



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

NÁVRH ROZŠÍŘENÍ 3D FRÉZKY NA 3D TISKÁRNU

MODIFICATION OF 3D MILLING MACHINE TO 3D PRINTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ HALAMÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK BRADÁČ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Halamíček

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh rozšíření 3D frézky na 3D tiskárnu

v anglickém jazyce:

Modification of 3D milling machine to 3D printer

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem je návrh rozšíření 3D portálové frézky o 3D tiskovou hlavu a analýzu možností přebudování na 3D frézku.

Cíle bakalářské práce:

1. Reserše možných 3D tiskových hlav včetně podávání materiálů a pro použití k frézce.
2. Návrh a oživení tiskové hlavy včetně podávání materiálu.
3. Návrh a oživení vyhřívané podložky pro tisk.

Seznam odborné literatury:

www.beckhoff.com

www.smc.cz

Vedoucí bakalářské práce: Ing. František Bradáč, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 26.11.2014

L.S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato práce se zabývá přestavbou gravírovací frézky na 3D tiskárnu. V první části se práce zabývá možnými technologiemi 3D tisku a možnostmi jejich využití u přestavby. Dále jsou popsány a vybrány vhodné součásti pro přestavbu. V další části je realizováno řízení ohřevu podložky, trysky a řízení posuvu drátu pomocí softwaru TwinCat od společnosti Beckhoff na průmyslovém počítači. Výsledkem práce by měla být oživená 3D tiskárna.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, Rapid Prototyping, FDM, vyhřívaná podložka, extrudér, tryska, hot-end, TwinCat, PLC, Beckhoff

ABSTRACT

This thesis deals with rebuilding of engraving machine to 3D printer. In the first part it describes possible 3D printing technologies and its utilizations in rebuilding. In the next section suitable parts for reconstruction are chosen and described. Then the controlling of heating bed, hot end and filament feed is realized by using software TwinCAT by company Beckhoff. Functional 3D printer should be result of this thesis.

KEYWORDS

3D printing, Rapid prototyping, FDM, heated bed, extruder, nozzle, hot-end, TwinCat, PLC, Beckhoff



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HALAMÍČEK, L. *Návrh rozšíření 3D frézky na 3D tiskárnu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 48 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Bradáč, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Františka Bradáče, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 29. května 2015

.....
Lukáš Halamíček



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Františkovi Bradáčovi Ph.D. za cenné rady, strávený čas a ochotu při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat svojí rodině za trvalou podporu během studia.



OBSAH

Úvod.....	11
1 Technologie 3D tisku	12
1.1 SLS - Selective laser sintering	12
1.2 SLA – Stereolitography.....	13
1.3 FDM – Fused deposition modeling.....	14
1.4 LOM – Laminated object manufacturing.....	14
1.5 Ink-Jet technologie	15
1.5.1 Binder Jetting	16
1.5.2 Multi-Jet Modeling	16
2 Popis 3D tiskárny typu FDM.....	18
2.1 Konstrukce FDM tiskárny	18
3 Součásti pro přestavbu frézky	22
3.1 Tisková hlava	22
3.2 Vyhřívání podložka	24
3.3 Gravírovací frézka.....	25
3.4 Dostupný hardware průmyslového počítače	25
3.4.1 PC Beckhoff C6925-0000.....	25
3.4.2 EtherCAT Bus Coupler.....	26
4 Rozbor praktické části	28
5 Řízení posuvu struny	29
5.1 krokový motor	29
5.2 Úprava PLC programu	32
6 Řízení ohřevu podložky a hlavy	34
6.1 Sledování teploty.....	34
6.2 Regulace teploty	35
6.3 Realizace v PLC programu	35
7 Příprava k tisku.....	38
7.1 Instalace komponent.....	38
7.2 Přehled elektroinstalace.....	38
7.3 Příprava kódu	39
7.4 Zkouška tisku	41
Závěr	43
Použité informační zdroje.....	44
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	46
Seznam obrázků.....	47
Seznam tabulek.....	48
Seznam použitých vzorců	48
Seznam příloh	48



ÚVOD

3D je progresivní technologií, se kterou se již máme možnost setkávat i v běžném životě. Umožňuje vytvářet prostorové součástky složitých tvarů i tisk materiálů jinak nezpracovatelných. Ve firmách může velmi usnadnit návrh komponent jednoduchou výrobou prototypů či modelů součástí a strojů.

Stavba 3D tiskárny už není doménou pouze velkých korporací, i domácí uživatelé si můžou postavit vlastní, případně koupit hotový stroj. K dispozici jsou různé konstrukce, kvalitnější i méně kvalitní.

Proto pro stavbu 3D tiskárny byla vybrána gravírovací frézka s již vyřešeným řízením posuvů a dostatečně tuhou sestavou vhodnou pro 3D tisk. Je třeba ji vhodně upravit pro užití konkrétní použité technologie tisku a správně nastavit potřebné parametry.

Cílem práce je zvolit vhodnou technologii, navrhnout potřebné součásti a zprovoznit řízení těchto dílů. Řízení je provedeno pomocí průmyslového počítače v softwaru TwinCat.



1 TECHNOLOGIE 3D TISKU

3D tisk je označení pro technologii výroby součástí nanášením tenkých vrstev materiálu a jejich spojováním pomocí tepla nebo lepidel. Mohou být vytvářeny velmi složité tvary a dokonce i funkční součástky (např. ložisko).

Na rozdíl od třískového obrábění je zde u většiny technologií žádné nebo minimální množství odpadu, ovšem výrobní časy a pořizovací ceny tiskáren jsou vysoké. Proto jsou vhodné zejména pro výrobu prototypů – odtud anglický název technologie „Rapid Prototyping“ [1].

Technologie 3D tisku byla vyvinuta v 80. letech 20. století a od té doby byl zaznamenán velký pokrok. Mohou být tisknuty různorodé materiály – plasty, kovy, papír a dokonce se již experimentuje s tiskem jídla a lidských orgánů [5]. V NASA již probíhají experimenty s tiskem titanových trysek do raketových motorů [3].

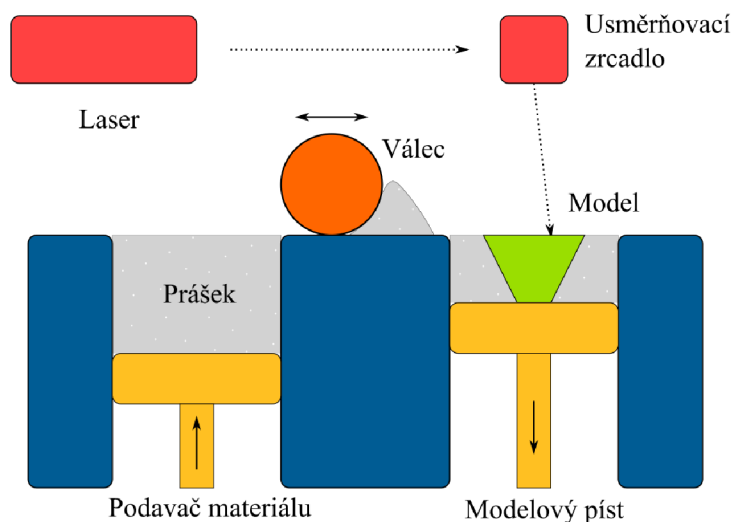
3D tisk je velmi progresivní technologie, která se rozšiřuje již i do domácí sféry. V budoucnu bude naprosto běžné používat výrobky z 3D tiskáren [2].

Za svou téměř 30 letou éru existence se vyvinulo velké množství technologií tisku, které se velmi liší svou fyzikální podstatou. Tisk může být realizován nanášením roztaveného materiálu, tavením prášku i dělením a spojováním vrstev papíru a dalšími principy.

V následujících odstavcích jsou popsány některé významné technologie 3D tisku.

1.1 SLS - SELECTIVE LASER SINTERING

Jedná se o jednu z nejstarších technologií 3D tisku, vyvinutou na konci 80. let minulého století Texaské univerzitě v USA.



Obr. 1 Princip technologie SLS.

Princip této technologie spočívá v usměrnění laserového paprsku pomocí soustavy zrcadel do jednoho bodu a pomocí takto vytvořeného tepla se materiál ve formě prášku spéká. Laserový paprsek je naváděný ve vodorovné rovině na základě dat z modelu a takto vytváří jednu vrstvu součásti.



Materiál dodávaný ve formě prášku obklopuje součást a v případě složitých součástí tvoří nosnou konstrukci pro převislé části modelu.

Po vytvoření jedné vrstvy součásti, je díl posunut o tloušťku jedné vrstvy dolů a je nanášena a zarovnána další vrstva prášku.

Pracovní komora je neprodyšně uzavřená a uvnitř je udržována teplota blízká teplotě tavení daného materiálu. Předehřev je důležitý kvůli zmenšení nároků na ohřev prášku laserem.

Jako tiskový materiál může být použit plast, keramika, sklo a různé kovy. Ovšem čím vyšší teplotu tavení má konkrétní materiál, tím vyšší jsou nároky na předehřev komory a výkon laseru.

Technologií SLS jdou vytvořit velmi složité a přesné tvary nicméně je potřeba speciální a drahé zařízení, které má i drahý provoz [1,2,4].

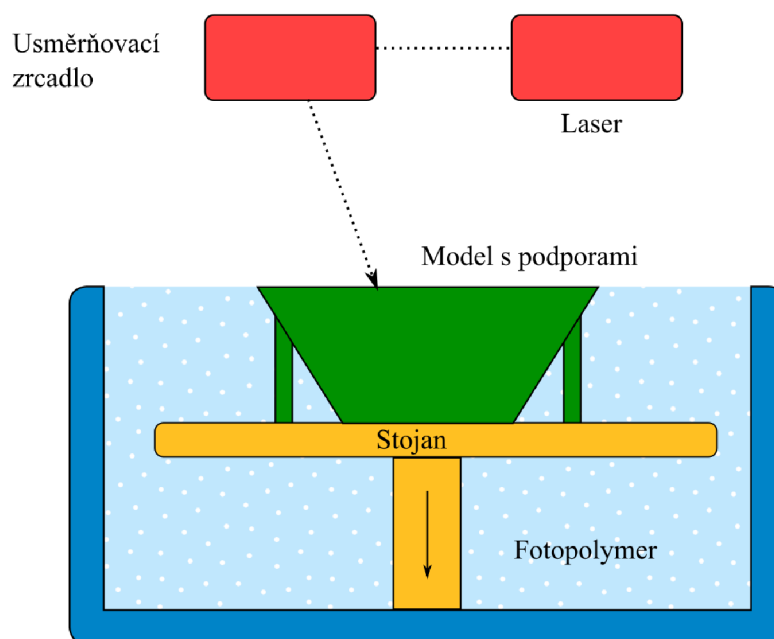
Především z důvodu potřebě vyhřívání neprodyšné komory a nákupu drahého laseru je tato technologie pro přestavbu frézky zcela nevhodná.

1.2 SLA – STEREO LITOGRAPHY

Stereolitografie je nejstarší technologií 3D tisku. Vyvinuta byla v Japonsku v roce 1980, ale patentována byla až v roce 1986.

SLA využívá tekutou fotopolymerickou pryskyřici vytvrzovanou UV laserem. Jednotlivé vrstvy modelu jsou usměrněným laserovým paprskem vytvrzovány na hladině zásobníku s pryskyřicí a po jejím dokončení se posune součást dolů tloušťku vrstvy a nanáší se další část.

V případě stavby složitějších součástí je nutností používat podpěry, které musí být po dokončení ručně opracovány.



Obr. 2 Technologie SLA.

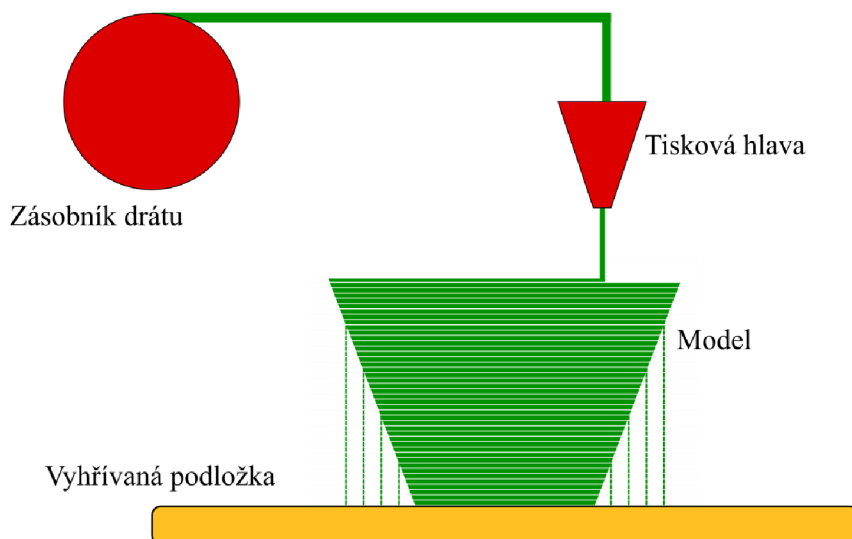
Tato technologie bývá považována za jednu z nejpřesnějších, ovšem kvůli omezenému množství materiálů je možnost jejího použití malá. Často je využívána k tisku vytavitelným modelům pro odlévání. Cena stroje a materiálů je celkem vysoká [1,2].

Stereolitografie je nevhodná technologie 3D tisku pro přestavbu frézky. Bylo by třeba zakoupit drahé vybavení v podobě laseru a kompletně přestavit zbytek tiskárny.



1.3 FDM – FUSED DEPOSITION MODELING

FDM je v dnešní době nejpoužívanější technologií 3D tisku a to hlavně kvůli nenáročnosti výroby strojů i obsluhy. Tento typ tiskáren se rozšířil i mimo průmyslové použití a na trhu je množství zařízení, které jsou připravené k okamžitému použití, dokonce je již v prodeji i 3D pero [6,7].



Obr. 3 Technologie FDM.

Tato technologie je založena na tavení drátu materiálu v tiskové hlavě a následným vytlačení na podložku. Pohybem v horizontální rovině nad podložkou se vytvoří vrstva materiálu a poté se podložka nebo hlava oddálí o tloušťku vrstvy a nanáší se nová vrstva. Pokud je součástí složitějších tvarů, musíme použít podpůrnou konstrukci, která je posléze odstraněna [1].

Chladnutí materiálu způsobuje jeho smršťování, a tudíž se může stát, že se výrobek od podložky odlepí a zdeformuje. Tomu jde zabránit použitím vyhřívané podložky, která chladnutí zpomalí [8].

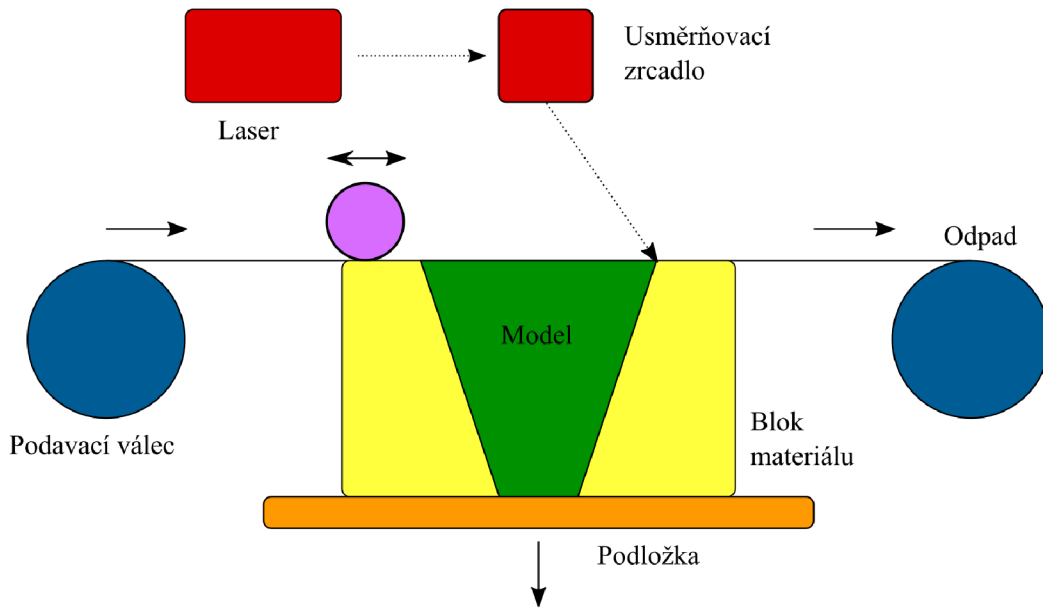
Nejpoužívanější materiály jsou různé plasty například ABS, PLA, nylon, ale i například různé kovy, které se do trysky dopravují ve formě prášku. V potravinářství se uplatňuje tisk čokolády a výrobků z cukru [9].

Tisk technologií FDM je relativně levný, pořizovací cena stroje i materiálu je nižší než u jiných technologií. Ovšem tisk rozměrných součástí je časově náročný, a proto se tato technologie uplatňuje především pro tisk menších součástí [1].

Pro přestavbu frézky na 3D tiskárnu je tato technologie vhodná. Máme zajištěny posuvy extrudéru a samotné připojení hlavy a podavače materiálu nevyžaduje velký zásah do konstrukce frézky. Kvůli rozšíření FDM je i cena jednotlivých komponent přívětivá.

1.4 LOM – LAMINATED OBJECT MANUFACTURING

Laminování spočívá v nařezání vrstev laminátu na příslušný tvar dle 3D modelu a jejich spojení pomocí tepla nebo lepidla. Řezání může být provedeno mechanicky nebo laserem. Spojování probíhá buď za pomoci tepla, nebo různých lepidel [4].



Obr. 4 Laminated object manufacturing.

Technologií podávání materiálu a řezání je více druhů. Materiál může být podáván ve formě pásu a vždy je z něj vyřezán jenom potřebný díl, nebo může jít o předpřipravené archy laminátu, které jsou umístovány do tiskárny podavačem. Poté je vyřezán potřebný tvar a přebytek materiálu je nařezán na menší kusy, kvůli usnadnění vytahování modelu.

Přebytek materiálu navíc tvoří podporu pro složitější části modelu. Působením tlaku nebo tepla válce se vrstvy spojí dohromady. Po dokončení součásti následuje čištění od přebytků laminovacího materiálu a poté se případně může součást napouštět, lakovat apod. pro zlepšení pevnosti a kvality povrchu [1,11].

Jako laminovací materiál můžeme používat různé plastové a kovové folie, ale i obyčejný kancelářský papír – v tomto případě jsou modely velmi levné.

Nevýhodou technologie je velké množství odpadu a prakticky nemožnost použití více druhů laminovacího materiálu u jednoho stroje.

Součásti vyrobené laminováním mohou mít nižší tloušťku vrstvy než např. u technologií FDM, SLS. Záleží na použitém materiálu. Strukturou se podobají součástem vyrobeným ze dřeva. Technologie tisku je rychlá a můžeme tisknout i velmi rozměrné součásti. Ovšem přesnost a mechanické vlastnosti jsou menší než u jiných technologií [10].

Přestavba frézky na technologii lom by byla teoreticky proveditelná, v případě použití mechanického systému dělení materiálu. Nicméně kvůli vytvoření systému na podávání materiálu by se musela konstrukce frézky radikálně upravit a pro zachování tiskové plochy by bylo potřeba zvětšit základnu stroje.

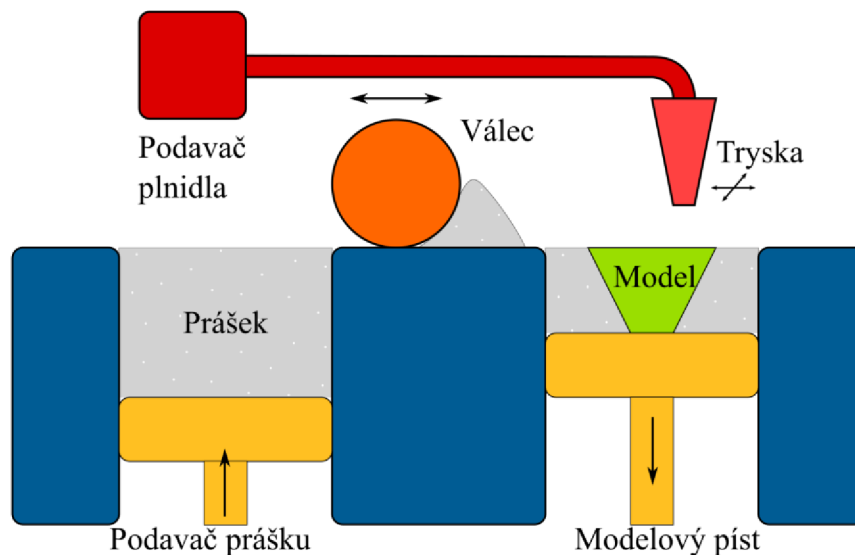
1.5 INK-JET TECHNOLOGIE

Technologie tisku „inkoustem“ vychází z klasické metody inkoustového tisku na papír. Základem je tryska, která nanáší tekutý tiskový materiál na podložku. Ink-Jet technologií je celá řada, lišících se v principu nanášení a vytvrzování materiálu [12].



1.5.1 BINDER JETTING

Binder Jetting neboli „nanášení pojiva“ je technologie založená na principu vytvrzování základního materiálu (prášku) pojivem, které je aplikováno pomocí tiskové hlavy. Jakmile je vytvořena jedna vrstva, je nanášena a zarovnána nová vrstva prášku a tisk pokračuje. Je možnost do plniva přidávat barvivo a tím, jako u jedné z mála technologií vytvořit součást v jakékoliv barevné kombinaci.



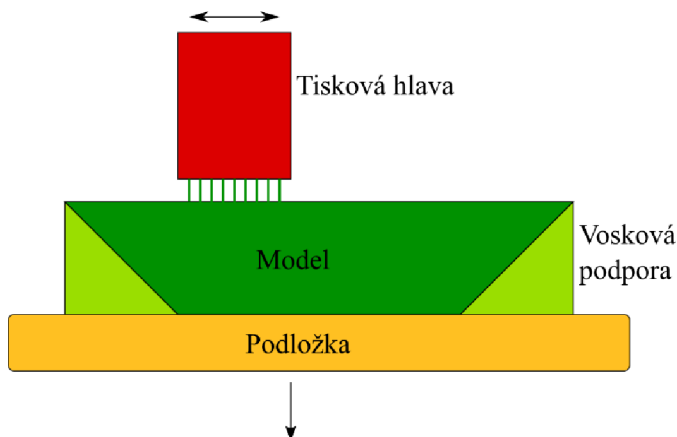
Obr. 5 Technologie Binder Jetting.

Vytvořené součásti nedosahují takových kvalit v porovnání s např. SLS. Kvůli dosažení kvalitnějšího povrchu a mechanických vlastností, musí být dále upravovány [2].

Tato metoda tisku by vyžadovala příliš velký zásah do konstrukce frézky, nutnost postavit zásobníky pro prášek i plnidlo, vyrobit podavače prášku a posuvu modelu. Pro přestavbu je nevhodná.

1.5.2 MULTI-JET MODELING

MJM je označení pro technologii nanášení materiálu tiskovou hlavou obsahující 96 trysek. Dávkování materiálu lze řídit pro každou trysku zvlášť. Hlava se pohybuje nad podložkou ve vodorovné rovině a nanáší jednotlivé vrstvy materiálu. Po dokončení jedné vrstvy se podložka posune o tloušťku vrstvy dolů.



Obr. 6 Princip Multi-Jet Modeling.



Tiskový materiál je termoplast, který při kontaktu s podložkou téměř okamžitě ztuhne. Jako podpůrný materiál je hlavou nanášen vosk, který je po dokončení součásti vytaven. Řízení dávkování materiálu zajišťuje počítač [13].

Velký počet trysek zajišťuje rychlý tisk a kvůli konstrukci stroje a použitým materiálům je tisk tichý a ekologický. Hlavní uplatnění tedy nalezne v kancelářích pro tisk prototypů [12].

Pro přestavbu frézky by tato technologie teoreticky mohla být využita. Prakticky bychom se připravili o výhody této technologie, hlavně o rychlost tisku. Posuvy na frézce nedosahují takových rychlostí jako MJM tiskárny. Navíc tisková hlava nejde na trhu sehnat samostatně, a tedy by přestavba byla nemožná.

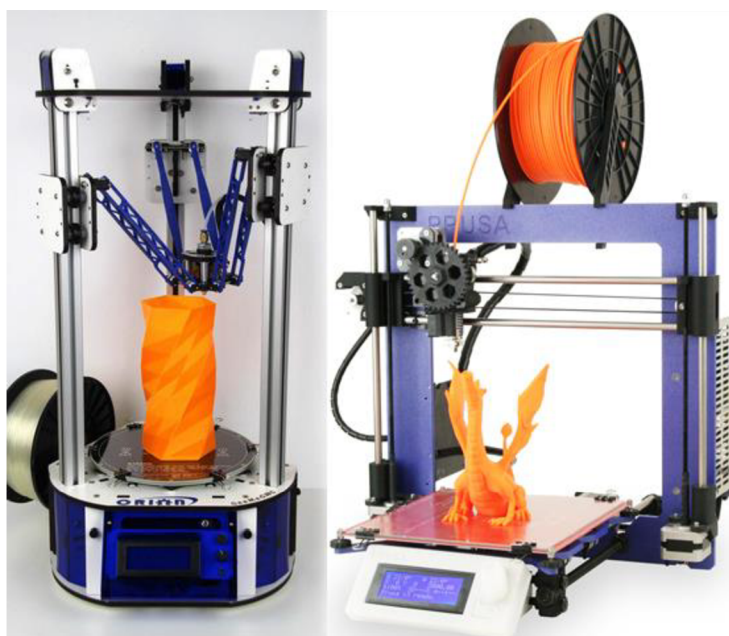


2 POPIS 3D TISKÁRNY TYPU FDM

Po zhodnocení možných technologií 3D tisku, je zřejmé, že pro přestavbu frézky je nejvhodnější technologie FDM. Konstrukce frézky je velmi podobná konstrukci tiskárny technologie Fused deposition modeling. Ke správné funkci je třeba pouze připevnit tiskovou hlavu k frézce, namontovat vyhřívanou podložku a zprovoznit tiskárnu z hardwarové i softwarové stránky. V následující části jsou stručně vysvětleny základní pojmy z konstrukce tiskárny.

2.1 KONSTRUKCE FDM TISKÁRNY

Tiskárna se skládá se z několika základních součástí, které musí být zastoupeny v každém typu stroje. Mezi ně především patří posuvy, tisková hlava a vyhřívaná podložka. Uspořádání součástí může být různé - tiskárna s delta posuvy nebo častější varianta s kartézskými posuvy ve 3 osách (viz Obr. 7), který je dále popsán. Výhodou delta typu je použití pouze 4 krokových motorů proti 5 motorům u kartézského typu. Cenou za to je složitější konečné ladění tiskárny.



Obr. 7 Tiskárna typu Delta (vlevo) [20] a Kartézského typu (vpravo) [19].

RÁM

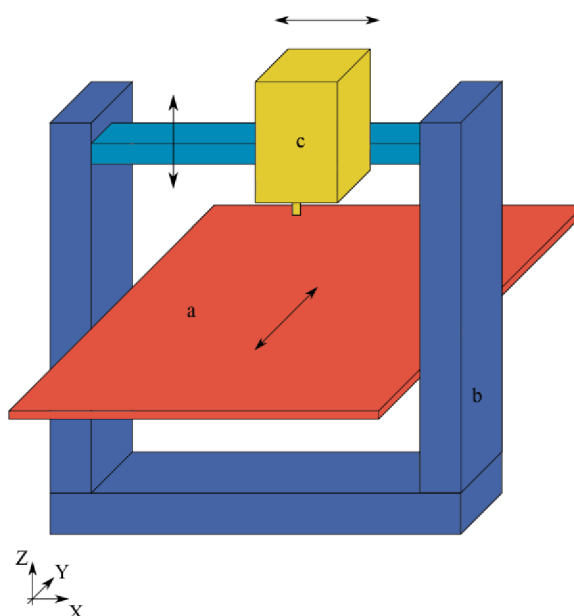
Základem tiskárny je rám, který zajišťuje oporu a stabilitu pro celou tiskárnu. Rám může být navrhnout mnoha způsoby, často bývá u hobby tiskáren jen složen ze závitových tyčí, které drží další součásti nebo z hliníkových profilů, zajišťujících větší stabilitu. U komerčních výrobků je často celé šasi navrženo s ohledem na design produktu, ovšem na funkci to velký vliv nemá.

POSUVY

Pro přesné polohování tiskové hlavy je zapotřebí posuvů ve 3 osách X, Y, Z. Možností polohování je mnoho, u hobby produktů je nejčastější možnost posuvu hlavy v ose X a Z a podložky v ose Y (jako na Obr. 8). Případně se podložka namísto hlavy pohybuje ve směru osy Z. U komerčních produktů je populární polohování hlavy v ose X, Y a podložky v Z. Posuvy jsou v naprosté většině poháněny krokovými motory, a pro transformaci rotačního



pohybu na lineární se využívají hlavně ozubené řemeny a závitové tyče [19]. Vedení bývají konstruována různě, často jde o nerezové vodící tyče kombinované s lineárními ložisky.



Obr. 8 Schéma tiskárny typu FDM, a) podložka, b) rám s posuvy, c) tisková hlava (šipky označují směr posuvu dané části).

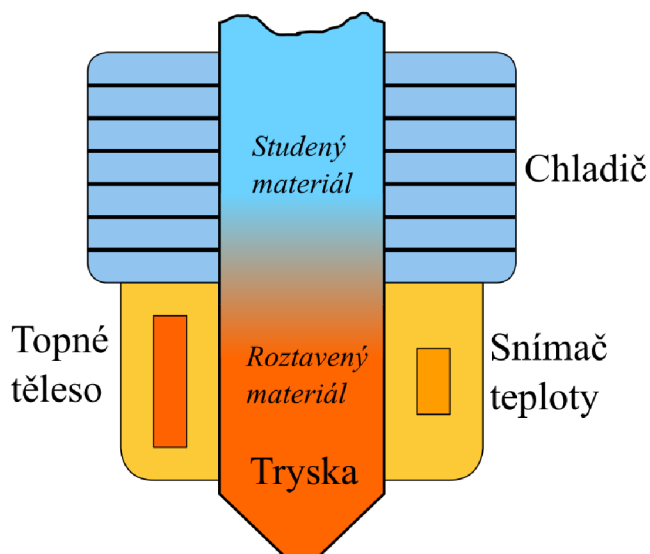
TISKOVÁ HLAVA

3D tiskárna typu FDM využívá pro tisk hlavu, která má na starosti ohřev a tisk materiálu. Vždy se skládají z trysky, ohřívacího tělíska a snímače teploty¹. Často je součástí hlavy i extrudér², zajišťující posuv materiálu. Ten může být umístěn i mimo hlavu a poté je tiskové vlákno dopravováno k trysce skrz bowden³. Tiskových hlav je nepřehledné množství druhů, všechny ale mají společné charakteristické rysy znázorněné na schématu (viz Obr. 9). Kvůli zajištění dobrého průchodu materiálu tryskou je nutné zajistit dostatečné chlazení nad tryskou. Při nedostatečném chlazení by docházelo k tavení materiálu mimo trysku. To by způsobovalo další problémy. Pro správnou funkci tiskárny musí být hlava schopná dodávat plynule dostatečné množství roztaveného materiálu.

¹ pro tyto tři součásti dohromady se často využívá anglický název hot end (volně přeloženo horký konec), tento název bude dále využíván

² extrudér – z anglického extrude – protlačit, část tiskárny zajišťující pohyb drátu materiálu do trysky

³ bowden – flexibilní, dlouhá, dutá trubička menších průměrů sloužící pro vedení ovládacích lanek (např. mechanické brzdy na kole) nebo jako zde k vedení materiálu na delší vzdálenost (řádově desítky cm)

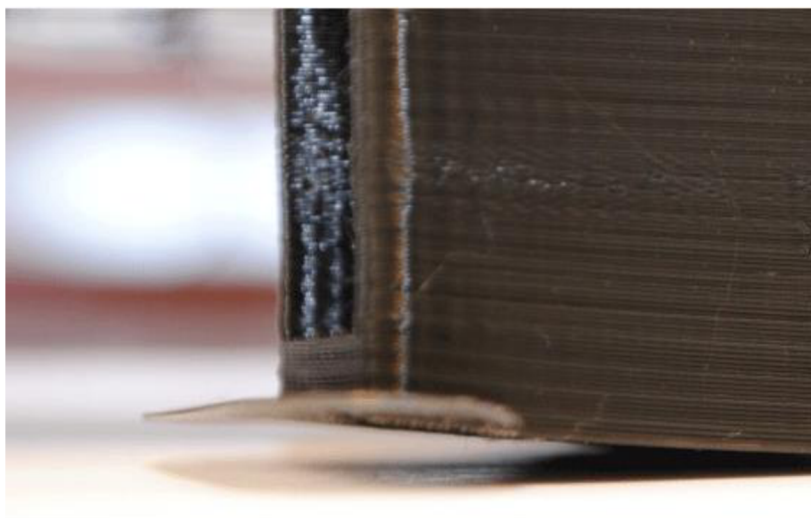


Obr. 9 Schéma hot endu.

VYHŘÍVANÁ PODLOŽKA

V tomto odstavci je čerpáno ze zdroje [15].

Z podstaty metody vyplývá, že při tisku vzniká teplo. To se následně akumuluje ve vytisknuté součásti. Při tisku větších dílů dochází k nerovnoměrnému chladnutí součásti, způsobující deformace. Ty se projevují především smršťováním dílu a následnému oddělení od podložky (Obr. 10). V určitých případech může dojít ke kompletnímu oddělení modelu, který se přilepí na trysku a tisk musí být přerušen (Obr. 11).



Obr. 10 Oddělení dílu od podložky[18].



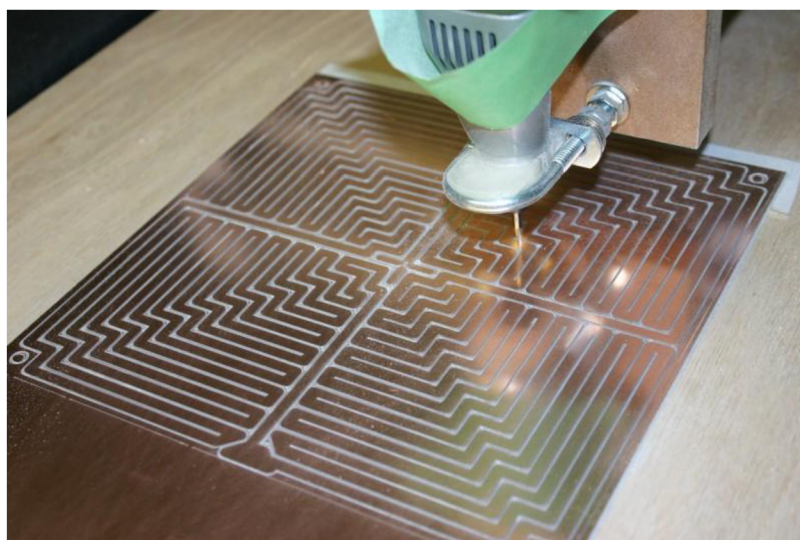
Pro zamezení těchto deformací se využívá zpomalení chladnutí pomocí řízeného chladnutí součástí pomocí vyhříváných komor⁴ či vyhříváných podložek. Tisk některých materiálů, např. ABS se bez vyhřívání podložky prakticky nedá realizovat.



Obr. 11 Následek přilepení modelu k trysce[18].

Dominantním typem používaných podložek je PCB⁵ vyhřívána deska, což je plošný spoj zapojený do elektrického obvodu. Průchodem proudu skrz vodivou cestu se generuje teplo. Netiskne se přímo na plošný spoj, ale většinou na skleněné či hliníkové desky uchycené na PCB desce.

Existují i jiné typy desek (vyhřívání pomocí topných tělísek, silikonový PCB, atd.), ale i v komerční sféře uvedený typ převažuje.



Obr. 12 Vyhřívána podložka typu PCB [25].

⁴ tato technologie je patentována firmou Stratasys[21] a její využití je velmi limitováno

⁵ PCB – Printed circuit board je deska plošných spojů (DPS)

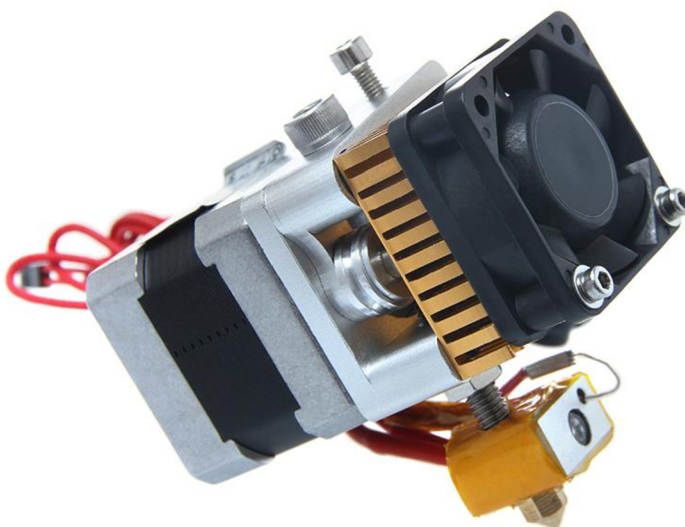


3 SOUČÁSTI PRO PŘESTAVBU FRÉZKY

3.1 TISKOVÁ HLAVA

Tisková hlava se jako celek skládá z 2 hlavních součástí – hot endu a extrudéru. Obě se musí volit s ohledem na několik parametrů.

Při volbě správného hot endu se musí vzít v potaz požadavky na výsledný tisk součástí. V případě nutnosti vysoké přesnosti se volí tiskové hlavy s tryskami s malými otvory a umožňující použití drátu s malým průměrem (1,75 mm). Pro požadavek na vysokou rychlost tisku bývá použit drát s velkým průměrem (3 mm) a trysky s většími otvory. Průměry otvorů u trysek se pohybují od 0,15 mm do 0,8 mm[22]. V řadě hot endů jsou trysky vyměnitelné a je k dispozici celá řada trysek pro maximální využití potenciálu tiskárny. Rozumný kompromis mezi rychlostí a přesností je tryska o průměru 0,4 mm, která je často používána i u komerčních tiskáren [19].



Obr. 13 Tisková hlava MK8 [23].

Dále musí být hot end dostatečně nadimenzován po tepelné stránce, aby zajistil dostatečný ohřev materiálu a zároveň bylo zajištěno dobré chlazení materiálu vstupujícího do hot endu.

Extrudérů je velké množství a při jejich volbě se musí brát ohled na použitý hot end (a samozřejmě i naopak). Základní částí je krokový motor, jednoduché vedení pro materiál (někdy není potřeba) a člen zajišťující posun drátu (často ozubené kolo). Podle typu hot endu a tiskárny je možnost volit extrudér připevněný k tiskové hlavě nebo je umístěn na rámu tiskárny a drát je poté dopravován k hlavě pomocí bowdenu. Dále je možnost výběru mezi součásti extrudéru vyrobenými z kovu či vytisknutými na 3D tiskárně.

V případě přestavby frézky na tiskárnu je potřeba volit extrudér a hlavu jako jeden celek, protože kvůli velkým vzdálenostem mezi hlavou a rámem stroje by vznikly příliš velké třecí odpory v bowdenu a dávkování materiálu by nebylo plynulé. V rámci kompaktnosti a zjednodušení následné montáže byla zvolena hlava MK8 od výrobce Geeetech⁶ [23]. Jedná se o kopii oblíbeného modelu MK8 od firmy Makerbot, který již bohužel není k dostání na trhu.

Jde o celokovovou konstrukci obsahující všechny důležité části. Průměr drátu byl zvolen 1,75 mm. Tryska má průměr 0,4 mm a je možnost ji vyměnit za jiné trysky. Ty je však třeba v případě potřeby dokoupit zvlášť. Extrudér se skládá z krokového motoru, ozubeného kolečka

⁶ společnost Geeetech se skutečně píše se třemi e



pro posuv materiálu, hliníkového chladiče a ventilátoru. K extrudéru je připojena tryska obsahující ohřívací tělísko, trysku a teplotní čidlo.

KROKOVÝ MOTOR

Jedná se typ s označením 42SHD0217-24B od společnosti Geeetech. Základní údaje jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Technická data krokového motoru.

Počet fází [-]	2
Úhel kroku [°]	1,8
Jmenovité napětí [V]	3,75
Jmenovitý proud [A]	1,5
Krouticí moment [Nm]	0,5

OHŘÍVACÍ TĚLÍSKO

Tělísko má výkon 40W a je konstruováno na napětí 24V. Pro kvalitní tisk je třeba regulovat jeho výkon a tím i výslednou teplotu hot endu.

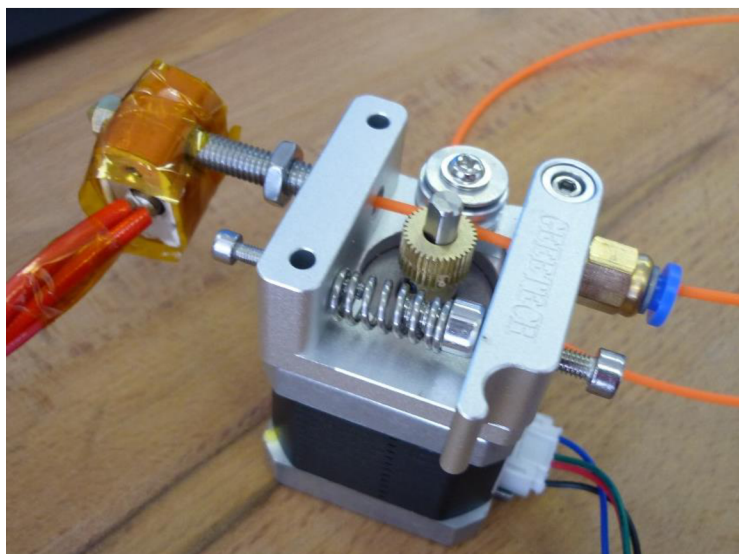
ČIDLO

Pro snímání teploty byl již výrobcem dodán zabudovaný termistor v hlavě. Jedná se termistor typu NTC, tudíž s vzrůstající teplotou klesá jeho odpor. Pro správné odečítání teploty je nutné znát jeho charakteristiku, viz Tab. 2.

Tab. 2 Charakteristické údaje NTC termistoru hot endu.

R_{25} [k Ω]	100
$\beta_{100/200}$ [K]	4317

R_{25} je hodnota odporu termistoru při teplotě 25°C a $\beta_{100/200}$ je charakteristická hodnota termistoru měřená pro teplotní rozsah 100 - 200°C.



Obr. 14 Sestava extrudéru.



3.2 VYHŘÍVANÁ PODLOŽKA

Vyhřívána podložka je nezbytnou součástí, každé tiskárny typu FDM. Jinak tomu není ani u přestavby frézky. Gravírovací frézka má však mnohem větší rozměry než běžné tiskárny. Kvůli tomu zde nastává specifická situace, kdy máme k dispozici velkou pracovní plochu (500×500) mm² a na trhu jsou k dispozici prakticky pouze podložky o rozměrech (200×200) mm². V případě potřeby zachovat velkou pracovní plochu by bylo třeba vyrobit podložku vlastní. To značně přesahuje možnosti této práce, jelikož je potřeba nejprve navrhnout vhodný systém ohřevu, poté jej spočítat a dále experimentálně ověřit. Musí být dodržena rovnoměrnost ohřevu podložky. U podložky velkých rozměrů navíc rapidně stoupá požadavek na výkon napájení a bylo by potřeba použít další zdroj.

Z těchto důvodů byla zvolena standartní vyhřívána podložka typu PCB. Na trhu jich je obrovské množství, ale všechny fungují na stejném principu a mají velmi podobné prvky⁷. Podložky jsou většinou vyrobené pro napětí 12 V i 24 V, ale jejich výkon je při obou zapojeních přibližně stejný. To je způsobeno odlišným zapojením PCB. Řízením těchto napětí je možné regulovat teplotu desky a pro kvalitní tisk je to i nezbytné. O hlídání teploty se stará termistor B57164K0104K000 (viz Tab. 3).



Obr. 15 Podložka MK2B [26].

Pro frézku byla tedy zvolena podložka o rozměrech (200×200) mm². Jedná se typ MK2B (Obr. 15), který umožňuje zapojení na 12 V i 24 V. Je třeba na desku připevnit skleněnou, případně hliníkovou desku, na kterou bude stavěn samotný model.

Tab. 3 Charakteristické údaje NTC termistoru podložky

R₂₅ [kΩ]	100
β_{25/100} [K]	4600

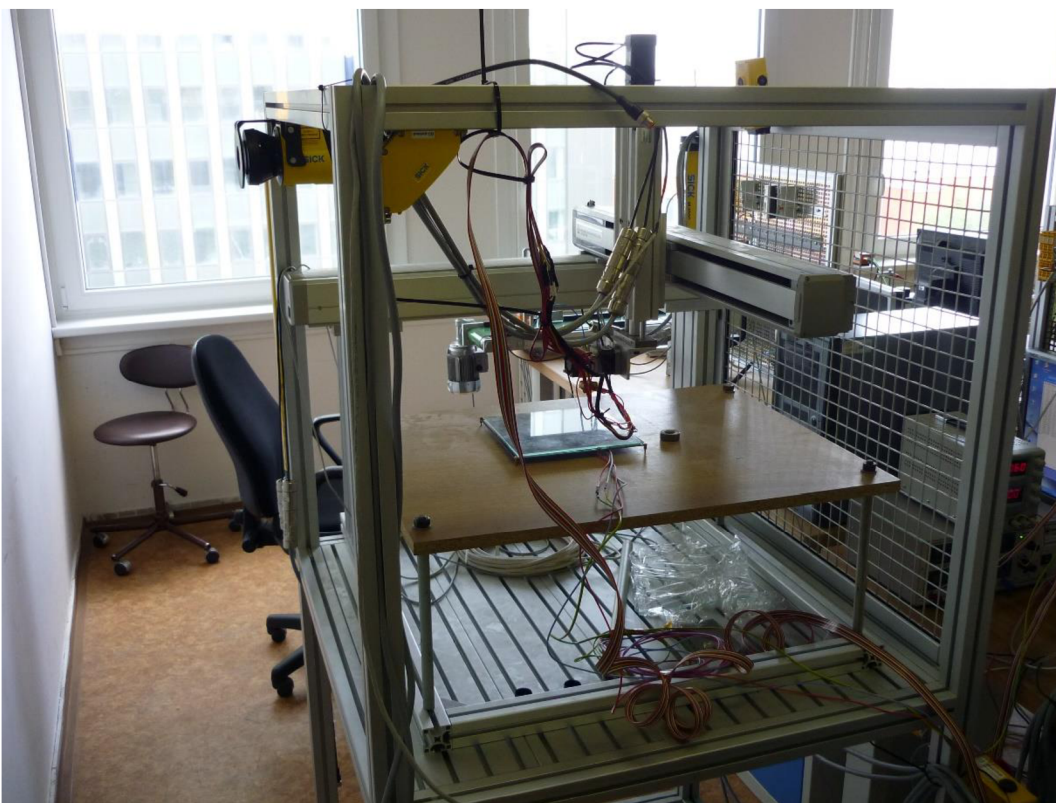
⁷ v podstatě všechny dostupné podložky na trhu jsou napodobeninami podložky, vytvořené na základě volně šiřitelného návrhu Josefa Průšy, českého průkopníka 3D tisku, z roku 2010 [24]



3.3 GRAVÍROVACÍ FRÉZKA

Základem pro přestavbu tiskárny je gravírovací frézka. Vznikla úpravou laboratorního manipulátoru. Rám stroje je tvořen čtvercovými hliníkovými profily 45×45 mm. Lineární posuvy jsou tvořeny systémem od společnosti SMC, obsahujícím lineární vedení a posuvový šroub. Posuvy jsou konstruovány tak, že nástroj se může pohybovat ve 3 osách. Pracovní prostor má rozměr přibližně (500×500) mm². Pohony vedení zajišťují servomotory od společnosti Beckhoff. Řízení stroje je realizováno pomocí průmyslového počítače C6925-0000 od firmy Beckhoff a řízeno pomocí softwaru TwinCAT.

Frézku je třeba upravit pro upevnění vyhřívané podložky a tiskové hlavy. Tyto úlohy ovšem nejsou v práci řešeny.



Obr. 16 Gravírovací frézka, na fotce při přestavbě.

3.4 DOSTUPNÝ HARDWARE PRŮMYSLOVÉHO POČÍTAČE

Pro řízení je třeba zapojit příslušné součástky do terminálů průmyslového počítače. Zde následuje stručný přehled použitých modulů.

3.4.1 PC BECKHOFF C6925-0000

O řízení celého systému se stará kompaktní průmyslový počítač C6925-0000. Obsahuje procesor Intel Celeron 1 GHz a 256MB RAM-DDR. Konektorová výbava zahrnuje video DVI konektor, 2 síťové konektory sloužící pro komunikaci počítače, 4 USB porty, sériový port a napájecí konektor. PC běží na napětí 24 V stejně jako celý systém. Použitým operačním systémem je Windows XP Embedded nainstalovaný na MicroSD kartě [32].



3.4.2 ETHERCAT BUS COUPLER

Pro propojení počítače a jednotlivých terminálů slouží modul EtherCAT Bus Coupler BK1120. Komunikuje v reálném čase prostřednictvím ethernetového kabelu. Je to prvek, propojující dalšími kartami tvořícími modulární systém K-bus. Je možno připojit 1 až 64 karet a navíc jednu kartu ukončovací [32]. Je možno využít digitální a analogové vstupy, výstupy apod. Použité karty jsou popsány dále.



Obr. 17 Terminál KL2541 [29] a terminál Bus Coupler [33].

TERMINÁL PRO ŘÍZENÍ KROKOVÉHO MOTORU

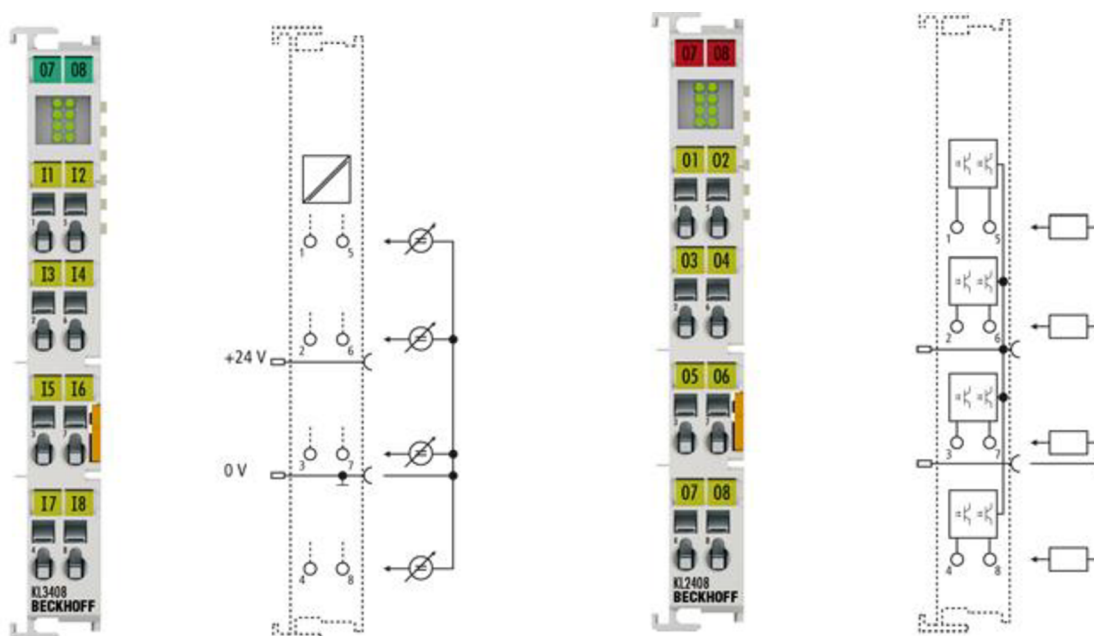
Modul pro řízení krokového motoru KL2541 je určený pro motory středního výkonu. Výstupní napětí a proud jsou řízeny pulsní šířkovou modulací (PWM). Terminál (Obr. 17 vlevo) je připojen ke Coupleru a do něj je přivedeno potřebné napětí pro pohon krokového motoru (vstupy 4' a 8'). Jednotlivé vývody cívek jsou zapojeny do vstupů 1', 5' a 2', 6' [29].

ANALOGOVÝ VSTUP

Pro snímání teploty je třeba zjišťovat hodnotu napětí na termistoru. Pro tento účel je možno použít terminál KL3408 (Obr. 18 vlevo), který obsahuje 8 analogových vstupů s rozsahem ± 10 V. Napětí je digitalizováno s rozlišením 16 bitů [31].

DIGITÁLNÍ VÝSTUP

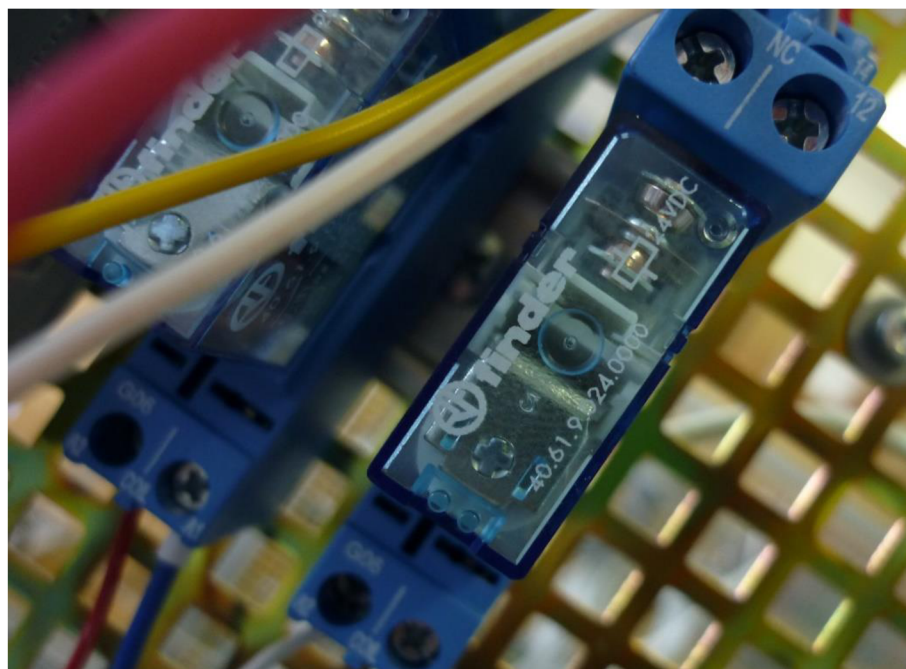
Ovládání ohřevu je realizováno pomocí relé, ovládaných pomocí signálu z PC. Dále je potřeba ovládat chladicí větrák extrudéru. Proto je třeba digitálního výstupu. Karta KL2408 obsahuje 8 výstupů s napětím 24 V [30].



Obr. 18 Terminál KL3408[30] a karta KL2408 [31].

ELEKTROMAGNETICKÉ RELÉ

Pro ovládání ohřevu jsou potřeba 2 relé. K dispozici jsou relé 40.61.9 v modulu 95.05 pro uchycení do lišty od firmy Finder. Ovládací cívka je napájena napětím o velikosti 24 V. Relé je pro přenášený výkon dostatečné.



Obr. 19 Relé Finder 40.61.9.



4 ROZBOR PRAKTICKÉ ČÁSTI

Výstupem této práce by mělo být fungující řízení posuvu tiskové struny, ohřevu podložky a hot endu. Pro řízení je využit průmyslový počítač od firmy Beckhoff. Tato bakalářská práce navazuje na diplomovou práci Ing. Daniela Bosáka 3D gravírovací frézka [32], v které byl vytvořen program na ovládání frézky a nahrávání a spouštění NC-kódu⁸. Tato diplomová práce slouží jako vzor a návod pro tvorbu ovládacích programů. Samotný řídicí program frézky je funkční a nemusí se nijak zásadně předělávat. Pouze musí být modifikován a rozšířen pro možnost přidání ovládání osy extrudéru a regulaci teplot.

⁸ kód sloužící k ovládání NC řízených strojů. Pomocí jednoduchých parametrů nastavuje posuv v osách, rychlosti posuvů, otáčky vřetene, zapínání chlazení apod.

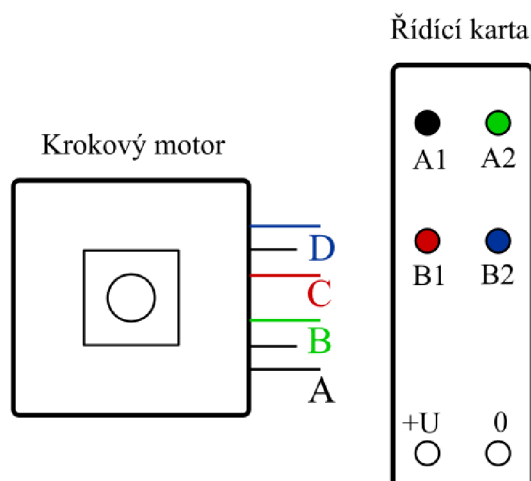


5 ŘÍZENÍ POSUVU STRUNY

Přesné dávkování materiálu do trysky je podmínkou pro přesný a kvalitní tisk. Nastavení správných materiálů posunu drátu do extrudéru je složitá práce, vyžadující čas a materiál na experimentální zjišťování chování materiálu. Tyto poznatky byly aplikovány do různých softwarů, které slouží k „nařezání“ modelu do vrstev. Při volbě nastavení můžeme specifikovat charakteristiky vytištěného modelu – tloušťku stěny, hustotu výplně, nastavení podpor, atd. Výstupem „řezacích programů“ je NC-kód, který je poté použit pro ovládání tiskárny. Kromě nastavení souřadnic X, Y, Z a rychlosti posuvu os, je zde i vygenerován parametr pro absolutní, případně relativní délkový posun tiskové struny, který je nutno naprogramovat pro řízení krokového motoru.

5.1 KROKOVÝ MOTOR

Pohonem extrudéru je krokový motor, který je potřeba nejprve připojit do ovládacího terminálu KL2541. K tomu slouží 4 vodiče - napájení příslušných ovládacích cívek motoru. Konkrétní zapojení do terminálu je uvedeno na schématu, viz Obr. 20.



Obr. 20 Schéma zapojení krokového motoru.

Na napájecí konektory je přivedeno napětí 10 V z externího zdroje. Použitý krokový motor má jmenovité napětí 3,75 V, které bohužel není podporováno řídicí kartou. Pro zachování přibližně stejného výkonu byl v nastavení karty (Obr. 21) omezen maximální proud na cívce na 0,5 A.



Pos.: 5 Channel: 1 Firmware: Version 3 D
Type: KL2541-0000

Settings 1 | Settings 2 | Current table | Calculations | Commissioning

Operation mode
speed, direct
 ramps linear ramps exponential

General

- Watchdog timer active
- Auto start function active
- Auto stop function active
- Deceleration active
- Latch event deletes counter
- Store multiple latch values
- Reverse digital input 1 for break contacts
- Reverse digital input 2 for break contacts
- Latching of position register
- Show idle status
- Reverse position feedback
- Encoder position feedback

Register values

- maximum coil current A: 30 %
- maximum coil current B: 30 %
- number of latch values: 20
- minimum speed: 5
- maximum speed: 1024
- maximum acceleration: 1023
- maximum deceleration: 2047
- maximum emergency acceleration: 2047
- acceleration threshold: 1023
- load angle threshold: 7
- coil current, a > a (th): 30 %
- coil current, a <= a (th): 30 %
- coil current, v = 0 (automatic): 15 %
- coil current, v = 0 (manual): 15 %
- number of impulses per revolution: 1
- number of motor fullsteps: 200
- number of encoder increments: 4000

Obr. 21 Nastavení parametrů krokového motoru v programu KS2000.

Dále bylo třeba nastavit správné kinematické a dynamické parametry motoru (Obr. 22 a 23). Jmenovitá rychlost byla po krátkém zkoušení nastavena na 25 mm/s. Maximální rychlost na 30 mm/s. Zrychlení byla nastavena nepřímou metodou. Doba, za jakou má krokový motor dosáhnout zvolené rychlosti, byla stanovena na 0,1s. Důležitým parametrem je tzv. Scaling Factor – jedná se o přepočtový součinitel jednoho kroku motoru na jednotku délky posuvu. Pohon má krok 1,8 ° odpovídající 200 krokům na otáčku. Řídící jednotka navíc pro větší přesnost řízení každý krok rozdělí na 64 mikrokroků. Výsledný vztah tedy je:

$$SF = \frac{\pi \cdot d_p}{64 \cdot k} \quad (5.1)$$

$$SF = \frac{\pi \cdot 11}{64 \cdot 200}$$

$$SF = 0.00269981 \text{ mm/krok}$$

d_p	[mm]	průměr podavače extrudéru
k	-	počet kroků na otáčku
SF	[mm/krok]	Scaling Factor



	Parameter	Value	Type	Unit
-	Velocities:			
	Reference Velocity	25.0	F	mm/s
	Maximum Velocity	30.0	F	mm/s
	Manual Velocity (Fast)	20.0	F	mm/s
	Manual Velocity (Slow)	10.0	F	mm/s
	Calibration Velocity (towards plc cam)	75.0	F	mm/s
	Calibration Velocity (off plc cam)	75.0	F	mm/s
	Jog Increment (Forward)	5.0	F	mm
	Jog Increment (Backward)	5.0	F	mm

Obr. 22 Nastavení kinematických parametrů.

Indirect by Acceleration Time


Maximum Velocity (V max.): mm/s

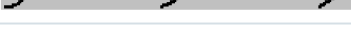
Acceleration Time: s

Deceleration Time: as above s

Acceleration Characteristic: smooth stiff

Deceleration Characteristic: smooth stiff

a (t): 

v (t): 

Direct

Acceleration: mm/s²

Deceleration: as above mm/s²

Jerk: mm/s³

Obr. 23 Nastavení dynamických parametrů.

	Parameter	Value	Type	Unit
-	Monitoring:			
	Position Lag Monitoring	TRUE	B	
	Maximum Position Lag Value	5.0	F	mm
	Maximum Position Lag Filter Time	0.02	F	s
-	Position Control Loop:			
	Position control: Proportional Factor Kv	1.5	F	mm/s/mm
	Feedforward Velocity: Pre-Control Weighting [0.0 ... 1.0]	0.05	F	
+	Other Settings:			

Obr. 24 Nastavení regulátoru motoru.

V nastavení regulátoru motoru bylo třeba změnit hodnotu „Feedforward Velocity“ na 0,05. Bez této úpravy se motor po startu a při dotáčení točil s nesprávnými kroky. Po testování byla zvednuta hodnota „Proportional Factor Kv“ na 1,5. To zpřesnilo najíždění polohy. Po provedení těchto nastavení je již motor připraven k použití a je možné jej ovládat pomocí PLC programu.



5.2 ÚPRAVA PLC PROGRAMU

Program pro řízení frézky je vhodný i pro použití 3D tiskárny. Obsahuje všechny potřebné knihovny a funkční bloky potřebné k řízení posuvu drátu. Je potřeba pouze doplnit řízení a ovládání osy extrudéru. Celkově se tato úprava skládá z těchto kroků:

1. Definování lokálních a globálních proměnných, pro osu extrudéru.
2. Doplnění programů pro zapnutí a restart osy extrudéru.
3. Zavolání funkčního bloku pro ruční posuv extrudéru.
4. Změna knihovny pro vytváření 3D interpolační skupiny pro možnost přidání další osy.
5. Čtení aktuální polohy extrudéru a nulování osy.
6. Přidání ovládacích prvků do vizualizace.

Všechny změny v programu jsou označeny komentářem pro snadné rozpoznání. Pro lepší představu jak program vypadá, je přiloženo několik ukázek změn v kódu.

```
0001 (*-----DELKARACNI CAST-----*)
0002
0003 PROGRAM Axis_Power
0004 (*Program sloužící ke spuštění os. Dochází k povolení pohybu
0005 v osách na základě globální proměnné a k nastavení override os.*)
0006
0007 VAR
0008   fbPower_X: MC_Power;           (*funkční blok spuštění osy X*)
0009   fbPower_Y: MC_Power;           (*funkční blok spuštění osy Y*)
0010   fbPower_Z: MC_Power;           (*funkční blok spuštění osy Z*)
0011
0012 (*3D Tiskarna*)
0013   fbPower_Ex:MC_Power;           (*funkční blok spuštění osy extrudéru*)
0014
0037
0038 (*3D Tiskarna*)
0039
0040 fbPower_Ex(
0041   Enable:= Axes_Execute,
0042   Enable_Positive:= Axes_Execute,
0043   Enable_Negative:= Axes_Execute,
0044   Override:= ItpGetOverridePercent( Channel1_1_FromPLC),
0045   AxisRefIn:= Axis_Extruder_ToPlc,
0046   AxisRefOut:= Axis_Extruder_ToNc,
0047   Status=> ,
0048   Error=> ,
0049   ErrorID=>);
0050
```

Obr. 25 Program pro aktivování osy.

```
0022
0023 (*3D Tiskarna*)
0024 MOVING_Extruder:Move_XYZ; (*FB pro rucni pohyb v ose Z*)
0025 END_VAR
0026
0084
0085 (*3D Tiskarna*)
0086 MOVING_Extruder(
0087   Rapid_Positioning:= Rapid_Positioning,
0088   Move_plus:= Move_Extruder_plus,
0089   Move_minus:= Move_Extruder_minus,
0090   Axis_ToPlc:= Axis_Extruder_ToPlc,
0091   Axis_ToNc:= Axis_Extruder_ToNc);
0092
0093
0094   Axis_Extruder_ToPlc:= Axis_Extruder_ToPlc,           (*3D Tiskarna*)
0095   Axis_Extruder_ToNc:= Axis_Extruder_ToNc,           (*3D Tiskarna*)
0096
0097
```

Obr. 26 Ruční pohyb extrudéru.



POUs	0048	
Axis_Power (PRG)	0049	(*3D tiskarna*)
Axis_Reset (PRG)	0050	Read_Actual_Position_Extruder:MC_ReadActualPosition;
Coordinate (PRG)	0051	Zero_Actual_Position_Extruder:MC_SetActualPosition;
Homing_XYZ (FB)	0052	
MAIN (PRG)	0053	
Move_XYZ (FB)	0054	END_VAR
NC_Interpreter (FB)	0121	
Temp_Ctrl_HeatedBed (PRG)	0122	(*3D Tiskarna*)
Temp_Ctrl_HotEnd (PRG)	0123	
Temperature (PRG)	0124	Read_Actual_Position_Extruder(
Visualisation_control (PRG)	0125	Enable:= TRUE,
Zeros_Tools (PRG)	0126	Axis:= Axis_Extruder_ToPlc,
	0127	Done=> ,
	0128	Error=> ,
	0129	ErrorID=> ,
	0130	Position=> Actual_Position_Extruder);
	0131	
	0132	Zero_Actual_Position_Extruder(
	0133	
	0134	
	0135	Execute:=Set_Zero_Actual_Position_Extruder,
	0136	Axis:=Axis_Extruder_ToPlc,
	0137	Position:=0,
	0138	

Obr. 27 Čtení aktuální polohy a nulování pozice osy.

The screenshot displays a CNC control interface with the following components:

- SOUŘADNICE (Coordinates):** A panel showing the current position of the axes: X (221.14), Y (394.84), Z (132.45), and Ex (0.00). A "Zero Ex" button is located next to the Ex coordinate.
- OSY (Axes):** A panel with buttons for "SPUSTIT" (Start), "READY" (green indicator), "RESET", and "REF." (Reference). Below these are small red X, Y, and Z indicators.
- POSUVY (Movements):** A grid of buttons for moving the axes: "+Ex", "+Y", "+Z", "-X", "Rychlo posuv" (Fast move), "+X", "-Z", "-Y", and "-Ex".
- OVERVERRIDE [%]:** A horizontal slider at the bottom, ranging from 0 to 120, with a current value of approximately 100%.

Obr. 28 Upravená vizualizace

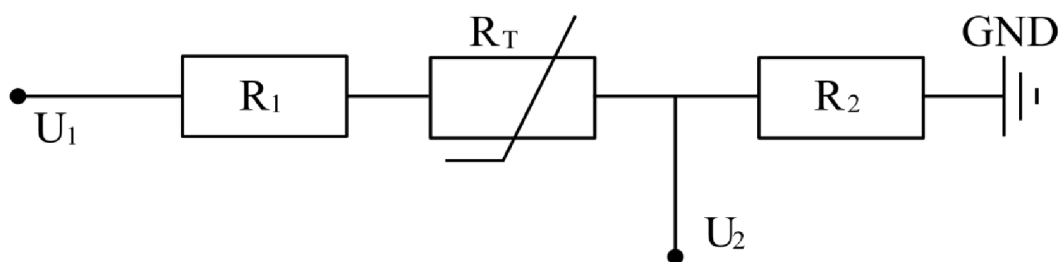


6 ŘÍZENÍ OHŘEVU PODLOŽKY A HLAVY

Ovládání teploty je důležité pro přesný a bezproblémový tisk. Struny různých materiálů, dokonce i různých výrobců si žádají jiné nastavení a hlídání teploty. V následujících odstavcích je popsán postup při zjišťování a řízení teploty vyhřívané podložky a tiskové hlavy.

6.1 SLEDOVÁNÍ TEPLoty

Důležitou částí regulace teploty je sledování aktuální teploty. Pro zjišťování teploty jsou použity termistory⁹. Bohužel bez potřebného převodníku odporu na napětí není možné je zapojit do karty analogového vstupu. Změna odporu termistoru se musí převést na změnu napětí. Pro levné a jednoduché řešení přestavby byl použit napěťový dělič, viz Obr. 29. Ten vytvoří potřebné napětí, které je závislé na odporu termistoru a tudíž i teplotě termistoru.



Obr. 29 Napěťový dělič (uprostřed je zapojen měřící termistor).

GND	-	uzemnění
R ₁ , R ₂	[Ω]	rezistory
R _T	[Ω]	odpor termistoru
U ₁	[V]	napětí zdroje
U ₂	[V]	napětí na výstupu

Sledované napětí U₂ je závislé na napětí U₁, odporech R₁, R₂ a odporu termistoru. Nejprve je třeba zvolit vhodné hodnoty rezistorů. Analogový vstup KL3408 je konstruovaný na maximální napětí 10 V. Zdroj použitý u PLC je 24 V. Je nutné omezit napětí vstupující do výstupu předřadným rezistorem R₁. Potřebné hodnoty odporů jsou odvozeny z Ohmova zákona (odpor termistoru je zanedbán¹⁰), za U₂ dosadíme max. hodnotu napětí na analogovém vstupu.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (6.1)$$
$$\frac{24}{10} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Z tohoto poměru byly následně určeny vhodné rezistory o normalizovaných hodnotách R₁ = 22 kΩ a R₂ = 15 kΩ. Tyto hodnoty odporů vytváří na výstupu napětí U₂ = 9,73 V, tudíž jsou hodnoty zvoleny správně. Vyšší hodnota odporů je nutná, aby proud protékající obvodem byl co nejnižší a neohříval termistor. Zbytečný ohřev termistoru by zkreslil sledování teploty.

⁹ termistor – elektrotechnická součástka, jejíž odpor je závislý na teplotě.

¹⁰ kvůli simulaci nejnižší možné hodnoty odporu při maximální teplotě termistoru.



Výpočtový vztah pro výsledný odpor na termistoru R_T je uveden v rovnici 6.2 [27].

$$R_T = \frac{U_1 \cdot R_2}{U_2} - R_1 - R_2 \quad (6.2)$$

Pro určení správné teploty z odporu termistoru R_T je třeba dosadit do rovnic 6.3 a 6.4 [28].

$$r_\infty = R_0 \cdot e^{-\frac{\beta}{T_0}} \quad (6.3)$$

$$T = \frac{\beta}{\ln\left(\frac{R_T}{r_\infty}\right)} \quad (6.4)$$

R_0	[Ω]	odpor termistoru při jmenovité teplotě
r_∞	[Ω]	výpočtová konstanta
T	[K]	teplota termistoru
T_0	[K]	jmenovitá teplota
β	[K]	konstanta termistoru

Zapojení obvodu je realizováno pomocí analogového vstupu KL3408. Do zdírek Input 1 a 2 jdou přivedeny příslušné vodiče U_2 (dle Obr. 15) od každého z termistorů. Vodiče s napětím 24V (U_1) a uzemnění (GND) jsou napojeny do příslušných otvorů na elektrickém zdroji.

6.2 REGULACE TEPLoty

Vzhledem k vysokým proudům potřebným k napájení topných součástí, není možné přímo regulovat výkon ohřivačů. Regulace probíhá za pomoci elektromagnetických relé s řízeným zapínáním a vypínáním přívodu elektrické energie do obvodů. Podložka i hot end se musí řídit samostatně, nicméně principiálně jde o stejné zapojení. Proto jsou další kroky popsány obecně.

6.3 REALIZACE V PLC PROGRAMU

Po připojení termistorů, ohřivacích součástí na zdroj elektrického proudu, resp. do příslušných vstupů a relé, je zapotřebí napsat řídicí program. Ten musí obsahovat podprogramy pro sledování teploty a pro řízení teploty. Dále obsahuje i grafickou vizualizaci pro zobrazování aktuální teploty a nastavování požadované teploty.

SLEDOVÁNÍ TEPLoty

Výstupem karty analogového vstupu KL3408 je 16 bitový signál. Ten zahrnuje rozmezí $\pm 10V$. Tento signál je třeba převést na hodnotu reálného napětí, pomocí jednoduchého příkazu. Poté můžeme zapsat vzorce 6.2, 6.3, 6.4 pro zjištění teploty. Vzorce byli lehce modifikovány pro možnost definování a výstupu proměnných ve stupních Celsia.

Při zkoušce programu se objevilo několik problémů, zamezující správnému výpočtu. Bylo potřeba tyto chyby odstranit.

Napětí U_2 při spuštění programu má nulovou hodnotu a po dosazení do dalších vzorců došlo k dělení 0, které program interpretoval jako chybu. Tato chyba byla odstraněna pomocí přičtení hodnoty 1×10^{-6} k hodnotě napětí U_2 . To způsobí chybu teploty pouze v řádu desetin procenta, tudíž výsledek je prakticky neovlivněn.



Dalším problémem bylo nepřesné snímání při vyšších teplotách hot endu. Přibližně od 150 °C přestal výpočetní algoritmus zvyšovat teplotu, ačkoliv externí teploměr nárůst ukazoval. Experimentálně bylo zjištěno, že hodnota β není správně stanovena a po pokusech byla určena její nová hodnota 3100 K. Ta zajišťuje poměrně přesné měření teploty v okolí 200 °C. Při teplotách výrazně nižších ukazuje vyšší hodnotou o přibližně 20%, ale jelikož pracovní teplota je asi 210 °C, není to problém.

Poslední problém souvisel se zapínáním ohřevu. Při připojení topného tělíska do obvodu poklesla měřená teplota o cca 10 °C. Takto vysoký rozdíl se projevoval hlavně v blízkosti pracovní teploty. To by znemožňovalo její udržení na žádané hodnotě. Tento skok nejspíše způsobil drobný pokles napětí, při těchto teplotách se jedná o desetiny voltů, které zapříčiní nepřesný odečet teploty. Problém by vyřešil silnější a stabilnější zdroj, který však nebyl k dispozici a proto byl použit externí laboratorní zdroj. Po připojení topného tělesa na druhý zdroj problém odezněl.

```
0001 (*Programova Cast*)
0002
0003 (*Prepocet analog. vstupu na napeti*)
0004
0005 U2_HB:=(INT_TO_REAL(VoltageU2_HB))*20/65536;
0006
0007 U2_HE:=(INT_TO_REAL(VoltageU2_HE))*20/65536;
0008
0009
0010 (*Teristor Hot End*)
0011 r_CT_HE:=R0_HE*EXP(-BETA_HE/(T0_HE+273.15)); (*Vypocet konstatny termistoru*)
0012
0013 R_term_HE:=((R2_HE*U1_HE/(U2_HE+0.000001))-R2_HE-R1_HE); (*Vypocet odporu termistoru*)
0014
0015 Temp_Term_HE:=(BETA_HE/LN(R_term_HE/r_CT_HE))-273.15; (*Vypocet teploty termistoru ve °C*)
0016
0017
0018 (*Termistor Heat Bed*)
0019 r_CT_HB:=R0_HB*EXP(-BETA_HB/(T0_HB+273.15)); (*Vypocet konstatny termistoru *)
0020
0021 R_term_HB:=((R2_HB*U1_HB/(U2_HB+0.000001))-R2_HB-R1_HB); (*Vypocet odporu termistoru *)
0022
0023 Temp_Term_HB:=(BETA_HB/LN(R_term_HB/r_CT_HB))-273.15; (*Vypocet teploty termistoru ve °C*)
0024
0025
0026
```

Obr. 30 Ukázka programu pro sledování teploty.

REGULACE TEPLoty HOT ENDU

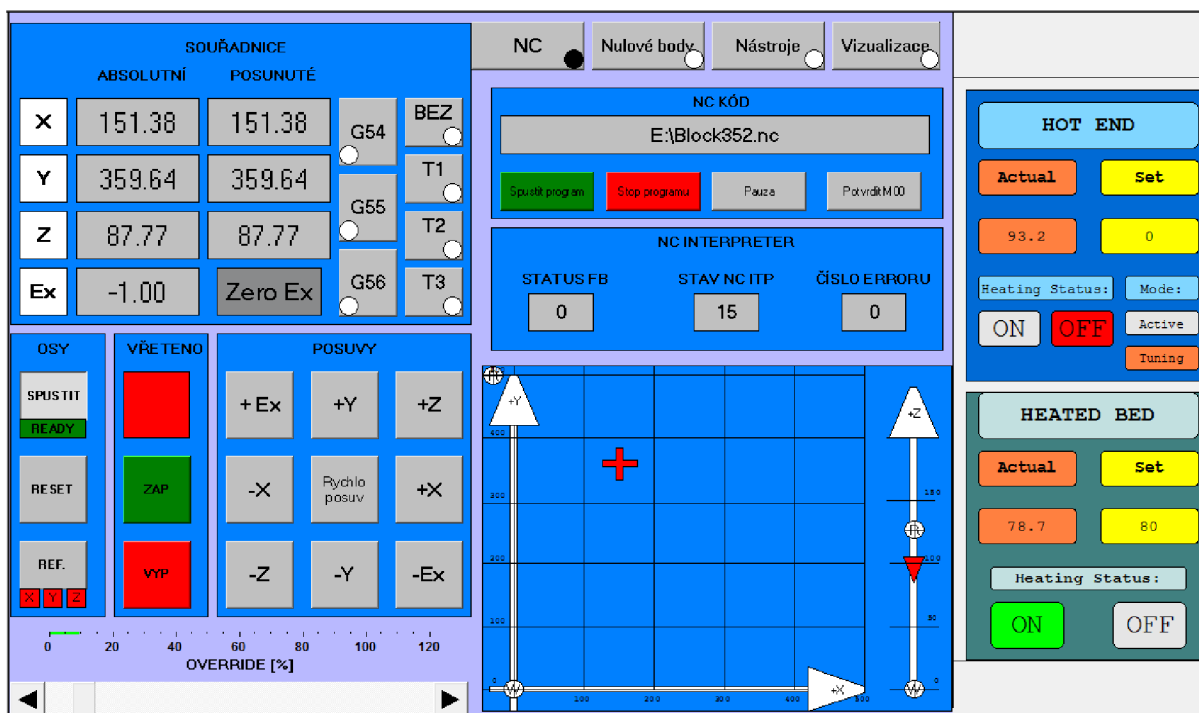
Pro regulování teploty hot endu byl zvolen přednastavený teplotní kontrolér od společnosti Beckhoff. V regulátoru bylo pouze třeba správně nastavit vstupní proměnné a poté upravit několik proměnných. Regulace probíhá pomocí PID regulátoru¹¹.

Kvůli pomalé reakci teploty trysky, je obtížné najít správnou konfiguraci PID pro plně automatické řízení teploty. Proto byla využita možnost automatického ladění regulátoru. Ta se spouští při každém spuštění programu a trvá přibližně 4-5 minut. Po ladění je již regulátor připraven k řízení teploty.

¹¹ spojitý regulátor, obsahující proporcionální, derivační i integrační složku



Dále byl přidán ovládací panel do vizualizace ovládání frézky (Obr. 31). Ten umožňuje sledovat a řídit teplotu pohodlně z grafického prostředí. Panel ukazuje aktuální teplotu, okno pro nastavení požadované teploty, upozornění zda je vyhřívání zapnuté a aktuální mód, v kterém program běží.



Obr. 31 Vizualizace kontrolního panelu s teplotními regulátory.

REGULACE TEPLoty PODLOŽKY

Pro řízení teploty podložky byl využit jednoduchý hysterezní regulátor¹². Vyhřívání i ochlazování podložky je pomalé – z toho důvodu by bylo zbytečné používat složitý PID regulátor a zatěžovat se s laděním jeho parametrů. Hysterezní interval je nastaven na ± 2 °C a tento interval se po testech ukázal jako naprosto dostačující pro udržení vhodné teploty.

Ovládání regulátoru probíhá skrz grafické prostředí vizualizace (obrázek 31 – okno Heated Bed), kde můžeme nastavit požadovanou teplotu a kontrolujeme aktuální teplotu a stav vyhřívání.

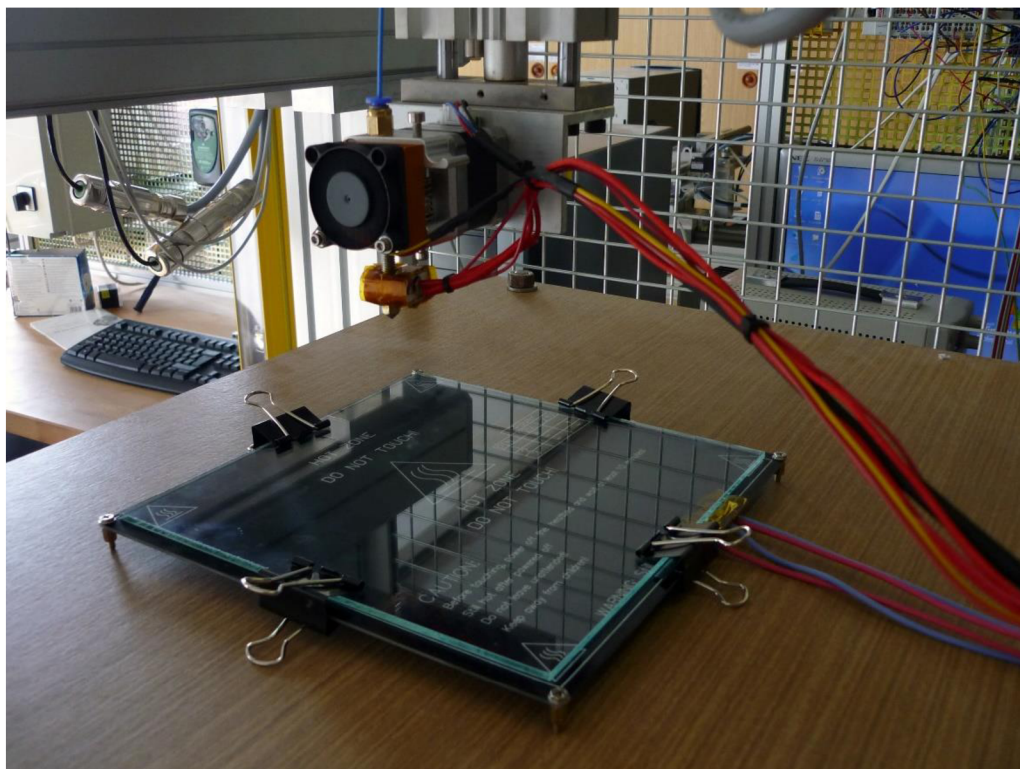
¹² hystereze – řízení požadované hodnoty v závislosti na předchozím stavu systému v určitém intervalu



7 PŘÍPRAVA K TISKU

7.1 INSTALACE KOMPONENT

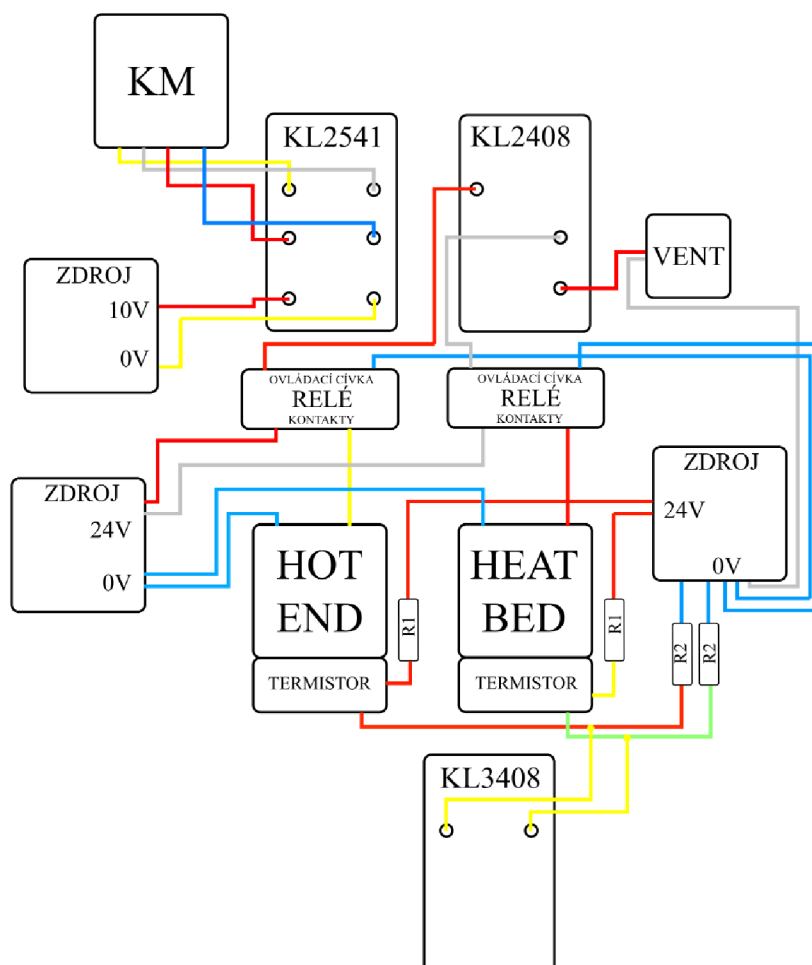
Komponenty tiskárny jsou zatím pouze provizorně připevněny k frézce. Na podložku bylo umístěno sklo, která slouží jako základna pro stavbu modelů. Podložka je umístěna na 4 distančních matkách M3. Tisková hlava je pomocí L profilu uchycena k ose Z. Toto uspořádání umožňuje bezproblémový tisk.



Obr. 32 Nainstalované součásti 3D tiskárny

7.2 PŘEHLED ELEKTROINSTALACE

Důležitým krokem po zprovoznění všech součástí je vytvořit přehlednou elektroinstalaci. Pro případné další úpravy v systému je zde přiloženo schématické zapojení. Detail připojení krokového motoru je na Obr. 20. Barvy čar odpovídají barvám použitých vodičům.



Obr. 33 Schéma elektroinstalace.

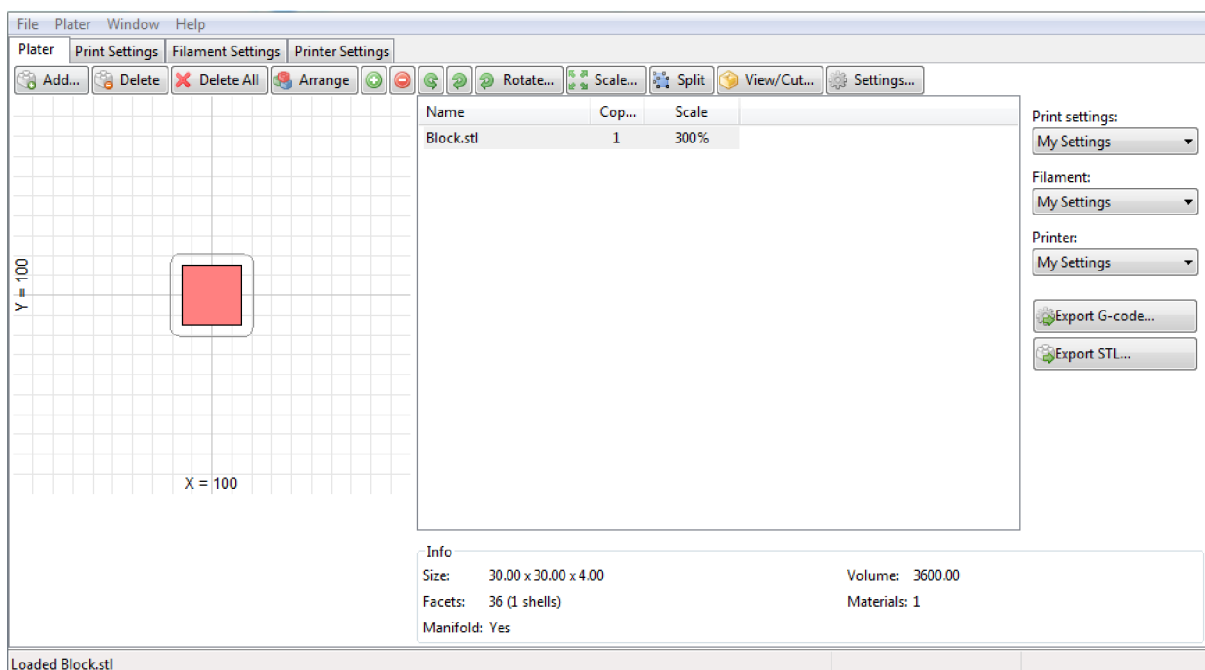
7.3 PŘÍPRAVA KÓDU

Pro tisk modelu je zapotřebí mít G kód s přichystanými posuvy a rychlostmi jednotlivých os. Kód je generován prostřednictvím speciálního softwaru, který model „rozkrájí“ na jednotlivé vrstvy a dle uživatelem definovaných nastavení¹³ provede převod modelu na trasu tisku. Jelikož tyto softwary jsou přizpůsobeny pro jiné typy ovládacího hardware, bude nutné ve vygenerovaném kódu provést několik změn.

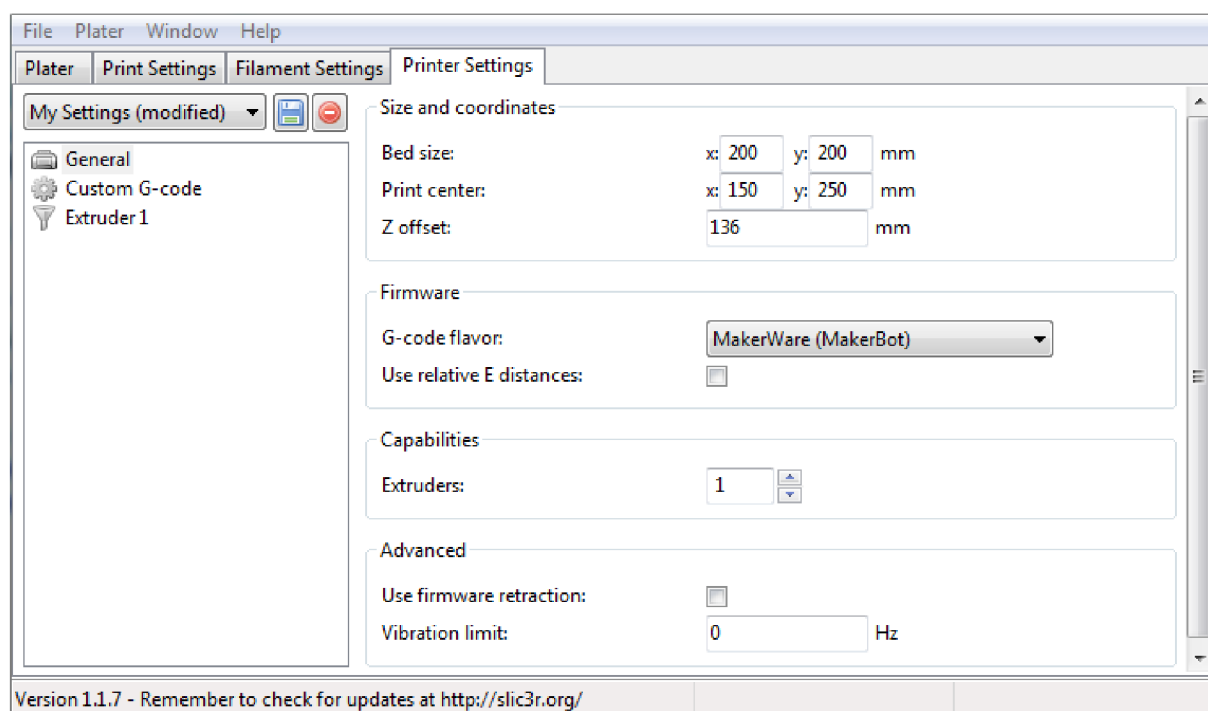
SLIC3R

Tento software pro tvorbu G kódu (NC kódu), je volně dostupný na internetu [34]. Umožňuje nastavení mnoha různých parametrů ovlivňujících kvalitu tisku. Pro tvorbu zkušební kódu není třeba příliš měnit nastavení, pouze je třeba nastavit reálné parametry tiskárny – průměr použité trysky, průměr drátu, rychlosti posuvu a změnit nulový bod souřadného systému. Pro představu jsou přiloženy ukázky z programu (Obr. 34 a 35) i neupravený G kód (Obr. 36).

¹³ možnosti nastavení jsou velké – rychlosti tisku, množství extrudovaného materiálu, forma výplně, nastavení podpěr atd.



Obr. 34 Okno pro načtení a úpravu pozice modelu.



Obr. 35 Nastavení nulového bodu a rozměru podložky.



Neupravený G kód:

```

M127
M104 S205 T0 ; set temperature
G28 ; home all axes
G1 Z5 F5000 ; lift nozzle
M73 P0
G1 F1800.000 E-1.00000
M103 ; extruder off
G1 Z100.400 F6000.000
G1 X131.583 Y229.220 F6000.000
M101 ; extruder on
G1 E0.00000 F1800.000
G1 X133.743 Y228.405 E0.27422 F1080.000
G1 X135.000 Y228.286 E0.42419
G1 X165.000 Y228.286 E3.98715
G1 X167.275 Y228.683 E4.26137

```

Obr. 36 Ukázka G kódu.

G kód obsahuje příkazy, které momentálně nejsou softwarem tiskárny podporovány, proto se musejí odmazat. Dále posun struny, zde charakterizovaný osou E, musí být změněn na parametr „Q1“. Tyto změny se dají jednoduše provést v jakémkoliv textovém editoru.

```

G1 F1800.000 E-1.00000
G1 Z100.400 F6000.000
G1 X131.583 Y229.220 F6000.000
G1 E0.00000 F1800.000
G1 X133.743 Y228.405 Q1=0.27422 F1080.000
G1 X135.000 Y228.286 Q1=0.42419
G1 X165.000 Y228.286 Q1=3.98715
G1 X167.275 Y228.683 Q1=4.26137

```

Obr. 37 Ukázka upraveného G kódu.

Po těchto úpravách je kód připraven k nahrání do paměti programu a spuštění.

7.4 ZKOUŠKA TISKU

Po nastavení základních parametrů a odzkoušení NC kódu, byl vytisknut zkušební vzorek. Model se vytiskl v přijatelné kvalitě, po dalším ladění pohonů a nastavení v programu Slic3r byli vytisknuty vzorky s kvalitou odpovídající i některým komerčním tiskárnám.

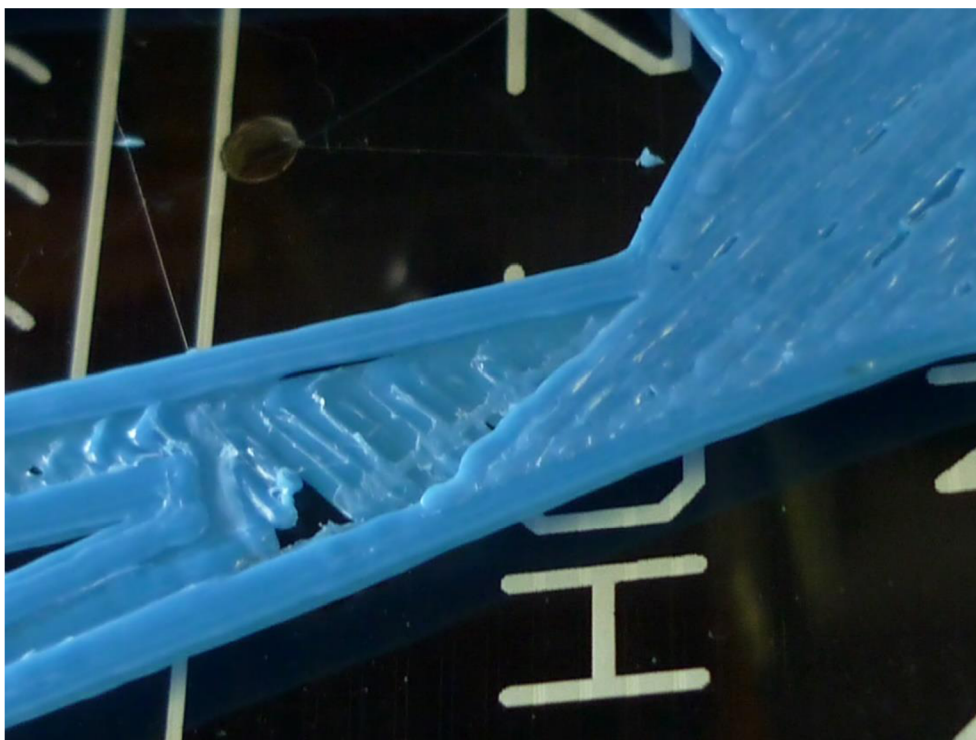
Velkou nevýhodou je velmi pomalý tisk, způsobený nevhodnou konstrukcí frézky – její pohony jsou relativně těžké a způsobují velkou setrvačnost. Pohyby tiskárny jsou rychlé a krátké. Celá frézka se při vyšších rychlostech rozvibruje a v podstatě znemožní přesný tisk (Obr. 39). Tuto komplikaci by mohlo pomoci zredukovat další důkladné vyladění všech pohonů.

Dalším problémem je nahrávání kódů do NC interpretu. Soubory s kódem větší než 145 kB, se nenačtou. Tuto situaci se nepodařilo odstranit ani po konzultaci s odborníkem ze společnosti Beckhoff. Znemožňuje tisk větších součástí a používání detailnějších modelů.

V příloze je k dispozici video zachycující tisk součástí.



Obr. 38 Série zkušebních vzorků



Obr. 39 Vada tisku způsobená rozvibrováním tiskárny



ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo realizovat přestavbu gravírovací frézky na 3D tiskárnu. Jako vhodná technologie tisku byla vybrána metoda Fused Deposed Modeling.

K přestavbě byla vybrána vhodná vyhřívaná podložka a tisková hlava. Ty byly zvoleny s ohledem na snadnou zástavbu do tiskárny. Vyhřívaná podložka je typ MK2B. Jedná se o PCB desku o rozměrech (200×200) mm². Pro tisk je použita hlava MK8 od společnosti Geeetech, která obsahuje všechny důležité komponenty v jednom bloku.

V další části práce byl zprovozněn posuv tiskové struny, řízení teplot podložky a hlavy. Po vykonané úpravě program umožňuje nahrávat řídicí kód, sledovat a řídit teploty podložky a extrudéru. Vše je ovládáno skrze naprogramované grafické prostředí.

Současná sestava umožňuje tisk, nicméně pro lepší výsledky bude třeba tiskárnu dále zdokonalovat. Nabízejí se následující možnosti vylepšení 3D tiskárny.

Snímání teploty není příliš přesné, především kvůli dodaným termistorům. Pro přesnější řízení teploty by bylo třeba nahradit součástky kvalitnějšími. Rychlost tisku je v důsledku nevhodné konstrukci frézky pro 3D tisk malá. Vyladění všech pohonů a případné odlehčení posuvů by umožnilo nastavit vyšší rychlost tisku. Přidání dalších tiskových hlav může dovolit tisknout z více materiálů najednou. To umožní tisknout vícebarevné modely nebo tisk podpěr ze snadno odstranitelných materiálů. Pro snadnější řízení tisku, by dále bylo možné upravit některý z dostupných softwarů na přípravu modelů pro tisk, případně upravit software tiskárny, tak aby bylo umožněno z NC kódu ovládat teploty tisku a zapínání chlazení materiálu.

Navržené úpravy by přispěly k celkovému zkvalitnění a zpřesnění 3D tisku. I přes některé nedostatky dokáže tiskárna tisknout přesně a kvalitně.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] 3D Printing Basics: The Free Beginner's Guide. 3D Printing Industry [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/>
- [2] Encyklopedie 3D tisku [online]. [cit. 2015-01-31]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/encyklopedie-3d-tisku/>
- [3] 3D tištěné díly raketových motorů prošly zkouškou ohněm. OSEL.cz [online]. [cit. 2015-01-31]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=7035>
- [4] Informace o technologiích 3D tisku. [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [5] Tiskárna na jídlo míří do prodeje. *Technet.cz* [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/3d-tiskarna-natural-machines-lynette-kucsma-fe3-/tec_tecnika.aspx?c=A141104_151119_tec_tecnika_nyv
- [6] Tiskneme ve 3D na Cel-Robox: je to snadné a navíc pěkné. *PCTuning.cz* [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://pctuning.tyden.cz/hardware/36-ostatni/31793-tiskneme-ve-3d-na-cel-robox-je-to-snadne-a-navic-pekne>
- [7] The3Doodler [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://the3doodler.com/>
- [8] Joysféra: Máme vlastní 3D tiskárnu!. [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://joysfera.blogspot.cz/2013/11/mame-vlastni-3d-tiskarnu.html>
- [9] 3D tisk ze skla, písku i kmenových buněk. *ScienceWORLD* [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://www.scienceworld.cz/aktuality/3d-tisk-ze-skla-pisku-i-kmenovych-bunek/>
- [10] Rapid Prototyping: LOM: *efunda.com*. [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/lom.cfm
- [11] Rapid Prototyping Centre:Laminated Object Manufacturing. [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: http://www.rpc.msos.edu/machines_lom.php
- [12] Rapid Prototyping: Ink Jet: *efunda.com*. [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/inkjet.cfm
- [13] <http://robo.hyperlink.cz/rapid/>. [online]. [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/rapid/>
- [14] Heated Bed: RepRapWiki. RepRap [online]. [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Heated_Bed
- [15] PCB Heatbed: RepRap Wiki. RepRap [online]. [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed
- [16] RepRap PCB Heatbed 200x300mm. *RepRap.me* [online]. [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: reprap.me/heatbed/pcb300.html
- [17] PCB Heated bed MK2a. *PRUSA RESEARCH* [online]. [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: <http://shop.prusa3d.com/en/electronics/48-heated-bed-mk2a.html>
- [18] Heat bed in 3D printing. *Boots Industries* [online]. [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <https://bootsindustries.com/portfolio-item/heat-bed-3d-printing/>
- [19] Prusa research s.r.o. *Prusa Research* [online]. [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/>
- [20] SeeMeCNC: Orion Delta 3D Printer. *SeeMeCNC* [online]. [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://seemecnc.com/products/orion-delta-3d-printer>
- [21] Patent US6722872 - High temperature modeling apparatus: Patenty Google. [online]. [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US6722872>
- [22] Hot End Comparison: RepRapWiki. *RepRap* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Hot_End_Comparison



- [23] New Product Released: Assembled MK8 extruder. *Geeetech:Blog* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.geeetech.com/blog/2014/08/new-product-released-assembled-mk8-extruder/>
- [24] PCB Heatbed Mk1 by prusjr. *Thingiverse* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.thingiverse.com/thing:3919>
- [25] Milled Reprap Heated bed PCB. *Bill's Tinkers* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://protovision.com/2011/09/25/milled-reprap-heated-bed-pcb/>
- [26] MK2b Aluminium Heatbed (12-24V): cultivate3D. *Cultivate3D* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.cultivate3d.com/mk2b-aluminium-heatbed-black-12v-or-24v/>
- [27] Dělič zatížený a nezatížený. *LMS Software* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://mylms.cz/text-3-delic-napeti-zatizeny-a-nezatizeny/>
- [28] Thermistor. *Wikipedia* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor>
- [29] BECKHOFF New Automation Technology: KL2541 | Stepper motor terminal. *BECKHOFF* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: http://www.beckhoff.com/english.asp?bus_terminal/kl2541.htm
- [30] BECKHOFF New Automation Technology: KL2408 | 8-channel digital output terminal. *BECKHOFF* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: http://www.beckhoff.com/english.asp?bus_terminal/kl2408.htm
- [31] BECKHOFF New Automation Technology: KL3408 | 8-channel analog input terminal. *BECKHOFF* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: http://www.beckhoff.com/english.asp?bus_terminal/kl3404_kl3408.htm
- [32] BOSÁK, D. *3D gravírovací frézka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Bradáč, Ph.D.
- [33] BECKHOFF New Automation Technology: BK1120 | EtherCAT Bus Coupler. *BECKHOFF* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.beckhoff.com/BK1120/>
- [34] Slic3r - G-code generator for 3D printers. *Slic3r* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://slic3r.org/>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

d_p	[min]	průměr ozubeného kola podavače extrudéru
FDM		Fused Deposed Modeling
GND		uzemnění
k	[-]	počet kroků na 1 otáčku krokového motoru
LOM		Laminated Object Manufacturing
PLC		Programmable Logic Controller
R_0	[Ω]	odpor termistoru při jmenovité teplotě
R_1	[Ω]	hodnota odpor rezistoru
R_2	[Ω]	hodnota odpor rezistoru
r_∞	[Ω]	výpočtová konstanta
R_T	[Ω]	hodnota odpor termistoru
SF	[mm/krok]	Scaling Factor
SLA		Stereolitografie
SLS		Selective Laser Sintering
T	[K]	teplota termistoru
T_0	[K]	jmenovitá teplota
U_1	[V]	napětí zdroje
U_2	[V]	napětí na termistoru
β	[K]	konstanta termistoru
NC		Numeric Control



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Princip technologie SLS.	12
Obr. 2 Technologie SLA.	13
Obr. 3 Technologie FDM.	14
Obr. 4 Laminated object manufacturing.	15
Obr. 5 Technologie Binder Jetting.	16
Obr. 6 Princip Multi-jet Modeling.	16
Obr. 7 Tiskárna typu Delta (vlevo) [20] a Kartézského typu (vpravo) [19].	18
Obr. 8 Schéma tiskárny typu FDM.	19
Obr. 9 Schéma Hot-endu.	20
Obr. 10 Oddělení dílu od podložky [18].	20
Obr. 11 Následek přilepení modelu k trysce [18].	21
Obr. 12 Vyhřívání podložka typu PCB [25].	21
Obr. 13 Tisková hlava MK8 [23].	22
Obr. 14 Sestava extrudéru.	23
Obr. 15 Podložka MK2B [26].	24
Obr. 16 Gravírovací frézka, na fotce při přestavbě.	25
Obr. 17 Terminál KL2541 [29] a terminál Bus Coupler [33].	26
Obr. 18 Terminál KL3408[30] a karta KL2408 [31].	27
Obr. 19 Relé Finder 40.61.9.	27
Obr. 20 Schéma zapojení krokového motoru.	29
Obr. 21 Nastavení parametrů krokového motoru v programu KS2000.	30
Obr. 22 Nastavení kinematických parametrů.	31
Obr. 23 Nastavení dynamických parametrů.	31
Obr. 24 Nastavení regulátoru motoru.	31
Obr. 25 Program pro aktivování osy.	32
Obr. 26 Ruční pohyb extrudéru.	32
Obr. 27 Čtení aktuální polohy a nulování pozice osy.	33
Obr. 28 Upravená vizualizace.	33
Obr. 29 Napěťový dělič (uprostřed je zapojen měřící termistor).	34
Obr. 30 Ukázka programu pro sledování teploty.	36
Obr. 31 Vizualizace kontrolního panelu s teplotními regulátory.	37
Obr. 32 Nainstalované součásti 3D tiskárny.	38
Obr. 33 Schéma elektroinstalace.	39
Obr. 34 Okno pro načtení a úpravu pozice modelu.	40
Obr. 35 Nastavení nulového bodu a rozměru podložky.	40
Obr. 36 Ukázka G kódu.	41
Obr. 37 Ukázka upraveného G kódu.	41
Obr. 38 Série zkušebních vzorků.	42
Obr. 39 Vada tisku způsobená rozvibrováním tiskárny.	42



SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Technická data krokového motoru	23
Tab. 2 Charakteristické údaje NTC termistoru hot endu	23
Tab. 3 Charakteristické údaje NTC termistoru podložky	24

SEZNAM POUŽITÝCH VZORCŮ

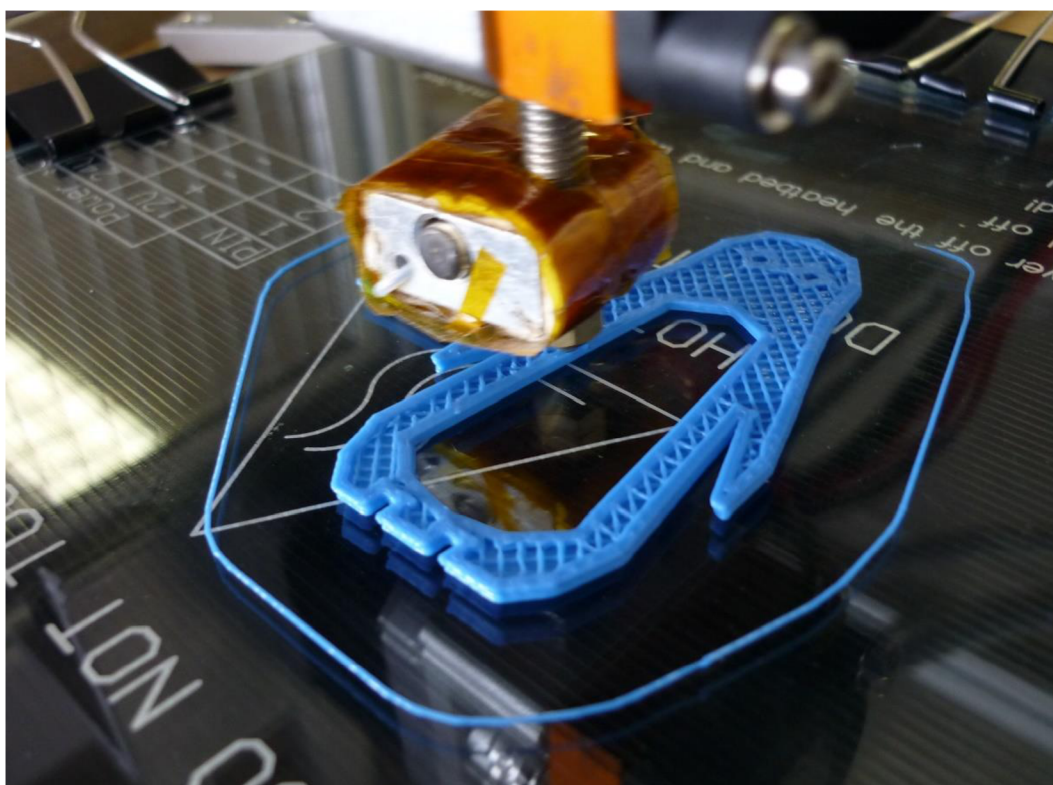
5.1 Výpočet Scaling Factor	30
6.1 Výpočet rezistorů napěťové děličky	34
6.2 Výpočet odporu termistoru	35
6.3 Výpočtová konstanta	35
6.4 Výpočtový vztah pro určení teploty	35

SEZNAM PŘÍLOH

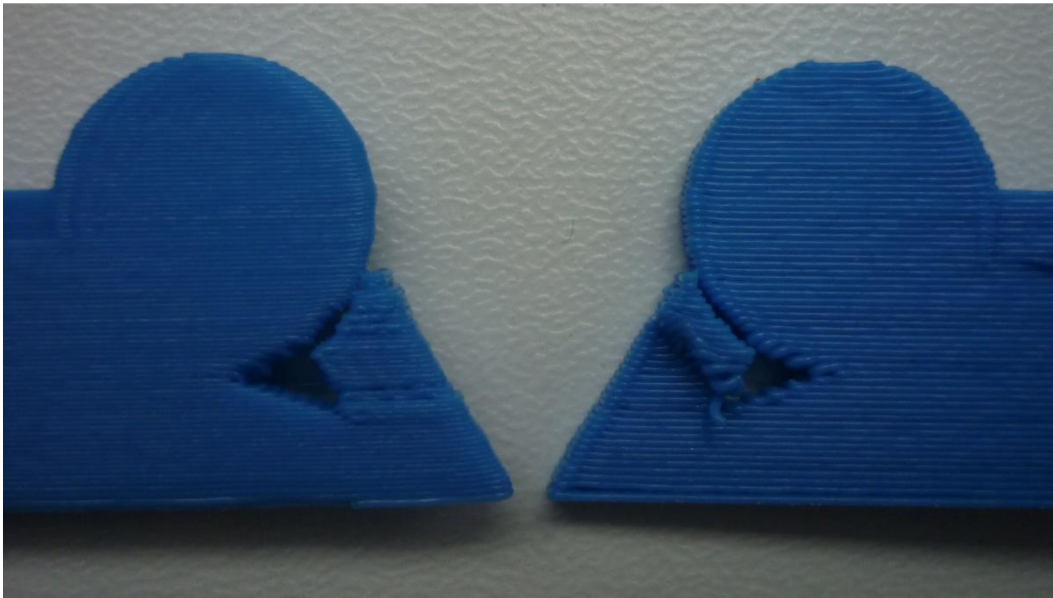
- Příloha 1: Fotografie
- Příloha 2: Video průběhu tisku
- Příloha 3: Ovládací program frézky



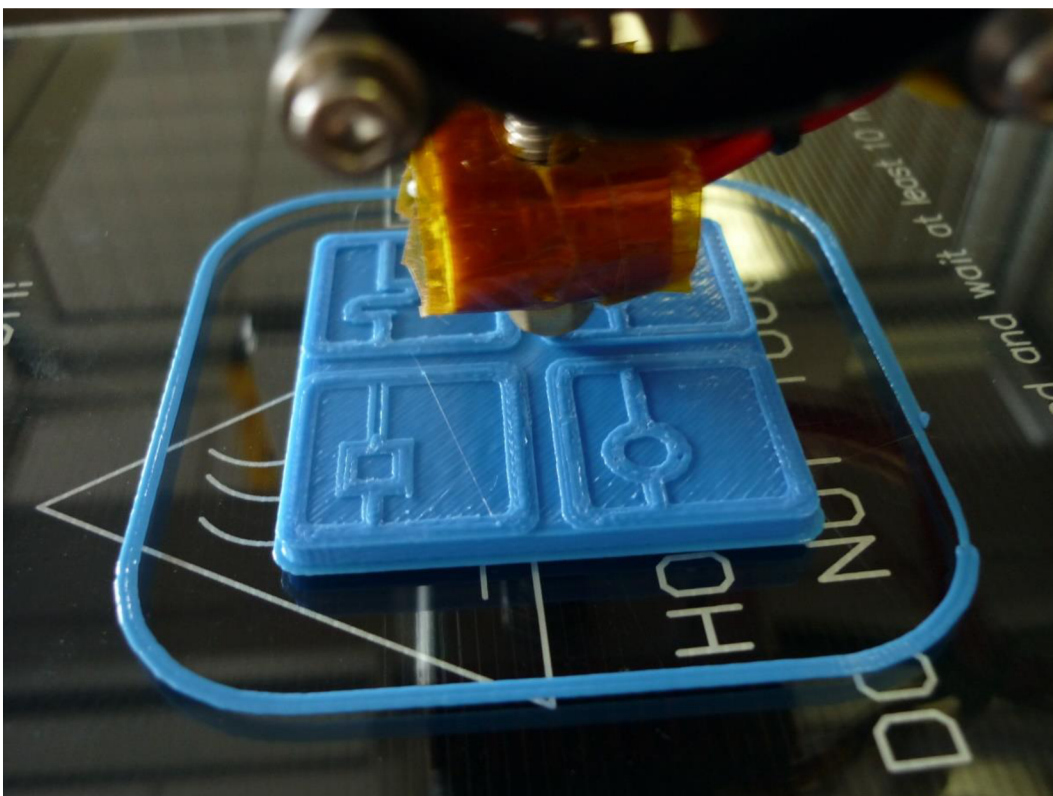
Obr. P1 Porovnání kvality tisku po vyladění parametrů



Obr. P2 Jedna z možností nastavení výplně



Obr. P3 Srovnání tloušťky vrstvy tisku 0,2 a 0,3 mm



Obr. P4 Tisk loga