



# Návrh 3D tiskárny technologie FDM

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301T049 – Výrobní systémy a procesy  
*Autor práce:* **Bc. Jan Šáfr**  
*Vedoucí práce:* Ing. Petr Keller, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Šáfr**  
Osobní číslo: **S14000487**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní systémy a procesy**  
Název tématu: **Návrh 3D tiskárny technologie FDM**  
Zadávací katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je provést rozbor stávajícího stavu konstrukce 3D tiskárny pro aditivní technologii FDM a navrhnout úpravu konstrukce a řízení této tiskárny pro umožnění 3D tisku z dostupných materiálů. Úpravy by se měly týkat především tiskové hlavy a řídicího systému 3D tiskárny.

Body vypracování:

1. Seznamte se se stávajícím stavem konstrukce 3D tiskárny pro aditivní technologii FDM.
2. Na základě tohoto rozboru a poznatků z literatury navrhnete konstrukci tiskové hlavy pro minimálně dva materiály s možností využití co nejšířší škály dostupných materiálů ve formě plastového drátu (filament).
3. Navrhnete vhodné řízení celé tiskárny s využitím volně šiřitelného softwaru a dostupného hardwaru (např. platforma Arduino).
4. Realizujte navržené řešení prakticky s využitím stávající konstrukce 3D tiskárny.



Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **50**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

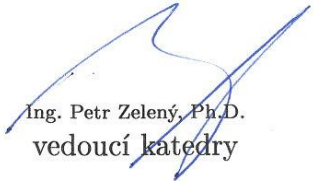
- [1] **REPRAP**. *RepRap Forums :: Czech RUG* [online]. 2015 [cit. 2015-09-25].  
Dostupné z: <http://forums.reprap.org/index.php?321>  
[2] **REBEL 3D**. *Diskuse o 3D tiskárnách Rebel, RepRap atp.* [online]. 2014.  
[cit. 2015-09-25].  
Dostupné z: <http://www.rebelove.org/>  
[3] **STRATASYS LTD**. *Professional 3D Printing*. [online]. 2015 [cit. 2015-09-25].  
Dostupné z: <http://www.stratasys.com/>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Keller, Ph.D.**  
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání diplomové práce: **15. listopadu 2015**  
Termín odevzdání diplomové práce: **15. února 2017**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2015

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

S úctou děkuji vedoucímu této diplomové práce Ing. Petru Kellerovi Ph.D. z Katedry výrobních systémů a automatizace za odborné vedení práce, věcné připomínky a čas věnovaný častým konzultacím.

Stejně tak bych rád poděkoval mé rodině a blízkým za soustavnou podporu v průběhu studia.

**TÉMA :** **NÁVRH 3D TISKÁRNY TECHNOLOGIE FDM**

**ABSTRAKT:** Cílem práce je návrh a realizace 3D tiskárny s ohledem na její původní stav. Zaměřuje se především na vytlačovací hlavu a řízení technologie FDM pro tisk z minimálně dvou materiálů. Práce obsahuje rešerši dostupných řešení, návrh vlastního řešení a praktickou realizaci zakončenou úspěšným výtiskem testovacího modelu.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** 3D tisk, FDM, Arduino, RepRap

**THEME :** **3D PRINTER PROPOSAL USING FDM TECHNOLOGY**

**ABSTRACT:** The aim of thesis is a proposal and realization of 3D printer with respect to its original construction. It is primarily focused on the extruder and control of FDM technology using at least two materials. The thesis contains research on available solutions, the suggestion of own solution and practical realization finished by successful print of testing model.

**KEYWORDS:** 3D printing, FDM, Arduino, RepRap

**Zpracovatel :** TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů a automatizace

Počet stran: 85

Počet příloh: 10

Počet obrázků: 74

Počet tabulek: 3

Počet modelů

nebo jiných příloh: 5 modelů

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
Cíl práce .....	11
<b>1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE FDM .....</b>	<b>12</b>
1.1 Princip FDM.....	12
1.2 Historie .....	13
1.2.1 RepRap.....	13
1.3 Pre - processing .....	13
1.3.1 Formát STL.....	13
1.3.2 Slicování a G-kód .....	14
1.4 Processing .....	15
1.5 Post – processing.....	15
<b>2 KONSTRUKCE FDM ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>16</b>
2.1 Typy tiskáren.....	16
2.1.1 Kartézské .....	16
2.1.2 CoreXY .....	16
2.1.3 Delta.....	16
2.1.4 Polární.....	17
2.2 Otevřená a uzavřená konstrukce .....	17
2.2.1 Otevřené konstrukce .....	17
2.2.2 Uzavřené konstrukce.....	18
2.3 Vytlačovací hlava.....	19
2.3.1 Podávací mechanismus .....	19
2.3.2 Heatbreak .....	20
2.3.3 Chladič .....	20
2.3.4 Topný blok .....	21
2.3.5 Topné těleso .....	21

2.3.6	Termistor.....	22
2.3.7	Tryska .....	22
<b>3</b>	<b>ŘÍZENÍ 3D TISKÁRNY .....</b>	<b>23</b>
3.1	Elektronika .....	23
3.1.1	Řídící deska.....	23
3.1.2	Koncové spínače .....	24
3.1.3	Další volitelné komponenty .....	25
3.2	Firmware .....	26
<b>4</b>	<b>DOSTUPNÁ ŘEŠENÍ VYTLAČOVACÍCH HLAV .....</b>	<b>28</b>
4.1	Podávací mechanismus .....	28
4.1.1	Zpřevodovaný podavač.....	28
4.1.2	Přímý podavač .....	29
4.1.3	Bowdenový podavač.....	29
4.2	Duální vytlačovací hlavy.....	30
4.2.1	Duplikace .....	30
4.2.2	Dvě nezávislé trysky v jednom chladiči .....	31
4.2.3	Jedna tryska pro dva filameny .....	32
4.2.4	Manuální zavádění během tisku .....	33
4.3	Porovnání jednotlivých řešení.....	34
<b>5</b>	<b>STÁVAJÍCÍ STAV KONSTRUKCE 3D TISKÁRNY .....</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>NÁVRH KONSTRUKCE VYTLAČOVACÍ HLAVY.....</b>	<b>37</b>
6.1	Varianta 1.1 .....	38
6.2	Varianta 1.2.....	39
6.2.1	Realizace varianty 1.2.....	41
6.3	Varianta 1.3 .....	45
6.3.1	Realizace varianty 1.3.....	46
6.4	Varianta 2.1 .....	49



6.4.1	Realizace varianty 2.1 .....	50
6.5	Varianta 2.2 .....	52
6.5.1	Realizace varianty 2.2 .....	52
6.6	Porovnání navržených variant .....	53
<b>7</b>	<b>NÁVRH ŘÍZENÍ 3D TISKÁRNY .....</b>	<b>54</b>
7.1	Výběr elektroniky .....	54
7.1.1	Výběr řídicí desky .....	54
7.1.2	Výběr budičů krokových motorů .....	55
7.2	Výběr firmwaru .....	55
7.2.1	Konkrétní nastavení firmwaru .....	56
7.3	Řízení servomotoru .....	58
7.4	Výběr host programu a sliceru .....	59
7.4.1	Nastavení sliceru .....	60
<b>8</b>	<b>PRAKTICKÁ REALIZACE TISKU .....</b>	<b>62</b>
8.1	Zapojení komponentů do řídicí desky .....	62
8.2	Zkouška a kalibrace posuvů .....	62
8.2.1	Kalibrace počtu kroků krokových motorů .....	63
8.3	Zkušební tisk .....	65
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>68</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>70</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>73</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>75</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>75</b>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

3D	Three-dimensional
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAD	Computer Aaided Design
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
LCD	Liquid Crystal Display
NTC	Negative Temperature Coefficient
PLA	Polylactic acid (kyselina polymléčná)
PTC	Positive Temperature Coefficient
PTFE	Polytetrafluorethylen (teflon)
PVA	Polyvinylalkohol
RAMBo	RepRap Arduino-compatible Mother Board
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
SD	Secure Digital
STL	Standard Triangulation Language
USB	Universal Serial Bus

## ÚVOD

Naši předci by nám dnes nejspíš záviděli, s jakou rychlostí jsme schopni přetavit naše myšlenky v reálný model. V dnešní době je z digitálního modelu možné již za několik hodin zhotovit model fyzický. Jednou z technologií, která nám toto umožňuje, je právě 3D tisk. Ten v posledních letech zažívá obrovský rozvoj, když se z těžkopádných zařízení, která si mohly dovolit jen velké společnosti, stala zařízení dostupná téměř komukoliv.

Z počátku nacházely 3D tiskárny své uplatnění především v průmyslu, kde je tradičně kladen obrovský tlak na zkrácení výrobních časů. Dnes je však jejich pole působnosti o mnoho širší. S touto technologií se můžeme setkat nejen v lékařství, umění, modelářství, či stavebnictví, ale také v domácnostech nebo v gastronomii. Metodou postupného skládání jednotlivých vrstev je navíc možné vyrobit modely, které by šly jinou technologií vyrobit obtížně nebo vůbec.

Jednou z nejrozšířenějších metod 3D tisku, které se tato práce věnuje, je aditivní technologie FDM. Ta se začala objevovat již v osmdesátých letech minulého století, v posledních letech však dostala nový impuls v podobě celosvětového zájmu vývojářů otevřené komunity RepRap.

### **Cíl práce**

Nejprve je nutné seznámit se s původní konstrukcí zařízení, na kterém má být tato práce realizována. Po rozboru 3D tiskárny je úkolem navrhnout takovou konstrukci tiskové hlavy, která umožňuje tisk jednoho modelu z minimálně dvou materiálů ve formě plastového drátu (filamentu). Dalším cílem je navrhnout řízení tiskové hlavy spolu s veškerými dalšími komponenty, které jsou k tisku potřebné, a to s využitím volně šiřitelného softwaru a dostupného hardwaru. Závěrečným krokem má být praktická realizace všech předešlých bodů.

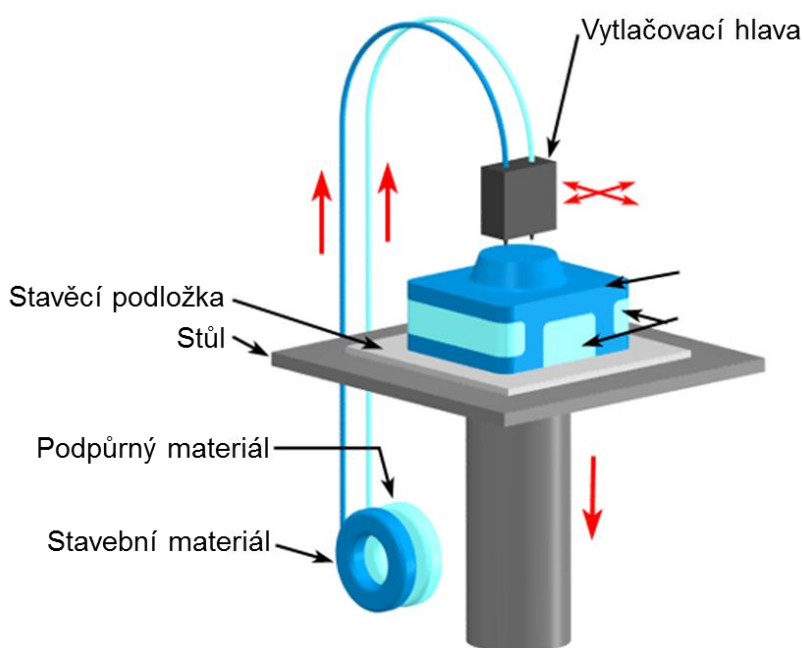
# 1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE FDM

Fused Deposition Modeling (FDM) je jednou z technologií 3D tisku, která pracuje na principu aditivní výroby. Na rozdíl od tradičních metod jako je soustružení, frézování nebo broušení, kde je materiál odebírán, aditivní metody materiál přidávají.

## 1.1 Princip FDM

Principem je řízené skládání jednotlivých vrstev z termoplastického materiálu (nejčastěji ve formě drátu zvaného filament o průměru 1,75 nebo 3 mm), který je většinou odvíjen z cívky. Tento materiál je podávacím mechanismem přiveden do vytlačovací hlavy, kde je roztaven a jeho spojitým nanášením na stavěcí desku dochází k postupnému vytváření daného modelu. Vždy po dokončení kontury v dané rovině XY dojde k pohybu stavěcí desky v ose Z o daný inkrement.

V případě, kdy pod aktuálně tisknutou vrstvou v ose Z není stavěcí deska ani již dříve nanesený materiál (došlo by k tzv. tisknutí do vzduchu), je nutné tisknout model s podporami (viz Obr. 1), které se po dokončení tisku odstraní. Podpurný materiál je možné odstranit mechanicky (např. odlamováním), výhodnější je však využití tisku s více druhy materiálů a jako podpurný materiál využít například takový, který je rozpustný ve vodě (např. PVA). Dalším využitím tisku s více použitými materiály je možnost realizace vícebarevných modelů.



Obr. 1: Schéma technologie FDM [1]

## 1.2 Historie

Technologie byla vynalezena a koncem osmdesátých let 20. století pod zkratkou FDM patentována S. Scottem Crumpem, který následně spoluzaložil společnost Stratasys. Tento patent vypršel v roce 2009 a vzápětí, i díky této expiraci, došlo k masivnímu rozvoji této technologie pod názvem Fused Filament Fabrication (FFF), kterým byl tento způsob tisku označován komunitou RepRap. [2]

### 1.2.1 RepRap

Název projektu RepRap je zkratkou slov *replicating rapid prototyper*, čímž může být v českém překladu označováno zařízení, které je schopné sebereplikace a rychlého prototypování. Tento projekt založil roku 2004 Dr. Adrian Bowyer na *University of Bath* ve Velké Británii. Postupně se stal RepRap mezinárodním projektem vyvíjeným na principu otevřeného hardwaru a softwaru, což znamená, že instrukce k sestavení RepRap produktů jsou volně otevřené komukoliv na světě. Pod touto licencí může také kdokoliv projekt vylepšovat a znovu dále volně poskytovat. [3]

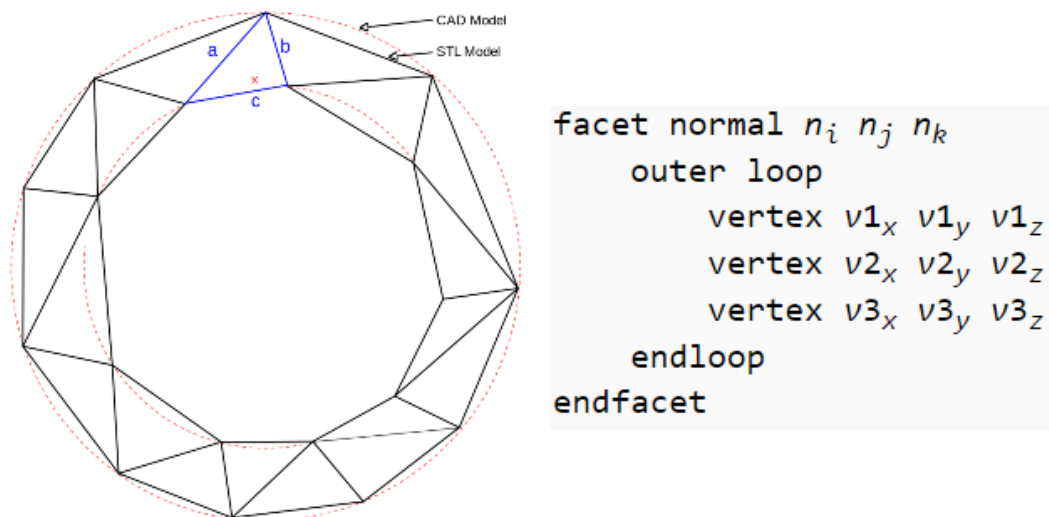
Velkou část součástí potřebných k sestavení nové 3D tiskárny RepRap je možné vytisknout na jiné 3D tiskárně. Fakt, že jsou tiskárnu schopné částečné sebereplikace a návody na sestavení takového zařízení jsou volně dostupné, měl za následek podstatný pokles cen i u komerčních zařízení typu FDM. [2]

## 1.3 Pre - processing

Prvním, ještě předvýrobním krokem je získání modelu ve formátu STL (Standard Triangulation Language), jelikož většina FDM zařízení požaduje ke svému dalšímu zpracování právě tento formát. Drtivou většinou CAD programů je uložení modelu do STL podporováno. V současné době také existuje několik webových stránek, které nabízejí již hotové modely ke stažení, v mnohých případech zdarma.

### 1.3.1 Formát STL

Formát STL obsahuje pouze informace o geometrii povrchu. Nepřenáší žádné údaje o textuře, materiálu a většinou ani o barvě tělesa. Geometrie povrchu je rozdělena na rovinné plochy ve tvaru trojúhelníků (viz Obr. 2), kde je každý z nich definován souřadnicemi třech vrcholů v kartézských souřadnicích a normálovým vektorem. Následující obrázek vizualizuje prokládání tělesa s mezikruhovou stěnou jednotlivými trojúhelníky.



Obr. 2: Porovnání STL modelu s CAD modelem a jeho zápis ASCII kódem [4]

Z obrázku je také možno vidět, že trojúhelníky nekopírují úplně přesně tvar CAD modelu, čímž vzniká v datech odchylka. Tuto odchylku je možné snížit zjemněním trojúhelníkové struktury, tedy zvýšením počtu trojúhelníků prokládajících objekt. To však s sebou přináší delší dobu exportu do formátu STL a také zvýšení jeho velikosti. Je tedy vhodné zvážit, s jakou přesností je 3D tiskárna schopna pracovat a model vyexportovat v příslušném rozlišení. Soubory STL jsou ukládány v ASCII nebo binárním formátu. [4]

### 1.3.2 Slicování a G-kód

Účelem sliceru (slice = krájet) je vytvoření tzv. G-kódu. Nejprve je nutné v nastavení předat sliceru základní informace o tisku, mezi které patří například průměr filamentu, teplota tavení materiálu nebo teplota prostředí tisku.

Po načtení modelu ve sliceru dojde k rozdělení 3D modelu na jednotlivé vrstvy a jeho přeložení do G-kódu, který obsahuje veškeré informace k řízení celého procesu. V tomto souboru se tedy nachází příkazy (G-kódy) k tomu, kde se má nacházet vytlačovací hlava, kolik materiálu má při určené teplotě vytlačovat a jakou rychlostí se má pohybovat. G-kód dále obsahuje příkazy k tisku, které byly nakonfigurovány v nastavení sliceru (např. žádaná teplota tiskového prostředí před začátkem tisku).

Mezi oblíbené slicery s otevřeným softwarem patří v současné době programy Cura, Slic3R, Simplify3D a Skeinforge.

## 1.4 Processing

Po nutných předvýrobních procesech nastává proces samotného tisku. Ten začne spuštěním G-kódu přes určitý hostující software v počítači, který komunikuje s řídicí deskou (nejčastěji přes USB). Nejrozšířenějšími programy s otevřenou licencí jsou Repetier-Host nebo Pronterface. Hostující programy mají uživatelské prostředí na různé vysoké úrovni. Mezi jejich základní funkce patří celkový monitoring tisku, aktuální stav teplot, odhad zbývajících času tisku a v reálném čase také umožňují ovlivnit parametry rychlosti tisku, nebo průtoku materiálu. Další funkcí může být vizualizace dosud vytištěného modelu po jednotlivých vrstvách. Sekvence prvních příkazů G-kódu se v závislosti na použitých zařízeních a softwarech liší, podstata je však velmi podobná. Příklad ukazuje Obr. 3.

<b>M190 S112 ;</b>	nastavení teploty vyhřívání podložky na 112° C
<b>M104 S260 ;</b>	nastavení teploty vytlačovací hlavy na 260° C
<b>G28 ;</b>	počáteční pozice pro každou osu
<b>G1 Z5 F500 ;</b>	lineární pohyb v ose Z do výšky 5mm rychlostí 500 mm/min
<b>M109 S260 ;</b>	čekání na teplotu 260° C
<b>G21 ;</b>	nastavení jednotek na mm
<b>G90 ;</b>	použití absolutního programování

Obr. 3: Příklad G-kódu

Kromě rychlosti posuvů závisí délka tisku především na velikosti objektu, výšce jednotlivých vrstev a počtu použitých materiálů. Obvykle se pohybuje v řádu hodin.

## 1.5 Post – processing

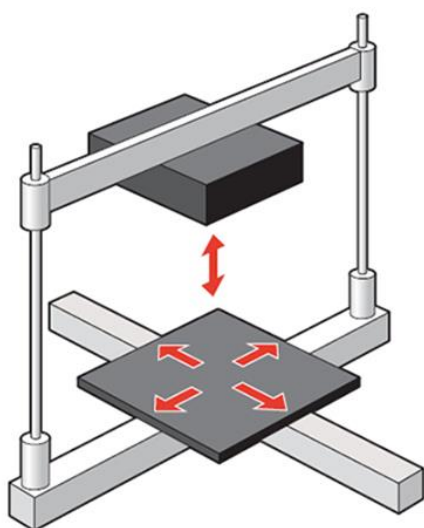
V ideálním případě je možné po dotisknutí a mírném vychladnutí materiálu odebrat z podložky hotový výtisk. Dost často je však třeba odstranit podpory, ať už mechanicky či například rozpuštěním podpůrného materiálu. Dalším krokem může být povrchová úprava modelu. Například pro materiál ABS se využívá máčení modelu v lázni acetonových výparů, čímž dojde k vytvoření lesklejšího povrchu modelu. Při tisku větších modelů, které svou velikostí přesahují tiskový prostor tiskárny, je možné je před tiskem rozdělit na několik menších dílů, které se následně po tisku slepí.

## 2 KONSTRUKCE FDM ZAŘÍZENÍ

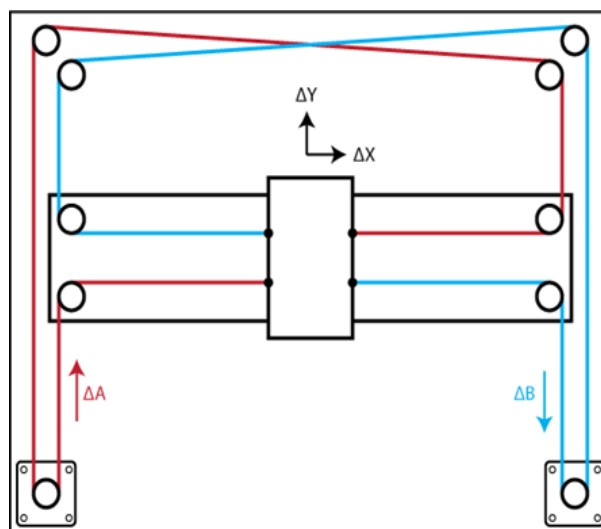
### 2.1 Typy tiskáren

#### 2.1.1 Kartézské

Mezi nejpoužívanější konstrukce patří tiskárny kartézského typu (viz Obr. 4). Jak napovídá název, poloha jednotlivých částí je odměřována pomocí kartézské soustavy souřadnic, která má 3 na sebe kolmé osy (X, Y a Z). Na Obr. 4 se v ose X a Y pohybuje stavěcí podložka, obvykle čtvercového nebo obdélníkového tvaru, a pohyb v ose Z koná vytlačovací hlava. V praxi je však možné se setkat se všemi možnými kombinacemi, například v ose Z pohybující se stavěcí deskou.



Obr. 4: Tiskárna kartézského typu [5]



Obr. 5: Princip polohování os X a Y na tiskárně typu CoreXY [8]

#### 2.1.2 CoreXY

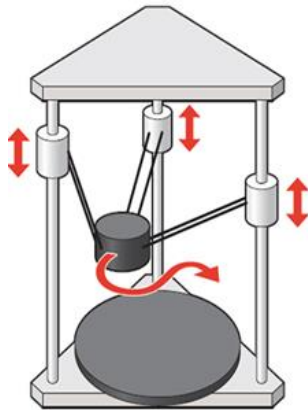
Hlavním znakem tiskáren typu CoreXY je umístění motorů ovládajících pohyby v osách X a Y do rámu tiskárny. Uspořádání os je také kartézského typu, ovšem osy X a Y mají vzájemně závislý pohyb (viz Obr. 5). Motory je ovládající jsou umístěny v horní části rámu, takže nezatěžují jiné pohyblivé části. Stavěcí podložka se pohybuje v ose Z směrem od vytlačovací hlavy. [8]

#### 2.1.3 Delta

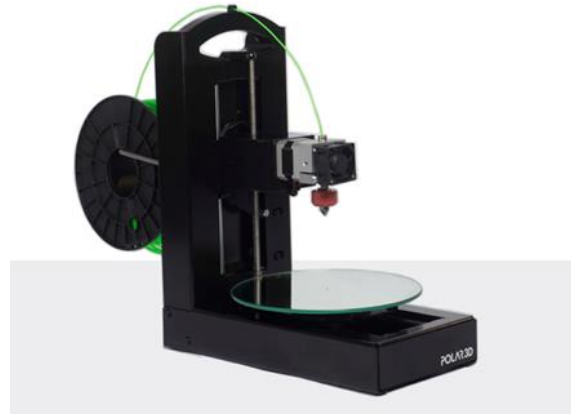
Principem tiskáren typu delta je uchycení vytlačovací hlavy v kloubech třech ramen (viz Obr. 6), které mezi sebou svírají úhel  $120^\circ$ . Každé z ramen se pohybuje nezávisle na ostatních a poloha vytlačovací hlavy, která se pohybuje ve všech třech osách, je vždy



závislá na všech ramenech. Motory jsou obvykle umístěny na rámu tiskárny, čímž je možné dosáhnout velmi lehkých pohyblivých částí. Souřadnicový systém je stejně jako v předchozích případech kartézský, avšak stavěcí podložka je kruhového tvaru a je statická. Charakteristickým znakem tohoto provedení je velká výška konstrukce, avšak oproti tiskárnám kartézského provedení disponují větším stavěcím prostorem při srovnatelných rozměrech stavěcí podložky. [7]



Obr. 6: Tiskárna typu Delta [5]



Obr. 7: Polární tiskárna společnosti POLAR3D [9]

#### 2.1.4 Polární

Tiskárny tohoto typu (viz Obr. 7) mají stavěcí podložku také kruhového tvaru, avšak na rozdíl od tiskáren typu Delta není tato podložka statická, ale otočná. Další rozdíl je v použitém souřadnicovém systému, který je, jak již vyplývá z názvu, polární. Při srovnání s tiskárnami kartézského typu mají podobně jako tiskárny Delta větší využitelnost stavěcího prostoru oproti tiskárnám kartézským. [7][9]

### 2.2 Otevřená a uzavřená konstrukce

Jednotlivé tiskárny lze dále rozdělovat dle zakrytování stavěcího prostoru, a to na tiskárny s otevřenou konstrukcí (viz Obr. 8) a tiskárny s konstrukcí otevřenou (viz Obr. 9).

#### 2.2.1 Otevřené konstrukce

Mezi přednosti tiskáren s otevřenou konstrukcí patří hlavně jednoduchý přístup k veškerým komponentům, jako jsou vytlačovací hlava či stavěcí podložka. Především stavěcí podložku je před tiskem třeba často ošetřit pro lepší přilnavost nebo naopak očistit po předchozím tisku. Nezakrytovaná konstrukce také umožňuje snadnější sledování a monitorování procesu během tisku.

Naopak nevýhodou těchto konstrukcí je především to, že nechrání tisknutý objekt před prouděním vzduchu z okolí, což může mít značný vliv na kvalitu tisku. Různé materiály mohou vyžadovat určitou teplotu pracovního prostředí, jelikož se při chladnutí smršťují, čehož není možno s touto konstrukcí dosáhnout. Tento fakt lze však částečně kompenzovat speciálními stavěcími podložkami (např. vyhřívanou podložkou). V neposlední řadě tyto konstrukce nechrání obsluhu před nebezpečným dotykem částí s teplotou dosahujících stovek stupňů celsia. [10]



Obr. 8: Příklad tiskárny s otevřenou konstrukcí [11]



Obr. 9: Příklad tiskárny s uzavřenou konstrukcí [12]

### 2.2.2 Uzavřené konstrukce

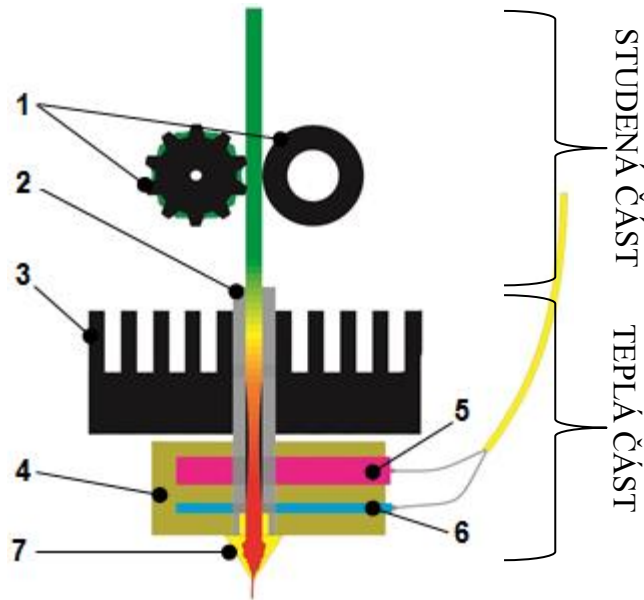
Uzavřené tiskárny disponují větší tuhostí konstrukce a uzavřené prostředí také umožňuje nastavit a udržovat požadovanou teplotu pracovního prostředí. Jako přístup k vytisknutému objektu slouží většinou dvířka. Zakrytovaná konstrukce slouží také k částečnému odhlučnění nepříjemných zvuků pohyblivých částí tiskárny (motory, ventilátory).

U některých používaných materiálů, například ABS, dochází při tavení k uvolňování nepříjemného zápachu. Ten se u zakrytovaných konstrukcí uvolňuje do okolí ve významně menší míře než při otevřené konstrukci. Stejně tak konstrukce chrání obsluhu před možným popálením.

Nevýhodou uzavřených konstrukcí může být horší přístup k některým částem tiskárny. Pro snadnější údržbu jsou stavěcí podložky často vyjímatelné. [10]

## 2.3 Vytlačovací hlava

Vytlačovací hlava (často označována anglickým slovem *extruder*) je nedůležitějším komponentem celého zařízení a skládá se ze dvou částí – studené a teplé (viz Obr. 10).



Obr. 10: Schéma vytlačovací hlavy [13][14]

### 2.3.1 Podávací mechanismus

Podávací mechanismus (viz Obr. 10.1) patří do studené části vytlačovací hlavy a jeho úkolem je řízeně přivádět filament do části teplé. K přívodu materiálu je použito podávacího kola (zubatice či pastorek), které se při otáčení mírně zařezává do filamentu. Filament se díky přítlaku z druhé strany (např. ložiskem) posouvá požadovaným směrem. Posuv materiálu je řízen krokovým motorem, na kterém je podávací kolo umístěno. Během tisku může být výhodné na krátkou dobu materiál z teplé části odvést, čehož se docílí reverzací v podávacím mechanismu – tento jev se nazývá retrakce.



Obr. 11: Ozubené (podávací) kolo podávacího mechanismu [15]

Podstatným parametrem podávacího mechanismu je velikost přítlaku filamentu k podávacímu kolu (viz Obr. 11). Při nastavení příliš malého přítlaku může dojít k prokluzu materiálu, a tím pádem k jeho nesprávnému nebo žádnému dávkování do teplé části vytlačovací hlavy. Pokud je přítlak příliš velký a zuby podávacího kola se do materiálu příliš zařezávají, může docházet v místě jejich styku k drobení filamentu, který následně ucpe drážky podávacího kola. Důsledkem je prokluz filamentu v podávacím mechanismu a možné znehodnocení tisknutého modelu. [13]

### 2.3.2 Heatbreak

Úkolem této součásti (viz Obr. 10.2) je vedení filamentu od podávacího mechanismu k trysce, která vytlačuje materiál. Horní část *heatbreaku* (lze volně přeložit jako součást pro dělení nebo lámání tepla) je aretována v chladiči (viz kapitola 2.3.3), spodní část je zakončena závitem a zašroubována v topném bloku (viz kapitola 2.3.4), v kterém materiál prochází do trysky.

Zatímco v místě styku *heatbreaku* s tryskou je teplota v řádu stovek stupňů, v místě vstupu filamentu do *heatbreaku* je kladen požadavek na co nejnižší teplotu. Pro tiskárnu RepRap se k výrobě této části vytlačovací hlavy často užívá nerezová ocel, jejíž tepelná vodivost je zhruba 3x menší než u běžně používané oceli. V ideálním případě by se filament měnil na taveninu skokově v místě co nejbližším ukončení trysky. [16]



Obr. 12: Heatbreak a jeho řez [17]



Obr. 13: Různá provedení chladičů [17]

### 2.3.3 Chladič

Chladič (viz Obr. 10.3) je největší součástkou celé vytlačovací hlavy. Slouží k odvodu tepla z *heatbreaku*, z kterého je třeba, především z jeho horní části, odvádět teplo, aby

nedošlo k natavení filamentu příliš vysoko a následnému ucpání heatbreaku. Pro zvýšení účinnosti je chladič osazován přídatným ventilátorem.

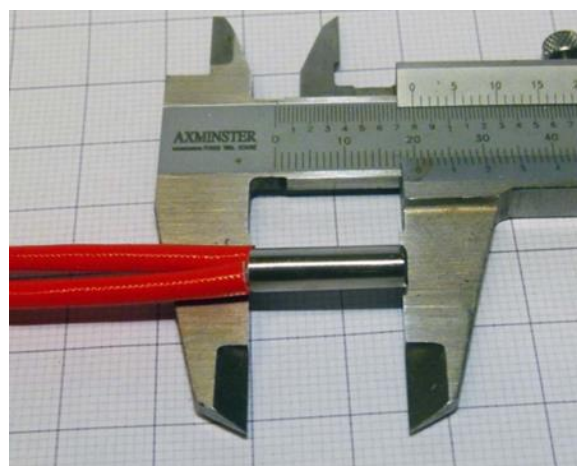
Dle výrobce a typu vytlačovací hlavy jsou používány chladiče různých tvarů, nejčastěji však kvádry a válce (viz Obr. 13). U tiskáren RepRap je častým materiálem pro výrobu chladičů hliník.

### 2.3.4 Topný blok

Topný blok (viz Obr. 10.4) je významným spojníkem několika částí vytlačovací hlavy. V rozměrově nevelké součásti přechází roztavený materiál z heatbreaku do trysky (viz Obr. 46), která je v topném bloku aretována pomocí závitů. Dále je v něm umístěno topné těleso (viz kapitola 2.3.5) s termistorem (viz kapitola 2.3.6). Topný blok je nejčastěji ve tvaru kvádry a pro tiskárny typu RepRap se jako materiál nejčastěji využívá hliník.



Obr. 14: Příklad provedení topného bloku [17]



Obr. 15: Topné těleso 12V/40W [17]

### 2.3.5 Topné těleso

Topné těleso (viz Obr. 10.5) je tvořeno rezistorem, který přeměňuje elektrickou energii na tepelnou. Tím je vytápěn topný blok, ve kterém je topné těleso aretováno. Nejrozšířenějším topným tělesem pro tiskárny typu RepRap je těleso s keramickým jádrem o výkonu 40 W a pracovním napětím 12 nebo 24 V (viz Obr. 15). V jednom topném bloku je obvykle umístěno jedno topné těleso. [18]

### 2.3.6 Termistor

Nejpoužívanějším teplotním čidlem pro tiskárnu typu RepRap je termistor (viz Obr. 10.6). Toto čidlo pracuje na proměnné hodnotě rezistence, která je závislá na změně teploty. Termistory se rozlišují na dva druhy – NTC a PTC. Při zahřátí termistoru typu NTC jeho odpor klesá, zatímco u typu PTC stoupá. Často využívaným termistorem u tiskáren typu RepRap je termistor typu NTC s vnitřním odporem 100 k $\Omega$  (viz Obr. 16). [19][24]



Obr. 16: Termistor NTC 100 k $\Omega$  [17]

### 2.3.7 Tryska

Tryska je posledním článkem vytlačovací hlavy (viz Obr. 10.7). V tomto místě opouští tavenina prostor vytlačovací hlavy a je nanášena na stavěcí desku nebo předchozí vrstvy tisknutého modelu. Základní podmínkou úspěšného vytlačování je, aby byl průchod taveniny tryskou co nejplynulejší, tavenina se nehromadila a tryska jí kladla co nejmenší odpor. Důležité je, aby byla tryska dostatečně dotažena k topnému tělesu s heatbreakem a nedocházelo tak k úniku taveniny kolem závitů, kterými jsou součásti aretovány.

Materiály pro výrobu trysek se různí v závislosti na tom, z jakého materiálu se tiskne. Pro tisk nejpoužívanějších materiálů (ABS, PLA) se využívají trysky mosazné. Průměry otvorů v trysce jsou volitelné a pohybují se v řádech desetin milimetrů (viz Obr. 17). Obecně lze říct, že čím menší průměr otvoru tryska má, tím detailnějších modelů můžeme dosáhnout. Čím menší však průměr trysky je, tím déle se bude model tisknout (pokud uvažujeme srovnatelné parametry tisku pro různé trysky).



Obr. 17: Různé průměry otvorů trysek [17]

## 3 ŘÍZENÍ 3D TISKÁRNY

### 3.1 Elektronika

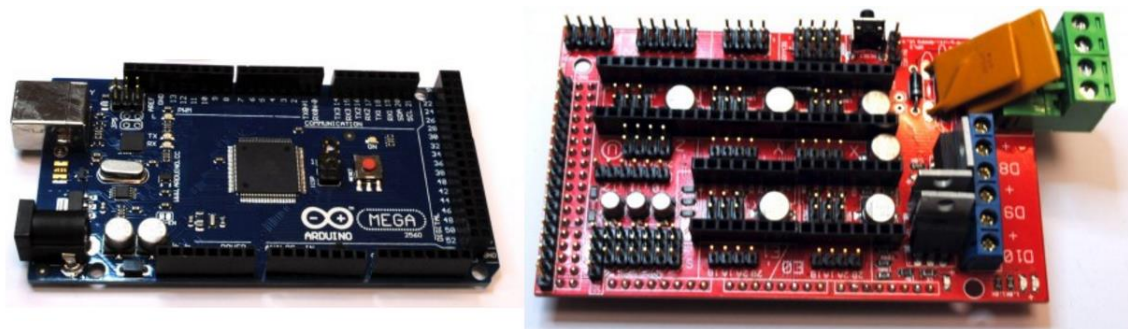
Kromě zdroje elektrického napětí a součástek uvedených v předchozí kapitole, které obsahuje vytačovací hlava (termistor, topné těleso), je k sestavení a provozování 3D tiskárny třeba ještě dalších komponentů.

#### 3.1.1 Řídící deska

Řídící deska je mozkiem celé 3D tiskárny. Většina z nich je založena na desce prototypové platformy Arduino a obsahuje 8bitové mikrokontroléry z rodiny AVR od firmy Atmel a množství dalších podpůrných obvodů. Firmware pro Arduino je uživatelem programován samostatně na stolním počítači a do Arduina je následně překompilován. Uvnitř Arduina běží firmware ve smyčce - stále dokola zjišťuje stav svého okolí a dle příslušného řídicího firmwaru na podněty z okolí reaguje. [21]

Vzhledem k otevřenosti platformy Arduino existuje obrovské množství odvozených konstrukcí a návrhů pro řídicí desky 3D tiskáren. Ty jsou ve své podstatě velice podobné a volba konkrétního řešení je vždy individuální vzhledem k požadavkům k danému zařízení (např. počet vytačovacích hlav). [20][21]

Velice rozšířeným řešením (viz Obr. 18) je použití desky Arduino Mega 2560 (procesor ATmega2560) spolu s přídatným modulem (tzv. shield) zvaným RAMPS (aktuálně ve verzi 1.4.2), kde se Arduino stará o logickou část procesu a modul RAMPS obstarává všechny výkonové prvky a senzory. V tomto sestavení je možné ovládat dvě vytačovací hlavy a krokové motory všech tří os. Dále je možné připojit vyhřívanou podložku, LCD displej, čtečku SD karet a ventilátory. Nutností je osadit RAMPS budiči krokových motorů. [22]

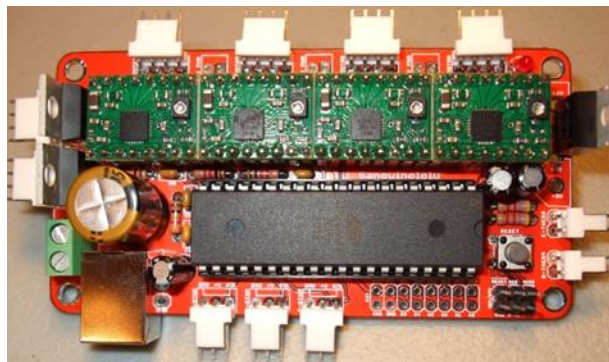


Obr. 18: Arduino MEGA 2560 (vlevo) a RAMPS 1.4 (vpravo) [17]

Další z mnoha možností je použití řídicí desky s názvem RAMBo, aktuálně ve verzi 1.3 (viz Obr. 19). Ta se skládá z podobných komponentů (procesorATMega2560) jako předchozí řešení. Rozdíl však tkví v integraci všech komponentů, včetně budičů krokových motorů, do jedné desky. [23]



Obr. 19: RAMBo Electronics v1.3 [23]



Obr. 20: Sanguinololu [22]

Jak již bylo zmíněno, řídicích desek existuje velké množství. Kromě výše jmenovaných stojí za zmínku ještě tyto: Sanguinololu (viz Obr. 20), Gen7, Megatronics, Minitronics.

### 3.1.2 Koncové spínače

Koncové spínače se používají pro vymezení pohybů jednotlivých os 3D tiskárny. Vždy před začátkem tisku najede tiskárna v každé své ose do nulového bodu, typicky jsou to souřadnice  $[0, 0, 0]$ . Vždy při kontaktu s koncovým spínačem je osa ve své nulové poloze. Pro vymezení pohybu v jednotlivých osách obvykle postačují 3 koncové spínače, umístěné vždy v nulové poloze. Omezení maximální možné hodnoty každé osy lze určit softwarově. Obecně lze rozdělit koncové spínače na několik druhů, pro 3D tiskárny se používají především mechanické a optoelektronické.

Mechanické koncové snímače, které pracují na principu mikrospínače, mají jednoduché provedení a nižší cenu. Nevýhodou je omezený počet cyklů a nižší přesnost, která je důležitá především u osy Z, kde koncový spínač při první vrstvě udává polohu trysky nad stavěcí deskou.

Optoelektronické koncové snímače pracují na principu přerušování světelné závory. Ve srovnání se snímači mechanickými jsou dražší, konstrukčně složitější, avšak jejich přesnost bývá vyšší. [22][24]



### 3.1.3 Další volitelné komponenty

Kromě výše zmíněných komponentů, které jsou pro funkčnost tiskárny nezbytné, je možné k 3D tiskárnám využít dalších přídatných komponentů, které vylepšují nebo zjednodušují proces tisku.

Jedním z nich je přídatný ventilátor. Ten má, na rozdíl od ventilátoru pro odvod tepla z chladiče, za úkol chladit tisknutý objekt. Toho může být s výhodou použito například při tisku malých objektů, jejichž předchozí vrstvy nestihnou vychladnout před nanesením vrstvy další.

Dalším volitelným komponentem je vyhřívaná podložka (viz Obr. 21). Ta zlepšuje přilnavost tisknutého objektu k stavěcí podložce a předchází negativním jevům (např. odtrhnutí modelu od podložky) způsobených smršťováním materiálu při jeho chladnutí. Především u tiskáren s otevřenou konstrukcí je vyhřívaná podložka často využívanou součástí pro tisk např. ABS (teplota podložky okolo 110° C).



Obr. 21: Vyhřívaná podložka MK2B [17]

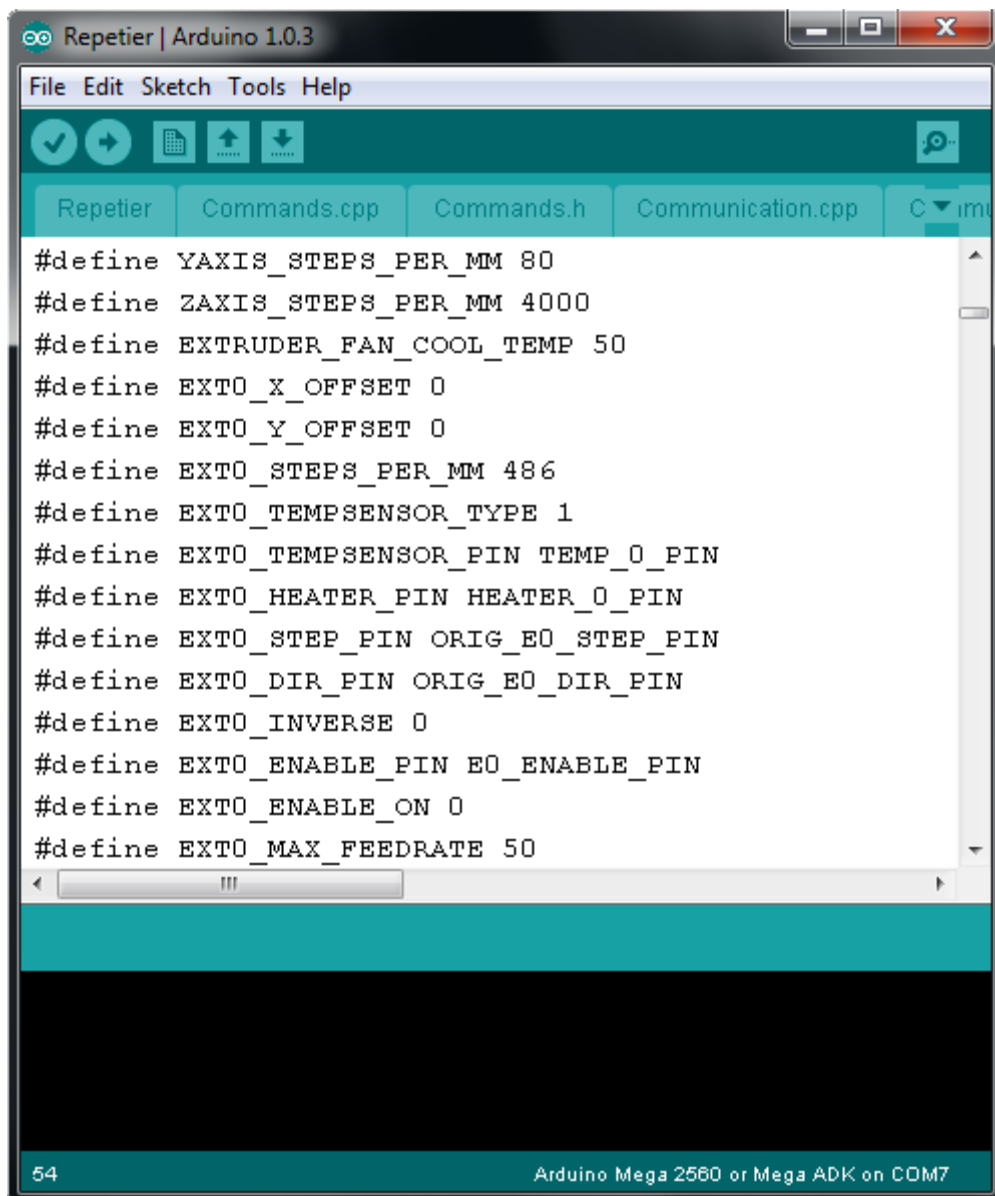


Obr. 22: LCD displej s čtečkou SD karet [17]

Přídatný LCD displej (viz Obr. 22) slouží k ovládání 3D tiskárny, kde je na displeji možné provést základní nastavení nebo např. tiskárnu kalibrovat. Dále je na displeji možné sledovat stav tisku, teploty vytlačovacích hlav apod. Součástí displeje často bývá čtečka SD karet. Pokud je vložena SD karta s vygenerovaným G-kódem pro tisk, odpadá nutnost připojení zařízení k počítači.

### 3.2 Firmware

Firmware je druh softwaru, který běží v řídicí desce a obsluhuje veškeré komponenty připojené k řídicí desce. Firmware pro RepRap bývá nejčastěji programován v jazyce Wiring, což je jazyk vyvinutý pro Arduino (má téměř stejnou syntaxi jako C/C++). Předtím, než je kód firmwaru nahrán do Arduina, je v něm třeba nadefinovat všechny potřebné parametry dané tiskárny (jako je použitá řídicí deska, počet vytlačovacích hlav, počet kroků krokového motoru na 1 mm, apod.). Většinu z těchto parametrů lze změnit pouze novým přehráním firmwaru.



```
Repetier | Arduino 1.0.3
File Edit Sketch Tools Help
Repetier Commands.cpp Commands.h Communication.cpp
#define YAXIS_STEPS_PER_MM 80
#define ZAXIS_STEPS_PER_MM 4000
#define EXTRUDER_FAN_COOL_TEMP 50
#define EXT0_X_OFFSET 0
#define EXT0_Y_OFFSET 0
#define EXT0_STEPS_PER_MM 486
#define EXT0_TEMPSENSOR_TYPE 1
#define EXT0_TEMPSENSOR_PIN TEMP_0_PIN
#define EXT0_HEATER_PIN HEATER_0_PIN
#define EXT0_STEP_PIN ORIG_E0_STEP_PIN
#define EXT0_DIR_PIN ORIG_E0_DIR_PIN
#define EXT0_INVERSE 0
#define EXT0_ENABLE_PIN E0_ENABLE_PIN
#define EXT0_ENABLE_ON 0
#define EXT0_MAX_FEEDRATE 50
54 Arduino Mega 2560 or Mega ADK on COM7
```

Obr. 23: Definování parametrů vytlačovací hlavy v jazyce Wiring

Komunitou projektu RepRap bylo vytvořeno několik volně šiřitelných firmwarů pro 3D tiskárny. Většina z nich pracuje na velmi obdobném principu, což je dáno i tím, že jsou

od sebe často odvozeny. Liší se v parametrech jako je maximální možný počet vytlačovacích hlav, podpora SD karet, podpora EEPROM, řízení teplot apod. Podstatným faktorem je také aktivita vývojářů a vydávání aktualizací. Mezi nejrozšířenější pro tiskárny typu RepRap patří firmwary s názvem Marlin, Repetier, Sprinter nebo Teacup. [20]

## 4 DOSTUPNÁ ŘEŠENÍ VYTLAČOVACÍCH HLAV

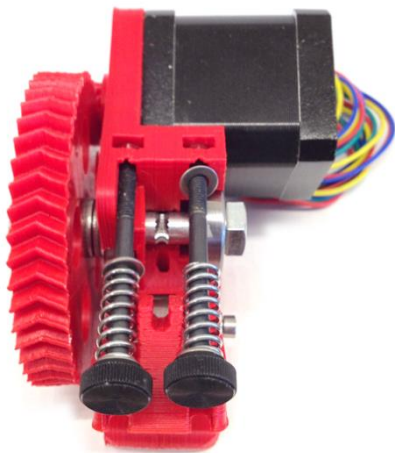
Dostupných řešení existuje celá řada. Vzhledem k charakteru projektu RepRap si mnoho uživatelů upravuje vytlačovací hlavy dle vlastních potřeb a svá řešení poskytují dále na internetu. V této kapitole se objevují ta nejčastější provedení vytlačovacích hlav. Je nutné podotknout, že ve skutečnosti často dochází k jejich kombinaci.

### 4.1 Podávací mechanismus

Jedno z kritérií, dle kterého lze podávací mechanismy dělit, je způsob přívodu filamentu podávacím mechanismem do teplé části vytlačovací hlavy. Drtivá většina extruderů, které používají k tisku materiál v podobě tiskové struny, řeší přívod materiálu právě jedním z uvedených způsobů.

#### 4.1.1 Zpřevodovaný podavač

Zpřevodovaný podavač (v anglickém jazyce nazývaný *Geared extruder* nebo dle jeho autorů také *Greg's Wade's extruder*) využívá k posuvu filamentu ozubeného převodu zpřevodovaného do pomala. Převodový poměr těchto kol může být různý (např. 59:11), musí se však správně promítnout do výpočtu při kalibraci podávacího mechanismu. Způsob provedení je na Obr. 24 – hnací kolo je umístěno na výstupní hřídeli krokového motoru a pohání kolo hnané, uložené na podávacím šroubu. Tento šroub je uložen ve dvou ložiskách a má na svém obvodu speciální drážkování (viz Obr. 25), které zajišťuje posuv filamentu. Správný přítlak filamentu k šroubu zajišťuje výklopný držák s ložiskem, který k šroubu přitlačují dvě pružiny.



Obr. 24: Zpřevodovaný podavač [25]



Obr. 25: Podávací šroub [26]

Výhoda tohoto provedení je především v použitých dílech, které je z velké části možné vytisknout na 3D tiskárně (včetně ozubených kol). Vzhledem k použitému převodovému poměru dosahují tyto podavače větších krouticích momentů než podavače přímé a jsou tak vhodné především pro tiskové struny větších průměrů (3 mm). Jeho nevýhodou může být poněkud robustnější konstrukce, tedy i větší rozměry.

#### 4.1.2 Přímý podavač

Přímé podavače (v anglickém jazyce označovány jako *Direct drive extruders*) jsou charakteristické umístěním podávacího kola přímo na výstupní hřídel krokového motoru. Na rozdíl od předchozího řešení tak není posuvný mechanismus zpřevodován a dosahuje menšího krouticího momentu, který však plně postačuje pro posuv filamentu o průměru 1,75 mm. Na Obr. 26 je jedno z možných provedení přímého podavače, které, jak lze vidět, vyniká v porovnání s předchozím řešením především svými menšími rozměry. Přítlak filamentu k podávacímu kolu je opět realizován ložiskem umístěným v páce, která je tlačena pružinou.



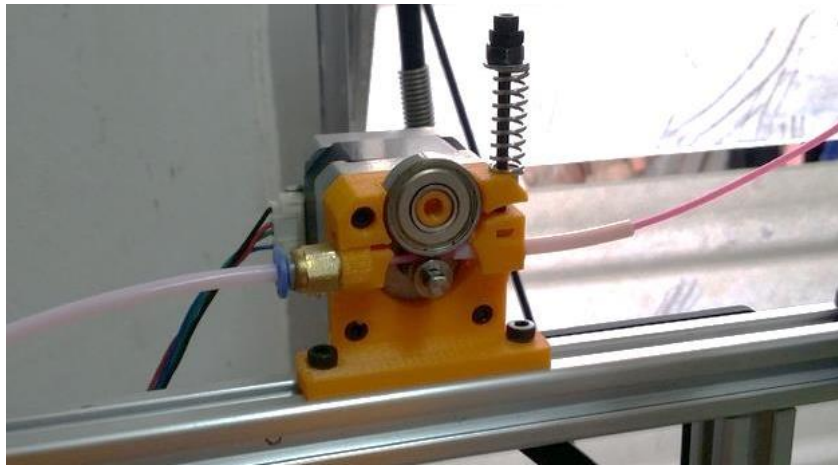
Obr. 26: Přímý podavač [27]

#### 4.1.3 Bowdenový podavač

Bowdenový podavač je jedním ze speciálních případů. Jeho specifikum je v tom, že se podávací mechanismus nenachází na vozíku spolu s teplou částí vytlačovací hlavy, ale je umístěn pevně na rámu tiskárny (viz Obr. 27). K teplé části je poté filament veden v trubičce (nejčastěji teflonové). Posuv filamentu může být realizován jako přímý i zpřevodovaný.

Výhoda tohoto provedení spočívá v odlehčení vozíku s vytlačovací hlavou, díky tomu je teoreticky možné tisknout rychleji a kvalitněji. Nevýhoda bowdenových podavačů je v odporu, který klade trubička filamentu cestou do teplé části vytlačovací hlavy. Kvůli

této přívodní trubičce je také obtížnější či nemožný tisk z některých materiálů. Problémy se mohou vyskytnout také při retrakci.



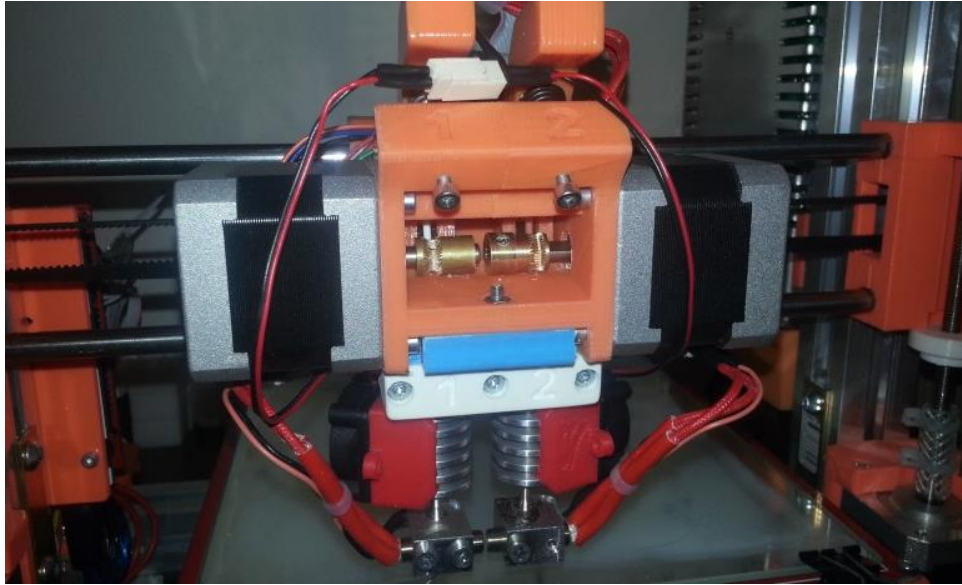
Obr. 27: Bowdenový podavač umístěný na rámu tiskárny [28]

## 4.2 Duální vytlačovací hlavy

Pod pojmem duální vytlačovací hlava je myšlena taková vytlačovací hlava, která umožňuje použití dvou nezávislých materiálů (filamentů), které je možné automaticky vyměňovat bez nutnosti jejich manuální výměny. Na trhu již existují řešení, která duální tisk podporují. K podávání materiálu do teplé části vytlačovací hlavy může být využita libovolná konstrukce z předchozí kapitoly, stejně tak je možná i jejich kombinace (např. přímý podavač pro první trysku a bowdenový pro druhou).

### 4.2.1 Duplikace

Patrně nejjednodušším způsobem, jak dosáhnout možnosti tisknout na 3D tiskárně z více tiskových strun současně, je duplikace samostatných trysek - takové řešení je vidět na Obr. 28. V tomto řešení došlo k úpravě pojezdového vozíku osy X. Vozík nyní nese dvě totožné trysky, které se však obvykle využívají samostatně. Takové řešení logicky vyžaduje dvojnásobný počet komponentů potřebných k realizaci jednoho extruderu. V konstrukci jsou tedy použity dva samostatné chladiče a každý z nich je osazen samostatným ventilátorem. Poměrně prostorově náročné je využití dvou nezávislých krokových motorů, také rozteč trysek je v tomto případě poměrně velká, čímž dochází ke zmenšení maximálního tiskového prostoru. Dále dojde k navýšení celkové hmotnosti vytlačovací hlavy (je však možnost umístit podávací mechanismus mimo vytlačovací hlavu na nepohyblivou část tiskárny) o jeden krokový motor (u nejpoužívanějších motorů přibližně 300 gramů).



Obr. 28: Duplikace samostatné trysky [29]

Dalším úskalím těchto řešení je, že se obě trysky nachází ve stejné výšce. Po přepnutí z jedné trysky na druhou může z předchozí trysky vytékat menší množství materiálu, které může následně negativně ovlivnit další průběh tisku. Tomuto negativnímu jevu je však možné částečně předcházet (např. čištěním trysek během tisku o kartáč, správnou retrakcí), narůstá zde však složitost řízení procesu. Důležité je také správné nastavení obou trysek v ose Z.

Samozřejmou výhodou je přítomnost dvou na sobě nezávislých trysek, přičemž v každé z nich může být zaveden různý materiál s různou teplotou tavení, což v případě použití jedné trysky pro podpurný materiál nabízí možnost tisku složitějších objektů apod. Použitím tohoto řešení je možné počet trysek zvyšovat i o více než jednu trysku, avšak vždy s nárůstem hmotnosti a zmenšením maximálního tiskového prostoru tiskárny.

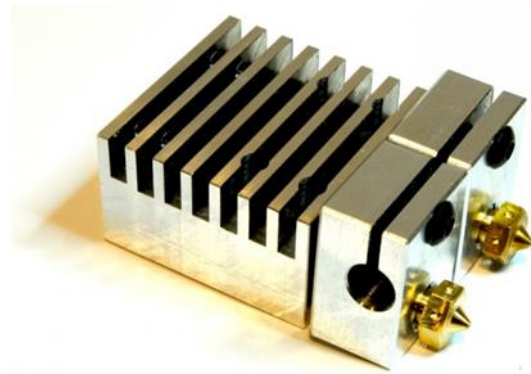
#### **4.2.2 Dvě nezávislé trysky v jednom chladiči**

Další možné řešení duálních vytlačovacích hlav je vidět na Obr. 29 a Obr. 30. Dvě nezávislé trysky volitelných průměrů jsou aretovány v topných blocích, které jsou nezávisle na sobě vytápěny vlastními topnými tělesy. Heatbreak je jedním koncem aretován v topném tělese a druhým koncem v chladiči tvaru kvádru, který je celistvý, osazen ventilátorem a je společný pro obě trysky. O přísun materiálu se starají dva krokové motory, které jsou nezávislé, a každý z nich podává materiál právě pro jednu trysku.

Klady i zápory tohoto řešení jsou totožné s řešením předchozím. Rozdílné je využití jednoho celistvého chladiče pro obě dvě trysky, který je osazen pouze jedním ventilátorem. Ve srovnání s předešlým řešením je rozteč trysek menší.



Obr. 29: Duální hlava tiskárny Felix 3.1 [30]

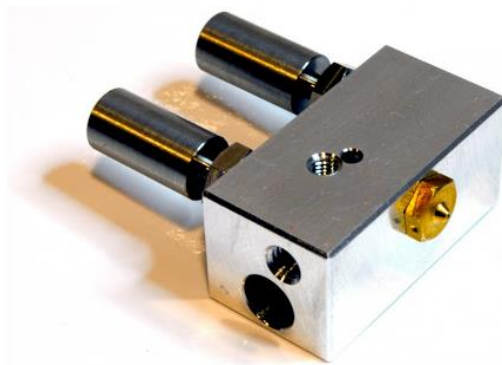


Obr. 30: Duální vytlačovací hlava Chimera [17]

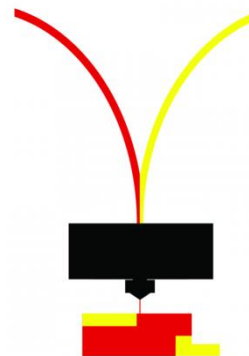
#### 4.2.3 Jedna tryska pro dva filamenty

Tento koncept využívá k tisku ze dvou filamentů jednu trysku, do které jsou přiváděny dva filamenty (viz Obr. 31), a to společně nebo samostatně. Prakticky je toto řešení vhodné pouze pro míchání (případně střídání, dle nastavení ve sliceru) dvou barev stejného materiálu, jelikož různé materiály mají ve většině případů různé teploty tavení.

Využitím tohoto konceptu, stejně jako v předchozím řešení, narůstá hmotnost o váhu jednoho krokového motoru. Výhoda řešení s pouze jednou použitou tryskou spočívá v tom, že nedochází k zmenšení maximálního tiskového prostoru tiskárny. Zároveň odpadá problém se zadrháváním nepoužívané trysky o tisknutý objekt.



Obr. 31: Vytlačovací hlava Cyclops [17]





#### 4.2.4 Manuální zavádění během tisku

S dalším řešením přišla česká společnost Prusa Research s.r.o., která pro tento účel speciálně upravila firmware Marlin. Při použití tohoto postupu je nejprve nutné běžně vygenerovat G-kód, poté vstoupit do webové aplikace a tam G-kód nahrát. V této aplikaci se dále nastaví, v jakých vrstvách má ke změně barvy dojít a upravený G-kód se znovu stáhne.

Při tisku dojde ve vrstvě, která byla předem definována, k zastavení tisku a vytlačování materiálu. Vytlačovací hlava odjede mimo plochu tisku a zvukový signál upozorní, že je třeba zavést nový filament. Veškerá komunikace probíhá přes LCD displej (viz Obr. 32), na kterém následně uživatel potvrdí, zda již z trysky vychází čistý nový filament. V případě, že je materiál vycházející z trysky ještě smíchaný s předchozím filamentem, dojde k dalšímu vytlačení. Tak až do té doby, než z trysky vychází čistý materiál. Po potvrzení se vytlačovací hlava vrátí na poslední pozici a pokračuje v tisku.



Obr. 32: LCD displej při výměně filamentu [31]

Toto řešení je však, stejně jako předchozí řešení jedné trysky pro více materiálu, vhodně použitelné spíše pro vícebarevný tisk ze stejných materiálů, jelikož topné těleso je nahříváno na stále stejnou teplotu. Nehodí se tedy pro tisk více různých materiálů. Další nevýhodou je nemožná automatizace tisku, jelikož filament je třeba vždy zavádět manuálně. Při výměně filamentu je vždy nutné manuálně vytlačit zbylý předešlý materiál z teplé části vytlačovací hlavy, což lze považovat za plýtvání materiálem. Plusem tohoto řešení s jednou tryskou je stejně jako v předchozím případě fakt, že nezmenšuje maximální tiskovou plochu tiskárny. [31]

### 4.3 Porovnání jednotlivých řešení

Následující tabulka (Tab. 1) porovnává vlastnosti zmíněných provedení podávacího mechanismu, tedy zpřevodovaného, přímého a bowdenového podavače.

	VÝHODY	NEVÝHODY
<b>Zpřevodovaný podavač</b>	Větší krouticí moment (vhodné pro 1,75 i 3 mm filament)	Rozměry Složitější konstrukce
<b>Přímý podavač</b>	Rozměry Jednoduchá konstrukce	Menší krouticí moment (spíše pro filament 1,75 mm)
<b>Bowden extruder</b>	Odlehčení vozíku s vytlačovací hlavou Teoreticky lepší vlastnosti tisknutého objektu	Odpor přívodové trubičky Nevhodné pro některé materiály

Tab. 1: Porovnání řešení podávacích mechanismů

V další tabulce (Tab. 2) jsou porovnána jednotlivá dostupná řešení duálních vytlačovacích hlav. Konkrétně se jedná o duplikaci, dvě nezávislé trysky v jednom chladiči, jednu trysku pro dva filameny a manuální zavádění během tisku.

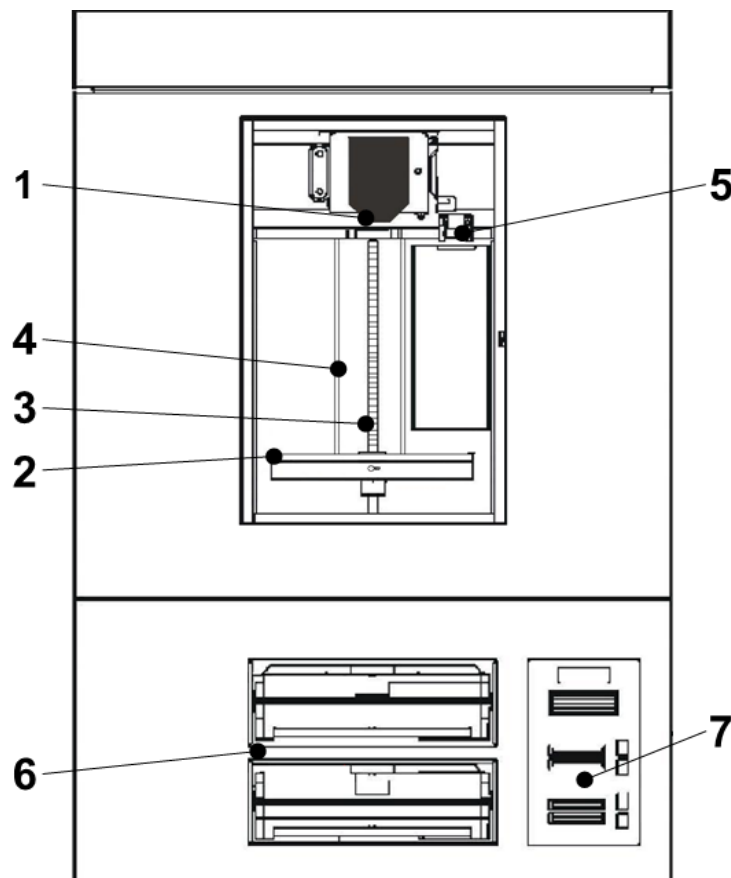
	VÝHODY	NEVÝHODY
<b>Duplikace</b>	Jednodušší konstrukční řešení Dvě nezávislé trysky	Dva chladiče, dva ventilátory Hmotnost dvou motorů Rozteč trysek Trysky ve stejné výšce
<b>Dvě nezávislé trysky v jednom chladiči</b>	Menší rozteč trysek Jeden chladič a ventilátor pro dvě trysky Dvě nezávislé trysky	Hmotnost dvou motorů Trysky ve stejné výšce
<b>Jedna tryska pro dva filameny</b>	Jedna tryska nezmenšuje tiskový prostor Absence druhé trysky (nepřekáží při tisku)	Hmotnost dvou motorů Jen pro dva stejné (podobné) materiály
<b>Manuální zavádění během tisku</b>	Jednoduché řešení (pouze firmwarová úprava) Hmotnost Absence druhé trysky (nepřekáží při tisku)	Manuální zavádění (nemožnost automatizace) Jen pro dva stejné (podobné) materiály Plýtvání při výměně

Tab. 2: Porovnání řešení dostupných duálních vytlačovacích hlav

## 5 STÁVAJÍCÍ STAV KONSTRUKCE 3D TISKÁRNY

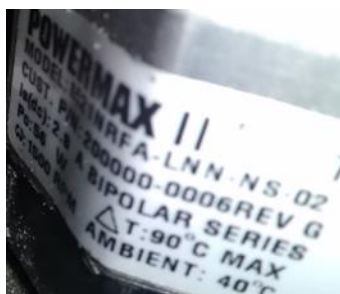
Prvním krokem bylo zjištění stavu stávající 3D tiskárny, na jejíž konstrukci má být tato práce realizována. Jednalo se o tiskárnu pracující na principu FDM, která disponovala dvěma vytlačovacími hlavami a umožňovala tak tisk se dvěma materiály. Na tiskárně, vzhledem k zřejmě poškozené a již částečně rozebrané vytlačovací hlavě, nebylo možné tisknout. Souřadný systém této konstrukce byl kartézského typu.

Zařízení (o rozměrech přibližně 900 x 700 x 1000 mm) s uzavřenou konstrukcí (viz Obr. 33) původně nabízelo tiskový prostor o rozměrech max. 203 x 203 x 305 mm, kde přístup k tiskovému prostoru zajišťovala dvířka. V tomto prostoru se nacházela původní vytlačovací hlava (1) pro 2 materiály. O posun osy Z, po které se pohybuje stavěcí podložka (2) se staraly závitové (3) a vodící tyče (4). V rohu tiskového prostoru je umístěn kartáček (5) pro očištění trysky vytlačovací hlavy při výměně materiálů. Ve spodní části jsou umístěny otvory (6) pro dvě cívky s filamenti a ovládací panel s displejem (7). Uzavřenou část tiskárny bylo možné vytápět topnými odporovými tělesy s ventilátory a zajistit tak požadovanou teplotu uzavřeného tiskového prostředí.



Obr. 33: Schéma stávající konstrukce

Kinematiku celé tiskárny obstarávaly 3 krokové motory - 2 s lanovým třecím převodem v osách X a Y a jeden pro osu Z, který přes řemen poháněl 3 závitové tyče. Po sejmutí krytu tiskárny bylo i přes špatný přístup možné ze štítku odečíst název (model) krokového motoru a jeho parametry (viz Obr. 34 a Obr. 35). Záměrem bylo krokové motory os X, Y a Z zachovat.



Obr. 34: Štítek krokového motoru

<b>POWERMAX II 1,8° STEP MOTOR</b>		
MODEL: M21NRFA-LNN-NS-02		
CUST P/N: 200000-0006REV G		
Is(dc): 2,8 A BIPOLAR SERIES		
Po: 56 W	ΔT: 90°C MAX	Vs(dc): 35 V
Ω: 1500 RPM	AMBIENT: 40°C	DATE: 010351194

Obr. 35: Přepsaný štítek krokového motoru

Filament o průměru 1,75 mm byl k vytlačovací hlavě přiváděn ze zásobníků ve spodní části konstrukce tiskárny (viz Obr. 33.6). Od zásobníku byl filament veden v teflonových (PTFE) trubičkách, které k vytlačovací hlavě přivádí ohebná trubice ze směru osy Y.

Komunikace s tiskárnou probíhala pomocí ethernetu. Řídící deska (viz Obr. 36) se zdrojem a dalšími obvody sloužícími k řízení tisku se nachází na zadní straně tiskárny. Po podrobnějším prozkoumání bylo zjevné, že původní komponenty, jako je např. procesor či budiče krokových motorů, budou těžko použitelné pro nový návrh řízení tiskárny.



Obr. 36: Původní řídicí deska 3D tiskárny

## 6 NÁVRH KONSTRUKCE VYTLAČOVACÍ HLAVY

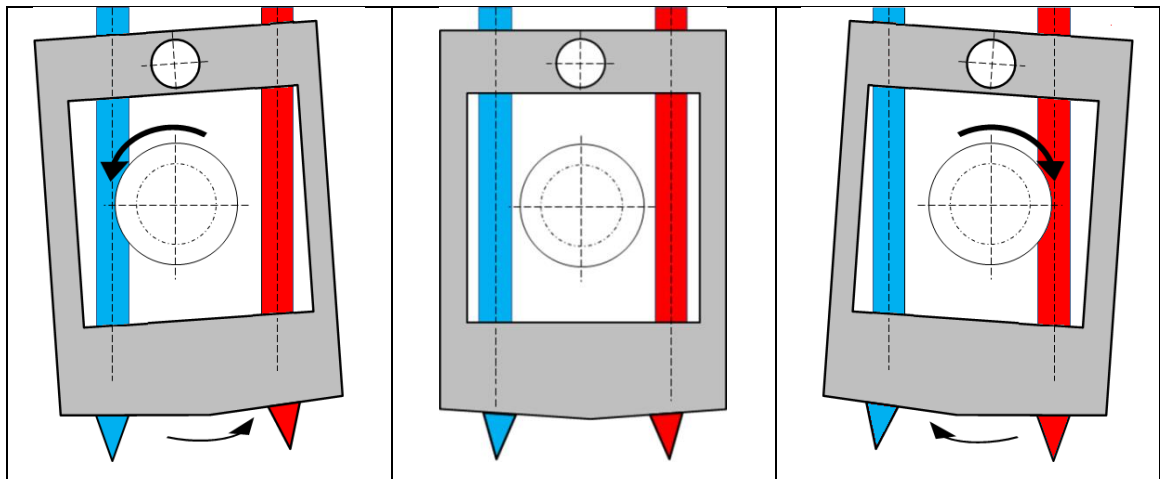
Vzhledem k vlastnostem výše uvedených dostupných řešení duálních vytlačovacích hlav, které byly porovnány v kapitole 4.3 - Tab. 2, bylo rozhodnuto o použití vlastního návrhu konstrukce vytlačovací hlavy. Některá řešení sice nabízela možnost tisku s více materiály, jejichž výměna probíhá automaticky bez nutnosti fyzické přítomnosti obsluhy, avšak za cenu použití dalšího krokového motoru, s jehož použitím narůstá hmotnost vytlačovací hlavy.

Záchytným bodem pro konstrukci nové vytlačovací hlavy byl zvolen původní vozík vytlačovací hlavy nacházející se na vodičích tyčích osy X. K uchycení hlavy na vozík jsou na vozíku 4 otvory se závitem M5 (viz Obr. 37), roztečí 20,3 mm a vzdáleností v ose X 127 mm. Otvory se nacházejí pod úrovní vodičích tyčí.



Obr. 37: Původní vozík na vodičích tyčích osy X

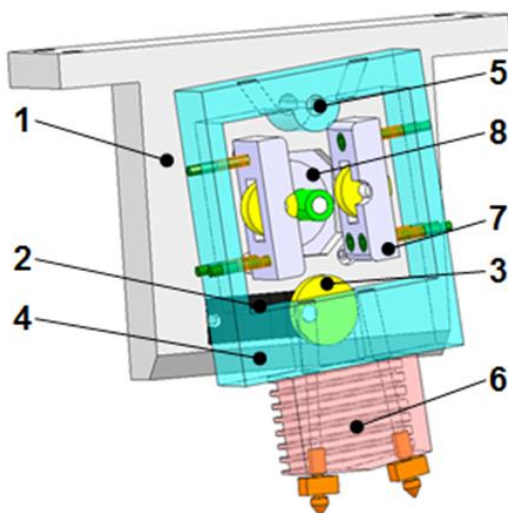
Aby došlo k úspoře na hmotnosti vytlačovací hlavy, bylo záměrem použít konstrukci s jedním krokovým motorem pro podávací mechanismus a servomotorem (hmotnost jednoho standardního krokového motoru pro posuv filamentu je přibližně 300 g, zatímco hmotnost servomotoru je zhruba desetkrát nižší). Servomotor v momentě žádané změny filamentu překlápí vytlačovací hlavu, přitlačí k podávacímu kolu druhý filament a původní filament oddálí tak, aby nedocházelo k jeho obrušování. Princip je znázorněn na Obr. 38, kde je na prostředním obrázku stav vytlačovací hlavy v neutrální poloze. Na krajních obrázcích je znázorněno, jak dochází k překlápění celé vytlačovací hlavy.



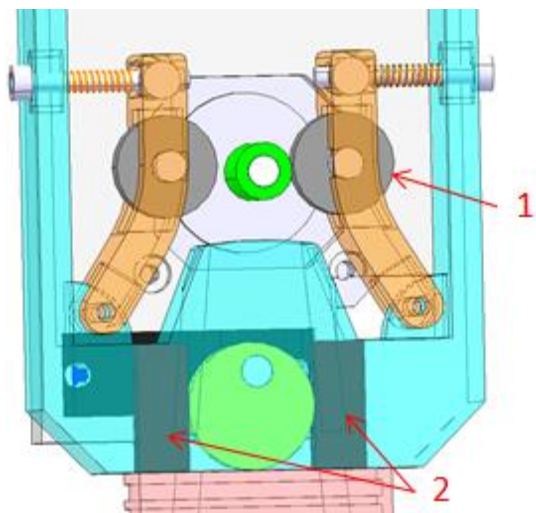
Obr. 38: Uvažovaný princip překlápění vytlačovací hlavy

Dále bylo třeba rozhodnout o tom, jaký průměr filamentu bude pro návrh použit. Ve většině případů je při nákupu možnost výběru ze dvou možných průměrů filamentu, konkrétně 1,75 a 3 mm. Pro toto řešení byl zvolen průměr filamentu 1,75 mm, a to z několika důvodů. Filament menšího průměru je možné lépe a snáze ohýbat při jeho přivádění do vytlačovací hlavy. Ze zkušenosti dosahuje výrobci dodávaný filament o průměru 1,75 mm konstantnějšího průměru v celé délce než materiál průměru 3 mm, což je důležité pro přesné dávkování materiálu. Vzhledem k zvolenému průměru drátu, rozměrům, dostupnosti a jednoduchému řešení byl jako podávací mechanismus zvolen přímý podavač.

### 6.1 Varianta 1.1



Obr. 39: Návrh naklápěcí vytlačovací hlavy - varianta 1.1



Obr. 40: Úprava přítlaku filamentu

Na Obr. 39 je první koncept vytlačovací hlavy s naklápěním. Skládá se z těla (1), které je pevně připojeno k původnímu vozíku tiskárny. O naklápění celé hlavy se stará servomotor (2), který je osazený excentrickým kolem (3) a pevně umístěn v těle. Při potřebné změně filamentu dojde k otočení excentrického kola v drážce naklápěče (4), čímž dojde k natočení celého naklápěče, který je přes čep (5) uložený ve 2 ložiskách a otáčí se oproti tělu. Teplá část (6) vytlačovací hlavy (viz. kapitola 2.3) je pevně spojena s naklápěčem, který je z obou stran osazen přítlaky (7) filamentu. Potřebná síla přítlaku je vyvozena pružinami působícími na držák s jednořadým kuličkovým ložiskem, které přitlačuje filament k podávacímu kolu. Podávací kolo je poháněno krokovým motorem (8), který je pevně umístěn v těle.

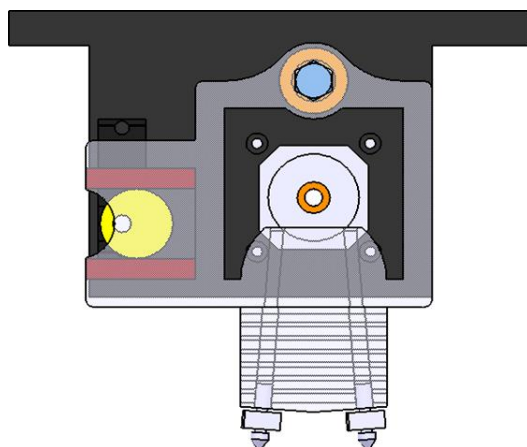
Na výše uvedeném návrhu bylo nutné upravit přítlak filamentu k podávacímu kolu. Původní návrh počítal s třemi pružinami na každé straně. Při této koncepci by zcela jistě docházelo k zasekávání a přičení pružin a potřebný přítlak ložiska na filament by tak byl malý, případně žádný.

Z toho důvodu byla provedena úprava přítlaku filamentu (viz Obr. 40.1). Přítlak je stejně jako v předchozí variantě vyvozován pružinou. Pružina tlačí na držák s ložiskem, které přitlačuje filament k podávacímu kolu. Držák ložiska je rotačně uložen ve spodní části naklápěče. Dále byla rozšířena drážka pro excentrické kolo (viz Obr. 40.2), do které byly, pro její přesné vymezení, vloženy dvě vložky. Tyto vložky se před sestavením frézováním upraví na přesný rozměr excentrického kola, kterého není možné vytištěním na 3D tiskárně dosáhnout.

## **6.2 Varianta 1.2**

Záměrem dalšího kroku bylo zkrácení rozměru vytlačovací hlavy v ose Z, čímž by došlo k navýšení maximálního možného tiskového prostoru. Dosavadní výška celé vytlačovací hlavy byla přibližně 140 mm (od vozíku ke špičce trysky).

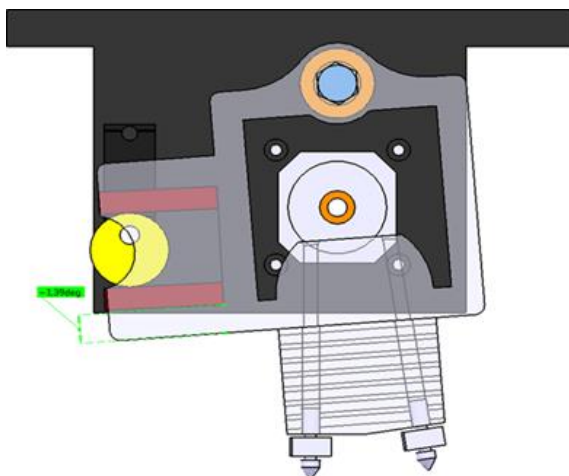
Doposud byla vytlačovací hlava symetrická, jelikož otvor pro čep, krokový motor s podávacím kolem, servomotor a celá teplá část vytlačovací hlavy byly v jedné linii osy Z. Díky tomu došlo při natočení excentrického kola (do jedné nebo druhé krajní polohy) k naklonění naklápěče vždy o stejný úhel a osa otvoru pro vedení filamentu svírala se stavěcí podložkou pravý úhel. Zkrácení vytlačovací hlavy bylo možné odebráním a změnou umístění jednoho z komponentů této linie. Jediným přemístitelným komponentem byl servomotor s excentrickým kolem.



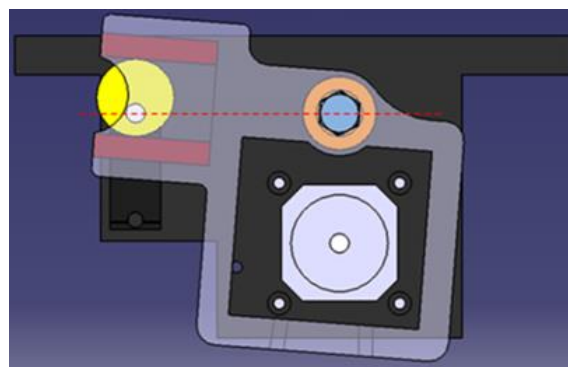
Obr. 41: Přemístění servomotoru, verze 1

Z výše uvedených důvodů byl servomotor přesunut do levé části těla vytlačovací hlavy (viz Obr. 41). Po tomto přesunu přestala být hlava symetrická. Ze simulace verze 1 bylo zjištěno, že při otočení excentrického kola o  $90^\circ$  došlo k natočení naklápěče oproti tělu vytlačovací hlavy o  $4,235^\circ$ . Otočením excentrického kola o stejnou hodnotu opačným směrem došlo k otočení o  $4,494^\circ$ .

V druhé verzi bylo zvažováno natočení drážky pro excentrické kolo o takový úhel oproti vodorovné poloze, aby mohly být osy otvorů pro vedení filamentu odkloněné o stejný úhel. Simulací bylo zjištěno, že dosáhnout takového stavu je možné natočením drážky pro excentrické kolo o  $1,39^\circ$  (viz Obr. 42). Třetí verze uvažovala přemístění servomotoru do takové polohy, aby vzdálenost os otáčení čepu a servomotoru byla nulová v ose Z (viz Obr. 43). Stejně jako v předchozí verzi by mohly osy otvorů pro vedení filamentu zůstat symetrické.



Obr. 42: Přemístění servomotoru, verze 2



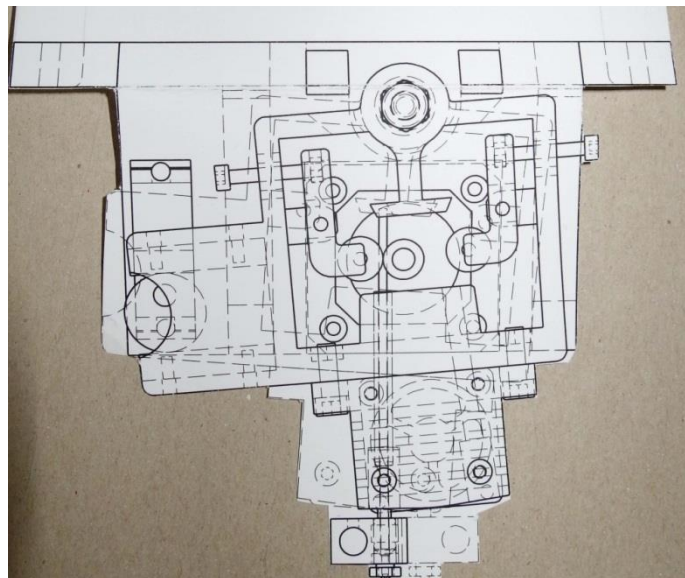
Obr. 43: Přemístění servomotoru, verze 3



Pro další postup byla vybrána verze 1 s rozdílným natočením os otvorů pro vedení filamentu v chladiči. Jelikož došlo k přemístění servomotoru do levé části vylačovací hlavy, bylo nutné přemístit i stávající přítlaky filamentu k podávacímu kolu. Ty byly navrženy na obdobném principu jako v předchozím případě, avšak otočná vazba byla přesunuta do prostřední části držáku ložiska (viz Obr. 49). Pro lepší vedení filamentu byly nad podávacím kolem domodelovány dva výstupky s otvory.

### 6.2.1 Realizace varianty 1.2

Pro ověření správnosti některých rozměrů byl nejprve vytvořen papírový (viz Obr. 44) model zachycující vylačující hlavu v polohách pro obě trysky (plná a přerušovaná čára).



Obr. 44: Papírový model vylačovací hlavy

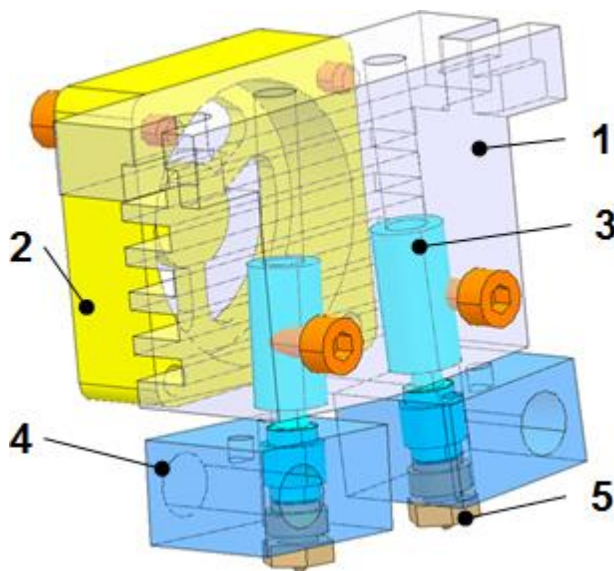
Jelikož všechny potřebné rozměry souhlasily, bylo třeba připravit určité části pro 3D tisk a vytisknout je. Tisk probíhal v laboratoři katedry na zařízení Dimension SST 768 a jako materiál bylo použito ABS. Konkrétně se jednalo o části:

- Naklápěč
- Tělo
- 2x držák ložiska pro přítlak filamentu

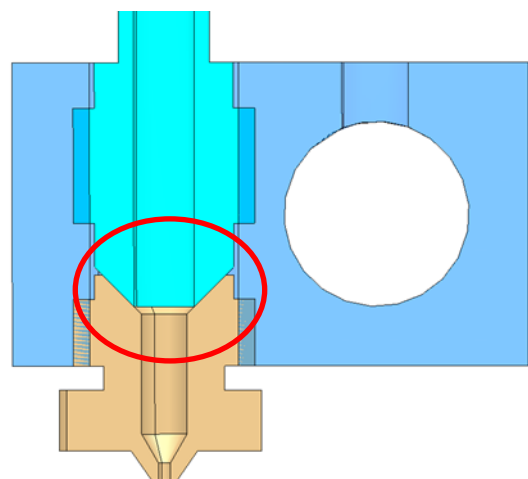
Další díly teplé části vylačovací hlavy a části mechanismu naklápění bylo nutné vyrobit. Díly byly navrženy z volně dostupných dokumentů komunity RepRap,

upraveny na základě vlastních zkušeností a dispozic strojů a nástrojů laboratoře katedry. Sestava teplé části je na Obr. 45. Hliníkový chladič s žebry (1) je osazen ventilátorem (2) o rozměrech 30 x 30 mm. Otvory v horní části chladiče přivádějí filament v teflonové trubičce až do nerezového heatbreaku (3), který je v chladiči aretován šroubem, jímž je možné před tiskem regulovat výšku trysky v ose Z. Heatbreak je závitem spojen s topným blokem (4), v němž je zároveň našroubována i mosazná tryska (5). Teflonová trubička byla k přívodu zvolena především vzhledem k její vysoké tepelné odolnosti (až 260° C) a také dostupnosti potřebného průměru. [32]

Na Obr. 46 je detail přechodu mezi heatbreakem a tryskou. S cílem zamezit úniku taveniny v místě tohoto přechodu byla jejich společná dosedací plocha navržena jako kuželová.



Obr. 45: Teplá část vytlačovací hlavy



Obr. 46: Detailní řez přechodu  
heatbreak - tryska

Materiál vložky mechanismu (mosaz) byl volen tak, aby nedocházelo k zadírání excentrického kola v mechanismu. Teflon pro excentrické kolo byl volen z důvodu jeho dobrých kluzných vlastností a zároveň proto, aby se při první montáži kola zařízlo ozubení vystupující hřídele servomotoru do otvoru excentrického kola a nedocházelo tak k jeho prokluzu. Díly byly vyrobeny v prostorách laboratoře katedry na dostupných zařízeních a jednalo se o následující:

- Chladič (dural)
- 2x heatbreak (nerezová ocel)
- 2x topný blok (dural)
- 2x tryska (mosaz)
- Excentrické kolo (teflon)
- 2x vložka mechanismu (mosaz)

Zbylé části již bylo nutné zakoupit. Spojovací materiál byl pořízen v železářství, ložiska (626-ZZ pro uložení čepu a 623-ZZ pro přítlak) ve specializovaných prodejnách:

- Spojovací materiál 15 Kč
- 2x ložisko 623-ZZ 84 Kč
- 2x ložisko 626-ZZ 118 Kč

Další díly bylo nutné objednat z internetových obchodů. Mezi ně patří krokový motor NEMA SX17-1005LQCEF – jedná se o dvoufázový krokový motor se standardní délkou kroku  $1,8^\circ$  a možností mikrokrokování. Při jeho výběru se přihlíželo k dostupnosti a jeho parametrům, především potřebnému krouticímu momentu (viz Obr. 47).

Řada SX - příruba NEMA17							
Typ	Statický moment (Nm)	Jmenovitý proud (A)	Indukčnost (mH)	Odpor ( $\Omega$ )	Zbytkový moment (Nm)	Moment setrvačnosti rotoru (gcm <sup>2</sup> )	Hmotnost (kg)
	jmen. proud v obou fázích bipol. zap.	sériové / paralelní zapojení	sériové / paralelní zapojení	sériové / paralelní zapojení			
<b>SX17-1005LQCEF</b>	0,52	1 / -	14 / -	5,9 / -	0,022	54	0,3

D - motor s hřídelí na obě strany Motory na žlutém pozadí jsou určeny pro nové aplikace.

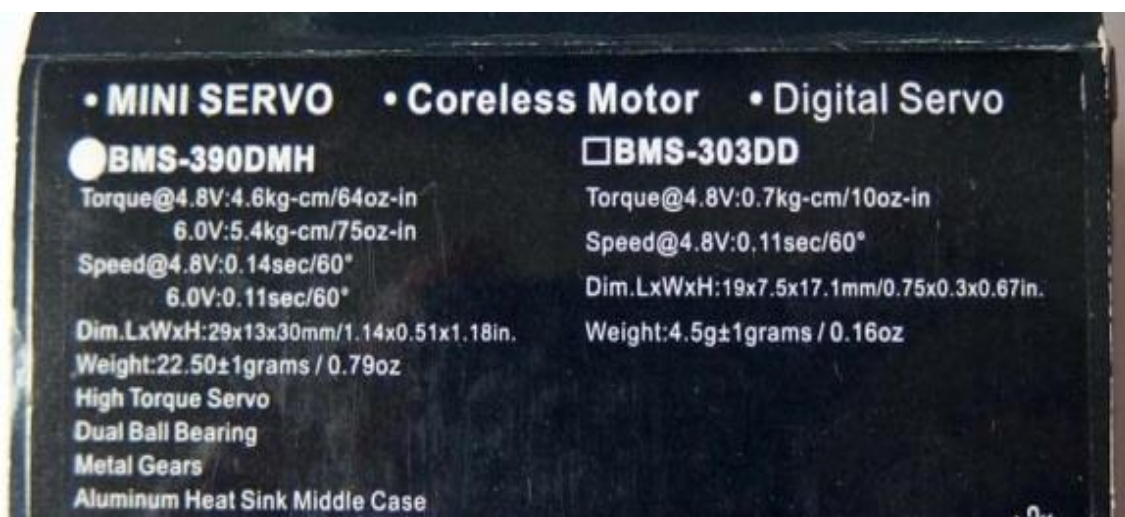
Délka kroku .....  $1,8^\circ$   
Tolerance kroku .....  $\pm 0,1^\circ$   
Izolační třída ..... NEMA B (130°C)

**Rozměry (mm)**

Typ	Hlavní hřídel	Délka		Vývody
	Ploška	L max.	L <sub>v</sub>	Počet
<b>SX17-1005LQCEF</b>	ano	40	740 (flexibilní)	4; konektor na konci vývodů - 2,54 mm Crimp Connector 1x4-Pin for Header Pins

Obr. 47: Parametry krokového motoru NEMA SX17-1005LQCEF [33]

Následně byl pro mechanismus naklápění vybrán servomotor Bluebird BMS-390 DMH. Jedná se o servomotor určený především pro modelářské účely, avšak na rozdíl od většiny modelářských servomotorů má kovová převodová kola. Jeho parametry jsou shrnuty na Obr. 48.



Obr. 48: Parametry servomotoru Bluebird BMS-390 DMH

Největším možným ventilátorem pro rozměry chladiče byl ventilátor o rozměrech 30 x 30 mm. Dále bylo objednáno podávací kolo s rozměry vhodnými pro hřídel výše zmiňovaného krokového motoru, dvě keramická topná tělesa a dva termistory. Celkem byly z internetových obchodů objednány tyto položky:

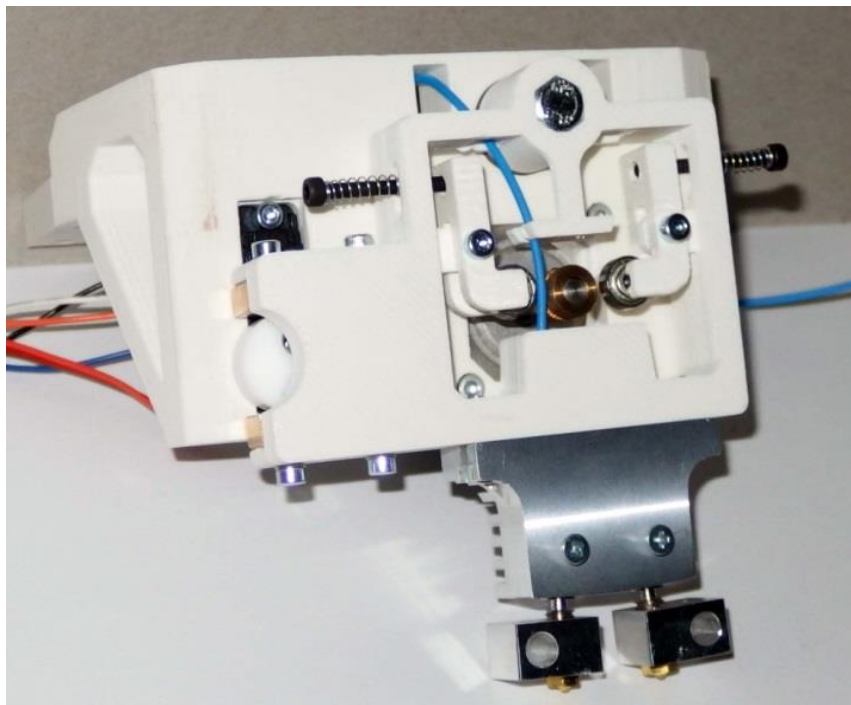
- Krokový motor NEMA SX17-1005 LQCEF	279 Kč
- Servomotor Bluebird BMS-390 DMH	790 Kč
- Podávací kolo	150 Kč
- Ventilátor SUNON FAN DC MC30101V2-A99 (30x30 mm)	159 Kč
- 2x keramické topné těleso 12V 40W	78 Kč
- 2x termistor NTC 100K, 1% (-40° C;300° C)	78 Kč

Pro řízení vytlačovací hlavy a stávajících motorů 3D tiskárny (dále viz kapitola 7) bylo třeba zakoupit:

- Arduino Mega 2560	529 Kč
- Ramps 1.4	279 Kč
- 3x budič krokového motoru SD28R5	2541 Kč
- budič krokového motoru DRV8825	172 Kč

Po zkompletování veškerých potřebných dílů bylo třeba mechanicky upravit některé otvory ve vytištěných modelech (např. otvor pro servomotor) a bylo možné vytlačovací hlavu kompletně sestavit (viz Obr. 49). První pokusy o vytlačování probíhaly bez tavení materiálu ve vytlačovací hlavě a filament byl vytlačován za studena bez účasti teplé části vytlačovací hlavy.

Testování otáčení excentrického kola v drážce bylo hodnoceno kladně. Naklápěč se polohoval do požadovaných pozic a servomotor měl dostatečnou sílu na to otáčet excentrickým kolem v drážce. Kladně se však již nedalo hodnotit provedení přitlaku filamentu k podávacímu kolu. Při čtenějším počtu překlápění se držák ložiska přičil a nepřítlačoval filament ideálním způsobem. S velkou pravděpodobností by při delším tisku a častém překlápění vytlačovací hlavy nebylo možné zaručit stálý a dostatečný přitlak. Z tohoto důvodu bylo nutné přitlak filamentu k podávacímu kolu upravit.



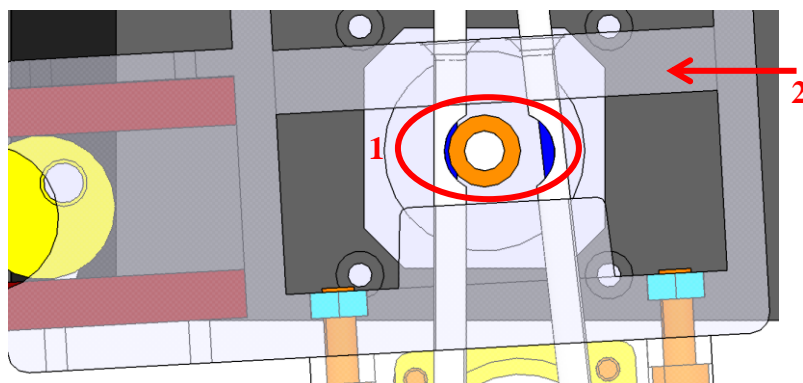
Obr. 49: Realizace varianty 1.2

### 6.3 Varianta 1.3

Po úvaze bylo rozhodnuto o ustoupení od dosud navrhovaného konceptu přitlaku. Vize nového návrhu byla taková, že filament bude od cívky až k podávacímu kolu přiveden v teflonové trubičce o vnitřním průměru 2 mm a vnějším průměru 4 mm. V místě styku s podávacím kolem bude teflonová trubička vykrojena přesně na průměr (viz Obr. 50.1) podávacího kola tak, aby umožnila styk filamentu s podávacím kolem a zároveň zamezila filamentu v odklonu. Pod podávacím kolem pokračuje teflonová trubička opět v plném průměru dále přes chladič až k heatbreaku.

Dalším novým prvkem pro zajištění přitlaku bylo pevné žebro umístěné na naklápěči (viz Obr. 50.2). Tímto žebrem procházela teflonová trubička a jeho účelem mělo být přesné vymezení polohy trubičky co nejbližší nad podávacím kolem tak, aby zamezila odklonu filamentu od podávacího kola a zároveň při odklonění oddálila teflonovou

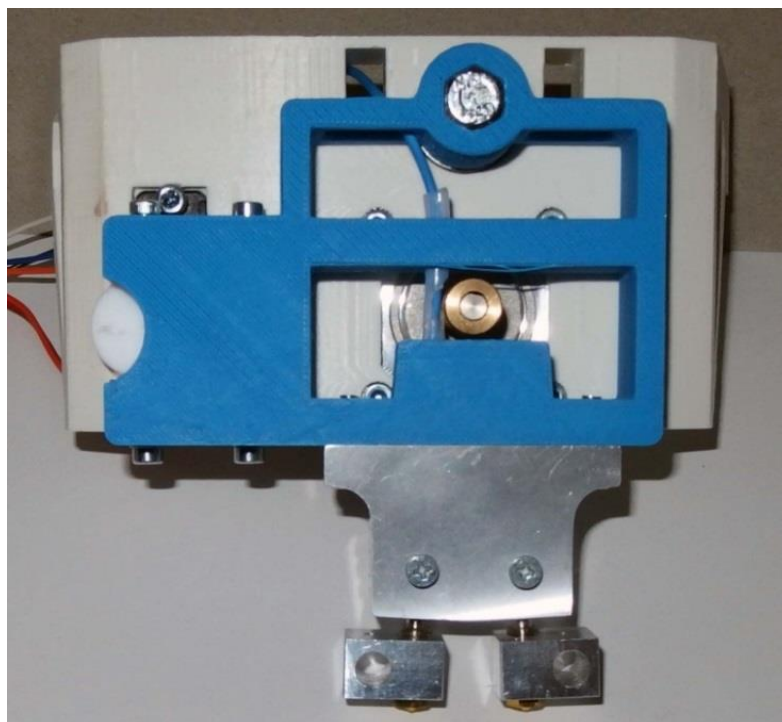
trubičku s filamentem od podávacího kola tak, aby nedocházelo k obrušování nepoužívaného filamentu.



Obr. 50: Detail vedení filamentu v teflonové trubičce

### 6.3.1 Realizace varianty 1.3

Oproti předchozí variantě došlo k změně pouze u naklápěče. Veškeré ostatní části zůstaly stejné, a tak bylo nutné na 3D tiskárně vytisknout pouze jeden model. Dále bylo třeba opatřit teflonovou trubičku požadovaných rozměrů. Ta byla zakoupena v kamenném obchodě s těsnícími prvky (cena 86 Kč/m). Po shromáždění těchto nových dílů bylo možné upravenou vytlačovací hlavu znovu sestavit (viz Obr. 51).

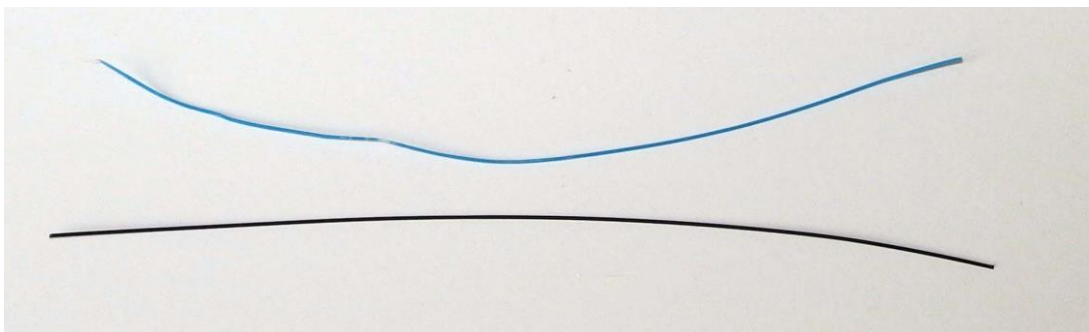


Obr. 51: Realizace varianty 1.3

Stejně jako v předchozím případě byla nejprve provedena zkouška samotného vytlačování filamentu bez teplé části vytlačovací hlavy. Posun filamentu se zdál být uspokojivý, bylo tedy možné vyzkoušet protlačit materiál přes trysku teplé části vytlačovací hlavy. Na naklápěč byl připevněn chladič s topnými bloky a tryskami. Do topného bloku byly připevněny termistory a topná tělesa.

Jako zkušební materiál pro protlačování bylo použito ABS, teplota pro zkušební tisk byla nastavena na 255° C. Po dosažení požadované teploty v topném bloku mohlo být provedeno první vytlačení materiálu přes trysku. Posuv materiálu přes podávací kolo byl konstantní a na filament byla vyvozována dostatečná síla, aby byl protlačen přes trysku vytlačovací hlavy. Obr. 52 ukazuje tvar a vzhled vytlačeného filamentu, který je konstantní, nevlíní se a při vytlačování směřoval přímo dolů.

Podle těchto vlastností bylo možné hodnotit správnost vytlačování navržené vytlačovací hlavy. V tomto případě byly vlastnosti vytlačeného materiálu hodnoceny velmi dobře se závěrem, že teplá část vytlačovací hlavy pracuje správně. Přesto, že byly obě trysky vyráběny stejným způsobem a jejich otvor byl vrtán vrtákem o průměru 0,4 mm, průměr vytlačovaného materiálu jednotlivých trysek se mírně lišil.

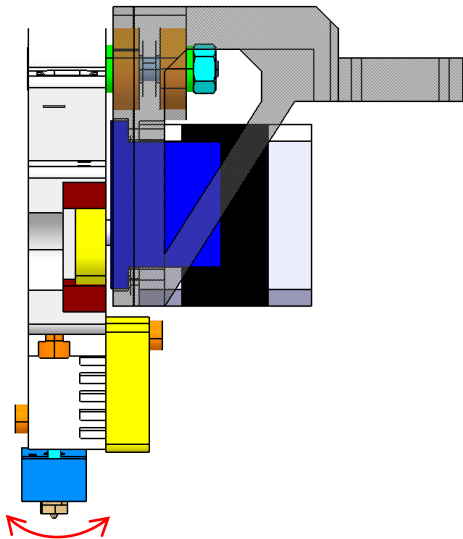


Obr. 52: První test vytlačení filamentu

Jelikož toto zkušební vytlačování probíhalo bez jakékoliv kalibrace vytlačovací hlavy (resp. počtu kroků krokového motoru na 1 mm posuvu), nelze přesně stanovit, jaký byl posuv filamentu. Při zvyšování rychlosti posuvu však již podávací kolo nebylo schopné filament posouvat, docházelo k jejímu prokluzování a drolení, čímž se zacpaly drážky podávacího kola a posuv materiálu už nebyl možný. Bylo tedy nutné vyhodnotit, co tento problém způsobuje.

Síla krokového motoru byla pro posuv filamentu dostatečná. Při ručním zavádění byl průchod filamentu tryskou také hladký. Problém byl shledán, obdobně jako u předchozí varianty, u přítlaku filamentu k podávacímu kolu. Vykrojená teflonová trubička

nezajišťovala při zvyšování otáček potřebný přítlak. Dalším úskalím přívodu filamentu v teflonové trubičce byl její odpor, který kladly především ohyby v místech přívodu do vytlačovací hlavy. Pro přívod filamentu do vytlačovací hlavy bylo nutné změnit jeho směr téměř o 90° (ze směru Y do směru Z) a právě v ohybu s ostrým úhlem (viz Obr. 54) docházelo v teflonové trubičce k deformaci, která kladla posuvu filamentu poměrně velký odpor.



Obr. 53: Vůle vytlačovací hlavy



Obr. 54: Oblast zlomu teflonové trubičky

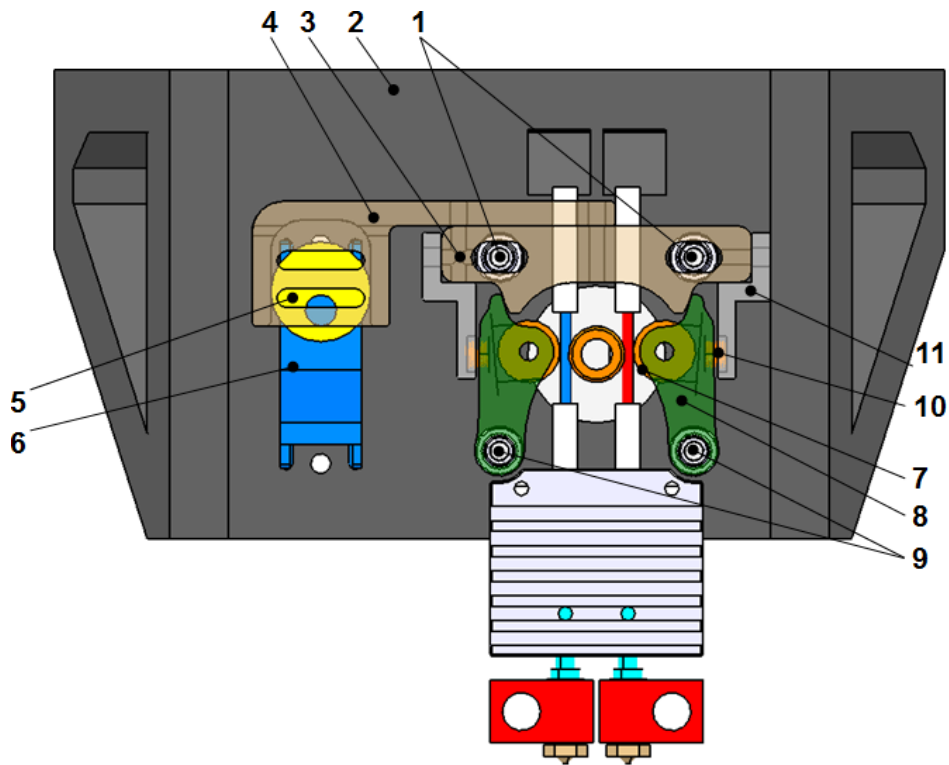
Při dalším zkoumání byla odhalena poměrně velká vůle v oblasti spodní části vytlačovací hlavy (viz Obr. 53), kterou způsobovalo dlouhé rameno od čepu naklapěče až k tryskám. Nešlo však o vůli čepu uloženého v ložiskách, ale o vůli způsobenou vlivem malé tuhosti materiálu naklapěče (v tomto případě byl naklapěč vytisknut z ABS). Dílem této vůle by velmi pravděpodobně docházelo k nepřesnému nanášení materiálu, a to především při pohybu v ose Y. Pro vymezení této vůle by bylo nutné naklapěč v tomto směru fixovat, což by bylo vzhledem k jeho pohybu poměrně složité.

Při ověřování této varianty se dospělo k závěru, že dané řešení nesplňuje kladené požadavky, a to především spolehlivost podávání filamentu, kde i nemalá závada může způsobit znehodnocení při několikahodinovém tisku. Kladně bylo hodnoceno řešení teplé části vytlačovací hlavy. Z výše uvedeného vyplynula nutnost hledání nového řešení.



## 6.4 Varianta 2.1

Při úvaze nad novým řešením byl kladen důraz na zachování již ověřených a funkčních principů z řešení předchozího (především oblast teplé části vytlačovací hlavy). Naopak úprava či změna konceptu byla nutná u problematických částí především v oblasti vůle ramene hlavy a přítlaku filamentu.



Obr. 55: Návrh varianty 2.1 – rovnovážná poloha

V návrhu nového řešení (viz Obr. 55) dochází k odstranění čepu uloženého v ložiskách, který doposud realizoval rotační pohyb. Ten je nahrazen dvojicí čepů (1) pevně umístěných v těle (2), po kterých se lineárně posouvá smykadlo (3). Smykadlo je pevně spojené s unášecem (4), jehož poloha se mění v závislosti na natočení excentrického kola (5) servomotoru (6). Přítlak filamentu k podávacímu kolu zajišťují z obou stran ložiska (7) použitá z předchozí varianty, ty jsou uložena v pákách (8). Páky, otáčející se na čepch (9), jsou tlačeny pružinou (10), pevně opřenu v držáku pružin (11). Držáky pružin se pohybují spolu se smykadlem. Při pohybu smykadla do jedné z krajních poloh tedy dojde k přítlačení jednoho filamentu k podávacímu kolu. Zároveň je přítlak druhého filamentu odkloněn pomocí výstupku ze smykadla a nedochází tak k obroušování nepoužívaného filamentu. Filament je těsně nad úroveň podávacího kola přiváděn v teflonové trubičce. Ta je v místě podávacího kola přerušena a pokračuje

těsně pod úrovní podávacího kola až k heatbreaku. Celý mechanismus je umístěn v těle, které je pevně spojeno s původním vozíkem.

Teplá část vytlačovací hlavy zůstala téměř nezměněná, jelikož se její řešení osvědčilo v předchozí variantě. Jediná úprava se týkala chladiče, jelikož v této variantě nedochází k naklápění vytlačovací hlavy, a tím pádem musí být osy otvorů pro vedení filamentů rovnoběžné s osou Z – chladič je nyní symetrický.

#### **6.4.1 Realizace varianty 2.1**

Pro realizaci bylo nutné na 3D tiskárně vytisknout následující díly:

- Tělo (viz Obr. 55.2)
- Unášeč (viz Obr. 55.4)
- Excentrické kolo (viz Obr. 55.5)
- 2x držák pružiny (viz Obr. 55.11)

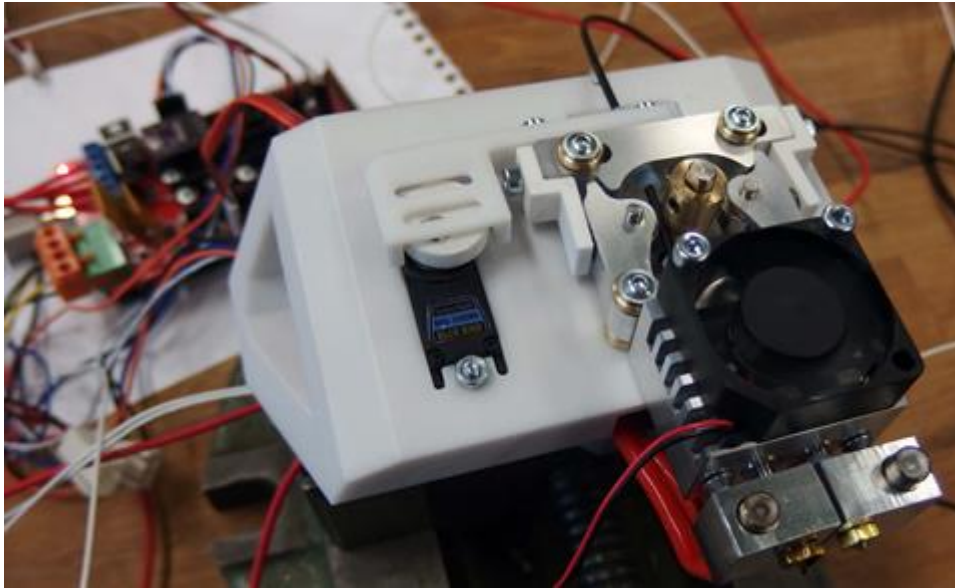
Dále byly z dostupných materiálů na dostupných zařízeních vyrobeny díly:

- 2x čep pro posuv smykadla (viz Obr. 55.1)
- Smykadlo (viz Obr. 55.3)
- 2x páka viz (Obr. 55.8)
- 2x čep pro páku (viz Obr. 55.9)
- Chladič

Čepy byly vyrobeny z mosazi, zbylé díly z duralu. Další díly, jako je servomotor, krokový motor, podávací kolo, ventilátor, heatbreaky, topné bloky, trysky, termistory a topná tělesa byly využity z předchozí konstrukce. Pro přítlak byla použita válcová tlačná pružina s délkou ve volném stavu 11 mm a tuhostí 1,2 N/mm.

Po zkompletování veškerých dílů bylo možné vytlačovací hlavu sestavit (viz Obr. 56) a zapojit pro zkušební provoz (viz kapitola 8.1). Vytlačovaný filament měl stejné parametry jako u předchozí varianty. Přítlak filamentu k podávacímu kolu, což byl jeden z hlavních problémů předchozího řešení, se jevil jako spolehlivý pro několikahodinový tisk. Přítlak byl dokonce příliš velký, čímž docházelo k zařezávání zubů podávacího kola do filamentu a mírnému zanášení podávacího kola. Dále, zřejmě vlivem velkého přítlaku pružin, při překlápění vytlačovací hlavy docházelo v místech, kde se servomotor přibližoval ke krajní poloze, k několika vteřinovému bzučení

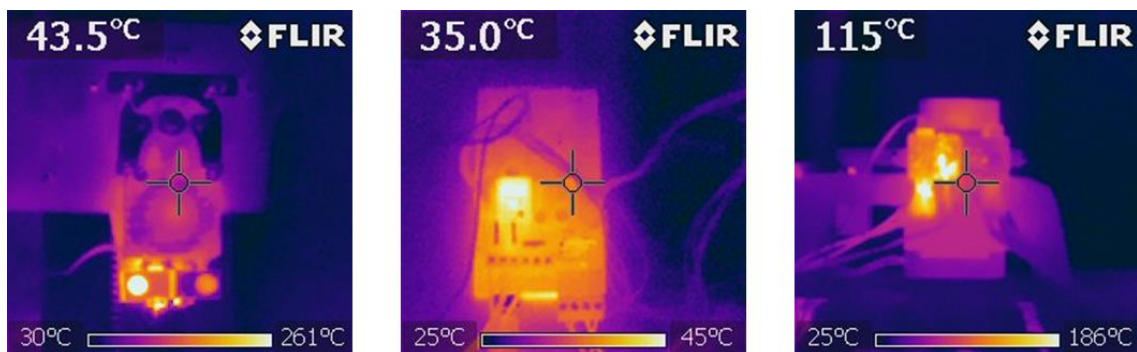
servomotoru, než se jeho poloha ustálila. Z těchto důvodů bylo nutné přítlaky filamentu upravit.



Obr. 56: Realizace varianty 2.1

Pro představu o rozložení tepla byla vytlačovací hlava změřena termokamerou. Cílem měření nebylo zjištění konkrétních teplot, ty je nutné brát pouze jako orientační. Záběry vytlačovací hlavy při nahřívání jednoho topného bloku na teplotu 255° C jsou na Obr. 57.

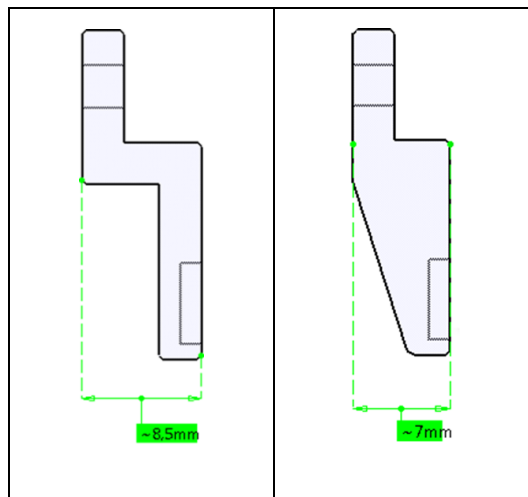
Snímek vlevo ukazuje rozložení tepla při nahřívání levého topného bloku. Díky spuštěnému ventilátoru je teplo z chladiče dostatečně odváděno a jeho teplota v horní části je dostatečně nízká. Na prostředním snímku je zabrána řídicí elektronika tiskárny, kde je nejteplejší částí oblast umístění budiče krokového motoru. Snímek vpravo zabírá vytlačovací hlavu zespodu, kde je vidět zvýšená teplota v oblasti krokového motoru podávacího mechanismu.



Obr. 57: Záběry z termokamery

## 6.5 Varianta 2.2

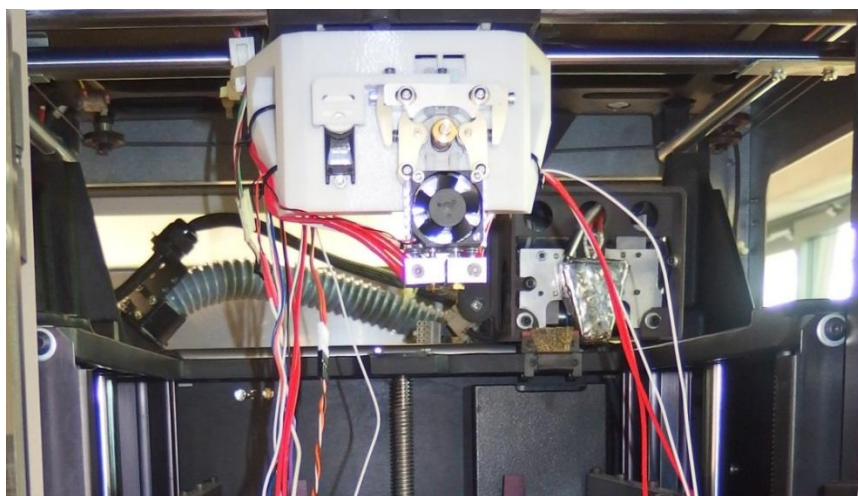
Problémem předešlé varianty byl příliš velký přítlak filamentu k podávacímu kolu. Z toho důvodu došlo ke zkrácení ramene držáku pružiny, zároveň došlo k drobné změně tvaru. Na Obr. 58 je porovnání předchozího (vlevo) a nového řešení (vpravo) držáku pružiny. Zkrácením ramene o 1,5 mm došlo k zmenšení síly vyvozuující přítlak filamentu k podávacímu kolu. Nový držák pružiny byl vyroben z duralu.



Obr. 58: Zkrácení ramene držáku pružiny

### 6.5.1 Realizace varianty 2.2

Vytlačovací hlava s novou úpravou držáků pružiny byla zkompletována (viz Obr. 59) a 4 šrouby připevněna k původnímu vozíku tiskárny. Konečná rozteč trysek byla 10 mm, přibližná hmotnost celé vytlačovací hlavy (včetně jejích komponentů) je 650 g. Kabely byly pomocí stahovacích pásek připevněny k tělu. Dále již následovalo zapojení a praktická realizace tisku, která je popsána v kapitole 8.



Obr. 59: Realizace varianty 2.2

## 6.6 Porovnání navržených variant

V této kapitole byl popsán postup vývoje dvou různých variant řešení, kde první varianta využívá k překlápění vytlačovací hlavy rotačního pohybu v čepu, kdežto druhá varianta využívá k překlopení lineárního posunu smykadla po čepch. Následující tabulka shrnuje porovnání jednotlivých konečných variant (tedy varianty 1.3 a varianty 2.2).

	VÝHODY	NEVÝHODY
VARIANTA 1	Odklopení nevyužívané trysky nad tisknutý objekt	Vůle v rameni vytlačovací hlavy Větší rozměr v ose Z Asymetrie hlavy
VARIANTA 2	Odstranění vůle v rameni vytlačovací hlavy Menší rozměr v ose Z Symetrie hlavy	Obě trysky v jedné úrovni

Tab. 3: Porovnání jednotlivých variant

Největším plusem prvně zmiňované varianty s rotačním překlápěním je to, že při překlopení vytlačovací hlavy dojde k odklonění aktuálně nevyužívané trysky. Ta je tak vyvýšena nad tisknutý objekt a nemůže se stát, že by o něj zavadila a jakýmkoliv způsobem ho znehodnocovala. Výhoda této konstrukce si však vybírá svou daň řadou negativů. V dolní oblasti trysek má dlouhé naklápěcí rameno nepříjemnou vůli, která by znehodnocovala tisk. Dále je výška této konstrukce v ose Z zhruba o 10 mm delší než v následující variantě. Poslední, avšak ne příliš zásadní nevýhodou je asymetrie hlavy způsobena natáčením excentrického kola v naklápěcím mechanismu mimo osu konstrukce.

Druhá varianta odstraňuje největší problém předešlé varianty změnou konstrukce z rotačního na lineární posuv, čímž dochází k odstranění vůle v rameni vytlačovací hlavy. S tím však přichází o výhodu předchozí varianty a obě trysky jsou nad tisknutým modelem ve stejné úrovni. Zároveň však dochází nejen ke zkrácení rozměru vytlačovací hlavy v ose Z, ale také k symetrii jednotlivých dílů vytlačovací hlavy.

## 7 NÁVRH ŘÍZENÍ 3D TISKÁRNY

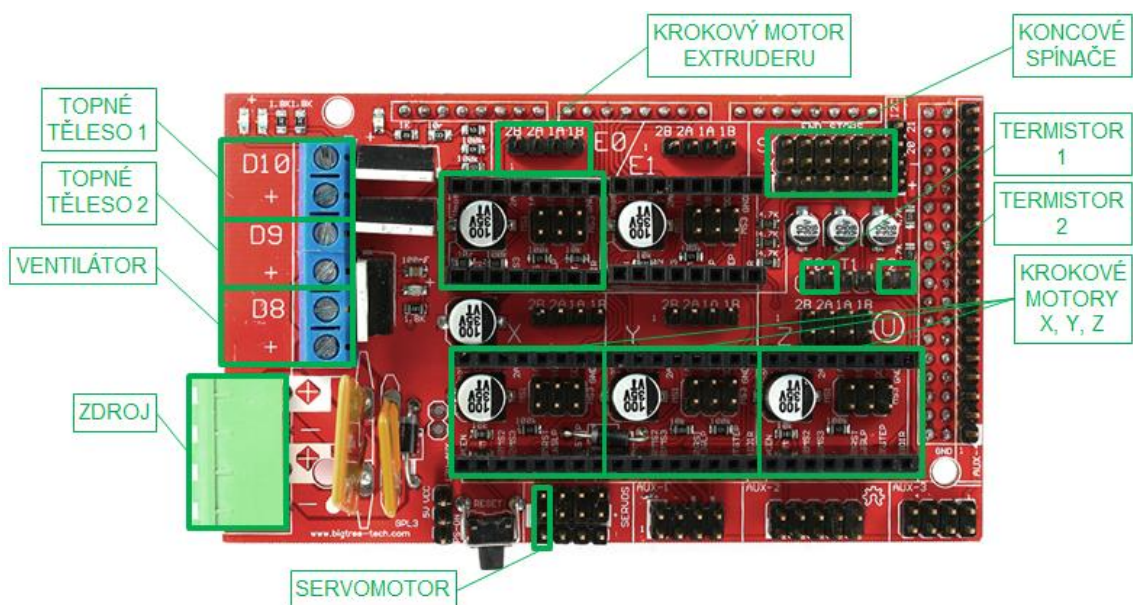
### 7.1 Výběr elektroniky

#### 7.1.1 Výběr řídicí desky

Při výběru řídicí desky bylo nutné dbát na to, aby nabízela možnost ovládání veškerých prvků navržených v konstrukci vytlačovací hlavy, tedy především podporu dvou nezávislých trysek a možnost připojení servomotoru. Z těchto důvodů byla pro řízení celé 3D tiskárny vybrána deska Arduino Mega 2560 spolu s přídatným modulem RAMPS 1.4. Tato varianta splňuje všechny zmíněné požadavky, je snadno dostupná a nabízí možnost případného dalšího připojení periférií do budoucna.

Výhodou tohoto řešení také je, že neobsahuje integrované budiče (drivery) krokových motorů. Integrované budiče jsou většinou určeny pro běžné motory tiskáren typu RepRap (zhruba do 2A ve špičce), což by na původní motory, které mají být zachovány, nestačilo. Dalším plusem použití externích budičů je možnost jejich jednoduché záměny v případě zničení. Pokud dojde k poškození integrovaného budiče, je jeho výměna obtížná, případně je nutné vyměnit celou řídicí desku.

Na Obr. 60 je zobrazené zapojení jednotlivých komponentů do RAMPS 1.4 pro konkrétní řešení této práce.

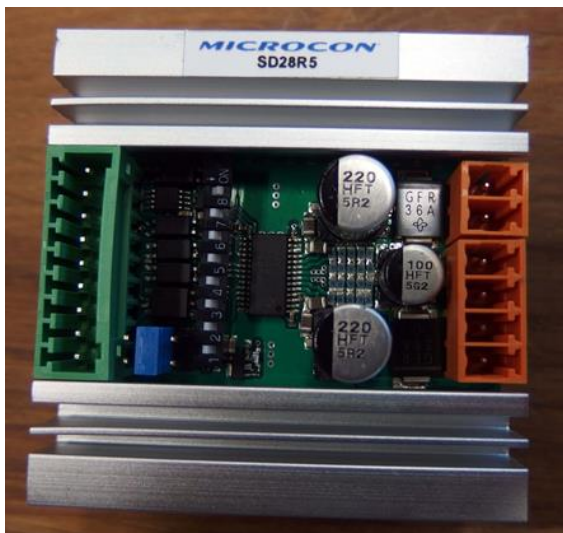


Obr. 60: Zapojení komponentů do RAMPS 1.4

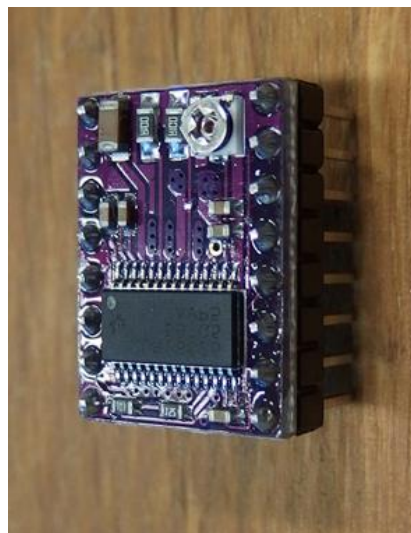
### 7.1.2 Výběr budičů krokových motorů

V konstrukci byly použity dva typy krokových motorů. Pro pohon os X, Y a Z byly ponechány tři krokové motory z původní konstrukce tiskárny (viz kapitola 5). Pro podávací mechanismus vytlačovací hlavy byl vybrán krokový motor NEMA SX17 1005LQCEF.

Pro vybraný krokový motor se jmenovitým proudem 1A (viz Obr. 47) je vhodným budičem Pololu DRV8825 (viz Obr. 62), který zvládá rozlišení až 1/32 kroku a je možné ho zapojit přímo do RAMPS. Pro původní motory s parametry na Obr. 35 byly z katalogu společnosti Microcon vybrány budiče SD28R5 (viz Obr. 61), které také nabízejí možnost dělení kroku až 1/32. [33]



Obr. 61: Budič SD28R5



Obr. 62: Budič Pololu DRV8825

### 7.2 Výběr firmwaru

Při výběru firmwaru je, podobně jako při výběru řídicí desky, nutné nejprve zvážit veškeré požadavky, které máme. Mnohé firmwary například nepodporují tisk s více tryskami. Dále je vhodné, aby firmware obsahoval přednastavené parametry pro danou řídicí desku, do které bude následně nahrán.

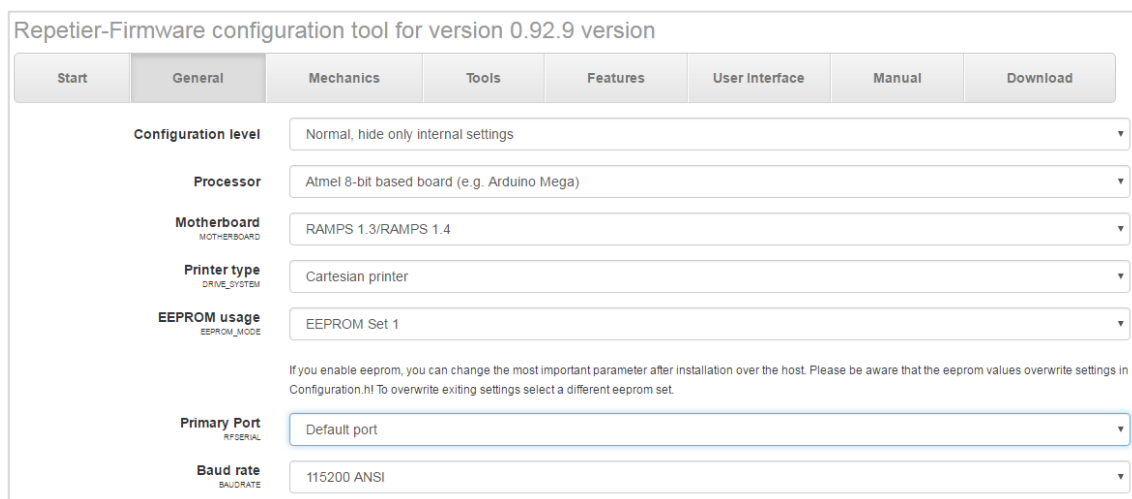
Pokud je firmware neustále vyvíjen, zdokonalován a vycházejí jeho nové verze, je to jeho velkou výhodou. Jelikož jsou firmwary šířeny pod volnou licenci, není na autory kladen žádný tlak k jejich vylepšování a některé z nich tak mohou být zastaralé.

Po zvážení možností byl vybrán Repetier-Firmware od německých vývojářů. Tento firmware podporuje řídicí desku Arduino Mega 2560 + RAMPS 1.4, připojení

servomotorů, tisk s více než jednou tryskou a umožňuje i připojení dalších volitelných komponentů. Jednou z hlavních výhod tohoto firmwaru je možnost jeho konfigurace ve webovém rozhraní [34], kde naprosto odpadá nutnost práce v programovacím jazyku a nakonfigurované soubory firmwaru pro danou tiskárnu si uživatel stáhne ve formátu ZIP. Další výhodou je, že od stejných vývojářů pochází i hostující program pro 3D tiskárny s názvem Repetier-Host (viz kapitola 7.4).

### 7.2.1 Konkrétní nastavení firmwaru

Konfigurace ve webovém rozhraní Repetier-Firmware je rozdělena do osmi částí (viz Obr. 63). Jedná se o části Start, General, Mechanics, Tools, Features, User Interface, Manual a Download.



Obr. 63: Konfigurace Repetier-Firmware přes webové rozhraní [34]

V prvním kroku *Start* je možné nahrát již dříve nakonfigurovaný soubor firmwaru, který chceme editovat. Toho lze využít ve chvíli, kdy má uživatel již funkční firmware, který chce jen drobně upravit (např. změna používaného termistoru). V případě, že chce uživatel konfigurovat čistý firmware od začátku, zvolí pouze *Next step* (další krok).

V druhé záložce *General* (obecné nastavení) bylo nejprve nutné přepnutí do expertního módu, dále byl zvolen typ procesoru (pro Arduino Mega 2560 volíme Atmel 8-bit based board) a vybráno bylo použití násuvného modulu RAMPS 1.4. Již předem definovaný byl typ souřadného systému – kartézský. Pro první fáze testování tiskárny byla vypnuta paměť EEPROM a následovalo zadání rozměrů tiskového prostoru na 200 x 200 x 200 mm. U ostatních nastavení byla ponechána defaultní volba.



Třetí záložka *Mechanics* se týká mechanické části tiskárny. Pro krokové motory jednotlivých os jsou zde voleny hodnoty, jako je jejich maximální rychlost, zrychlení či jerk, které byly pro prvotní testování ponechány na předdefinovaných hodnotách. Dále bylo vyrušeno zapojení koncových spínačů, které by v této fázi zkoušení mohly blokovat otáčení krokových motorů. Důležitou položkou u každého krokového motoru je kolonka *Resolution* (rozlišení), která udává, kolik kroků krokového motoru je potřeba pro posun o 1 mm. Tato hodnota se bude měnit při kalibraci posuvů tiskárny.

Ve čtvrté části *Tools* (nástroje) se definují parametry týkající se teplé části vytlačovací hlavy, mezi které patří minimální a maximální možné teploty pro různé případy tisku. Až do této chvíle probíhala konfigurace nezávisle na počtu použitých trysek. V této části byl tlačítkem *Add extruder* (přidat extruder) navolen počet trysek (extruderů) dané vytlačovací hlavy. V tomto případě byla přidána jedna tryska a v konfigurátoru k položce *Extruder 0* přibyla položka *Extruder 1*. Pro každý extruder lze v kolonce *Select commands* (vyber příkazy) nadefinovat sekvenci příkazů, které budou provedeny při výměně extruderů (viz kapitola 7.3), zároveň je pro každou trysku možné nastavit *offset* (odsazení), jehož hodnota se udává v počtu kroků krokového motoru na posuv o 1 mm. Následně byl pro každý extruder vybrán druh použitého termistoru a u druhého extruderu byl definován příslušný výstup RAMPS 1.4 pro druhý extruder. Nakonec bylo třeba vybrat kolonku *Invert motor direction* pro Extruder 1, čímž dojde k změně smyslu otáčení krokového motoru podávacího mechanismu při výměně extruderu a pro obě trysky definovat, že ventilátor chladiče je na výstupu D8 z RAMPS.

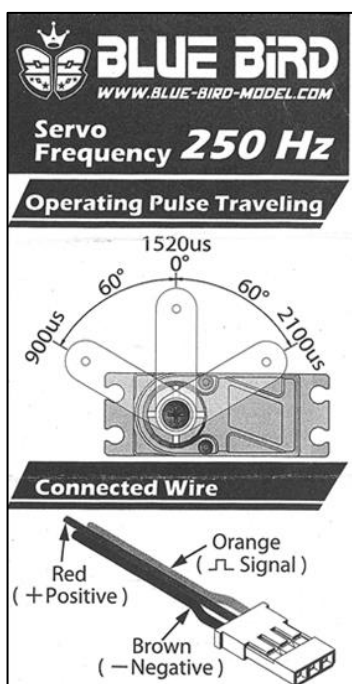
Pátá záložka *Features* (funkce) je v tomto případě důležitá především pro konfiguraci servomotoru. Po zaškrtnutí kolonky *Enable servo support* (povolit podporu serva) dojde k rozbalení nabídky *Servo configuration* (nastavení serva). V této nabídce byl pro ovládání servomotoru definován Digital pin 11.

Šestá záložka *User Interface* slouží ke konfiguraci uživatelského rozhraní, např. při připojení LCD displeje. V sedmé záložce *Manual Additions* lze do konfiguračního souboru připsat poznámky. Pro tuto tiskárnu nebyly funkce z šesté a sedmé záložky použity. V poslední záložce *Downloads* je možné stažení vygenerovaných konfiguračních souborů firmwaru, které je třeba následně překompilovat do Arduina. Konečné nastavení firmwaru je přiloženo na CD.

### 7.3 Řízení servomotoru

Vybraný servomotor Bluebird BMS-390 DMH je do RAMPS zapojen třížilovým kabelem. Červený (+) a hnědý (-) vodič napájí servomotor a oranžový vodič přenáší řídicí signál. Řídicí signál je přenášen pomocí obdélníkových pulsů různé šířky při stejné frekvenci (250 Hz, viz Obr. 64). Servomotor má celkový rozsah 120°, přičemž šířka pulzu pro jednu krajní polohu je 900  $\mu$ s a pro druhou krajní polohu 2100  $\mu$ s. Neutrální polohy 0° je dosaženo při pulzu o šířce 1520  $\mu$ s (viz Obr. 64). [35]

V Repetier-Firmware (v jiných firmwarech se bude příkaz s velkou pravděpodobností lišit) se servomotor ovládá pomocí příkazů M340 a parametrů P<servoID> S<pulse>. První parametr „P“ vybere konkrétní servomotor (RAMPS umožňuje připojit až 4 servomotory na pozice 0-3, viz Obr. 60). Druhým parametrem „S“ je udávána šířka obdélníkového pulsu. Zadáním parametru „P0“ dojde k vypnutí servomotoru. Konkrétní příkaz, který je zapsán ve firmwaru a provede se při každé výměně trysky, je uveden na Obr. 65. [36]



Obr. 64: Leták přiložený k servomotoru Bluebird BMS-390 DMH

Příkaz k vyvolání levé krajní polohy (Extruder 1)

**M340 P0 S950**

Příkaz k vyvolání neutrální polohy

**M340 P0 S1520**

Příkaz k vyvolání pravé krajní polohy (Extruder 2)

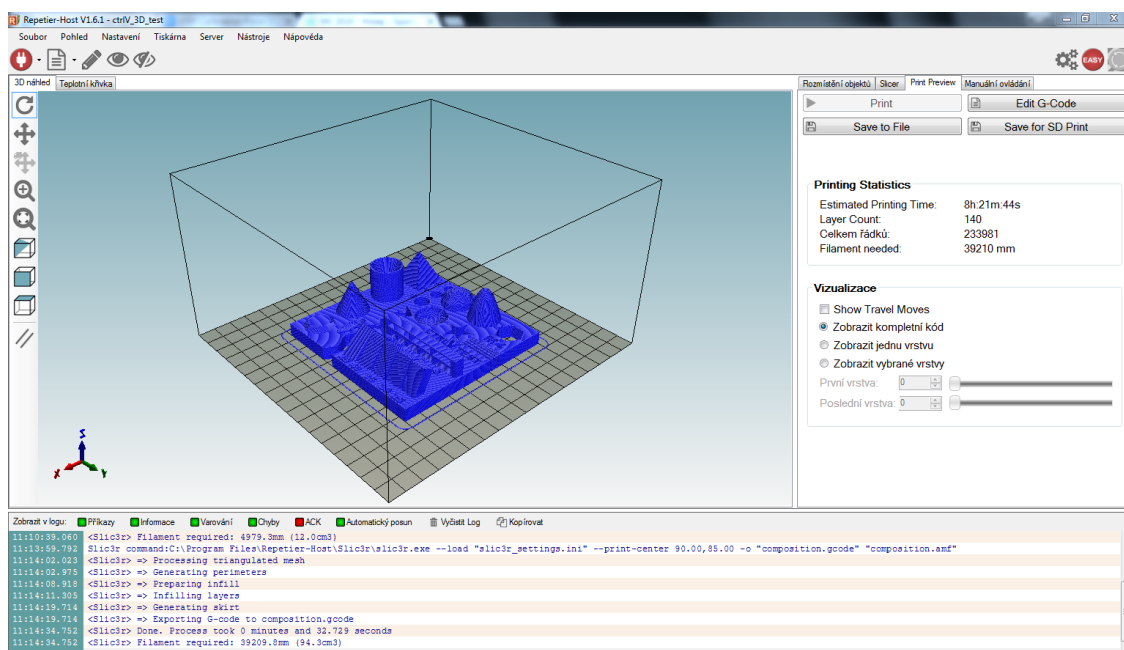
**M340 P0 S2000**

Obr. 65: Sekvence příkazů k ovládní servomotoru

## 7.4 Výběr host programu a sliceru

Jak již bylo řečeno, vývojáři Repetier-Firmware nabízí také hostující program pro 3D tisk s názvem Repetier-Host. V porovnání s ostatními volně šiřitelnými programy má Repetier-Host poměrně slušné uživatelské prostředí a nabízí možnost výběru z více než dvaceti jazyků, včetně češtiny. Jeho výhodou je také přímá integrace slicerů (v základu Slic3r a CuraEngine). Okno programu je rozděleno do tří hlavních částí.

První a zároveň největší podokno (viz Obr. 66) slouží k 3D vizualizaci tiknutého modelu v tiskovém prostoru tiskárny, jehož rozměry se definují v nastavení. V závislosti na fázi procesu je v něm možné model polohovat, sledovat vizualizaci konkrétních vrstev, do kterých byl model rozdělen slicerem nebo monitorovat průběh při reálném tisku modelu. V tomto okně je také možné sledovat graf s průběhem teplot jednotlivých komponentů v časovém úseku stanoveném uživatelem.



Obr. 66: Uživatelské prostředí Repetier-Host

Druhé podokno v pravé části programu (viz Obr. 66) slouží nejprve k přípravě modelu pro tisk. V záložce *Rozmístění objektu* se model polohuje, je možné měnit jeho měřítko, duplikovat ho, centrovat nebo dělit. Po napolohování modelu se v záložce *Slicer* vybere jeden z předem definovaných slicerů (viz kapitola 7.4.1), případně je možné některé parametry změnit, a model se nechá zpracovat. V třetí záložce *Print Preview* je dán příkaz k tisku, případně je možný náhled, editace G-kódu a jeho procházení po jednotlivých vrstvách. Je zde také uvedena informace o předpokládané časové délce

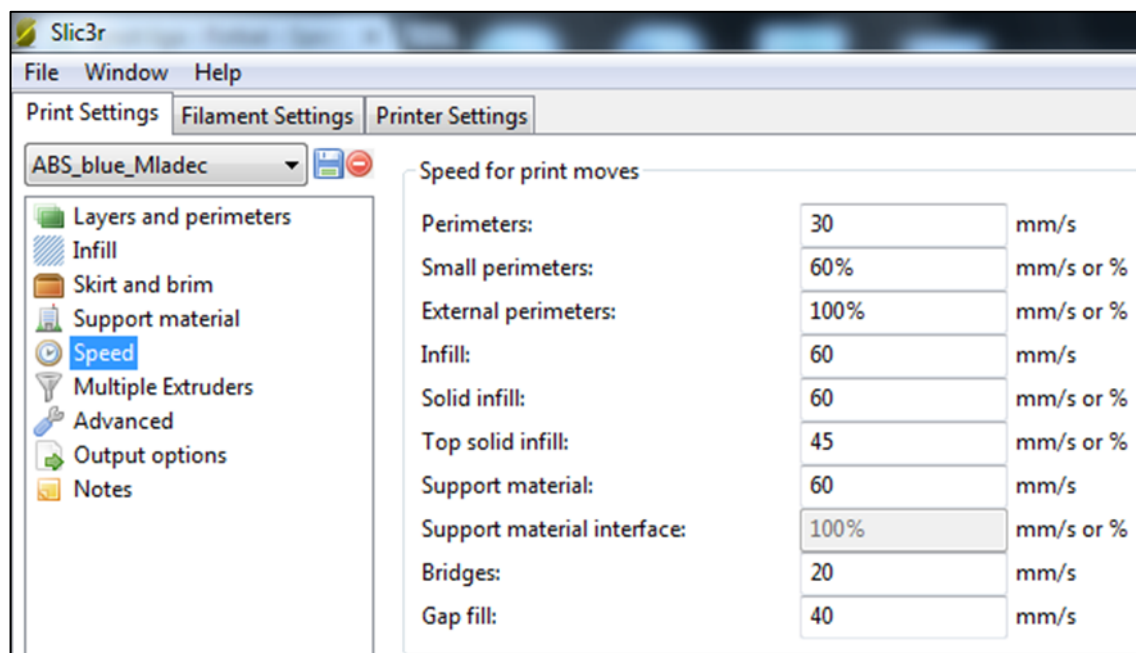
tisku, počtu vrstev, řádků G-kódu a délce potřebného filamentu v milimetrech. Ve čtvrté záložce je možné manuálně ovládat tiskárnu, pokud není spuštěn tisk, případně během tisku regulovat rychlosti, teploty, průtok plastu či ovládat ventilátor.

Třetí podokno (viz Obr. 66) ve spodní části zobrazuje informace o komunikaci hostujícího programu s řídicí deskou 3D tiskárny. Je možné zde sledovat veškeré příkazy, případně informace a upozornění před a během tisku.

#### 7.4.1 Nastavení sliceru

Pro toto konkrétní řešení byl jako slicer vybrán program s názvem Slic3r, což je volně šiřitelný program, který je, jak je uvedeno výše, integrován v Repetier-Host. Je nutné podotknout, že nastavení sliceru je vždy unikátní nejen pro danou tiskárnu, ale také pro použitý materiál. I v případě, kdy se k tisku použije dvou stejných materiálů, avšak od různých výrobců, se může detailní nastavení parametrů tisku lišit.

Konfigurace parametrů v programu Slic3r probíhá ve 3 hlavních záložkách (viz Obr. 67). V první záložce *Print Settings* (nastavení tisku) se nastavuje nejvíce parametrů. Mezi ty patří například výška jedné vrstvy, procentuální výplň objektu a její vzor, volba podpůrného materiálu a rychlosti posuvů. Dále je zde definováno, která tryska je určena pro modelovací materiál a která tryska pro podpůrný.



Obr. 67: Konfigurace rychlostí posuvu v programu Slic3r

Druhá záložka *Filament Settings* (nastavení filamentu) slouží k zadání průměru filamentu, požadované teploty v trysce pro konkrétní materiál v první tisknuté vrstvě (teplota v trysce se pro první vrstvu obvykle zvyšuje pro lepší přilnutí k podložce) a dalších vrstvách. Dále je zde možné regulovat parametry ventilátoru. Pro každý materiál je možné definovat unikátní vlastnosti a při jeho výměně se již uložené vlastnosti pouze vyberou z nabídky.

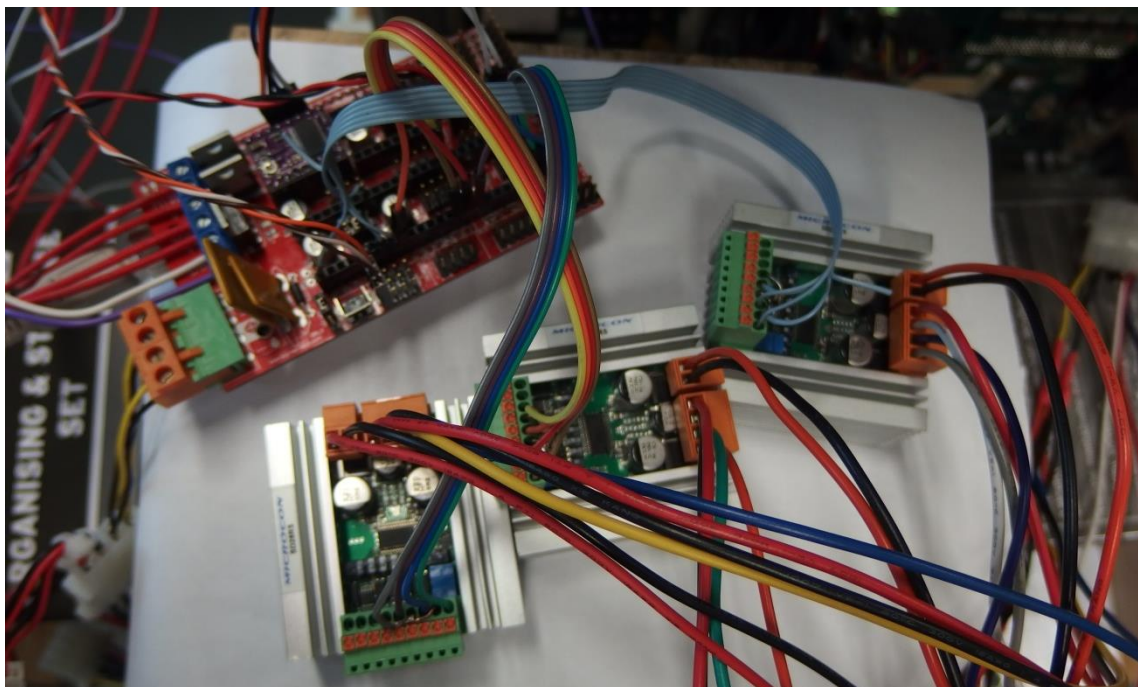
Ve třetí záložce *Printer Settings* (nastavení tiskárny) jsou zadávány rozměry tiskového prostoru, počet trysek, jejich průměry, použitý firmware a parametry retrakce pro každou trysku. Dále je zde možné definovat určitou sekvenci kódu, která se objeví vždy na začátku nebo konci G-kódu. Stejně tak je zde možné nastavit určité příkazy, které se provedou při výměně trysek během tisku nebo při dokončení každé vrstvy. Konečné nastavení Slic3ru je přiloženo na CD.

## 8 PRAKTICKÁ REALIZACE TISKU

Po dokončení návrhu vytlačovací hlavy s ohledem na původní konstrukci zařízení a návrhu řízení celé 3D tiskárny následovalo zapojení všech komponentů, kalibrace a samotný zkušební tisk.

### 8.1 Zapojení komponentů do řídicí desky

Zapojení veškerých komponentů do RAMPS 1.4 bylo realizováno dle schématu na Obr. 60. Reálné zapojení pro zkušební provoz je vidět na Obr. 68 – řídicí deska a 3 budiče původních krokových motorů 3D tiskárny. Při porovnání s rozměry původní řídicí desky zabírá navržené řešení mnohonásobně menší plochu než původní řešení, avšak nabízí více možností týkajících se komunikací s tiskárnou či možností připojování dalších komponentů v budoucnosti. To všechno navíc za příznivou cenu v řádu nižších jednotek tisíců korun. Nutno však podotknout, že tomuto faktu nahrává obrovsky rychlý vývoj oblasti výpočetní techniky v posledních letech.



Obr. 68: Zapojení komponentů do RAMPS 1.4

### 8.2 Zkouška a kalibrace posuvů

Po zapojení bylo možné vyzkoušet jednotlivé posuvy ve všech osách. Ovládání jednotlivých krokových motorů probíhalo přes Repetier-Host. Krokové motory v osách X a Y pracovaly správně, avšak krokový motor pohybující osou Z se neotáčel. Příčina

byla nalezena ve vodiči, který se uvolnil ze svorkovnice budiče krokového motoru. Po odstranění tohoto problému se zkouška krokového motoru osy Z opakovala.

Krokový motor již reagoval na příkazy z hostujícího programu, jeho chování však bylo podobné chování krokového motoru se špatně zapojenými fázemi – zdálo se, že se neotáčí a pouze vibruje. Problém byl shledán v parametru hostujícího programu omezujícím rychlost posuvu v ose Z a v zatím nekalibrovaném počtu potřebných kroků krokového motoru na posuv o 1 mm. Krokový motor tedy reagoval na příkazy z hostujícího programu správně, ale otáčel se tak pomalu, že se pouhým okem jevil jako špatně zapojený krokový motor. Po zvýšení parametru omezujícího rychlost posuvu v ose Z již krokový motor pracoval dle požadavků.

### 8.2.1 Kalibrace počtu kroků krokových motorů

Důležitým parametrem, který je třeba zadat do firmwaru pro přesné posuvy jednotlivých os, je potřebný počet kroků vykonaných krokovým motorem k posuvu v dané ose o 1 mm (v Repetier-Firmware pod názvem *AXIS\_STEPS\_PER\_MM*). Tento parametr je možné vypočítat nebo využít přednastaveného webového kalkulátor RepRap [37]. Vzhledem k neznámým převodovým poměrům použitých v původní konstrukci byl tento parametr určen experimentálně.

Experiment probíhá tak, že je na vodící tyči dané osy označena (např. lihovým popisovačem) počáteční poloha daného vozíku. Následně je v hostujícím programu dán příkaz k posuvu v dané ose o konkrétní vzdálenost a po jeho provedení je stejným způsobem zaznamenána i jeho konečná poloha. Potřebná hodnota počtu kroků na posuv o 1 mm je dána původním počtem kroků násobeným podílem mezi žádanou a skutečnou vzdáleností vozíkem uraženou. Viz (1), kde:

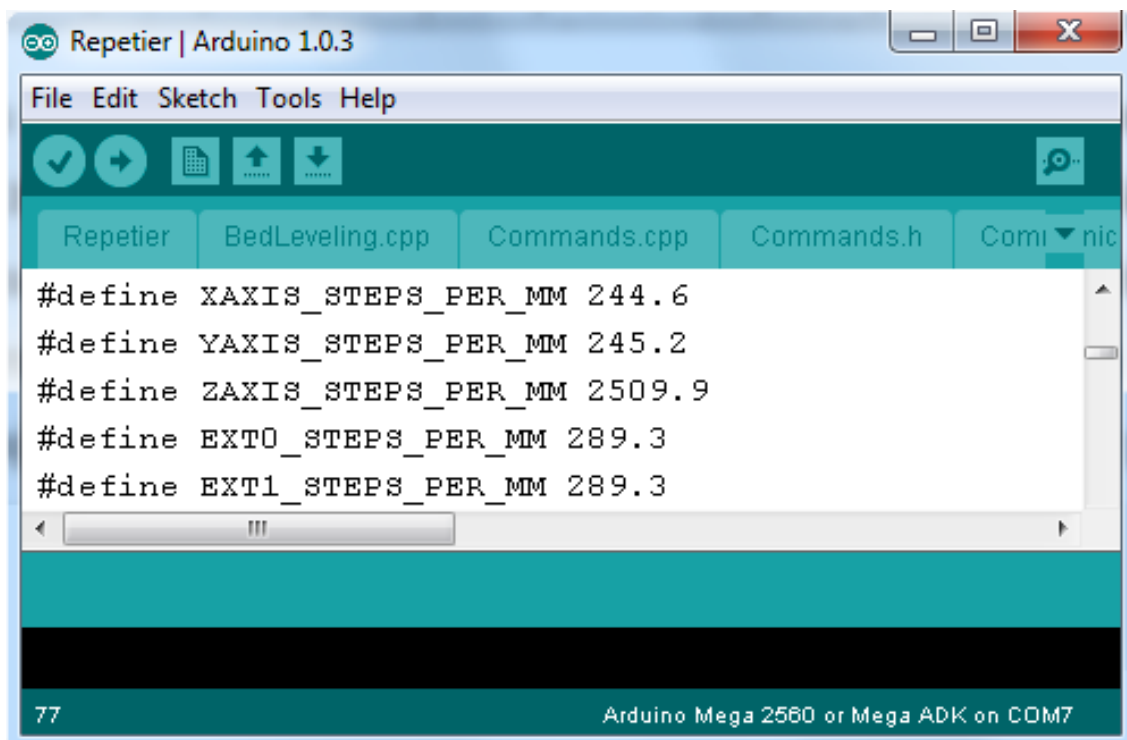
$$k_n = k_p \cdot \frac{x_z}{x_s} \quad (1)$$

- $k_n$ ...nový parametr potřebného počtu kroků na posuv o 1 mm [kroky/mm]
- $k_p$ ...původní parametr potřebného počtu kroků na posuv o 1 mm [kroky/mm]
- $x_z$ ...žádaná vzdálenost [mm]
- $x_s$ ...skutečná vzdálenost [mm]

Například osa Z se po příkazu k posuvu o 100 mm posunula o 2,9 mm při původním parametru 80 kroků na 1 mm posuvu (hodnota přednastavená ve firmwaru). Z těchto hodnot byl vypočten nový parametr pro osu Z, viz (2):

$$k_n = 80 \cdot \frac{100}{2,9} = 2\,758,6 \left[ \frac{\text{kroky}}{\text{mm}} \right] \quad (2)$$

Z původního a nového parametru krokového motoru osy Z je patrné, proč se z počátku zdálo, že se krokový motor vůbec neotáčí. Tento postup je u každé z os opakován, dokud není dosaženo požadované přesnosti. Stejný princip byl využit při nastavení tohoto parametru pro krokový motor podávacího mechanismu, kde se hodnoty posuvu odměřují na vytlačovaném filamentu (je nutné nastavit parametry pro oba extrudery, ty jsou však totožné, mění se pouze smysl otáčené krokového motoru). Konečné hodnoty zadané do firmwaru jsou na Obr. 69.



The screenshot shows the Repetier software interface for an Arduino 1.0.3. The main window displays the configuration file 'Configuration.h' with the following code:

```
#define X_AXIS_STEPS_PER_MM 244.6
#define Y_AXIS_STEPS_PER_MM 245.2
#define Z_AXIS_STEPS_PER_MM 2509.9
#define EXT0_STEPS_PER_MM 289.3
#define EXT1_STEPS_PER_MM 289.3
```

The status bar at the bottom indicates '77' and 'Arduino Mega 2560 or Mega ADK on COM7'.

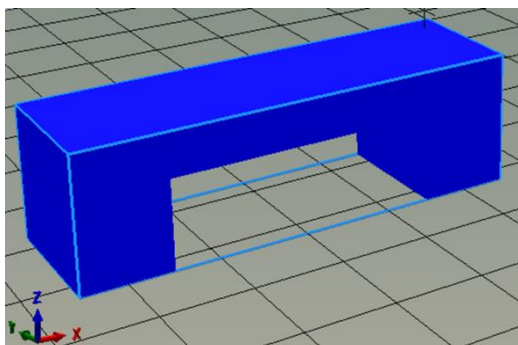
Obr. 69: Konfigurace firmwaru v souboru Configuration.h

Jelikož jsou parametry pro původní krokové motory osy X a Y velmi blízké, lze s velkou pravděpodobností tvrdit, že jsou z výroby zpřevodovány stejným převodovým poměrem.

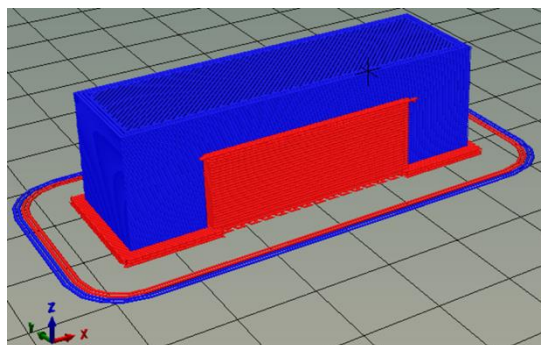


### 8.3 Zkušební tisk

Po nastavení veškerých potřebných parametrů bylo možné přejít k samotnému tisku. Jako stavěcí podložka byla použita polyuretanová podložka se skelnými vlákny z původní konstrukce 3D tiskárny. Stavěcí podložka ani okolní prostředí nebyly žádným způsobem vyhřívány. Pro zkušební tisk byl navržen model mostu s dvěma podporami (viz Obr. 70). Je zřejmé, že tento model by s vhodnou orientací bylo možné vytisknout i bez podpůrného materiálu. Zde však byl model cíleně polohován tak, aby bylo možné otestovat tisk s více materiály.



Obr. 70: Model mostu s dvěma podporami

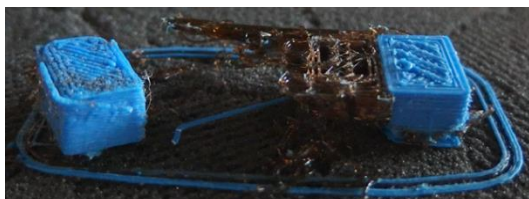


Obr. 71: Model zpracovaný Slic3rem s vygenerovaným podpůrným materiálem

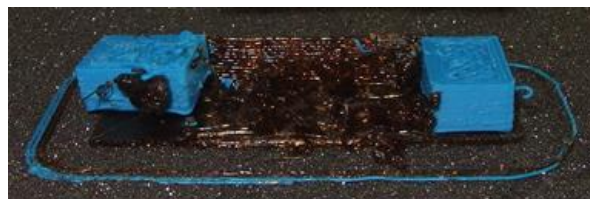
Na Obr. 71 je již zkušební model s vygenerovanými vrstvami a podpůrným materiálem ze Slic3ru. Okolo modelu je ve dvou linkách každého materiálu tzv. *skirt* (lem), který slouží ke správnému naplnění materiálu do trysky před stavbou samotného modelu. Při prvních pokusech o tisk se nakonec přítlak filamentu k podávacímu kolu z varianty 2.2 (viz kapitola 6.5) ukázal jako nedostatečný, proto bylo rozhodnuto o navrácení se k variantě 2.1 (viz kapitola 6.4), kde byl přítlak větší a jeho regulace proběhla změnou nastavení krajních poloh excentrického kola.

Jako stavěcí materiál bylo použito ABS modré barvy (výrobce Plasty Mladeč), pro podpory byl použit materiál P400SR Soluble Support (ve vodním roztoku hydroxidu sodného rozpustný materiál od výrobce Stratasys). Na Obr. 72 a Obr. 73 jsou první nevydařené výtisky, k jejichž nezdaru vedlo hned několik příčin. Jelikož zkušební tisk probíhal bez zapojení koncových spínačů, bylo nutné nejprve správně definovat nulovou polohu trysek v ose Z. Při prvních pokusech se totiž materiál nedostatečně vnořil do stavěcí podložky a během tisku tak následně docházelo k jeho odlepování. Jako správné se osvědčilo takové nastavení nulové polohy v ose Z, kdy se trysky vytlačovací hlavy těsně zanořovaly do stavěcí podložky.

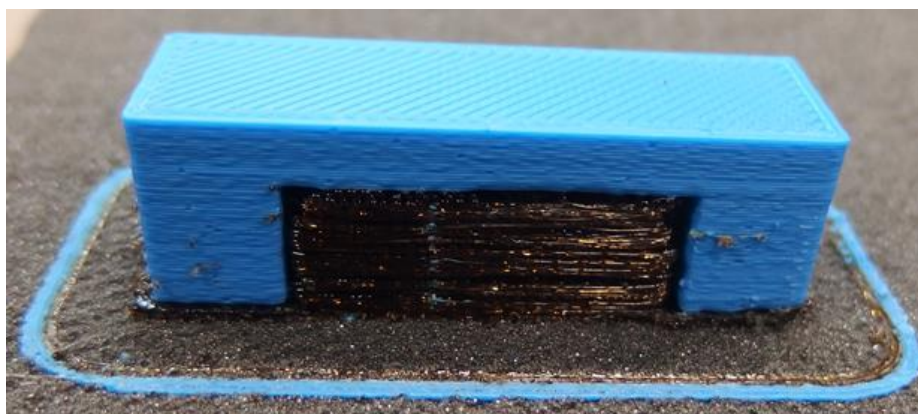
Dalším problémem bylo vytékání taveniny z té trysky, která nebyla zrovna využívána k tisku (například nevyplněná levá část v oblasti podpůrného materiálu na Obr. 72). To bylo nutné ošetřit vhodnou sekvencí příkazů prováděných při výměně trysek (*Slic3r / Printer Settings / Custom G-Code / Tool change G-code*), kdy se tisk při výměně zastavil a pokračoval až poté, co došlo k poklesu teploty předchozí trysky a k nahřátí potřebné teploty u trysky aktuální. Správné nastavení retrakce pro jednotlivé materiály zde hrálo také velkou roli.



Obr. 72: Nevydařený tisk 1



Obr. 73: Nevydařený tisk 2



Obr. 74: První úspěšný tisk

Další úpravou, která přispěla k provedení správného tisku, bylo přesné nastavení trysek do stejné výšky v ose Z. Předtím docházelo k tomu, že při vyšším počtu vrstev narazila níže položená tryska do modelu a došlo k jeho odtržení od podložky (viz levá podpora na Obr. 72). Slic3r sice umožňuje nadzvedávání trysek v ose Z při přejezdu nad modelem, výhodnější je však mít trysky nastavené tak, aby toto nadzvedávání nutné nebylo. Po správném nastavení trysek do stejné výšky již k podobným problémům nedocházelo.

Velice důležité je nastavení týkající se podpůrného materiálu (*Slic3r / Print Settings / Support material*). V této záložce je možné navolit, aby se před tiskem z modelovacího materiálu vytvořila základna (*Slic3r / Print Settings / Raft layers*) z podpůrného materiálu o volitelném počtu vrstev (nastaveny byly 3 vrstvy). Nanesením několika vrstev podpůrného materiálu na stavěcí podložku dojde k vyrovnání podkladu předtím,

než začne tisk z modelovacího materiálu. Následně je v šesti záložkách možné nastavit parametry výplně podpůrného materiálu. Bohužel se ukázalo, že Slic3r není příliš vhodný pro generování G-kódu u modelů s podporami. Ačkoliv nabízí poměrně velké množství volitelných parametrů, není schopen generovat podpůrný materiál pro každou jednotlivou vrstvu, ale některé vrstvy přeskakuje a nedochází tak k 100% výplni. I přes tuto nevýhodu je generování G-kódu s podporami ve Slic3ru možné, pro detailnější nastavení je však pro konkrétní případy vhodné zvolit jiný slicer.

Aplikováním výše uvedených nastavení bylo dosaženo prvního úspěšného výtisku, který je na Obr. 74. Ačkoliv byly použity rozpustné podpory, bylo celkem snadné je odstranit mechanicky a jejich rozpouštění nebylo nutné.

## 9 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl návrh 3D tiskárny technologie FDM. Hlavními úkoly bylo navrhnout takovou konstrukci vytlačovací hlavy, která bude během tisku schopna automatické výměny materiálu ve formě plastového drátu (filamentu). Dalším úkolem bylo zvolit vhodné řízení celé technologie s využitím dostupného, volně šiřitelného softwaru a hardwaru. Posledním úkolem byla praktická realizace navržených řešení na původní konstrukci 3D tiskárny.

Úvodem práce je rozebrána problematika a princip 3D tisku, především jedné z jeho technologií - FDM. Zmíněna je také historie této technologie a okolnosti vzniku vývojářského projektu RepRap. Následně se práce věnuje jednotlivým typům používaných konstrukcí tiskáren a po jednotlivých komponentech popisuje složení vytlačovací hlavy. Práce pokračovala provedením rešerše existujících řešení pro řízení 3D tiskáren. Rešerše je také věnována dostupným řešením duálních vytlačovacích hlav, které jsou rozděleny z hlediska podávání materiálu k teplé části vytlačovací hlavy a jejich způsobu provedení.

V samotném návrhu konstrukce byl nejprve prozkoumán původní stav tiskárny, který se stal základem pro další postup. Pro pojezdový vozík osy X z původní konstrukce bylo postupně navrženo 5 provedení vytlačovacích hlav, z nichž 4 byly prakticky realizovány a testovány pro danou aplikaci. Patrně největší problém jednotlivých řešení byl v přitlaku filamentu k podávacímu kolu, což se však v druhé navržené variantě podařilo vyřešit. Finální řešení s jedním přímým podavačem umožňuje tisk ze dvou různých materiálů ve formě filamentu, k jejichž výměně dochází automaticky během tisku. Tato výměna je zajištěna mechanismem se servomotorem, jehož využitím došlo k úspoře hmotnosti tiskové hlavy o zhruba 280 g (v porovnání s dostupnými řešeními duálních vytlačovacích hlav).

V práci byl dále proveden návrh řízení celé tiskárny a jeho praktická realizace. Při výběru řídicí desky byla jako nejvhodnější vybrána deska Arduino Mega 2560 s mikroprocesorem ATmega2560 a násuvným modulem RAMPS 1.4. Jako firmware pro tuto desku byl zvolen Repetier-Firmware. Vzhledem k vybranému firmwaru bylo vhodné zvolit hostující program s názvem Repetier-Host, který je dílem stejných vývojářů jako firmware. Pro zkušební tisk byl jako slicer vybrán program s názvem Slic3r.

Před praktickou realizací tisku bylo ještě nutné všechny komponenty správně zapojit a zkalibrovat posuvy všech os a extruderu. V posledním kroku došlo k realizaci zkušebního tisku na vybraném testovacím modelu. Při prvních pokusech docházelo k problémům způsobeným především nesprávným nastavením sliceru. Chyby se však dařilo postupně odstraňovat a po několika pokusech se podařilo slicer uzpůsobit pro konkrétní navržené řešení. Výsledkem byl úspěšný výtisk testovacího modelu, čímž došlo k ověření správnosti navržených řešení a je tak možné konstatovat, že byly jednotlivé cíle práce splněny.

## Seznam použité literatury

- [1] The FDM technology – One Step Closer To The Future: How does it work? *3devo* [online]. 2016 [cit. 2016-05-13].  
Dostupné z: <http://3devo.eu/guide-fdm-printable-plastics-3d-printing-filament/>
- [2] Fused deposition modeling. *Wikipedia* [online]. 2016 [cit. 2016-04-04].  
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fused\\_deposition\\_modeling](https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling)
- [3] About: The Realization. *RepRapWiki* [online]. 2016 [cit. 2016-04-04].  
Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/About>
- [4] STL (file format). *Wikipedia* [online]. 2016 [cit. 2016-04-04].  
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/STL\\_\(file\\_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format))
- [5] The road ahead for 3-D printers: Figure 3: Cartesian and Delta configuration in printers. *Pwc* [online]. [cit. 2016-04-04].  
Dostupné z: <http://www.pwc.com/us/en/technology-forecast/2014/3d-printing/features/future-3d-printing.html>
- [6] RepRap/cs: Typy tiskáren. *RepRapWiki* [online]. 2016 [cit. 2016-04-04].  
Dostupné z: [http://reprap.org/wiki/RepRap/cs#Typy\\_tisk.C3.A1ren](http://reprap.org/wiki/RepRap/cs#Typy_tisk.C3.A1ren)
- [7] Styly stolních 3D tiskáren. *Future3d* [online]. [cit. 2016-04-04].  
Dostupné z: <http://www.futur3d.net/styly-stolnich-3d-tiskaren>
- [8] Principle of Operation. *CoreXY* [online]. 2012 [cit. 2016-04-04].  
Dostupné z: <http://corexy.com/theory.html>
- [9] Polar 3D. *Polar 3D printers..* [online]. [cit. 2016-04-04].  
Dostupné z: <http://polar3d.com/>
- [10] How to Buy a 3D Printer. *PCmag* [online]. 2015 [cit. 2016-04-04].  
Dostupné z: <http://www.pcmag.com/article2/0,2817,2483632,00.asp>
- [11] 3d tiskárna original Prusa i3. *Prusa Research s.r.o.* [online]. [cit. 2016-04-04].  
Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/2015/09/black.jpg>
- [12] Ultimaker 2 3D Printer. *IGo3D* [online]. [cit. 2016-04-04].  
Dostupné z: <http://www.igo3d.nl/en/ultimaker-2-3d-drucker.html>
- [13] How does the UP 3D printer's print head (Extruder) work? *3D Printing Systems* [online]. 2014 [cit. 2016-04-06].  
Dostupné z: <https://3dprintingsystems.freshdesk.com/support/solutions/articles/4000003132-how-does-the-up-3d-printer-s-print-head-extruder-work>
- [14] Fused filament fabrication. *Wikipedia* [online]. 2016 [cit. 2016-04-08].  
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fused\\_filament\\_fabrication](https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication)

- [15] MK7 drive gear. *RepRap.me* [online]. [cit. 2016-04-08].  
Dostupné z: <http://reprap.me/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/m/k/mk7.jpg>
- [16] Thermal Conductivity of some common Materials and Gases. *The Engineering Toolbox* [online]. [cit. 2016-04-08].  
Dostupné z: [http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)
- [17] *E3D-ONLINE* [online]. [cit. 2016-07-08].  
Dostupné z: <http://e3d-online.com/>
- [18] Topné těleso pro RepRap (12V/40W). *Shop uart* [online]. [cit. 2016-07-09].  
Dostupné z: <http://www.shop.uart.cz/kategorie/reprap/topne-teleso-pro-reprap-12v-40w/>
- [19] Thermistor. *RepRapWiki* [online]. [cit. 2016-04-09].  
Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Thermistor>
- [20] RepRap Options: Electronics. *RepRapWiki* [online]. [cit. 2016-04-11].  
Dostupné z: [http://reprap.org/wiki/RepRap\\_Options#Electronics](http://reprap.org/wiki/RepRap_Options#Electronics)
- [21] Arduino. *Wikipedia* [online]. [cit. 2016-04-11].  
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- [22] *RepRap/cs* [online]. 2016 [cit. 2016-04-11].  
Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRap/cs>
- [23] RAMBo Electronics v1.3. *3D Maker World* [online]. [cit. 2016-04-11].  
Dostupné z: <http://www.3dmakerworld.com/store/parts--accessories/electronics/rambo-electronics-v1-3>
- [24] Ďaďo, S. a Kreidl, M, *Senzory a měřicí obvody*  
Praha 1996, Vydavatelství ČVUT, ISBN 80-01-01500-9
- [25] Greg's Wade Extruder Hardware Kit. *UltiBots* [online]. [cit. 2016-05-23].  
Dostupné z: <http://www.ultibots.com/gregs-wade-extruder-hardware-kit/>
- [26] Hobbed Bolt Stainless Steel. *Lulzbot* [online]. [cit. 2016-05-23].  
Dostupné z: <https://www.lulzbot.com/store/parts/hobbed-bolt-stainless-steel>
- [27] Direct drive extruder kit/set. *Aliexpress* [online]. 2016 [cit. 2016-05-23].  
Dostupné z: <http://www.aliexpress.com/item/3D-printer-parts-Reprap-Printrobot-aluminum-extruder-DIY-direct-drive-Extruder-kit-set-no-motor-compact/32289956499.html>
- [28] Compact Bowden Extruder, direct drive 1.75mm. *Thingiverse* [online]. 2015 [cit. 2016-05-23].  
Dostupné z: <http://www.thingiverse.com/make:154892>

- [29] Duální hybridní extruder (příspěvek uživatele Janson). *Rebelove* [online]. 2014 [cit. 2016-05-23].  
Dostupné z: <http://www.rebelove.org/viewtopic.php?f=8&t=350>
- [30] Felix 3.1 3D Printer. *The 3D Printer* [online]. [cit. 2016-04-27].  
Dostupné z: <https://www.the3dprinter.com.au/products/felix-3-0>
- [31] *Barevný 3D tisk na nové Prusa i3 1.75mm* [online]. 2015 [cit. 2016-04-27].  
Dostupné z: <http://josefprusa.cz/barevny-3d-tisk-na-nove-prusa-i3-1-75mm/>
- [32] Teflon® [PTFE] Polytetrafluoretylen. *EPP Plasty* [online]. [cit. 2016-05-18].  
Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz/ptfe.php>
- [33] Kompletní katalog produktů, verze 9/2015. *Microcon* [online]. 2015 [cit. 2016-05-07].  
Dostupné z: <http://www.microcon.cz/>
- [34] Repetier-Firmware configuration tool for version 0.92.9 version. *Repetier Software* [online]. 2016 [cit. 2016-05-10].  
Dostupné z: <https://www.repetier.com/firmware/v092/>
- [35] Serva. *Pelikan Daniel* [online]. [cit. 2016-05-13].  
Dostupné z: <http://www.pelikandaniel.com/?sec=page&id=22>
- [36] G-code: M340: Control the servos. *RepRapWiki* [online]. 2016 [cit. 2016-05-13].  
Dostupné z: [http://reprap.org/wiki/G-code#M340: Control the servos](http://reprap.org/wiki/G-code#M340:_Control_the_servos)
- [37] RepRap Calculator. *Prusa Printers* [online]. [cit. 2016-05-13].  
Dostupné z: <http://prusaprinters.org/calculator/>



## Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma technologie FDM [1] .....	12
Obr. 2: Porovnání STL modelu s CAD modelem a jeho zápis ASCII kódem [4].....	14
Obr. 3: Příklad G-kódu .....	15
Obr. 4: Tiskárna kartézského typu [5] .....	16
Obr. 5: Princip polohování os X a Y na tiskárně typu CoreXY [8].....	16
Obr. 6: Tiskárna typu Delta [5].....	17
Obr. 7: Polární tiskárna společnosti POLAR3D [9] .....	17
Obr. 8: Příklad tiskárny s otevřenou konstrukcí [11].....	18
Obr. 9: Příklad tiskárny s uzavřenou konstrukcí [12].....	18
Obr. 10: Schéma vytlačovací hlavy [13][14].....	19
Obr. 11: Ozubené (podávací) kolo podávacího mechanismu [15] .....	19
Obr. 12: Heatbreak a jeho řez [17] .....	20
Obr. 13: Různá provedení chladičů [17].....	20
Obr. 14: Příklad provedení topného bloku [17].....	21
Obr. 15: Topné těleso 12V/40W [17] .....	21
Obr. 16: Termistor NTC 100 kΩ [17].....	22
Obr. 17: Různé průměry otvorů trysek [17] .....	22
Obr. 18: Arduino MEGA 2560 (vlevo) a RAMPS 1.4 (vpravo) [17].....	23
Obr. 19: RAMBo Electronics v1.3 [23].....	24
Obr. 20: Sanguinololu [22] .....	24
Obr. 21: Vyhřívaná podložka MK2B [17].....	25
Obr. 22: LCD displej s čtečkou SD karet [17].....	25
Obr. 23: Definování parametrů vytlačovací hlavy v jazyce Wiring .....	26
Obr. 24: Zpřevodovaný podavač [25].....	28
Obr. 25: Podávací šroub [26].....	28
Obr. 26: Přímý podavač [27] .....	29
Obr. 27: Bowdenový podavač umístěný na rámu tiskárny [28] .....	30
Obr. 28: Duplikace samostatné trysky [29] .....	31
Obr. 29: Duální hlava tiskárny Felix 3.1 [30].....	32
Obr. 30: Duální vytlačovací hlava Chimera [17].....	32
Obr. 31: Vytlačovací hlava Cyclops [17] .....	32
Obr. 32: LCD displej při výměně filamentu [31] .....	33

Obr. 33: Schéma stávající konstrukce.....	35
Obr. 34: Štítek krokového motoru .....	36
Obr. 35: Přepsaný štítek krokového motoru .....	36
Obr. 36: Původní řídicí deska 3D tiskárny .....	36
Obr. 37: Původní vozík na vodičích tyčích osy X .....	37
Obr. 38: Uvažovaný princip překlápění vytlačovací hlavy .....	38
Obr. 39: Návrh naklápěcí vytlačovací hlavy - varianta 1.1 .....	38
Obr. 40: Úprava přítlaku filamentu.....	38
Obr. 41: Přemístění servomotoru, verze 1 .....	40
Obr. 42: Přemístění servomotoru, verze 2 .....	40
Obr. 43: Přemístění servomotoru, verze 3 .....	40
Obr. 44: Papírový model vytlačovací hlavy .....	41
Obr. 45: Teplá část vytlačovací hlavy .....	42
Obr. 46: Detailní řez přechodu heatbreak - tryska.....	42
Obr. 47: Parametry krokového motoru NEMA SX17-1005LQCEF [33] .....	43
Obr. 48: Parametry servomotoru Bluebird BMS-390 DMH .....	44
Obr. 49: Realizace varianty 1.2 .....	45
Obr. 50: Detail vedení filamentu v teflonové trubičce .....	46
Obr. 51: Realizace varianty 1.3 .....	46
Obr. 52: První test vytlačení filamentu .....	47
Obr. 53: Vůle vytlačovací hlavy .....	48
Obr. 54: Oblast zlomu teflonové trubičky .....	48
Obr. 55: Návrh varianty 2.1 – rovnovážná poloha .....	49
Obr. 56: Realizace varianty 2.1 .....	51
Obr. 57: Záběry z termokamery.....	51
Obr. 58: Zkrácení ramene držáku pružiny .....	52
Obr. 59: Realizace varianty 2.2 .....	52
Obr. 60: Zapojení komponentů do RAMPS 1.4 .....	54
Obr. 61: Budič SD28R5.....	55
Obr. 62: Budič Pololu DRV8825.....	55
Obr. 63: Konfigurace Repetier-Firmware přes webové rozhraní [34].....	56
Obr. 64: Leták přiložený k servomotoru Bluebird BMS-390 DMH.....	58
Obr. 65: Sekvence příkazů k ovládní servomotoru.....	58
Obr. 66: Uživatelské prostředí Repetier-Host.....	59

Obr. 67: Konfigurace rychlostí posuvu v programu Slic3r .....	60
Obr. 68: Zapojení komponentů do RAMPS 1.4 .....	62
Obr. 69: Konfigurace firmwaru v souboru Configuration.h.....	64
Obr. 70: Model mostu s dvěma podporami .....	65
Obr. 71: Model zpracovaný Slic3rem s vygenerovaným podpůrným materiálem.....	65
Obr. 72: Nevydařený tisk 1 .....	66
Obr. 73: Nevydařený tisk 2.....	66
Obr. 74: První úspěšný tisk.....	66

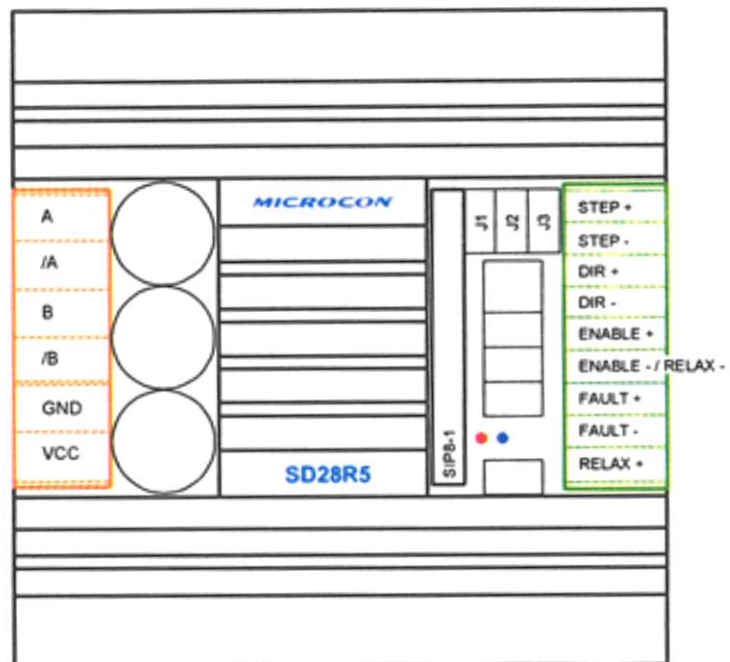
## Seznam tabulek

Tab. 1: Porovnání řešení podávacích mechanismů.....	34
Tab. 2: Porovnání řešení dostupných duálních vytlačovacích hlav.....	34
Tab. 3: Porovnání jednotlivých variant.....	53

## Seznam příloh

- I. Příloha A - Zapojení a nastavení ovládacích prvků budiče SD28R5
  - II. Příloha B - Výkres sestavy 3-KSA-VS-01
  - III. Příloha C - Výrobní výkres 4-KSA-VS-01-01 CHLADIČ
  - IV. Příloha D - Výrobní výkres 4-KSA-VS-01-02 SMYKADLO
  - V. Příloha E - Výrobní výkres 4-KSA-VS-01-03 DRŽÁK PRUŽINY
  - VI. Příloha F - Výrobní výkres 4-KSA-VS-01-04 PÁKA
  - VII. Příloha G - Výrobní výkres 4-KSA-VS-01-05 ČEP
  - VIII. Příloha H - Výrobní výkres 4-KSA-VS-01-06 HEATBREAK
  - IX. Příloha I - Výrobní výkres 4-KSA-VS-01-07 TRYSKA
  - X. Příloha J - Výrobní výkres 4-KSA-VS-01-08 TOPNÝ BLOK
- CD Text práce (*CD/Safr\_DP\_2016.pdf*)
- 3D modely pěti zmiňovaných variant (*CD/STP\_modely\_variant*)
- Konečná konfigurace Repetier-Firmware (*CD/Repetier*)
- Konečná konfigurace Slic3r (*CD/Slic3r/Slic3r\_config\_bundle*)
- Výkresová dokumentace (*CD/Vykresova\_dokumentace*)

## Příloha A - Zapojení a nastavení ovládacích prvků budiče SD28R5



### Nastavení mikrokrokování

J1	0	0	0	0	1	1	1	1
J2	0	0	1	1	0	0	1	1
J3	0	1	0	1	0	1	0	1
Počet mikrokroků na celý krok	1**	2	4*	8	16	32	32	32

\* výrobní nastavení

0 = jumper nezasunut

1 = jumper zasunut

1\*\* = bez dělení kroku, proud 71% nastavené amplitudy proudu v obou fázích motoru

### Nastavení proudu motoru

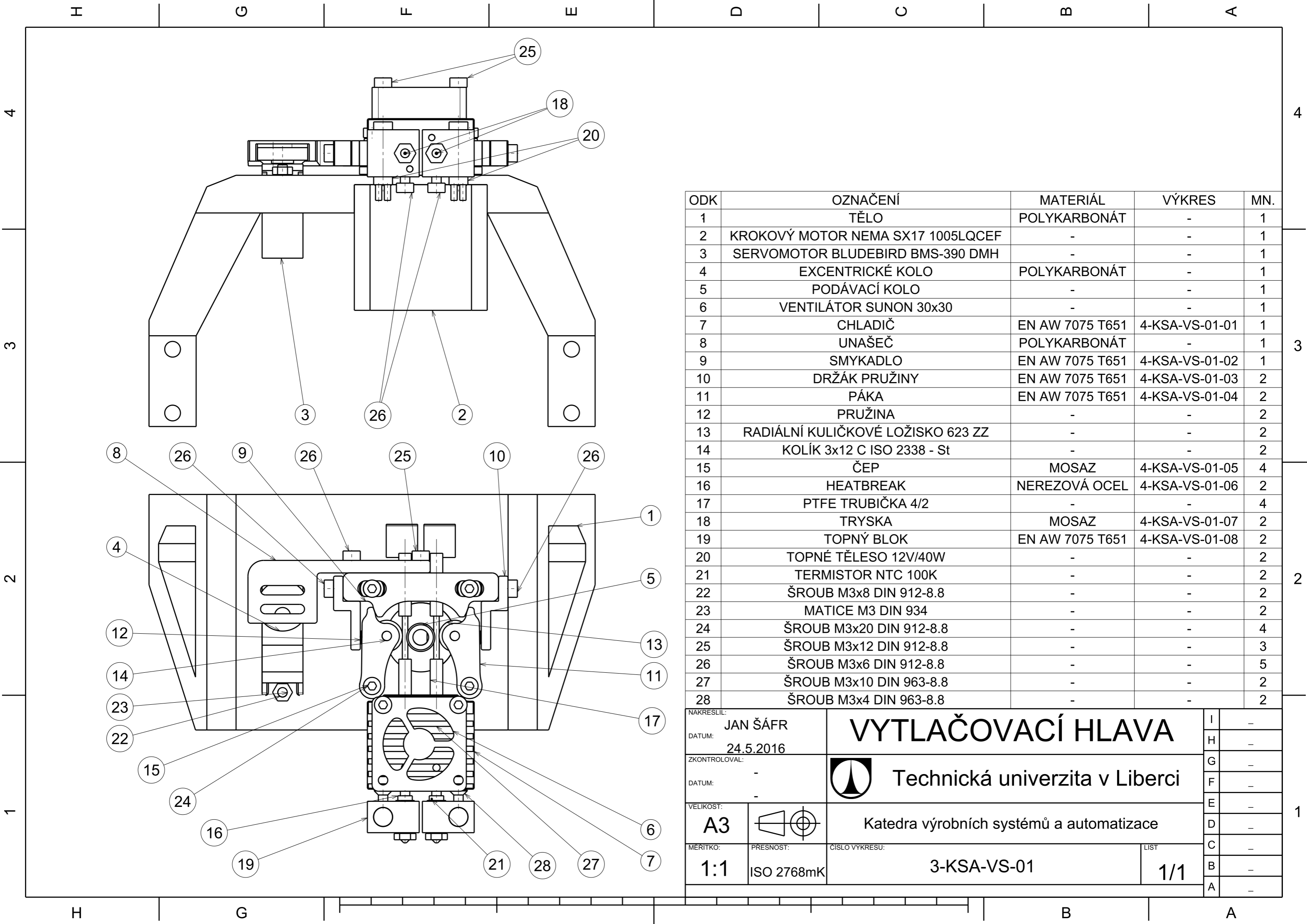
Sepnutý spínač na SIP spínači	1	2	3	4	5	6	7	8*
Efektivní hodnota proudu (A)**	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2

\* výrobní nastavení

\*\* amplituda proudu je vyšší o 41%

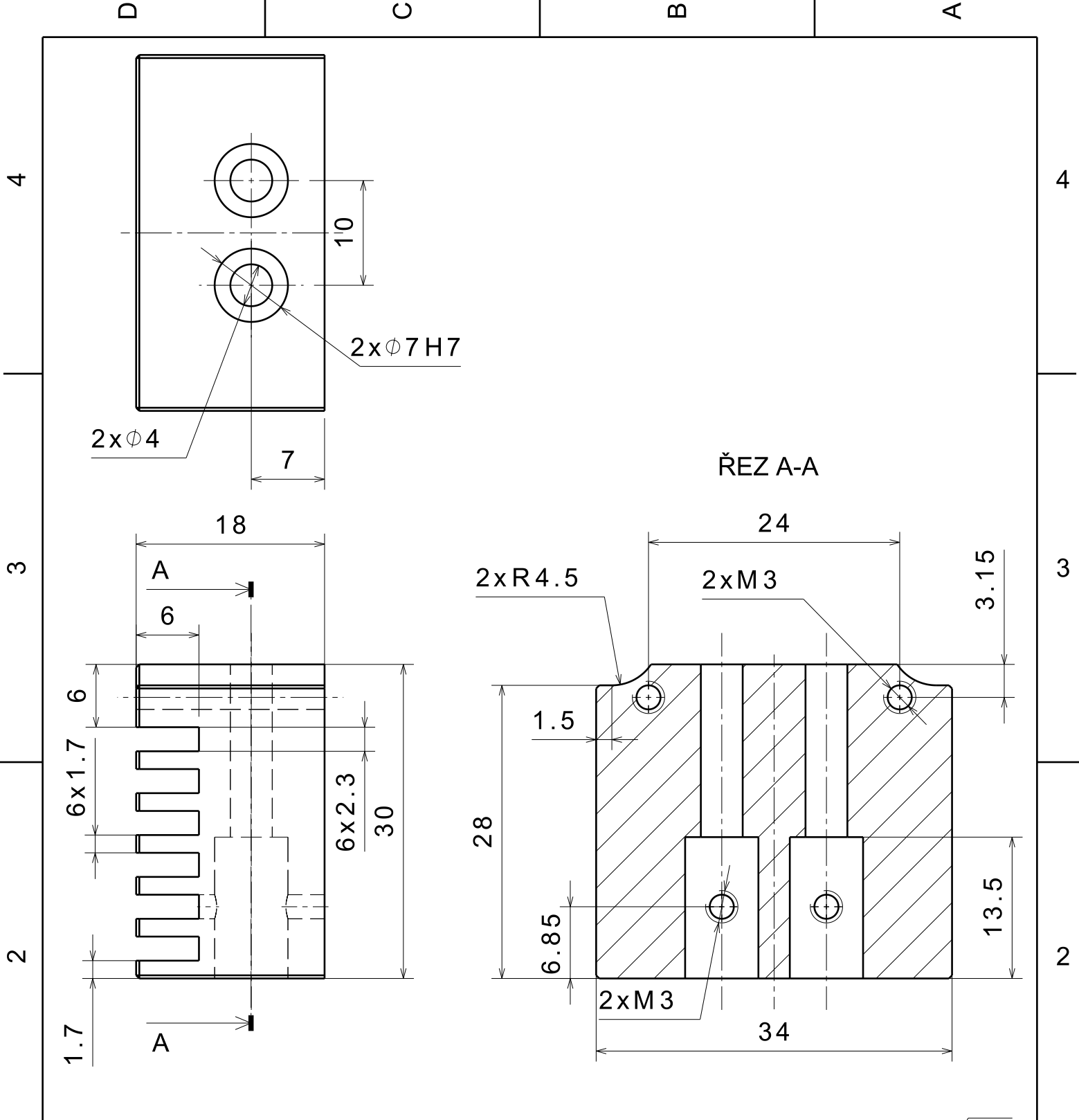
Spínač SIP8 ON = poloha ve směru šipky na spínači, spínač SIP8-1 umístěn u jumperů J1 – J3  
V poloze ON může být vždy jen jeden z osmi spínačů SIP8, zbylých 7 spínačů musí být vždy v poloze OFF.

Po zastavení motoru dochází k automatickému snížení proudu motoru na polovinu pro snížení tepelných ztrát v motoru i driveru.



ODK	OZNAČENÍ	MATERIÁL	VÝKRES	MN.
1	TĚLO	POLYKARBONÁT	-	1
2	KROKOVÝ MOTOR NEMA SX17 1005LQCEF	-	-	1
3	SERVOMOTOR BLUDBIRD BMS-390 DMH	-	-	1
4	EXCENTRICKÉ KOLO	POLYKARBONÁT	-	1
5	PODÁVACÍ KOLO	-	-	1
6	VENTILÁTOR SUNON 30x30	-	-	1
7	CHLADIČ	EN AW 7075 T651	4-KSA-VS-01-01	1
8	UNAŠEČ	POLYKARBONÁT	-	1
9	SMYKADLO	EN AW 7075 T651	4-KSA-VS-01-02	1
10	DRŽÁK PRUŽINY	EN AW 7075 T651	4-KSA-VS-01-03	2
11	PÁKA	EN AW 7075 T651	4-KSA-VS-01-04	2
12	PRUŽINA	-	-	2
13	RADIÁLNÍ KULIČKOVÉ LOŽISKO 623 ZZ	-	-	2
14	KOLÍK 3x12 C ISO 2338 - St	-	-	2
15	ČEP	MOSAZ	4-KSA-VS-01-05	4
16	HEATBREAK	NEREZOVÁ OCEL	4-KSA-VS-01-06	2
17	PTFE TRUBIČKA 4/2	-	-	4
18	TRYSKA	MOSAZ	4-KSA-VS-01-07	2
19	TOPNÝ BLOK	EN AW 7075 T651	4-KSA-VS-01-08	2
20	TOPNÉ TĚLESO 12V/40W	-	-	2
21	TERMISTOR NTC 100K	-	-	2
22	ŠROUB M3x8 DIN 912-8.8	-	-	2
23	MATICE M3 DIN 934	-	-	2
24	ŠROUB M3x20 DIN 912-8.8	-	-	4
25	ŠROUB M3x12 DIN 912-8.8	-	-	3
26	ŠROUB M3x6 DIN 912-8.8	-	-	5
27	ŠROUB M3x10 DIN 963-8.8	-	-	2
28	ŠROUB M3x4 DIN 963-8.8	-	-	2

NAKRESLIL: <b>JAN ŠÁFR</b>		<h1>VYTLAČOVACÍ HLAVA</h1>		I	-
DATUM: 24.5.2016				H	-
ZKONTROLOVAL: -		 <b>Technická univerzita v Liberci</b>		G	-
DATUM: -				F	-
VELIKOST: <b>A3</b>		Katedra výrobních systémů a automatizace		E	-
MĚRITKO: <b>1:1</b>	PRESNOST: ISO 2768mK			C	-
CÍSLO VÝKRESU: <b>3-KSA-VS-01</b>		LIST <b>1/1</b>		D	-
				B	-
				A	-

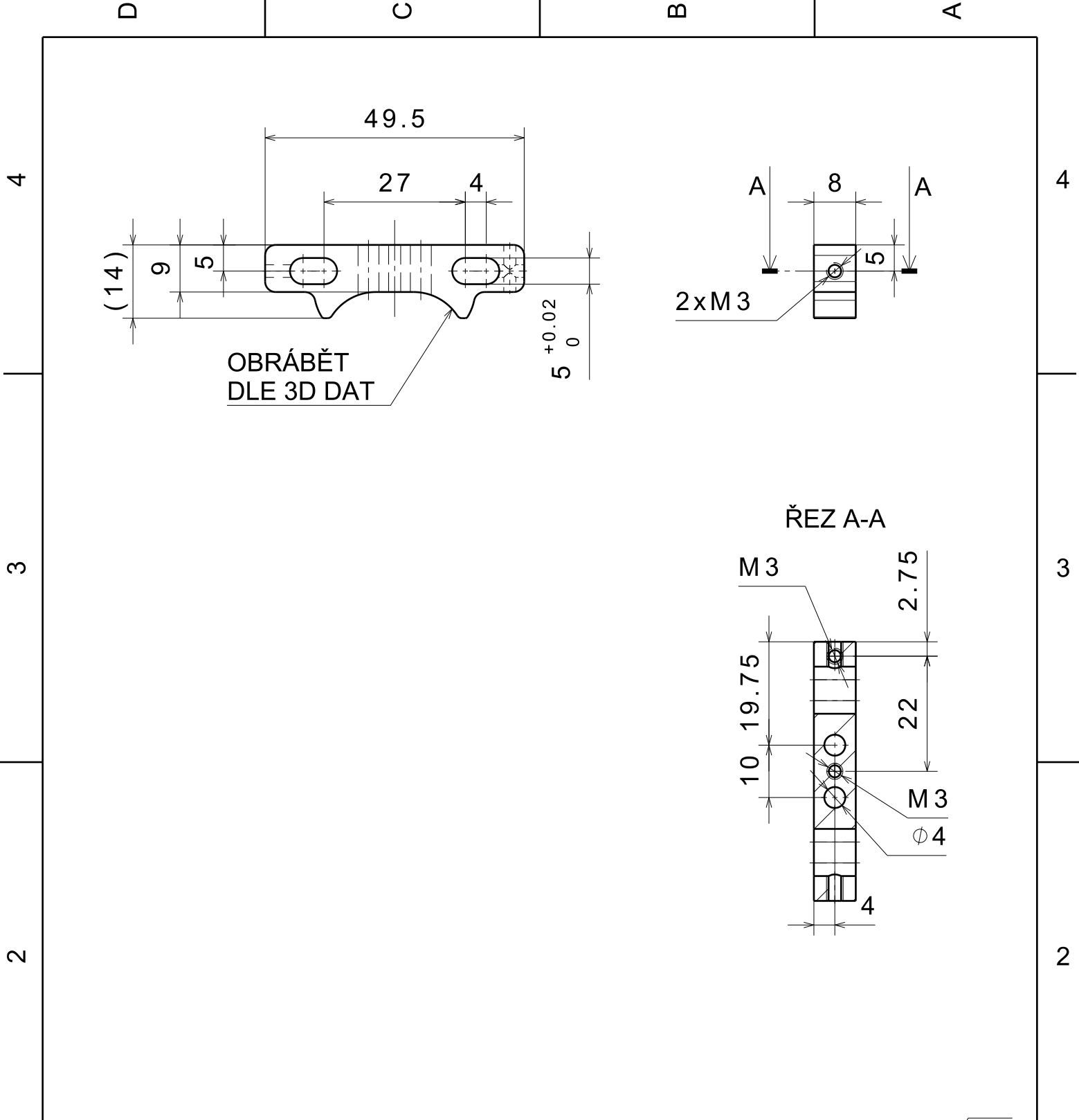


NEKÓTOVANÁ SRAŽENÍ 0,3x45°


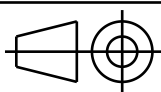
NAKRESLIL:	JAN ŠÁFR
DATUM:	24.5.2016
ZKontroloval:	-
DATUM:	-
VELIKOST:	A4
MÉRITKO:	2:1
PŘESNOST:	ISO 2768mK

<h1>CHLADIČ</h1>	
	<b>Technická univerzita v Liberci</b>
Katedra výrobních systémů a automatizace	
ČÍSLO VYKRESU:	4-KSA-VS-01-01
LIST:	1/1

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-



NEKÓTOVANÉ RÁDIUSY R2

NAKRESLIL: <b>JAN ŠÁFR</b>		<h1>SMYKADLO</h1>		I	-
DATUM: <b>24.5.2016</b>				H	-
ZKontroloval: -		 <b>Technická univerzita v Liberci</b>	G	-	
DATUM: -			F	-	
VELIKOST: <b>A4</b>		<b>Katedra výrobních systémů a automatizace</b>		E	-
				D	-
MÉRITKO: <b>1:1</b>	PŘESNOST: <b>ISO 2768mK</b>	ČÍSLO VYKRESU: <b>4-KSA-VS-01-02</b>	LIST: <b>1/1</b>	C	-
				B	-
				A	-

D C B A

4

3

2

1

4

3

2

1

23.5

∅ 5.8

A

A

4

8

4

15.5

∅ 3

ŘEZ A-A

11

4

3

7

1.5

8

3,2

NEKÓTOVANÁ SRAŽENÍ 0,3 x 45°

NAKRESLIL:

JAN ŠÁFR

DATUM:

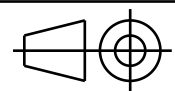
24.5.2016

ZKontroloval:

DATUM: -

VELIKOST:

A4



MÉRITKO:

5:1

PŘESNOST:

ISO 2768mK



**DRŽÁK PRUŽINY**

Technická univerzita v Liberci

Katedra výrobních systémů a automatizace

ČÍSLO VYKRESU:

4-KSA-VS-01-03

LIST:

1/1

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

D A



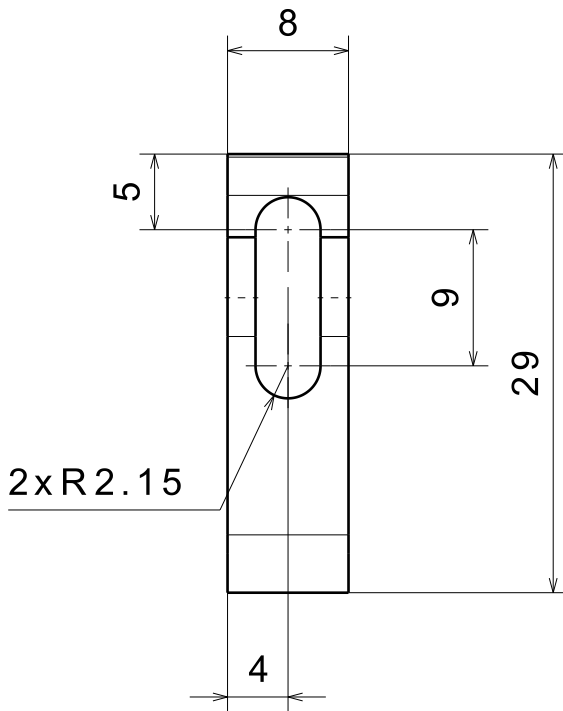
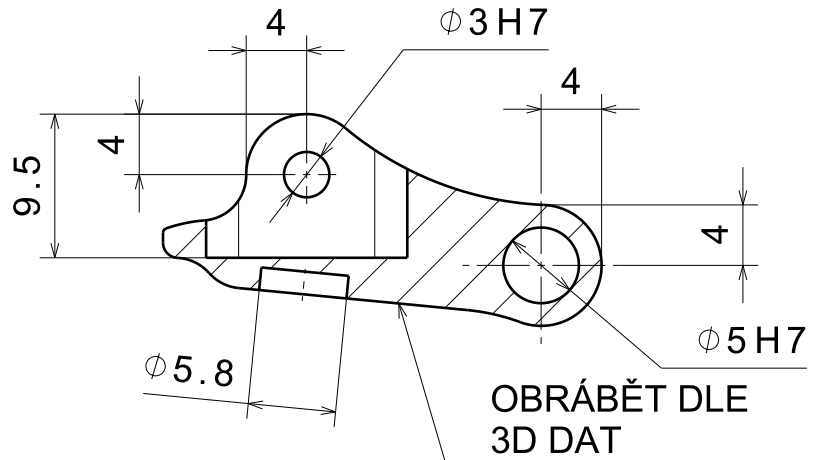
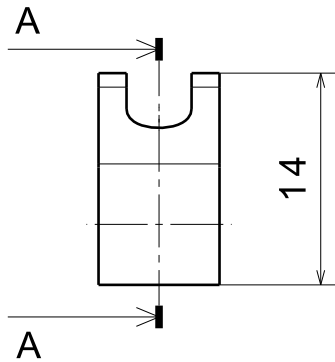
D

C

B

A

ŘEZ A-A



3,2

NAKRESLIL:

JAN ŠÁFR

DATUM:

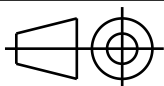
24.5.2016

ZKontroloval:

DATUM:

VELIKOST:

A4



MÉRITKO:

2:1

PŘESNOST:

ISO 2768mK

ČÍSLO VYKRESU:

4-KSA-VS-01-04

LIST:

1/1

PÁKA



Technická univerzita v Liberci

Katedra výrobních systémů a automatizace

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

D

A

D

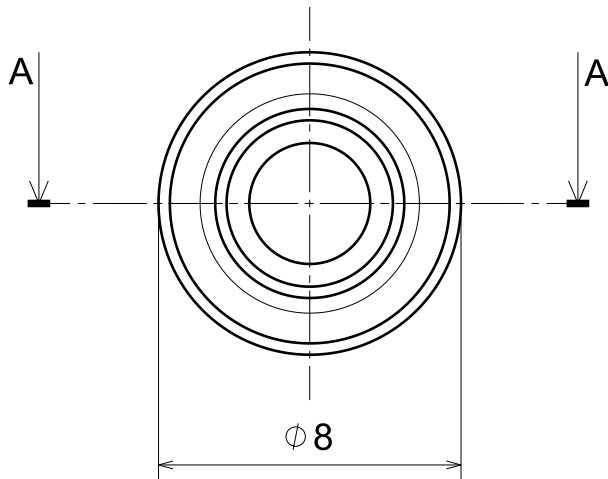
C

B

A

4

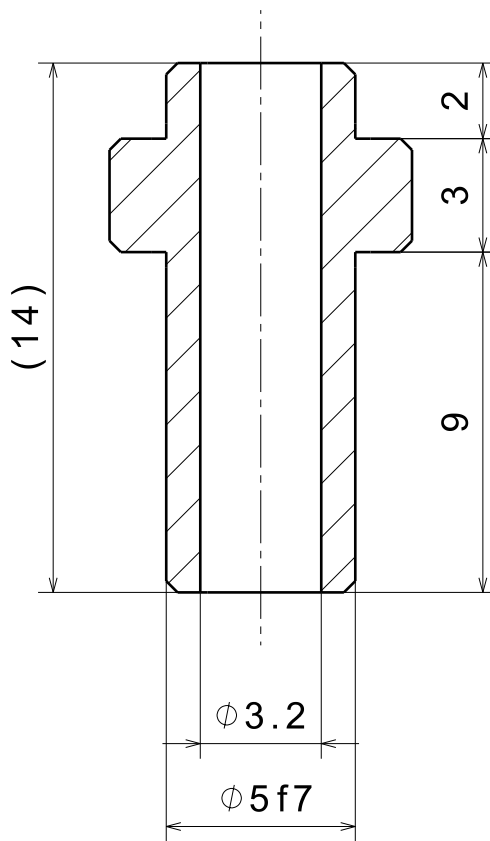
4



ŘEZ A-A

3

3



2

2

NEKÓTOVANÁ SRAŽENÍ 0,5x45°

3,2

NAKRESLIL:

JAN ŠÁFR

DATUM:

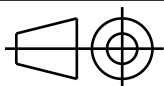
24.5.2016

ZKontroloval:

DATUM:

VELIKOST:

A4



Katedra výrobních systémů a automatizace

MÉRITKO:

5:1

PŘESNOST:

ISO 2768mK

ČÍSLO VYKRESU:

4-KSA-VS-01-05

LIST:

1/1

ČEP



Technická univerzita v Liberci

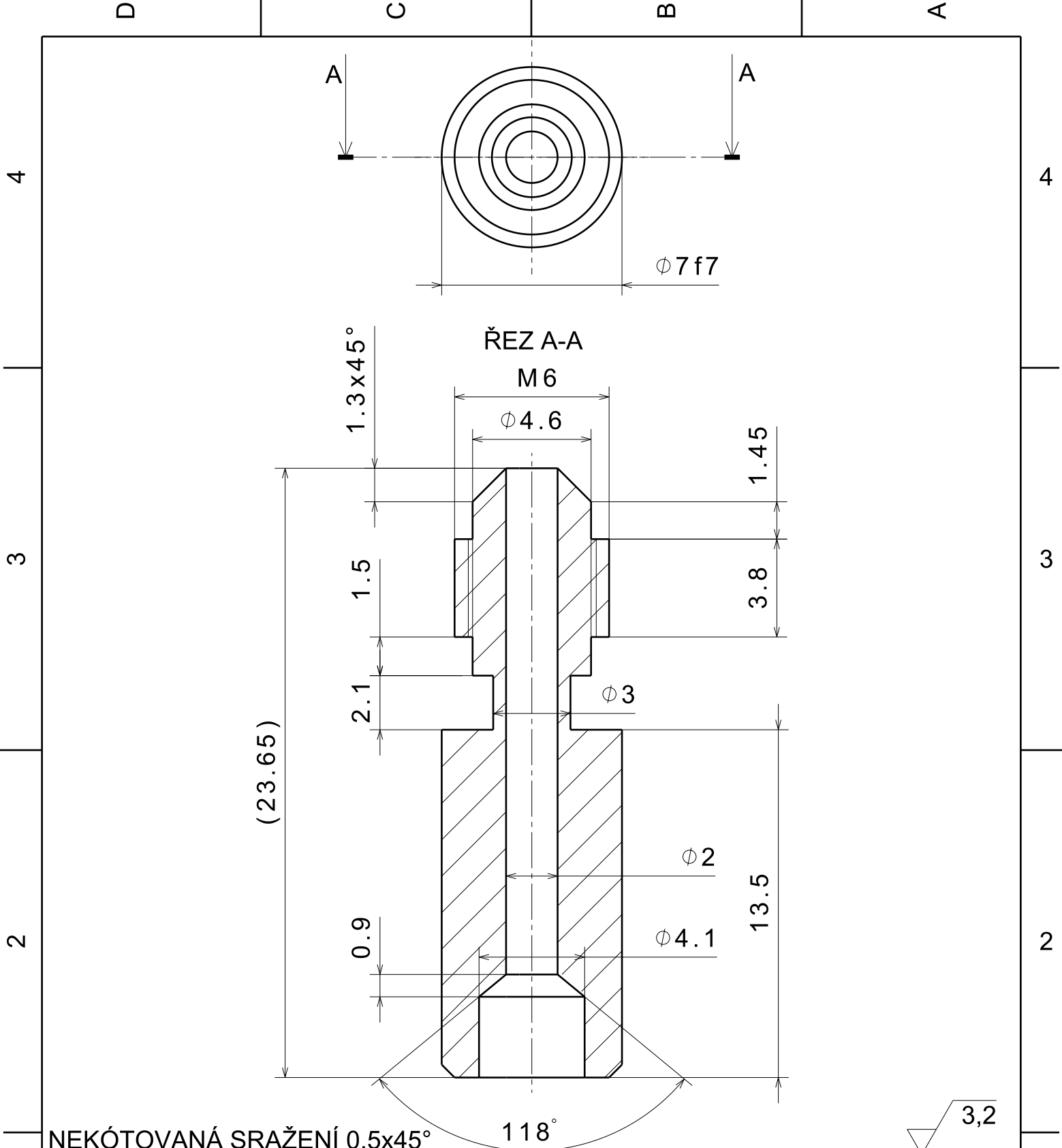
I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

1

1

D

A



NEKÓTOVANÁ SRAŽENÍ 0.5x45°

118°

3,2

NAKRESLIL:	JAN ŠÁFR
DATUM:	24.5.2016
ZKontroloval:	-
DATUM:	-
VELIKOST:	A4
MÉRITKO:	5:1
PŘESNOST:	ISO 2768mK

<b>HEATBREAK</b>	
	Technická univerzita v Liberci
Katedra výrobních systémů a automatizace	
CÍSLO VYKRESU:	4-KSA-VS-01-06
LIST:	1/1

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

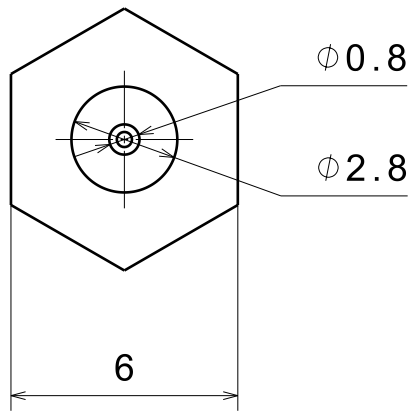
D

C

B

A

4

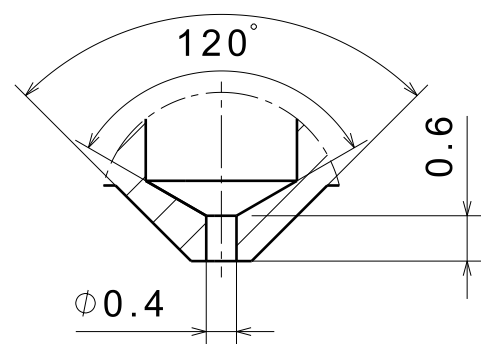


Detail B

10:1

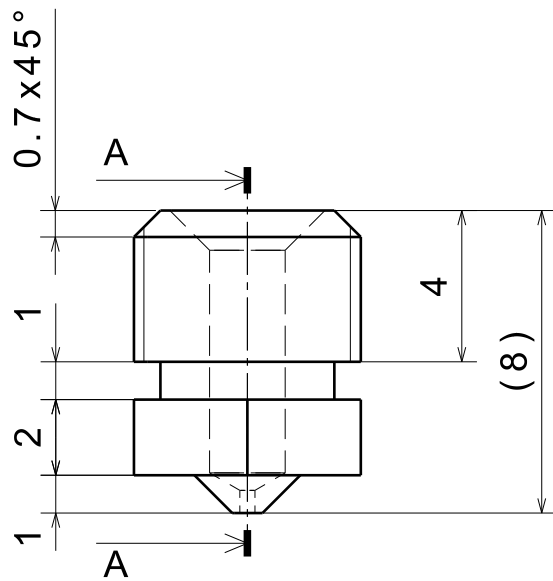
90°

120°

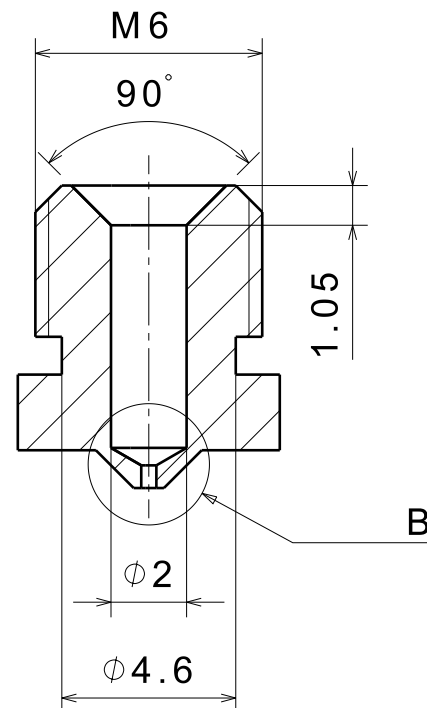


4

3



ŘEZ A-A



3

2

2

NAKRESLIL:

JAN ŠÁFR

DATUM:

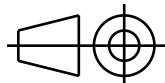
24.5.2016

ZKontroloval:

DATUM:

VELIKOST:

A4



MÉRITKO:

5:1

PŘESNOST:

ISO 2768mK

ČÍSLO VYKRESU:

4-KSA-VS-01-07

LIST:

1/1

# TRYSKA



## Technická univerzita v Liberci

### Katedra výrobních systémů a automatizace

3,2

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

1

D

A

D C B A

4

3

2

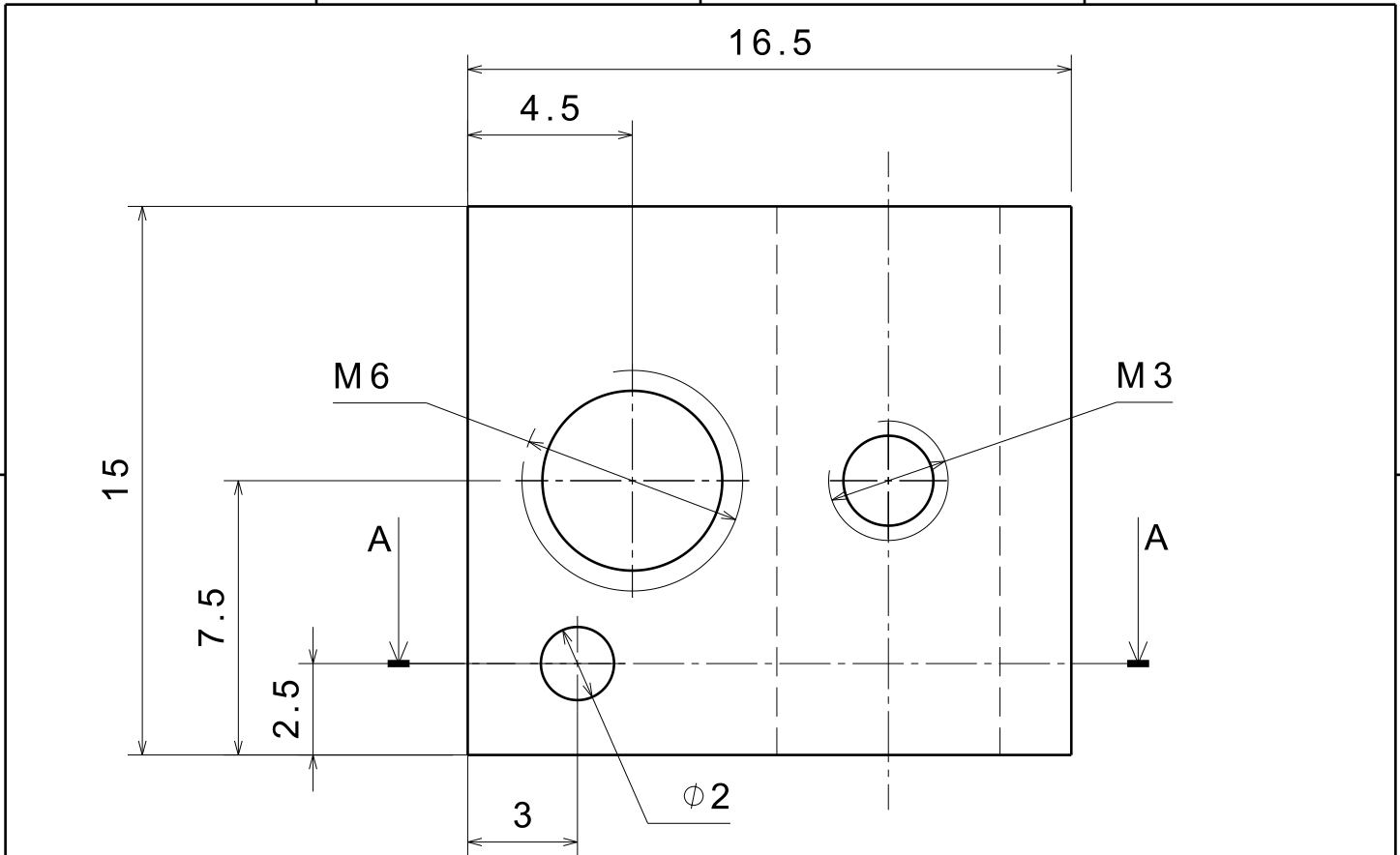
1

4

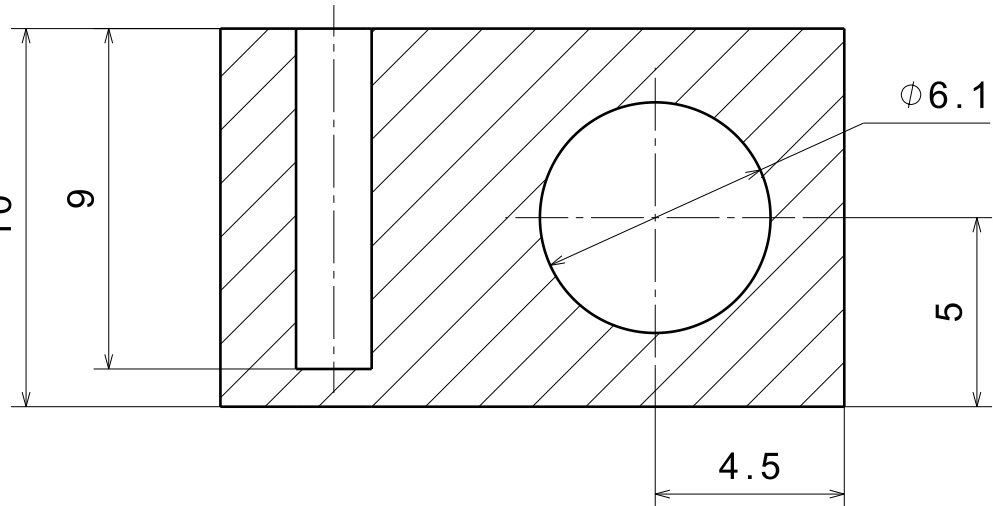
3

2


1



ŘEZ A-A



NAKRESLIL:	JAN ŠÁFR
DATUM:	24.5.2016
ZKontroloval:	-
DATUM:	-
VELIKOST:	A4
MÉRITKO:	5:1
PŘESNOST:	ISO 2768mK

<h1>TOPNÝ BLOK</h1>	
	Technická univerzita v Liberci
Katedra výrobních systémů a automatizace	
CÍSLO VYKRESU:	4-KSA-VS-01-08
LIST:	1/1

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

D A