
4.3.1	REŽIM CNC FRÉZKA	62
4.3.2	REŽIM CNC VRTAČKA	67
4.3.3	OSTATNÍ REŽIMY	68
4.4	PŘEHLED POUŽITÝCH KLÁVESOVÝCH ZKRATEK	68
5	<u>PŘEHLED NÁKLADŮ</u>	69
6	<u>ZÁVĚR</u>	70
7	<u>LITERATURA</u>	72
8	<u>SEZNAM PŘÍLOH</u>	75

ÚVOD

Předmětem tohoto projektu je realizace CNC frézky, určené pro výrobu menších součástí z lehkých slitin a plošných spojů. Tomu bude podřízen výběr mechanických komponent a pohonů. Mechanická konstrukce by neměla být kvůli omezeným výrobním prostředkům příliš složitá, nicméně je k dispozici laserová řezačka a možnost výroby menších součástí na konvenčních obráběcích strojích. Součástí je také návrh a výroba interpolační jednotky ovládající krokové motory a vyhodnocující stav stroje. Interpolační jednotka se bude připojovat k osobnímu počítači přes USB port a bude komunikovat pomocí vlastního protokolu, kterým budou zadávány souřadnice a druh pohybu nástroje. Vytvoření ovládacího softwaru, pomocí kterého se bude stroj ovládat, je také součástí tohoto projektu. Software by měl umět interpretovat G-kód, který je nejrozšířenějším jazykem pro ovládání CNC strojů, dále pak vrtací plány ve formátu Excellon, a také data pro plotter ve formátu Gerber RS-274-D. Podle potřeby může být přidána podpora dalších formátů vstupních dat. Také je plánováno naprogramovat jednoduchý grafický simulátor sloužící pouze k ověření použitých výrobních dat, naprogramování kompletního CAM softwaru se neplánuje.

V první části tohoto dokumentu je popsán výběr mechanických komponent a materiálu pro realizaci mechanické konstrukce. Dále je zdokumentován průběh stavby mechaniky frézky. Další část je věnována návrhu a realizaci interpolační jednotky, kde jsou výsledné parametry, elektrické schéma, popis komunikačního protokolu a význam jednotlivých konektorů. V poslední části jsou popsány všechny funkce ovládacího softwaru, popis vstupních formátů a zkrácený návod k použití.

1 VÝBĚR TYPU RÁMU A MECHANICKÝCH KOMPONENT

Pro CNC frézku existuje několik základních ověřených typů rámu, které jsou typicky jakýmsi kompromisem mezi požadovanou tuhostí stroje, pracovní plochou, množstvím použitého materiálu, mechanickou složitostí a velikostí zastavěného prostoru. Volba je pak závislá na prioritách těchto vlastností. Základní rozdělení konstrukcí frézek je na konzolovou a portálovou, podle toho v kolika osách se pohybuje vřeteno a pracovní stůl:

KONZOLOVÁ KONSTRUKCE

Toto mechanické provedení se vyznačuje vysokou tuhostí a je tedy vhodné i k obrábění ocelí. Osy X a Y jsou tvořeny křížovým stolem a osa Z pohybuje v závislosti na typu stroje buď obráběcím motorem, nebo celým křížovým stolem. Nevýhodou tohoto řešení je nepoměr celkových rozměrů k rozměrům pracovní plochy a také značná mechanická náročnost. Výroba takového stroje by se neobešla bez odlévání kovových částí, nutnosti přesného obrábění relativně velkých ploch a jejich kalení.



Obr. 1 - Konzolová CNC frézka [1]

PORTÁLOVÁ KONSTRUKCE S PEVNÝM PORTÁLEM

Portálová konstrukce je vhodná tam, kde je zapotřebí větší pracovní oblast stroje. Je kompromisem mezi jednoduchostí a mechanickou tuhostí, a při zachování malých celkových rozměrů je tuhost konstrukce dostatečná pro obrábění lehkých slitin. U tohoto druhu konstrukce se portál nepohybuje a tvoří její osy X a Z. Osa Y je na základně a pohybuje se po ní pracovní deska. Tato konstrukce je nejméně náročná na stavbu, protože ji lze relativně snadno realizovat z kovových profilů nebo svařit z dílů vypálených z ocelového plechu. Tato konstrukce je značně variabilní, což se týče druhu lineárních vedení a šroubů.



Obr. 2 - Portálová CNC frézka [2]

PORTÁLOVÁ KONSTRUKCE S POHYBLIVÝM PORTÁLEM

Tento druh konstrukce má všechny tři osy realizovány pomocí portálu a obrobek se nepohybuje. Má nejlepší poměr pracovní oblasti k celkovým rozměrům, takže je vhodná, když je potřeba rozměrná a plochá pracovní oblast. Bohužel má ale relativně nízkou tuhost, takže je jako frézka použitelná pouze pro obrábění dřeva, plastů a gravírování. Proto je používána obvykle jako plotter, pro laserové, plasmové nebo vodní řezání plechu a jako vrtačka, jako frézka jen výjimečně.



Obr. 3 - CNC frézka s pohyblivým portálem [2]

Pro stavbu rámu CNC frézky existuje několik vhodných druhů materiálů a výběr vhodného typu se odvíjí od požadovaných mechanických vlastností. Mezi ně patří především tuhost, opracovatelnost, hmotnost, tepelná roztažnost a cena.

OCEL

Ocel je tradičním materiálem pro rámy obráběcích strojů. Rámy sériově vyráběných strojů jsou nejčastěji odlévány, což umožňuje relativně velké možnosti návrhu různého žebrování za účelem zvýšení tuhosti stroje. U amatérských frézek, kde nejsou k dispozici možnosti odlévání materiálu do formy, se častěji volí svařenec z dílů vyřezaných z ocelového plechu pomocí laseru, plasmu nebo vodního paprsku, což je relativně levná a dostupná metoda. Problémem ocelových rámu je mírná nepřesnost vlivem tepelné roztažnosti a možná deformace v důsledku svařování.

HLINÍK / DURAL

Rám z lehkých slitin je vhodný pro stroje, u kterých jsou zapotřebí vysoké rychlosti posuvu a vysoká dynamika stroje. Jedná se tedy o různé gravírky, plottery, řezačky apod. Díly je možno vypálit z plechu obdobně jako u oceli, ale následné svaření je možné pouze metodou TIG, proto se u amatérských CNC frézek z tohoto typu materiálu častěji používají šroubované spoje. Další nevýhodou oproti oceli je několikanásobně vyšší cena materiálu a horší tlumení vibrací.

KOMBINACE OCELI A POLYMERNÍHO BETONU [3]

Tato kombinace se používá pro zvýšení tuhosti stroje a lepší tlumení vibrací. Do polymerního betonu (štěrka + pryskyřice) jsou zapuštěny ocelové díly, které se poté obrobí a jsou na ně montována lineární vedení a další části stroje. Cena materiálu je relativně nízká, ovšem rám má spornou spolehlivost kvůli problematickému zajištění spojení betonových a ocelových částí a jejich rozdílné tepelné roztažnosti.

KERAMICKÉ MATERIÁLY

Keramické materiály se používají pro stroje, kde je zapotřebí vysoká přesnost, protože mají několikanásobně nižší tepelnou roztažnost než kovy. Problémem je vysoká cena a pracnost výroby, proto se používají jen pro stroje pracující s mikrometrovou přesností.

Vzhledem k charakteru požadovaného využití, tj. obrábění lehkých slitin, výroba plošných spojů a vrtání různých plechových dílů byla pro tento projekt **zvolena portálová konstrukce s pevným portálem**. Vzhledem k přístupu k laserové řezačce byl jako základní stavební materiál použit **ocelový plech tloušťky 10 mm a vypálené díly jsou svařovány**. Protože se jedná o jednorázovou konstrukci, kde není potřebná opakovatelnost výroby, je návrh stroje z velké míry závislý na dílech, které se podařilo opatřit. Velikost pracovního prostoru frézky byla zvolena podle dostupných lineárních vedení a činí **500 * 400 * 120 mm**.

1.1 LINEÁRNÍ VEDENÍ

1.1.1 KLUZNÁ VEDENÍ

U větších frézek jsou typicky jako lineární vedení použity přímo opracované části litinové konstrukce, které jsou obrobeny do tvaru rybin, zakaleny a přebroušeny. Konstrukce tohoto typu má velmi dobrou tuhost, ale není v amatérských podmínkách realizovatelná. Jiným typem kluzných vedení jsou vodící tyče s kluznými lineárními ložisky z bronzového materiálu. Jedná se o relativně levné řešení, ale ve větších délkách pojezdu než cca 300mm při průměru tyče 30mm nemá konstrukce dostatečnou tuhost pro obrábění lehkých slitin. Dalším problémem je vůle, vznikající opotřebením ložisek, a také vysoké tření.

1.1.2 VALIVÁ VEDENÍ LINEÁRNÍ LOŽISKA

Pro svou mechanickou nenáročnost a nízkou cenu je kombinace vodících tyčí a lineárních ložisek nejčastěji používaným řešením u menších CNC strojů. Vodící tyče lze velmi snadno nastavitelně upevnit do nepřesné základové konstrukce, proto jsou vodící tyče velmi oblíbené v případě amatérské výroby CNC. Problematické je použití pro větší pojezdové vzdálenosti, protože dochází k prohýbání vodících tyčí. Řešením jsou podepřené vodící tyče a speciální lineární ložiska s otvorem pro hliníkový profil podepírající tyč. Oproti kolejnicovým vedením mají nízkou životnost, pouzdra obsahují pouze 4 řady kuliček a dochází k vytvoření drážek na tyčích, čímž vzniká vůle.



Obr. 4 - vodící tyč a lineární ložisko [4]



Obr. 5 - Podepřená vodící tyč a otevřené lineární ložisko [4]

VEDENÍ POMOCÍ POJEZDOVÝCH ROLEN

Každá osa typicky používá dvě čtvercové tyče (případně pouze drážky v základních částech), kolem kterých je umístěno několik kuličkových roln. Pro značnou mechanickou náročnost a relativně vysokou míru opotřebování se toto řešení téměř nepoužívá. Variací na tento druh vedení jsou vozíky s jehličkovými rolnami na speciálních kolejnicích. Tento druh vedení se ale používá velmi málo kvůli vysoké výrobní náročnosti. Výhodou je nastavitelná míra předepnutí.



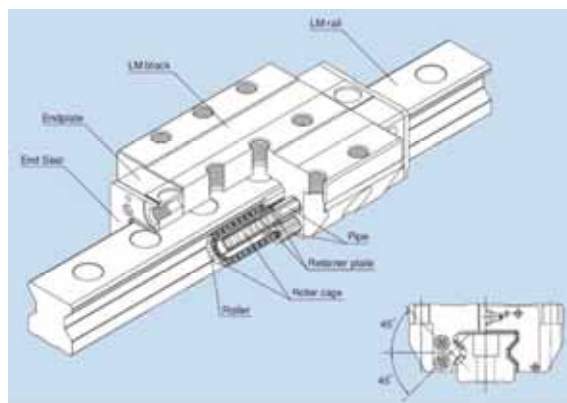
Obr. 6 - Pojezdová rolna [4] Obr. 7 - Lineární vedení s pojezdovými rolnami [5]

KOLEJNICOVÁ VEDENÍ

Speciálně tvarované kalené kolejnice a kuličkové vozíky vynikají vysokou přesností a mechanickou pevností, bohužel ale tomu odpovídá i jejich cena. Kolejnice i vozíky obsahují montážní otvory. Tento druh vedení by měl být umístován na rovnou základnu optimálně s vyfrézovanými drážkami.

Lineární vedení se vyrábějí dvojího druhu- s oběhovými kuličkami nebo válečky. Válečkové typy snesou větší zatížení, ale jsou několikanásobně dražší. Kuličky nebo válečky mohou být umístěny ve vozíku volně, nebo v plastovém řetězu, čímž se eliminuje tření mezi jednotlivými kuličkami nebo válečky.

Pro tento projekt se podařilo sehnat za přijatelnou cenu na CNC fóru [3] použitá lineární vedení THK SHW17 pro osy X a Y. Vedení jsou ve velmi dobrém stavu.



Obr. 8 - Vedení s kuličkovou klecí THK SHW17 [6] Obr. 9 - S válečkovou klecí THK SRG [7]

VEDENÍ S OMEZENOU DÉLKOU POJEZDU

Jedná se druh kolejnicového valivého vedení, ve kterém nemají valivé elementy návratové dráhy. Valivými elementy mohou být kuličky, válečky nebo jehly, a jsou vždy umístěny ve speciální kleci z plechu nebo plastu. U válečkových typů jsou válečky umístěny v jedné řadě střídavě otočené o 90° a obě kolejnice mají stejný tvar. Jehličkový typ má jehly umístěny ve dvou řadách a kolejnice mají tvar klínu. Častěji se používá válečkový typ. Pro jeden pohyblivý prvek je nutno použít dva páry kolejnic vedle sebe, kde je celá sestava dotažena přítláčnými šrouby ze strany.

Tento druh vedení je jednoduchý a značně robustní, proto snese extrémní zatížení ve všech směrech a má vynikající mechanickou tuhost. Výhodou je také možnost jednoduchého nastavení předepnutí přítláčnými šrouby a malý zastavěný prostor. Hlavní nevýhodou je zjevně omezená délka pojezdu (nejdelší vyráběné typy mají délku pojezdu kolem 300mm), potřeba přesně opracované základny, špatné možnosti zakrytování a to, že vedení není samonosné.

Byl zakoupen jeden pár použitých válečkových vedení typu NSK R106200AP5-57 s délkou pojezdu 120mm na aukčním serveru EBAY. Bude použit na osu Z.



Obr. 10 - Válečkové vedení s omezeným pojezdem

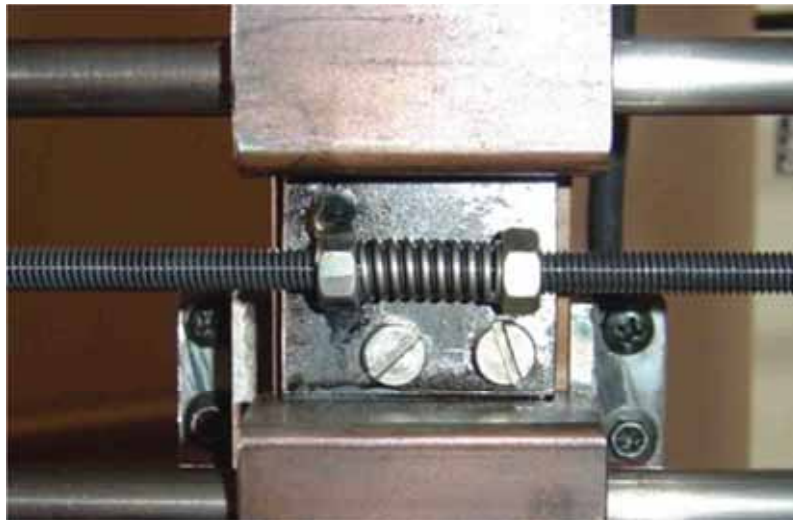


Obr. 11 - Jehličkové vedení

1.2 ŠROUBY

METRICKÉ ZÁVITOVÉ TYČE

Metrické závitové tyče vynikají svoji nízkou cenou, okolo 20Kč za metr, a jsou proto hojně používány v kombinaci s obyčejnými metrickými maticemi v amatérských konstrukcích nejnižšího technologického stupně, kde nevadí vysoké tření, opotřebování, enormní nepřesnost a vůle několik desetin milimetru. Tyto problémy jsou způsobeny tím, že metrické závitové tyče jsou určeny k použití jako spojovací materiál, a ne jako pohybové šrouby pro CNC frézku. Poněkud přijatelnější variantou je předepnutá matice pomocí pružiny, nicméně toto řešení způsobuje ještě větší tření a opotřebování.



Obr. 12 - Použití metrického šroubu s předepnutou maticí [2]

TRAPÉZOVÉ ŠROUBY

Trapézové závitové tyče se speciálními kluznými ložisky se používají spíše u konvenčních obráběcích strojů, kde může pracovník snadno kompenzovat vůli. Použití u CNC strojů je také možné, ale problematické, neboť je třeba provádět složitou softwarovou kompenzaci vůle, která je závislá na stupni opotřebenosti. Oproti následujícím možnostem je zde také vyšší tření.



Obr. 13 - Trapézový šroub a příslušné bronzové kluzné matice [4]

KULIČKOVÉ ŠROUBY

Kuličkové šrouby vynikají vysokou přesností, minimální vůlí a nízkým třením. Jde o ekvivalent kuličkového ložiska, kde se kuličky pohybují v drážkách mezi maticí a šroubem. Nevýhodou je pouze vysoká cena. Recirkulace kuliček může být řešena pomocí převáděcích trubic nebo deflektorů.



Obr. 14 - Kuličková matice s deflektory [4] Obr. 15 - Matice s převáděcími trubicemi[8]

VÁLEČKOVÉ ŠROUBY

Valivá matice[5] je přímým ekvivalentem valivého ložiska. Závitová tyč je umístěna v pouzdru s několika satelity. Zevnitř pouzdra a na satelitech jsou závity s nulovým stoupáním. Závitová tyč musí mít vícechodý závit, resp. tolikachodý, kolik bude v pouzdru satelitů. Valivá matice dosahuje lepších vlastností než kuličkové šrouby, hlavně jde o nižší opotřebení a vůli. Problémem je špatná dostupnost a enormně vysoká cena.



Obr. 16 - Řez valivou maticí [8]

1.3 VÝROBA VZORKU VÁLEČKOVÉHO ŠROUBU

Pro účel tohoto projektu byl vyroben a otestován vzorek válečkového šroubu. Pro co možná nejmenší náročnost výroby a nejmenší plýtvání materiálem v případě nefunkčnosti byl vybrán šroub pro osu Z, který je nejkratší.

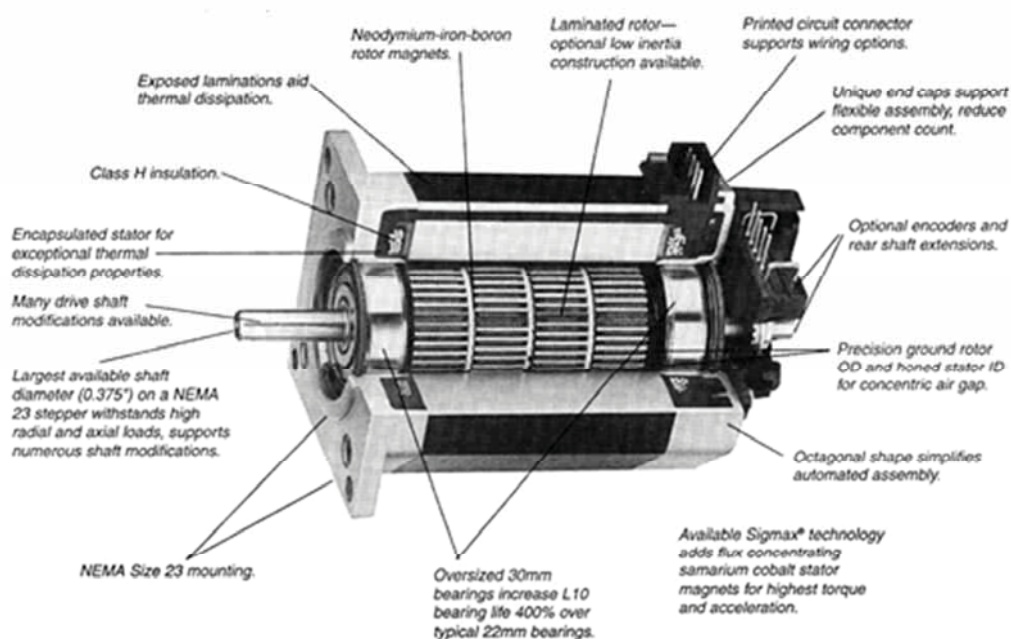


Obr. 17 - Vzorek válečkového šroubu

Na obr. 17 je fotografie válečkového šroubu. Šroub navíc obsahuje provizorní klec z kusů měděného drátu, která drží satelity ve správných pozicích. Pro další použití by bylo vhodné použít plechové příruby. Šroub vykazuje naprosto minimální tření, při otočení šroubu do svislé polohy dokonce začne matice vlastní vahou zrychlovat. Bohužel, při testování byl objeven problém s nedefinovatelným stoupáním šroubu, kdy se při otočení o stejný počet otáček na levou a na pravou stranu matice nevrátila do původní polohy. To je způsobeno drobným třením a prokluzováním mezi satelity a maticí. Řešením by bylo ozubení koncích satelitů a matice, které by zajistilo, že se budou satelity odvalovat korektně. Takové ozubení ale není v těchto podmínkách vyrobitelné, a proto **byly pro tento projekt zakoupeny na aukčním serveru EBAY levné kuličkové šrouby z Číny.**

1.4 POHONY

Jako pohony pro CNC frézku jsou vhodné servomotory[12] a krokové motory[11]. Servomotory jsou tvořeny stejnosměrným komutátorovým motorem nebo třífázovým elektromotorem s permanentními magnety, převodovkou a snímačem polohy. Jejich použití má výhodu ve vyšší rychlosti a nižší spotřebě, ale za cenu poměrně složitého řízení pomocí zpětné vazby. Krokové motory jsou v podstatě synchronní motory s větším množstvím pólů na otáčku. Toho je dosaženo rozdílnou konstrukcí rotoru a statoru, kde je magnetický tok veden mezi vinutími a permanentním magnetem pólovými nástavci. Vyšší spotřeba krokového motoru oproti servomotoru je způsobena tím, že na rozdíl od servomotoru musí vinutími krokového motoru protékat proud i v době nečinnosti kvůli udržování stavu otočení hřídele.



Obr. 18 - Struktura krokového motoru [9]

Při každém kroku se rotor otočí o přesně definovaný úhel, takže je jej možné použít bez jakékoliv zpětné vazby. Existují i systémy se zpětnou vazbou, ale způsob řízení je ještě komplikovanější než u servomotorů, a proto se používá pouze u vysoce přesných strojů. Krokové motory nejčastěji obsahují 2 páry vinutí. Existují i 3 a 5fázové krokové motory, ale nejsou tak často používané hlavně kvůli své vysoké ceně a složitosti řídicí elektroniky. K otáčení je potřeba přivádět na dva páry vinutí dvoufázový signál s fázovým posuvem 90°. Signál je typicky obdélníkový a motor vykoná za jednu periodu 4 kroky. Třístavovým řízením je možné dosáhnout 8 kroků na jednu periodu. Pro další zvýšení počtu kroků je zapotřebí použít tzv. mikrokrokování, kdy napětí na jednotlivých má víc než 2 úrovně napětí, čehož je dosaženo obvykle PWM modulací.

Pro uvedený způsob ovládání krokového motoru je zapotřebí jeden H-můstek pro každé vinutí, tedy celkem 8 tranzistorů. Takovýto způsob ovládání se pak nazývá bipolární. Unipolární ovládání snižuje počet tranzistorů na 4 a lze použít pouze u motorů s vyvedenými

středů vinutí, kde opačné polarity je dosaženo druhou polovinou vinutí. Středů vinutí se pak připojí na kladné napájecí napětí a konce vinutí jsou spínány tranzistory proti zemi, takže není zapotřebí plovoucí buzení tranzistorů. Unipolárním ovládním se ale sníží výkon motoru přibližně na polovinu, takže pro účel CNC frézky toto zjednodušení nevyplatí.

V této frézce budou osazeny použité krokové motory zakoupené u firmy Strojtechnik. Výrobce udává kroutivý moment 1,6 Nm při původním unipolárním zapojení. Motory byly upraveny na bipolární a kroutivý moment se nyní může pohybovat kolem 2 Nm. Motory jsou vybaveny tlumičem mezi přírubou a statorem, což by mělo snížit vibrace přenášené na rám stroje.

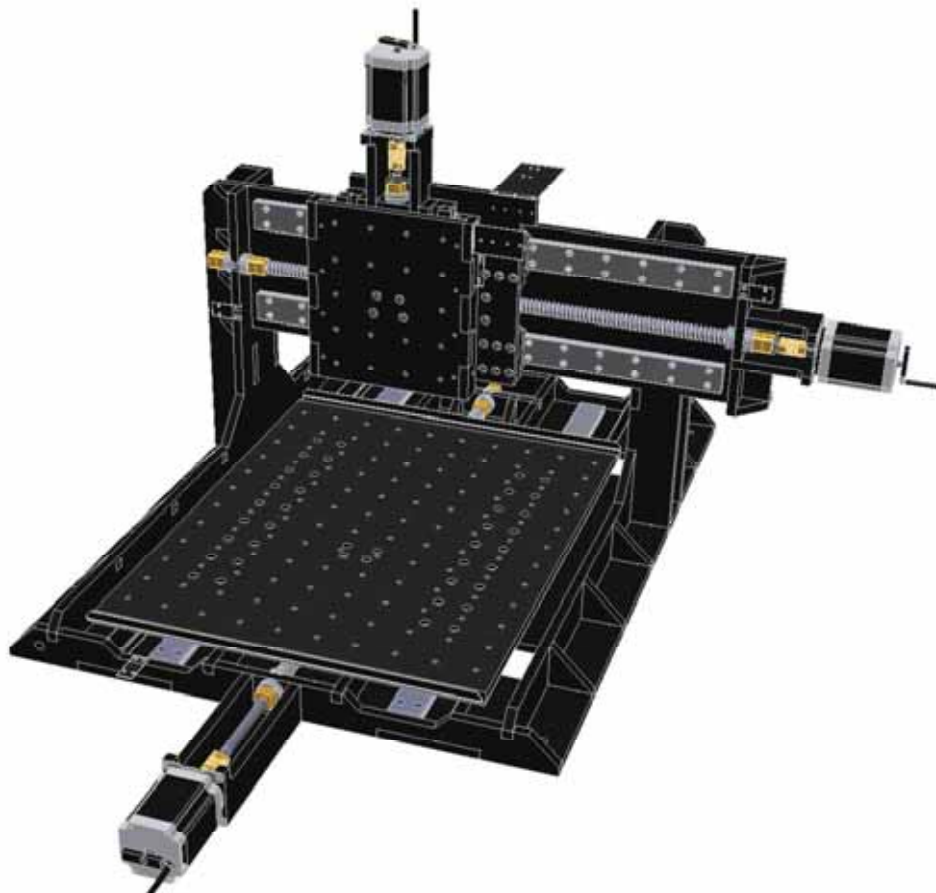


Obr. 19 - Krokový motor Sanyo Denki

2 NÁVRH A VÝROBA MECHANIKY FRÉZKY

Rám frézky byl navržen v prostředí Autodesk Inventor 2011 Trial. Při návrhu bylo počítáno s použitím ocelového plechu o síle 10 mm a bylo dbáno na to, aby bylo možno rám jednoduše složit a svařit, s minimálními požadavky na strojní a měřicí vybavení. Proto jednotlivé díly obsahují velké množství zámků, aby jednotlivé díly zapadly dohromady a nebylo zapotřebí je např. pomocí nějakých přípravků přesně umísťovat. Vozíky lineárních vedení os X a Y musí být nadzvednuty, k čemuž byla použita přesná ocelová obdélníková tyč o rozměrech 60 * 15 mm, která bude s ostatními díly sešroubována. Pouze u osy Z se počítá se zafrézováním drážek pro umístění páru lineárních vedení s omezenou délkou pojezdu. Dalšími frézovanými díly jsou pouzdra pro kuličkové matice. Pracovní stůl obsahuje pole děr se závity M6 pro připevnění strojního svěráku nebo různých upínacích přípravků. Návrh dále obsahuje díly z plechu tloušťky 1mm pro zakrytování, montáž kabelových řetězů a koncových spínačů.

Podklady pro vypálení rámu a drobných součástí z 1mm plechu jsou ve formátu .dxf a jsou zapsány na přiloženém CD v adresáři DXF. Výkresy frézovaných a ohýbaných součástí jsou k dispozici v tištěné příloze. Postup výroby rámu a montáže ostatních dílů je uveden dále v této kapitole.



Obr. 20 – Návrh frézky v prostředí Inventor

2.1 VÝROBA RÁMU

Jednotlivé díly byly následně vypáleny na laserové řezačce o výkonu laseru 3 kW, která je schopna dělit konstrukční ocel do síly 16 mm, hliník do 8 mm a nerez ocel do síly 10 mm. Průměr stopy laserového svazku při této tloušťce plechu je přibližně 0,5 mm, a je tedy nutné při vytváření výkresů pálených dílů počítat s použitím poloměrové korekce stopy a nechat místo pro započetí stopy. Při započetí vznikne vypálený otvor o průměru cca 4 mm, takže nelze takto vypalovat otvory s průměrem menším než 5 mm. Pokud má být do otvoru vyřezán závit, je jej nutno převrtat na minimálně o 1 mm větší průměr, protože okraje vypálených dílů jsou zakalené a do takto tvrdého materiálu nelze vyřezat závit. U menších otvorů než 5 mm je nutno pouze vygravírovat kříž a otvor vyvrtat pomocí vrtačky. Při převrtávání otvorů a úpravě povrchu okrajů dílů je nutno počítat s vyšším opotřebením nástrojů. Dále je nutno vzít v úvahu, že laserový svazek není rovnoběžný a hrany dílů proto nejsou přesně kolmé. Ve vnitřních rozích vzniká zaoblení s poloměrem 0,5-1 mm, takže je vhodné do návrhu implementovat zápichy. V tomto projektu se s tím nepočítalo, a proto musely být zápichy dodatečně vybroušeny úhlovou bruskou.

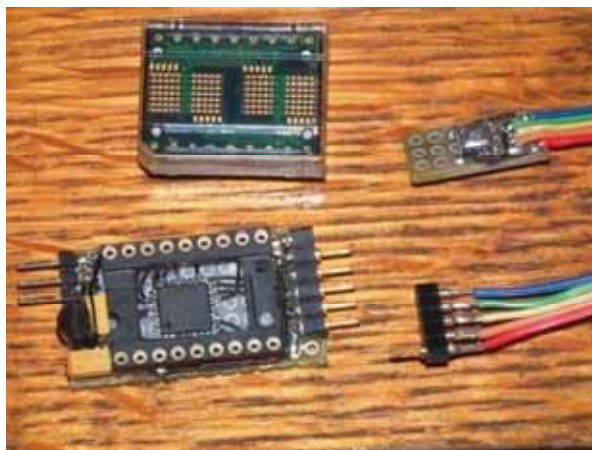


Obr. 21 – Vypálené díly a zbytky ocelové desky

Protože bylo vrtáno několik stovek otvorů a u většiny z nich byl také vyřezán závit, byla tato činnost časově velmi náročná. Některé otvory byly vyvrtány na strojní vrtačce, ale to, bohužel, bylo proveditelné pouze u menších dílů, kde se otvory vešly mezi sloup vrtačky a nástroj. Ostatní otvory byly vyvrtány pomocí ruční vrtačky NAREX EVP 16. Pomocí ruční vrtačky byly také řezány závity. Díky výkonu 920 W, vysoké hmotnosti vrtačky a rýčové rukojeti bylo vrtání do oceli bezproblémové a produktivita práce se blížila strojní vrtačce. Pro řezání závitů byly použity standardní HSS maticové závitníky, které mají delší ostří, a závit se vyřezává jedním nástrojem. U rozměrů M4 a nižších bylo nutné v polovině řezání závitník vytáhnout, aby nedošlo k jeho ucpání šponami. Závity M5 a větší byly řezány najednou. Vzhledem k povaze laserem řezaného materiálu, kde byla některá místa více prohřátá, bylo nutno měnit závitníky po vyřezání cca 50 otvorů vzhledem k jejich opotřebením. Vrtáky, které musely převrtat kalený povrch, musely být broušeny někdy i každých 10 otvorů.

2.1.1 VSUVKA - PŘÍPRAVEK PRO KONTROLU KOLMOSTI RUČNÍ VRTAČKY

Pro zajištění kolmosti vrtání byl zhotoven jednoduchý přípravek obsahující akcelerační senzor ADXL312 [10], mikrořadič ATMEGA8 [11] a LED displej. Protože se jedná o vývojový vzorek, bylo zapojení realizováno na univerzální desce. Přestože výroba prototypu a programování zabralo pouze několik hodin, přípravek v praxi velmi osvědčil. Program pro mikrořadič byl napsán v jazyce C a nutno uznat že není optimální, neboť používá výpočty s datovými typy FLOAT, nicméně pro tento účel je rychlost dostatečná a program vejde do 8 kB paměti FLASH. Pro složitější nebo na rychlost náročné projekty je vhodné používat celočíselné datové typy a goniometrické funkce řešit pomocí převodních tabulek. K zobrazení slouží maticový 4znakový LED displej typu Agilent HDLR 2416 [12]. Jedná se o poměrně drahý a nedostupný typ a použít proto, že se povedlo levně zakoupit na aukčním serveru Aukro desku z jakéhosi hracího automatu pro více gamblerů, kde těchto displejů bylo obsaženo celkem 32. Po očištění od zaschlého piva byly všechny displeje funkční. Displeje vynikají dobrou čitelností za všech podmínek, jejich nevýhodou je vysoká spotřeba kolem 1 W. Po umístění senzoru na vrtačku je nutno provést kalibraci, jednak kvůli nepřesnosti umístění, ale hlavně kvůli offsetu nulových hodnot jednotlivých os akcelerometru, který může činit až 10% jejich rozsahu. Protože při práci s vrtačkou nikdy nebyla používána přídatná rukojeť, mohla být deska s akcelerometrem umístěna do vybrání pro její upnutí. Deska s akcelerometrem byla připevněna elektroinstalační lepicí páskou a deska s displejem je k vrtačce uchycena Velcro textilíí přilepenou pomocí tavného lepidla. Konektor pro připojení desky s akcelerometrem slouží zároveň k naprogramování mikrořadiče. Modul se napájí malým spínaným adaptérem s výstupním napětím 5V. Schéma zapojení a zdrojový kód je na přiloženém CD.



Obr. 22 – Přípravek pro kontrolu kolmosti

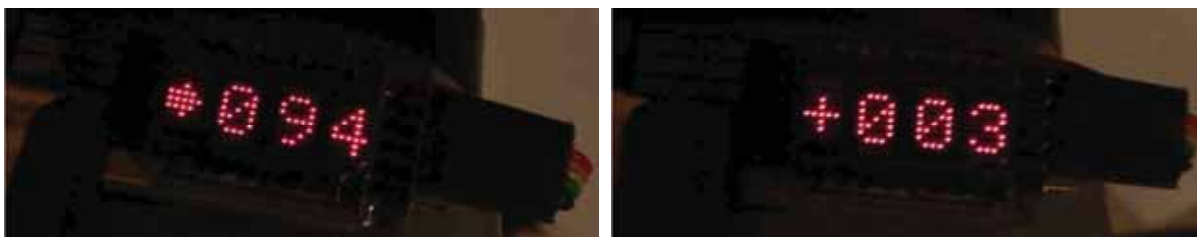
Přípravek je schopen kontrolovat kolmost nebo rovinu, přičemž zobrazuje úhel v desetinách stupně a směr, do kterého má být vrtačka nakloněna, aby bylo dosaženo kolmosti. Při kontrole roviny se zobrazuje pouze směr náklonu nahoru nebo dolů. Přesnost přípravku je přibližně $\pm 0,5^\circ$, což pro účel ručního vrtání dostačuje.



Obr. 23 – Nainstalovaný přípravek pro kontrolu kolmosti



Obr. 24 – Kontrola roviny



Obr. 25 – kontrola kolmosti

Na povrchu ocelového plechu je tenká vrstva strusky, která na některých místech praská a vyvyšuje se. Proto ji bylo nutné na dosedacích plochách pro kolejnice lineárních vedení odstranit. K tomu byla použita úhlová bruska s lamelovým kotoučem a pomocí pravítka byla průběžně kontrolována rovinnost ploch. Tato operace produkuje obrovské množství prachu černé barvy, kterého se lze velmi těžce zbavit, a proto je vhodné provádět broušení venku. Bohužel, v době výroby rámu byly venkovní teploty kolem -15°C , takže bylo nutno znečišťovat dílnu. Mírně zkorodované díly, kde taktéž praskala vrchní vrstva strusky, byly na hrubo přebroušeny aby nedošlo poškození nátěru vlivem dalšího rozkladu.

Po přebroušení byl rám složen dohromady a díky použití zámků téměř všechny díly přesně dosedaly. U úzkých a dlouhých dílů došlo k mírnému prohnutí po vyřezání laserem, a proto byly před bodovým svařením přihnuty zpět pomocí několika svorek.

Po kontrole geometrie byl rám bodově svařen CO₂ svářečkou. Byl použit svařovací drát o průměru 1 mm a proud byl nastaven na 130 A, při vyšším proudu se již drát utavoval v trysce svářečky. Po několika bodech byla opět zkontrolována geometrie pomocí úhelníku a

mohlo se pokračovat ve svařování. Aby se eliminovalo riziko zkroucení rámu vlivem prohřátí, byla většina součástí vařena bodově s postupným zvyšováním počtu svárů až na přibližně jeden každých 10 mm. Souvisle byly svařeny pouze místa s nejvyšším předpokládaným namáháním, tj. mezi základnou, sloupy portálu a portálem, a také v rozích základny. Nevýhodou svařování pomocí velkého množství bodů je nižší pevnost, velké znečištění svařovaných součástí a zanášení trysky, nicméně test ukázal, že pevnost takového spoje je více než dostatečná. Spoj o délce přibližně 30 mm povolil až po několika silných úderech kladivem. Většina dílů navíc drží pohromadě pomocí zámků a mechanické namáhání se rozkládá vždy na více dílů. Bohužel, po svaření došlo k menšímu prohnutí základny v místě portálu, ale základnu se podařilo narovnat pomocí hydraulického rozpínáku.



Obr. 26 – Svařování rámu

Jako nátěr rámu byla použita syntetická barva HOSTAGRUND S2160, sloužící jako základová i vrchní. Byl vybrán matný černý odstín. Plochy pro montáž kolejnic a ostatních komponent byly maskovány papírovou krycí páskou. Barva obsahuje 35% VOC, takže výrobce patrně preferoval kvalitu a životnost barvy před její šetrností k životnímu prostředí. Rozpouštědlem je xylen. Barva by měla být nelepivá již za 2,5 hodiny po aplikaci a k úplnému zaschnutí by mělo dojít za 16 hodin. K aplikaci byl použit plyšový váleček o délce 100 mm. Nepřístupná místa byla natřena štětcem. Kromě rámu byly pochopitelně natřeny i všechny ostatní vyráběné součásti. Celková spotřeba barvy činila přibližně 2/3 z plechovky 0,6kg.

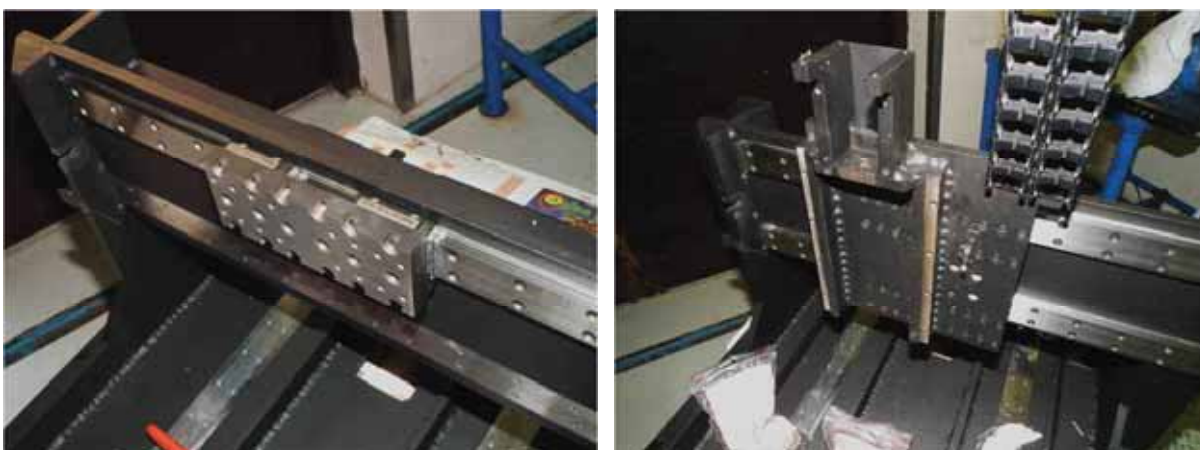


Obr. 27 – Natřený rám frézky

2.2 MONTÁŽ KOMPONENT FRÉZKY

2.2.1 LINEÁRNÍ VEDENÍ A POHYBOVÝ ŠROUB OSY X

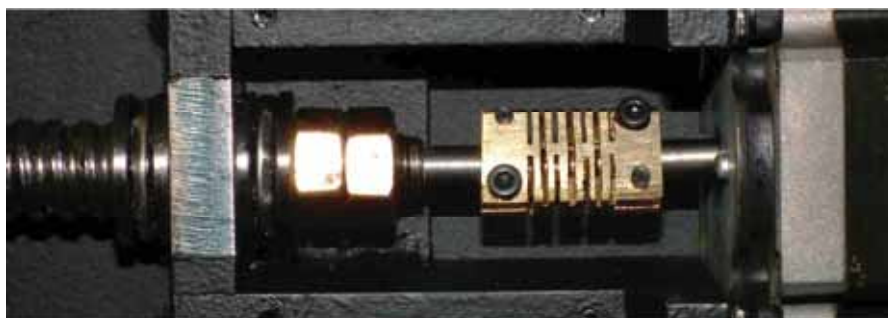
Jako první proběhla montáž lineárních vedení na ose X. Jedná se o vozíky se čtyřmi řadami kuliček v plastových klecích na rozšířené broušené kolejnici upevněné pomocí dvou řad šroubů. Na každou z kolejnic byl umístěn jeden pár vozíků a kolejnice byly přišroubovány k rámu pomocí celkem 56 šroubů M4 s imbusovou hlavou, ale šrouby zatím nebyly dotaženy. Poté byly na vozíky přišroubovány dva vymešovací bloky (24 šroubů M4) a suport osy X (32 šroubů M5). Dotažení šroubů kolejnic bylo provedeno za pohybu suportem a byly dotahovány vždy šrouby v jeho blízkosti.



Obr. 28 – Montáž lineárních vedení na ose X

Při montáži kuličkového šroubu bylo nejprve přišroubováno pouzdro s maticí na suport pomocí 4 šroubů M5, a poté bylo vytvořeno otočné spojení šroubu s rámem pomocí dvou axiálních ložisek typu 51100. Nejprve byla dotažena ložiska na straně motoru dvěma

maticemi M10 * 1. První matice byla dotažena lehce a druhá větší silou, ale tak, aby bylo možno se šroubem volně otáčet. Po dotažení byly matice zalepeny zajišťovačem šroubů Locktite. Poté byly obdobně dotaženy a zajištěny na druhé straně dvě dvojice stejných matic.



Obr. 29 – Detail konce pohybového šroubu

2.2.2 LINEÁRNÍ VEDENÍ A POHYBOVÝ ŠROUB OSY Z

Suport osy Z se pohybuje pomocí lineárního vedení s omezenou délkou pojezdu. Z kolejnic byly odšroubovány dorazy. Jeden pár kolejnic je přišroubován pomocí 8 šroubů M5 do frézovaných drážek v X suportu a druhý pár do Z suportu. Poté byly kolejnice umístěny k sobě a byly do drážek shora vloženy lišty s do kříže uspořádanými válečky. Poté byly přišroubovány zpět dorazy a Z suport byl posunut ke spodnímu dorazu, přičemž byly kolejnice dotaženy pomocí šroubů M5 typu červ na horní straně. Obdobně byl suport posunut k hornímu dorazu a byla dotažena dolní strana kolejnic. Tento postup je nutný k tomu, aby byly lišty s válečky umístěny na správné pozici.

Montáž kuličkového šroubu a matice s pouzdrem byla obdobná jako u osy X, s tím rozdílem, že šroub osy Z má jeden volný konec. Suport osy Z je tvořen upínací deskou s maticí otvorů se závitem M6.

2.2.3 LINEÁRNÍ VEDENÍ A POHYBOVÝ ŠROUB OSY Y

Montáž lineárních vedení a pohybového šroubu je stejná jako u osy X. Suport osy Y se skládá z ohýbaného krytu z 1 mm plechu a upínací desky tloušťky 10mm s maticí otvorů se závitem M6. Je zapotřebí 96 šroubů M4 a 36 šroubů M5.

2.2.4 KROKOVÉ MOTORY A PRUŽNÉ SPOJKY

Krokové motory obsahovaly na koncích hřídele ozubené kolo a tlumič vibrací. Tyto součásti bylo nutno odstranit. Před samotným odstraněním byly otvory pro hřídel zality tavným lepidlem, aby nedošlo k natažení špon dovnitř krokového motoru vlivem silného magnetického pole. Obě nežádoucí součásti byly následně destruktivně odstraněny. Tlumič vibrací byl tvořen kroužkem zalisovaným na hřídeli motoru a větším kovovým diskem. Celé to bylo zalito do gumové hmoty. Odstranění spočívalo v ukroucení většího disku, čímž zůstal na hřídeli pouze kroužek. Ten bylo možno volně sundat po jeho rozlisování ve svěráku. Poté byl motor upnut do svěráku za ozubené kolo, a to bylo z jedné strany upilováno. Po menší domluvě svěrákem jej bylo možno také volně odstranit. Každý z krokových motorů je

přišroubován k rámu pomocí 4 šroubů M5 a hřídele motorů jsou s pohybovými šrouby spojeny pružnými spojkami.

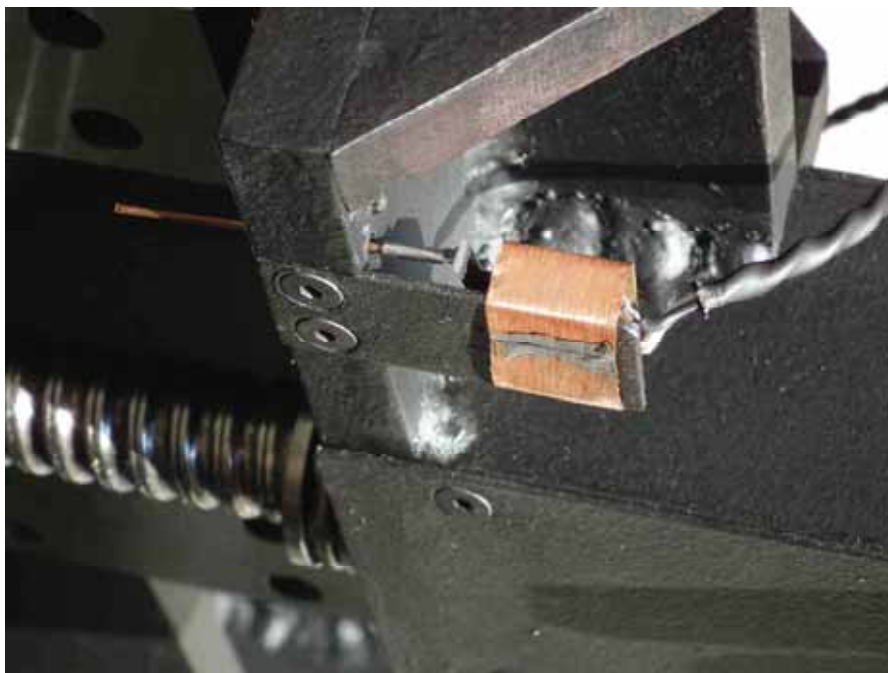
Z důvodu úspory nákladů byly pružné spojky vyrobeny ručně ze zbytku mosazné pásoviny 10 * 16 mm. Jejich výkres se nachází v tištěné příloze. Pásovina byla nejprve navrtána středem vrtákem 6,3 mm. Poté byly vyvrtány díry, zahloubení a vyřezány závity pro šrouby M3, sloužící k utažení spojky na hřídel motoru a konec kuličkového šroubu. Nakonec byly pomocí ruční pilky vyřezány drážky. Tato operace vyžaduje velmi přesnou práci s ruční pilkou, nicméně všechny tři spojky se podařilo úspěšně vyrobit na první pokus.



Obr. 30 – Pružná spojka

2.2.5 KONCOVÉ SPÍNAČE

Jako koncové spínače byly použity standardní mikrospínače s páčkou, které byly upraveny na jehlové. Konec páčky byl ohnut na opačnou stranu, byly do něj pomocí diamantového pilníku vybroušeny drážky a vzniklé okraje byly přihnuty k jehle vyrobené ze svařovacího drátu. Každý koncový spínač je umístěn do výpalku z 1 mm plechu pomocí 2 čepů. Aby nedošlo k uvolnění, je koncový spínač s plechem omotan Cu folií, která je zapájena, a jako celek je přišroubován do rámu pomocí dvojice šroubů M3 s kuželovou hlavou.



Obr. 31 – Detail koncového spínače

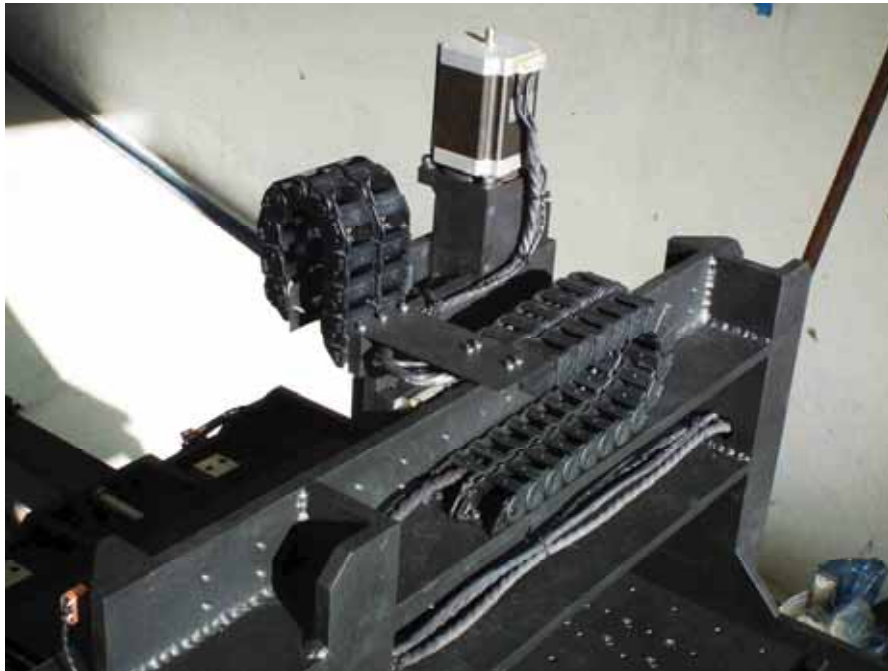
2.2.6 ZAKRYTOVÁNÍ

Prostory mezi motory a rámem s pružnou spojkou a axiálním ložiskem jsou zakrytovány dvojicí plechů tloušťky 1mm, které byly vypáleny na laserové řezačce stejně jako rám stroje. K upevnění slouží vždy čtveřice šroubů M3 s kuželovou hlavou. V základně rámu jsou dále umístěny dvě lišty z ohýbaného plechu, které mají zabránit padání špon a dalších nečistot do středního prostoru, kde jsou lineární vedení a pohybový šroub. Lišty jsou přišroubovány každá pomocí 8 šroubů M3 s imbusovou válcovou hlavou.

2.2.7 KABELY A VLEČNÉ ŘETĚZY

Aby byly pohyblivé kabely rovnoměrně mechanicky namáhány a aby nedošlo k jejich přivření do pojezdů frézky, jsou umístěny do vlečných řetězů o rozměrech 20 * 15 mm. Protože se počítá s vodním chlazením vřetena a budou kromě kabelů také vedeny hadice, jsou vlečné řetězy ještě zdvojeny. Navíc byla opatřena větší délka řetězů, než bylo potřeba, takže zdvojení nezpůsobilo žádné další náklady. Řetězy byly zakoupeny u firmy Strojtechnik. Každý z vlečných řetězů je upevněn pomocí 4 šroubů M3 na jedné straně k rámu (resp. suportu), a na druhá straně k liště vypálené z plechu tloušťky 1 mm.

K protažení kabelů je rám vybaven několika otvory, čímž jsou kabely z velké části skryty mezi výztuhami rámu a nemohou nikde zavazet. Kabely jsou dále přichyceny k rámu pomocí stahovacích pásek do tomu určených otvorů.

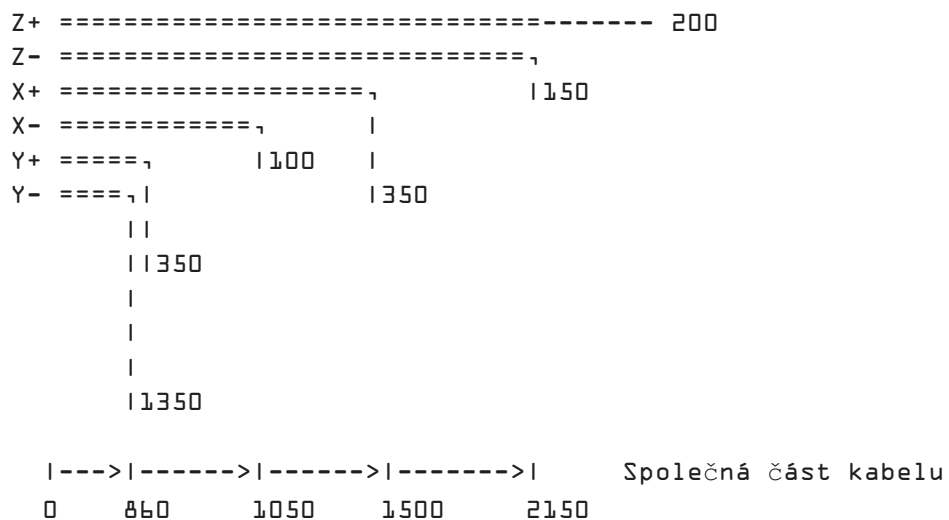


Obr. 32 - Uchycení vlečných řetězů a vedení kabeláže

Kabely pro připojení krokových motorů mají následující délky:

X:	1200 mm
Y:	1200 mm
Z:	2300 mm

Kabel pro připojení koncových spínačů byl vyroben z jednotlivých vodičů, které byly zkrouceny a vloženy do teplem smršťované bužírky. Délky párů vodičů od každého koncového spínače popisuje následující diagram a všechny rozměry jsou v milimetrech:



Obr. 33 – Rozměry kabelu pro připojení koncových spínačů

3 INTERPOLAČNÍ JEDNOTKA

Elektroniku CNC frézky mohou tvořit minimálně tři základní zařízení- osobní počítač, na kterém běží ovládací software, napájecí zdroj a driver krokových motorů nebo servomotorů, v tomto případě propojený s PC paralelním portem. Takovéto řešení je sice jednoduché, ale naráží na několik problémů:

- Paralelní port nemá dostatečné množství vstupních a výstupních signálů pro kompletní ovládání CNC frézky. Řešením by bylo krokové motory ovládat přímo a ostatní signály jako koncové spínače, nastavení otáček vřetene a chlazení rozšířit pomocí softwarové implementace nějakého druhu sériové sběrnice na paralelním portu, případně využitím jiného portu počítače. Ovládací rozhraní se tímto značně zkomplikuje.
- Při nastavování logických úrovní na výstupech paralelního portu pod vyššími operačními systémy je problematické dosáhnout konzistentního časování.
- Poslední dobou přestávají výrobci počítačů a základních desek v rámci úspor osazovat paralelní port.

Možnou alternativou k paralelnímu portu je použití USB převodníku v režimu přímého nastavování jeho vstupně výstupních pinů. Pro tento účel by mohl být použitelný např. FT2232 firmy FTDI, obsahující dostatek I/O portů, v režimu BIT-BANG. Bohužel se ale při pokusech ukázalo, že nastavování log. úrovní se provádí velmi nekonzistentní rychlostí a zahájení přenosu trvá pro tento účel neúnosně dlouhou dobu.

Z těchto důvodů je mezi PC a driver krokových motorů vloženo zařízení, známé jako interpolátor. Jedná se o koprocesor, který přijímá z PC pomocí nějakého druhu sběrnice, např. sériový port nebo USB, příkazy, podle kterých provádí ovládání driverů, resp. generuje časovou posloupnost signálů STEP a DIR. Interpolátor z důvodu potřebného výpočetního výkonu pracuje na rozdíl od ovládacího softwaru na PC v celočíselné aritmetice a jednotkou míry je zde 1 krok. Použitím interpolační jednotky se rovněž výrazně zvýší spolehlivost stroje, neboť selhání PC nebo některé softwarové vrstvy může mít v případě driveru řízeného z paralelního portu katastrofální následky, kdežto interpolátor musí obdržet platný příkaz, aby došlo k pohybu nástroje. Interpolátor je možné zakoupit od různých výrobců. Tyto moduly je možné na internetu nalézt pod anglickým názvem „Motion control device“. Bohužel u většiny je funkčnost podmíněna použitím ovládacího softwaru od stejného výrobce a není znám komunikační protokol. Ovládací software je navíc často velmi nízké kvality. Existují i open source řešení, ale zde je zase sporná spolehlivost.

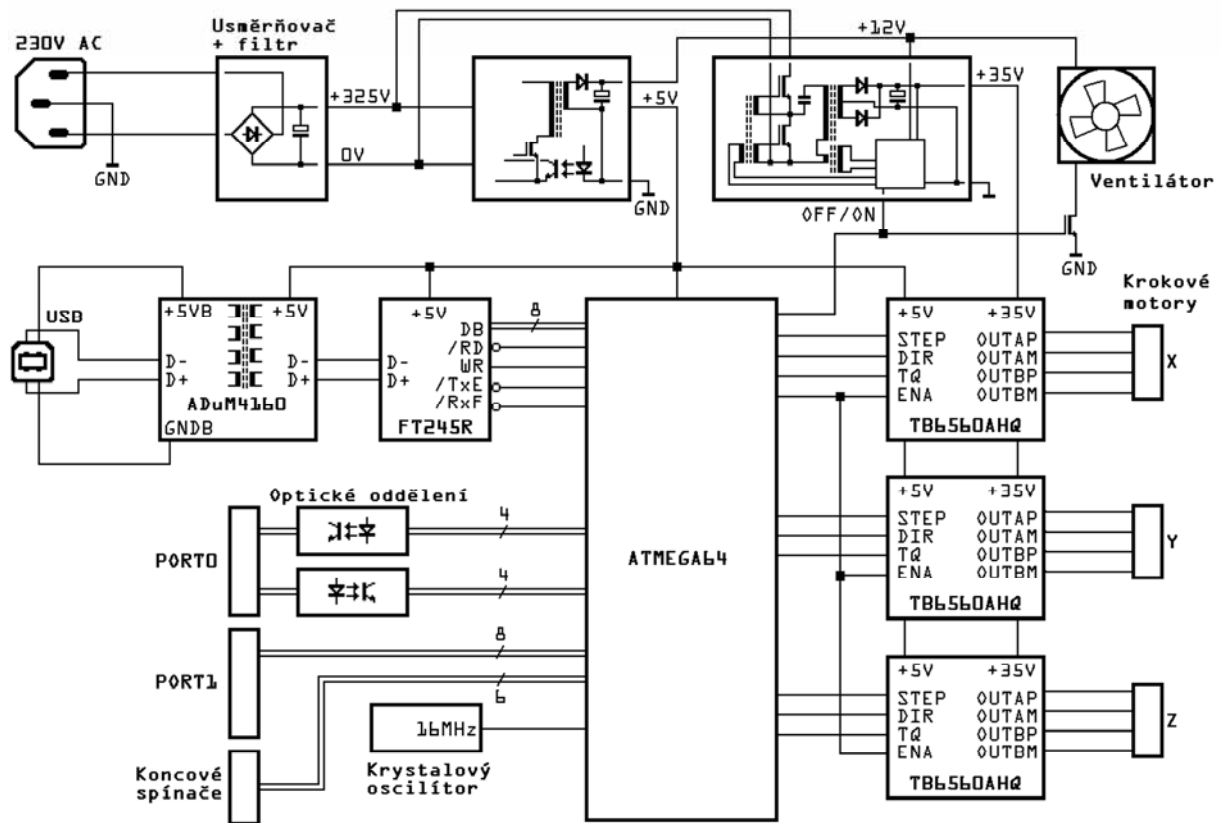
Z těchto důvodů bylo pro tento projekt vytvořeno zařízení, obsahující v jedné krabici napájecí zdroj, mikrořadič, provádějící interpolaci a driver krokových motorů, nazvané **interpolační jednotka**. Interpolační jednotka je řízena z PC přes USB port a je napájena síťovým napětím. Zařízení je schopno ovládat krokové motory pohánějící 3 osy. Každá osa může být vybavena párem koncových spínačů a interpolační jednotka provede automatické

zastavení při najetí na doraz a zakáže další pohyb v tomto směru. Z důvodu rozšiřitelností obsahuje několik univerzálních portů pro připojení dalších zařízení, jako např. frekvenční měnič a čerpadlo na chladicí kapalinu. Dvojice portů má jako sekundární funkci sběrnici UART. USB sběrnice a 8 signálů disponuje galvanickým oddělením, chránícím PC a interpolační jednotku proti přepětí, např. z důvodu chyby v kabeláži nebo statické elektřině.

3.1 PARAMETRY

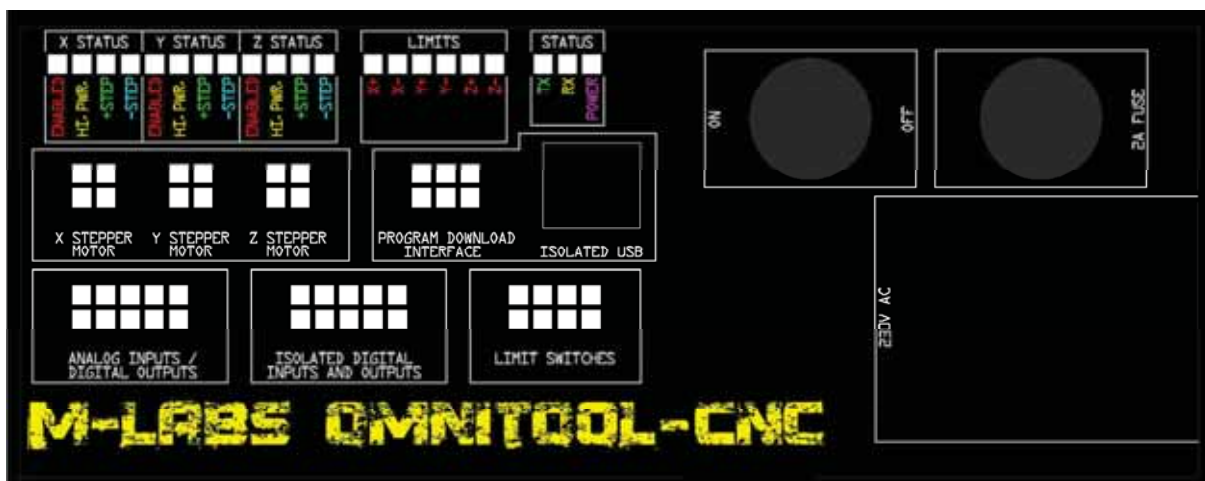
PARAMETR	MIN. HODN.	TYP. HODN.	MAX.HODN.
NAPÁJENÍ			
Napájecí napětí	200 V	230 V	270 V
Příkon	< 2 W (standby)	20 W	150 W
Jištění	Tavná pojistka o rozměrech D5*20, 3 A / F		
KOMUNIKACE			
USB specifikace	1.1		
USB identifikátor PID/VID	0x0403 / 0x6001		
Název USB zařízení	M-LABS MOTION CONTROL DEVICE		
Vyžaduje ovladač	FTD2XX [13]		
Elektrická pevnost USB oddělovače	2 kV		
Počet oddělených digitálních vstupů	4, zapojení LED dioda a odpor 680R		
Napětí na oddělených vstupech, log.0	-5 V	0 V	1 V
Napětí na oddělených vstupech, log.1	3 V	5 V	12 V
Počet oddělených digitálních výstupů	4, typ otevřený kolektor		
Proud do výstupu, log.0	100 uA	1 mA	10 mA
Proud do výstupu, log.1		0 A	10 uA
Elektrická pevnost optického oddělení	2 kV		
Napětí na neoddělených vstupech, log.0	-0,5 V	0 V	2 V
Napětí na neoddělených vstupech, log.1	3 V	5 V	5,5 V
DRIVER			
Napětí na prázdno		35 V	
Proud vinutím motoru	0A (standby); 0,75A (udržovací); 3A (pracovní)		
Možnost nastavení počtu kroků na periodu	4; 8; 16; 32		
INTERPOLACE			
Maximální rychlost interpolace	200 000 kroků/s (lineární) 50 000 kroků/s (spirálová)		
Rozsah interpolace	+- 2 147 483 648 kroků v každé ose		
Další možnosti	Kompenzace rychlosti při šikmém pohybu, plynulé zrychlení a zpomalení, automatické snižování výkonu motorů při udržování pozice		

3.2 BLOKOVÉ SCHÉMA



Obr. 34 – Blokové schéma interpolační jednotky

3.3 POPIS KONEKTORŮ



Obr. 35 – Návrh čelního panelu

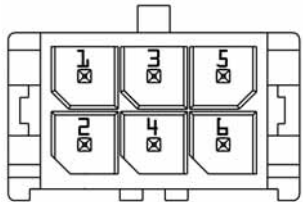
NAPÁJECÍ KONEKTOR

TYP KONEKTORU	EURO, 3 vodiče		
ROZMÍSTĚNÍ VÝVODŮ	Č.	OZNAČENÍ	FUNKCE
	1	L	Fáze 230V
	2	PE	Ochranný vodič
	3	N	Nulový vodič

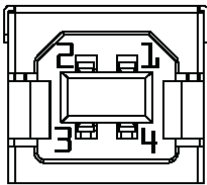
KONEKTORY PRO PŘIPOJENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ

TYP KONEKTORU	Molex MicroFit-4		
ROZMÍSTĚNÍ VÝVODŮ	Č.	OZNAČENÍ	FUNKCE
	1	1A	Vinutí 1
	2	1B	Vinutí 1
	3	2B	Vinutí 2
	4	2A	Vinutí 2

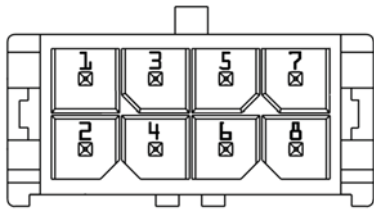
PROGRAMOVACÍ ROZHRANÍ PRO MIKROŘADIČ AVR

TYP KONEKTORU	Molex MicroFit-6		
ROZMÍSTĚNÍ VÝVODŮ	Č.	OZNAČENÍ	FUNKCE
	1	+5V	Napájení 5V
	2	MISO	Vstupní data
	3	MOSI	Výstupní data
	4	SCK	Hodiny
	5	GND	Zem
	6	/RESET	/Reset

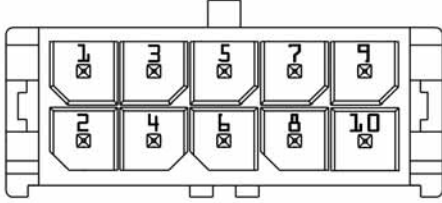
USB KONEKTOR

TYP KONEKTORU	USB-B		
ROZMÍSTĚNÍ VÝVODŮ	Č.	OZNAČENÍ	FUNKCE
	1	+5V	Napájení 5V
	2	D-	Data -
	3	D+	Data +
	4	GND	Zem

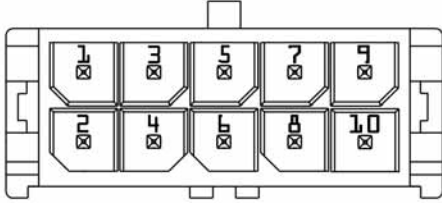
KONEKTOR PRO PŘIPOJENÍ KONCOVÝCH SPÍNAČŮ

TYP KONEKTORU	Molex MicroFit-8		
ROZMÍSTĚNÍ VÝVODŮ	Č.	OZNAČENÍ	FUNKCE
	1	GND	Zem, kontakty spínačů jsou ve vypnutém stavu spojeny se zemí.
	2		
	3	X+	Osa X, kladný konec
	4	X-	Osa X, záporný konec
	5	Y+	Osa Y, kladný konec
	6	Y-	Osa Y, záporný konec
	7	Z+	Osa Z, kladný konec
	8	Z-	Osa Z, záporný konec

GALVANICKY NEODDĚLENÉ GPIO

TYP KONEKTORU	Molex MicroFit-10		
ROZMÍSTĚNÍ VÝVODŮ	Č.	OZNAČENÍ	FUNKCE
	1	GND	Zem
	2	+5V	Napájení 5V
	3	AD0	Vývody je možno nakonfigurovat jako digitální vstupy/výstupy, nebo jako analogové vstupy
	4	AD1	
	5	AD2	
	6	AD3	
	7	AD4	
	8	AD5	
	9	AD6	
	10	AD7	

GALVANICKY ODDĚLENÉ GPIO

TYP KONEKTORU	Molex MicroFit-10		
ROZMÍSTĚNÍ VÝVODŮ	Č.	OZNAČENÍ	FUNKCE
	1	GND- I	Společné katody
	2	GND- O	Společné emitory
	3	IN0	Vstup0/ RxD
	4	OUT0	Výstup0/ TxD
	5	IN1	Vstup1
	6	OUT1	Výstup1
	7	IN2	Vstup2
	8	OUT2	Výstup2
	9	IN3	Vstup3
	10	OUT3	Výstup3

3.4 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL

Interpolační jednotka je ovládána z PC pomocí USB sběrnice. Jako USB převodník je použit integrovaný obvod FT245R. Pro zápis a čtení slouží na straně PC ovladač FTD2xx a k zařízení se přistupuje pomocí výrobcem dodaných knihoven [13], přičemž není třeba měnit jakékoliv nastavení převodníku, ani přenosovou rychlost (pracuje s maximální možnou rychlostí 1MB/s). Komunikační protokol pracuje pouze s ASCII znaky a rozlišuje malá a velká písmena. S interpolační jednotkou je možné pracovat i bez použití ovládacího softwaru pouze pomocí terminálu a virtuálního sériového portu, což je vhodné pro vývoj a pro otestování základních funkcí. Protokol obsahuje instrukce pro lineární interpolaci, kruhovou a spirálovou interpolaci, nastavení rychlosti posuvu, ovládání portů, testování stavu koncových spínačů a nastavení otáček vřetena. Interpolační jednotka pracuje s celočíselnou aritmetikou a veškeré výpočty reprezentují počet kroků. Znaménkové hodnoty jsou zadávány ve dvojkovém doplňkovém kódu. U lineární a kruhové/spirálové interpolace je prováděna korekce řezné rychlosti. Nástroj zachovává konstantní řeznou rychlost při pravoúhlém i šikmém pohybu, kdy má jeden krok větší vzdálenost než při pravoúhlém. U rychloposuvu tato korekce není prováděna.

ZNAK	MĚNÍ REGISTRY	POPIS
0..9, A..F	T(31..0) <<= 4; T(3..0) = (HEX)Z;	Uloží hexadecimální hodnotu do dočasného 32b posuvného registru T.
a		Nastavuje parametry plynulého rozjezdu a brzdy podle obsahu registru T: T(0) ... Povolení plynulého rozjezdu rychloposuvu T(1) ... Povolení plynulé brzdy rychloposuvu T(2) ... Povolení plynulého rozjezdu lineární interpolace T(3) ... Povolení plynulé brzdy lineární interpolace T(12..8) ... Nastavení doby rozjezdu/ brzdy ve 4násobku dvojkového logaritmu počtu kroků. Může nabývat hodnot 1-10. T(31..16) ... Dělička pro počáteční, resp. konečnou rychlost posuvu (výpočet shodný s příkazem ,f)
f	F = f(T15..0); RF = f(T31..16);	Nižší WORD registru T nastavuje řeznou rychlost při lineární a kruhové interpolaci a vyšší WORD rychlost rychloposuvu v krocích za jednu sekundu podle následující funkce. Jedná se o nastavení děličky. $F = 1562500 / T(15..0)$ Výpočet děličky pro zadanou rychlost v mm / min: $T(15..0) = 1562500 / F * 60 * ROZMĚR_KROKU_V_MM$

g	GPIO &= T(15..0) GPIO_DIR &=T(31..16)	Maskuje GPIO na 0 (nižší WORD- log. hodnota, vyšší WORD- směr portu, log. 1 - výstup).
G	GPIO = T(15..0) GPIO_DIR = T(31..16)	Maskuje GPIO na 1.
I,i		Nastaví rovinu kruhové interpolace podle T(1:0): 0... X,Y; 1... Z,X; 2... Y,Z
J	X,Y,Z	Kruhová / spirálová interpolace po směru hodinových ručiček se středem na absolutních koordinátách X,Y,Z a o poloměru R.
j	X,Y,Z	Kruhová / spirálová interpolace po směru hodinových ručiček se středem na relativních koordinátách X,Y,Z a o poloměru R.
K	X,Y,Z	Kruhová / spirálová interpolace proti směru hodinových ručiček se středem na absolutních koordinátách X,Y,Z a o poloměru R.
k	X,Y,Z	Kruhová / spirálová interpolace proti směru hodinových ručiček se středem na relativních koordinátách X,Y,Z a o poloměru R.
L	X,Y,Z = YT,YT,ZT;	Lineární interpolace na absolutní koordináty.
l	X,Y,Z += YT,YT,ZT;	Lineární interpolace na relativní koordináty.
M	X,Y,Z = YT,YT,ZT;	Rychloposuv na absolutní koordináty.
m	X,Y,Z += YT,YT,ZT;	Rychloposuv na relativní koordináty.
N		Povolí napájení driveru.
n		Zakáže napájení driveru.
O,o	O = T;	Nastaví celkovou délku oblouku kruhové interpolace v krocích. Jako jeden krok jsou počítány jak pravouhlé tak šikmé kroky. Nezapočítává se zde třetí osa v případě spirály.

P		Pozastaví interpolaci. Varování! Pozastavení se provede okamžitě a vlivem omezené dynamiky stroje může dojít k chybám odměřování a zvýšenému namáhání krokových motorů a šroubů.
p		Obnoví interpolaci.
R	R(31..0) = T;	Zápis vyšších 4B druhé mocniny poloměru kruhové interpolace.
r	R(63..32) = T;	Zápis nižších 4B druhé mocniny poloměru kruhové interpolace.
S		Zastavení interpolace Varování! Zastavení se provede okamžitě a vlivem omezené dynamiky stroje může dojít k chybám odměřování a zvýšenému namáhání krokových motorů a šroubů.
s		Provede restart interpolační jednotky.
T		Test, odešle cílové koordináty, informaci o připravenosti interpolační jednotky na další příkaz, stav koncových spínačů a stav GPIO. Formát odchozí zprávy: 00000000X00000000Y00000000Z0000 _____ Cílové koordináty _____ _____ Limity X, Y, Z (N)epřipraven/(P)řipraven/ 0...OK; x...X-; X...X+
t		Test, odešle aktuální koordináty, informaci o připravenosti interpolační jednotky na další příkaz, stav koncových spínačů a stav GPIO. Formát odchozí zprávy: 00000000x00000000y00000000z0000 _____ Výchozí koordináty _____ _____ Limity X, Y, Z (N)epřipraven/(P)řipraven/ 0...OK; x...X-; X...X+
v		Zastaví vřeteno *

V		Roztočí vřeteno * Nižší WORD registru T nastavuje otáčky. Pokud T(16) = 0, roztočí se vřeteno po směru hodin, pokud 1, proti směru hodin.
X	XT = T;	Nastaví cílovou souřadnici X.
Y	YT = T;	Nastaví cílovou souřadnici Y.
Z	ZT = T;	Nastaví cílovou souřadnici Z.
x	X = T;	Nastaví výchozí souřadnici X.
y	Y = T;	Nastaví výchozí souřadnici Y.
z	Z = T;	Nastaví výchozí souřadnici Z.

* Příkaz zatím není podporován, protože ještě nebyl určen formát komunikace s měničem pro vřeteno.

PŘÍKLAD POUŽITÍ PROTOKOLU:

FFFFFFFF0X000000020Y000000030ZL

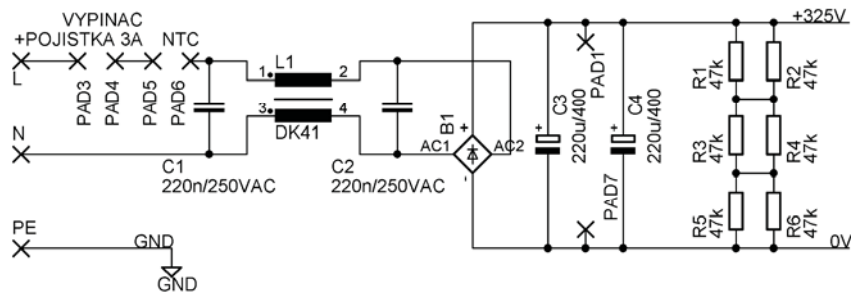
Provede lineární interpolaci na souřadnice x= -15; y= 32; z= 48 kroků.

3.5 POPIS OBVODU

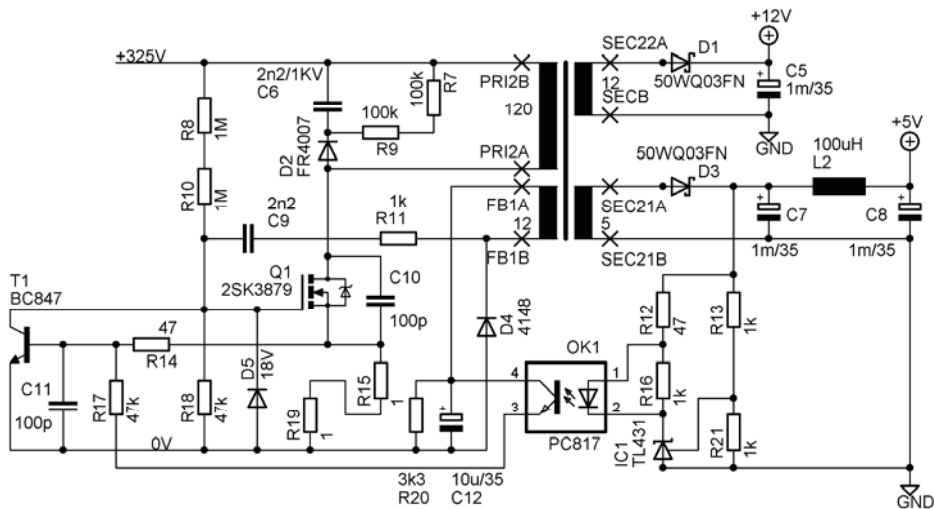
3.5.1 NAPÁJECÍ ZDROJE

Drivery krokových motorů potřebují pro efektivní činnost napájecí napětí kolem 35V. Špičkově může téct oběma fázemi vinutí krokového motoru proud až 3A, nicméně vzhledem k induktivnímu charakteru zátěže by potřebný výkon pro všechny 3 drivery neměl překročit hodnotu cca 100W. Napájecí zdroj byl pro jistotu dimenzován na dvojnásobný výkon, tj. 200W. Dále je nutné zajistit napájení mikrořadiče a ostatních logických obvodů. K tomu slouží nezávislý záložní zdroj malého výkonu, který je v provozu po celou dobu, kdy je interpolační jednotka zapnuta. Tato koncepce je rozšířená hlavně u počítačových zdrojů typu ATX.

Záložní zdroj je typu galvanicky oddělený blokující měnič a měl by být schopen dodat výkon cca 15W. Jedná se o samokmitající topologii a obvod disponuje přímou stabilizací napětí s napětovou referencí typu TL431 a odvozenou proudovou ochranou. Výstupní napětí je dáno odporovým děličem R13 a R21 a odpory R15 a R19 určují maximální špičkový proud primárním vinutím. Pracovní frekvence zdroje je přibližně 50kHz a je určena kondenzátorem C11 a impedancí uzlu s připojeným hradlem tranzistoru typu MOS-FET. Kondenzátor C10 slouží k ochraně tranzistoru proti vysokým ztrátovým výkonům v okamžiku sepnutí omezením dU/dt . Zapojení zdroje bylo převzato z [14], a údajně vzniklo reverzním inženýrstvím na bližší neurčený ATX zdroj. V minulosti bylo postaveno několik spínaných zdrojů založených na tomto zapojení s drobnými úpravami, a jejich provoz se zdá být bezproblémový. Počty závitů transformátoru byly určeny experimentálně.

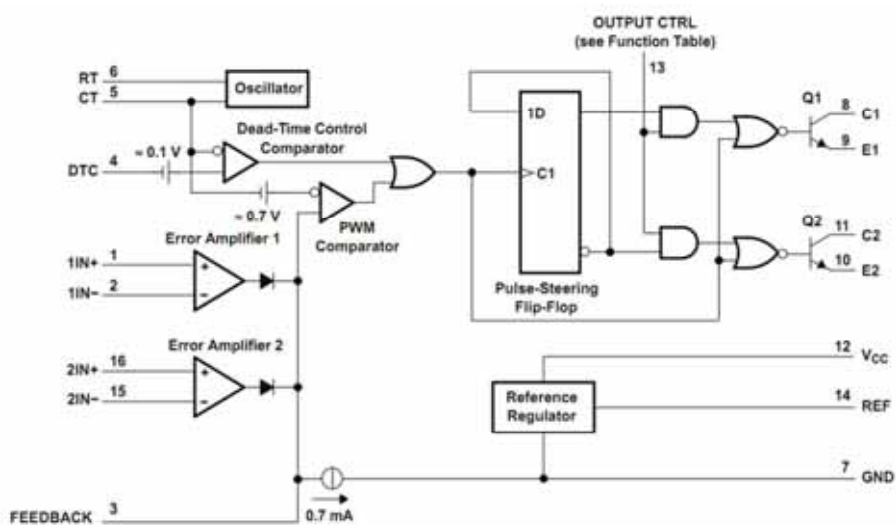


Obr. 36 – Schéma zapojení síťového filtru a usměrňovače



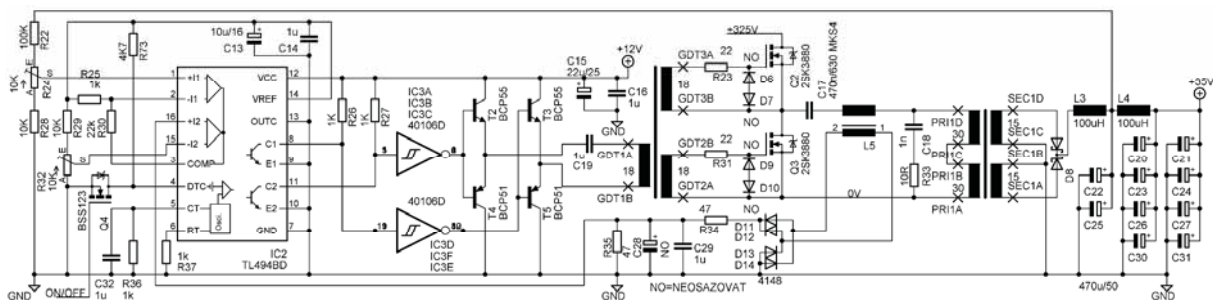
Obr. 37 – Schéma zapojení záložního zdroje

Hlavní zdroj, který napájí drivery, je kvůli vyššímu požadovanému výkonu poněkud složitější- jedná se o topologii polomost s budičem na sekundární straně a hradly spínacích tranzistorů buzenými GDT transformátorem. Umístění budiče na sekundární stranu zařízení umožňuje jednodušší ovládání zdroje a má rychlejší zpětnou vazbu, protože tu již není třeba galvanicky oddělovat. Nevýhodou je, že musí být napájen pomocným zdrojem, nicméně pokud by byl budič na primární straně, bylo by stejně nutné jej napájet nějakým snižujícím měničem. Takto může pomocný zdroj sloužit k napájení logiky i hlavního zdroje. Řízení zdroje je založeno na známém integrovaném obvodu TL494, který může být díky své univerzalitě použit téměř pro jakýkoliv spínaný zdroj, jak jednočinný tak dvojitý (nastavuje se vstupem OUTPUT CTRL). Má vlastní zdroj referenčního napětí a k řízení PWM modulátoru je možno využít dvou zpětnovazebních vstupů. Pracovní frekvence se nastavuje RC filtrem na vývodech RT a CT. Princip tohoto integrovaného obvodu a všechny potřebné výpočty jsou popsány v dokumentu [15].



Obr. 38 – Blokové schéma TL494 [16]

Pracovní frekvence zdroje byla zvolena cca 170kHz. Zdroj má stabilizaci napětí řešenou porovnáním napětí na odbočce odporového děliče R22, R24, R28 s referenčním napětím 5V. Druhá zpětná vazba slouží jako proudové omezení, které je odvozeno z primární strany. Tím je zároveň omezen i proud do filtračních kondenzátorů při zapnutí zdroje. K omezení proudu je použit proudový transformátor a následně je snímáno napětí na odporu R35. Toto napětí je filtrováno a porovnáváno s nastaveným napětím odvozeným od reference. K dostavení výstupního napětí slouží odporový trimr R24 a k nastavení proudové ochrany trimr R32. K vypínání zdroje byl použit vstup DTC (střída výstupních signálů se níží na 0, pokud je na DTC napětí 5 V). Pomocí výstupů TL494 je řízen budič GDT transformátoru. Ten je typu plný most a je napájen ze stejné větve jako TL494. Jako budič slouží vždy trojice paralelně zapojených hradel CMOS40106, která jsou proudově posílena NPN a PNP bipolárními tranzistory. Primární vinutí GDT je kapacitně odděleno keramickým kondenzátorem 1uF. Správná funkce GDT transformátoru je kritická na jeho způsob vinutí. Transformátor musí být navinut trifilárně aby byla omezena parazitní indukčnost jednotlivých vinutí. Průběh napětí na hradlech výkonových tranzistorů je vhodné ověřit pomocí osciloskopu, jestli nevykazuje příliš dlouhé náběžné a sestupné hrany, nebo případně nějaké zakmitávání. Změřené průběhy jsou na obr. 61, kde je rovněž vidět doba deadtime, vkládaná TL494 kvůli eliminaci příčného proudu. Drobné překmity jsou způsobeny Müllerovou kapacitou. Jako výkonové tranzistory byly použity typy Toshiba 2SK3880 ($V_{DS} = 800V$, $I_d = 6,5A$, $C_{gs} = 1,5nF$). Tranzistory mají integrovanou ochranu proti přepětí na hradle, proto na desce není osazena. K omezení dU/dt slouží kombinace R33 a C18. Pár tranzistorů je umístěn na chladiči. Sekundár transformátoru je dvoucestně usměrněn dvojitou Schottkyho diodou, která je také umístěna na chladiči. Výstupní napětí je filtrováno LC filtrem s baterií nízkoimpedančních kondenzátorů. Rozdělením kapacity mezi několik kondenzátorů by mělo být zmírněno jejich proudové namáhání, a tím prodloužena životnost.

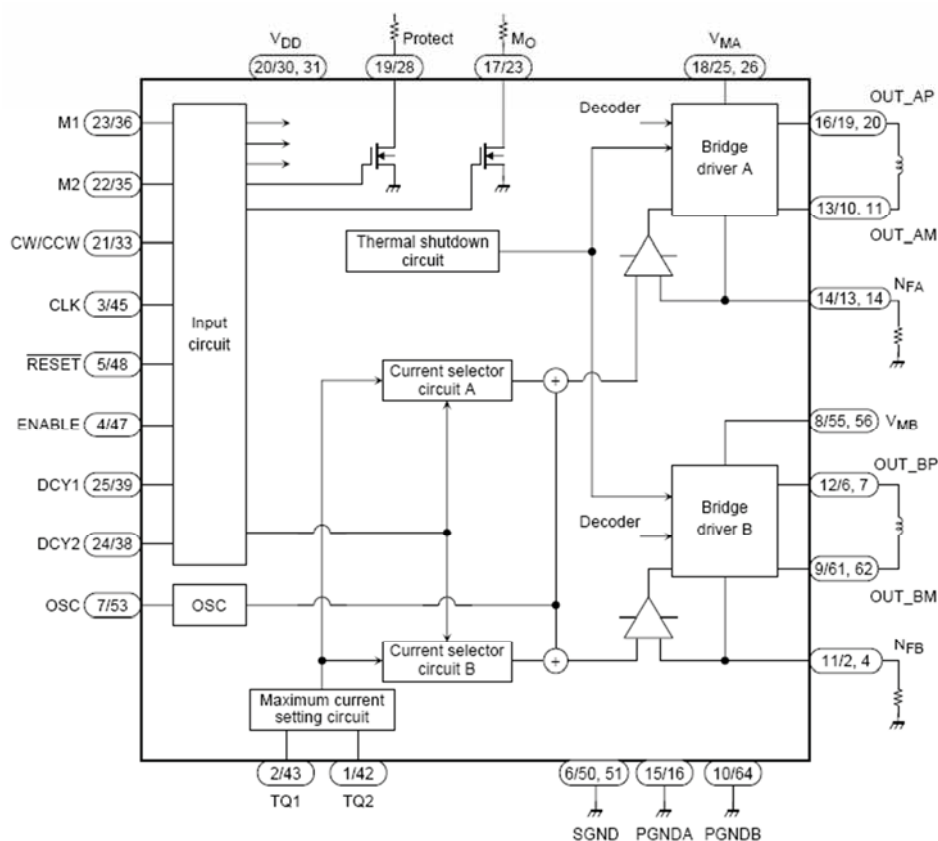


Obr. 39 – Schéma zapojení hlavního zdroje

3.5.2 DRIVER KROKOVÝCH MOTORŮ S TB6560AHQ

Bipolární driver krokového motoru je možno realizovat osmičí spínacích tranzistorů a mikrokontroleru nebo programovatelného logického pole. Jinou možností je použít k tomu určený integrovaný obvod. Po prohledání nabídek různých výrobců byl vybrán integrovaný obvod TB6560AHQ [17] firmy Toshiba. Cena tohoto integrovaného obvodu je výrazně nižší než předchozí navrhované řešení a obsahuje všechny potřebné funkce včetně mikrokrokování a nastavení výkonu motoru. Maximální povolený proud je 3,5 A a maximální

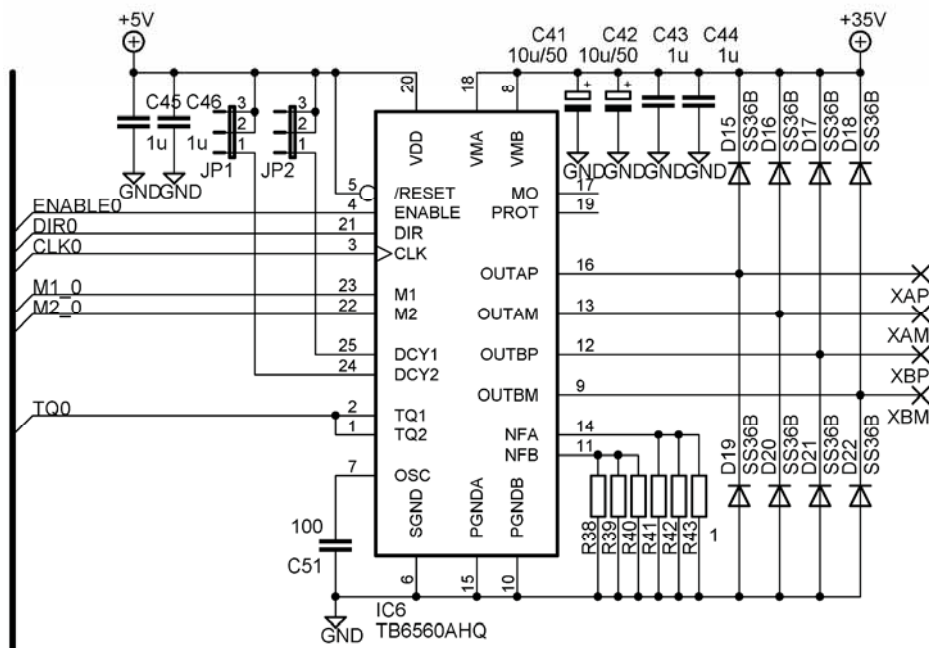
napětí 40 V, což je pro tento účel dostatečné. Obvod je v souladu s běžnou zvyklostí řízen signály CLK a DIR pro provedení kroku a definici směru. Může pracovat v režimech 4 a 8 kroků na periodu, a navíc umožňuje 16 a 32 násobné mikrokrokování. K výběru počtu kroků slouží vstupy M1 a M2. Vstupy TQ1 a TQ2 slouží k nastavení výkonu. Snížení výkonu je vhodné např. ve stavu, kdy motor pouze udržuje natočení hřídele. Driver krokových motorů obsahuje 3 integrované obvody TB6560AHQ. TB6560AHQ je v pouzdru SIP, které je ze zadní strany vybaveno masivní měděnou plochou pro odvod tepla. Montáž na chladič se provádí pomocí dvojice šroubů M3.



Obr. 40 - Blokové schéma TB6560AHQ

ZÁKLADNÍ PARAMETRY TB6560AHQ

- Maximální výstupní proud (pro každou fázi): $I_{out} = 3,5 \text{ A}$
- Maximální napájecí napětí výkonové části: $U_m = 40 \text{ V}$
- Jmenovité napájecí napětí pro logiku: $U_{dd} = 5 \text{ V}$
- Odpor v sepnutém stavu (součet odporů obou tranzistorů): $R_{on} = 0,6 \Omega$
- Počet kroků na periodu: 4,8,16 nebo 32
- Regulace výstupního proudu ve 4 krocích
- Nastavení maximálního proudu vinutím pomocí bočníku ($I_{out} = 2 / R_n$)



Obr. 41 – Schéma zapojení driveru krokového motoru

3.5.3 MIKROŘADIČ

V interpolační jednotce je použit mikrořadič řady AVR ATMEGA64 [18]. Má dostatečné množství portů a výpočetní výkon AVR je pro tuto aplikaci dostatečný i při 32 a 64b aritmetice. Z interních periférií je využito 1 z časovačů, externí přerušení pro řízení datového toku mezi FT245R a jeden UART pro případnou komunikaci s dalšími zařízeními. Jako algoritmus pro interpolaci úsečky byl použit Bresenhamův algoritmus pro 3rozměrný prostor [19]. Algoritmus interpolace oblouku a spirály vychází z trigonometrie a porovnává se druhá mocnina vzdálenosti bodu od středu s druhou mocninou poloměru. Podle výsledku se určí, zda se má provést krok přímo nebo šikmo. Při tomto výpočtu je nutno použít 64b aritmetiku. Tento algoritmus je časově náročnější než Bresenhamův algoritmus pro kružnici [20], ale je vhodnější z důvodu univerzality, neboť začátek i konec kružnice nebo spirály se může nacházet v libovolném bodě. Při interpolaci spirály je tento algoritmus kombinován s algoritmem pro úsečku ve 2rozměrném prostoru, přičemž jednu souřadnicí je celkový počet kroků a druhou výška spirály.

Firmware pro mikrořadič byl naprogramován v jazyce C a využívá vkládaný assembler. Zdrojové kódy (cnc.c, cnc.h a asm.S) a obraz FLASH paměti je uložen na přiloženém CD v adresáři AVR.

NASTAVENÍ FUSES:

```
Extended byte: 0xFF
High byte:    0xD1
Low byte:     0x00
```

K naprogramování mikrořadiče byl použit USB->ISP kabel s převodníkem FT232R, obsluhovaný programem FTISP [21]. Software využívá režim BIT-BANG a pracuje s jakýmkoliv typem FTDI převodníku. Jedná se o typické zapojení převodníku FT232R a propojení s ISP rozhraním je následující:

DTR -> SCK; DSR -> MISO; DCD-> MOSI; RI -> /RESET

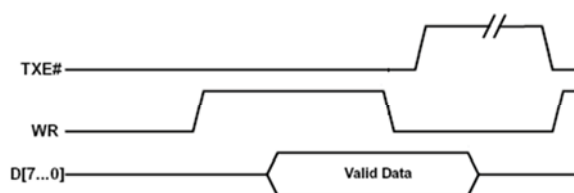
Programátor byl realizován na univerzální desce a obsahuje navíc konektor pro UART a volbu napájecího napětí: 5 V, 3,3 V nebo z aplikace. Toto řešení je pravděpodobně nejjednodušším programovacím kabelem pro AVR do USB portu a pracuje relativně rychle a spolehlivě.



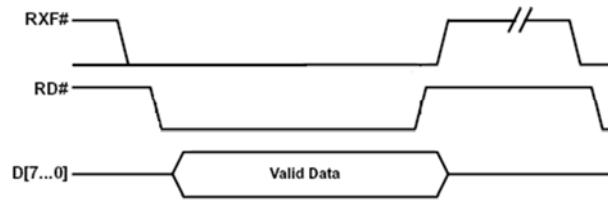
Obr. 42 – Použitý programovací kabel

3.5.4 PŘEVODNÍK USB <-> FIFO

Kvůli komplikovanému komunikačnímu protokolu USB sběrnice se často používají převodníky na UART nebo paralelní rozhraní. Pravděpodobně nejrozšířenějšími USB převodníky jsou integrované obvody firmy FTDI. V interpolační jednotce je použit převodník USB <-> FIFO, který má 8bitovou paralelní sběrnici. Dosahuje přenosové rychlosti 1MB/s a ovládá se poměrně jednoduše pomocí signálů /WR, /OE, /TXE a /RXF. Vstup /WR na sestupnou hranu zapisuje do vyrovnávací paměti data z datové sběrnice a odesílá je. Logická 0 na vstupu /OE načítá data z vyrovnávací paměti pro příjem na datovou sběrnici a při náběžné hraně je zásobník posunut na další byte. Výstup /TXE indikuje logickou 0 připravenost k odesílání a výstup /RXF indikuje log. 0 příchozí data. Z PC je možné po nainstalování ovladačů přistupovat prostřednictvím virtuálního sériového portu (VCP) nebo přímo pomocí DLL knihoven FTD2XX ovladače, což se jeví jako výhodnější. FT245R má vlastní EEPROM paměť, kde je PID/VID identifikátor, název zařízení, sériové číslo a další informace. K přeprogramování slouží výrobcem poskytovaná utilita FTPROG a konfigurace se provádí přímo přes USB rozhraní.



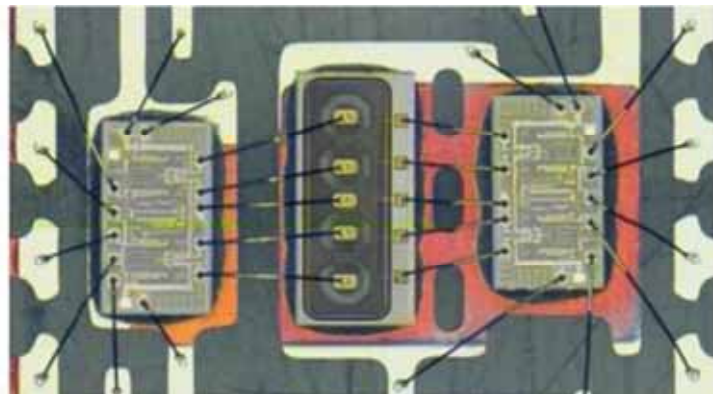
Obr. 14: Časový diagram zápisu do FT245R



Obr. 15: Časový diagram čtení z FT245R

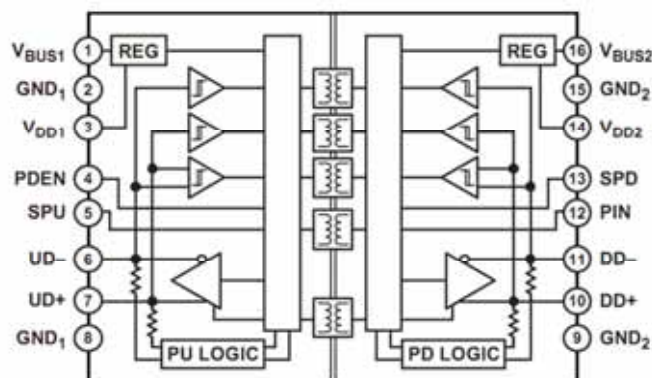
3.5.5 USB IZOLÁTOR

Kvůli ochraně PC, ke kterému bude připojena interpolační jednotka, je USB sběrnice galvanicky oddělena. K tomu byl použit specializovaný integrovaný obvod ADuM4160 [22] od společnosti Analog Devices, využívající technologii iCoupler®. Signály jsou odděleny pomocí miniaturních transformátorů umístěných na vlastním čipu přímo v pouzdru integrovaného obvodu.



Obr. 43 – Struktura iCoupler® [23]

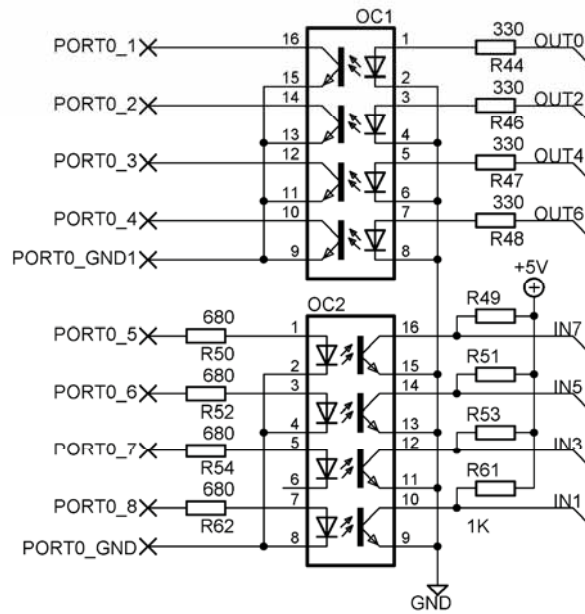
USB izolátor může pracovat s přenosovou rychlostí 12Mbit/s, jde tedy o specifikaci USB1.1. ADuM4160 je v pouzdru SOIC-16W (široká varianta) a výrobcem uváděná izolační pevnost mezi oběma stranami je 5 kV.



Obr. 44 - Blokové schéma ADuM4160

3.5.6 OPTICKY IZOLOVANÉ VSTUPY A VÝSTUPY

Pro bezpečné připojení dalších zařízení, jako např. frekvenční měniče, na GPIO obsahuje interpolační jednotka 4 galvanicky oddělené vstupy a 4 výstupy. Výstupy jsou typu otevřený kolektor a vstupy jsou kompatibilní s logickými úrovněmi TTL. Pro oddělení byly použity rychlé optrony Toshiba TLP621-4 [24].



Obr. 45 - Schéma zapojení galvanického oddělení portu

3.6 NAVÍJECÍ PŘEDPISY PRO TRANSFORMÁTORY

Protože jsou parametry transformátorů závislé na způsobu jejich vinutí, je zde uvedena jejich výrobní dokumentace včetně fotografií. Vzhledem k vysoké spínací frekvenci je pro většinu vinutí použito VF lanko složené z několika desítek tenkých lakovaných drátů, čímž je potlačen povrchový jev. Vývody transformátorů jsou kvůli zvýšení odolnosti a izolaci opatřeny silikonovými bužírkami vhodných průměrů. Jako izolace mezi vrstvami byla použita PTFE folie o síle 0,05 mm. Aby byla zachována rovinnost jednotlivých vrstev vinutí, byla volná místa vyplněna neutrálním silikonem. Kostříčky transformátorů byly zhotoveny ze sklolaminátu. Pro vinutí GDT a proudového transformátoru byl použit drát o rozměru 30AWG s kynarovou (PVDF) izolací a elektrickou pevností 250V.

3.6.1 TRANSFORMÁTOR PRO STANDBY ZDROJ

PARAMETRY VINUTÍ

Jádro: E16/12/5, průřez 20mm², materiál 3F3

PRI: 12z, VF lanko o průřezu 0,1mm²

FB: 12z, libovolný lakovaný drát

SEC5: 5z, VF lanko o průřezu 0,25 mm²

SEC12: 12z, VF lanko o průřezu 0,25 mm²

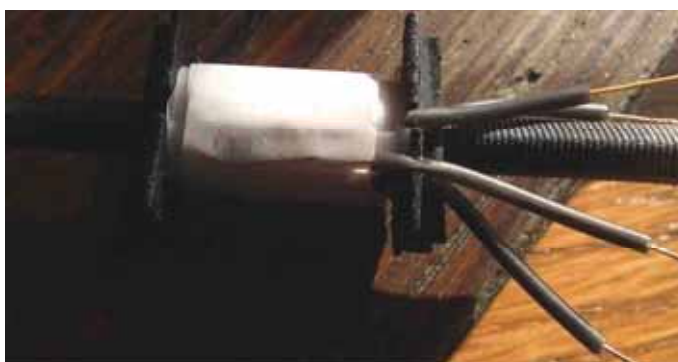
NAVÍJECÍ PŘEDPIS



Obr. 46 – První vrstva primárního vinutí a izolace ze 2 vrstev PTFE folie



Obr. 47 – Dokončení primárního vinutí. Následují 4 vrstvy PTFE folie



Obr. 48 – Zpětnovazební vinutí, následuje silikonová výplň a 4 vrstvy PTFE folie



Obr. 49 – Obě sekundární vinutí, následuje silikonová výplň, 4 vrstvy PTFE folie a zafixování lepící páskou.



Obr. 50 – Dokončený transformátor pro standby zdroj. Jádru má vzduchovou mezeru 0,5mm rozdělenou mezi střední a krajní sloupky jádra.

3.6.2 GDT TRANSFORMÁTOR

PARAMETRY VINUTÍ

Jádro: feritový toroid, vnější průměr 21 mm, průřez 24,6mm², materiál 43

PRI: 18z, drát 30AWG kynar + silikonová bužírka jako dodatečná izolace

SEC a, b: 18z, drát 30AWG kynar, vinuto trifilárně.

NAVÍJECÍ PŘEDPIS



Obr. 51 – Vinutí GDT transformátoru



Obr. 52 – GDT transformátor ve smršťovací bužírce

3.6.3 TRANSFORMÁTOR VÝKONOVÉHO ZDROJE

PARAMETRY VINUTÍ

Jádro: ETD34, materiál 3F3

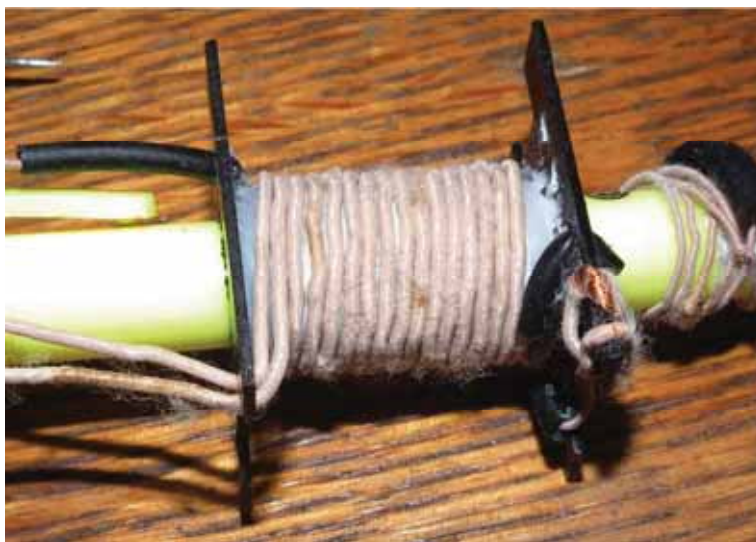
PRI: 60z, VF lanko o průřezu 0,25mm². Kvůli snížení parazitní indukčnosti bylo primární vinutí rozděleno na dvě poloviny, mezi kterými je sekundární vinutí.

SEC a, b: 15z, VF lanko o průřezu 1 mm², vinuto bifilárně

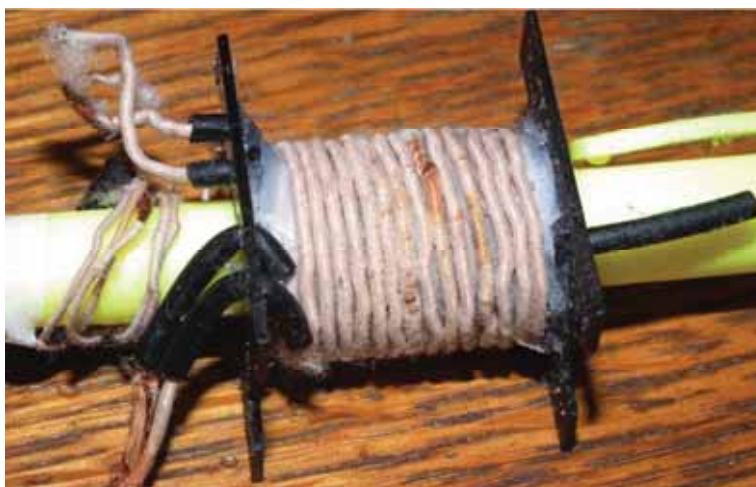
NAVÍJECÍ PŘEDPIS



Obr. 53 – První polovina primárního vinutí, následuje silikonová výplň a 4 vrstvy PTFE folie



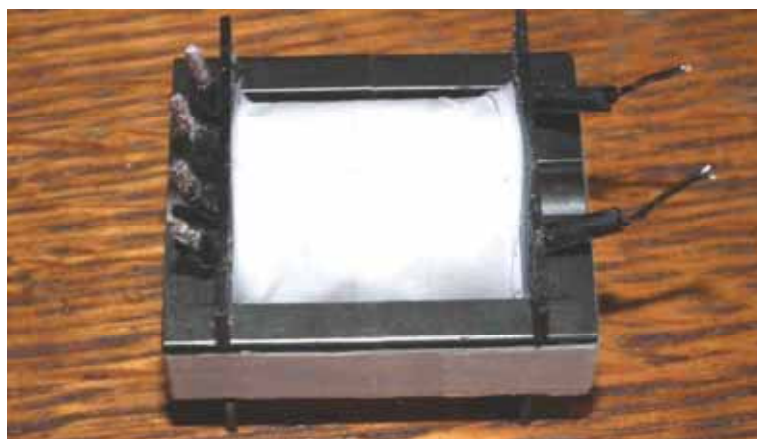
Obr. 54 – Část bifilárně vinutého sekundárního vinutí, následuje silikonová výplň a 1 vrstva PTFE folie



Obr. 55 – Zbytek sekundárního vinutí, následuje silikonová výplň a 4 vrstvy PTFE folie



Obr. 56 – Druhá polovina primárního vinutí, následuje silikonová výplň, 4 vrstvy PTFE folie a zafixování lepící páskou.



Obr. 57 – Dokončený transformátor pro výkonový zdroj. Jádru je bez vzduchové mezery.

3.6.4 PROUDOVÝ TRANSFORMÁTOR

PARAMETRY VINUTÍ

Jádro: Feritový toroid $D = 12,7\text{mm}$, $S = 13,3\text{mm}^2$, materiál „43“

PRI: 3/4z, VF lanko 1mm^2 + silikonová bužírka jako dodatečná izolace

SEC: 50z, drát 30AWG kynar

NAVÍJECÍ PŘEDPIS



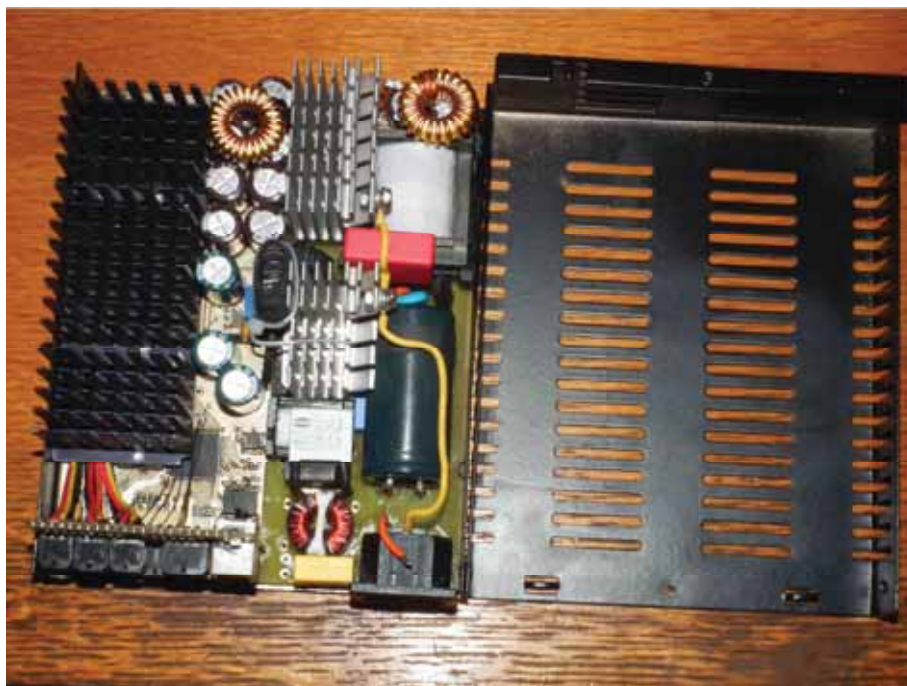
Obr. 58 – Proudový transformátor

3.7 POSTUP OSAZENÍ DESKY A MECHANICKÉ USPOŘÁDÁNÍ KRABICE

Deska plošných spojů byla navržena v prostředí EAGLE 4.16 LIGHT jako oboustranná smíšená montáž. Jako základní materiál byl použit FR4 o síle 2,5 mm a motiv plošného spoje byl vyroben v domácích podmínkách metodou fotocesty. Kvůli ochraně mědi před korozí byla deska chemicky postříbřena pomocí lázně AG1 [25]. Jelikož se jedná o vývojový vzorek, byly konektory pro připojení ostatních zařízení kvůli možnému rozšíření umístěny na univerzální desku. Dále bylo na desce provedeno několik oprav obdobným způsobem, přičemž návrh desky plošných spojů byl průběžně aktualizován a finální verze předloh je na přiloženém CD v adresáři „DPS“.

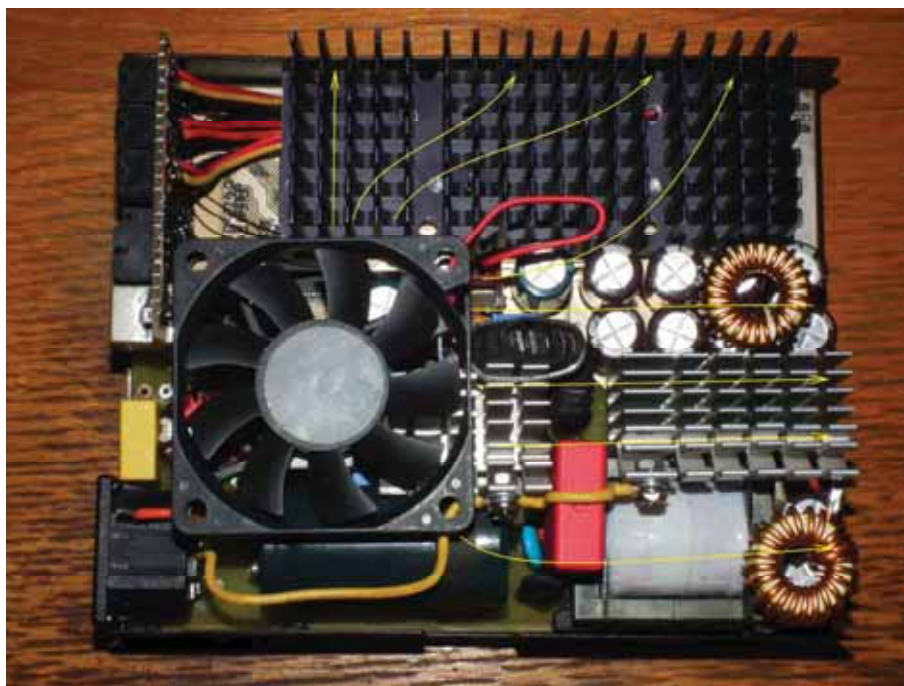
Při osazování desky je vhodné začít s nejmenšími součástkami a rozměrné součástky osazovat jako poslední. Výkonové polovodiče jsou vybaveny chladiči a jsou osazeny čelní stranou k desce s vývody ohnutými na opačnou stranu. Šrouby pak procházejí jak deskou, tak otvorem v pouzdru. Obvody TB6560AHQ mají plochu pro odvod tepla uzemněnou, takže mohou být umístěny na chladič bez izolačních podložek, pouze je nutné nanést tepelně vodivou pastu. Použité MOS-FET tranzistory ve výkonovém zdroji jsou v plně izolovaných pouzdech, takže pro ně platí totéž jako pro drivery krokových motorů. Izolační podložku vyžaduje pouze dvojitá dioda, která má na ploše pro chlazení společnou katodu. Oba chladiče ve zdroji by měly být připojeny na ochranný vodič.

Zařízení bylo umístěno do plechové krabice od nefunkčního modulu spínaného zdroje o rozměrech 125 * 155 * 450mm. Několik takových spínaných zdrojů bylo zakoupeno na šrotišti za cenu 20Kč / 1kg. Krabice se skládá ze dvou ohýbaných částí. Jedná se o velmi jednoduché a funkční řešení a je ji možno relativně snadno replikovat. Krabička dále obsahuje prolisy tvořící šachtu pro vložení plošného spoje



Obr. 59 – Umístění modulu do přístrojové krabice

Drivery krokových motorů a napájecí zdroje jsou zdrojem tepla a kvůli malým rozměrům modulu je nutné aktivní chlazení. K tomu byl použit úzkoprofilový 60mm ventilátor. Vzduch je nasáván přes vrchní víko v blízkosti konektorů, část ofukuje chladiče zdroje a další část chladič driverů. Ohřátý vzduch je vyfukován z boku na protější straně, čímž se částečně zabrání jeho recirkulaci. Přístroj zatím nemá čelní panel, ten bude vyroben později na CNC frézce.



Obr. 60 – Ilustrace proudění vzduchu v krabici

3.8 DOPORUČENÝ POSTUP OŽIVENÍ MODULU

Před ožívováním neosazujeme tlumivky L2 a L4, protože zdroj je vhodné ožívovat odděleně.

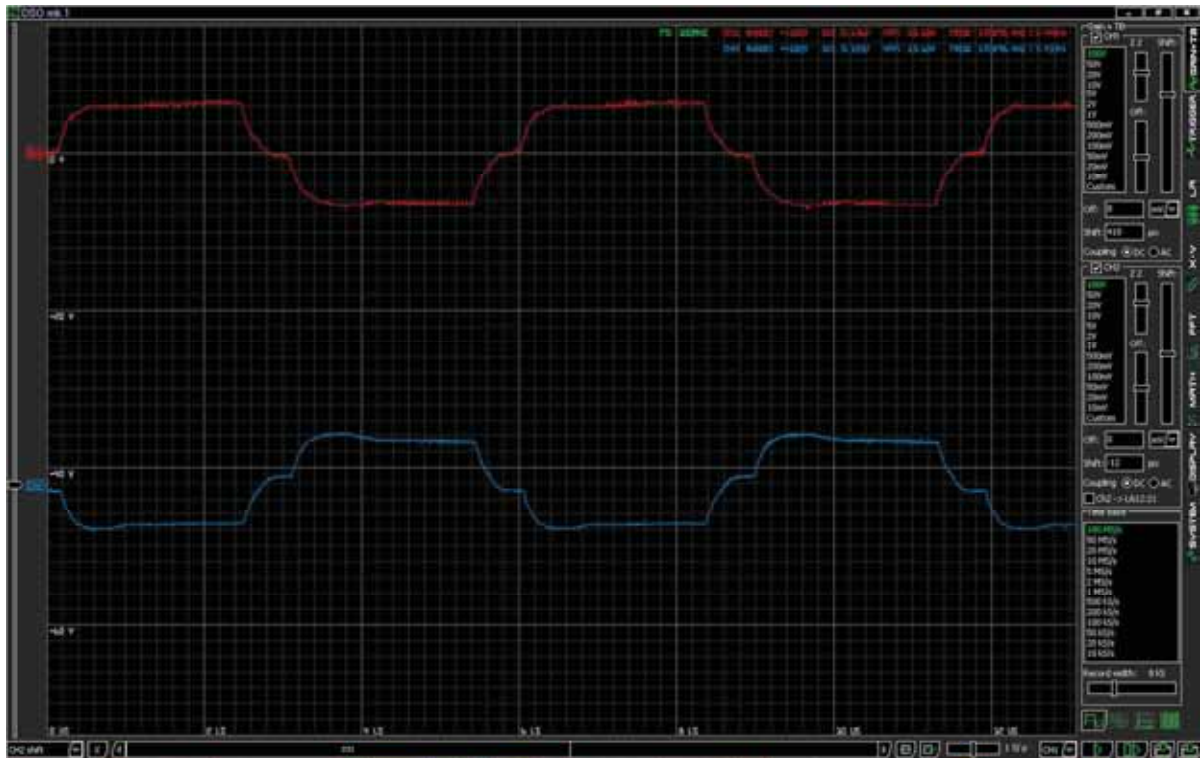
Nejprve je vhodné oživit nízkonapěťovou část obvodu. Do ISP konektoru připojíme napětí 5V s proudovým omezením 200 mA. Pokud proudový odběr nepřekračuje cca 50 mA, můžeme naprogramovat mikrořadič. Interpolační jednotku můžeme dále napájet z programátoru. Při připojení interpolační jednotky k počítači přes USB port by měl operační systém identifikovat USB převodník FT245R a nabídnout instalaci ovladače. Provedeme tak. Pomocí programu FT_PROG [26] zapíšeme do EEPROM paměti převodníku obraz, který je k dispozici na příloženém CD v adresáři FTDI. Po odpojení a opětovném připojení interpolační jednotky k počítači by měl operační systém identifikovat zařízení s názvem „M-LABS MOTION CONTROL DEVICE“.

Napájecí větve driverů připojíme na napětí 30 V s proudovým omezením 1 A. Proudový odběr by se měl pohybovat v desítkách mA. Zvýšíme proudové omezení na 3 – 5 A a připojíme krokové motory k interpolační jednotce. Pomocí terminálu odešleme postupně příkazy:

```
N00000050f
00000&00XL
00000000XL
00000&00YL
00000000YL
00000&00ZL
00000000ZL
n
```

Všechny tři motory by měly postupně provést 2048 kroků každým směrem a s posledním příkazem by mělo dojít k přepnutí interpolační jednotky do standby režimu. Driver by měl snižovat proud do vinutí právě nepoužívaných motorů.

Než začneme s ožíváním zdroje, změříme odpory ve zpětných vazbách, abychom se ujistili o jejich správné funkci. Odporové trimry nastavíme pro napěťovou zpětnou vazbu tak, aby na odbočce bylo teoreticky co nejvyšší napětí, a pro proudovou zpětnou vazbu přibližně na odpor 2 k Ω proti zemi. Poté připojíme napětí 15 V s proudovým omezením 200 mA na C5. Budič by měl odebírat proud přibližně 100 mA. Připojíme sondy osciloskopu mezi G a S tranzistorů Q1 a Q2. Máme-li k dispozici osciloskop s galvanicky oddělenými vstupy, můžeme použít oba kanály, pokud ne, použijeme jeden kanál a průběhy napětí na hradlech změříme postupně. Další možností je použít oddělovací transformátor u některého kanálu. Napětí na hradlech by mělo mít průběh podobný následujícímu oscilogramu a amplitudu minimálně 10V. Digitální osciloskop použitý zde měří amplitudu nesprávně, protože byly provedeny změny ve vstupních zesilovačích a ovládací software nebyl zatím upraven. Můžeme vyzkoušet připojit napětí do zpětné vazby, čímž by se měla snížit střída signálů na hradlech.



Obr. 61- Průběhy napětí na hradlech výkonových MOS-FET tranzistorů

Zdroj připojíme k síti přes žárovku 25 W / 230 V, a optimálně také přes oddělovací transformátor. Žárovka by měla po nabití kondenzátorů pohasnout. Na kondenzátoru C7 bychom měli naměřit napětí 5 V a na kondenzátoru C5 napětí 15 V. Na kondenzátoru C22 bychom měli naměřit přibližně 30 V. Odporovým trimrem R24 nastavíme napětí 35 V. Zdroj odpojíme od sítě, počkáme na vybití filtračních kondenzátorů, a zkontrolujeme teplotu chladičů. Na desce by se nic nemělo zahřívat ani při odpojeném ventilátoru. Zaměníme 25W žárovku za 100W, případně použijeme paralelní kombinaci žárovek nižšího výkonu, není-li 100W k dispozici. Přimo na výstup hlavního zdroje připojíme ampérmetr, a poté připojíme zdroj k síti. Je nezbytně nutné připojovat ampérmetr ještě před připojením zdroje, jinak by mohl být poškozen zkratovým proudem z nabitých filtračních kondenzátorů. Trimrem R32 nastavíme proudové omezení na 4 A a odpojíme zdroj. Na závěr se ujistíme, že funguje ventilátor, na výstup zdroje zapojíme 3 halogenové žárovky 12 V / 40 W do série (případně vhodnou odporovou zátěž, máme-li k dispozici), a připojíme zdroj přímo k síti. Zdroj by měl vydržet napájet zátěž libovolně dlouhou dobu. Pokud zdroj tento test přežil, osadíme tlumivky L2 a L4. Zařízení zakrytujeme podle platných nároků na třídu ochrany 1.

4 OVLÁDACÍ SOFTWARE

Ovládací software slouží k interpretaci dat ze známých formátů a jeho výstupem je mikrokód, řídící interpolační jednotku. Dále umožňuje manuální řízení stroje a jednoduchou simulaci chování vstupních dat. Ovládací software byl vytvořen v prostředí C++ builder a využívá mimo základních VCL komponent také komponentu TOpenGLAppPanel ze stránek [27]. Komponenta slouží jako plocha umožňující práci s grafickou knihovnou OpenGL [28] a automaticky provádí veškerou inicializaci. Dále byly použity knihovny FTD2xx pro komunikaci s převodníkem FT245. Ovládací software je určen pro operační systémy Microsoft Windows XP nebo vyšší a pro úspěšné připojení s interpolační jednotkou je nutné mít nainstalován ovladač FTD2XX [13].

4.1 POPIS FUNKCE PROGRAMU

Protože kompletní popis funkce zdrojových kódů je nad rámec této dokumentace, jsou zde uvedeny pouze nejdůležitější informace.

Aplikace spouští 2 výpočetní vlákna. Hlavní vlákno obstarává veškeré grafické uživatelské rozhraní (Form0.ccp a grafika.h) a druhé komunikaci a navázání spojení s interpolační jednotkou (nc_comm.ccp).

Po spuštění aplikace dojde k inicializaci druhého vlákna programu a automatickému načtení nastavení ze souboru „settings.ini“. Pokud tento soubor nebyl nalezen, je vypsáno varování a je použito výchozí nastavení. Nastavení je také možno libovolně ukládat a načítat, a vytvořit tak např. profily pro konkrétní CNC stroje. Po načtení nebo nenačtení nastavení se ovládací software může pokusit připojit k interpolační jednotce, pokud je tato možnost povolena v nastavení. K připojení dojde, pokud je připojena právě jedna interpolační jednotka. Identifikace se provádí pomocí kontroly sériového čísla uloženého v EEPROM paměti USB převodníku. Sériové číslo musí začínat řetězcem „MCD“.

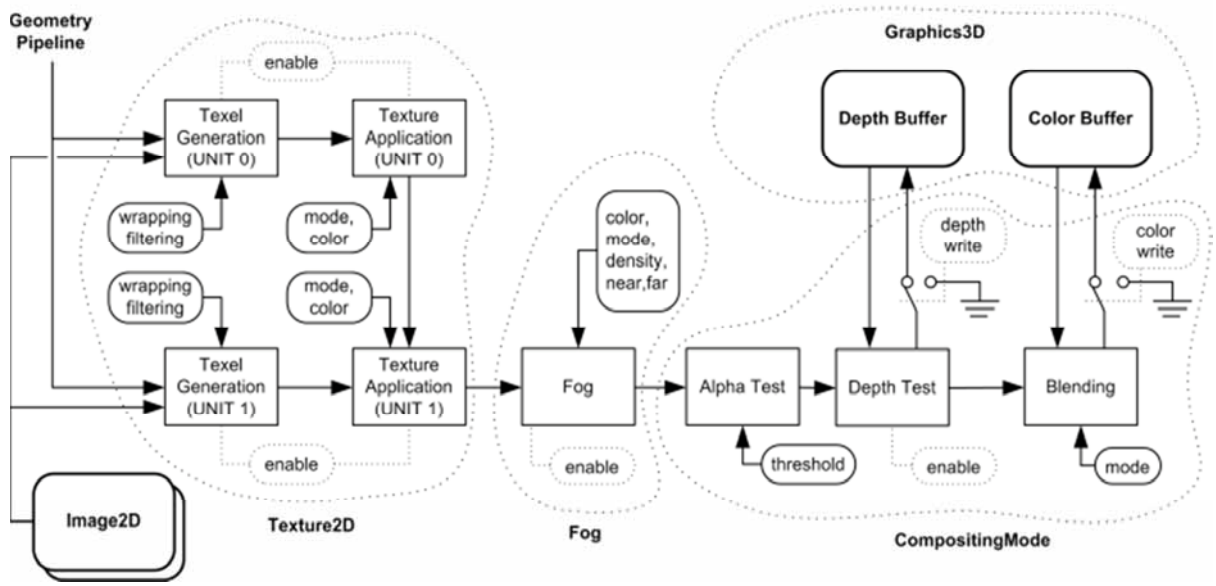
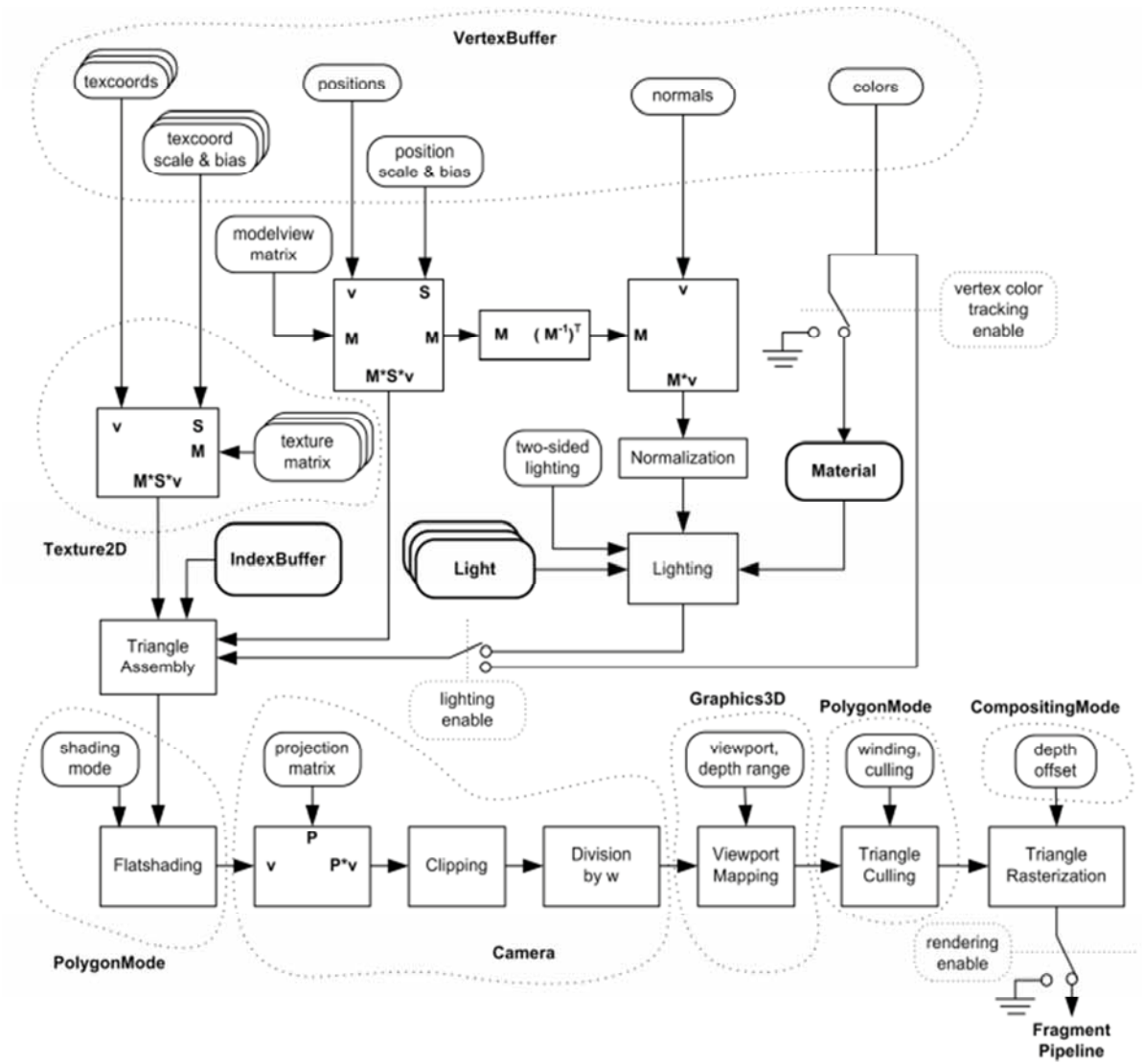
Pro odeslání příkazu do interpolační jednotky je zapotřebí pouze uložit řetězec do pole TxBuffer a nastavit počet bytů, které se mají odeslat, do proměnné TxBytes. Po odeslání příkazu je automaticky TxBytes = 0, podle čehož je možno testovat úspěšné odeslání příkazu. Načítání koordinát a stavu interpolační jednotky probíhá automaticky ve 2. vlákně, kde jsou také průběžně aktualizovány stavové proměnné. Funkce interpretů programovacích jazyků stroje jsou spouštěny z hlavního vlákna programu. Stav interpolační jednotky, koordináty vizualizace dráhy nástroje se zobrazuje v okně OpenGL komponenty. Vykreslování veškeré grafiky v této komponentě je prováděno pomocí jediné funkce, obsažené v souboru „grafika.h“. Funkce se spouští cyklicky z prvního vlákna programu. Popis chování funkce pracující s OpenGL oknem by byl nad rámec této dokumentace, nicméně pro lepší orientaci ve zdrojových kódech je v následující kapitole popsán princip a způsob práce s grafickou knihovnou OpenGL.

Před ukončením aplikace se provede přepnutí interpolační jednotky do standby režimu, a její odpojení. Nastavení aplikace je opět uloženo do souboru „settings.ini“, pokud je tato možnost povolena.

4.1.1 GRAFICKÁ KNIHOVNA OPENGL

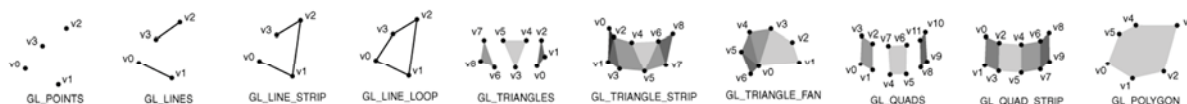
OpenGL [28] (Open Graphics Library) je standard popisující aplikační rozhraní mezi programem, který běží na CPU, a grafickou kartou. Je určen pro vykreslování 3d grafiky. Byl vyvinut společností Silicon Graphics Inc. (SGI) v roce 1992. Standard OpenGL byl poté spravován konsorciem OpenGL Architecture Review Board (ARB) a roku 2006 byl převeden pod konsorcium Khronos Group, jehož členy jsou v současnosti AMD/ATI, Apple Inc., ARM Holdings, Creative Labs, id Software, Ericsson, Google, Intel Corporation, Motorola, Mozilla, Nokia, Nvidia, Samsung Electronics, Sony Computer Entertainment, Oracle/Sun Microsystems a Texas Instruments. Khronos Group spravuje také další průmyslové standardy, např. OpenCL umožňující provádění paralelních výpočtů na grafické kartě.

V této podkapitole bude stručně vysvětlen princip OpenGL. Řetězec základního renderingu pomocí OpenGL bez dalších rozšíření reprezentuje diagram na následující straně.



Obr. 62 – Řetězec renderingu pomocí API OpenGL [31]

Na začátku řetězce jsou programově zadané koordináty vrcholů (funkce glVertex3f) grafických primitiv ve 3rozměrném prostoru. Grafickými primitivami v OpenGL jsou body (GL_POINTS), samostatné úsečky (GL_LINES), poly-úsečky (GL_LINE_STRIP), uzavřené poly-úsečky (GL_LINE_LOOP), samostatné trojúhelníky (GL_TRIANGLES), pásy trojúhelníků (GL_TRIANGLE_STRIP), trsy trojúhelníků (GL_TRIANGLE_FAN), samostatné čtverce (GL_QUADS), pásy čtverců (GL_QUAD_STRIP) a polygony (GL_POLYGON). Jakékoliv komplexnější tvary je nutné vytvořit pomocí těchto primitiv. Čtverce a polygony musí být konvexní, jinak rendering neproběhne korektně.



Obr. 63 – OpenGL primitiva [28]

Zadáání souřadnic vrcholů pracuje nativně ve trojrozměrném prostoru. Vykreslování 2d grafiky je možné při zvolení ortogonální projekce, nicméně zde dochází pouze k transformaci souřadnic a grafická karta normálně pracuje i se souřadnicí Z a hloubkovým bufferem. Pro použití světel je nutné, aby každý vrchol měl zadanou normálu povrchu pomocí funkce glNormal3f. Světel může být až 8 a je možno nastavit každému světlu difusní, ambientní a spekulární složku. Vlastnosti osvětlení jsou dále ovlivněny materiálovým nastavením. Dále je pro správné vykreslení nutné nepoužívat pásy primitiv, ale např. pouze trojúhelníky, protože všechny vrcholy téhož primitiva by měly mít shodnou normálu. K určení pořadí vrcholů slouží IndexBuffer. Funkcí glBegin(název_primitiva) dojde k jeho vynulování a po každém použití funkce glVertex3f k jeho inkrementaci. Ke každému vrcholu je také kromě normály možno přiřadit barvu pomocí funkce glColor a texturové koordináty, je-li použito texturování (glEnable(GL_TEXTURE_2D)). Barvu zadáváme buďto složkami RGB nebo RGBA, pokud je použita průhlednost (glEnable(GL_BLEND)).

Souřadnice vrcholů a normál jsou následně násobeny **maticí ModelView**. Transformací matice ModelView je možno dosáhnout změny polohy, orientace a měřítka právě vykreslovaného primitiva. K tomu slouží funkce glTranslatef, glRotatef a glScalef. Pro reset matice na její jednotkovou podobu existuje funkce glLoadIdentity. Matice je možno dále ukládat na zásobník a načítat zpět funkcemi glPushMatrix a glPopMatrix. Matici je také možno uložit do programové proměnné pomocí funkce glGet s parametrem GL_MODELVIEW_MATRIX a zpětně načíst funkcí glLoadMatrix. K volbě právě upravované matice slouží funkce glMatrixMode.

V další části řetězce se všechna ostatní použitá primitiva transformují na trojúhelníky a koordináty jejich vrcholů se vynásobí **Projekční maticí**. Projekční matice reprezentuje polohu, orientaci a další parametry kamery. Do dalšího zpracování pak jdou pouze trojúhelníky, které jsou alespoň částečně viditelné. Obdobně funguje i nastavení hloubkového rozsahu. Dále je aplikováno nastavení vykreslování ploch, pomocí kterého je možno vybrat, ze které strany bude plocha viditelná, případně objekt vykreslit jako drátový

model. Trojúhelníky jsou následně rasterizovány na **fragменты**, přičemž každý fragment reprezentuje část vykreslovaného trojúhelníku pod jedním obrazovým bodem.

Na každý fragment je aplikována barva a textura, pokud je povoleno texturování. K tomu je vyhrazen hardware grafické karty známý jako texturovací jednotky. Kromě nastavení polohy, rozměru a orientace jsou u každé textury zadány také parametry filtrování a případně také parametry mipmapy. Na každý fragment může být dále aplikována mlha, která se vypočítává podle vzdálenosti fragmentu od kamery podle některé z předdefinovaných funkcí. Může je také možno nastavit barvu. Je-li aktivní hloubkové testování, je každý u každého fragmentu testováno, jestli není skryt za bližším fragmentem. Informace o hloubce každého vykresleného fragmentu je uložena v **hloubkovém bufferu**. V takovém případě nedojde k jeho vykreslení. V diagramu převzatém z internetu bohužel není vyznačeno Stencil testování, který pracuje obdobně jako hloubkový test a umožňuje vytvářet a aplikovat šablony. Vykreslení fragmentů poté proběhne / neproběhne podle příslušných hodnot ve **Stencill bufferu**. Použití Stencil testu je velmi užitečné hlavně při vykreslování dvourozměrné grafiky.

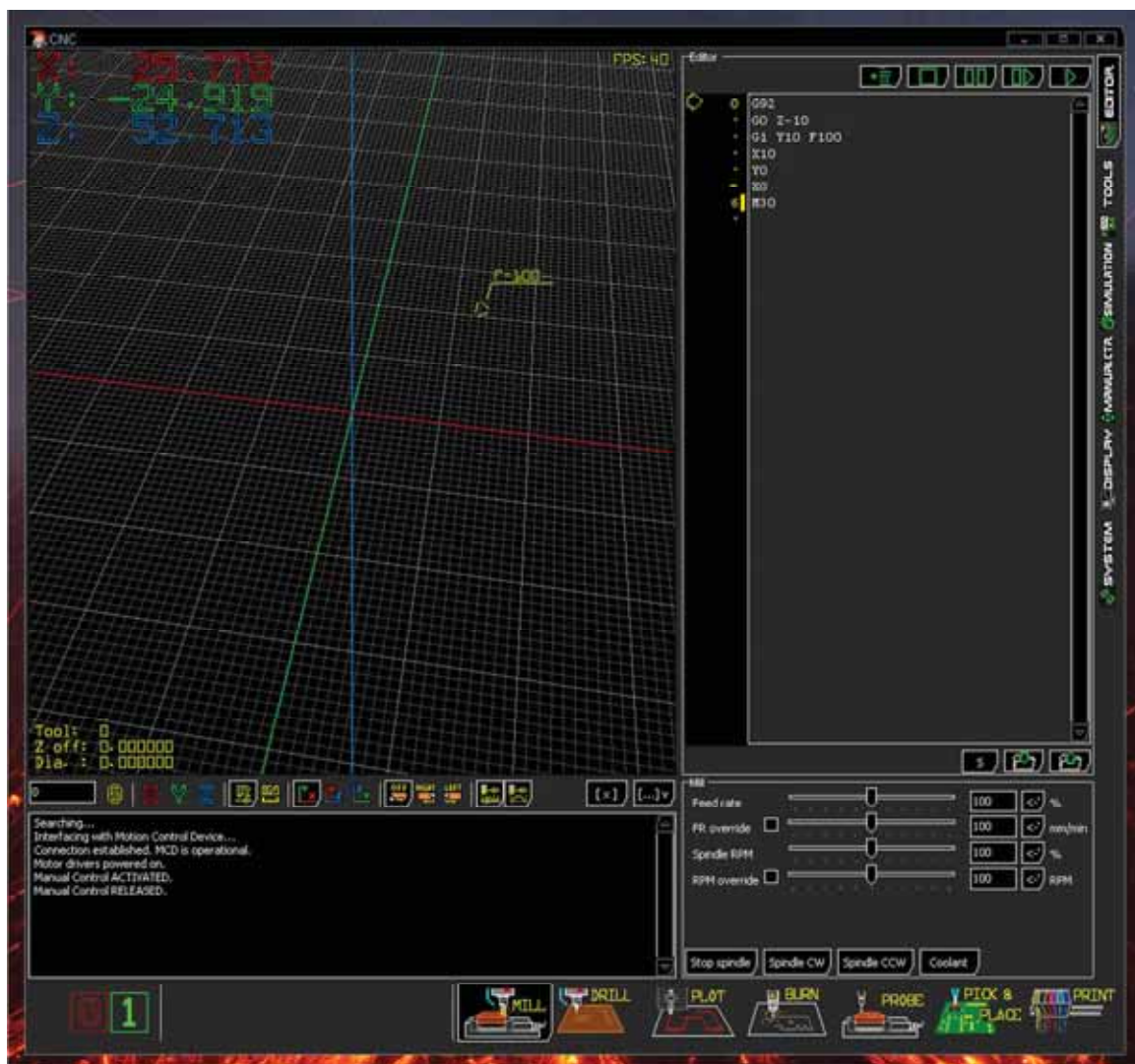
Je-li použita průhlednost (blending), je do **Color bufferu** zapsána barevná hodnota, která je výsledkem původní a nové hodnoty podle některé z předdefinovaných funkcí (glBlendFunc). Proto je také pro korektní zobrazení průhlednosti nutné vykreslovat nejdříve vzdálenější objekty. Pokud průhlednost není použita, dojde k jednoduše k přepsání hodnot v Color bufferu. Po dokončení vykreslování reprezentuje Color buffer jednotlivé pixely obrazovky.

JEDNODUCHÝ PŘÍKLAD POUŽITÍ OPENGL V JAZYCE C

```
//----- nastaveni projekce -----  
glMatrixMode(GL_PROJECTION); // zvolí projekční matici  
glLoadIdentity();           // resetuje projekční matici  
// nastaví perspektivu a rozsah hloubky  
gluPerspective(45,(GLfloat)xres/(GLfloat)yres,0.001,10000);  
glMatrixMode(GL_MODELVIEW); // Zvolí Modelview matici  
glLoadIdentity();           // resetuje Modelview matici  
// resetuje color buffer, Z buffer a stencill buffer  
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT | GL_STENCIL_BUFFER_BIT);  
  
//----- vlastní vykreslení -----  
glTranslatef(0, 0, -2);      // bude se kreslit v hloubce -2  
glBegin(GL_TRIANGLES);     // vybere primitivum "trojuhelniky"  
    glColor3ub(0, 0, 255);  glVertex3f(1, -1, 0);  
    glColor3ub(0, 255, 0);  glVertex3f(-1, -1, 0);  
    glColor3ub(255, 0, 0);  glVertex3f(0, 1, 0);  
glEnd();
```

Příklad provede vykreslení barevného trojúhelníku doprostřed obrazovky a není zde vytvoření okna aplikace ani OpenGL okna. Jedná se pouze o část, která má na starosti vykreslení.

4.2 POPIS GRAFICKÉHO UŽIVATELSKÉHO ROZHRAŇÍ



Obr. 64 – Hlavní okno programu

Hlavní okno programu má adaptivní velikost, avšak minimální rozlišení obrazovky je 1024 * 768 pixelů. Do levého horního rohu je umístěno OpenGL okno, kde se zobrazují koordináty, vizualizace dráhy nástroje ve 3d prostoru a aktuální technologické parametry. Pohled je možno měnit stiskem kláves F2, F3 nebo F4 za současného tažení myši (levé tlačítko). Pomocí klávesy F2 je možno pohybovat se scénou v rovině obrazovky, pomocí F3 ji přibližovat a oddalovat a pomocí F4 otáčet. Při tažení za vnější okraj kruhu se provádí otáčení objektu kolem osy pohledu. Nastavení pohledu je tedy podobné jako ve 3d CAD programech typu Autodesk Inventor.

Pod OpenGL oknem se nachází panel nástrojů, kde je možno nastavovat koordináty a parametry interpreteru. Panel také indikuje aktuální stav těchto nastavení podle průběhu interpretace kódu. Panel nástrojů obsahuje následující objekty:

- Okno pro zápis hodnoty – zde je možno zapsat vzdálenost, na kterou je možno nastavit některou osu pomocí tlačítek X, Y nebo Z.

- ‚0‘ – zapíše 0 do předchozího okna
- X, Y a Z – přepíše souřadnice na hodnotu v předchozím okně. Interpoláční jednotka musí být ve stavu „připraveno“.
- Relativn programování- Pohyb nástroje je zadáván v přırůstcch. Ekvivalentem jsou G kódy G90 (absolutn programování) a G91 (relativn programování).
- Programování v palcích (G21 - milimetry, G20 - palce)
- Nastavení roviny kruhov/spirlov interpolace (XY – G17, XZ – G18 nebo ZX – G19)
- Nastavení korekce na nástroj (vypnuto, korekce zprava, korekce zleva), stejn uinek mají G kódy G40, G41 a G42.
- Povolen manuln úpravy rychlosti posuvu nezávisle na programu (M kódy M48 - povoleno, M49 - zakázáno)
- Povolen pomalého rozjezdu a zastavení (M50 a M51). Tato volba by měla být zakázána pouze při frzovn jemných kontur, kdy G kód obsahuje velké množství přırkazů, a změny směru nástroje jsou nepatrn. Při nesprvnm pouzt může dojít ke ztrátě kroků a zvyšenmu mechanickému namáhání stroje.

V dolním levém rohu je umístěna konzole, kde jsou vypisovány dležit události ohledně chování programu, varování a chyby. Konzoli je možno skryt. Panel u dolního okraje okna umožu zapnut interpoláčn jednotky nebo její přepnutí do standby reži mu, a dále pak vybrat v jakém reži mu bude pracovat překladač. Ke každé moznosti je dále specifick nastavení v prav dolní části okna. Jednotliv reži my jsou popsány v následující podkapitole.

Obsah prav horní části okna je rozdělen do několika zlozek, které lze přepínat lištou u pravého okraje:

EDITOR

V editoru je možno otevřít a upravovat výrobní podklady. Editor je dovybaven lištou označující čísla řádků, příběh programu a indikaci jestli byl obsah řádku zmnn. K řízení příběhu programu slouží tlačítka v horní části editoru:

- Skok – zmn programov čítač na číslo řádku, na kterm je kurzor.
- Stop – navrátí programov čítač na první řádek a zastaví vykonvan přırkaz.
- Pozastaven – provede okamžit pozastaven interpolace.
- Krok – provede jeden přırkaz. Pokud přırkaz probíhá, provede se pozastaven po jeho dokončn.
- Start – začne provádět posloupnost přırkazů a skončí buď přırkazem pro terminaci programu, ručním zastavenm nebo v přırpad chyby.



Obr. 65 - Editor

SEZNAM NÁSTROJŮ

Údaje v tomto seznamu slouží k aplikaci délkové a poloměrové korekce na nástroj. Zadávají se mechanické parametry (relativní délka nástroje, jeho průměr a překrytí drah) a volitelně technologické parametry (řezná rychlost a otáčky vřetene), které mohou být aplikovány automaticky, pokud je tato možnost povolena. Seznam nástrojů je možno uložit nebo načíst jako textový soubor, kde sloupce v tabulce jsou odděleny tabulátory (formát .tsv). Karta dále obsahuje možnost manuálně načíst parametry nástroje na vybraném řádku seznamu a nastavit Z korekci nástroje podle aktuální polohy.

SIMULACE

Možnost simulace z časových důvodů zatím nebyla implementována, proto je tato karta zatím prázdná.

MANUÁLNÍ ŘÍZENÍ

Karta obsahuje pouze tlačítko pro přepnutí stroje do režimu manuálního řízení. Podmínkou je, že neběží program a interpolační jednotka je připojena. K ovládání stroje pak slouží klávesnice podle ilustrace vyobrazené na kartě manuálního řízení.



Obr. 66 – Režim manuálního řízení stroje

Do budoucna je plánováno přidat možnosti pojezdu na předefinované souřadnice, což umožní snadno použít více zařízení umístěných na suportu osy Z, tedy kromě vřetena také např. dotykovou sondu, kameru, apod.

NASTAVENÍ

Karta obsahuje nastavení připojení, nastavení výchozích technologických hodnot, nastavení stroje a nastavení interpolační jednotky:

Připojení a nastavení programu:

- Zařízení – obsahuje výpis zařízení připojených k počítači. Že se jedná o interpolační jednotku je zjišťováno podle sériového čísla FTDI převodníku, které začíná znaky „MCD“.
- Refresh – aktualizuje seznam zařízení
- Připojit – naváže spojení s vybraným zařízením
- Odpojit – uvede zařízení do standby režimu a provede odpojení.
- Připojit automaticky – Po spuštění aplikace se pokusí spojit s interpolační jednotkou. Předpokladem funkce je, že je k počítači připojena právě jedna interpolační jednotka.
- Automatické uložení – provede po zavření aplikace automatické uložení nastavení do souboru „settings.ini“.
- Automatické načtení – po spuštění aplikace automaticky načte nastavení ze souboru „settings.ini“.
- Uložit nastavení – uloží nastavení do zvoleného souboru.
- Načíst nastavení – Načte nastavení ze zvoleného souboru.

Nastavení interpolační jednotky:

- Výchozí řezná rychlost.
- Rychlost rychloposuvu.
- Výchozí otáčky vřetena.
- Zrychlení (viz komunikační protokol interpolační jednotky)
- Počet kroků krokových motorů na jednu periodu.

Další parametry:

- Rozměr jednoho kroku v mikrometrech.
- Maximální dovolené zrychlení při manuální změně rychlosti posuvu.



Obr. 67 – Karta nastavení

4.3 REŽIMY PROGRAMOVÁNÍ STROJE

Ovládací software obsahuje interprety více programovacích jazyků v závislosti na druhu práce prováděné na CNC stroji. Zatím jsou implementovány pouze režimy CNC frézky a vrtačky.

4.3.1 REŽIM CNC FRÉZKA

K programování stroje v režimu CNC frézky slouží jazyk G-kód, který je v různých formách všeobecně používán pro tento účel již desítky let. Přestože byl standardizován normou ISO 6983, může se rozsah funkcionality a chování příkazů na řídicích systémech jednotlivých výrobců značně lišit. Protože je norma placená, byl v tomto projektu použit rozpis příkazů uvedený v [29].

PRAVIDLA ZÁPISU G-KÓDU

- Každý příkaz G nebo M musí být na novém řádku.
- Parametry X, Y a Z je možno vynechávat pokud se nemají měnit.
- Technologické parametry (F a S) a adresy (N nebo O) je možno zadávat nezávisle na příkazu.
- Při programování dráhy nástroje je možno příkaz zapsat pouze jednou a dále již pouze koordináty, např.:

```
G1 X1 Y1
Y2
X3 Y5
```

- Komentáře lze zapisovat za znaky `;` nebo ` ' " '`.
- Obvyklé označení čísel řádku parametrem N není povinné.
- Do programu je možno zasahovat i za jeho běhu.

PODPOROVANÉ G-KÓDY

G-KÓD	POPIS
G0	Rychloposuv Parametry: X, Y, Z Koordináty cíle (nepovinné)
G1	Lineární interpolace Parametry: X, Y, Z Koordináty cíle (nepovinné)
G2	Kruhová / spirálová interpolace po směru hodin Parametry: a) zadání pomocí středu X, Y, Z Koordináty cíle (nepovinné) I, J Koordináty středu oblouku (povinné) Q Počet celých kruhů, nebo závitů (nepovinné, 0 pokud nezadáno) b) zadání pomocí poloměru X, Y, Z Koordináty cíle (nepovinné) R Poloměr (povinné) Q Počet celých kruhů nebo závitů (nepovinné, 0 pokud nezadáno)
G3	Kruhová / spirálová interpolace proti směru hodin Parametry: a) zadání pomocí středu X, Y, Z Koordináty cíle (nepovinné) I, J Koordináty středu oblouku (povinné) Q Počet celých kruhů, nebo závitů (nepovinné, 0 pokud nezadáno) b) zadání pomocí poloměru X, Y, Z Koordináty cíle (nepovinné) R Poloměr (povinné) Q Počet celých kruhů nebo závitů (nepovinné, 0 pokud nezadáno)

G4	<p>Prodleva</p> <p>Parametry: P Prodleva v milisekundách (povinné)</p>
G12	<p>Cyklus frézování kruhové kapsy po směru hodin</p> <p>Parametry: Z Hloubka R Poloměr</p>
G13	<p>Cyklus frézování kruhové kapsy proti směru hodin</p> <p>Parametry: Z Hloubka R Poloměr</p>
G17	Zvolí rovinu XY pro kruhovou interpolaci
G18	Zvolí rovinu YZ pro kruhovou interpolaci
G19	Zvolí rovinu ZX pro kruhovou interpolaci
G20	Programování v palcích
G21	Programování v milimetrech
G28	Návrat na výchozí pozici (X, Y, Z = 0)
G40	Deaktivace poloměrové korekce na nástroj
G41	Poloměrová korekce na nástroj zleva (použitelné pouze pro G1)
G42	Poloměrová korekce na nástroj zprava (použitelné pouze pro G1)
G81	<p>Vyvrtávací cyklus</p> <p>Po vyvrtání otvoru vrátí nástroj rychloposuvem do původní hloubky.</p> <p>Parametry: X, Y Koordináty cíle (nepovinné) Z Souřadnice holoubky vrtání</p>

G81	<p>Vyvrtávací cyklus s prodlevou</p> <p>Po vyvrtání otvoru zůstane nástroj na jeho dně po dobu P. Poté se nástroj vrátí rychloposuvem do původní hloubky.</p> <p>Parametry:</p> <p>X, Y Koordináty cíle (nepovinné)</p> <p>Z Souřadnice holoubky vrtání</p> <p>P Prodleva v milisekundách</p>
G81	<p>Vyvrtávací cyklus s výplachem</p> <p>Po dosažení maximálního přírůstku Q provádí výplach špon. Po vyvrtání otvoru vrátí nástroj rychloposuvem do původní hloubky.</p> <p>Parametry:</p> <p>X, Y Koordináty cíle (nepovinné)</p> <p>Z Souřadnice holoubky vrtání</p> <p>Q Maximální přírůstek vrtání</p>
G90	Absolutní programování
G91	Relativní programování
G92	Nulování souřadnic

PODPOROVANÉ M-KÓDY

M-KÓD	POPIS
M0, M1	Pozastavení programu
M2, M30	Ukončení programu
M3	Roztočení nástroje po směru hodin
M4	Roztočení nástroje proti směru hodin
M5	Zastavení vřetena

M6	<p>Volba nástroje</p> <p>Varování! Za tímto příkazem musí následovat příkaz pro lineární interpolaci nebo rychloposuv, při kterém bude aplikována délková korekce nástroje.</p> <p>Parametry: T Číslo nástroje (povinné)</p>
M7	Chlazení- postřik
M8	Chlazení- zaplavit
M9	Vypnout chlazení
M48	Povolit manuální změnu řezné rychlosti
M49	Zakázat manuální změnu řezné rychlosti
M50	Povolit pomalý rozjezd a brzdu (nestandardní příkaz)
M51	<p>Zakázat pomalý rozjezd a brzdu (nestandardní příkaz)</p> <p>Příkaz je možné použít např. pro frézování složitých kontur, programovaných pomocí velkého množství úseček. Je však nutno zvolit odpovídající řeznou rychlost aby nástroj byl schopen se rozjet a zastavit. Při nesprávném použití může docházet ke ztrátám kroků, a chybám v odměřování.</p>
M98	<p>Volání podprogramu</p> <p>Příkaz volá podprogram, před kterým je zapsána číselná adresa parametry N nebo O. Návrátová adresa je uložena do zásobníku, který má 255 pozic.</p> <p>Parametry P Adresa podprogramu (povinné) Q Počet opakování (nepovinné, 1 pokud nezadáno)</p>
M99	<p>Návrat z podprogramu</p> <p>Návrat na adresu uloženou v zásobníku</p>

TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY

Technologické parametry je možno zadávat nezávisle na příkazu a při vyhodnocení mají nejvyšší prioritu.

PARAMETR	POPIS
F	Nastaví řeznou rychlost [mm / min]
S	Nastaví otáčky vřetena [min^{-1}]

4.3.2 REŽIM CNC VRTAČKA

Pro režim CNC vrtačky byl použit programovací jazyk Excellon [30], který vychází z G-kódu a byl vytvořen pro programování CNC vrtaček stejnojmenné firmy. Z důvodu značné náročnosti naprogramování interprete ručně jsou podporovány pouze základní příkazy postačující k vrtání desek plošných spojů. Data je možno vygenerovat např. v návrhovém systému EAGLE pomocí CAM procesoru.

PŘÍKAZY PRO DEFINICI VRTACÍHO PLÁNU

PARAMETR	POPIS
X,Y	Vyvrtá díru na zadaných koordinátách Pokud je nastaveno programování v milimetrech (M71), zadávají se koordináty v mikrometrech. Pokud je nastaveno programování v palcích (M72), zadávají se koordináty v desetinách milu (resp. v 1 / 10000 palce).
T	Zvolit nástroj
F	Nastaví rychlost posuvu nástroje při vrtání [mm / min]
S	Nastaví otáčky vřetena [min^{-1}]

PODPOROVANÉ M-KÓDY

M-KÓD	POPIS
M0, M1	Pozastavení programu
M2, M30	Ukončení programu

M71	Roztočení nástroje po směru hodin
M72	Roztočení nástroje proti směru hodin

PODPOROVANÉ G-KÓDY

G-KÓD	POPIS
G90	Absolutní programování
G91	Relativní programování
G92	Nulování souřadnic

4.3.3 OSTATNÍ REŽIMY

Je plánováno dále přidat režim plotteru, jehož vstupem bude Gerber formát, a dále pak modifikaci tohoto režimu pro laserové vypalování a gravírování. Další režimy a funkce budou postupně přidávány podle potřeby.

4.4 PŘEHLED POUŽITÝCH KLÁVESOVÝCH ZKRATEK

ESC	Pozastavení
F5	Start programu
F6	Provedení jednoho příkazu
F7, F8	Zastavení vřetene
Shift + F7	Roztočení vřetene po směru hodin
Shift + F8	Roztočení vřetene proti směru hodin
F9	Chlazení - postřík
F10	Chlazení - zaplavení

5 PŘEHLED NÁKLADŮ

OBJEKT	ČÁSTKA [KČ]	DISTRIBUTOR
Lineární vedení THK SHW17 pro osy X a Y	10500	Bazar- CNC fórum
Kuličkové šrouby 1605	3300	Ebay
Lineární vedení s omezenou délkou pojezdu NSK R106200AP5-57 pro osu Z	1500	Ebay
Plech 10 * 1250* 1250 a 1 * 1000* 2000 + doprava	3300	Morkus-Morava s.r.o.
Další materiál (tyč tažená 60 * 15 * 1m a tyč válcovaná 20 * 20 * 1m)	500	Ferona
Krokové motory Sanyo Denki 2 Nm, 3 kusy	1200	Strojtechnik Brno
Ložiska 51100	400	
Šrouby imbus M3, M4, M5 a M3 s kuželovou hlavou	500(odhad)	TME
Matice M10 * 1, 15ks	180	Fabory
Barva Hostagrund s2160 + válečky	250	Barvy A Laky Hostivař
Nástroje	1000(odhad)	
Ostatní materiál	200(odhad)	
Součástky na interpolační jednotku	3000(odhad)	TME
Spotřební materiál (chemikálie pro výrobu a osazování plošných spojů)	300(odhad)	GME
Kabely, bužírky, konektory	500(odhad)	GME
Stavba přípravků	500(odhad)	
Kapalné naturálie na odměny za obrábění	700(odhad)	
Celkové náklady	27830	

6 ZÁVĚR

V rámci tohoto projektu byla navržena, sestavena a úspěšně otestována interpolační jednotka, která je schopna ovládat 3osý CNC stroj. Interpolační jednotka dosahuje parametrů srovnatelných s podobnými zařízeními, dostupnými na trhu, a obsahuje navíc ještě spínaný napájecí zdroj a driver krokových motorů. Je možno ovládat trojici krokových motorů s proudem do každého vinutí o hodnotě 3 A. Pro jiný proud je možno provést úpravu zpětnovazebních odporů driveru. Interpolační jednotka je ovládána z PC pomocí vlastního komunikačního protokolu přes USB sběrnici, která je, stejně jako ostatní porty, sloužící ke komunikaci s dalšími zařízeními, galvanicky oddělena. Rychlost interpolace úsečky i oblouku přesahuje možnosti krokových motorů.

Stavba mechaniky CNC frézky byla časově i materiálně nejnáročnější částí celého projektu. Vzhledem k omezeným nákladům na frézku bylo také věnováno značné úsilí na shánění dílů, a podle lineárních vedení, které se podařilo opatřit, byl uzpůsoben návrh rámu stroje. Z výroby mechaniky frézky zabrala nejvíce času úprava jednotlivých dílů, která spočívala hlavně ve vyvrtání několika stovek otvorů a řezání závitů. Práci poněkud zkomplikovalo zalomení několika nástrojů v nejnevhodnějších místech, kde se nedala použít žádná konvenční možnost opravy, jako např. rozbroušení a vyvaření. Byl proto sestaven jednoduchý přípravek pro elektroerozivní obrábění, kterým se přes bídnou produktivitu práce podařilo všechny zalomené nástroje odstranit. Tato komplikace však znamenala poměrně velké zdržení. Nyní mechanika frézky téměř kompletně sestavena, až na jednu relativně důležitou komponentu- vřeteno. Vřeteno bude obsahovat Morse nebo ISO kužel a bude poháněno 3f servomotorem. Vývoj vřetena zatím nebyl prioritou, protože se doposud nepodařilo najít vhodný použitý servomotor za přijatelnou cenu. Tímto byla tato část zadání, sestavit interpolační jednotku a navrhnout a začít realizovat mechaniku frézky, bezesbytku splněna. Již první testování ukázalo, že tuhost rámu a síla pohonů bude více než dostatečná pro původní záměr, obrábění lehkých slitin. Přestože na frézce zatím nebylo nic frézováno, lze prohlásit, že tento projekt byl úspěšný.

Vývoj ovládacího softwaru nebyl prvořadou prioritou, a proto zatím neobsahuje všechny původně plánované funkce, jako možnost pracovat v režimu plotteru nebo simulátor programů řídicích stroj. Nejdůležitější funkce, interpret G-kódu, je hotova, takže je možno pomocí vytvořeného softwaru plnohodnotně ovládat CNC stroj v režimu frézky. Tím byla také splněna poslední část zadání práce. Protože byla mechanika frézky dokončena teprve nedávno, nezbyl již na kompletní otestování všech funkcí softwaru čas, takže existuje jistá pravděpodobnost výskytu chyb. Vývoj ovládacího softwaru bude průběžně pokračovat a budou podle potřeby přidávány další funkce.

Prozatímní náklady na tento projekt činily cca 28000 Kč. Plánovaný rozpočet byl 30 000 Kč, v čemž byly započítány i náklady na vřeteno. Do servomotoru je plánováno investovat kolem 2000 – 4000 Kč a náklady na další materiál se mohou pohybovat kolem 2000 Kč, takže ve výsledku bude plánovaný rozpočet mírně překročen. Ukázalo se, že nejdražší

komponenty, jako lineární vedení, šrouby a motory, činí jen asi polovinu nákladů a celý zbytek je tvořen velkým množstvím dalšího materiálu relativně nízké hodnoty. Proto je na začátku každého podobného projektu velmi obtížné stanovit předpokládané finanční náklady. Za tuto cenu je však možno sehnat nanejvýš nějakou nízkonákladovou čínskou frézku, která ani vzdáleně nedosahuje parametrů a kvality zpracování frézky sestavené v rámci tohoto projektu. Jde zde hlavně o tuhost stroje, frézky v této cenové kategorii mívají pojezdy řešeny pomocí nepodepřených vodících tyčí a tuhost se tedy nemůže srovnávat se strojem osazeným kolejnicovým vedením. Je nutno brát v potaz také to, že některé díly nebyly nové, ale použité, což tvořilo poměrně velké úspory. Vzhledem ke stavu dnešní velkovýroby, kdy CNC stroje jsou spotřebním materiálem, který po vypršení vypočítané životnosti putuje do kovošrotu, a poté do vysoké pece, není a pravděpodobně ani v blízké budoucnosti nebude o použité strojní díly nouze, nicméně výběr a obstarání vhodných součástí je časově velmi náročná činnost.

Do kalkulací nákladů samozřejmě nebyla započítána práce, jejíž cena by pravděpodobně několikanásobně překročila náklady na materiál. Úsilí věnované výrobě mechaniky frézky bylo obrovské. Kromě samotné stavby bylo potřeba realizovat několik dalších přípravků, a také zajistit strojní výrobu různých součástí. Přestože funkční CNC frézka postavená od základu představuje velký benefit, podruhé bych se do takovéto stavby asi nepouštěl a spíše by padla volba na konverzi konvenční frézky na CNC. Náklady na pořízení stroje a materiálu pro přestavbu jsou srovnatelné s náklady na frézku sestavenou v tomto projektu a výsledný užitek je, při daleko menší pracnosti, srovnatelný.



Obr. 68 – První test CNC frézky

7 LITERATURA

- [1] CNC Milling. *Automation-Drive.com* [online]. 2010 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.automation-drive.com/cnc-milling>
- [2] *Hobby CNC* [online]. 2009 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.hobbycnc.hu/>
- [3] Nová polymerbetonová frézka. In: *CNC fórum* [online]. 2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.c-n-c.cz/viewtopic.php?f=15&t=5847>
- [4] *CNCShop.cz - CNC & automatizace* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://cncshop.cz/>
- [5] *Low cost CNC plasma cutters and systems* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.cncburning.com/>
- [6] THK. Caged Ball LM Guide. 2010. Dostupné z: https://tech.thk.com/upload/catalog_claim/pdf/248E_SHW.pdf
- [7] THK. Caged Roller LM Guide. 2010. Dostupné z: https://tech.thk.com/upload/catalog_claim/pdf/346E_SRG85_100.pdf
- [8] Choosing the Right Linear Actuator. In: *Motion Control Online* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.motioncontrolonline.org/i4a/pages/Index.cfm?pageID=3601>
- [9] Types of Stepper Motors. In: *National Instruments* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/286>
- [10] ANALOG DEVICES. *3-Axis, ±1.5 g/±3 g/±6 g/±12 g Digital Accelerometer*. 2010. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL312.pdf
- [11] ATMEL CORPORATION. *ATMEGA8, 8-bit AVR with 8KBytes In-System Programmable Flash*. 2010. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc2486.pdf>
- [12] AGILENT TECHNOLOGIES. *Four Character 5.0 mm (0.2 inch) Smart 5 x 7 Alphanumeric Displays*. 2004. Dostupné z: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/c/0gaj9pwj2ti8s56tqa11oa7zttwy.pdf>
- [13] D2XX Direct Drivers. *FTDI Chip* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.ftdichip.com/Drivers/D2XX.htm>
- [14] Stand-by zdroj z ATX zdroje (varianta 2). In: *Andrea Ronešová* [online]. 2004 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~ronesova/index.php?menuitem=sbzdroj>
- [15] TEXAS INSTRUMENTS. *Designing Switching Voltage Regulators With the TL494*. 2011. Dostupné z: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=slva001&track=no>

- [16] TEXAS INSTRUMENTS. *TL494 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS*. 2005. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>
- [17] TOSHIBA. *TB6560AHQ, PWM Chopper-Type Bipolar Driver IC for Stepping Motor Control*. 2007. Dostupné z: http://www.toshiba-components.com/motorcontrol/pdfs/TB6560AHQ_AFG_E_2003_20080407.pdf
- [18] ATMEL CORPORATION. *ATMEGA64, 8-bit AVR with 64KBytes In-System Programmable Flash*. 2010. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc2490.pdf>
- [19] Bresenham's line algorithm. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Bresenham's_line_algorithm
- [20] Midpoint circle algorithm. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Midpoint_circle_algorithm
- [21] Ftisp - A USB-to-ISP Programmer Utility. In: *Procyon Engineering* [online]. 2010 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.procyonengineering.com/embedded/avr/ftisp/>
- [22] ANALOG DEVICES. *Full/Low Speed 5 kV USB Digital Isolator*. 2009. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADuM4160.pdf
- [23] ANALOG DEVICES. *ICOUPLER® DIGITAL ISOLATION - UNPARALLELED PERFORMANCE AND INTEGRATION*. 2009. Dostupné z: http://www.analog.com/en/content/cu_over_icoupler_digital_isolation/fca.html
- [24] TOSHIBA. *TOSHIBA Photocoupler GaAs Ired & Photo-Transistor TLP621, TLP621-2, TLP621-4*. 2007. Dostupné z: http://www.semicon.toshiba.co.jp/openb2b/watermarkDocDownloader.jsp?pid=TLP621&lang=en&path=TLP/TLP621_en_wm_20071001.pdf
- [25] GM ELECTRONIC. *Pokovovací lázeň ELCHEMCO S-LAZEN AG1*. 2012. Dostupné z: <http://www.gme.cz/pokovovaci-lazne/pokovovaci-lazen-elchemco-s-lazen-ag1-p740-003/>
- [26] FTDI Utilities. FTDI CHIP. [online]. 2012. Dostupné z: <http://www.ftdichip.com/Support/Utilities.htm>
- [27] VCL Component (TOpenGLAPPpanel). *AllanPetersen.com* [online]. 2012. Dostupné z: <http://allanpetersen.com/2011/12/vcl-component-topenglappanel-3/>
- [28] THE KHROSOS GROUP. *OpenGL* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.opengl.org>
- [29] G-code. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/G-code>

[30] Excellon Programming Manual. *Excellon Automation* [online]. 2005 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.excellon.com/manuals/program.htm>

[31] OpenGL Graphics Pipeline. *ATEGPU* [online]. 2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.ategpu.com/2009/06/07/opengl-graphics-pipeline-%E5%8E%9F%E7%90%86%E5%9B%BE.html>

8 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: SCHÉMA ZAPOJENÍ INTERPOLAČNÍ JEDNOTKY

Schéma zapojení zdroje

Schéma zapojení digitální části a koncového stupně

PŘÍLOHA 2: SEZNAM SOUČÁSTEK

PŘÍLOHA 3: PŘEDLOHY PRO VÝROBU DPS

Pozitivní předloha strany součástek

Pozitivní předloha strany spojů

Montážní schéma pro stranu součástek

Montážní schéma pro stranu spojů

PŘÍLOHA 4: VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

Obrobení konců kuličkových šroubů

Vymezovací bloky pro X a Y suport

Pouzdra pro matice kuličkových šroubů

Obrobení X suportu

Předpis pro ohýbání dílů z 1 mm plechu

Pružné spojky

PŘÍLOHA 5: FOTOGRAFIE DOKONČENÉ MECHANIKY FRÉZKY

PŘÍLOHA 1

SCHÉMA ZAPOJENÍ INTERPOLAČNÍ JEDNOTKY

SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPÁJECÍHO ZDROJE

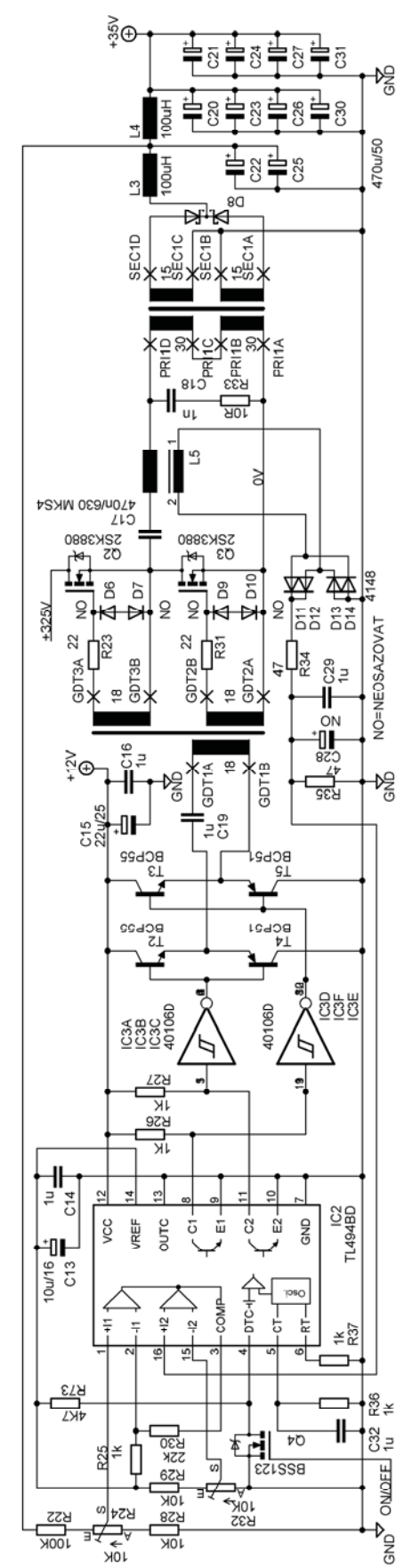
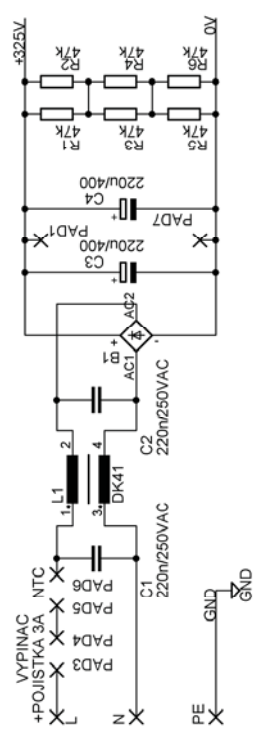
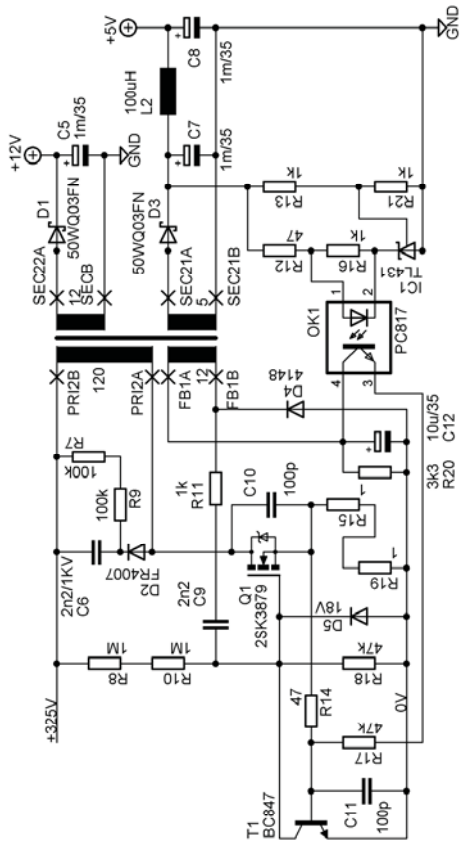
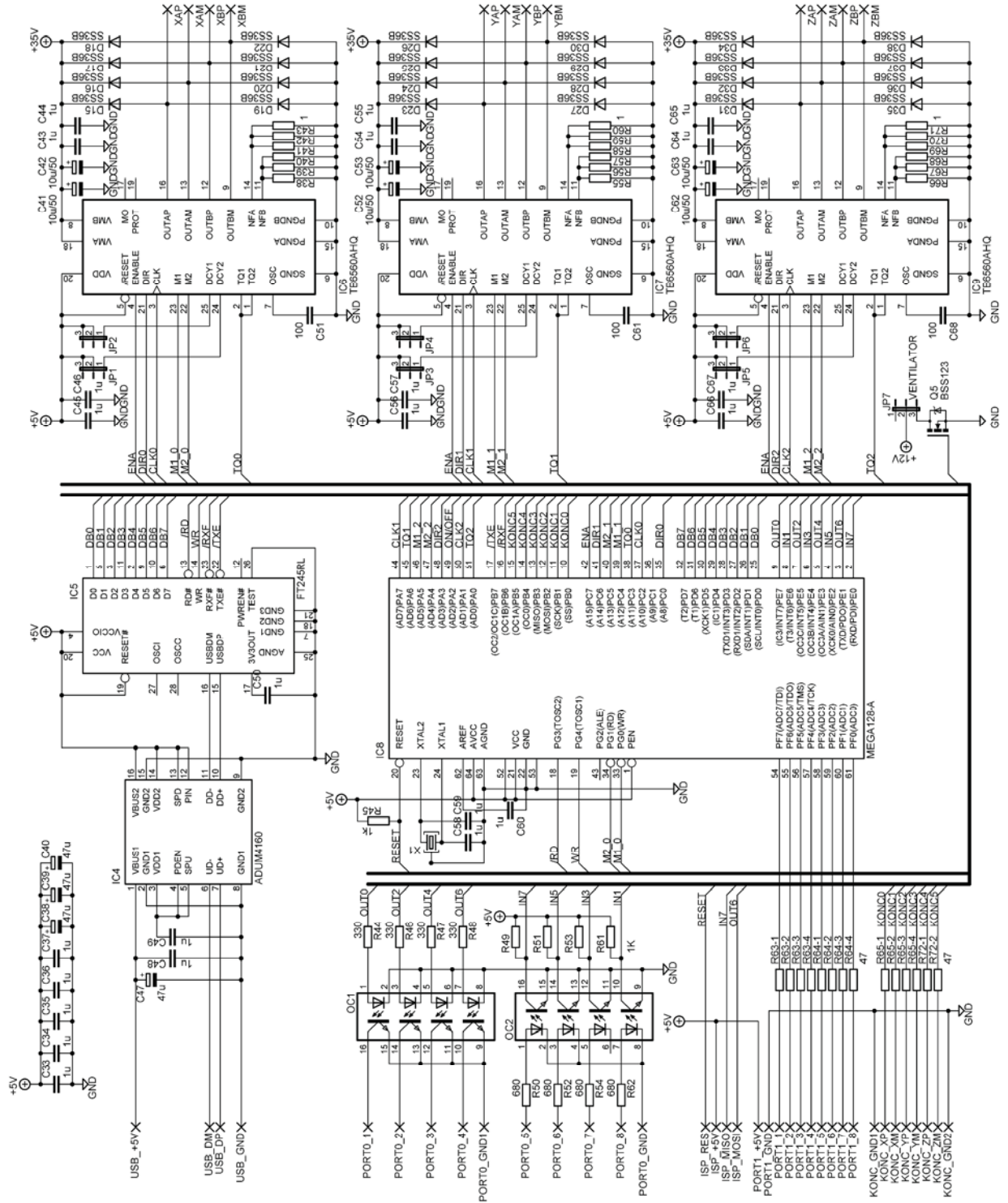


SCHÉMA ZAPOJENÍ DIGITÁLNÍ ČÁSTI A KONCOVÉHO STUPNĚ



PŘÍLOHA 2

SEZNAM SOUČÁSTEK

OZNAČENÍ	HODNOTA	POUZDRO
B1	2KBB-R	rectifier
C1	220n/250VAC	C150-064X183
C2	220n/250VAC	C150-064X183
C3	220u/400	EB30D
C4	220u/400	EB30D
C5	1m/35	E5-13
C6	2n2/1KV	C075-032X103
C7	1m/35	E5-13
C8	1m/35	E5-13
C9	2n2	C0805
C10	100p	C075-032X103
C11	100p	C0805
C12	10u/35	TANTAL-B
C13	10u/16	TANTAL-B
C14	1u	C0805
C15	22u/25	TANTAL-D
C16	1u	C0805
C17	470n/630	C-EU150-091X182
C18	1n	C102-054X133
C19	1u	C0805
C20	470u/50	E5-13
C21	470u/50	E5-13
C22	470u/50	E5-13
C23	470u/50	E5-13
C24	470u/50	E5-13
C25	470u/50	E5-13
C26	470u/50	E5-13
C27	470u/50	E5-13
C28	NO	SMC_B
C29	1u	C0805
C30	470u/50	E5-13
C31	470u/50	E5-13
C32	1u	C0805
C33	1u	C0805
C34	1u	C0805
C35	1u	C0805
C36	1u	C0805
C37	1u	C0805
C38	47u	TANTAL-D
C39	47u	TANTAL-D
C40	47u	TANTAL-D
C41	10u/50	TANTAL-D
C42	10u/50	TANTAL-D
C43	1u	C0805
C44	1u	C0805
C45	1u	C0805
C46	1u	C0805
C47	47u	TANTAL-D
C48	1u	C0805
C49	1u	C0805
C50	1u	C0805
C51	100	C0805
C52	10u/50	TANTAL-D
C53	10u/50	TANTAL-D
C54	1u	C0805
C55	1u	C0805

C56	1u	C0805
C57	1u	C0805
C58	1u	C0805
C59	1u	C0805
C60	1u	C0805
C61	100	C0805
C62	10u/50	SMC_D
C63	10u/50	SMC_D
C64	1u	C0805
C65	1u	C0805
C66	1u	C0805
C67	1u	C0805
C68	100	C0805
D1	50WQ03FN	D-DPAK
D2	FR4007	SMB
D3	50WQ03FN	D-DPAK
D4	4148	D-MINIMELF
D5	18V	D-MINIMELF
D8	2* 15A/60V schottky	SOT93V
D11	D-MINIMELF	D-MINIMELF
D12	4148	D-MINIMELF
D13	D-MINIMELF	D-MINIMELF
D14	D-MINIMELF	D-MINIMELF
D15	SS36B	SMB
D16	SS36B	SMB
D17	SS36B	SMB
D18	SS36B	SMB
D19	SS36B	SMB
D20	SS36B	SMB
D21	SS36B	SMB
D22	SS36B	SMB
D23	SS36B	SMB
D24	SS36B	SMB
D25	SS36B	SMB
D26	SS36B	SMB
D27	SS36B	SMB
D28	SS36B	SMB
D29	SS36B	SMB
D30	SS36B	SMB
D31	SS36B	SMB
D32	SS36B	SMB
D33	SS36B	SMB
D34	SS36B	SMB
D35	SS36B	SMB
D36	SS36B	SMB
D37	SS36B	SMB
D38	SS36B	SMB
IC1	TL431	SO08
IC2	TL494BD	SO16
IC3	40106D	SO14
IC4	ADUM4160	SO16W
IC5	FT245RL	SSOP28DB
IC6	TB6560AHQ	SIP25
IC7	TB6560AHQ	SIP25
IC8	MEGA128-A	TQFP64
IC9	TB6560AHQ	SIP25
L1	FILTR	FILTR
L2	100uH	radialni

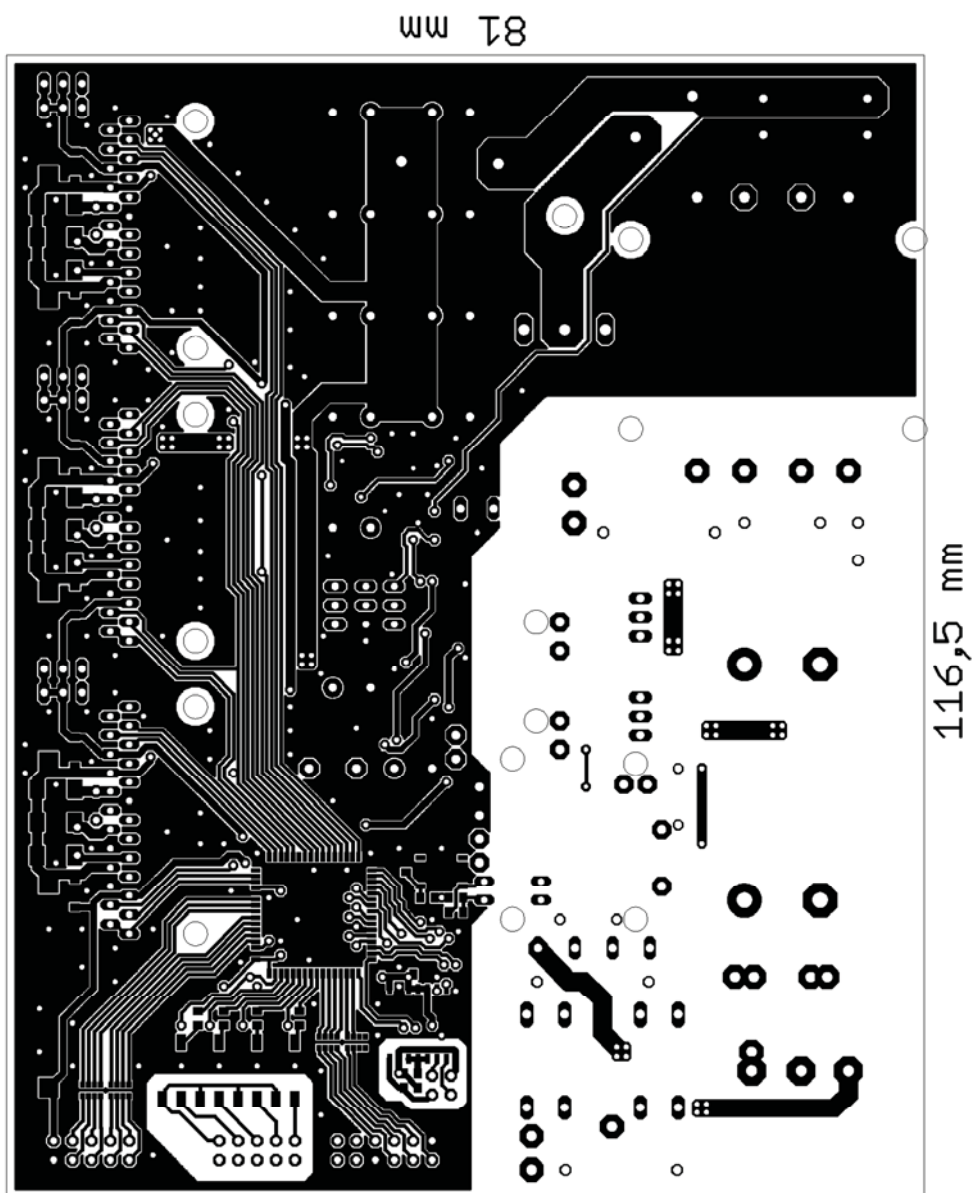
L3	100uH	TOROID
L4	100uH	TOROID
OC1	OPTO4	DIP16
OC2	OPTO4	DIP16
OK1	PC817	DIP04
Q1	2SK3879	D2PAK
Q2	2SK3880	TO220V
Q3	2SK3880	TO220V
Q4	BSS123	SOT23
Q5	BSS123	SOT23
R1	47k	R1206
R2	47k	R1206
R3	47k	R1206
R4	47k	R1206
R5	47k	R1206
R6	47k	R1206
R7	100k	R1206
R8	1M	R1206
R9	100k	R1206
R10	1M	R1206
R11	1k	R0805
R12	47	R0805
R13	1k	R0805
R14	47	R0805
R15	1	R2512
R16	1k	R0805
R17	47k	R0805
R18	47k	R0805
R19	1	R2512
R20	3k3	R0805
R21	1k	R0805
R22	100K	R0805
R23	22	R2512
R24	10K	B64Y
R25	1k	R0805
R26	1K	R0805
R27	1K	R0805
R28	10K	R0805
R29	10K	R0805
R30	22k	R0805
R31	22	R2512
R32	10K	B64Y
R33	10R	0617V
R34	47	R0805
R35	47	R0805
R36	1k	R0805
R37	1k	R0805
R38	1	R2512
R39	1	R2512
R40	1	R2512
R41	1	R2512
R42	1	R2512
R43	1	R2512
R44	330	R0805
R45	1k	R0805
R46	330	R0805
R47	330	R0805
R48	330	R0805

R49	1K	R0805
R50	680	R0805
R51	1K	R0805
R52	680	R0805
R53	1K	R0805
R54	680	R0805
R55	1	R2512
R56	1	R2512
R57	1	R2512
R58	1	R2512
R59	1	R2512
R60	1	R2512
R61	1K	R0805
R62	680	R0805
R63	47	4R-1206
R64	47	4R-1206
R65	47	4R-1206
R66	1	R2512
R67	1	R2512
R68	1	R2512
R69	1	R2512
R70	1	R2512
R71	1	R2512
R72	47	4R-1206
R73	4K7	R0805
T1	BC847	SOT23
T2	BCP55	SOT223
T3	BCP55	SOT223
T4	BCP51	SOT223
T5	BCP51	SOT223

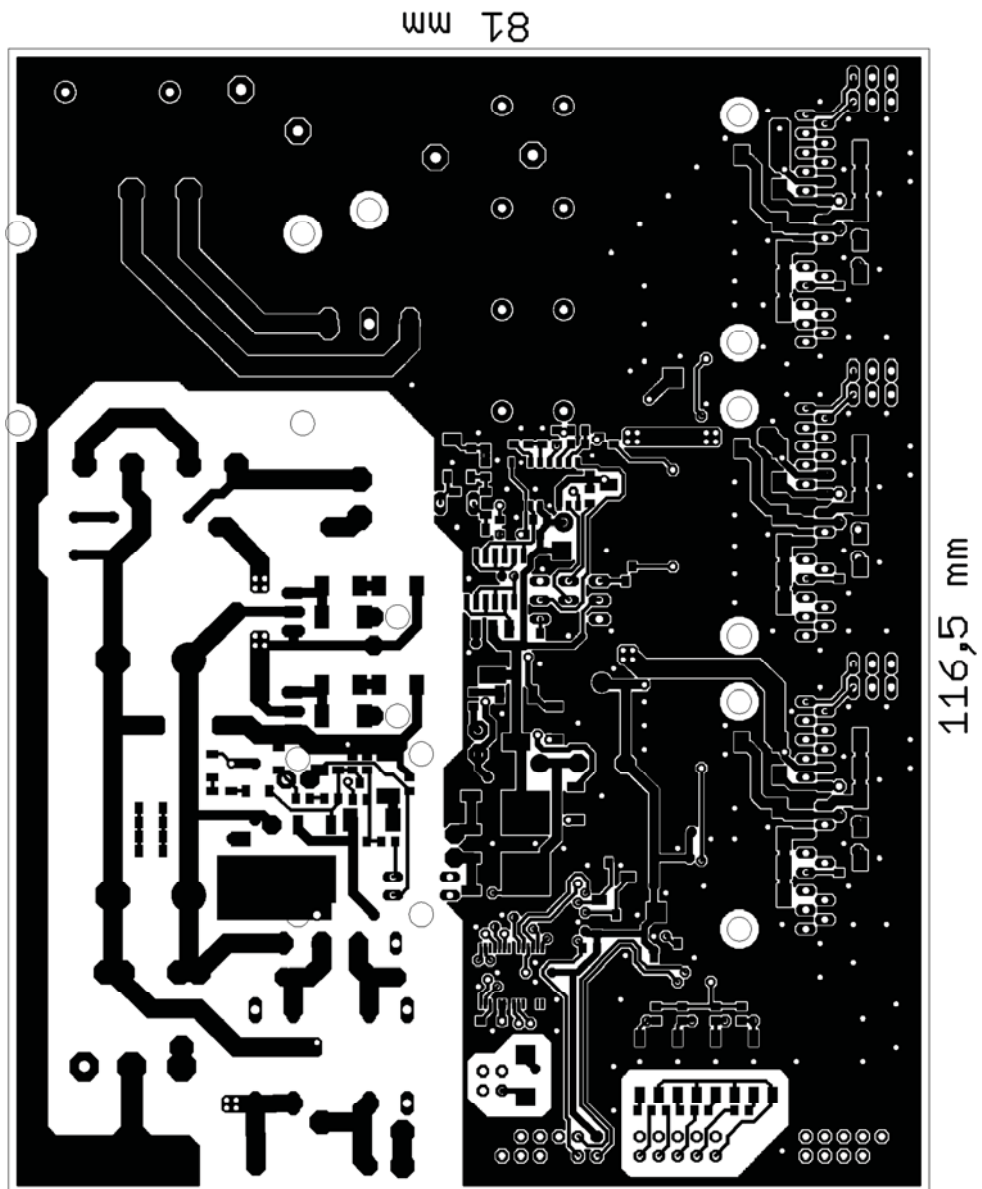
PŘÍLOHA 3

PŘEDLOHY PRO VÝROBU A OSAZENÍ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

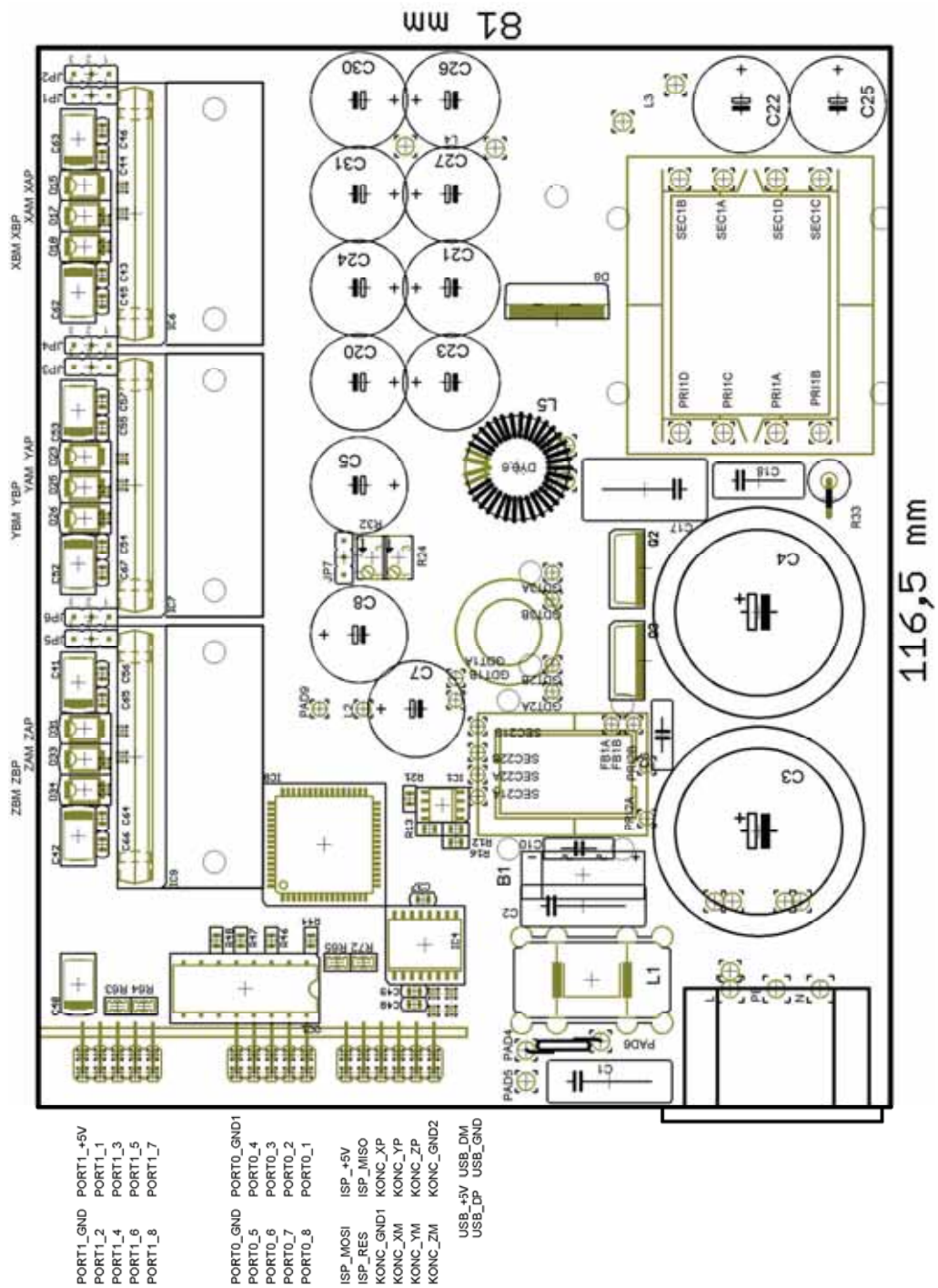
POZITIVNÍ PŘEDLOHA STRANY SOUČÁSTEK



POZITIVNÍ PŘEDLOHA STRANY SPOJŮ

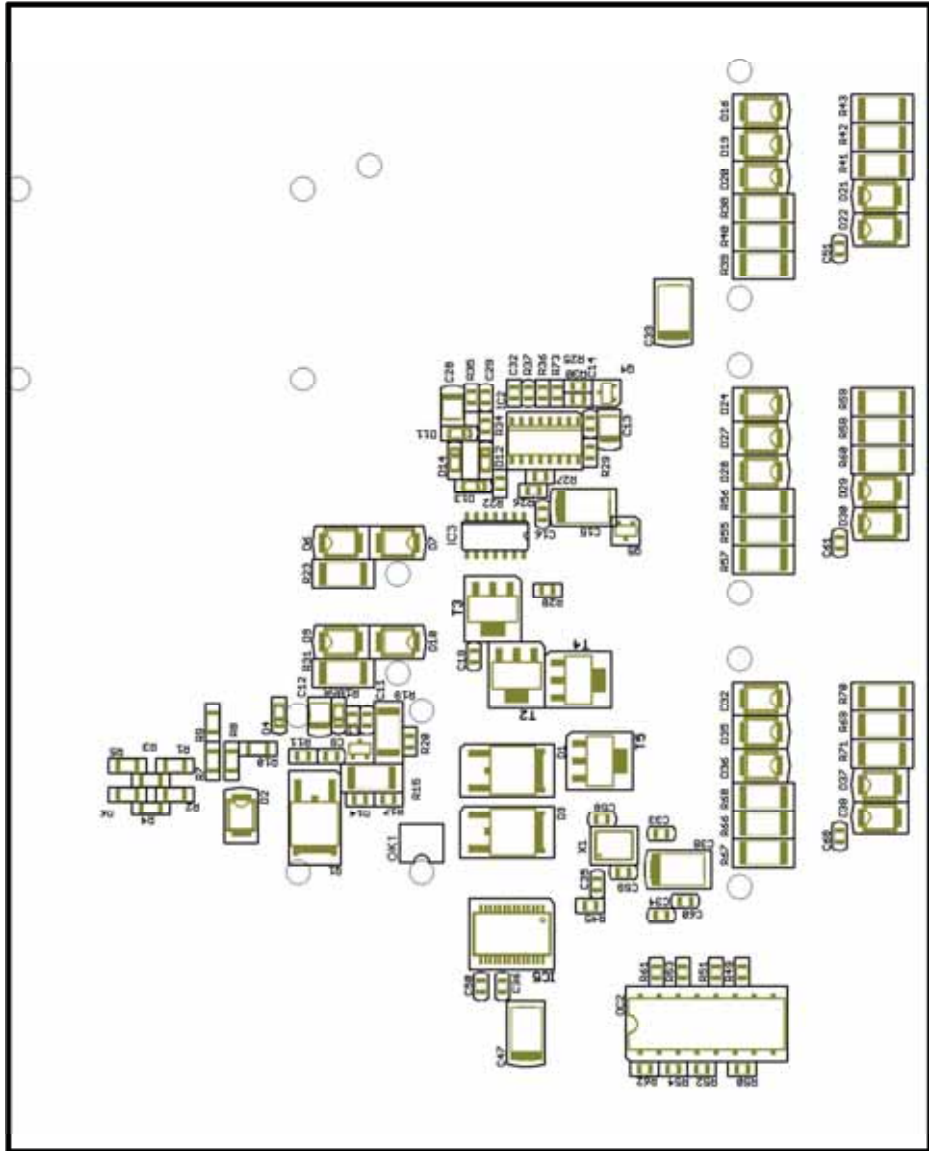


MONTÁŽNÍ SCHÉMA PRO STRANU SOUČÁSTEK



MONTÁŽNÍ SCHÉMA PRO STRANU SPOJŮ

81 mm

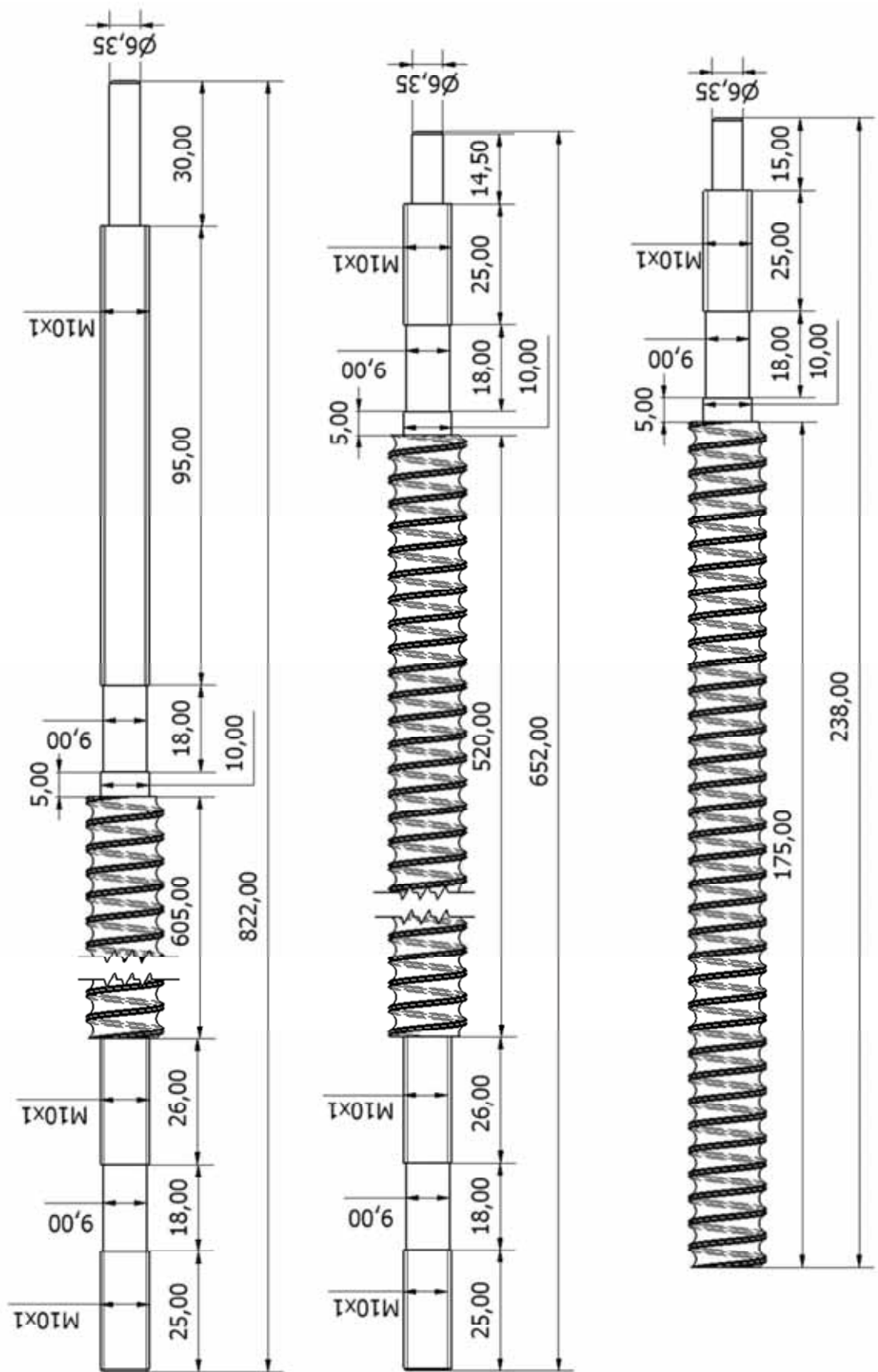


116,5 mm

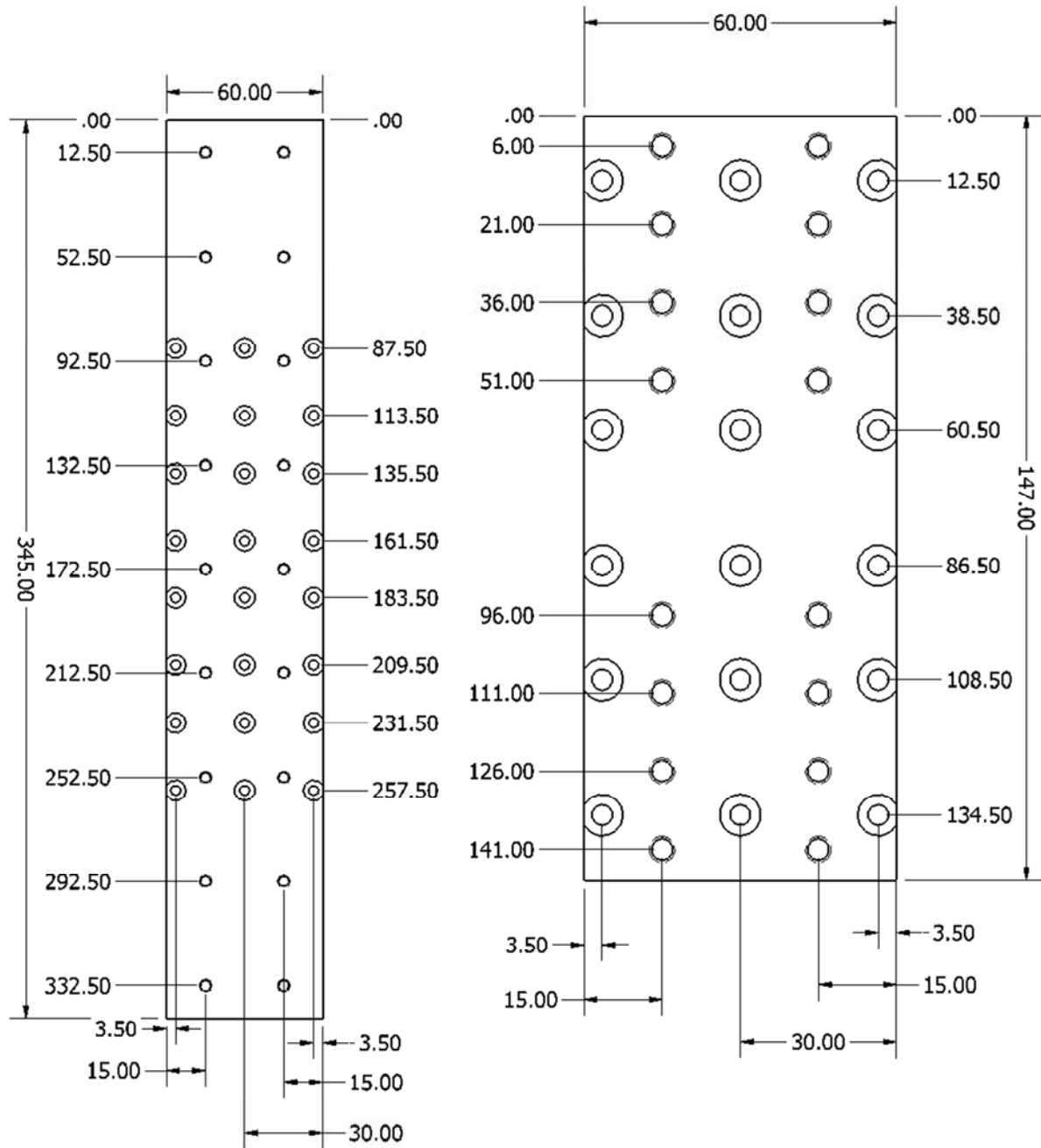
PŘÍLOHA 4

VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

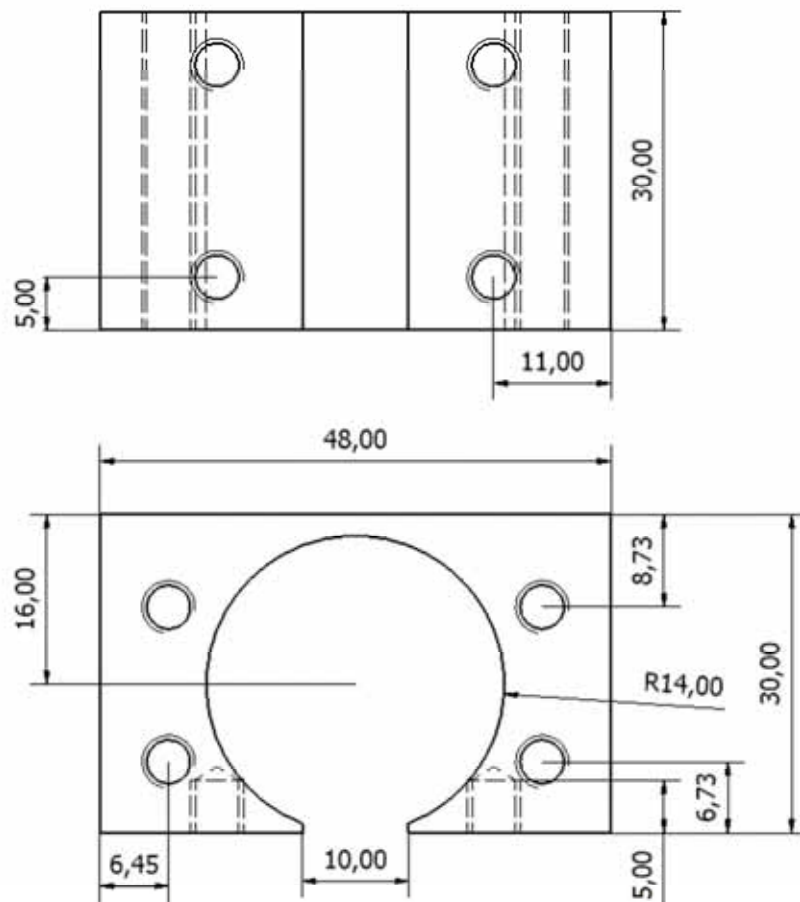
OBROBENÍ KONCŮ KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ



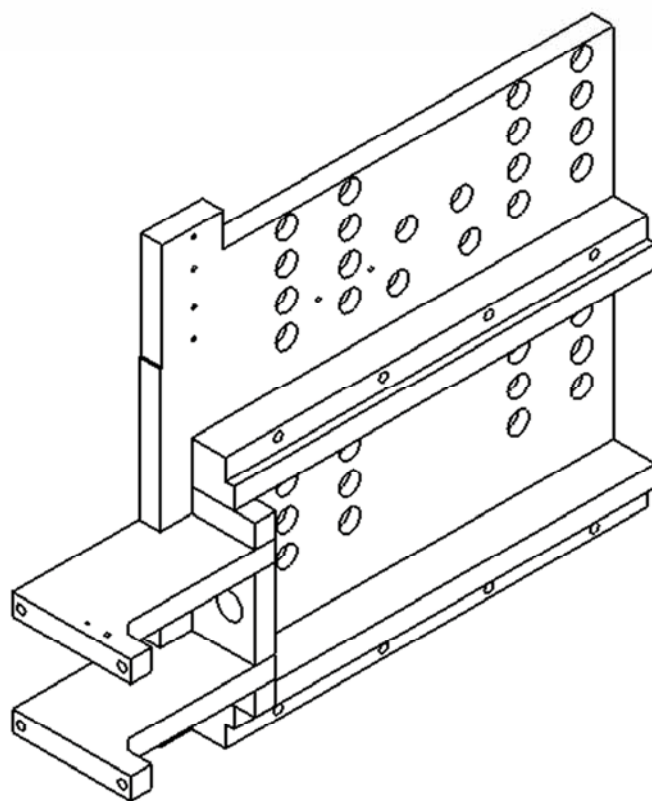
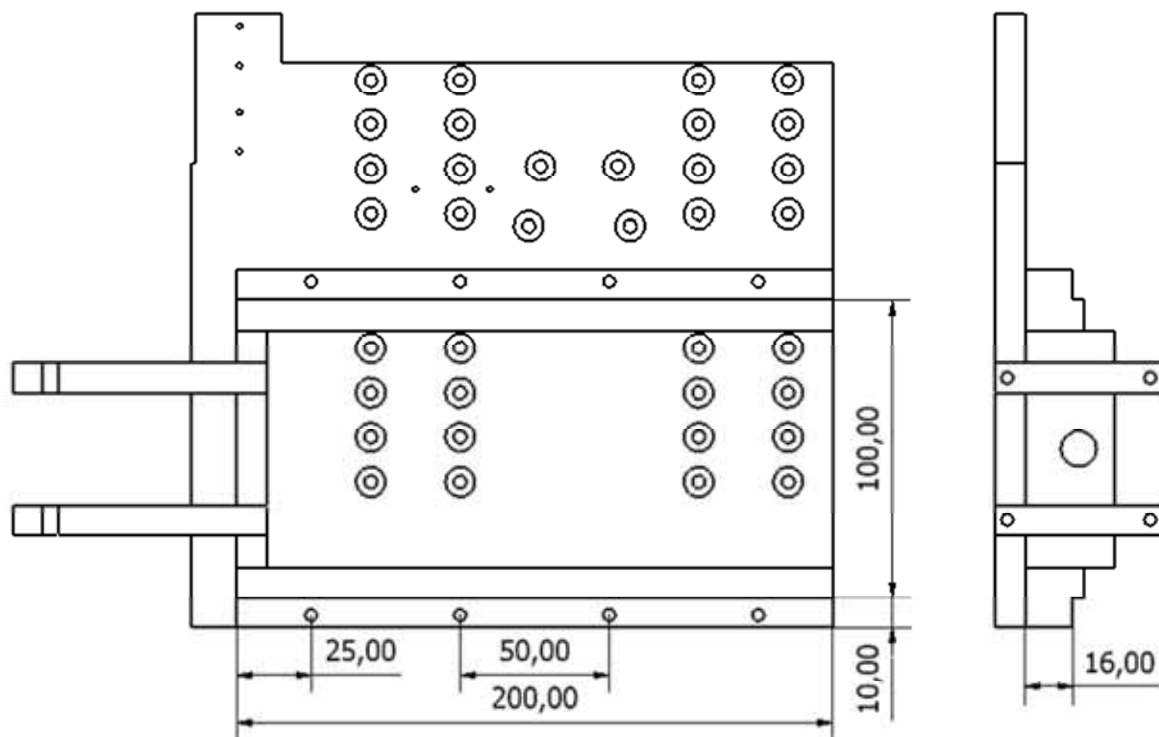
VYMEZOVACÍ BLOKY PRO X A Y SUPORT



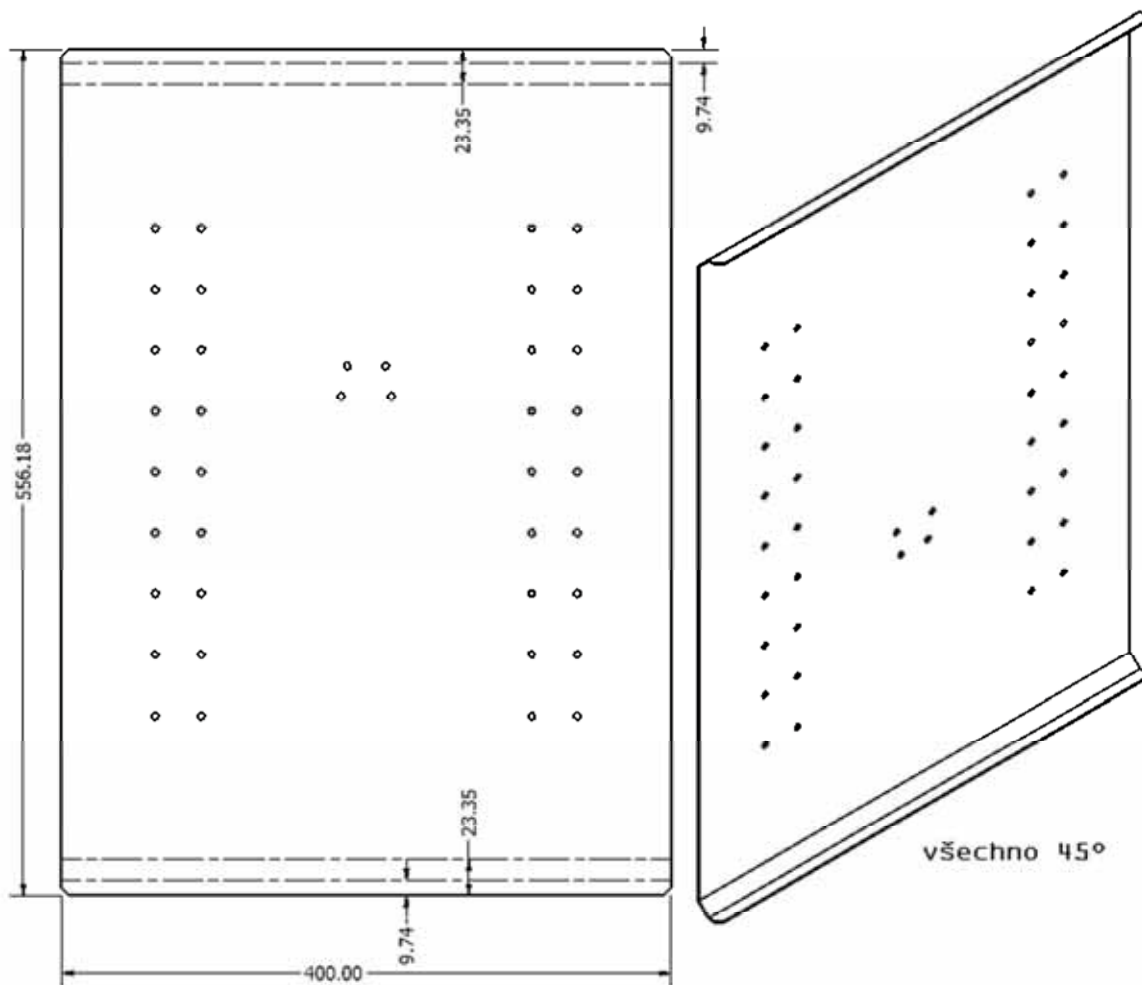
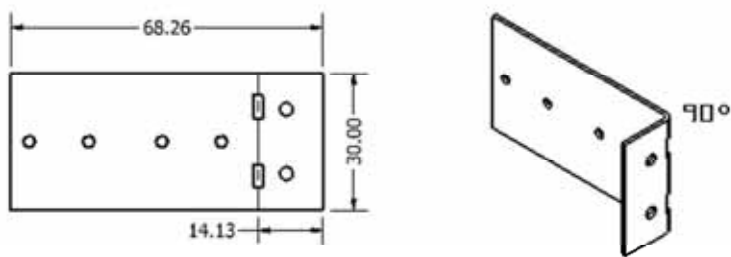
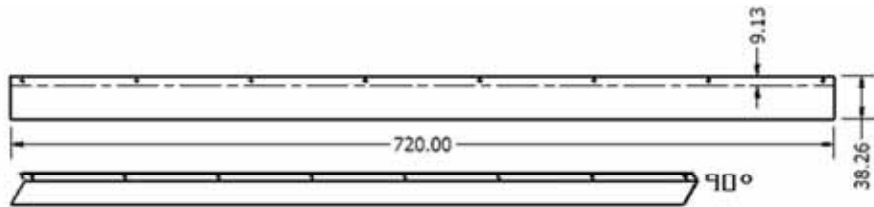
POUZDRA PRO MATICE POHYBOVÝCH ŠROUBŮ



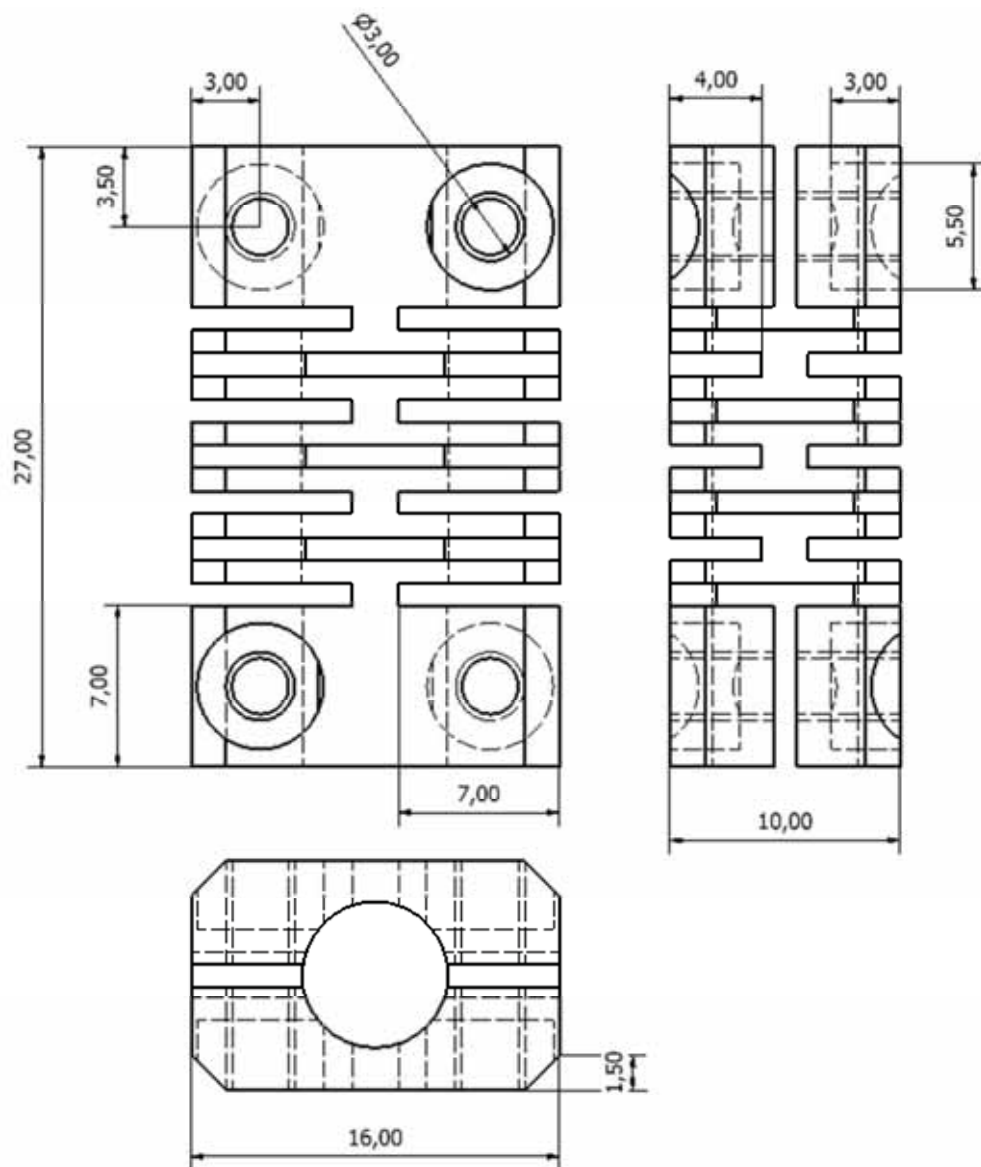
OBROBENÍ X SUPORTU



PŘEDPIS PRO OHÝBÁNÍ DÍLŮ Z 1 MM PLECHU



PRUŽNÉ SPOJKY



PŘÍLOHA 5

FOTOGRAFIE DOKONČENÉ MECHANIKY FRÉZKY

