



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

## 3D TISKÁRNA FDM SE ZABUDOVANÝM PODAVAČEM MATERIÁLU

3D FDM PRINTER WITH BUILT-IN FEEDER OF FILAMENT

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Puchta

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

BRNO 2020



## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Daniel Puchta
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing. Jan Pavlík, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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

### **3D tiskárna FDM se zabudovaným podavačem materiálu**

**Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Navrhněte a konstrukčně zpracujte FDM 3D tiskárnu s minimálním pracovním prostorem 200 x 200 x 200 mm. Tiskárna bude mít integrovaný podavače materiálu s měřením zbývajících materiálu, detekci vypořehování filamentu atd. Informace z podavače budou využívány systémem k optimalizaci procesu tisku.

**Cíle diplomové práce:**

Důkladná analýza problematiky.

Systémový rozbor řešené problematiky, návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.

Návrh variant řešení a zdůvodnění výběru konkrétního řešení.

Konstrukční návrh zvolené varianty – 3D model.

Výpočtová zpráva.

Výkresová dokumentace vybraných uzlů.

Závěr a doporučení pro praxi.

**Seznam doporučené literatury:**

PRŮŠA, Josef. Základy 3D tisku [online]. 1. Praha: Prusa Research s.r.o., 2014 [cit. 2016-09-30]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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



## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem FDM 3D tiskárny se zabudovaným podavačem materiálu, který mimo jiné slouží i pro měření zbývajících materiálu. Cílem této práce je konstrukční návrh 3D tiskárny o minimálním tiskovém objemu 200x200x200 mm s využitím dat pro optimalizaci tisku. Tato 3D tiskárna je cílena na uživatele bez zkušeností s 3D tiskem, a proto byl kladen důraz na jednoduchost ovládání, spolehlivost a uživatelsky přívětivé řešení tiskárny. Protože předložené konstrukční řešení je originální, bylo nutné jej experimentálně ověřit, přičemž experimentální ověření je součástí této práce. Volba konstrukce podavače materiálu, což je zásadní pro předkládanou práci, byla zdůvodněna realizací prototypů dvou vhodných konstrukcí, z nichž bylo vybráno optimální řešení. Poznatky z testování prototypů byly následně využity pro finální konstrukci 3D tiskárny. Využití dat pro optimalizaci procesu tisku je realizováno C++ kompatibilním zdrojovým kódem, který je součástí této diplomové práce.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with mechanical design of FDM 3D printer with a built-in material feeder with monitoring of remaining material. The aim of this thesis is designing the FDM 3D printer with minimum print volume of 200x200x200 mm and with usage of measured data for optimising the 3D printing process. This 3D printer is targeted to the non-experienced users, so the emphasis was on ease of use and reliability of the printer. Despite the fact that it is an innovative design solution, the suitability of the design was verified experimentally as part of this thesis. The choice of the material feeder design, which is essential for the presented thesis, was justified by the realization of prototypes of two suitable designs, from which the optimal solution was chosen. The knowledge obtained from testing the prototypes was then used for the final design of 3D printer. The usage of data for optimization of the printing process is realized by a C++ compatible source code that is a part of this thesis.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

3D tiskárna, FDM, zbývajcí materiál, jednoduchost ovládání, spolehlivost, testování prototypů

## **KEYWORDS**

3D printer, FDM, remaining material, ease of use, reliability, prototype testing

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PUCHTA, Daniel. 3D tiskárna FDM se zabudovaným podavačem materiálu. Brno, 2020. 111 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121683>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Pavlík.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji Ing. Janu Pavlíkovi, Ph.D. za vedení, cenné rady a vstřícný přístup. Dále děkuji Ing. Rostislavu Huzlíkovi, Ph. D. za odborné rady týkající se elektronických komponent. Děkuji Ústavu konstruování za poskytnutí vhodných prostor a nářadí pro realizaci prototypu. A děkuji své rodině a přítelkyni Veronice za trpělivost a podporu po celou dobu studia.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 21.5.2020

.....

Daniel Puchta



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>17</b>
2.1	Technologie 3D tisku FDM	17
2.1.1	Projekt RepRap	18
2.1.2	Profesionální 3D tiskárny	18
2.2	Kinematické struktury 3D tiskáren	19
2.2.1	Sériová struktura	19
2.2.2	Delta tiskárny	19
2.2.3	H-Bot	20
2.2.4	Core XY	20
2.2.5	Mostová kinematika	21
2.3	Způsoby použití materiálu	22
2.3.1	Tiskárny umožňující použít libovolný materiál	22
2.3.2	Tiskárny umožňující použití pouze specifického materiálu	24
2.4	Konstrukční celky tiskáren	25
2.4.1	Extruder	25
2.4.2	Tisková podložka	25
2.5	Elektronické komponenty tiskáren	27
2.5.1	Řídící elektronika	27
2.5.2	Krokové motory	28
2.5.3	Drivery krokových motorů	28
2.5.4	Uživatelské rozhraní	29
2.6	Firmware	30
2.6.1	Porovnání nejrozšířenějších firmwarů	30
2.7	Mechanické vlastnosti tisknutých součástí	31
2.7.1	Vliv orientace výtisku	31
2.7.2	Vliv hustoty výplně	32
2.7.3	Vliv multiplikátoru extruze	33
2.7.4	Vliv teploty extruze	34
2.7.5	Rozložení tepla při tisku	34
2.8	Rozměrová přesnost tisknutých součástí	35
2.8.1	Vliv parametrů tiskárny	35
2.9	Vlastnosti materiálu ovlivňující průběh tisku	36
2.9.1	Vliv vlhkosti materiálu na průběh tisku	36
2.9.2	Vliv nečistot na povrchu filamentu	37
<b>3</b>	<b>SYSTÉMOVÝ ROZBOR</b>	<b>39</b>
3.1	Formulace problému	39
3.2	Formulace cílů řešení	39
<b>4</b>	<b>NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A ZDŮVODNĚNÍ VÝBĚRU</b>	<b>41</b>
4.1	Výběr varianty podavače materiálu	41
4.1.1	Uchycení cívky na tyč	42
4.1.2	Vložení cívky na válečky	42
4.1.3	Gramofonová konstrukce podavače	45
4.2	Výběr vhodné varianty konstrukce tiskárny pro daný podavač materiálu	50
4.3	Ostatní komponenty 3D tiskárny	51

<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....</b>	<b>52</b>
5.1	Podavač materiálu .....	53
5.1.1	Přítlačný kužel.....	56
5.1.2	Odvíjení cívky a měření hmotnosti .....	58
5.1.3	Snímač napnutí .....	60
5.1.4	Extruder .....	61
5.1.5	Návod na vložení filamentu .....	62
5.1.6	Řídicí desky.....	62
5.1.7	Komunikační rozhraní.....	64
5.1.8	Zdroj napětí .....	66
5.2	Osa Z .....	67
5.2.1	Svařenec čelního krytu .....	68
5.2.2	Svařenec dna .....	69
5.2.3	Sestava motoru osy Z.....	70
5.2.4	Tisková platforma .....	70
5.2.5	Vedení osy Z .....	72
5.2.6	Výpočty osy Z .....	72
5.3	Rovina XY.....	74
5.3.1	Uchycení vertikálních podpěr k rámu .....	75
5.3.2	Sestava U.....	75
5.3.3	Sestava hot-endu .....	76
5.4	Zásuvka na úlomky filamentu .....	77
5.5	Kryty 3D tiskárny .....	80
5.5.1	Boční kryty.....	80
5.5.2	Horní kryt.....	80
5.5.3	Přední dveře.....	81
5.5.4	Vnitřní kryt motoru osy Z .....	82
5.5.5	Zadní servisní kryt 3D tiskárny .....	83
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VHODNOSTI TISKÁRNY .....</b>	<b>84</b>
6.1	Programování ve vývojovém prostředí Arduino IDE .....	84
6.1.1	Základní struktura zdrojového kódu.....	84
6.1.2	Často užívané funkce .....	85
6.1.3	Pravidla pro zdrojové kódy .....	85
6.2	Určení zbývajícího materiálu .....	86
6.2.1	Přesnost měření hmotnosti .....	86
6.2.2	Popis zdrojového kódu měření hmotnosti.....	87
6.2.3	Výsledky měření hmotnosti .....	89
6.2.4	Určení množství materiálu potřebného pro tisk .....	91
6.2.5	Určení zbývajícího materiálu na cívce .....	92
6.3	Podavač materiálu .....	93
6.3.1	Módy podavače materiálu .....	93
6.3.2	Naprogramování funkcí podavače materiálu .....	94
6.3.3	Návod na vyzkoušení funkce podavače materiálu .....	97
<b>7</b>	<b>ZHODNOCENÍ A DISKUZE .....</b>	<b>98</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>101</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>103</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>107</b>
10.1	Seznam tabulek.....	107

10.2 Seznam obrázků.....	108
<b>11 SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>111</b>



# 1 ÚVOD

Výhodou technologie 3D tisku oproti konvenčním technologiím výroby je, že je schopna pružně a rychle reagovat na novou situaci, která vyžaduje rychlou změnu výroby. Tuto skutečnost jsme mohli zaznamenat v době koronavirové pandemie, kdy na celém světě byli výrobci a uživatelé 3D tiskáren jedni z prvních, kdo začali masivně vyrábět ochranné štíty a ochranné masky, a značnou měrou pomohli pokrýt jejich urgentní nedostatek.

Trh 3D tisku stále není zcela nasycen, a to z toho důvodu, že nové zájemce odrazuje fakt, že celý proces 3D tisku je příliš složitý. Navíc počet potenciálních uživatelů doposud nevyužívajících 3D tisk, kteří by ho však dokázali smysluplně implementovat do výroby, například pro zefektivnění vývoje nebo pro snížení nákladů kusové výroby, násobně převyšuje počet těch, kteří technologii 3D tisku již aplikovali.

3D tisk zažil v posledních sedmi letech masivní rozmach – zejména technologie FDM díky projektu RepRap. Uživatelé, kteří se 3D tisku začali věnovat v počátcích jeho rozmachu (tedy v roce 2013), tvrdí, že 3D tisk metodou FDM je již zvládnutá technologie, u které není co inovovat. Problémem je, že velká část zakladatelů současných významných firem vyrábějících 3D tiskárny jsou právě tito uživatelé. Existuje zde však zásadní rozdíl mezi tím, jak tuto technologii vnímá nezkušený potenciální uživatel (jichž je většina) a jak pokročilý uživatel.

Zkušení uživatelé mají sice zájem rozšiřovat možnosti využití 3D tisku, například tiskem z pokročilých materiálů, což je však mnohem náročnější než běžný tisk. Je zde totiž nezbytné správně nastavit tisková data před spuštěním tisku. To je ale velmi obtížné, pokud uživatel nemá žádné zkušenosti s 3D tiskem. Z tohoto důvodu dochází k prohlubování bariéry, která nové uživatele odrazuje od využití 3D tisku.

Autor této práce se rozhodl na problematiku 3D tisku podívat z jiného úhlu. Problémem technologie 3D tisku nejsou fyzické vlastnosti výtisků, ale spíše fakt, že 3D tiskárny stále nelze považovat za uživatelsky přívětivá zařízení. Technologie je možná zvládnutá z pohledu pokročilých uživatelů, ale pro nové zájemce je příliš složitá, což je odrazuje od zakoupení první 3D tiskárny.

Jednou z hlavních skutečností způsobujících nízkou uživatelskou přívětivost je fakt, že 3D tiskárna není schopna vždy zajistit kvalitní odvíjení tiskového materiálu, který je navinutý na cívce. Tak může dojít k zaseknutí tiskového materiálu, což v lepším případě způsobí pozastavení tiskárny, v horším případě to způsobí ztrátu několikahodinové práce tiskárny a tím i ztrátu finanční.

Další skutečností je, že uživatel není dopředu informován o riziku, že během tisku může dojít k vypotřebování veškerého tiskového materiálu a tisk pak bude pozastaven. To je problém zejména u tiskáren, kde není cívka s tiskovým materiálem vložená v tiskárně na první pohled viditelná.

Tyto dva aspekty 3D tiskárny navržená v této práci řeší a přibližuje tak 3D tisk největší skupině potenciálních uživatelů – tedy těm bez zkušeností. V práci se nachází experimentální ověření nového systému manipulace 3D tiskárny s tiskovým materiálem navinutým na cívce a celá tiskárna je navržena tak, aby pomocí snadných úprav ji bylo možné malosériově vyrábět.





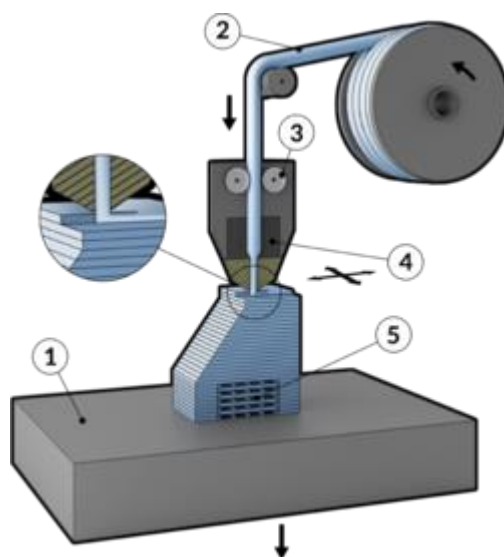
## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Technologie 3D tisku FDM

3D tisk FDM (fused deposition modeling) je proces, ve kterém se postupně nanášejí jednotlivé vrstvy tak, že po nanesení všech vrstev a po následné úpravě vznikne finální výrobek. Před samotným tiskem je nejprve nutné vytvořit 3D model, který je na PC pomocí speciálního softwaru, takzvaného sliceru, nařezán na jednotlivé vrstvy a pak dále upraven z technologických důvodů. Velmi často je vnitřní struktura výtisku vyplněna speciální strukturou generovanou pomocí sliceru z důvodu omezení spotřeby materiálu a zrychlení tisku při akceptovatelných výsledných mechanických vlastnostech. Pomocí sliceru je následně generován g-kód, jenž obsahuje instrukce pro pohyb tiskárny při tisku. G-kód je do tiskárny nahrán pomocí počítače, případně je do tiskárny vložena SD karta s g-kódem, což je nejpoužívanější řešení.

Princip technologie FDM je schematicky zobrazen na Obr. 1). Termoplast je navinut na cívce a je podáván během tisku pomocí podávacího mechanismu do extruderu. V extruderu se tiskový materiál – termoplast – zahřeje na teplotu skelného přechodu, při níž je plastický. Extruder se poté pohybuje v rovině XY a postupně nanáší plastický termoplast, který po svém nanesení tuhne, na tiskovou podložku, nebo případně na předchozí vrstvu, s níž se vlivem vysoké teploty spojí. Jakmile je dokončen tisk jedné vrstvy v rovině XY, začne se tisknout nová vrstva posunutím extruderu, nebo tiskové podložky, v ose Z. [1]

Technologie FDM je nejrozšířenější technologií 3D tisku díky své jednoduchosti, z čehož plynou nízké pořizovací a provozní náklady. Za masivním zlevněním a zpřístupněním široké veřejnosti stál projekt RepRap. Na projektu RepRap je v současné době založena většina spotřebitelských 3D tiskáren. [2]



Obr. 1) Princip technologie FDM [28]  
 1- Tisková podložka, 2 - Termoplast, 3 - Podávací mechanismus extruderu,  
 4 - Topné těleso extruderu,  
 5 - Tisknutý výrobek

### **2.1.1 Projekt RepRap**

Jedná se o projekt založený doktorem Adrianem Bowyerem, jehož cílem je vyvíjet 3D tiskárny, které jsou schopny replikovat samy sebe. To znamená, že díly použité pro 3D tiskárnu jsou buď snadno dostupné (například závitové tyče, spojovací součásti, krokové motory, řídicí elektronika a podobně), anebo jsou složitější díly vytisknuty pomocí jiné 3D tiskárny. Veškerá data projektu – tedy návrhová data, zdrojový kód řídicího softwaru, postup montáže a další – jsou volně dostupná. [3]

Vlastnosti RepRap 3D tiskáren se liší v závislosti na jejich výrobcích. Někteří výrobci – například Prusa Research – cílí na domácí hobby uživatele a tiskárny dodávají jak formou stavebnice, tak jako hotová zařízení. U těchto 3D tiskáren je většinou předpoklad, že uživatel je nadšenec do 3D tisku a že nebude mít problém tiskárnu rozebrat a následně opravit, nebo upgradovat. Na druhou stranu existují výrobci, jejichž 3D tiskárny jsou také založeny na projektu RepRap, ale jejichž cílová skupina jsou spíše uživatelé, kteří chtějí 3D tiskárny pouze používat, a ne je opravovat, či modifikovat. Mezi nejvýznamnější takové výrobce patří Ultimaker. [3]

### **2.1.2 Profesionální 3D tiskárny**

Na rozdíl od spotřebitelských 3D tiskáren jsou profesionální 3D tiskárny uzavřené architektury. Výrobci těchto 3D tiskáren návrhová data otevřeně nesdílí. Jejich konstrukce je přímo uzpůsobena tak, aby cílila na určitý okruh uživatelů. To způsobuje, že tyto 3D tiskárny jsou obecně spolehlivější, je možné je používat ihned po nainstalování, dosahují lepších výsledků a jejich ovládání je pro uživatele jednodušší. Na druhou stranu mají vyšší pořizovací i provozní náklady a pro jejich opravy je často potřeba využít autorizovaný servis. Mezi přední výrobce profesionálních FDM 3D tiskáren patří firma Stratasys.

## 2.2 Kinematické struktury 3D tiskáren

Obecně je možno 3D tiskárny, podobně jako jiné výrobní stroje, rozdělit dle jejich kinematického uspořádání na tiskárny sériové kinematické struktury a na tiskárny paralelní kinematické struktury.

### 2.2.1 Sériová struktura

Sériová kinematická struktura má prvky řazeny sériově a skládá se z kombinace rotačních a translačních kinematických dvojic. Toto uspořádání má ale některé nevýhody, především nižší tuhost a nižší rychlost tisku. Nevýhodou sériové struktury je fakt, že chyby v jednotlivých členech se sčítají. Proto byly vyvinuty delta 3D tiskárny (jež mají paralelní kinematickou strukturu) a 3D tiskárny s kombinovanou kinematickou strukturou. [4]

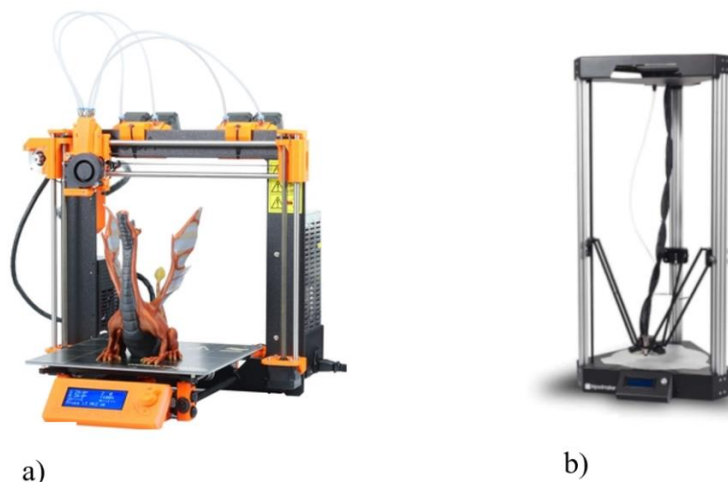
Typickým zástupcem tiskáren se sériovou strukturou je tiskárna Prusa i3 mk3 – Obr. 2) a)

### 2.2.2 Delta tiskárny

Delta tiskárny jsou jediné rozšířené 3D tiskárny, jejichž kinematická struktura je paralelní. Pohyb extruderu v osách X, Y, Z je kombinace pohybu tří ramen, pomocí nichž je extruder uchycen k rámu. Obecně pro jakoukoliv paralelní strukturu platí, že tato struktura má oproti sériové struktuře větší tuhost, což v tomto případě umožňuje rychlejší pohyb tisku vlivem rychlejšího pohybu extruderu při zachování dostatečné přesnosti. Pozitivně se na kvalitě tisku při vyšší rychlosti projeví také nižší hmotnost extruderu, protože u delta tiskáren je podávací mechanismus extruderu přichycen ve většině případů k rámu a není umístěn přímo na tiskové hlavě.

Nevýhodou delta tiskáren je fakt, že při stejné velikosti tiskového prostoru v rovině XY má tiskárna větší zástavbové rozměry a také je nutná delší osa Z. Tiskárny jsou vhodnější k tisku vyšších modelů. Také je uváděno, že tiskárny jsou složitější na řízení, tento fakt ale již není relevantní pro tiskárny využívající projekt RepRap, protože v rámci stejného open-source řídicího softwaru jsou delta tiskárny podporovány a cena dostatečně výkonných procesorů je nyní nízká. Oproti tiskárnám se sériovou kinematickou strukturou jsou ale konstrukčně náročnější, a tedy i dražší. [3] [4]

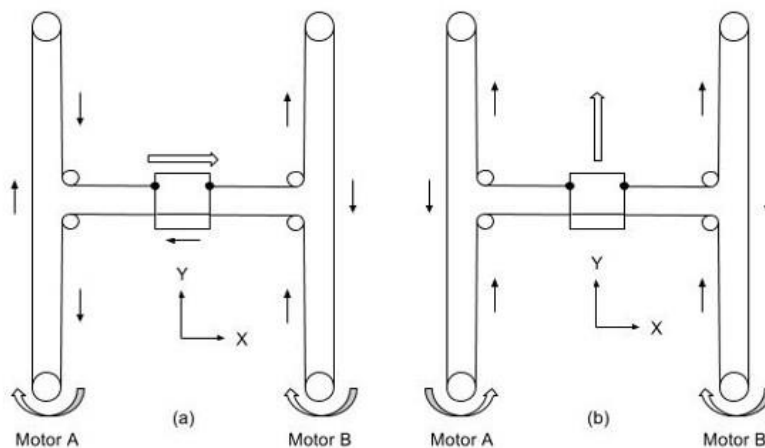
Typická delta 3D tiskárna je na Obr. 2) b).



Obr. 2) a) Prusa i3 mk3 – 3D tiskárna sériové kinematické struktury [27]  
b) Tripodmaker – delta 3D tiskárna paralelní kinematické struktury [3]

### 2.2.3 H-Bot

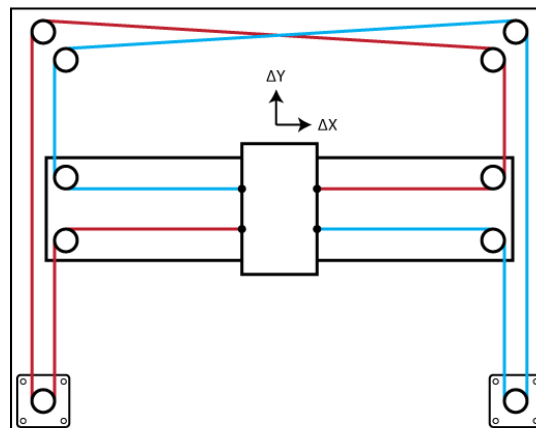
U kinematiky H-bot jsou pro pohyb v rovině XY použity 2 motory, které jsou spojeny jedním ozubeným řemenem. H-Bot strukturu schematicky ukazuje Obr. 3). Otáčí-li se motor A s motorem B proti sobě, pohybuje se základna s extruderem ve směru osy Y. Otáčí-li se motor A i motor B stejným směrem, pohybuje se základna s extruderem ve směru osy X. Při pohybu základny ve směru osy X se část řemene nalevo od základny pohybuje dolů, zatímco pravá část řemene se pohybuje nahoru. Základna s extruderem má tendenci se začít kroutit, což negativně ovlivňuje výslednou přesnost tisku. V ose Z se pohybuje tisková podložka. Kromě tiskáren založených na projektu RepRap se H-bot struktura vyskytuje i u některých profesionálních 3D tiskáren.



Obr. 3) Kinematika H-Bot [29] a) Kroucení vlivem různého směru pohybu řemene  
b) Bez kroucení díky stejnému směru pohybu řemene

### 2.2.4 Core XY

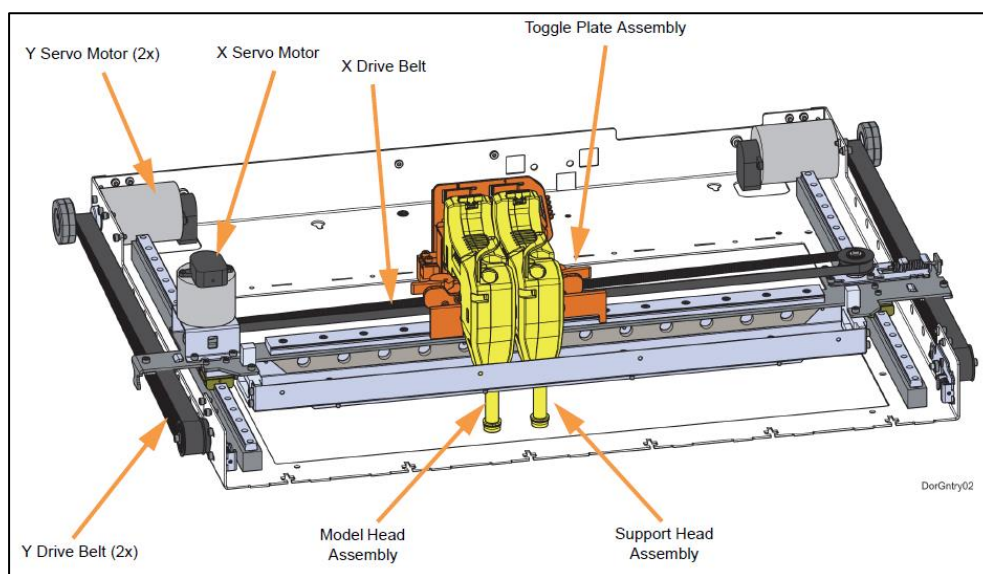
Na rozdíl od H-bot kinematiky, jsou u kinematiky Core XY použity dva řemeny z důvodu zamezení nepřesností nebo zasekávání vlivem tendence základny se kroutit. Každý z řemenů uchycuje základnu na jejich různých stranách tak, aby nebyly řemeny proti sobě, ale úhlopříčně. Tato struktura je oblíbená u RepRap 3D tiskáren, ale také se používá u některých profesionálních 3D tiskáren. Kinematika Core XY je zobrazena na Obr. 4).



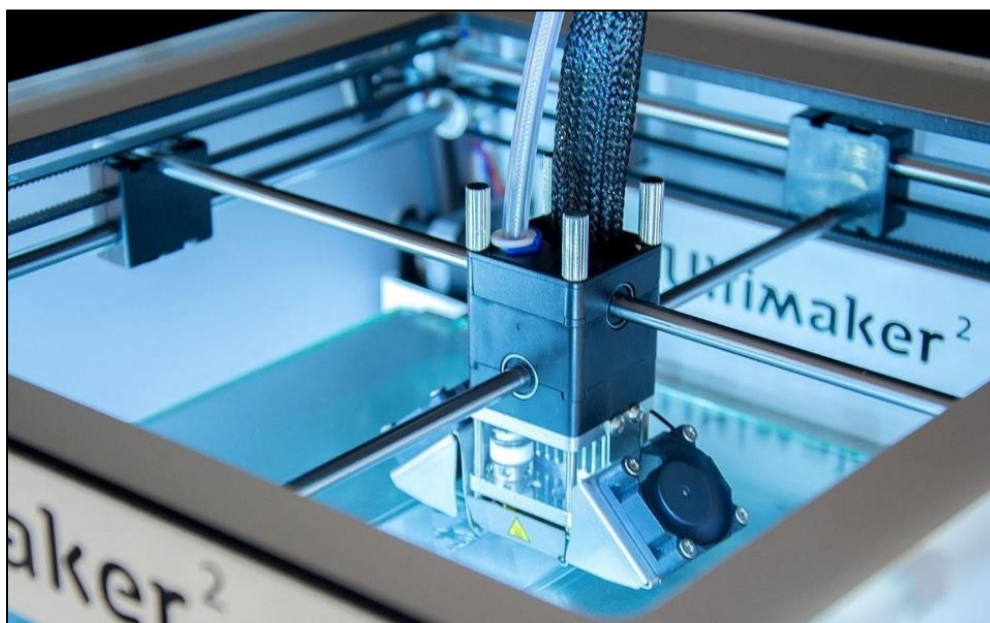
Obr. 4) Kinematika Core XY [28]

## 2.2.5 Mostová kinematika

Tato struktura je zobrazena na Obr. 5). Tisková podložka se pohybuje v ose Z. Tiskové hlavy s extrudery jsou umístěny na platformě, na níž se mohou pohybovat po ose X pomocí ozubeného řemenu, který je poháněn servomotorem. Tato platforma je poté umístěna na kolejničích, na nichž se celá platforma pohybuje v ose Y. Celkově má tato kinematická struktura 4 servomotory sloužící pro pohyb v rovině XY (2 pro pohyb v ose Y, jenž jsou synchronizovány, 1 pro pohyb v ose X a 1 pro pohyb v ose Z). Tato kinematická struktura je používána například u 3D tiskáren Stratasys, hlavně díky své vysoké tuhosti. Pohyb dílů po kolejničích může být nahrazen pohybem základny s ložisky po vodicích tyčích. Takovou kinematickou strukturu využívají například tiskárny Ultimaker – kinematika tiskárny je zobrazena na Obr. 6).



Obr. 5) Kinematika FDM 3D tiskáren Stratasys [34]



Obr. 6) Kinematika 3D tiskárny Ultimaker 2 [35]

## 2.3 Způsoby použití materiálu

Přístupy použití materiálu se liší v závislosti od výrobce. Výrobci 3D tiskáren založených na projektu RepRap nejčastěji umožňují použití libovolného materiálu navinutého na cívce. Někteří výrobci ale v případě jimi nedoporučeného materiálu snižují poskytovanou záruku. Výrobci profesionálních 3D tiskáren umožňují také používat libovolný materiál navinutý na cívce, nebo jsou zde využity speciální nosiče a tiskárna pak může pracovat pouze s materiálem navinutým na speciálním nosiči. Nejčastěji je pro odvíjení materiálu použita síla vyvinutá podávacím mechanismem extruderu, který je popsán v kapitole 2.4.1.

### 2.3.1 Tiskárny umožňující použít libovolný materiál

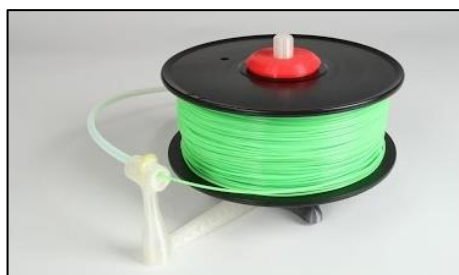
3D tiskárny určené pro běžné spotřebitele (a také některé profesionální 3D tiskárny) používají jako materiál filament navinutý na cívce, které jsou vyráběny různými výrobci. Většina tiskáren má zabudovaný držák sloužící pro uchycení cívky s navinutým filamentem. Výhodou je, že škála materiálů je omezena pouze konstrukčním řešením držáku cívky, maximální silou vyvinutou podávacím mechanismem tiskárny, typy materiálů podporovaných tiskárnou a průměrem filamentu (nejběžněji tiskárny používají filament o průměru 1,75 mm). Tím je u 3D tiskáren dosaženo možnosti použít širokou škálu materiálů. Na Obr. 7) je zobrazen zabudovaný držák strun 3D tiskárny Ultimaker.

V některých případech nemusí být uchycení cívky pomocí zabudovaného držáku tiskárny dostačující, například pokud uživatel používá cívky o vyšším množství materiálu. Může tak docházet k zasekávání podávaného materiálu vlivem nedostatečné síly vyvinuté podávacím mechanismem tiskárny. V takovém případě uživatel musí najít model držáku cívky, který klade menší odpor vůči otáčení cívky, v databázi volně stažitelných modelů (databáze GrabCAD, Thingiverse, a jiné); případně navrhnout své vlastní řešení a poté držák vyrobit. Držák je možno také zakoupit jako hotový výrobek, nabídka je však značně omezená.

Na Obr. 8) je držák strun, jehož díly byly vytisknuty použitím modelu z databáze Thingiverse.



Obr. 7) Držák strun 3D tiskárny Ultimaker [30]



Obr. 8) Držák strun – 3D model je dostupný z databáze Thingiverse [31]

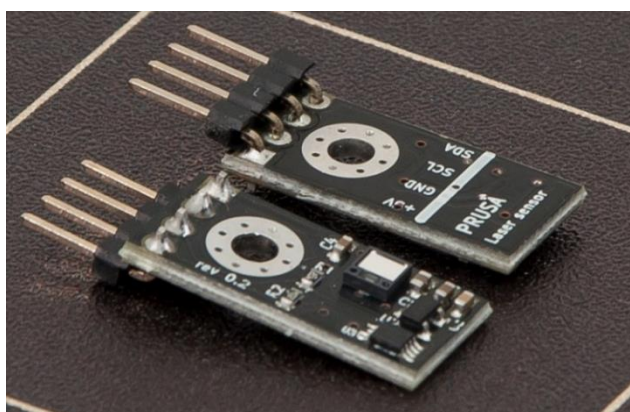
Nevýhodou používání téměř libovolného materiálu je fakt, že výrobci 3D tiskárny nemohou garantovat vlastnosti materiálu dodaného jiným výrobcem, a tak může docházet například k méně kvalitním výtiskům, nebo k ucpávání extruderu tiskárny. Kromě toho tiskárna neposkytuje žádnou informaci o zbývajícím množství materiálu. Nemůže tak například dopředu upozornit uživatele na to, že během tisku jeho sestavy dojde k vypotřebenému materiálu. To snižuje uživatelský komfort. Nejenže u většiny tiskáren dojde ke ztrátě celé tisknuté sestavy, tiskárna je navíc odstavena po dobu několika hodin, než uživatel daný problém zaznamená a vyřeší. Uživatelé se tomuto vyhýbají tak, že nepoužívají cívky, na nichž je navinuto malé množství materiálu, čímž ale dochází k jeho plýtvání.

Některé tiskárny založené na projektu RepRap již disponují senzorem vypotřebeného filamentu, který problém s vypotřebením tiskové struny částečně řeší. Jedná se o jednoduchý mechanismus využívající koncového spínače. Koncový spínač je v kontaktu s tiskovou strunou v poloze sepnuto. Při vypotřebením tiskové struny navinuté na cívce dojde ke ztrátě kontaktu koncového spínače, který je nyní v poloze vypnuto. U jiných tiskáren je použit senzor filamentu na principu laserového záření – viz. Obr. 9). Ten ale u některých materiálech může fungovat nesprávně, např. senzor hlásí přítomnost materiálu, i když tomu tak není. [5]

Je-li obsluha upozorněna na vypotřebením tiskové struny zvukovým signálem, případně jiným způsobem, je díky umístění senzoru u držáku strun ještě k dispozici dostatečné množství materiálu pro dotisknutí současné vrstvy a tiskárna je pozastavena po dobu nutnou k výměně materiálu.

Za rozšířením senzorů stojí mimo jiné modifikace open source řídicích systémů šířených v rámci projektu RepRap, která podporuje funkci senzorů filamentu. [3]

I přes výše uvedené některé senzory fungují nespolehlivě, navíc tiskárny stále neumožňují predikci vypotřebením materiálu během tisku.



Obr. 9) Laserový senzor vypotřebením filamentu 3D tiskárny Prusa i3 mk3

### 2.3.2 Tiskárny umožňující použití pouze specifického materiálu

Profesionální 3D tiskárny často umožňují tisknout pouze materiál podporovaný výrobcem. Ať už se jedná o speciální průmyslové tiskárny umožňující kompozitní 3D tisk, nebo o profesionální 3D tiskárny určené do kanceláří. U některých výrobců je takový materiál dodáván ve formě speciálních cívek nebo tiskových kazet.

Mezi takovéto výrobce patří firma Stratasys, kde je materiál dodáván ve formě tiskové kazety nebo cívky, která obsahuje čip, na němž jsou zaznamenány informace o daném materiálu, včetně jeho skutečného množství v nosiči. Taková kazeta je zobrazena na Obr. 10). 3D tiskárny Stratasys neumožňují použít materiál jiného výrobce, a pro tisk z daného materiálu vyžadují informace z čipu. Tisknout z jiného materiálu lze pouze úpravou originálních nosičů materiálu. Pak ale tiskárna disponuje nepřesnými informacemi o materiálu. [6]

Výhodou tohoto přístupu je optimalizace materiálu a tiskárny díky známým vlastnostem jak tiskárny, tak materiálu.

Nevýhodou je, že při výrobě vzniká při navíjení materiálu na nosiče nepřesnost – skutečné množství materiálu se liší od množství udávaného pro daný typ nosiče. Aby při tisku nedošlo ke stavu, kdy podle informace na nosiči ještě zbývá materiál, ale ve skutečnosti byl všechn materiál vypotřebován, je informace o prázdném nosiči hlášena s předstihem. To znamená, že na nosiči je ještě navinut materiál, i když tiskárna hlásí prázdný nosič. Výroba kazet s přesnější informací o navinutém množství by dále navýšila výrobní náklady a zvýšila tak cenu kazet. Na druhou stranu kvůli vyšší ceně speciálních nosičů mají uživatelé tendenci vypotřebovat všechn materiál. Další nevýhodou je, že kazetový nosič neumožňuje vizuální odhad zbývajících množství materiálu. Doporučení výrobce je, aby byl po vyjmutí nosiče z tiskárny na nosič nalepen papír s informací o zbývajícím množství materiálu, což ale snižuje uživatelský komfort.

Tento způsob použití materiálu profesionální tiskárnou má oproti RepRap tiskárnám se senzorem filamentu výhodu v tom, že dokáže předpovědět, že při tisku dojde k vypotřebování materiálu ještě před jeho samotným zahájením. Jeho nevýhoda spočívá v tom, že na rozdíl od RepRap tiskáren se senzorem filamentu není možné vypotřebovat veškerý materiál na daném tiskovém nosiči.



Obr. 10) Speciální kazeta s tiskovým materiálem Stratasys [33]

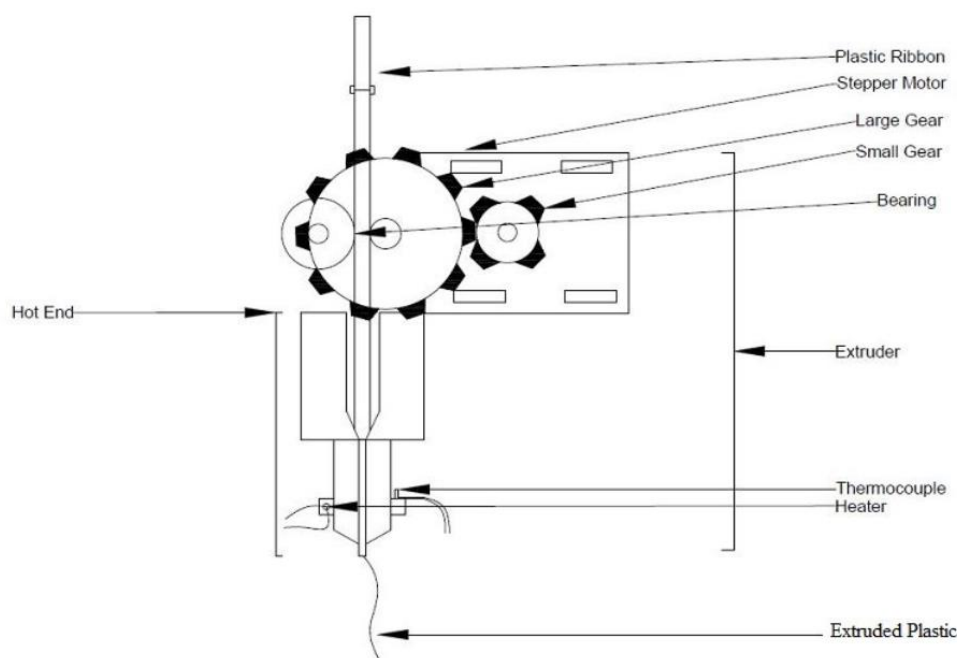


## 2.4 Konstrukční celky tiskáren

V této kapitole budou popsány důležité konstrukční celky tiskáren.

### 2.4.1 Extruder

Schéma extruderu je na Obr. 11). Filament o určité tloušťce je podáván podávacím mechanismem do hot-endu. Podávací mechanismus se skládá z krokového motoru, který pohání pomocí ozubeného převodu drážkované kolo. Drážkování je zde z důvodu vyšší spolehlivosti podávání. Z druhé strany filamentu je přítlačný váleček, který přitlačuje filament k drážkovanému kolu pomocí pružiny. Hot-end extruderu slouží k zahřátí filamentu na teplotu skelného přechodu, při níž je filament plastický. V hot-endu je umístěno čidlo měřící teplotu – nejčastěji termistor. Průměr otvoru trysky umístěné ve spodní části hot-endu ovlivňuje šířku jedné vrstvy. Nejčastější je průměr trysky 0,4 mm. Pro rychlejší tisk je nutné použít větší šířku vrstvy a tím pádem i větší průměr otvoru trysky, přičemž ale výsledný model bude hrubší. Pro jemnější modely je vhodnější tryska s menším otvorem. [2]



Obr. 11) Schéma extruderu [36]

### 2.4.2 Tisková podložka

Při tisku první vrstvy je filament nanášen extruderem na tiskovou podložku. Pro zvýšení adheze je pro tisk z některých materiálů nutné zajistit, aby tisková podložka byla vyhřívána. Vyhřívání je odporové a jako teplotní čidlo je využit opět termistor. Tiskové podložky jsou vyráběny ze skla, hliníkových slitin a teplu odolných plastů. [4]

#### Sklo

Sklo je termálně stabilní a má vysoký modul pružnosti. Vlivem nerovnoměrného vyhřívání ale může u rozměrnější tiskové podložky dojít k jejímu prasknutí. Z uvedeného důvodu je sklo vhodné pro tiskové podložky menších rozměrů. Skleněná podložka je vyobrazena na Obr. 13).

### Hliníkové slitiny

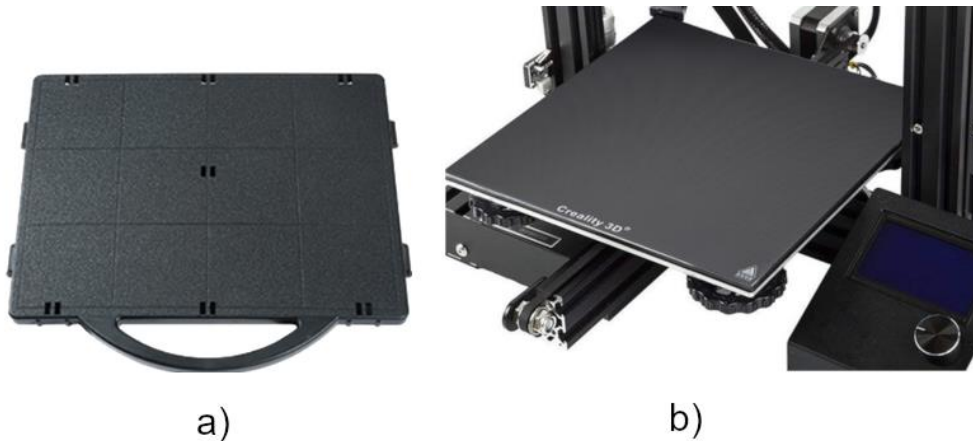
Teplotní roztažnost hliníkových slitin je vyšší, než je tomu u skla. U tiskových podložek vyrobených z hliníkových slitin je velmi důležité rovnoměrné vyhřívání, aby vlivem teplotní roztažnosti hliníku nedocházelo k příliš vysoké deformaci tiskové podložky. Tisková podložka s vhodně provedeným vyhříváním je vhodná pro velkorozměrné tiskárny. Hliníková podložka je vyobrazena na Obr. 12) b).

### Plasty

Tiskové podložky ze speciálních teple odolných plastů jsou používány u profesionálních 3D tiskáren. Jejich výhodou je, že tisková podložka má podobné vlastnosti jako tisknutý materiál, a tudíž je zajištěna velmi dobrá adheze. Plastová podložka se nachází na Obr. 12) a).

### Zvýšení adheze

Pro zvýšení adheze jsou na tiskové podložky přidávány dodatečné materiály, které zvyšují adhezi první vrstvy výtisku. Často jsou používány malířské lepicí pásy, nebo je povrch podložky potřen běžným tuhým lepidlem na papír, případně speciálním sprejovým lakem. [4]



Obr. 12) a) Plastová podložka 3D tiskáren Stratasys [37]  
b) Hliníková podložka 3D tiskárny Creality 3D [38]



Obr. 13) Skleněná tisková podložka tiskárny Ultimaker 2 [39]

## 2.5 Elektronické komponenty tiskáren

U RepRap 3D tiskáren jsou elektronické komponenty vyžadující řízení propojeny pomocí mikrokontroleru, případně speciální řídicí desky založené na principu mikrokontroleru. U profesionálních 3D tiskáren je architektura systému uzavřená, často se jedná o embedded systémy, například embedded Linux. V této kapitole budou popsány jak jednotlivé elektronické komponenty, tak řídicí elektronika RepRap 3D tiskáren.

### 2.5.1 Řídicí elektronika

3D tiskárny založené na projektu RepRap nejčastěji používají vývojové platformy založené buď na architektuře Arduino, nebo na architektuře Raspberry. Řídicí deska je buď celek desky vývojové platformy spojené se speciální deskou pro 3D tiskárnu – například spojení Ramps s Arduinem, nebo se jedná o speciální desku určenou čistě pro řízení 3D tiskárny.

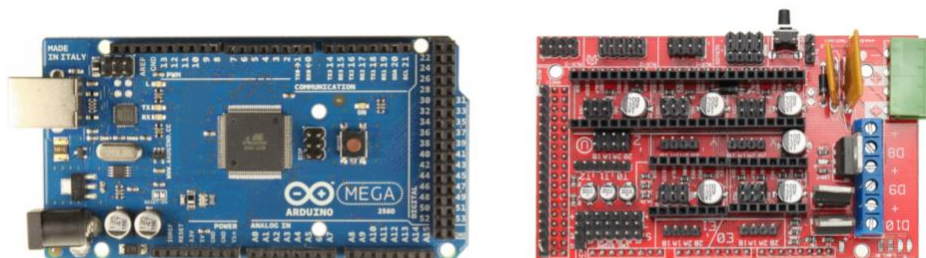
#### Vývojová platforma

Vývojová platforma umožňuje snadno zapojit jednotlivé elektronické součásti a následně zjednodušeně naprogramovat jejich komunikaci a řízení. Vývojové platformy vznikly z důvodu zjednodušeného vývoje různých elektronických zařízení, které pro své řízení potřebují používat složitější software. U 3D tiskáren jsou ale vývojové platformy často použity pro samotnou realizaci tiskárny, nejsou tedy používány pouze pro vývoj. Výhoda tohoto přístupu spočívá ve zjednodušené možnosti vylepšení tiskáren díky jednoduchému zapojení nových elektronických komponent a díky možnosti jednoduše nahrát nový firmware.

Základní komponenty vývojové platformy jsou: procesor, vyrovnávací paměť, paměť ROM, paměť FLASH, port sloužící pro komunikaci, napájecí port, vstupní/výstupní analogové piny, vstupní/výstupní digitální piny. Vývojová platforma je ze své podstaty obecná, není přímo určena pro 3D tiskárny. Platforma Arduino Mega 2560 je na Obr. 14) a).

#### Shield

Shield je speciální deska, jež se propojí s vývojovou platformou. Tato deska ještě více zjednodušuje zapojení jednotlivých komponent a je přímo určena pro 3D tiskárny. Namísto zapojování jednotlivých pinů do mikrokontroleru stačí danou komponentu zapojit do pro ni určených pinů na speciální desce. Pokud na Shieldu zbývají volné piny pro zapojení, je možné dohledat, s kterými piny vývojové platformy jsou spojeny, připojit nové komponenty, a poté upravit firmware tiskárny pomocí standardního programování dané vývojové platformy. [3] Shield Ramps 1.4, který patří mezi nejpoužívanější shiieldy, je zobrazen na Obr. 14) b).



a)

b)

Obr. 14) a) Mikrokontroler Arduino Mega 2560 [40]  
 b) Shield Ramps 1.4 [41]

### **2.5.2 Krokové motory**

Krokové motory slouží pro pohon jednotlivých os a pro pohon podávacího mechanismu extruderu. Nejčastěji je pro pohon každé osy tiskárny použit jeden motor, ale u některých tiskáren mohou být pro jednu z os použity i dva motory (viz. kapitola **2.2.5**). Motory jsou buď přímo spojeny s pohybovým šroubem, kdy je nejčastěji pomocí trapézového šroubu a matice proveden převod rotačního pohybu na translační, nebo je převod rotačního pohybu na translační proveden pomocí řemenice a řemene, který je pevně spojen s danou poháněnou základnou. Dále jsou u dražších tiskáren používány kuličkové pohybové šrouby a matice.

Krokový motor má konstrukčně definovaný krok, vždy se tedy pootáčí o určený počet kroků. Tyto kroky lze z důvodu plynulejšího a přesnějšího pohybu ještě zmenšit, jedná se pak o mikrokrokování. Pro řízení krokového motoru je použit driver, který usnadňuje řízení krokového motoru, díky čemuž jsou kladeny nižší nároky na řídicí elektroniku. Krokové motory většinou není možné napájet přímo pomocí vývojové platformy, je potřeba použít dodatečný zdroj. U profesionálních 3D tiskáren jsou často použity krokové motory se zpětnou vazbou (díky rotačním enkodérům nebo speciálním driverům krokových motorů), vlivem čehož může řídicí systém tiskárny kompenzovat případné vynechání kroku. Kvůli ceně je u 3D tiskáren téměř výhradně využíváno krokových motorů.

### **2.5.3 Drivery krokových motorů**

Impulsy pro řízení krokových motorů je možné generovat přímo pomocí vývojové platformy, ale tento způsob by příliš zatěžoval řídicí elektroniku, navíc by byl složitější pro programování. Z toho důvodu byly vyvinuty drivery, které generují ovládací impulsy krokového motoru v závislosti na jednoduchém příkazu od řídicí elektroniky.

## 2.5.4 Uživatelské rozhraní

Použitá řídicí elektronika přímo ovlivňuje volbu uživatelského rozhraní. 8-bitová architektura řídicí elektroniky není vhodná pro grafické uživatelské rozhraní, vhodnější je 16-bitová a vyšší architektura. U 8-bitové architektury je použit řádkový LCD displej, který slouží pro zobrazování textu, případně jednoduchých grafických symbolů. Ovládání je poté zajištěno pomocí rotačních enkodérů a tlačítek. Nejčastěji užívané rozhraní u levných RepRap 3D tiskáren se nachází na Obr. 16). U 3D tiskáren založených na 16-bitové a vyšší architektuře bývá často použit buď grafický displej s tlačítky a rotačními enkodéry, případně dotykový displej. U dotykového uživatelského rozhraní se vyskytuje u levnějších 3D tiskáren problém s odezvou, takové uživatelské rozhraní navíc není vhodné do nečistého prostředí. Dotykové uživatelské rozhraní je zobrazeno na Obr. 15).



Obr. 15) Dotykové uživatelské prostředí 3D tiskárny Flashforge [42]



Obr. 16) Nejrozšířenější typ uživatelského prostředí RepRap 3D tiskáren [43]

## 2.6 Firmware

Firmware obecně znamená stabilní software ovládající elektronické zařízení, v této práci se tímto pojmem označuje software sloužící pro řízení 3D tiskárny. Z důvodu obtížné dohledatelnosti firmwaru profesionálních 3D tiskáren bude v této kapitole popsán pouze firmware RepRap 3D tiskáren.

Použitý firmware se liší v závislosti na výrobci. Výrobci 3D tiskáren používají buď vlastní firmware, který může být založen na firmwaru vyvíjeném v projektu RepRap, přičemž zde mohou být dodatečně naprogramovány další funkce. Pokud výrobci umožňují vylepšování 3D tiskárny uživateli, používají přímo firmware vyvinutý v rámci projektu RepRap. Mezi takové výrobce patří například Prusa Research, nebo Felix – tento přístup je běžný pro výrobce hobby 3D tiskáren. Před nahráním firmwaru do tiskárny je tento modifikován tak, aby pomocí něj bylo možné řídit danou tiskárnu. Při upgradu provedeném uživatelem je možné získat nejaktuálnější firmware, ten pak je modifikován uživatelem tak, aby byl použitelný pro danou tiskárnu, a je nahrán do řídicí elektroniky tiskárny. Výhodou také je, že firmwary jsou psány jako obecné, v rámci jednoho firmwaru tedy umožňují použití různých elektronických komponent, případně umožňují i naprogramování specifické funkce tiskárny přímo uživatelem.

Pro modifikaci firmwaru se na PC používají různé editační programy – například Arduino IDE nebo webový server. Struktura firmwaru je psána tak, aby se v ní bylo možno jednoduše orientovat. Postačuje tedy vepsat určité parametry, nebo odmazat znak pro řádek určující komentář tak, aby daný řádek byl v rámci firmwaru aktivní. U některých firmwarů jsou řádky, kde je nutné program modifikovat, popsány komentářem. Po modifikaci firmwaru je kód pomocí editačního programu zkompilován na strojový kód specifický pro danou vývojovou platformu a nahrán do vývojové platformy. Chybějící informace nebo řešení problémů s kompatibilitou je možné snadno dohledat na internetu.

### 2.6.1 Porovnání nejrozšířenějších firmwarů

Systém **Repetier** je rozdělen na webový server a firmware, který je nahrán do tiskárny. Výhodou je možnost kontrolovat 3D tiskárnu vzdáleně pomocí serveru. Nevýhodou je, že pro přidání vlastních funkcí je nutné firmware nahrát pomocí webového rozhraní. Dalším nedostatkem je, že struktura firmwaru není komentovaná tak, aby byla srozumitelná pro běžné uživatele. Naproti tomu firmware **Marlin** nevyužívá webový server a samotná struktura firmwaru je srozumitelnější díky komentovaným řádkům. Uživateli je tak vysvětleno, co který parametr ovlivňuje. Další výhodou je, že je možné tento firmware editovat a poté nahrávat přímo do tiskárny pomocí komunikačního portu mikrokontroleru, případně řídicí desky tiskárny. Firmware Marlin je tak vhodnější, pokud uživatel potřebuje doprogramovat vlastní funkce tiskárny.

## 2.7 Mechanické vlastnosti tisknutých součástí

Kromě znalosti konstrukcí a komponent používaných ve 3D tiskárnách je nutné zabývat se mechanickými vlastnostmi výtisku. Mechanické vlastnosti vytisknutých součástí jsou anizotropní, to znamená, že při zatěžování v různých směrech se chování součástí liší. To je způsobeno principem metody FDM – tedy pokládáním materiálu po jednotlivých vrstvách pomocí trysky. Podobně jako u vláknových kompozitů závisí mechanická pevnost na směru zatěžování vůči vláknům. Například pevnost v tlaku u zatěžování ve směru vláken je o 11,6 % vyšší než při zatěžování kolmém na vlákna. Mechanické vlastnosti dále zhoršuje tvorba dutin nebo vnitřní pnutí způsobené rozdílnými teplotami při tisku. [7]

Dutiny se tvoří vlivem kroucení výtisku vlivem deformace způsobené rozdílnými teplotami. Nejvyšší teplotní rozdíl je zpravidla mezi právě tisknutou vrstvou a již vytištěnými vrstvami. Čím vyšší je rozdíl teplot v různých částech výtisku, tím více dochází k deformacím výtisku a je vyšší pravděpodobnost tvorby dutin. Dutina mezi vrstvami je zobrazena na Obr. 17). Z důvodu lepšího rozložení tepla v různých částech výtisku byly vyvinuty tiskárny s vyhřívanou podložkou, která je vůči okolí oddělena komorou a tiskárna tak má uvnitř komory stabilní teplotu. [7]



Obr. 17) Tvorba dutin mezi jednotlivými vrstvami výtisku [7]

### 2.7.1 Vliv orientace výtisku

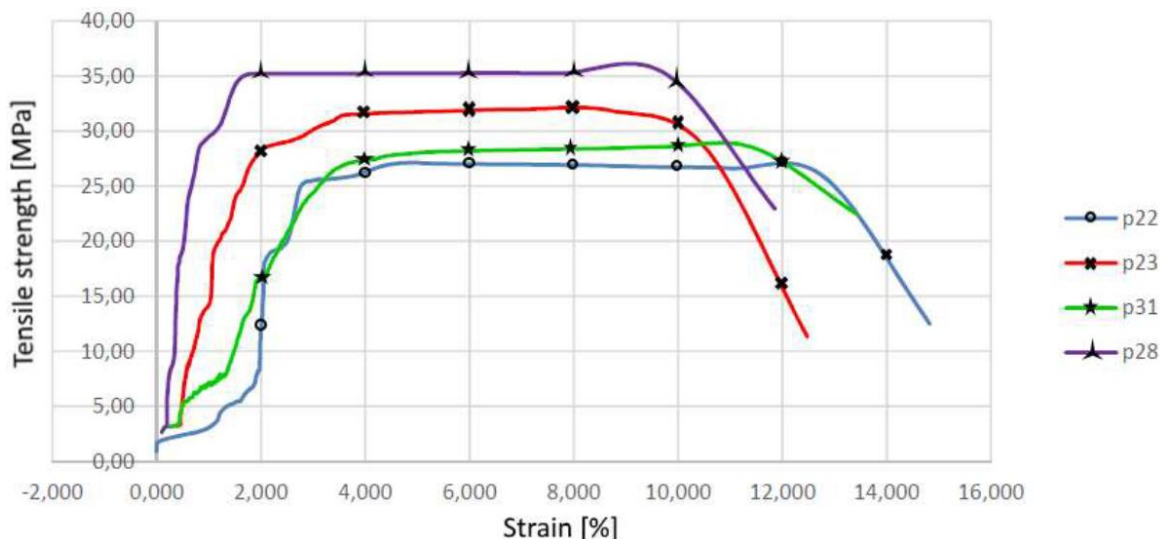
Úpravou parametrů výtisku lze docílit zlepšení mechanických vlastností. Vliv změny parametrů na mechanické vlastnosti součástí vytisknuté z ABS kopolymeru zkoumal doktor Anoop Kumar Saad ve svém experimentu. Měněno bylo 5 parametrů – orientace součásti vůči rovině tiskové plochy, tloušťka vrstvy, úhel výplně, šířka výplně a mezera mezi výplněmi. Z experimentu vyplývá, že ze všech parametrů nejvíce ovlivňuje pevnost v ohybu a pevnost v krutu právě orientace součásti vůči rovině tiskové plochy. Toto samozřejmě závisí na tvaru zkoušeného tělesa. Zkoušeným tělesem byl kvádr, vliv orientace výtisku vůči orientaci tiskárny na mechanické vlastnosti byl tedy v tomto případě podstatný. [7]

## 2.7.2 Vliv hustoty výplně

V jiném experimentu vedeném doktorem Čwiklou byl zkoumán vliv parametrů určených ve sliceru tiskárny na pevnost v tahu. Pro experiment byla použita 3D tiskárna P3steel, která je založena na konstrukci Prusa i3. Od tiskárny Prusa i3 se odlišuje vyšší tuhostí díky použití ocelového rámu. Před samotným experimentem byla ještě tiskárna modifikována pro dosažení co nejlepších výsledků. Pro porovnání s profesionální 3D tiskárnou byla stejná výchozí STL data modelu tisknuta pomocí 3D tiskárny Stratasys FDM 360 a poté byly výtisky vzájemně porovnány. [8]

Mezi zkoumanými parametry jsou: počet vyplněných vrstev (vrstvy, kde je 100 % materiálu), hustota výplně, tvar výplně, technika vyplňování plných vrstev a multiplikátor extruze. Multiplikátor extruze označuje, o kolik je jiné množství materiálu oproti materiálu potřebnému k vytisknutí (když je jeho hodnota jedna, znamená to, že je použito přesně tolik materiálu, kolik je nutné pro výtisk). [8]

Nejprve byl zkoumán vliv hustoty výplně na pevnost v tahu. Závislost pevnosti v tahu na deformaci pro různou hustotu výplně vyjadřuje graf na Obr. 18)



Obr. 18) Závislost pevnosti v tahu na deformaci pro vzorky o různých hustotách výplně [8]

Hodnoty jednotlivých parametrů z grafu na Obr. 18) vyjadřuje Tab 1).

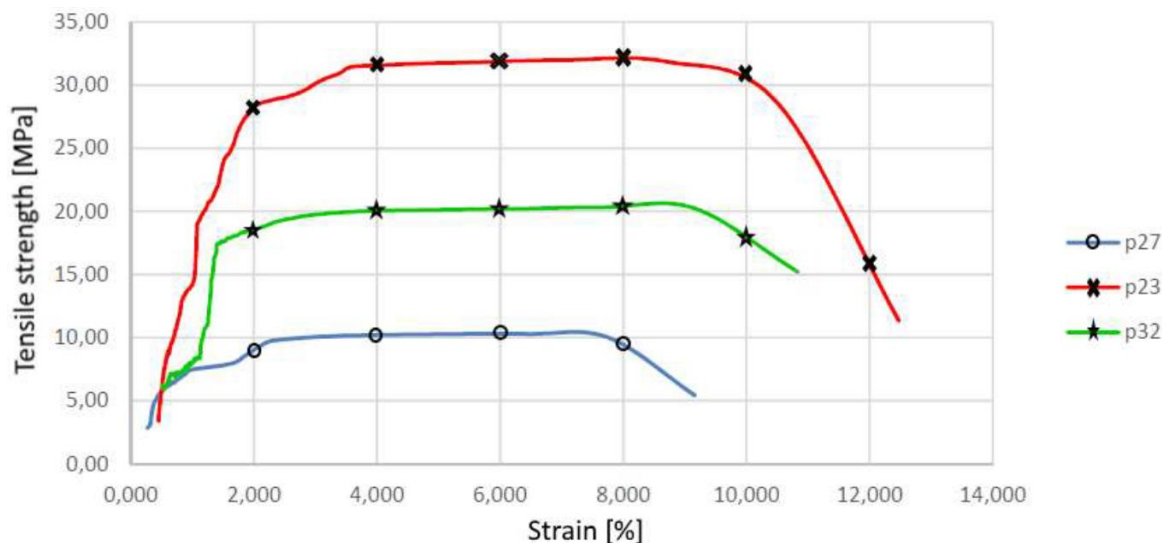
Tab 1) Hodnoty parametrů z grafu na Obr. 18) (hodnoty pevnosti určeny odečtením z grafu) [8]

Vzorek	Počet vyplněných vrstev [-]	Hustota výplně [%]	Tvar výplně	Multiplikátor extruze [-]	Výsledná pevnost v tahu [MPa]	Vytisknuto na tiskárně
p22	2	10	Honeycomb	1	26,25	P3steel
p23	2	40	Honeycomb	1	31,97	FDM 360
p31	2	25	Honeycomb	1	27,85	P3steel
p28	2	60	Honeycomb	1	35,00	P3steel



### 2.7.3 Vliv multiplikátoru extruze

Poté byl zkoumán vliv různého multiplikátoru extruze na pevnost v tahu. Graf závislosti pevnosti v tahu na deformaci pro různé multiplikátory extruze je na Obr. 19).



Obr. 19) Závislost pevnosti v tahu na procentuálním zatížení pro vzorky o různých hustotách [8]

Hodnoty parametrů z grafu na Obr. 19) jsou v Tab 2).

Tab 2) Hodnoty parametrů z grafu na Obr. 19) (hodnoty pevnosti určeny odečtením z grafu) [8]

Vzorek	Počet vyplněných vrstev [-]	Hustota výplně [%]	Tvar výplně	Multiplikátor extruze [-]	Výsledná pevnost v tahu [MPa]	Vytisknuto na tiskárně
p27	2	40	Honeycomb	0,5	10,2	P3steel
p23	2	40	Honeycomb	1	31,97	FDM 360
p32	2	40	Honeycomb	0,75	20,5	P3steel

Z experimentu jasně vyplývá, že multiplikátor extruze má na pevnost výtisku větší vliv než hustota výplně. Je to způsobeno tím, že multiplikátor extruze ovlivňuje všechny části výtisku, zatímco hustota výplně se týká pouze vnitřní struktury výtisku. Z této příčiny je pro optimalizaci spotřebovaného materiálu upřednostňováno vyplnění vnitřní struktury výtisku. Multiplikátor extruze dále ovlivňuje rozměrovou přesnost výtisku. Proto je doporučeno jej volit v intervalu od 0,9 do 1,1, přičemž hodnoty multiplikátoru vyšší než 1 se zadávají z důvodu lepších mechanických vlastností součástí, ale dochází zde ke zhoršení rozměrové přesnosti. [8]

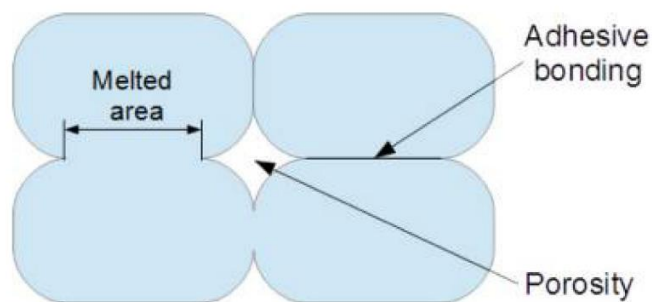
Dále z experimentu vyplývá, že vzorky tisknuté pomocí profesionální 3D tiskárny jsou srovnatelné se vzorky tisknutými pomocí spotřebitelské RepRap 3D tiskárny. Je však nutno

podotknout, že RepRap 3D tiskárnu bylo nutné uživatelem modifikovat, aby tohoto výsledku bylo dosaženo.

#### 2.7.4 Vliv teploty extruze

Je patrné, že pro úspěšný tisk musí být správně zvolena teplota, na níž bude nastaven extruder. Teplota extruze se odlišuje dle druhu materiálu. Při nižší teplotě extruderu, než je skutečná teplota extruze pro daný materiál, může dojít k zaseknutí materiálu v tiskárně a nebude tak docházet k nanášení materiálu. Vlivem toho může být extruder ucpán, protože po skončení vyhřívání extruderu dojde k zatuhnutí materiálu, a tím k ucpání trysky. Při příliš vysoké teplotě může naopak dojít až k hoření materiálu.

Vhodně zvolená teplota má vliv i na porozitu materiálu. Je-li tato vhodně zvolená, je porozita velmi nízká (konkrétně pro materiál PLA se pohybuje pod 1 % z celkové struktury materiálu). Kromě porozity materiálu může dojít k částečnému spojení předchozí vrstvy s právě vytisknutou vrstvou. Na to má vliv kromě nevhodně zvolené teploty i rozložení tepla ve výtisku během tisku. Tyto vlastnosti zesilují anizotropní chování výtisku, což má vliv i na mechanické vlastnosti. Strukturu materiálu zobrazuje Obr. 20). [9]



Obr. 20) Porozita materiálu [9]

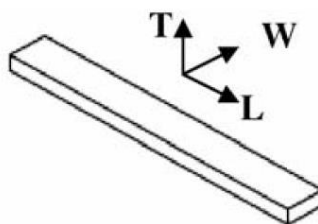
#### 2.7.5 Rozložení tepla při tisku

Rozložení tepla při tisku je různé. Jednak se liší podle konstrukce tiskárny – je rozdílné pro tiskárnu s oddělenou komorou vůči okolí a rozdílné pro tiskárnu, která není vůči okolí izolována. Dále má na rozložení tepla vliv vnitřní konstrukce tiskárny (konstrukce extruderu, chlazení extruderu, vyhřívání podložky). V neposlední řadě je zde důležitý i vliv tvaru tisknuté součásti a vlastnosti tiskového materiálu. Spodní vrstvy výtisku, které jsou neustále vyhřívány od podložky, mají jiné vlastnosti než ostatní části výtisku. [9]

## 2.8 Rozměrová přesnost tisknutých součástí

### 2.8.1 Vliv parametrů tiskárny

Podobně jako mechanické vlastnosti i rozměrovou přesnost ovlivňuje změna parametrů výtisku. Vliv změny parametrů na rozměrovou přesnost součásti vytisknuté z ABS kopolymeru zkoumal doktor Anoop Kumar Sood ve svém experimentu, zmíněném u vlivu na mechanické vlastnosti v kapitole 2.7.1. Výtisky byly tisknuty na tiskárně Stratasys FDM 1650 při použití materiálu ABSP400. Měněno zde bylo 5 parametrů – orientace součásti vůči rovině tiskové plochy, tloušťka vrstvy, úhel výplně, šířka výplně a mezera mezi dvěma výplněmi. Zkušební vzorek s popisem jednotlivých rozměrů pro zkoumání přesnosti je zobrazen na Obr. 21).



Obr. 21) Orientace os v experimentu – L – délka, W – šířka, T – tloušťka [7]  
 Výsledky experimentu zobrazuje Tab 3)

Tab 3) Změna parametrů pro rozměrovou přesnost v různých směrech [7]

Vhodné parametry pro:	Délkovou přesnost	Přesnost šířky	Přesnost tloušťky	Volumetrickou přesnost
Tloušťka vrstvy [mm]	0,254	0,254	0,127	0,178
Orientace tiskové plochy [°]	0	0	0	0
Úhel výplně [°]	60	30	0	0
Šířka výplně [mm]	0,4564	0,4564	0,5064	0,4564
Mezera mezi výplněmi [mm]	0,008	0,004	0,004	0,008

Z experimentu vyplývá, že nelze parametry nastavit tak, aby bylo dosaženo nejlepších hodnot ve všech třech sledovaných směrech. Pro optimalizaci parametrů tiskárny byla použita Taguchiho metoda, z níž byly získány parametry pro co nejvyšší volumetrickou přesnost, to znamená nejvyšší přesnost, která je dosažena v libovolném bodě pracovního prostoru.

Experimentem je doporučena ideální orientace tiskové plochy vůči výtisku ve tvaru kvádrů 0°. Tato hodnota je ale odlišná pro různý tvar tělesa výtisku. Existují jednotlivé prvky výsledného tělesa, jejichž kvalita geometrie je přímo závislá na orientaci tiskové plochy (například šikmé plochy nebo díry). Proto uživatel musí před tiskem porovnat jednotlivé části tělesa, které jsou přímo závislé na své orientaci vůči tiskové ploše. Jedná se však o sofistikované rozhodování a spíše než na dodržování obecných doporučení je toto rozhodování závislé na zkušenostech daného uživatele. [10]

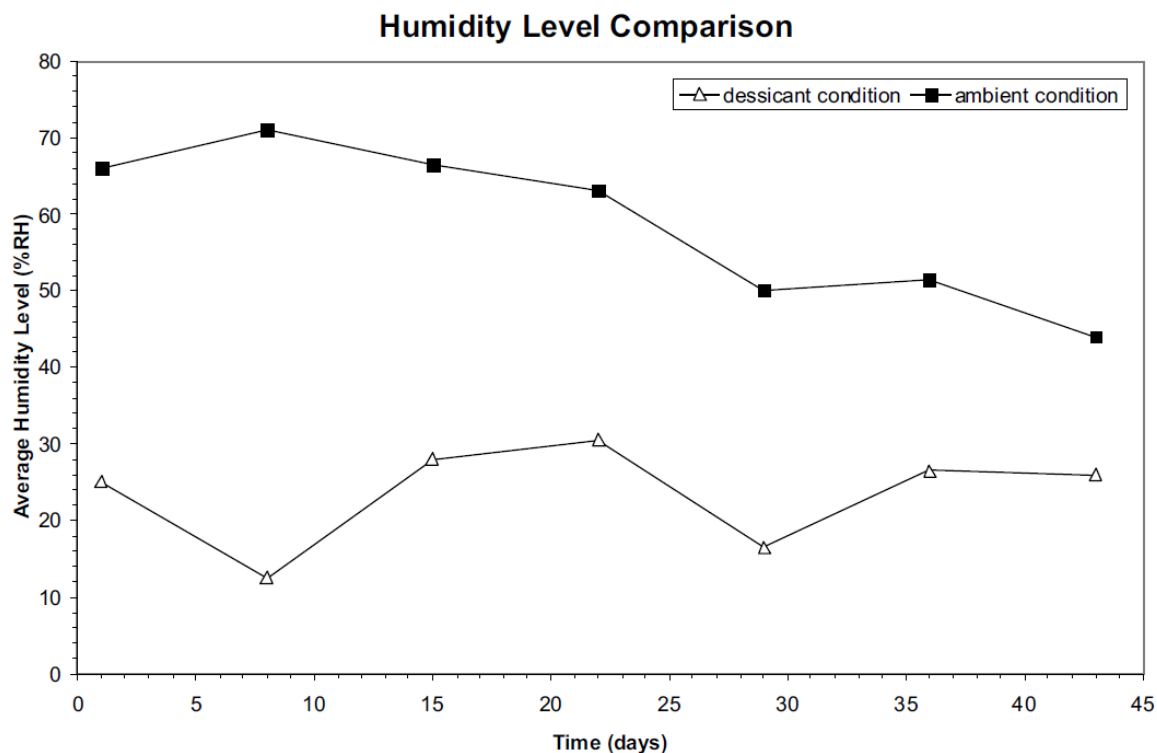
## 2.9 Vlastnosti materiálu ovlivňující průběh tisku

Kromě ovlivnění mechanických vlastností a rozměrové přesnosti mají vlastnosti materiálu vliv i na samotný průběh tisku. Vlivem vlastností materiálu může docházet k chybám tisku, například k ucpání extruderu. Jedná se například o vlhkost materiálu nebo množství nečistot na povrchu filamentu.

### 2.9.1 Vliv vlhkosti materiálu na průběh tisku

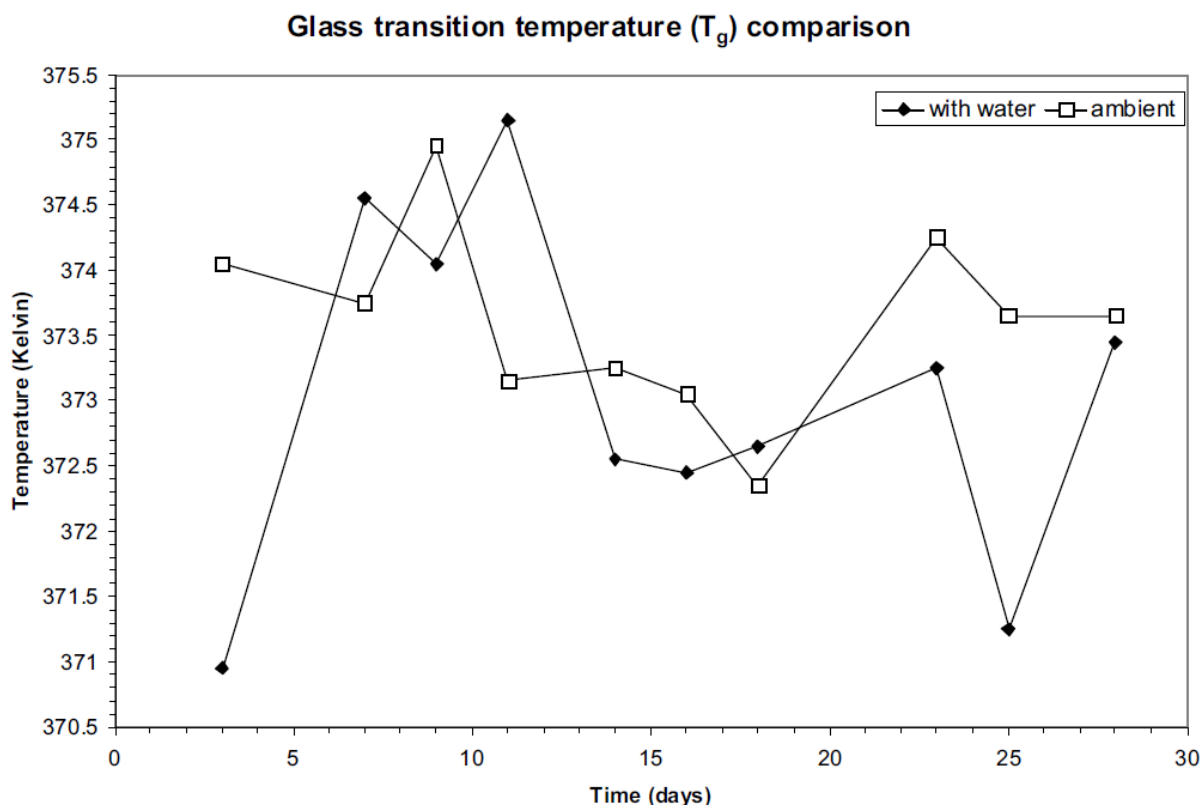
Materiály PLA a ABS jsou nejčastěji používané materiály pro tisk metodou FDM. Nevýhodou těchto materiálů je, že jsou hydrofilní; to znamená, že absorbují vlhkost z okolí. Vliv různé vlhkosti materiálu byl zkoumán a bylo zjištěno, co změněná vlhkost materiálu způsobuje.

S měnící se vlhkostí kopolymeru ABS se mění průměr filamentu a také se mění teplota skelného přechodu, která je definována jako přechodová teplota mezi křehkým chováním polymeru a plastickým chováním polymeru. Pokud dochází k jejímu zvyšování či snižování vlivem různé vlhkosti materiálu, má to vliv na rychlost tečení materiálu z extruderové trysky. Kromě toho má změněná vlhkost vliv na viskozitu materiálu. To může vést až k chybám při tisku a k nekonzistentnímu chování tiskárny. Na Obr. 22) je znázorněna měnící se vlhkost materiálu ABS při různých podmínkách skladování. [11]



Obr. 22) Graf vývoje velikosti vlhkosti v čase (**dessicant condition** – ABS skladován při upravených podmínkách, **ambient condition** – skladování ABS za normálních podmínek) [11]

Na Obr. 23) je znázorněna změna teploty skelného přechodu v závislosti na vlhkosti materiálu při stejném experimentu. Materiál označený popiskem **ambient** na Obr. 23) je stejný materiál, jako ten, jehož změna vlhkosti je označena křivkou **ambient** na Obr. 22). Pro srovnání byla ještě zkoumána změna teploty skelného přechodu materiálu ponořeného do vody (křivka **with water** na Obr. 23).



Obr. 23) Graf vývoje velikosti teploty skelného přechodu na čase (**with water** – ABS ponořený do vody, **ambient** – skladování ABS za normálních podmínek) [11]

Aby se předešlo změně vlhkosti materiálu, jsou do balení cívky s navinutým filamentem přidávány prvky o vyšší hydrofilii, než má materiál filamentu. Problém nastává po vybalení cívky. Ať už je materiál skladován, nebo je uchycen na držáku cívky tiskárny, většinou se u něj nenachází dané prvky o vyšší hydrofilii. Toto je u některých speciálních nosičů tiskového materiálu používaných u profesionálních 3D tiskáren řešeno tak, že v daném nosiči se nacházejí prvky o vyšší hydrofilii.

### 2.9.2 Vliv nečistot na povrchu filamentu

Pokud není cívka s navinutým filamentem vhodně skladována, budou se na povrchu filamentu usazovat nečistoty. Nečistoty pak mohou způsobit ucpání extruderu, vlivem čehož může dojít až ke znehodnocení celé tisknuté sestavy. [2]



## 3 SYSTÉMOVÝ ROZBOR

Současnými hlavními trendy FDM 3D tisku je zvyšování spolehlivosti této technologie, tisk z pokročilých tiskových materiálů a zachování otevřené volby materiálů uživatelem. Proto je pro uživatele výhodné, aby tiskárna umožňovala tisk z cívek s tiskovým materiálem o vysoké celkové kapacitě, díky čemuž je možno docílit nižší ceny za materiál pro daný tisk.

O technologii FDM 3D tisku jeví stále větší zájem firemní uživatelé, kteří ale na rozdíl od uživatelů hobby 3D tiskáren požadují vysokou spolehlivost tiskárny a nízké nároky na obsluhu tiskárny. Často 3D tiskárnu využívá větší počet vývojových pracovníků, kteří ale nemají časové kapacity pro průběžnou kontrolu tiskárny. Z těchto skutečností vyplynuly cíle řešení této práce.

### 3.1 Formulace problému

V současnosti neexistuje FDM 3D tiskárna, která by při použití libovolného materiálu (podporovaného tiskárnou) uživatele upozornila, že hrozí pozastavení tisku z důvodu nedostatku tiskového materiálu. Dále jsou současné FDM 3D tiskárny nevhodné pro odvíjení materiálů z velkokapacitních cívek, kde sice je nižší jednotková cena materiálu, ale které mají vyšší hmotnost, což uživatele nutí použít jinou konstrukci držáku strun. Tato situace může být řešena výrobou dle existujícího návrhu dostupného na internetu, nebo zakoupením samostatného držáku strun, případně vyvinutím a výrobou držáku vlastní konstrukce, což je ale pro firemní uživatele nevhodné.

### 3.2 Formulace cílů řešení

Cíle práce byly naformulovány následovně:

- návrh spolehlivého systému odvíjení filamentu z cívek o minimální hmotnosti 5 kg včetně detekce zbývajícího materiálu (dále podavač materiálu),
- realizace a ověření funkce experimentálního podavače materiálu s uvažovaným využitím informací řídicím systémem 3D tiskárny pro potřeby optimalizace procesu tisku,
- na základě ověřeného řešení podavače materiálu výběr optimálního řešení konstrukce 3D tiskárny,
- výkresová dokumentace vybraných uzlů,
- závěr a doporučení pro praxi.

Cíle práce jsou velmi ambiciózní, protože v současné době na trhu neexistuje 3D tiskárna s otevřenou volbou materiálu, která dopředu upozorní uživatele, že na cívce již není dostatečné množství materiálu pro tisk. Tento problém existuje zejména u 3D tiskáren, kde cívka není pro uživatele na první pohled viditelná (např. 3D tiskárny Ultimaker). Dále velké množství současných 3D tiskáren nedokáže spolehlivě odvíjet materiál z těžších cívek.





## 4 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A ZDŮVODNĚNÍ VÝBĚRU

V této kapitole bude popsán návrh variant řešení. Jak bylo uvedeno v kapitole 3, nejprve bude analyzován výběr varianty konstrukce podavače materiálu.

### 4.1 Výběr varianty podavače materiálu

Vybrání návrhu definitivní varianty podavače materiálu předcházelo určení, jakým způsobem bude vyřešena detekce zbývajících materiálu na cívce s tiskovou strunou. Pro stanovení zbývajících množství materiálu při vložení cívky uživatelem bude využit tenzometrický snímač, kdy ze zjištěné celkové hmotnosti bude odečtena hmotnost prázdné cívky. Takto získaný údaj bude na základě známé hustoty materiálu přepočten na zbývajících délku materiálu. Řídicímu systému 3D tiskárny je známá celková délka tiskové struny na daný tisk. Na základě porovnání těchto dvou hodnot bude uživatel informován, zda při tisku může dojít k vypotřebenosti tiskové struny a pozastavení tisku. Správnost rozhodnutí, zda dojde k vypotřebenosti materiálu při tisku, je dáno zejména

- přesností měření hmotnosti materiálu,
- přesností stanovení hustoty materiálu,
- přesností hmotnosti prázdné cívky.

Dle vyjádření výrobce tiskového materiálu se přesnost hustoty liší i mezi jednotlivými cívkami – pro jím nabízený materiál PLA se tato přesnost pohybuje v intervalu mezi 1,24 až 1,32 g/cm<sup>3</sup>. Výrobce si z důvodu ochrany obchodního tajemství nepřeje zveřejnit své jméno.

Následuje výběr varianty konstrukce podavače materiálu. Touto prací byly zvažovány tři jeho varianty. Hodnocení konstrukce podavače materiálu nebude probíhat na základě autorem zvoleného bodového hodnocení, ale realizací prototypu řešení a zhodnocením klíčových kritérií, které konstrukce podavače musí splnit, aby bylo dosaženo cílů řešení.

Zmiňovanými kritérii podavače materiálu jsou:

- možnost použít, co nejširší sortiment cívek s tiskovým materiálem (minimální nejtěžší hmotnost cívky až do hmotnosti 5 kg),
- snadnost obsluhy,
- zajištění spolehlivého odvíjení,
- detekce hrozícího přetržení filamentu při tisku,
- detekce možného problému při odvíjení.

Ze tří uvažovaných variant byly realizovány pouze dvě varianty. Důvod je uveden u popisu dané nerealizované varianty.

#### 4.1.1 Uchycení cívky na tyč

Nejčastějším způsobem uložení je vložení cívky na tyč, kdy osa tyče a tím i osa rotace cívky je horizontální. Tento typ uchycení zobrazuje Obr. 7 na straně 22.

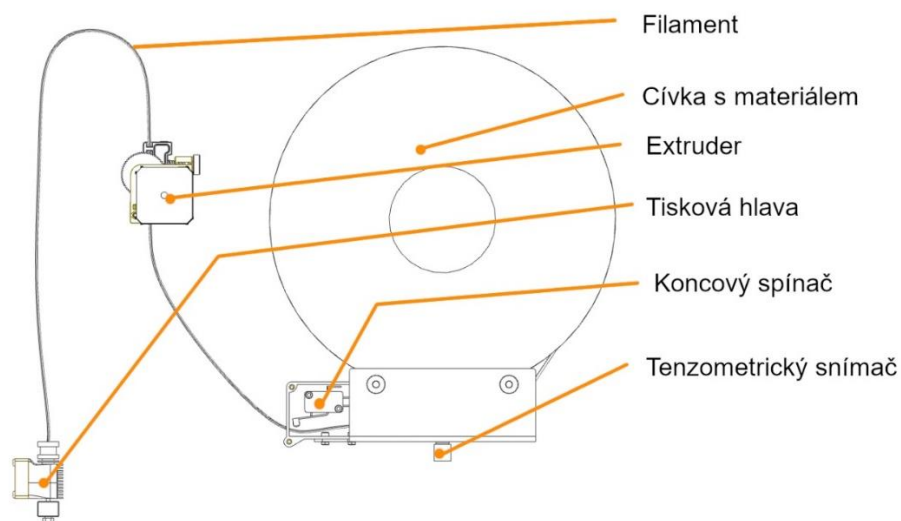
Aby podavač materiálu byl schopen zajistit spolehlivé odvíjení materiálu během tisku, musí být cívka pomocí podavače řízeně otáčena. Podávací mechanismus extruderu (který je popsán v kapitole 2.4.1 na straně 25), není u těžších cívek schopen vyvinout sílu, která by postačovala k odvinutí tiskové struny z cívky.

**Poznámka** – extruder obecně znamená zařízení pro extruzi, jež se skládá v této práci z hot-endu a podávacího mechanismu. Z důvodu, že v komunitě 3D tisku se běžně podávací mechanismus extruderu označuje zkráceně jako extruder, bude dále v textu pod pojmem extruder myšlen podávací mechanismus extruderu.

Pokud by extruder působil na tiskovou strunu za účelem vyvinutí dostatečné síly k odvinutí z cívky příliš velkou silou, docházelo by vlivem této síly k přetržení filamentu (zejména u obtížně tisknutelných materiálů jako materiálů typu FLEX). Varianta uchycení cívky na tyč tedy nebyla realizována z toho důvodu, že při zajištěném odvíjení tiskové struny z cívky pomocí motoru odvíječe by bylo nutné cívku vystředit a zajistit spolehlivý přenos krouticího momentu – například vyvozením přitlačné síly pomocí závitu. To by ale znamenalo náročnější manipulaci pro obsluhu tiskárny. Dále by u příliš velkých cívek mohlo dojít k tomu, že tenzometrický snímač by vlivem vychýlení těžiště cívky z oblasti, ve které je garantováno přesné měření tenzometrického snímače, poskytoval nepřesné hodnoty a tedy výsledky měření by byly nepřesné.

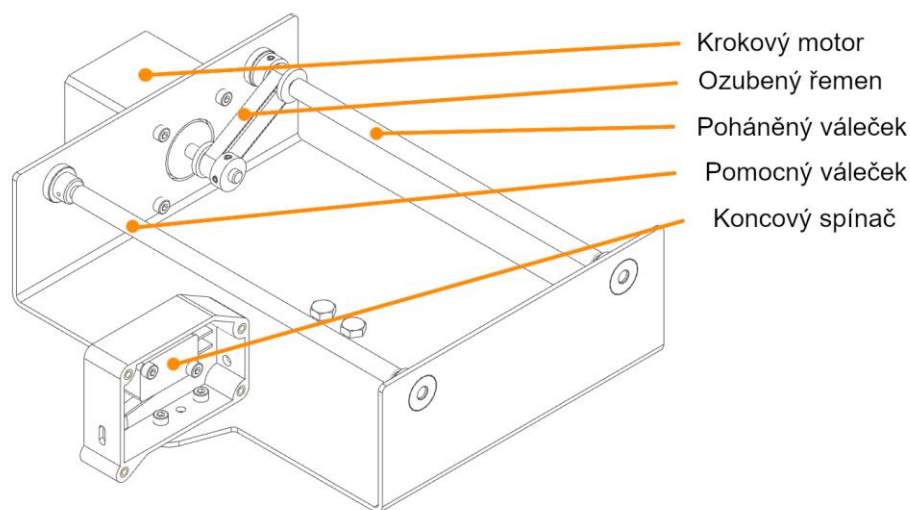
#### 4.1.2 Vložení cívky na válečky

Jako další uvažovaná varianta byl podavač materiálu, kde cívka bude vložena na dva válečky. Tato konstrukce byla zvolena z důvodu, že se jedná o druhý nejčastější způsob uložení cívky s tiskovým materiálem (u současných tiskáren jsou oba válečky nepoháněné, cívka se odvíjí díky odvíjení extruderu). Pro potřeby uvažované 3D tiskárny byl jeden z válečků poháněn, aby docházelo k řízenému odvíjení cívky. Tato varianta uchycení byla realizována. Vizualizaci této varianty zobrazuje Obr. 24).



Obr. 24) Vložení cívky na válečky – vizualizace 3D modelu

Extruder odvíjí filament z cívky tak, aby tisková hlava disponovala dostatečným přísunem materiálu pro bezproblémový tisk. To, kolik množství je potřeba odvinout, definuje g-kód generovaný slicerem. Mezi výstupem filamentu z cívky a extruderem je vložen koncový spínač, který slouží k řízení odvíjení. Podáváním filamentu extruderem, pokud se cívka neotáčí, vznikne napětí filamentu, které následně sepne koncový spínač. Pokud je koncový spínač sepnut, dojde k zapnutí otáčení krokového motoru tak, aby se koncový spínač opět dostal do klidové polohy. Celá konstrukce podavače materiálu je uchycena k tenzometrickému snímači, který je dále přichycen k rámu tiskárny na jeho spodní části. Na Obr. 25) je zobrazena konstrukce podavače materiálu. Pro přenos krouticího momentu z motoru na váleček byl zvolen ozubený řemen.



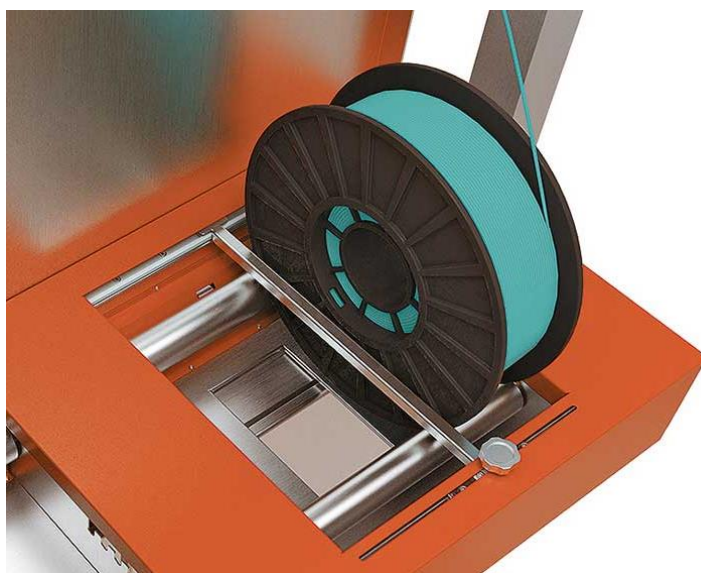
Obr. 25) Vložení cívky na válečky

Při experimentálním vyhodnocení požadovaných kritérií bylo dosaženo výsledků, které zobrazuje Tab 4), přičemž 0 znamená, že konstrukce danému kritériu nevyhovuje a 100 znamená, že konstrukce dané kritérium splňuje ideálně. Realizovaná konstrukce podavače materiálu je zobrazena na Obr. 28).

Tab 4) Vyhodnocení kritérií při vložení cívky na válečky

Kritérium	Hodnocení
Možnost vložit co nejširší sortiment cívek s tiskovým materiálem	100
Snadnost obsluhy	100
Zajištění spolehlivého odvíjení	0
Detekce hrozícího přetržení filamentu při tisku	0
Detekce možného problému odvíjení	30

Vkládání různých velikostí cívek na tento typ podavače je možné a vložení těchto cívek je snadné – cívku postačuje pouze vložit na válečky. Zajištění spolehlivého odvíjení je ale problematické. Při odvíjení cívky pomocí otáčení poháněného válečku dochází k postupnému přesouvání cívky na bok konstrukce, přičemž v extrémních případech může cívka z podavače spadnout, což je naprosto nežádoucí stav. Toto lze vyřešit bočním přichycením cívky pomocí stěny – zobrazeno na Obr. 26) – to ale zhorší jednoduchost vkládání cívek, což je hlavní výhoda tohoto typu uchycení cívky.



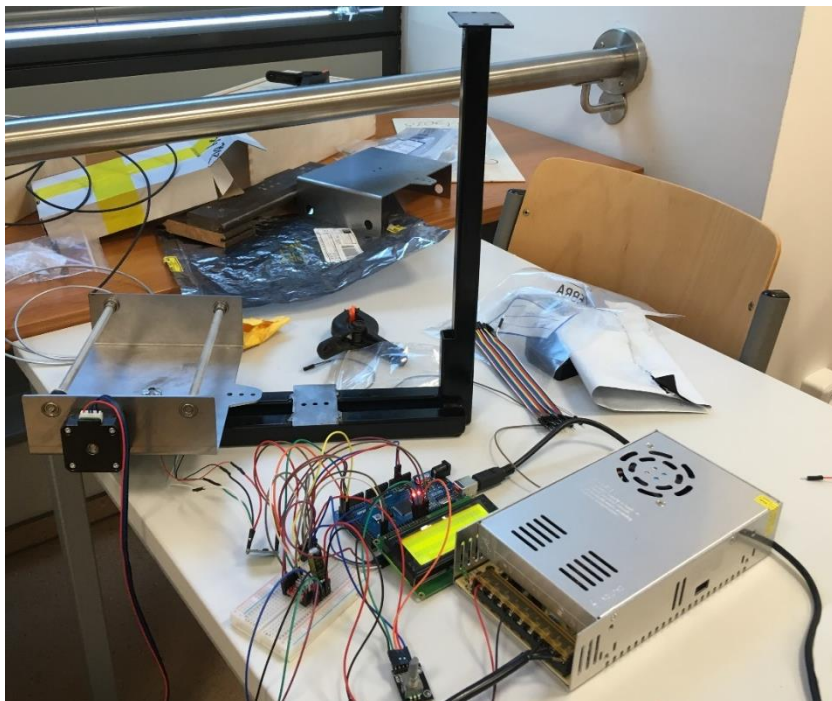
Obr. 26) Držák cívky 3D tiskárny BigRep One [12]

Dalším problémem nastane, pokud je na cívce poslední návin filamentu. Může dojít k vypadnutí cívky – jedním z důvodů je, že filament je vložen do otvorů, které zamezují samovolnému odvíjení filamentu při manipulaci. Některé cívky mají filament vložený v otvorech již z výroby. Taková cívka je zobrazena na Obr. 27). Pokud uživatel zapomene filament vyjmout z těchto otvorů, dojde při odvíjení filamentu z cívky, na níž je poslední návin, k vzrůstu síly vyvinuté extruderem. Tato síla u tohoto typu konstrukce způsobí vypadnutí cívky z konstrukce podavače, což je opět nežádoucí stav.



Obr. 27) Cívka s filamentem vloženým v otvorech [13]

Detekce možného problému odvíjení je také nedostačující. Bylo experimentálně zjištěno, že není možné spolehlivě určit pomocí vyhodnocování dat poskytnutých tenzometrickým snímačem, že došlo k problému při odvíjení materiálu. Konstrukce podavače, která byla zkoušena, je zobrazena na Obr. 28). Problém odvíjení je možné zjistit pouze tak, že koncový spínač je sepnut příliš dlouhou dobu a zároveň dochází k odvíjení válečku poháněného krokovým motorem. Během doby, než dojde k detekci problému odvíjení, může krokový motor extruderu ztratit kroky vlivem svého přetížení a proto je vyhodnocování problému odvíjení pouze na základě doby sepnutí koncového spínače nevyhovující. Nedostatky této konstrukce podavače vedly k návrhu třetí varianty konstrukce

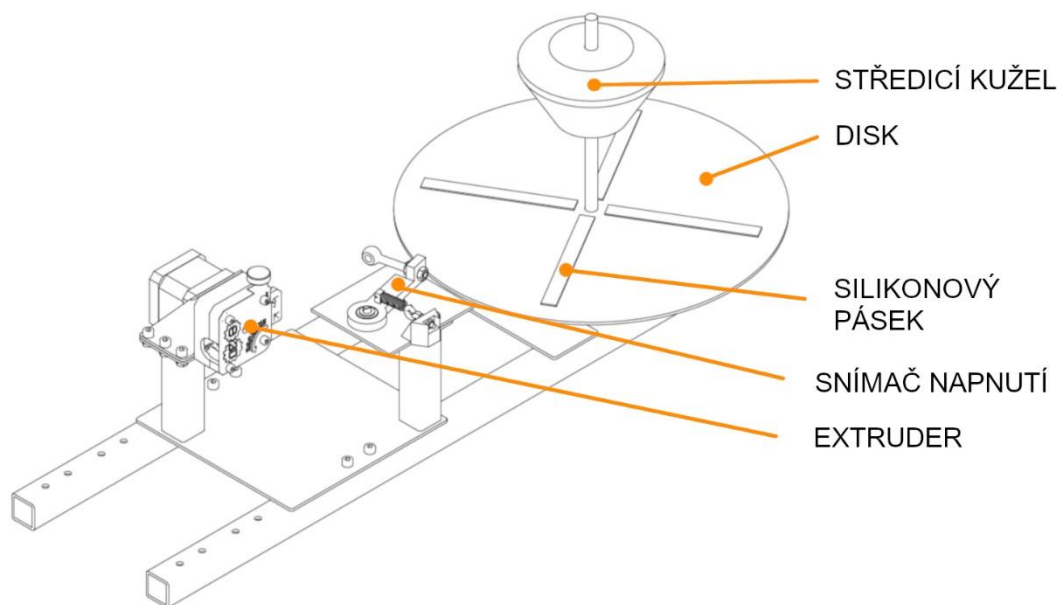


Obr. 28) Realizace podavače s uložením cívky na válečky

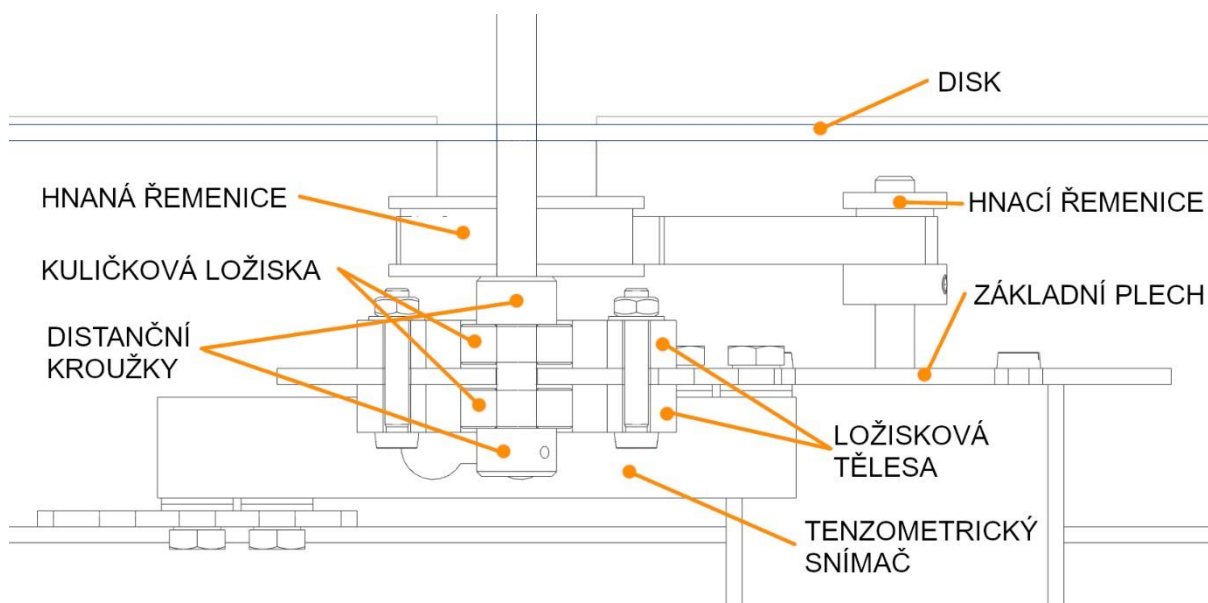
#### 4.1.3 Gramofonová konstrukce podavače

Na základě experimentálního vyhodnocení předchozí konstrukce podavače, kdy cívka je vložena na válečky, bylo motivací pro vznik nové konstrukce zejména zajištění spolehlivosti odvíjení při zachované snadnosti manipulace a také vhodnosti konstrukce pro měření hmotnosti cívky tenzometrickým snímačem.

Název této konstrukce je vystihující. Cívka bude vložena na disk, přičemž bude vystředěna středícím kuželem. Filament bude vstupovat do snímače napnutí a do extruderu. Celá konstrukce podavače je zobrazena na Obr. 29). Pod diskem se nachází tenzometrický snímač a pohon disku. To zobrazuje Obr. 30).



Obr. 29) Gramofonová konstrukce podavače

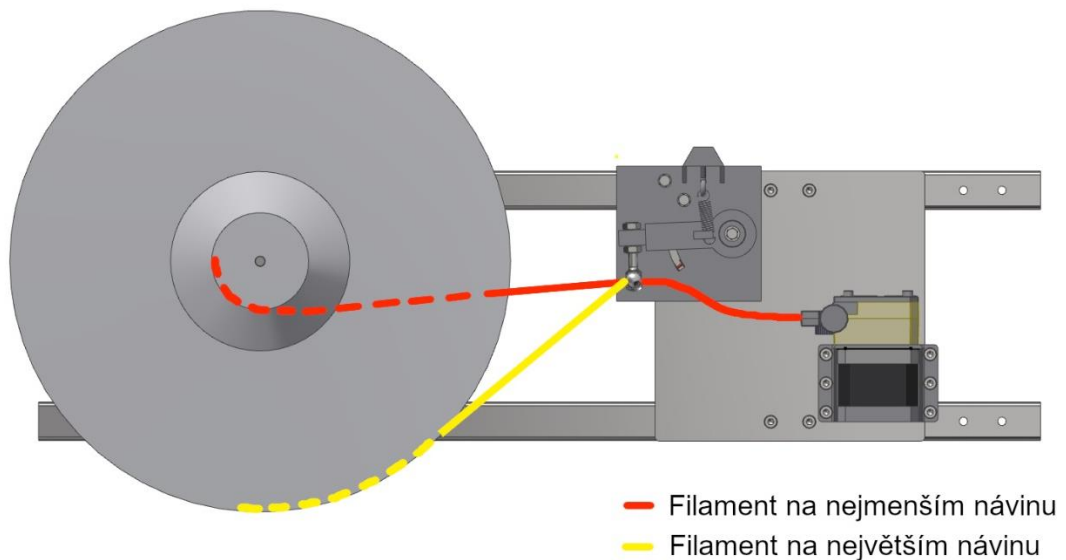


Obr. 30) Tenzometrický snímač a pohon disku

Hnaná řemenice z oceli je s diskem (z materiálu EN AW-6061) spojena lepidlem. Je to z důvodu, aby uživatelé vizuálně nerušili šrouby, dále by šrouby mohly způsobit to, že namísto silikonových pásek je cívka položena na tyto hlavy, čímž nedojde ke spolehlivému přenosu krouticího momentu. Pro kuželové zahlabení je tloušťka plechu disku nedostatečná. Silikonové pásky jsou k disku opět přilepeny speciálním vteřinovým lepidlem.

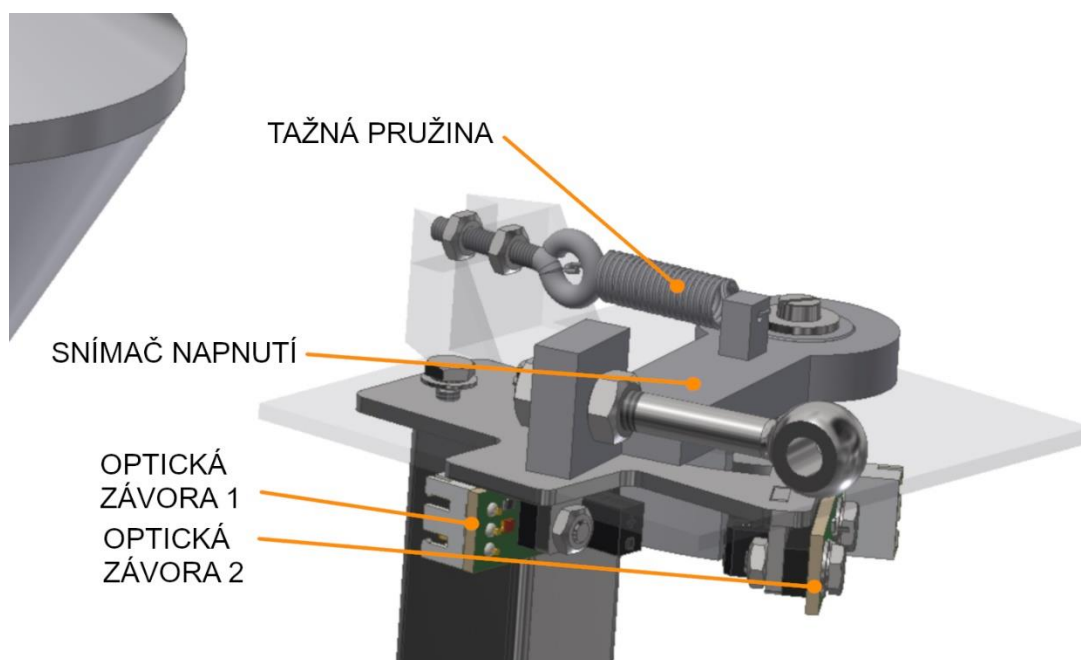
Filament vstupuje do snímače napnutí a poté do extruderu. Snímač napnutí je v klidové poloze držen tažnou pružinou. Tím, že oko šroubu, kterým prochází filament, je oproti vstupu filamentu do extruderu vyoseno, dochází při odebrání filamentu extruderem k postupnému zvyšování napětí. Snímač napnutí je konstruován tak, aby u různého poloměru náviny filamentu platilo, že síla odvíjení extruderu působí vždy proti síle vyvozené tažnou

pružinou. Dále síla způsobená tím, že navinutý filament má tendenci se kroutit zpět, působí opačným směrem než síla vyvinutá tažnou pružinou. To je patrné na Obr. 31).



Obr. 31) Vyosení snímače napnutí oproti extruderu

Jakmile je překonána síla tažné pružiny, je snímač napnutí vychýlen z klidové polohy. Až je vychýlen tak, že dojde k odkrytí optické závory 1 (kterou do té doby zakrýval snímač napnutí), dojde ke spuštění odvíjení cívky otáčením disku poháněného krokovým motorem, což snižuje napnutí filamentu. Krokový motor je zastaven po překonání maximálního počtu kroků, anebo je-li zakryta druhá optická závora. Umístění optických závor je zobrazeno na Obr. 32).



Obr. 32) Optické závory, snímač napnutí v klidové poloze

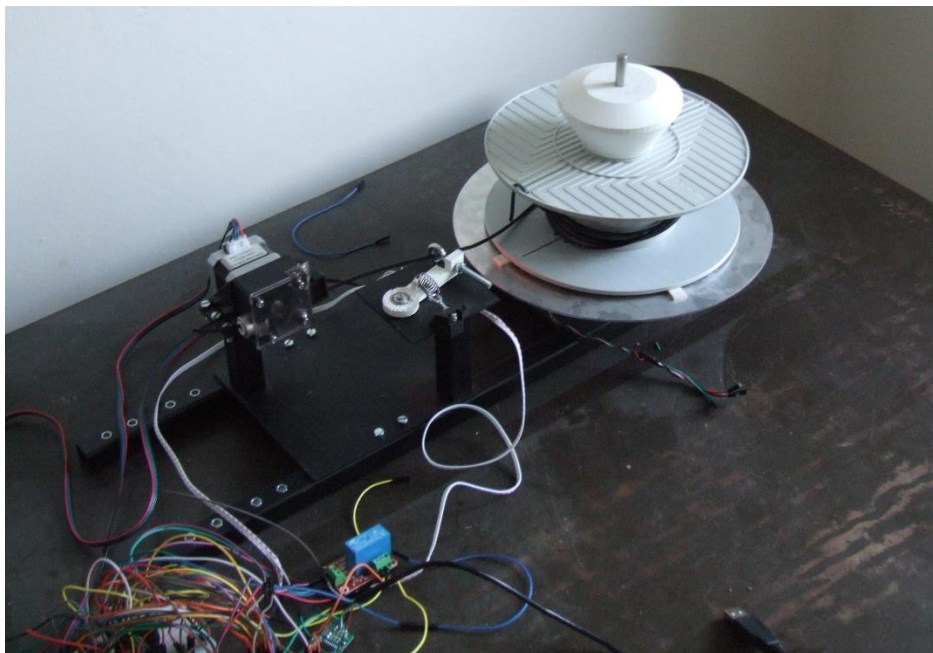
Princip odvíjení zabraňuje nebezpečí přetížení krokového motoru, který pohání disk. Na disk by musela být vložena velmi těžká cívka, aby motor nebyl schopen vyvinout dostatečný moment nutný pro otáčení cívky. Je pravděpodobnější, že dojde k přetížení motoru vlivem napnutí filamentu. Tomuto problému ale zabraňuje to, že snímač napnutí po překročení určité hodnoty napnutí filamentu spustí odvíjení. Síla, při které je vychýlen snímač napnutí z klidové polohy tak, aby došlo k odkrytí optické závory 1 (která spouští otáčení motoru), je nižší než síla vzniklá napnutím filamentu, která by na největším návínu podporované cívky vyvodila moment způsobující přetížení krokového motoru.

Realizovaná konstrukce podavače je zobrazena na Obr. 33). Výsledky experimentálního vyhodnocení kritérií zobrazuje Tab 5)

Tab 5) Vyhodnocení kritérií gramofonové konstrukce podavače

Kritérium	Hodnocení
Možnost vložit co nejširší sortiment cívek s tiskovým materiálem	100
Snadnost obsluhy	80
Zajištění spolehlivého odvíjení	100
Detekce hrozícího přetržení filamentu při tisku	100
Detekce problému odvíjení	90





Obr. 33) Gramofonová konstrukce podavače

V externích přílohách je uloženo video „Rizene\_odvijeni\_civky.mp4“, na kterém je zachycena činnost gramofonové konstrukce podavače. Zdrojový kód s 3D modelem gramofonové konstrukce podavače je uveden v přílohách, tabulka s potřebnými elektronickými komponenty je uvedena v kapitole 6.3.3.

Na základě experimentálního ověření konstrukce byly ještě provedeny následující úpravy.

1. Pro spolehlivé odvíjení cívek o nízké celkové hmotnosti (zejména cívek, z nichž byla většina materiálu již vypotřebována) je nutné, aby středící kužel působil na cívku minimální silou 30 N, kterou ji přitlačuje k disku. Pokud cívka není dostatečně přitlačována, dochází vlivem napnutí filamentu k samovolnému protáčení cívky po disku a tím k neřízenému odvíjení. V experimentálním ověření bylo daného jevu dosaženo vložím závaží tak, aby gravitační síla, kterou působí kužel na cívku, byla alespoň 30 N.
2. Druhá optická závora (zastavující otáčení krokového motoru pohánějícího disk) není nutná.

Po těchto úpravách konstrukce splňuje všechna požadovaná kritéria. Snadnost obsluhy je snížena vlivem nutnosti umístit na cívku středící kužel, který vyvozuje dostatečnou přitlačnou sílu. Dále je vhodné tuto sílu vyvodit pomocí jiného principu než hmotnosti kužele, která (pokud se jedná o 3 kg) snižuje uživatelský komfort. Nicméně díky použití přitlačného kužele má gramofonová konstrukce vysokou spolehlivost odvíjení. Pro detekci problému odvíjení a hrozícího přetržení filamentu lze využít data tenzometrického snímače, kdy konkrétní naprogramování detekce je uvedeno v kapitole 6.3.2.

Z porovnávaných způsobů uchycení cívky je uložení cívky na nepoháněný disk s vertikální osou rotace (tedy gramofonová konstrukce) nejméně časté. To je dáno zejména tím, že nejvhodnější umístění této konstrukce je z důvodu zástavbových prostorů celé tiskárny a z důvodu snadnosti manipulace na horní části tiskárny (nad tiskový prostor), pro což ale

stávající konstrukce 3D tiskáren nejsou uzpůsobeny. Pokud by podavač materiálu byl položen na stejnou úroveň jako samotná tiskárna (tedy zepředu, zezadu, z boků tiskárny), příliš by narostly zástavbové rozměry tiskárny.

Není tedy vhodné navrhnout nejprve 3D tiskárnu a k ní poté jako přídavné zařízení podavač materiálu. Proto zde navrhovaná 3D tiskárna bude mít podavač materiálu zabudován tak, aby tvořila kompaktní, uživatelsky snadné řešení zajišťující vysokou spolehlivost a uživatelský komfort, které současná konkurence výrobců 3D tiskáren nenabízí. Pro ujasnění této volby následuje stručná rekapitulace.

Jako nevhodná konstrukce byla vyřazena varianta uchycení cívky na tyč. Tato konstrukce je nevhodná z důvodu nemožnosti využití tenzometrického snímače pro těžší cívky a z důvodu obtížného vkládání materiálu při zajištěném řízeném odvíjení. Dále byla po vyzkoušení vyřazena konstrukce s uložením cívky na válečky. Tato konstrukce byla vyřazena zejména z důvodu nemožnosti zajistit spolehlivé odvíjení a detekovat jeho chybu. Jako vyhovující konstrukce byla zvolena gramofonová konstrukce podavače materiálu, která zajišťuje spolehlivé odvíjení a snadnost obsluhy. Pro tuto variantu budou navrženy varianty konstrukce 3D tiskárny.

#### **4.2 Výběr vhodné varianty konstrukce tiskárny pro daný podavač materiálu**

Konstrukce podavače materiálu a vlastnosti, které toto umožňují; jsou hlavní přidanou hodnotou navržené 3D tiskárny. Jedná se o originální řešení, které se u současných FDM 3D tiskáren nevyskytuje. Z toho důvodu budou u konstrukce ostatních částí 3D tiskárny použita ověřená a spolehlivá řešení. K dostatečnému využití inovativního řešení podavače materiálu dojde pouze tehdy, je-li konstrukce podavače vhodně integrovaná do celé konstrukce 3D tiskárny (a spojená s řídicím systémem 3D tiskárny) a celá 3D tiskárna tak je jeden fungující celek, nikoliv stroj poskládaný ze dvou samostatných celků. Vybraná varianta podavače materiálu také určuje, že podavač materiálu nemůže být umístěn vedle tiskárny, pouze pod tiskovým prostorem, nebo nad tiskovým prostorem. Pokud by podavač byl umístěn vedle tiskárny, zabírala by celá tiskárna příliš velkou plochu, přičemž by měla neadekvátně malý tiskový prostor.

Z toho plyne, že není možné použít otevřené konstrukce typu Prusa uvedené v kapitole 2.2.1. Jako vhodné konstrukce se jeví konstrukce Delta uvedená v kapitole 2.2.2 nebo konstrukce typu H-bot, CoreXY a mostová kinematika (kapitoly 2.2.3; 2.2.4; 2.2.5).

3D tiskárna je navrhována pro profesionální uživatele, jenž by 3D tisk využívali buď jako vývojový nástroj nebo pro zlevnění kusové výroby. Proto více než cena tiskárny je zde důležitá snadnost údržby a spolehlivost tiskárny. V tabulce Tab 6) je provedeno vyhodnocení těchto kritérií pro různé kinematiky, kde hodnota 1 je pro dané kritérium nejlepší ohodnocení a v záhlaví uvedené tabulky je v závorce uvedena váha daného parametru. Optimální je tedy ta kinematika, která dosáhne nejvyššího počtu bodů.

Tab 6) Výběr vhodné kinematiky

Kinematika	Cena (3x)	Snadnost údržby (5x)	Spolehlivost (6x)	Počet bodů
Delta	4	2	2	28
H-bot	2	1	2	23
CoreXY	3	1	1	20
Mostová kinematika	4	2	2	34

Ve výsledku se jako optimální jeví kinematika CoreXY. Tato kinematika je vhodná pro použití ocelových vodicích tyčí spolu s lineárními ložisky. Ocelové vodicí tyče jsou vhodné pro 3D tisk z toho důvodu, že na tiskovou hlavu nepůsobí na rozdíl od obrábění rezná síla a zatížení vedení je tedy velmi malé. Dále jsou vodicí tyče a lineární ložiska snadno dostupné za nízkou cenu od českých dodavatelů, což je vhodné pro uvažovanou sériovou verzi 3D tiskárny, která bude autorem vyvinuta z tiskárny navržené v této práci.

U kinematiky H-bot je třeba vlivem sil působících na tiskovou hlavu použít lineární vedení, které je ale dražší a pro FDM 3D tiskárnu značně předimenzované. Při použití lineárních ložisek s ocelovými vodicími tyčemi (což bylo uvažováno ve výše uvedené tabulce) hrozí vlivem zatížení tiskové hlavy od řemenů zaseknutí tiskové hlavy, a proto je kinematika H-bot méně vhodná než kinematika CoreXY.

Proti kinematikám CoreXY a H-Bot naopak hovoří argument vyšší náročnosti výpočtů pohybu, avšak tento fakt není v současné době relevantní, protože již jsou k dispozici řídicí platformy s dostatečně výkonným procesorem za nízkou cenu. Dále většina Open-source řídicích systémů 3D tiskáren tyto kinematiky podporuje.

### 4.3 Ostatní komponenty 3D tiskárny

U ostatních komponent (jako extruder, hot-end a další) budou, pokud to bude možné, použity již existující funkční komponenty od specializovaných výrobců. Tyto budou uvedeny v následující kapitole.

## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Mezi zkušenými uživateli 3D tiskáren je rozšířen názor, že na technologii FDM již není co inovovat. Tento názor vyvrací 3D tiskárna navrhnutá v této práci.

V současnosti na trhu neexistuje FDM 3D tiskárna, která by byla schopná uživatele předem informovat o tom, že během tisku může být vypotřebován veškerý materiál, a že tudíž dojde k pozastavení tisku, a která by současně umožňovala použít filament navinutý na cívce od libovolného výrobce. Navíc nová 3D tiskárna je schopna pracovat s těžšími cívkami, a to až s celkovou hmotností cívky 6 kg o průměru 260 a výšce 100 mm, ze kterých dokáže tisknout spolehlivěji než současné tiskárny s použitím méně hmotných cívek (nejčastěji používané cívky jsou do celkové hmotnosti 1,5 kg). Hmotnost 6 kg je pro dané maximální rozměry cívky předimenzovaná, avšak počítá se s možnou podporou těžších materiálů (například s kovovými aditivami).

Aby bylo dosaženo zmíněných vlastností, muselo být navrženo originální konstrukční řešení podavače materiálu a jeho umístění v konstrukci tiskárny. Toto nové řešení ale musí být dostatečně jednoduché na obsluhu a současně i intuitivní. Cílem rovněž je docílit vysoké spolehlivosti tiskárny. Následující kapitola popisuje konstrukční řešení, pomocí něhož je dosaženo těchto vlastností a které využívá poznatky získané experimentálním ověřením vhodnosti podavače materiálu. Jednotlivé kapitoly jsou řazeny chronologicky tak, jak budou jednotlivé celky postupně sestavovány.

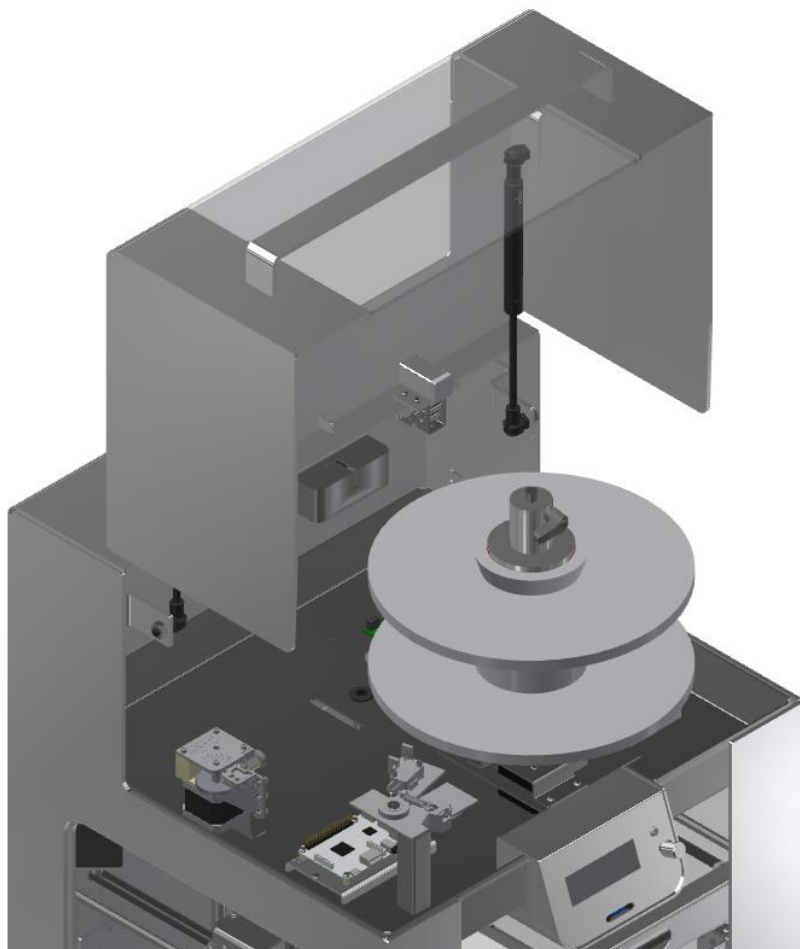


Obr. 34) Vizualizace 3D tiskárny

## 5.1 Podavač materiálu

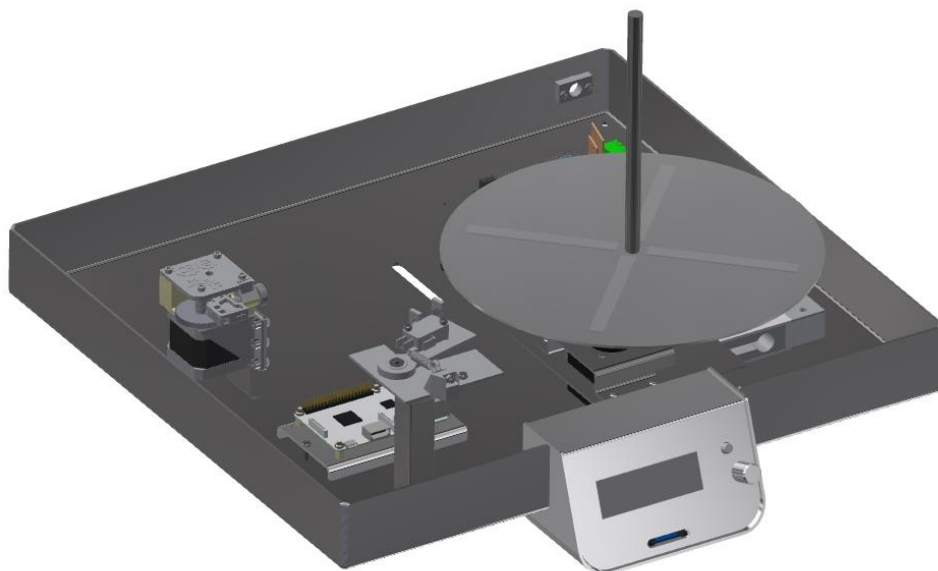
Rozhodující pro konstrukci navržené tiskárny, je podavač materiálu, díky jehož řešení a funkcím, které umožňuje, se tato odlišuje od konkurenčních výrobků. Konkrétně se jedná o funkce zajišťující spolehlivé odvíjení materiálu a monitorování zbývajících množství materiálu na cívce. Dle názvu této kapitoly by se mohlo jevit, že podavač materiálu je přídatné zařízení 3D tiskárny. Ve skutečnosti však tvoří podavač materiálu a 3D tiskárna z pohledu uživatele jeden uzavřený celek.

Na základě vyhodnocení všech parametrů bylo rozhodnuto, že podavač materiálu se bude nacházet nad tiskovou plochou. Je to kvůli jeho snadnější manipulaci uživatelem. Kromě plnění funkce podavače materiálu je zde také umístěna většina elektronických komponent včetně řídicích desek. Tyto zde byly umístěny kvůli tomu, aby spojení mezi řídicí deskou tiskárny a tenzometrickým snímačem bylo z důvodu co nejmenšího ovlivnění výsledků měření co nejkratší. Horní kryt tedy slouží jak ke vkládání materiálu, tak i pro snadný přístup k většině elektronických komponent pro servisní úkony. Umístění podavače materiálu v konstrukci celé tiskárny je zobrazeno na Obr. 35).



Obr. 35) Umístění podavače materiálu

Komponenty zajišťující spolehlivé odvíjení jsou umístěny na podavači materiálu. Kromě těchto komponent je zde také umístěna většina elektroniky tiskárny, včetně ovládacího rozhraní. Část konstrukce tiskárny, označována jako podavač materiálu, je zobrazena na Obr. 36).



Obr. 36) Podavač materiálu

Celá sestava podavače materiálu je z důvodu jednoduchosti montáže přichycena k rámu tiskárny pomocí čtyř šroubů procházejících otvory v rozích na Obr. 37).



Obr. 37) Otvory pro přichycení podavače materiálu umístěny v rozích

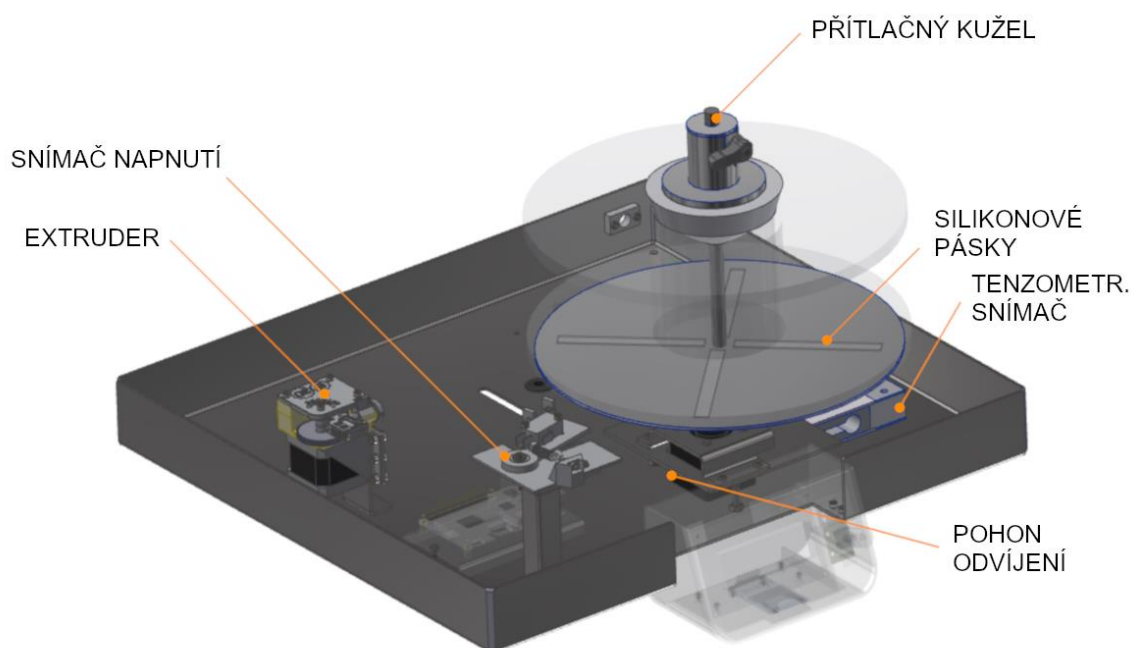
Komponenty zajišťující spolehlivé odvíjení filamentu vytvářejí nové a originální řešení zajišťující vysokou spolehlivost odvíjení těžkých cívek a tím zvyšující celkovou

spolehlivost tiskárny a snižující náklady na tisk. Hlavní prioritou bylo navrhnout řešení, na něž si uživatelé snadno zvyknou a akceptují jej. To znamená, že veškeré změny oproti stávajícím řešením odvíjení cívky musí být opodstatněné a musí být uživatelsky co nejjednodušší a nejpřívětivější. Pokud by dané řešení bylo pouze spolehlivé, ale uživatelsky nepřívětivé, uživatelé 3D tiskáren by jej nepřijali a preferovali by tiskárny využívající stávající vyzkoušená řešení.

Pro zajištění spolehlivého odvíjení těžkých cívek byly využity následující komponenty:

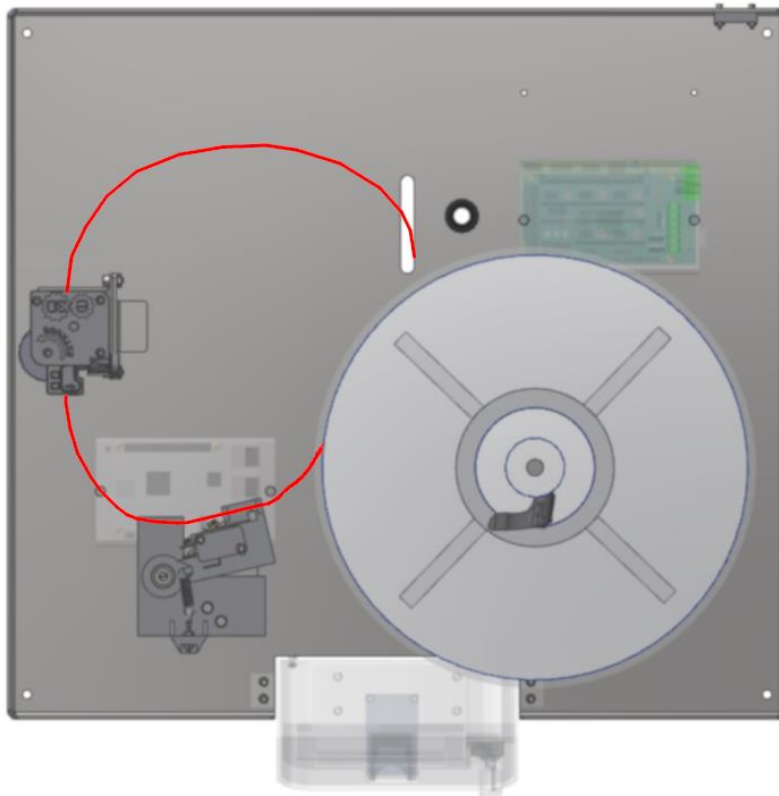
- Přítlačný kužel – zabezpečuje dostatečnou sílu pro spolehlivé odvíjení cívky.
- Silikonové pásky – zajišťují dostatečnou adhezi s cívkou. Jsou nalepeny na disku.
- Pohon odvíjení – slouží k pohonu disku, který přes silikonové pásky roztáčí cívku a tím odvíjí filament.
- Tenzometrický snímač – slouží k monitorování, zda nehrozí přetržení filamentu vlivem chyby odvíjení nebo vlivem nevhodně navinutého filamentu na cívce.
- Snímač napnutí – spustí odvíjení, pokud je překročeno napětí filamentu vlivem odebírání extruderu. Pokud je koncový spínač, který je patrný na Obr. 38) i Obr. 39), rozepnut kvůli tomu, že se například zlomil filament, tisk se pozastaví. Po vyřešení problému tisk pokračuje z místa přerušování.
- Extruder – podává filament do hot-endu. Zvyšuje napětí filamentu, což je využito pro řízení odvíjení.

Všechny komponenty zajišťující spolehlivost odvíjení jsou zobrazeny na Obr. 38), přičemž nesouvisející komponenty jsou zprůhledněny.



Obr. 38) Komponenty zajišťující spolehlivé odvíjení filamentu

Vložený filament zobrazuje Obr. 39), přičemž na obrázku chybí bowdenová trubice, která bude na výstupu extruderu a povede skrz oválnou drážku až do hot-endu.



Obr. 39) Cesta filamentu

### 5.1.1 Přítlačný kužel

Přítlačný kužel je jedna z komponent 3D tiskárny, se kterými bude uživatel často ve styku. Z toho důvodu je jako materiál všech vyráběných dílů kužele kromě pružiny zvolena slitina EN-AW 6061. Hliníkové slitiny jsou příjemné na dotyk, což ovlivnilo volbu materiálu, a mají oproti oceli nižší hustotu. Celková hmotnost kužele činí podle programu Autodesk Inventor 0,465 kg.

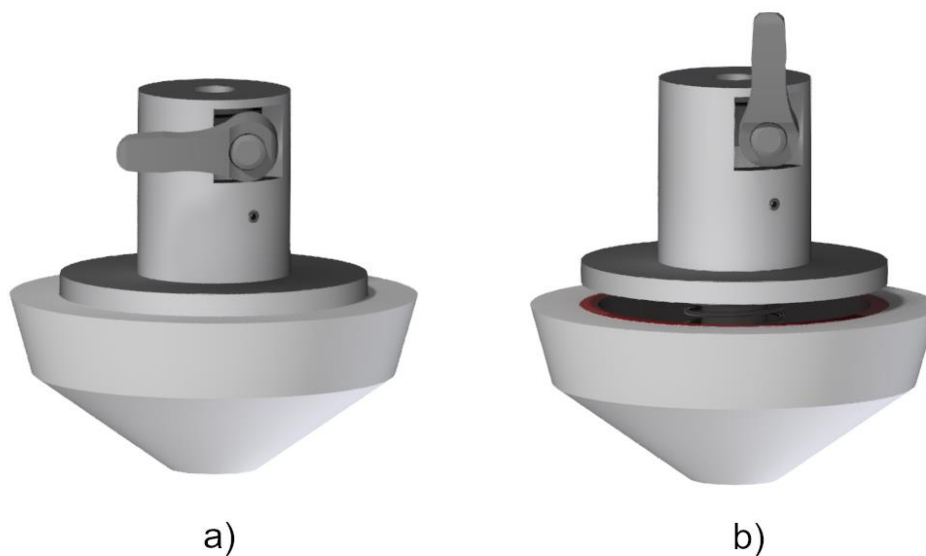
Aby docházelo ke spolehlivému a řízenému odvíjení cívky při tisku, je potřebné přitlačovat cívku k silikonovým páskům silou minimálně 30 N. Toto bylo zjištěno při experimentálním ověření vhodnosti konstrukce podavače materiálu a samotnou hmotností kužele není této síly dosaženo.

Už samotný fakt, že uživatel je nucen při každé výměně materiálu tiskárny kužel vyjmout a poté opět vložit, snižuje uživatelskou přívětivost. Cílem tedy bylo navrhnout kužel pro obsluhu co nejjednodušší a zároveň kužel plně spolehlivě svou funkci. Pokud by kužel sílu 30 N vyvozoval pouze pomocí hmotnosti a gravitačního zrychlení, bylo by to pro obsluhu nepříjemné. Minimální hmotnost 3 kg je pro častou manipulaci příliš velká.

Z toho důvodu je síla vyvozena pružinovým mechanismem umístěným uvnitř kužele. Kužel v poloze, kdy vyvozuje dostatečnou sílu, je na Obr. 40) a).



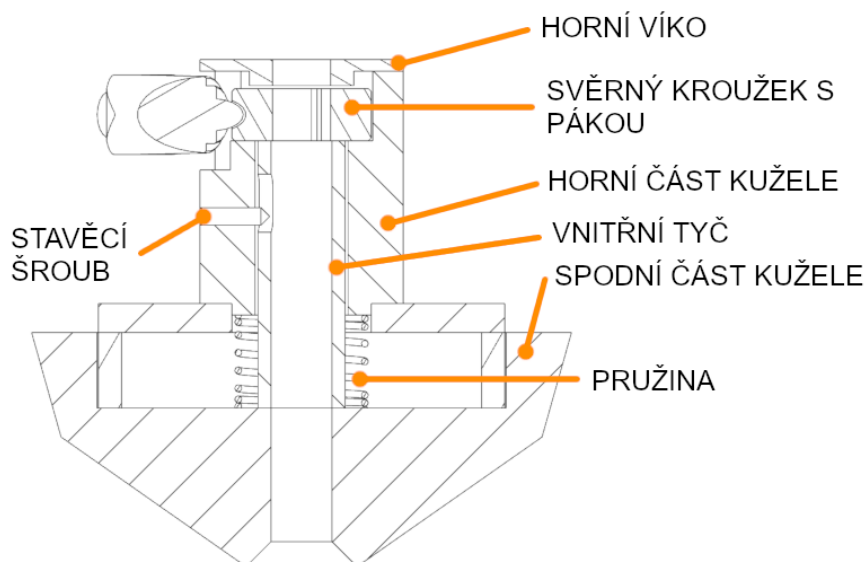
Pružina vytlačuje horní část kužele nahoru, a tím je odkryt červený indikační pruh informující uživatele, že kužel sílu nevyvozuje. Tak je jasně definován nežádoucí stav. Kužel v poloze, kdy nevyvozuje přítlačnou sílu a umožňuje manipulaci uživatele, je zobrazen na Obr. 40) b).



Obr. 40) a) Kužel v poloze, kdy vyvozuje dostatečnou sílu

b) Kužel v poloze, kdy umožňuje manipulaci

Řez kuželem ve stavu, kdy vyvozuje dostatečnou sílu, je zobrazen na Obr. 41)



Obr. 41) Přítlačný kužel v poloze zajišťující dostatečnou sílu

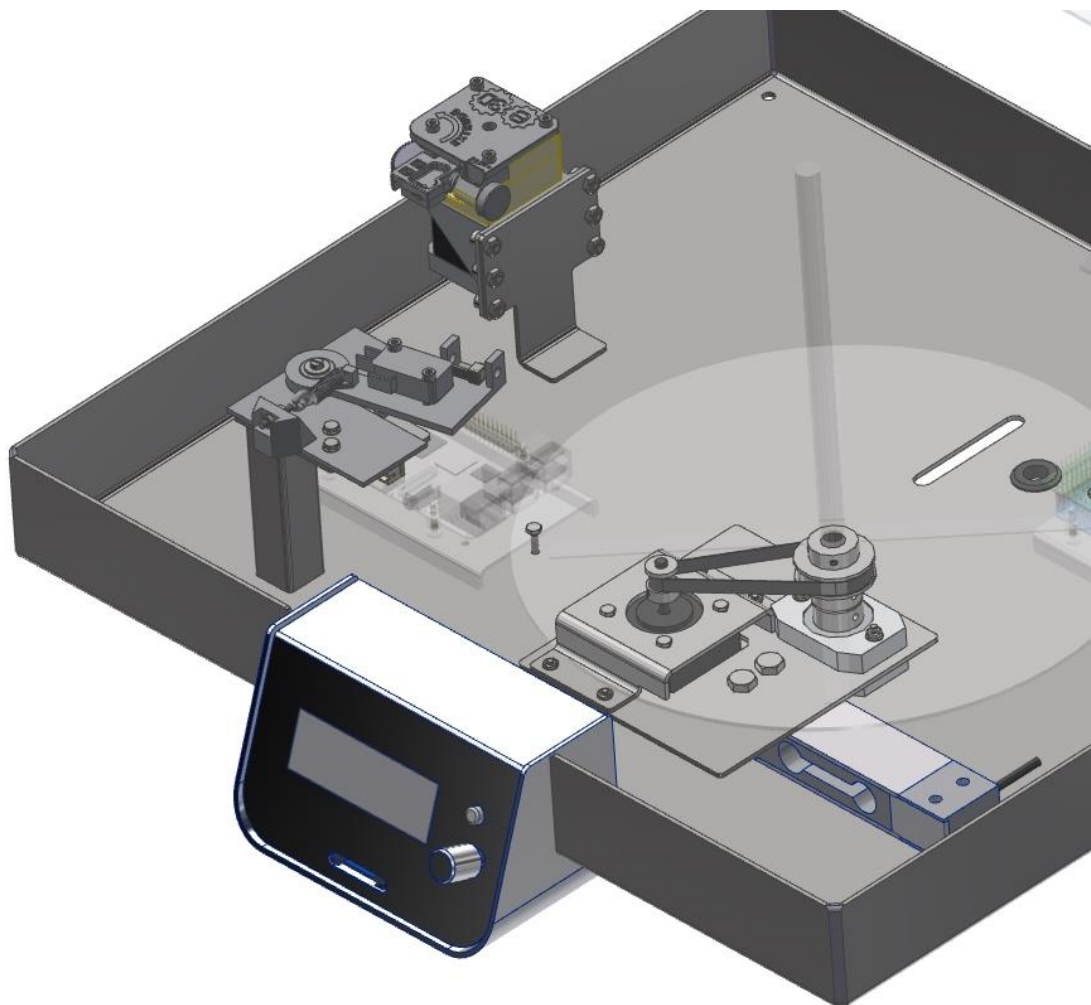
Kužel je k hřídeli přichycen pomocí svěrného kroužku spojeného s pákou pro manuální ovládání. Svěrný kroužek je vložen do horní části kužele a z horní části přitlačen víkem. Víko bude k horní části kužele přilepeno, nebo přichyceno šrouby v závislosti na experimentálním ověření.

Mezi horní a spodní částí kužele se nachází pružina, která je horní částí kužele stlačována. Pohyb horní a spodní části vůči sobě je vymezen drážkou a stavicím šroubem, což zamezuje otáčení těchto částí vůči sobě a axiálně omezuje pohyb těchto částí. Drážka se nachází ve vnitřní tyči, která je přivařena ke spodní části kužele. Stavěcí šroub je zašroubován do horní části kužele s tím, že přesahuje do již zmíněné drážky vnitřní tyče.

Díky vymezení pohybu spodní a horní části vůči sobě nedojde běžným užíváním kužele k rozdělení na tyto dvě části.

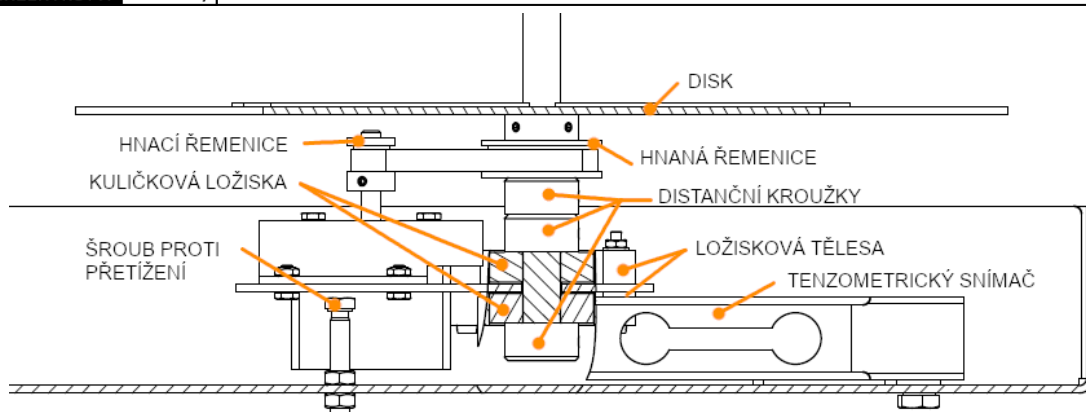
### 5.1.2 Odvíjení cívky a měření hmotnosti

Silikonové pásky jsou nalepeny na duralovém disku. Duralový disk je slepen s velkou řemenicí. Lepené spoje byly využity z důvodu jednoduchosti montáže a kvůli tomu, aby uživatelé vizuálně nerozptylovaly šrouby, se kterými není nutné při použití 3D tiskárny manipulovat. Pohon odvíjení cívky je zobrazen na Obr. 42).



Obr. 42) Pohon odvíjení

Vnitřní schéma pohonu odvíjení zobrazuje Obr. 43).

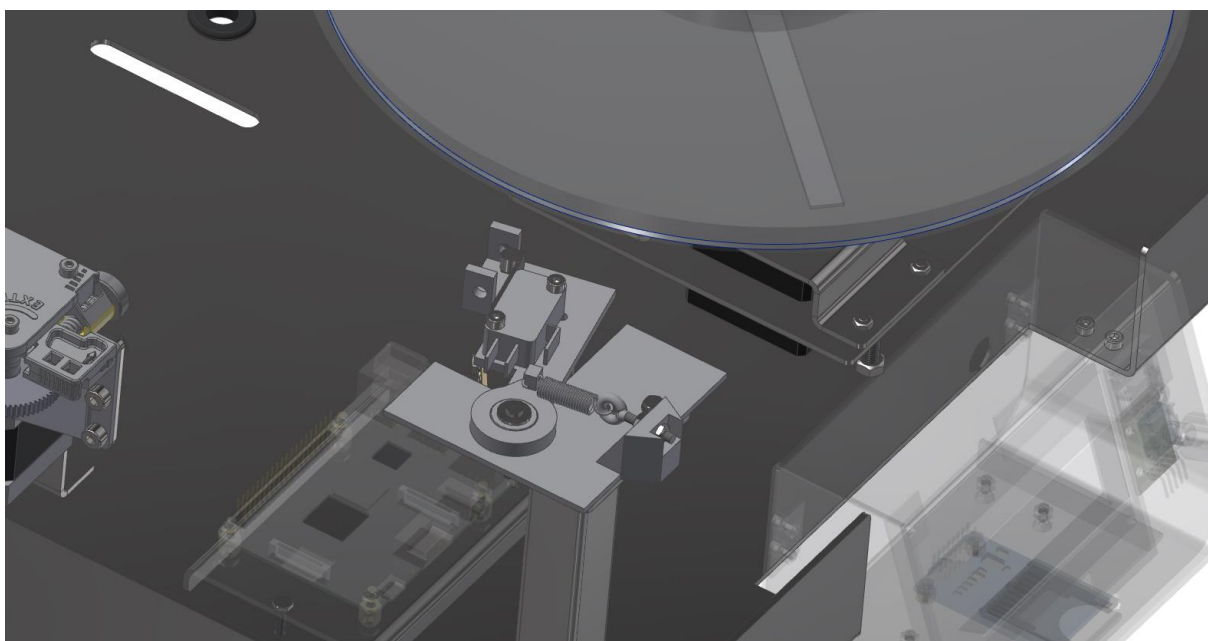


Obr. 43) Schéma pohonu odvíjení a měření hmotnosti

Konstrukce je podobná realizované konstrukci prototypu podavače materiálu uvedené v kapitole 4.1.3. Oproti této konstrukci je zde použit přesnější tenzometrický snímač (důvod je podrobně uveden v kapitole 6.2.3). Dále byly přidány šrouby proti přetížení tenzometrického snímače. Při příliš velkém zatížení podavače materiálu dojde k prohnutí veškeré konstrukce přišroubované k tenzometrickému snímači. Tato konstrukce se zdeformuje natolik, že dojde ke kontaktu plechu, k němuž jsou veškeré komponenty přišroubovány, s hlavou šroubu proti přetížení. Výška zašroubování šroubu bude určena experimentálně.

### 5.1.3 Snímač napnutí

Základní princip snímače je stejný jako realizovaný snímač napnutí pro experimentální ověření konstrukce podavače materiálu v kapitole 4.1.3. Oproti tomuto snímači se liší pouze tím, že byl přidán koncový spínač, který poskytuje 3D tiskárně informaci o tom, zda tímto místem prochází filament. K rozpojení snímače dojde buď při vypotřebování veškerého materiálu na cívce (na což ale bude uživatel předem upozorněn), nebo při zlomení filamentu vlivem jeho vysokého napětí. Pravděpodobnost zlomení filamentu je však velmi malá – jak je uvedeno v kapitole 6.3, podavač materiálu před možným zlomením filamentu uživatele dopředu varuje. Snímač napnutí pro 3D tiskárnu je zobrazen na Obr. 44).



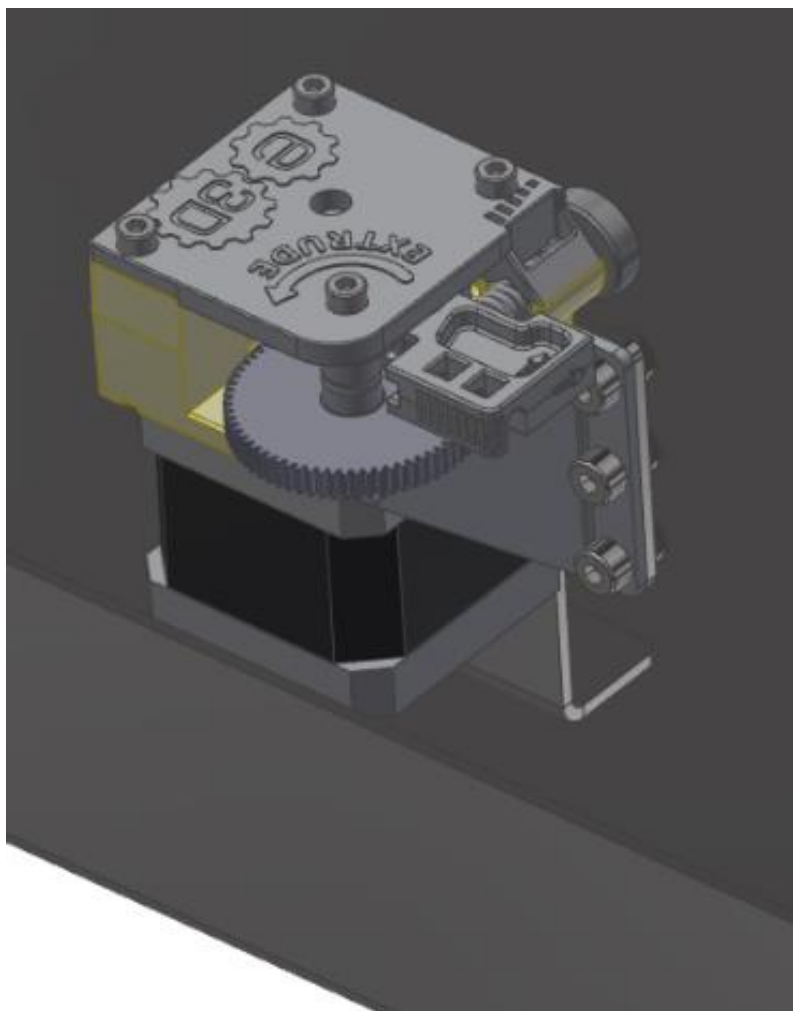
Obr. 44) Snímač napnutí filamentu

### 5.1.4 Extruder

Byl použit extruder Titan od výrobce E3D. Jedná se o oblíbený extruder, který je často používán v rámci upgradů 3D tiskáren. Jedná se tedy o spolehlivý funkční celek, který spolehlivě zásobuje hot-end filamentem. Je k dispozici v bowdenovém provedení (použitém v této práci). 3D model tohoto extruderu byl získán přímo na stránkách výrobce. [14]

Při realizaci podavače materiálu v kapitole 4.1.3 byly zjištěny skutečnosti, které ovlivnily zabudování extruderu do 3D tiskárny. Především je nutné změnit polohu extruderu – osa otáčení extruderu (totožná s osou otáčení krokového motoru extruderu) je nyní osa Z – tedy osa kolmá k zemi – oproti původní ose X. Díky tomu se do extruderu lépe zavádí filament.

Obtížné zavádění filamentu do původního umístění extruderu prototypu podavače materiálu bylo dáno faktem, že filament má tendenci ohýbat se vlivem svého navinutí na cívku. Pokud ale byla osou rotace osa X, vlivem ohýbání filamentu bylo obtížné jej vložit do extruderu. Pro snazší zavádění filamentu musí osa otáčení extruderu být vždy rovnoběžná s osou otáčení cívky. Tento fakt byl experimentálně ověřen. Extruder je zobrazen na Obr. 45).



Obr. 45) Extruder podavače materiálu

### 5.1.5 Návod na vložení filamentu

Tato kapitola je zde uvedena pro jasné vysvětlení funkce podavače materiálu. Uživatel nejprve do tiskárny vloží cívku s materiálem. Cívku zajistí přítlačným kuželem tak, aby nebyl viditelný červený pruh. Nyní zadá parametry vložené cívky do tiskárny. Pokud hmotnost na tenzometrickém snímači nebude odpovídat kvůli nevložení přítlačného kužele, bude uživatel požádán, aby přítlačný kužel vložil a cívku správně zajistil. Po ověření parametrů cívky se spustí odvíjení extruderu – uživatel nyní vloží filament nejprve do snímače napětí a poté do extruderu. Po správném vložení filamentu do extruderu (přičemž odvíjení extruderu je stále aktivní a slouží pro ulehčení vložení filamentu do extruderu) se začne filament zavádět přes bowdenovou trubici z extruderu do hot-endu. Jakmile bude hot-end extrudovat tiskový materiál, uživatel toto potvrdí. Nyní došlo k úspěšnému vložení tiskového materiálu. I přesto, že je nutné vkládat přítlačný kužel, je vložení materiálu dostatečně jednoduché a uživatelsky přívětivé.

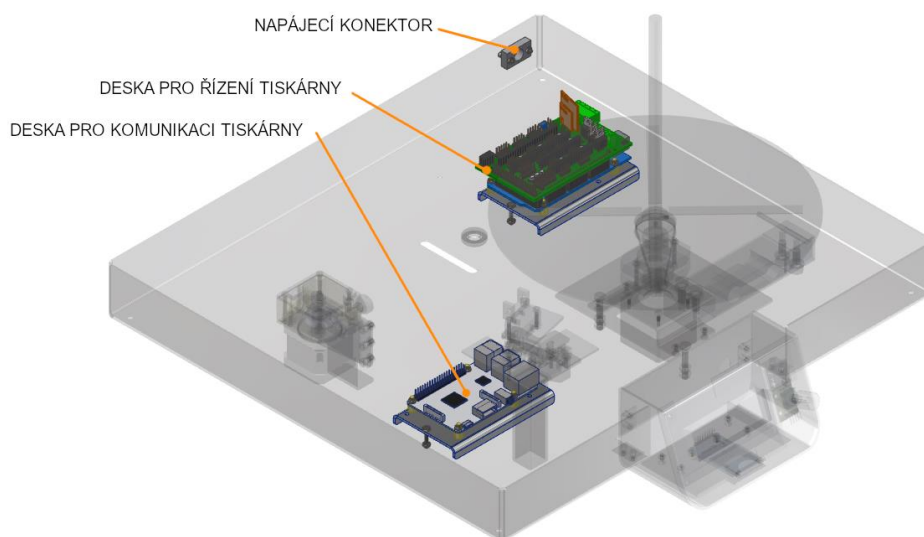
Zavádění nového materiálu je u některých běžně používaných 3D tiskáren obtížnější – mezi takovými tiskárnami patří tiskárny výrobce Ultimaker, kde je manipulace ztížena vlivem toho, že držák strun se nachází na zadní straně tiskárny, jež je uživateli často obtížně přístupná.

### 5.1.6 Řídicí desky

Do této kapitoly byly popisovány komponenty zajišťující spolehlivé odvíjení filamentu. Nicméně další funkcí podavače materiálu je, že je zde zabudována většina elektronických komponent, včetně řídicích desek. K rozhodnutí umístit řídicí desky k podavači materiálu autor dospěl na základě:

- Dodržení co nejkratší délky spojení mezi tenzometrickým snímačem a řídicí deskou. Toto ovlivňuje přesnost měření hmotnosti.
- Snadnost přístupu k elektrickým komponentám z důvodu servisních oprav nebo uživatelské údržby.

V konstrukci jsou použity dvě řídicí desky – jedna pro řízení 3D tiskárny – tedy konkrétně řízení všech motorů a měření hmotnosti – a druhá pro komunikaci. Je plánováno přidat možnost připojení 3D tiskárny do Wi-Fi sítě, dále tato deska slouží pro ovládání uživatelského rozhraní. Umístění desek je patrné z Obr. 46). Napájecí konektor a zdroj napětí budou popsány v následující kapitole.



Obr. 46) Umístění řídicích desek v konstrukci podavače materiálu

Jako řídicí deska byla použita deska Arduino Mega 2560 s nadstavbou Ramps 1.4 – na níž se připojí piny všech komponent 3D tiskárny kromě ovládacího rozhraní a drivery krokových motorů. V seznamu literatury je uveden zdroj na použitý 3D model [15]. Jako deska obstarávající komunikaci 3D tiskárny – tedy ovládání 3D tiskárny pomocí uživatelského rozhraní a funkce konektivity tiskárny – byla zvolena deska Raspberry PI 3B. Zdroj je opět uveden v seznamu literatury [16]. Zde zmíněná elektronika je pouze pro potřeby vývoje, v budoucnu je počítáno s variantou, kde pro veškeré funkce 3D tiskárny bude použita pouze jedna řídicí deska s podporou Wi-Fi sítě.

Nutnost snadno vyměnit řídicí desky ovlivnila konstrukci. Řídicí desky jsou umístěny na U profilech, které jsou pomocí šroubů přitaženy k základnímu plechu podavače materiálu, což je zobrazeno na Obr. 46).

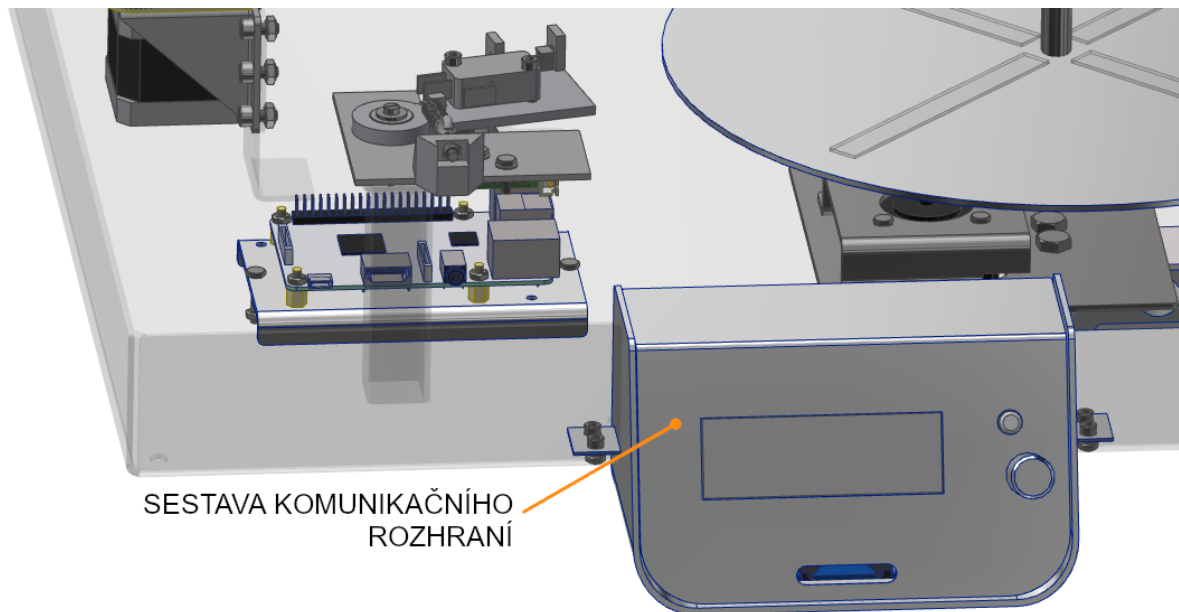
Řídicí deska je od U profilu z důvodu přesahujících pájených spojů odsazena pomocí distančních sloupků. Pro zabudování jiné řídicí desky tedy pouze stačí:

- Vyrobit U profil nebo upravit již existující U profil pro přichycení nové řídicí desky pomocí distančních sloupků.
- Dodržet rozměry děr, pomocí kterých je U profil přichycen ke konstrukci podavače materiálu.

Díky snadnému zabudování se usnadní i případné servisní opravy nebo uživatelské vylepšení tiskárny komponentami výrobce, který dnešní výrobci 3D tiskáren běžně nabízejí.

### 5.1.7 Komunikační rozhraní

3D tiskárna uvedená v této práci disponuje základním komunikačním rozhraním rozšířeným u RepRap tiskáren. Celá sestava komunikačního rozhraní byla uchycena ke konstrukci podavače materiálu pomocí 4 šroubů a matic.



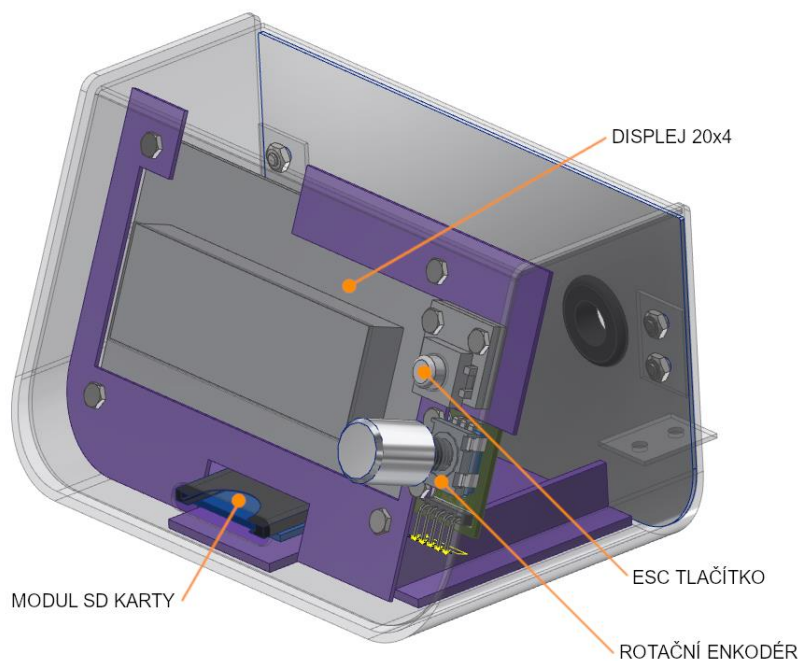
Obr. 47) Umístění sestavy komunikačního rozhraní

Komunikační rozhraní sestává z následujících elektronických komponent:

- Displej 20x4 – Standardní znakový displej komunikující přes na něm napájenou sběrnici I2C.
- Modul SD karty – slouží pro čtení dat g-kódu umístěného v souboru na SD kartě. Použitý 3D model je uveden v seznamu literatury. [17]
- Rotační enkodér – standardní rotační enkodér pro navigaci menu (otáčení – další položka, stisknutí – výběr položky). Použitý model je uveden v seznamu literatury. [18]
- ESC tlačítko – slouží ke zrušení akce nebo pro přechod do nadřazené úrovně menu

Všechny tyto komponenty jsou uchyceny pomocí šroubů tak, aby šrouby nebyly pro uživatele viditelné a nerozptylovali jej. Uchycení komponent je patrné z Obr. 48).





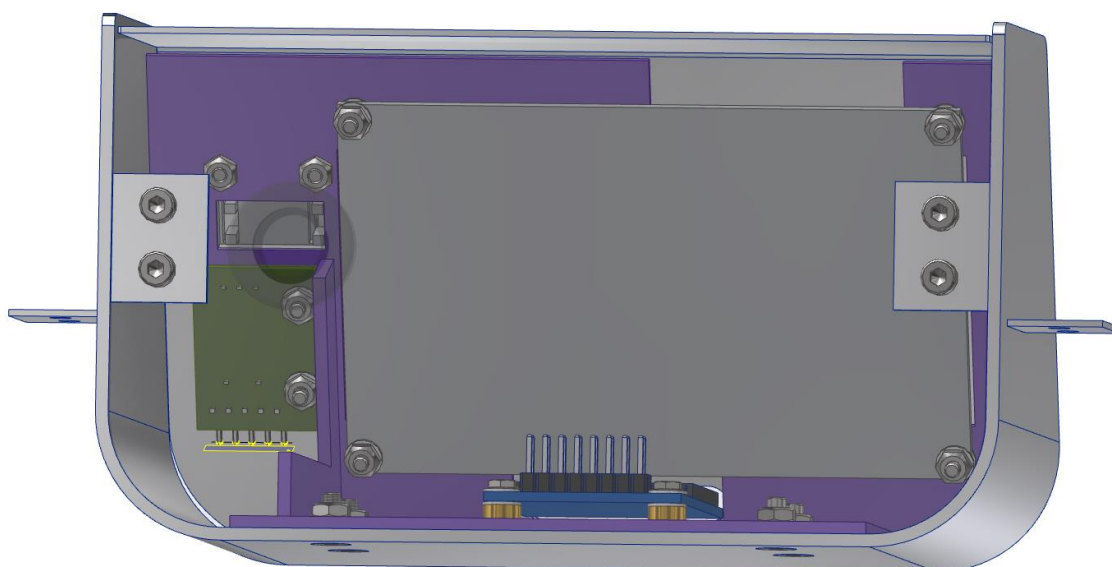
Obr. 48) Uchycení komponent komunikačního rozhraní

Fialová barva na Obr. 48) označuje svařenec, který slouží k uchycení všech elektronických komponent komunikačního rozhraní pomocí šroubů. Díly svařence jsou vyrobeny z hliníkové slitiny EN-AW-6060. Protože u některých elektronických komponent, například u displeje, by mohlo docházet k nesprávné funkci vlivem přímého kontaktu s kovem, je mezi hliníkový díl a elektronickou komponentu; a mezi šroub a elektronickou komponentu vložena plastová podložka s rozměry podle normy DIN 125.

Průhlednou barvou je znázorněn svařenec krytu složený ze dvou dílů – tvarovaného U profilu a ohnutého plechu.

Šedou barvou je znázorněn zadní plechový kryt přichycený pomocí čtyř šroubů. V tomto krytu je vložena pryžová průchodka, skrz kterou budou vedeny kabely komunikačního rozhraní.

Pohled ze zadní strany se zprůhledněným zadním krytem a svařencem krytu zobrazeným šedou barvou znázorňuje Obr. 49).



Obr. 49) Zadní pohled na uchycení komponent komunikačního rozhraní

Z Obr. 49) je patrné, že svařenec sloužící pro uchycení všech komponent (opět znázorněný fialovou barvou) je spojen se svařencem krytu zobrazeným šedou barvou pomocí šroubů se zápusťnou hlavou a matic. Šrouby jsou zašroubovány do nanýťovaných matic nebo navařených matic. Modul SD karty je z důvodu přesahujících pájených spojů od fialového svařence odsazen pomocí mosazných podložek.

### Postup montáže

Nejprve se veškeré elektronické komponenty namontují na svařenec zobrazený fialovou barvou /viz Obr. 48) a Obr. 49)/ pomocí šroubů a matic. Poté je tento svařenec vložen do krytu a poté jsou k sobě přišroubovány pomocí čtyř zápusťných šroubů a matic. Následně je zadní část sestavy zakryta plechovým krytem, který je přišroubován pomocí čtyř šroubů s vnitřním šestihranem k svařenci krytu (matice, jež jsou zobrazeny na Obr. 48), jsou ke svařenci krytu přivařeny, nebo jsou použity speciální nýtovací matice). V této fázi je možné testovat funkci elektronických komponent, pokud všechny komponenty fungují správně, je sestava komunikačního rozhraní připravena pro montáž do nadřazené sestavy – podavače materiálu.

Z postupu montáže je patrné, že montáž celé sestavy komunikačního rozhraní je jednoduchá, přičemž současně byly dodrženy estetické požadavky na tuto konstrukci.

### 5.1.8 Zdroj napětí

Bylo zvažováno, zda se zvolí externí nebo vnitřní zdroj napájení. Díky tomu, že celá konstrukce podavače je zakrytována a podavač je dimenzován na velké cívky, je zde dostatek místa pro vnitřní zdroj napětí. Dále průmyslový zdroj napětí obecně dosahuje vyššího výkonu za danou cenu.

Nicméně u externího zdroje napětí klesají požadavky na konstrukci z hlediska elektrické bezpečnosti. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že se zvolí externí zdroj napětí o

výkonu 360 W a poskytovaným stejnosměrným napětím 12 V. Podobný externí zdroj napětí od stejného dodavatele je zobrazen na Obr. 50).



Obr. 50) Zdroj napětí [19]

Pro propojení zdroje napětí s 3D tiskárnou je využit standardní 4-pinový konektor. Nejedná se o nestandardní řešení, například všechny 3D tiskárny Ultimaker jsou napájeny externím zdrojem.

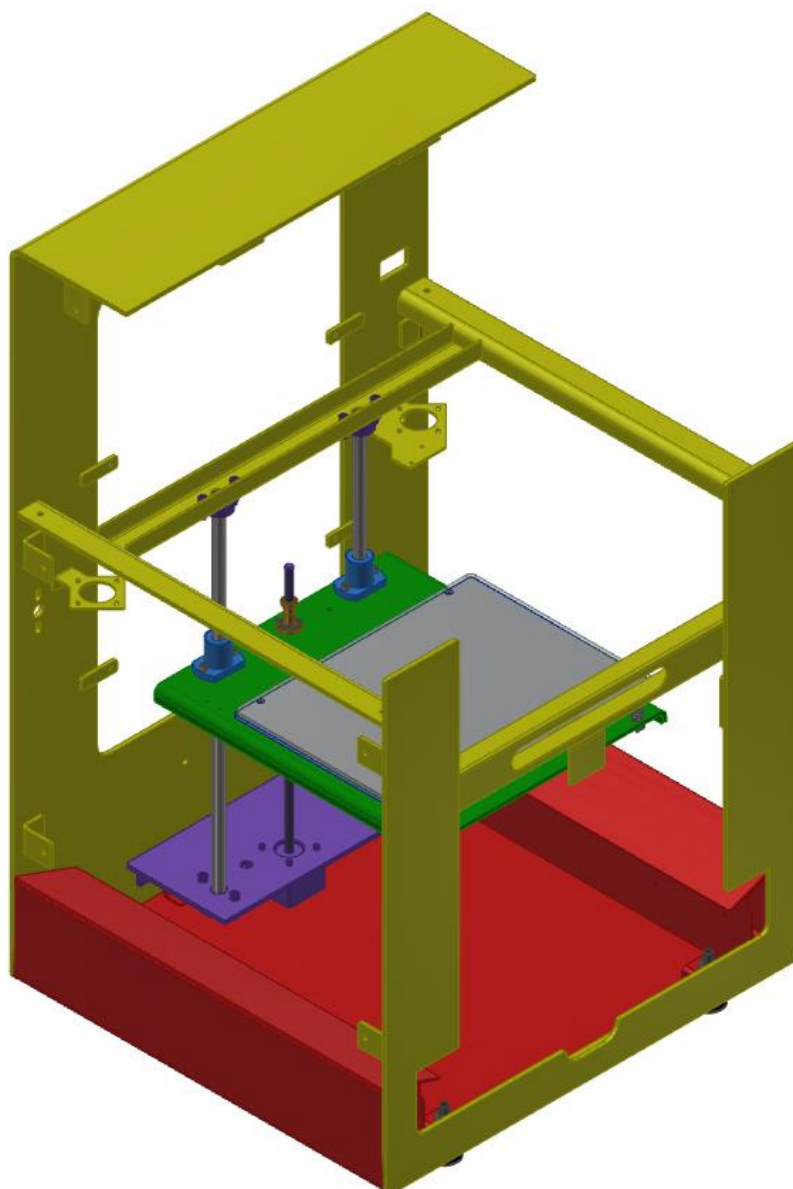
## 5.2 Osa Z

Při vývoji nového produktu je nutné určit, jaké mají být jeho hlavní vlastnosti, které potenciální zákazníci nejvíce ocení. Čím se budoucí produkt liší od konkurence a co u současných konkurenčních produktů zákazníkům chybí. V návaznosti na to určit, čemu při vývoji věnovat více zdrojů a čemu méně. Jinak by hrozilo, že nebude vyvinut spolehlivý a použitelný produkt – nebo bude jeho cena příliš vysoká – a nebude tedy konkurenceschopný.

U 3D tiskárny navržené v rámci této práce je hlavní vlastností spolehlivější systém odvíjení cívky, který dokáže uživatele dopředu upozornit na riziko pozastavení tisku kvůli nedostatku materiálu a který umožňuje spolehlivě odvíjet těžší cívky. Toto osa Z prakticky neovlivňuje – z toho důvodu byla pro osu Z využita standardní, již známá a spolehlivá řešení, využívaná u současných tiskáren.

Konstrukci osy Z ovlivnila zvolená kinematika v kapitole 4.2. Kinematika CORE XY vyžaduje, aby pohyb osy Z vykonávala tisková podložka. Osou Z se tedy v této práci rozumí konstrukce včetně rámu zajišťující vedení tiskové podložky. Osa Z využívá konvenční jednoduchou konstrukci používanou u 3D tiskáren mostové kinematiky, kinematiky CORE XY, kinematiky H-Bot a kinematiky Ultimaker. Všechny tyto kinematiky vykonávají pohyb tiskové podložky v ose Z.

Při výrobě 3D tiskárny navržené v této práci je osa Z první osou, která je sestavena. Na Obr. 51) jsou jednotlivé podsestavy, svařence a díly barevně odlišeny.

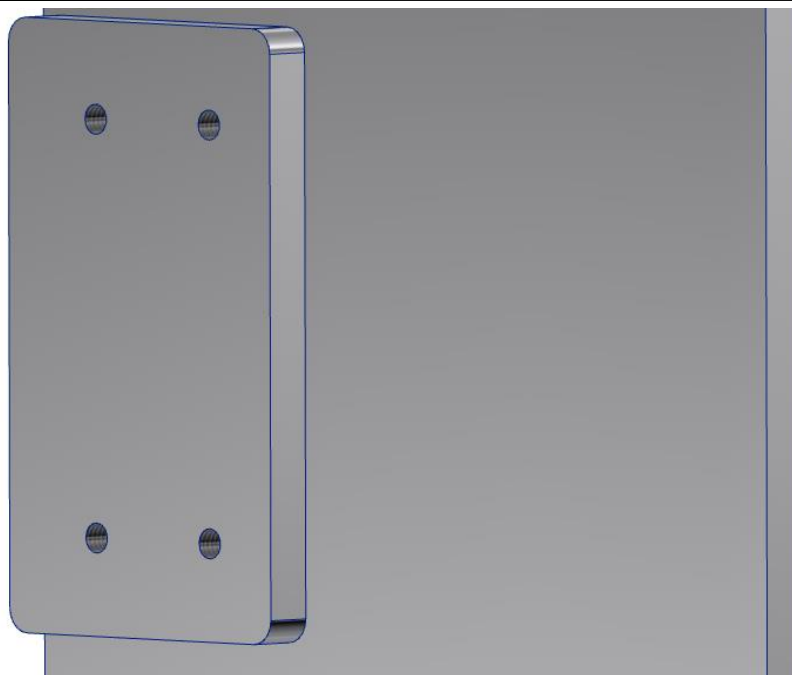


Obr. 51) Sestava osy Z

Žlutě je zobrazen svařenec čelního rámu, červeně svařenec dna, fialově sestava krokového motoru osy Z, zeleně tisková platforma a modře jsou vybarveny lineární vodící ložiska.

### 5.2.1 Svařenec čelního krytu

Jedná se o první svařenec popsáný v této práci, který ve výsledku tvoří rám tiskárny. Tyto díly, pokud se nacházejí na pohledové straně tiskárny (což jsou všechny strany tiskárny kromě zadní a spodní), jsou navrženy tak, aby po sestavení celé tiskárny uživatele vizuálně nerozptylovaly šrouby. Šrouby nemají pro uživatele běžně užívajícího 3D tiskárnu žádný význam. Některé díly však vyžadují šroubové spojení. Namísto spojení matice a šroubu, přičemž hlava šroubu by vyčnívala z krytu, bylo využito zašroubování šroubu do plechu s vyřezaným závitem. Takový plech zobrazuje Obr. 52).



Obr. 52) Plech rámu nahrazující matice

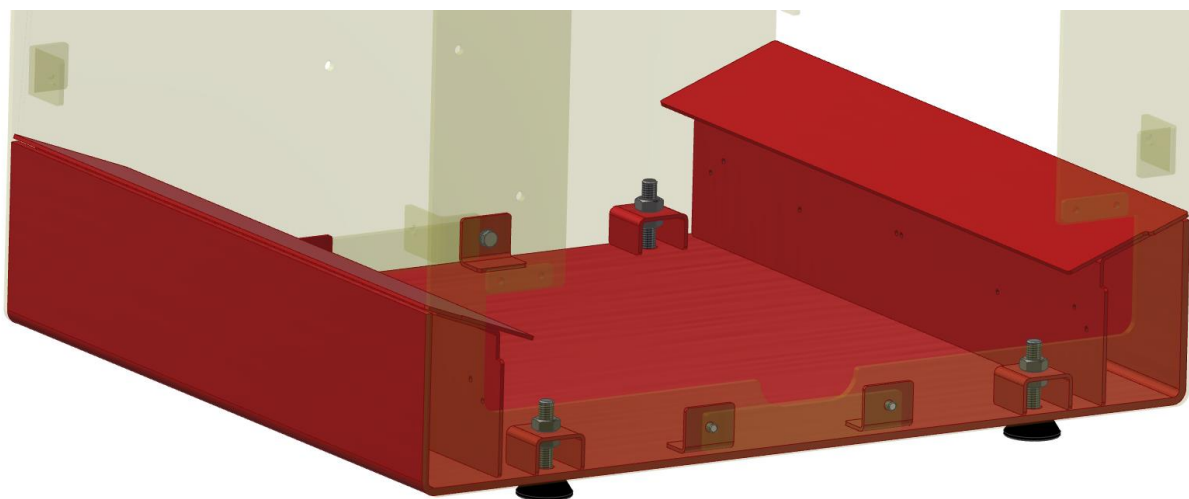
Kromě toho, že čelní kryt je jedním z rámu, které jsou na pohledové straně tiskárny, plní také další důležitou funkci. Je zde uchycena většina komponent 3D tiskárny. Mezi takové komponenty patří:

- podavač materiálu,
- boční kryty,
- komponenty roviny XY,
- komponenty osy Z,
- kryt sestavy krokového motoru osy Z,
- zadní servisní kryt,
- komponenty pro otevírání krytů,
- komponenty pro odvod úlomků filamentu,
- sestava optické závory horního krytu.

Svařenec čelního krytu je přišroubován ke svařenci dna.

### 5.2.2 Svařenec dna

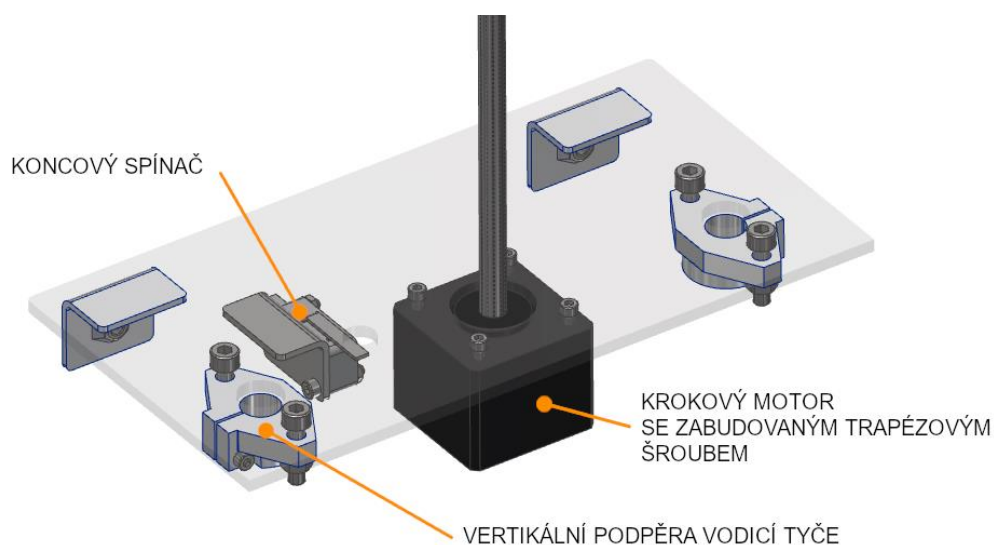
Kromě toho, že ke svařenci dna je přišroubován čelní kryt, tak ve spodní části jsou ke svařenci dna přišroubovány stavitelné nohy, na kterých stojí celá 3D tiskárna. Nakloněné plochy slouží pro odvod úlomků filamentu po sundání výtisku, toto bude popsáno v podkapitole 5.4. Svařenec dna s viditelným spojením se svařencem čelního krytu je zobrazen na Obr. 53).



Obr. 53) Svařenec dna

### 5.2.3 Sestava motoru osy Z

Na Obr. 54) je zobrazena sestava motoru osy Z. Koncový spínač slouží pro určení referenční polohy, která je použita jako výchozí bod pro odměřování polohy řídicím systémem. Krokový motor se zabudovaným trapézovým šroubem slouží k pohonu osy Z. Vertikální podpěry vodicích tyčí zajišťují uchycení vodicích tyčí.

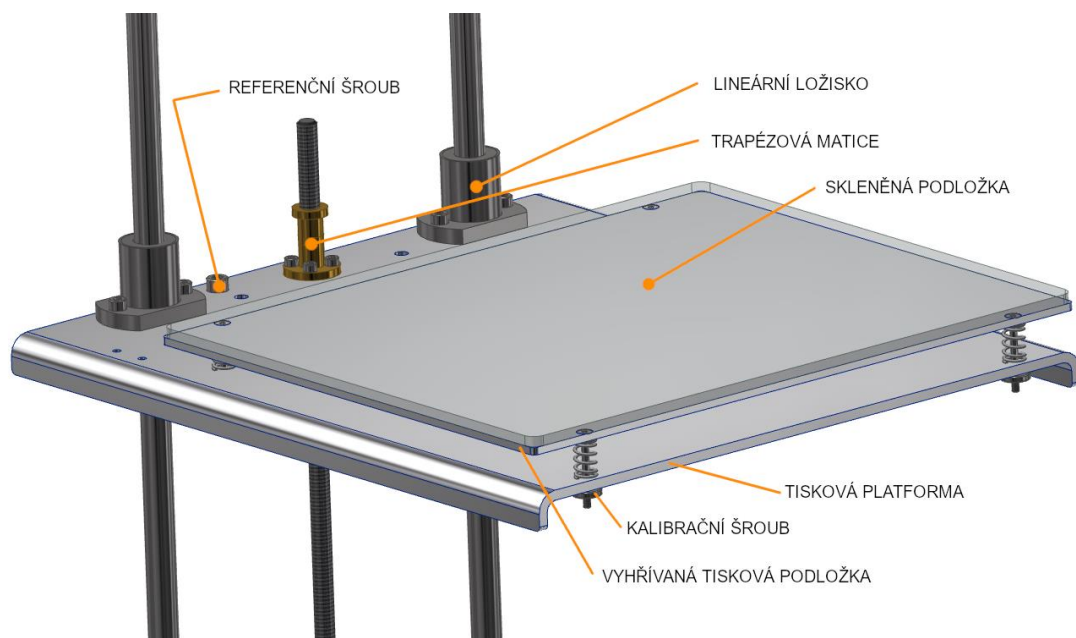


Obr. 54) Sestava motoru osy Z

### 5.2.4 Tisková platforma

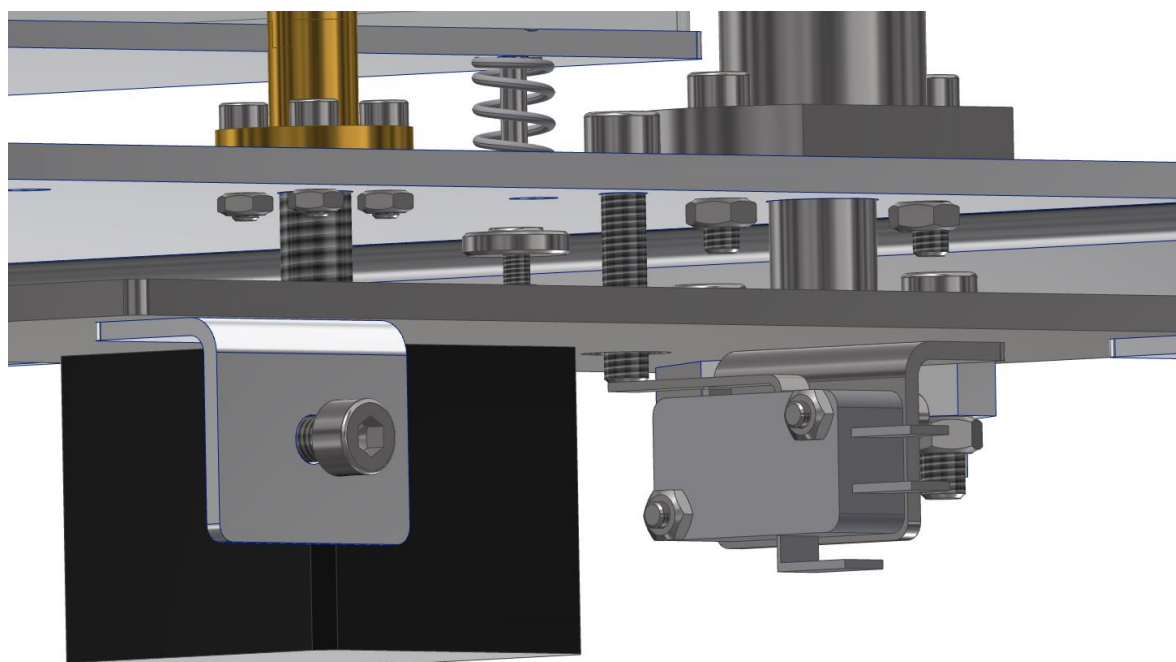
Tisková platforma je z plechu podélně vyztuženého ohyby, na kterém jsou přišroubovány lineární vodicí ložiska a trapézová matice. Ohyby na plechu jsou z důvodu snížení průhybu vlivem hmotnosti výtisku. Vzhledem k tomu, že hmotnost výtisku většinou nepřekročí 1 kg, je průhyb dostatečně malý.

Dále jsou na tiskové platformě přišroubovány kalibrační šrouby. Mezi horní plochou tiskové platformy a tiskovou podložkou jsou vloženy pružiny. Šroubováním kalibračních matic je možné zkalibrovat tiskovou podložku tak, aby pohyb tiskové hlavy byl s rovinou tiskové podložky rovnoběžný. Referenční šroub slouží k sepnutí koncového spínače osy Z při určení referenční polohy. Sestava tiskové platformy je zobrazena na Obr. 55).



Obr. 55) Tisková platforma

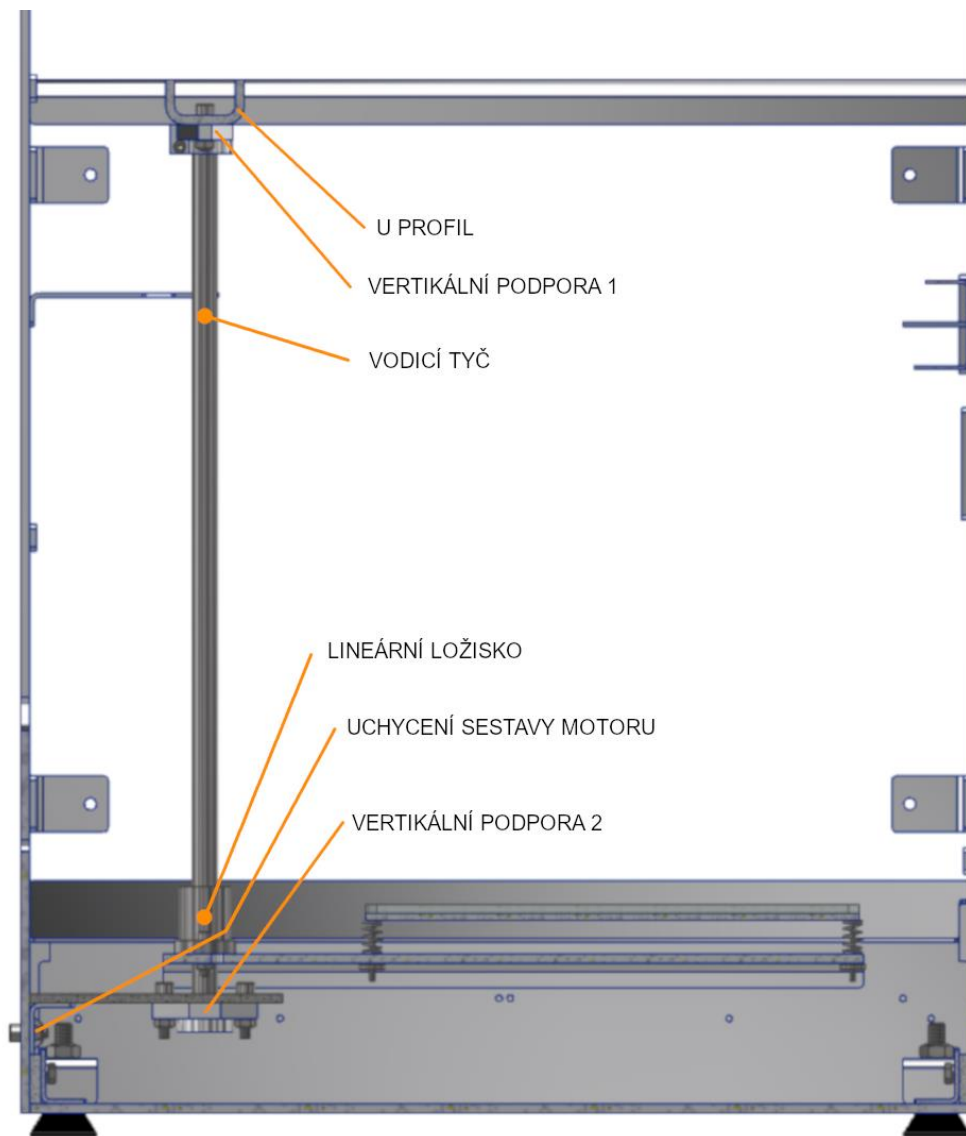
Sepnutý koncový spínač referenčním šroubem je zobrazen na Obr. 56).



Obr. 56) Sepnutí koncového spínače osy Z referenčním šroubem

### 5.2.5 Vedení osy Z

Podložka je vedena po dvou broušených vodících tyčích o průměru 12 mm a délce 404 mm. Tyče jsou oboustranně vetknuté – z jedné strany je vertikální podpora přišroubována k plechu sestavy motoru osy Z, z druhé strany je vertikální podpora přišroubována k rámu, což je zobrazeno na Obr. 57). Díky tomu je vyztužena sestava motoru osy Z, na níž je uchycený krokový motor se zabudovaným trapézovým šroubem.



Obr. 57) Vedení osy Z

Jako ložisko bylo použito lineární kuličkové ložisko nalisované v pouzdru. Veškeré komponenty vedení osy Z (ložiska, tyče, vertikální podpory) budou dodány externími dodavateli.

### 5.2.6 Výpočty osy Z

Zde jsou uvedeny výpočty využité pro návrh osy Z. Minimální posuv v ose Z určuje minimální rozlišení (výšku vrstvy) tiskárny. Ta je určena na 0,1 mm. Vztah (1) poté určuje počet kroků krokového motoru, které jsou potřebné pro posunutí o minimální výšku vrstvy. Protože se jedná o již rozdělené kroky mikrokrokováním, musí být výsledkem celočíselná hodnota.



$$(1) S_{min} = \frac{N_k \cdot s_m \cdot z_{min}}{P_h} = \frac{200 \cdot 16 \cdot 0,1}{8} = 40$$

Kde  $N_k$  je počet kroků na otáčku krokového motoru,  $s_m$  je mikrokrokování,  $z_{min}$  je minimální rozlišení vrstvy tiskárny a  $P_h$  je stoupání trapézového šroubu osy Z.

Dále je nutné zjistit, zda krokový motor disponuje dostatečným momentem pro zvednutí břemene. Maximální zátěžná síla byla určena tak, že celý tiskový prostor byl vyplněn krychlí z materiálu o nejvyšší hustotě, který bude 3D tiskárna podporovat. Z podporovaných materiálů je nejhustší PETG, jehož nejvyšší hustota je udávána jako  $1,27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  [20].

Nicméně kvůli faktu, že slicer uvažuje konstantní průměr filamentu (což v praxi neplatí), může být hmotnost takto vytisknuté krychle vyšší. Pro zohlednění nekonstantního průměru a dalších nepřesností byla hustota zvýšena na  $1,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Objem krychle je dán maximální velikostí výtisku v jednotlivých osách.

$$(2) V_t = s_x \cdot s_y \cdot s_z = 250 \cdot 200 \cdot 200 = 10 \text{ dm}^3$$

Hmotnost krychle je:

$$(3) M_{mat} = V_t \cdot \rho_{PETG} = 10 \cdot 1,35 = 13,5 \text{ kg}$$

Zátěžná síla je pak dána součtem hmotnosti krychle a hmotnosti konstrukce, s níž pohybuje trapézový šroub, vynásobeným gravitačním zrychlením.

$$(4) F_z = (M_{mat} + M_{kon}) \cdot g = (13,5 + 2,220) \cdot 9,807 = 154,161 \text{ N}$$

Pak moment pro zvednutí břemene je:

$$(5) M_{zv} = F_z \cdot \frac{d_2}{2} \left[ \frac{P_h \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \pi \cdot f \cdot d_2}{\pi \cdot d_2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - f \cdot P_h} \right] = 154,161 \cdot \frac{4}{2} \left[ \frac{8 \cdot \cos\left(\frac{30^\circ}{2}\right) + \pi \cdot 0,08 \cdot 4}{\pi \cdot d_2 \cdot \cos\left(\frac{30^\circ}{2}\right) - 0,08 \cdot 8} \right] = 0,234 \text{ Nm}$$

[21]

Kde  $d_2$  je střední průměr závitu,  $f$  je součinitel tření,  $\alpha$  je úhel profilu závitu.

I přesto, že v praxi se uvažovaný výtisk nebude tisknout z důvodu nepraktičnosti a velmi dlouhé doby tisku, použitý krokový motor se zádržným momentem 0,4 Nm je dostačující. Moment krokového motoru snižuje mikrokrokování a nastavené parametry driveru, parametry ale nebudou určeny teoreticky, ale až při ladění krokového motoru.

Následují dynamické parametry osy Z. Parametry skutečné se budou po ladění krokového motoru lišit, nyní se jedná o návrhové výpočty. Prvním parametrem je rychlost najetí osy Z z maximální polohy do referenční polohy. Z důvodu, že toto najetí bude probíhat před každým tiskem a vždy, když řídicí systém ztratí svou polohu, jedná se o důležitý parametr. Maximální rychlost osy Z -  $v_{zmax}$  - bude omezena firmwarem na  $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  a maximální zrychlení osy Z -  $a_{zmax}$  - na  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ . Aby bylo možné dosáhnout maximální rychlosti, musí být celková dráha větší nebo rovna dráze dané vztahem:

$$(6) s_{zmin} = \frac{v_{zmax}^2}{a_{zmax}} = \frac{40^2}{10} = 160 \text{ mm [22]}$$

Protože konstrukčně je celková vzdálenost 200 mm, maximální rychlost bude na této dráze dosažena. Pak doba najetí z maximální polohy do referenční je dána vztahem:

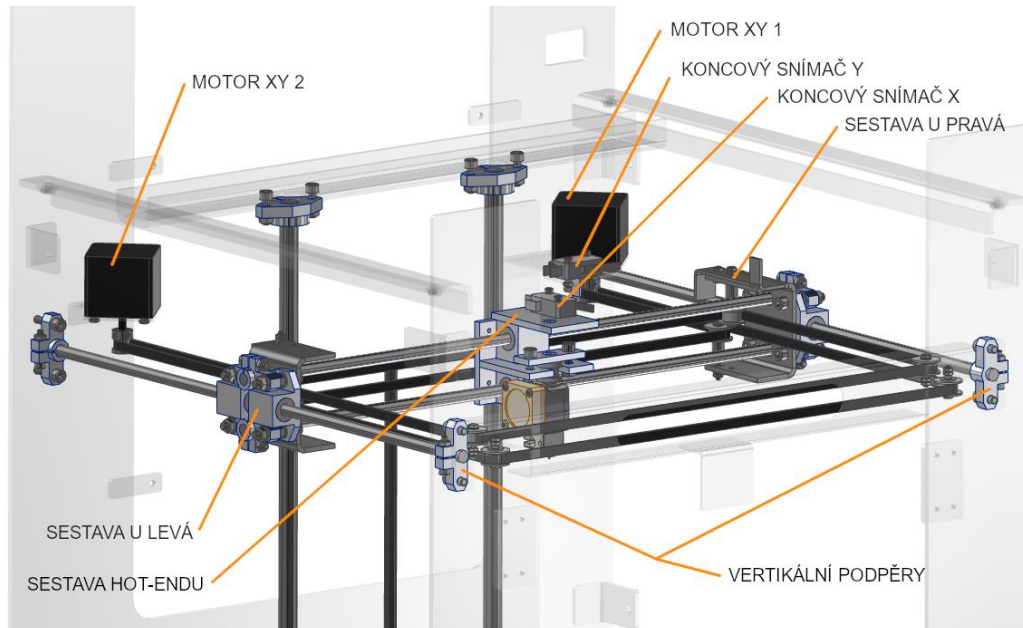
$$(7) T_z = \frac{s_z}{v_{zmax}} + \frac{v_{zmax}}{a_{zmax}} = \frac{200}{40} + \frac{40}{10} = 9 \text{ s [22]}$$

Je patrné, že osa Z je dimenzována tak, aby bylo možné tisknout i nejhmotnější možný výtisk. Doba pohybu osy Z z nulové do maximální polohy je 9 sekund. Dynamický moment je ve výpočtu zanedbán.

### 5.3 Rovina XY

Jedná se o kinematiku CORE XY. Tisková hlava je spojena s dvojicí řemenů, kdy každý řemen je poháněn vlastním motorem s momentem 0,46 Nm a rozměry NEMA 17. Byly zde použity ozubené řemeny s oblým profilem GT2 z neoprénu vyztuženým skelnými vlákny. Pohyb tiskové hlavy v rovině XY tedy vzniká kombinací otáčení krokových motorů. Maximální rychlosti a zrychlení motorů nejsou v této práci uvedeny. Tyto parametry budou určeny při realizaci tiskárny tak, aby bylo dosaženo rychlého tisku a spolehlivého chodu tiskárny. Pokud by tyto byly určeny výpočtem, mohlo by dojít buď k přetížení motoru, nebo příliš pomalému tisku.

Tyče, po nichž je veden pohyb v rovině Y, jsou přichyceny k rámu pomocí vertikálních podpěr. Po těchto tyčích se pomocí celkově čtyř lineárních ložisek pohybuje sestava skládající se z podsestav: sestava U levá, sestava U pravá a sestava hot-endu. Pohyb v rovině X je veden na dvou vodících tyčích, které jsou uchyceny mezi sestavou U levou a pravou. Všechny vodící tyče roviny XY mají průměr 8 mm. Sestavy U a sestava hot-endu budou popsány v následujících podkapitolách. Komponenty roviny XY jsou zobrazeny na Obr. 58).



Obr. 58) Komponenty roviny XY

### 5.3.1 Uchycení vertikálních podpěr k rámu

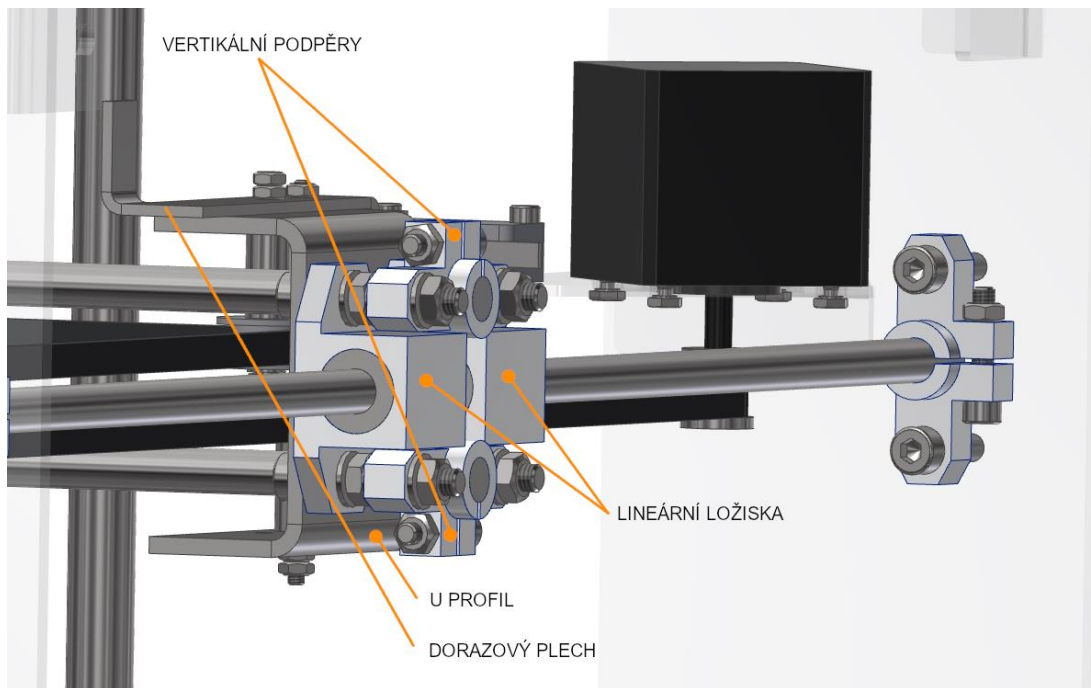
Vertikální podpěry, na nichž jsou uchyceny vodící tyče osy Y o průměru 8 mm, jsou na pohledové straně rámu přišroubovány do závitových děr pomocí šroubů s vnitřním šestihranem. Ze zadní strany jsou uchyceny šrouby maticemi. Tyto šrouby procházejí oválnými drážkami. Tím je možné upravit polohu vodících tyčí roviny Y tak, aby byly kolmé k vedení tiskové podložky. Případnou nerovnoběžnost pohybu tiskové hlavy vůči tiskové podložce lze kompenzovat kalibračními šrouby. Jedná se o standardní postup u většiny dnešních 3D tiskáren. Uchycení vertikálních podpěr je zobrazeno na Obr. 59).



Obr. 59) Uchycení vertikálních podpěr k rámu

### 5.3.2 Sestava U

Sestava U pravá a levá jsou složeny z identických dílů, přičemž k sestavě U pravé je navíc přišroubován plech s dorazovými plochami pro koncový spínač rovin X a Y. Sestava U pravá je zobrazena na Obr. 60).



Obr. 60) Sestava U pravá

K U profilům jsou přišroubovány kladky, s nimiž je v kontaktu ozubený řemen. Kladky jsou zobrazeny na Obr. 61).

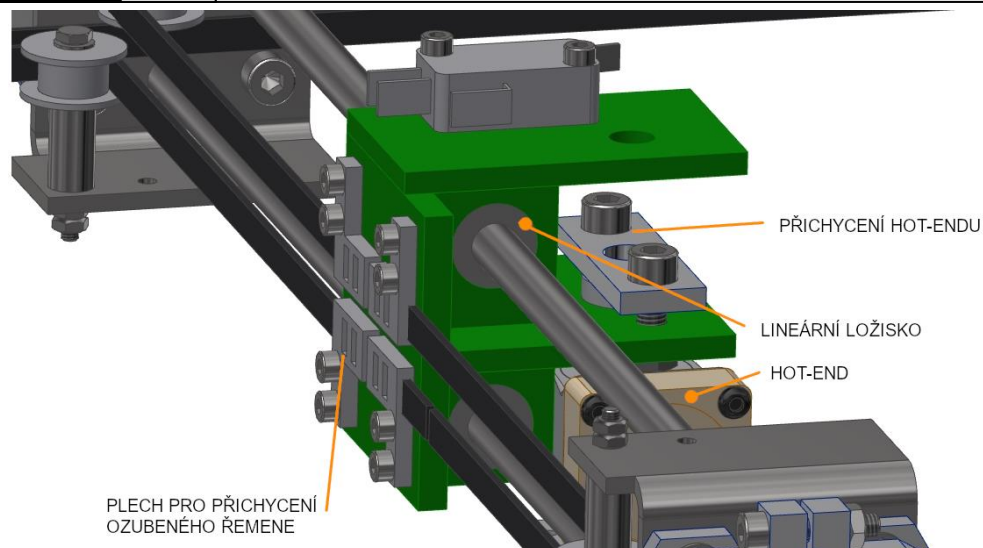


Obr. 61) Sestava U pravá – pohled na kladky

### 5.3.3 Sestava hot-endu

Na Obr. 62) je zobrazena sestava hot-endu. Základem této sestavy je svařenec, který je na obrázku zobrazen zeleně. V tomto svařenci jsou nalisována lineární ložiska. Ozubené řemeny jsou přichyceny pomocí plechů s drážkami. Tyto plechy jsou ke svařenci přišroubovány. Hot-end je přitlačen ke svařenci pomocí dvou šroubů a plechového dílu.

Použitý hot-end je E3D V6. Jedná se o oblíbený hot-end výrobce E3D, který je dodáván jak v bowdenovém provedení (použitém v této práci), tak v přímém provedení společně s extruderem E3D Titan. Tyto komponenty přímo ovlivňují škálu materiálů, které bude možné na 3D tiskárně tisknout. 3D model hot-endu byl získán ze stránek výrobce. [14]

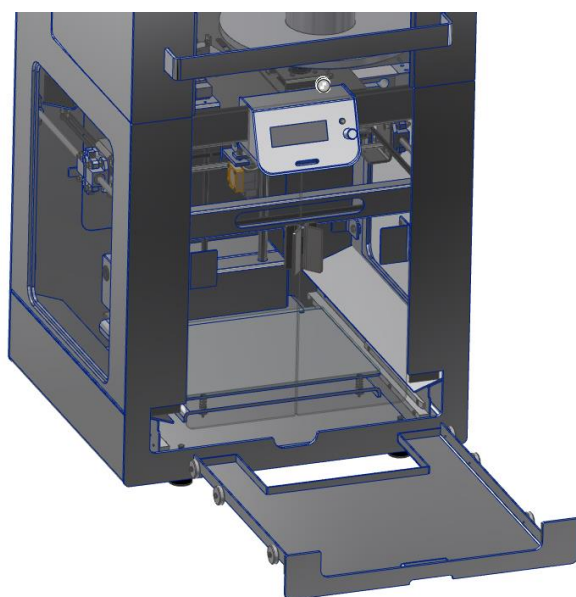


Obr. 62) Sestava hot-endu

#### 5.4 Zásuvka na úlomky filamentu

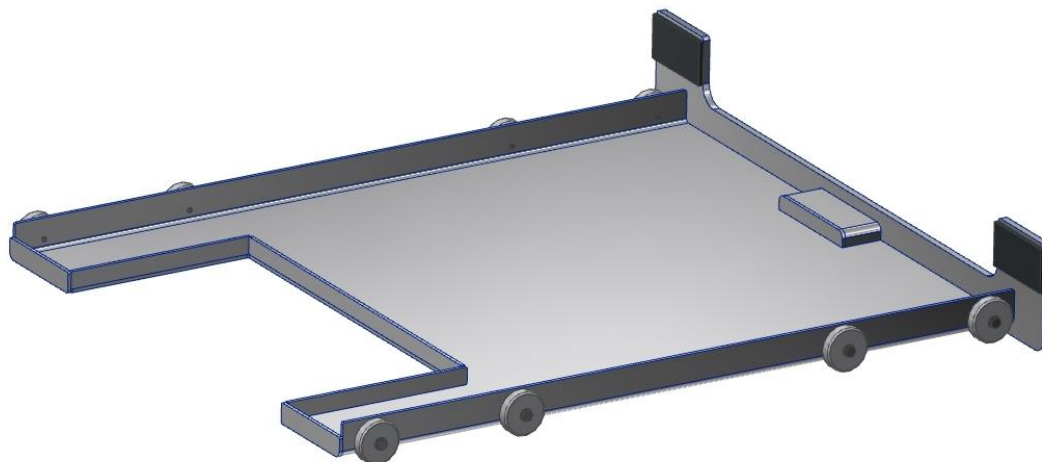
Cílem této práce je navrhnout 3D tiskárnu, jež bude uživatelsky co nejpřívětivější.

Doporučení výrobce Ultimaker, což je rozšířená značka 3D tiskáren s uzavřeným krytáním, a i dalších výrobců, je, aby uživatelé po tisku vyjmuli tiskovou podložku a poté mimo tiskový prostor tiskárny výtisk odstranili. V praxi ovšem velká část uživatelů nepostupuje dle tohoto doporučení. Uživatelé výtisk z podložky odstraňují uvnitř tiskárny například pomocí skalpelu. Je to z toho důvodu, že výtisk je po dotisknutí k tiskové podložce pevně přilnutý. Tak se v tiskovém prostoru tiskárny hromadí odřezky a úlomky filamentu a znečišťují pracovní prostor. Tím se kazí celkový dojem z 3D tiskárny, jejíž cena se podle typu pohybuje mezi 60 000 až 250 000 Kč. Pro eliminaci tohoto problému byla navržena zásuvka na úlomky filamentu. 3D tiskárna s vysunutou zásuvkou je zobrazena na Obr. 63).



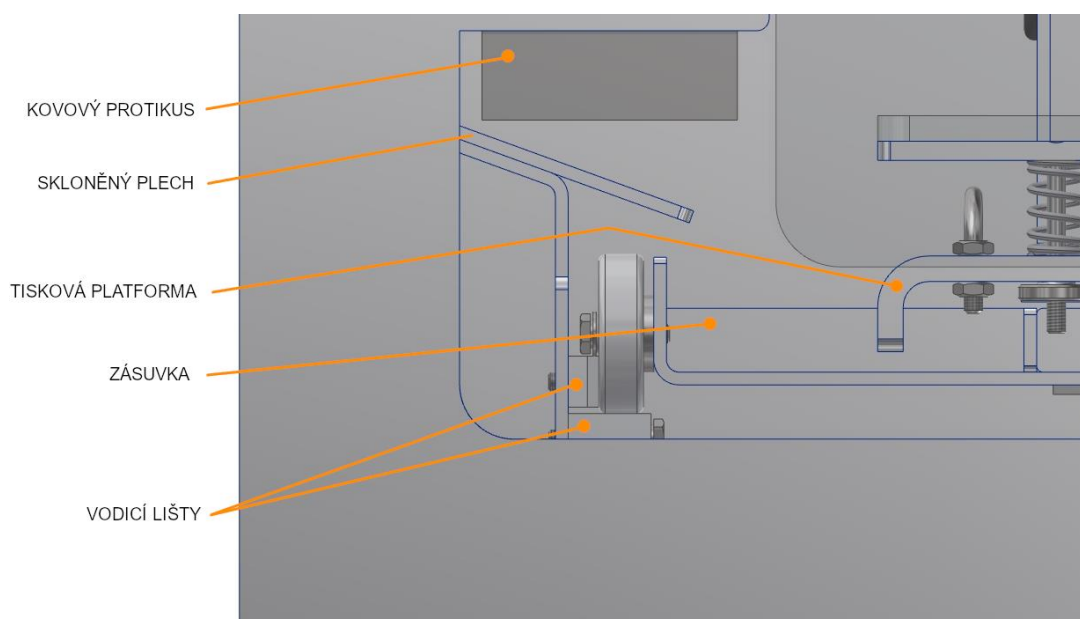
Obr. 63) Vysunutá zásuvka na úlomky filamentu

Základem je svařenec, ke kterému jsou přišroubována pojezdová kolečka s ložisky. Na zadní straně čela zásuvky je přilepena magnetická páska, která slouží k držení zásuvky v zavřené poloze. Sestava zásuvky je zobrazena na Obr. 64).



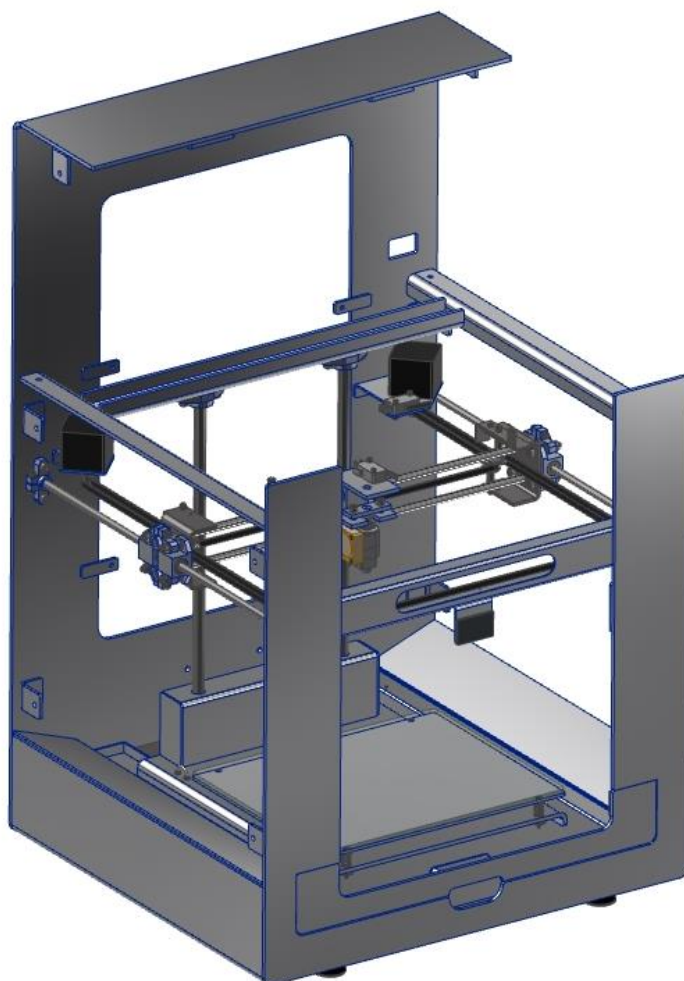
Obr. 64) Sestava zásuvky

Vnitřek tiskárny je navrhnut tak, aby úlomky a odřezky filamentu odpadávaly do zásuvky. Jsou zde skloněné plechy, které úlomky filamentu nasměrují do zásuvky v případě, kdy uživatel výtisk odnímá v tiskovém prostoru tiskárny. Vnitřní část tiskárny s vloženou zásuvkou zobrazuje Obr. 65).



Obr. 65) Vnitřek tiskárny s vloženou zásuvkou

Nyní již do sestavy zbývá přišroubovat kryty, vložit podavač materiálu a zapojit veškerá kabelová spojení. Stav sestavy zobrazuje Obr. 66).

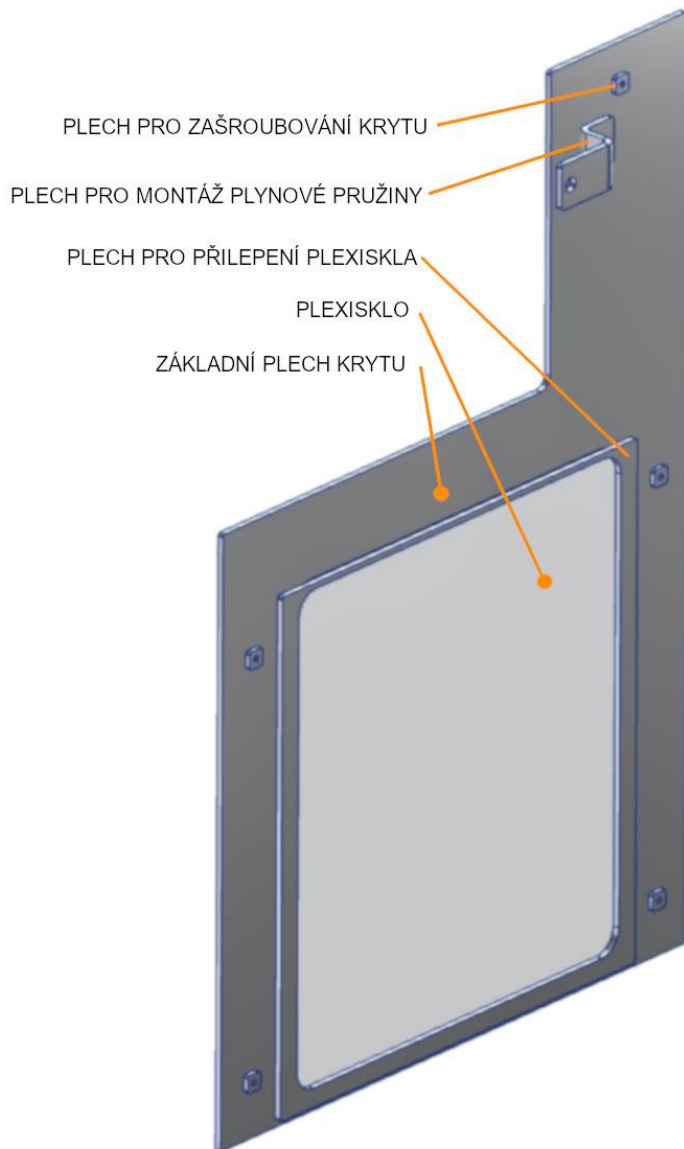


Obr. 66) Stav sestavení

## 5.5 Kryty 3D tiskárny

### 5.5.1 Boční kryty

Boční kryty jsou k 3D tiskárně přišroubovány. Kryty byly opět přišroubovány pomocí šroubového spojení do přivařeného plechu tak, aby z pohledových stran krytu nevyčnívaly žádné části spojovacích součástí. Do obou bočních krytů je vlepen čirý akrylát (dále plexisklo), sestava levého bočního krytu je zobrazena na Obr. 67).



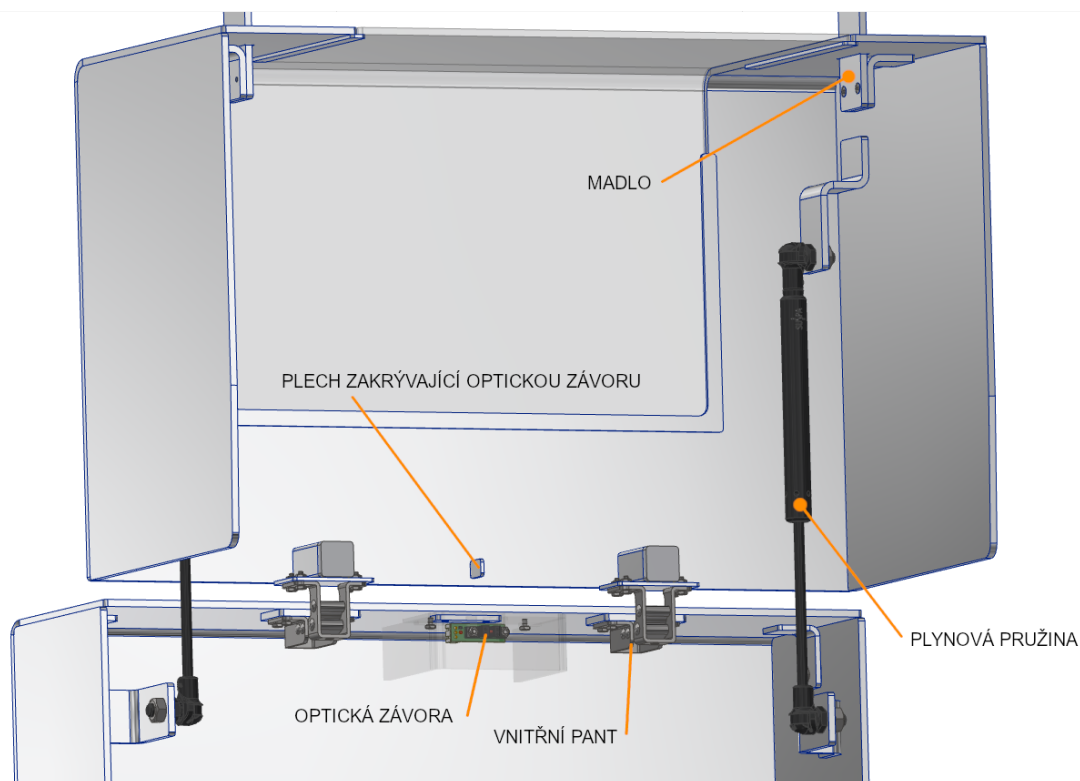
Obr. 67) Sestava levého bočního krytu

### 5.5.2 Horní kryt

Horní kryt je podstatný. Uživatel jej pravidelně bude otevírat za účelem výměny materiálu. Je tedy důležité, aby manipulace s ním byla uživatelsky příjemná. Protože celková váha horního krytu je 3,3 kg, je otevírání krytu ulehčeno pomocí dvou plynových pružin. Plynové pružiny se běžně využívají například pro otevírání zavazadlového prostoru osobních automobilů. Kromě snížení síly nutné pro otevření krytu plynové pružiny kryt drží v horní otevřené poloze



a naopak dovedou jej do zavřené polohy. Horní víko v poloze otevřeno je zobrazeno na Obr. 68)



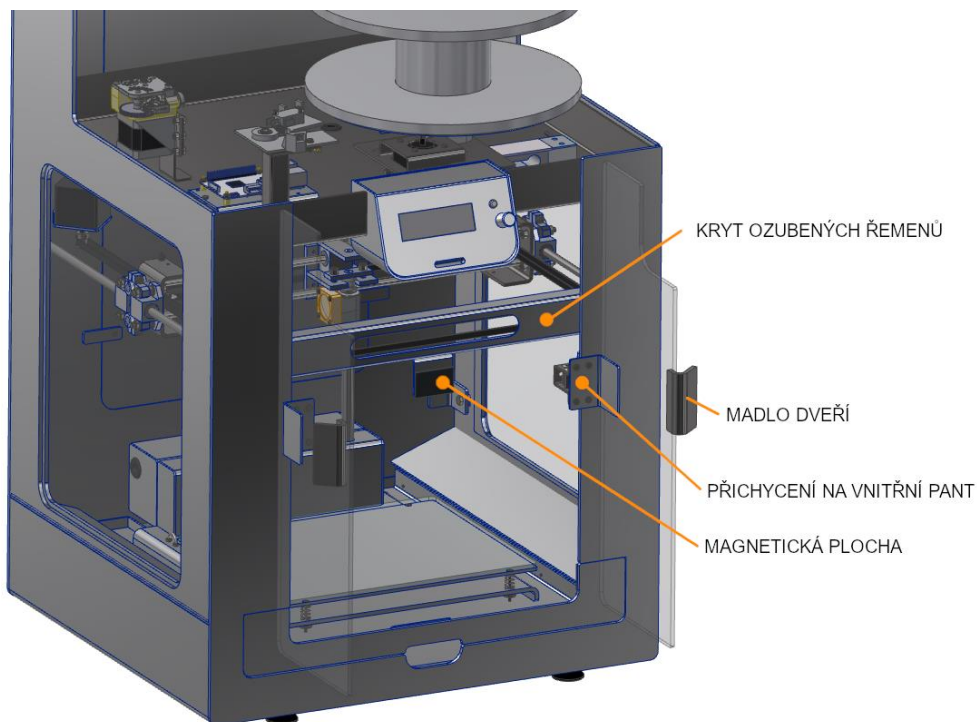
Obr. 68) Horní víko otevřeno

Plynové pružiny byly vybrány ve spolupráci s dodavatelem, firmou Marek Industrial, a.s. Katalog použitých plynových pružin je uveden v příloze.

### 5.5.3 Přední dveře

Přední dveře jsou nejčastěji otevíraná část krytu. Tyto se musí otevřít vždy, když uživatel potřebuje provést manipulaci v tiskovém prostoru – tedy minimálně v případě odejmutí výtisku po konci tisku.

Přední dveře nedisponují snímačem otevření – je to z toho důvodu, že se nejedná o 3D tiskárnu s vyhřívanou tiskovou komorou. Otevření předních dveří by tedy nemělo zásadně ovlivnit kvalitu tisku a není nutné kvůli tomuto tisk zastavovat. Uživatel nicméně bude varován formou výstražných symbolů, že jak podložka, tak hot-end mohou mít vysokou teplotu, podobně, jak je tomu u ostatních 3D tiskáren. Přední dveře jsou zobrazeny na Obr. 69).



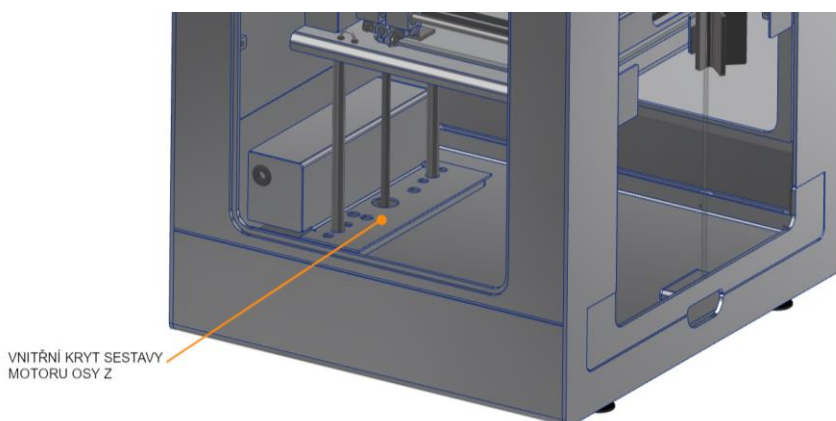
Obr. 69) Přední dveře 3D tiskárny

Dveře jsou drženy v poloze zavřeno magneticky. Madla dveří jsou vyrobena z feromagnetického materiálu S235JR a jsou přilepena k plexisklu dveří. Magnetická síla tedy vzniká mezi madlem dveří a magnetickou plochou, přičemž mezi těmito součástmi se nachází plexisklo.

Aby při manipulaci uvnitř tiskového prostoru nemohlo dojít k nechtěnému kontaktu uživatele s ozubenými řemeny, jsou ozubené řemeny zakryty U krytem. V krytu je vyřezána oválná drážka z toho důvodu, aby uživatel mohl snadno zkontrolovat napětí ozubených řemenů.

#### 5.5.4 Vnitřní kryt motoru osy Z

Vnitřní kryt motoru osy Z má dvě funkce. Slouží k vizuálnímu zakrytí vnitřních prostor tiskárny a dále snižuje možnost zapadnutí úlomku filamentu. Průchodkou vnitřního krytu motoru osy Z jsou vedena kabelová spojení sestavy motoru osy Z. Vnitřní kryt motoru osy Z je přišroubován k zadnímu plechu rámu tiskárny a je zobrazen na Obr. 70).



Obr. 70) Vnitřní kryt motoru osy Z

### 5.5.5 Zadní servisní kryt 3D tiskárny

Servisní kryt je k rámu tiskárny přichycen pomocí čtyř šroubů. Jak název napovídá, slouží k servisním účelům – například pokud bude nutné zvýšit napětí ozubených řemenů vlivem jejich opotřebování. Jelikož se zde neočekává častý přístup uživatele, jsou pro přichycení použity šrouby s vnitřním šestihranem. To je vhodné i z toho důvodu, bude-li tiskárna využívána v dílnách volně přístupným veřejnosti – kryt je možno vyjmout pouze pomocí nástroje. Zadní servisní kryt 3D tiskárny je zobrazen na Obr. 71).



Obr. 71) Zadní servisní kryt 3D tiskárny

# 6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VHODNOSTI TISKÁRNY

V této kapitole je popsáno experimentální ověření vhodnosti navrženého konstrukčního řešení podavače materiálu. Experimentální ověření se dělí na tři části – na popis principu stanovení zbývajícího materiálu, na přesnost určení množství zbývajícího materiálu a na popis optimalizace podavače materiálu tak, aby mohl být tiskárnou využit pro proces optimalizace tisku.

## 6.1 Programování ve vývojovém prostředí Arduino IDE

Programování ve vývojovém prostředí Arduino IDE, pomocí něhož byly napsány a kompilovány veškeré zdrojové kódy uvedené v této práci, je založeno na jazyku C++. To znamená, že většina příkazů bude s jazykem C++ kompatibilní. [23]

Případná náhrada použité řídicí desky tedy bude snadná, jelikož na trhu existuje velké množství řídicích desek kompatibilních s C++, které jsou vhodné pro navrhovanou 3D tiskárnu. Dále pro účely experimentálního ověření byly použity veřejně dostupné knihovny. Nicméně některé knihovny (především knihovna pro řízení krokového motoru) nebude nutné použít pro zdrojový kód finální tiskárny. Funkci totiž bude umožňovat samotný použitý firmware tiskárny.

### 6.1.1 Základní struktura zdrojového kódu

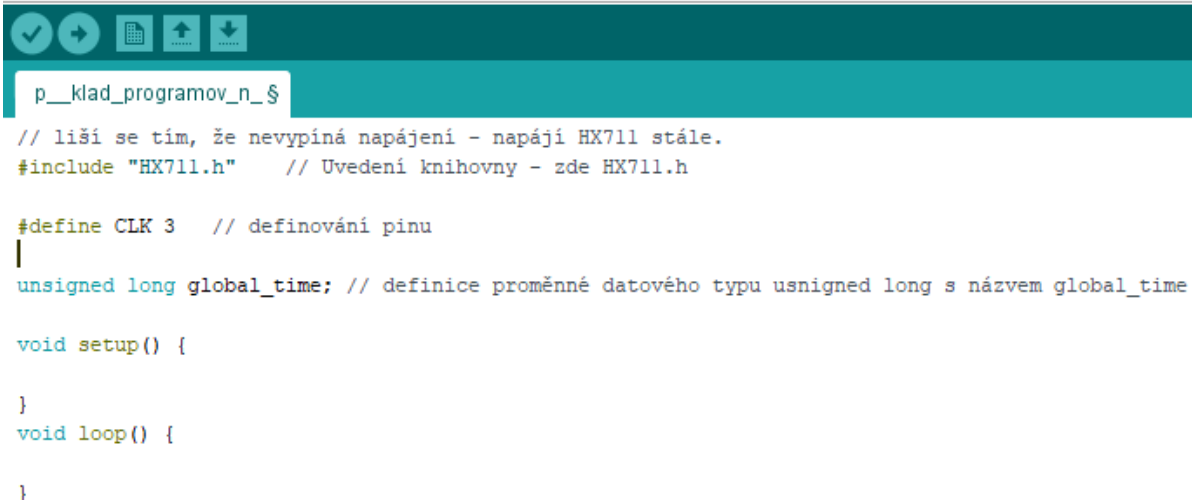
Na Obr. 72) je zdrojový kód, v němž je uvedena základní struktura. Pokud jsou kdekoliv na řádku uvedeny znaky “//“ – tak vše, co je za těmito znaky na daném řádku, se při kompilování nepřevádí na strojový kód. Tyto znaky se používají na poznámky, které zvyšují čitelnost zdrojového kódu.

Příkaz “ #include "HX711.h" “ do zdrojového kódu přidá knihovnu HX711.h. Aby mohla být knihovna použita, musí být ve složce knihoven programu Arduino IDE uvedena. Výchozí cesta k této složce je C:\Users\\*jmenouzivatele\Documents\Arduino\libraries.

Příkaz “ #define CLK 3“ slouží v tomto případě pro definici pinu CLK. Kdekoliv, kde bude ve zdrojovém kódu uvedeno “CLK“, tak při kompilaci dojde k nahrazení na hodnotu 3.

Příkaz “ unsigned long global\_time“ definuje proměnnou datového typu unsigned long a názvu global\_time.

Poté následují speciální příkazy, které musí být uvedeny v každém zdrojovém kódu vývojového prostředí Arduino IDE. Vše, co je uvedeno mezi složenými závorkami příkazu “void setup()“, se vykoná po startu desky arduino – tedy při nahrání, po resetu nebo po opětovném spuštění po ztrátě napětí. Vše, co je uvedeno mezi složenými závorkami příkazu “void loop()“, se cyklicky opakuje.



```

p_klad_programov_n_š
// liší se tím, že nevypíná napájení - napájí HX711 stále.
#include "HX711.h" // Uvedení knihovny - zde HX711.h

#define CLK 3 // definování pinu
|
unsigned long global_time; // definice proměnné datového typu unsigned long s názvem global_time

void setup() {

}

void loop() {

}
  
```

Obr. 72) Základní struktura zdrojového kódu

### 6.1.2 Často užívané funkce

Funkce “delay()“ – v závorkách je uvedena hodnota v milisekundách, na kterou se má pozastavit běh programu.

Funkce “millis()“ – příkazem “global\_time = millis()“ se do proměnné global\_time ukládá doba běhu programu v milisekundách.

### 6.1.3 Pravidla pro zdrojové kódy

Všechny zdrojové kódy uvedené v této práci jsou napsány tak, aby je bylo možné snadno použít pro zdrojový kód řídicí celou tiskárnu. Z toho plynou následující pravidla, kterými se tyto zdrojové kódy řídí.

- Namísto funkce delay() používat funkci millis(), která místo zastavení programu po určitý čas vrací dobu běhu programu. Funkci delay je možno použít pouze ve void setup(). To, jakým způsobem lze nahradit funkci delay() funkcí millis(), ukazuje Obr. 73). Pokud je hodnota výrazu “global\_time – previous\_global\_time“ větší než “interval\_vahy“, pak dojde k vykonání příkazů v následujících složených závorkách.

```

void loop() {
global_time = millis();

    if (global_time - previous_global_time >= interval_vahy) {

        previous_global_time = global_time;

    }

}
  
```

Obr. 73) Nahrazení funkce delay()

- Použité knihovny jsou tzv. non-blocking, což znamená, že při vykonávání příkazů knihovny zavolané v části void loop() je vždy aktivní hlavní smyčka v této části. Neboli vykonání příkazů knihovny je dostatečně rychlé na to, aby příliš nezpomalilo rychlost, kterou se vykoná jedna celá smyčka void loop().

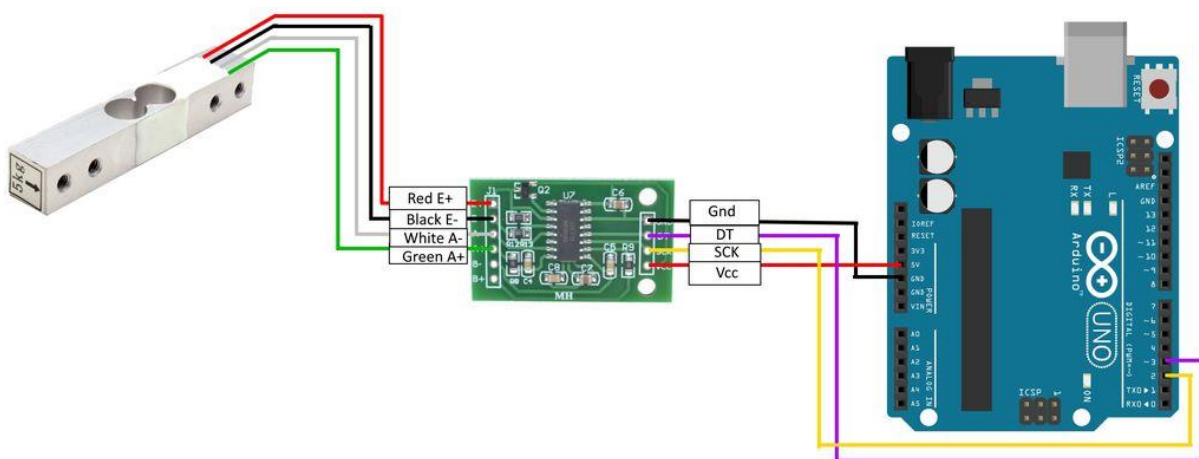
## 6.2 Určení zbývajícího materiálu

Největším problémem při experimentálním ověření byla přesnost určení zbývajícího materiálu. Slicer pracuje s konstantním průměrem filamentu (pro zde navrženou tiskárnu byly vybrány filameny s průměrem 2,85 mm), v praxi se ale průměr filamentu pohybuje v určitém intervalu, který je závislý na přesnosti výroby. Množství filamentu, jenž je potřebný pro tisk daného výtisku, je v g-kódu definované délkou. Hustota filamentu se ale různí, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1 – hustota materiálu PLA se u výrobcem nabízeného materiálu pohybuje mezi 1,24 až 1,32 g/cm<sup>3</sup>. Hustotu ovlivňuje přesné složení filamentu – při výrobě se do filamentu přimíchávají různá aditiva zajišťující požadované vlastnosti nebo barvu materiálu. Hustota materiálu se tedy pro stejný druh materiálu (např. PLA) od stejného výrobce mezi sebou liší v závislosti na použitých aditivech. Dále hustota dvou stejných typů materiálu od stejného výrobce se stejnými aditivy se liší – to je dáno přesností výroby.

Z výše uvedeného vyplývá, že aby byl uživatel včas a spolehlivě informován, že při tisku může dojít k vypotřebování veškerého materiálu, musí být použitý systém odhadu zbývajícího množství materiálu co nejpřesnější. Toto posouzení je založeno na principu měření celkové hmotnosti cívky, která je do podavače vložena.

### 6.2.1 Přesnost měření hmotnosti

Schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 74), přičemž namísto vývojové desky Arduino Uno byl použit klon desky Arduino Mega 2560, jako převodník byl využit HX711 modul od dodavatele GM Electronic, a běžný tenzometrický snímač o maximální nosnosti 5 kg.



Obr. 74) Prvotní schéma zapojení [24]

Zdrojový kód, pomocí něhož byly získány hodnoty měření, je uveden jako součást externích příloh ve složce Zdrojové kódy pod názvem „Load\_Cell\_dlouhodobě.ino“. Pro jeho případné převedení na strojový kód a nahrání na desku Arduino MEGA a pro jejich klony jsou zapotřebí knihovny Arduino-LiquidCrystal-I2C-library-master a HX711-master, které

jsou uloženy v podsložce Použité knihovny. Dále je doporučeno použít software Arduino IDE. Jako základ zdrojového kódu byl použit návod na programování digitální váhy uvedený v seznamu citované literatury jako [25], který byl pro potřeby experimentu modifikován.

Přes sériový port desky Arduino probíhá odesílání naměřených dat do PC propojením pomocí kabelu USB 2.0 A – USB 2.0 B. Tato data poté byla průběžně během měření ukládána do textového souboru na PC pomocí software CoolTerm.

Ke schématu na Obr. 74) byl ještě navíc připojen displej 20x4 (tedy 20 znaků o 4 řádcích) komunikující přes sběrnici I2C. Připojení logických pinů na desce Arduino Mega je provedeno pomocí korespondujících pinů SDA a SCL, které jsou na desce vyznačeny. Displej nicméně není nutný, během experimentu sloužil pouze pro vizuální kontrolu průběhu měření.

### 6.2.2 Popis zdrojového kódu měření hmotnosti

V části void setup() dojde k vynulování váhy a vypsání nápisů displeje. Díky tomu, že displej s napájenou sběrnicí I2C má svou vlastní paměť, budou se tyto vypsání hodnoty zobrazovat při běhu v části void loop(), pokud nedojde v této části k jejich přepsání. Při vypisování nápisů v části při každém běhu void loop() by docházelo k blikání displeje a zbytečnému využívání výkonu procesoru. Vizualizace displeje je na Obr. 75).



Obr. 75) Vizualizace displeje v části void setup() [44]

V části void loop() poté probíhá samotné měření a vypisování hodnot hmotnosti a času na displej přes sériový port. Tato hlavní část je uvedena na Obr. 76). Celá část měření a vypsání hodnot je možná díky využití proměnné global\_time, do níž je pomocí funkce millis() ukládána doba běhu programu; je spouštěna jednou za hodnotu proměnné “interval\_vazeni“. V příloženém programu je hodnota proměnné “interval\_vazeni“ vždy 1000 milisekund.

Příkaz “current\_weight = ((scale.get\_units(3)\*1000))“ uloží do proměnné current\_weight aktuální hmotnost získanou zprůměrováním tří hodnot měření. Následují příkazy pro vykreslení displeje (začínající předponou lcd.) a příkazy pro vypsání dat přes sériovou linku (začínající předponou Serial).

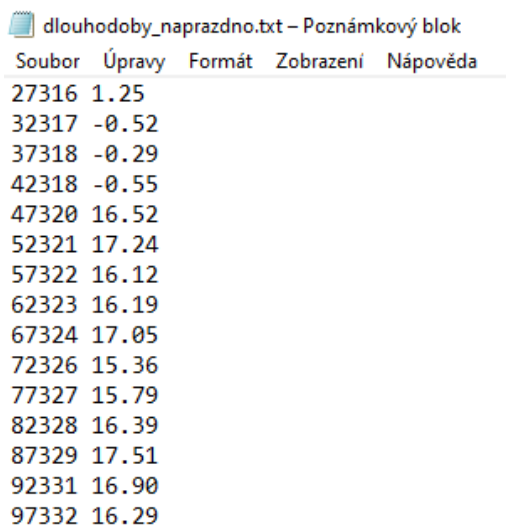
```

if (global_time - previous_global_time_2 >= interval_vazeni) {
  previous_global_time_2 = global_time;
  current_weight = ((scale.get_units(3)*1000));
  lcd.setCursor(12,0);
  lcd.print(global_time);
  lcd.setCursor(12,1);
  lcd.print(current_weight);
  Serial.print(global_time);
  Serial.print(" ");
  Serial.println(current_weight);
  last_weight = current_weight;
}
}

```

Obr. 76) Měření hmotnosti a vypisování hodnot

Vypisování na sériovou linku pomocí příkazů “Serial.print“ a “Serial.println“ je definováno tak, aby po zaznamenání výstupu sériové linky pomocí programu CoolTerm vznikl formát vhodný pro import dat do tabulkového editoru. Výstup sériové linky z měření uložený v textovém souboru je zobrazen na Obr. 77).



Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápověda
27316	1.25			
32317	-0.52			
37318	-0.29			
42318	-0.55			
47320	16.52			
52321	17.24			
57322	16.12			
62323	16.19			
67324	17.05			
72326	15.36			
77327	15.79			
82328	16.39			
87329	17.51			
92331	16.90			
97332	16.29			

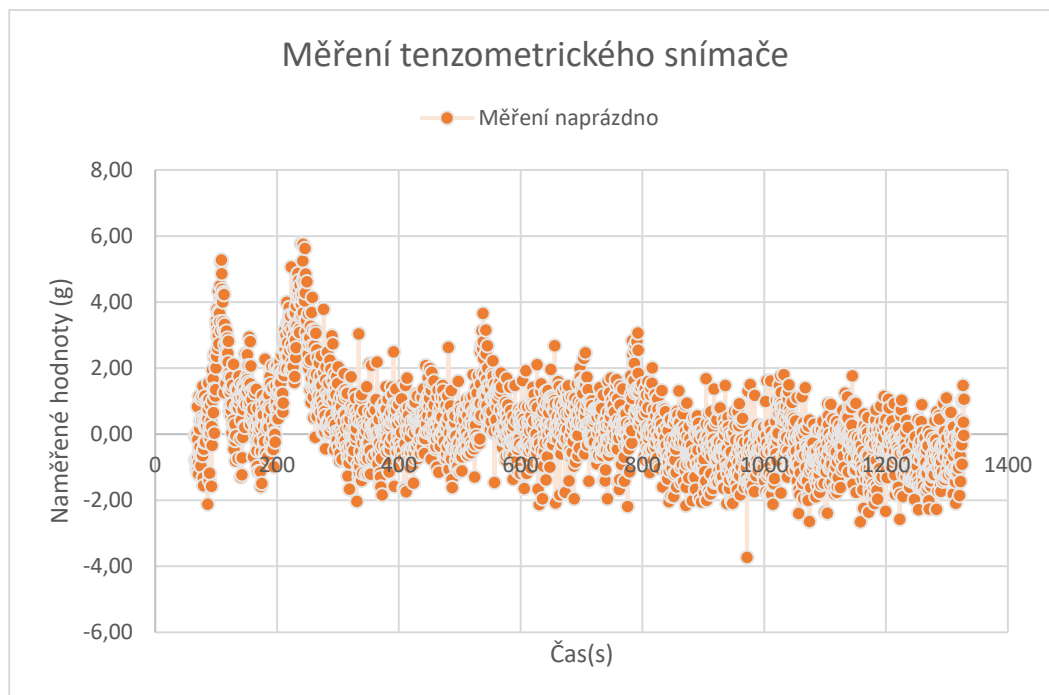
Obr. 77) Textový soubor dat měření

Upravená data ze všech měření jsou poté uložena v externích přílohách v souboru „Presnost\_vazeni.xlsx“.



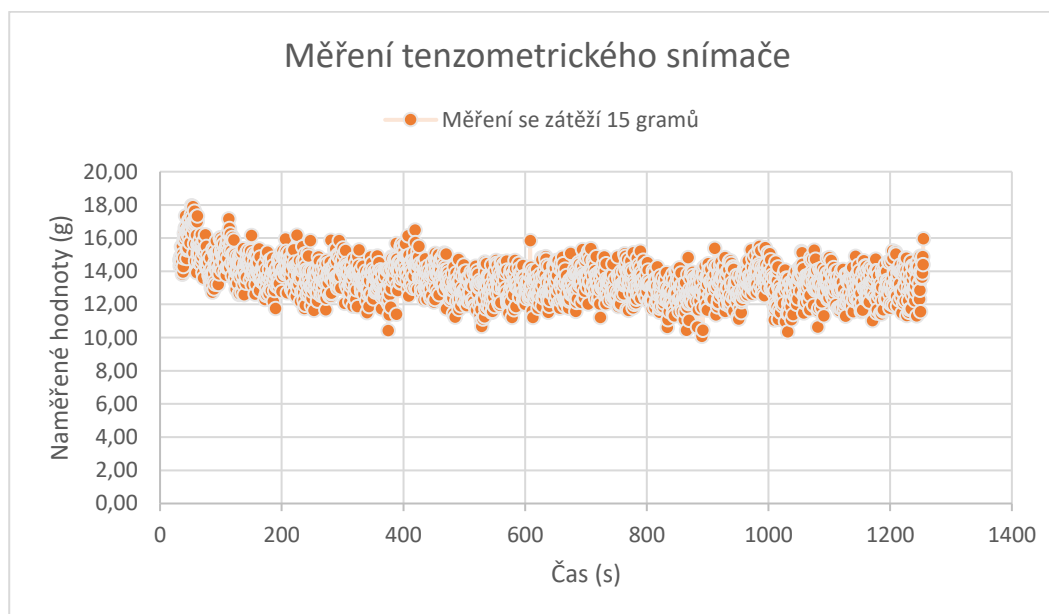
### 6.2.3 Výsledky měření hmotnosti

Nejprve bylo využito základního zapojení, stejně jako na Obr. 74) v kapitole 6.2.1. Zátěž byla 0 gramů, doba měření 1335 sekund. Výsledky znázorňuje Obr. 78).



Obr. 78) Prvotní výsledky měření

Následovalo měření se zátěží 15 gramů na 1222 sekund. To je zobrazeno na Obr. 79).

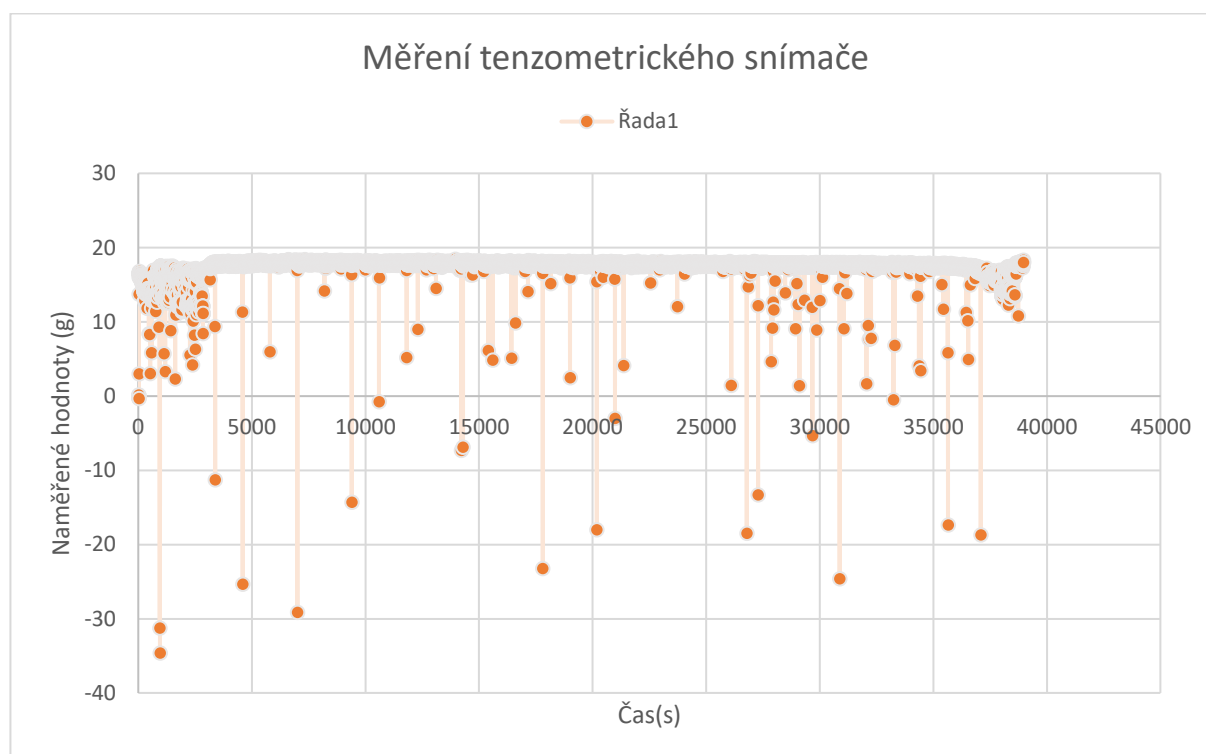


Obr. 79) Měření se zátěží 15 gramů

Výsledky měření byly neuspokojivé. Proto bylo odzkoušeno využití kroucené dvoulinky pro všechny vodiče, které vedou signál (tedy propojení tenzometrického snímače a převodníku a propojení převodníku a desky Arduino Mega). Výsledky ale byly i nadále neuspokojivé, nicméně zde bylo patrné částečné zlepšení.

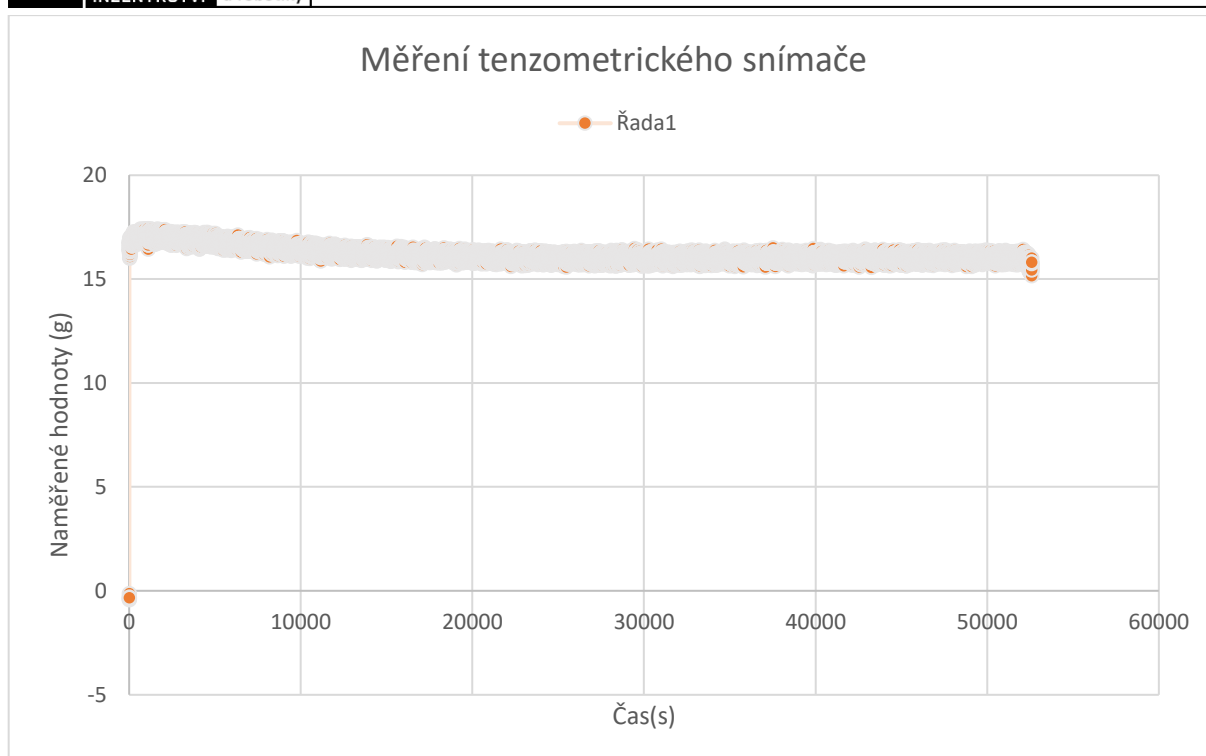
Problém mohl nastat v kvalitě snímače, kvalitě zapojení nebo kvalitě použitého převodníku. Změna převodníku prokázala, že problém zde není. Změnou snímače za podobný typ snímače bylo ověřeno, že nejde o výrobní vadu tenzometrického snímače. Proto se vycházelo z myšlenky, že použitý tenzometrický snímač je málo kvalitní a že pro rozsah měření hmotnosti 20 kg je nutné použít kvalitnější tenzometrický snímač.

Z těchto důvodů byl vybrán tenzometrický snímač L6D 20 kg od výrobce Zemnic, který byl autorovi laskavě zapůjčen e-shopem [www.tenzometricke-snimace.cz](http://www.tenzometricke-snimace.cz). Po prvotních výsledcích bylo pracováno s hypotézou, že snímač je v průběhu času zahříván napájením. Proto bylo do obvodu přidáno relé, které každých 5 sekund vypínalo napájení tenzometrického snímače. Interval vážení činil pro každých 5 sekund, v nichž je snímač napájen, jednu sekundu. Měřená zátěž byla 15 gramů. Výsledky zobrazuje Obr. 80).



Obr. 80) Měření 15 gramů s cyklickým vypínáním napětí

Výsledky vyvrátily, že by nepřesnosti měření byly způsobeny zahříváním snímače vlivem napájecího napětí. Dále všechny hodnoty, jež měly velkou odchylku od skutečné zátěže, byly první hodnoty po startu napájení. Takovéto hodnoty by bylo možno ignorovat, ale stále by přesnost měření nebyla dostatečná. Proto bylo z obvodu vyjmuto relé a veškeré komponenty byly zapojeny znovu, přičemž pro propojení tenzometrického snímače s převodníkem HX711 byl využit stíněný kabel. Výsledky zobrazuje Obr. 81). Celková doba měření byla 14,6 hodiny a zátěž byla opět statická – 15 gramů.



Obr. 81) Finální výsledky měření 15 g

Po využití stíněného kabelu snímače L6D bylo dosaženo uspokojivých výsledků. Konečná odchylka měření je  $\pm 2$  gramy. Jako dominantní se tedy projevila kvalita kabelového spojení a kvalita použitého snímače. Pro spojení kabelů přenášejících informace z tenzometrického snímače není doporučeno v 3D tiskárně používat nepájivé kontaktní pole kabelů typu dupont, jenž jsou běžné v projektech Arduino nebo u 3D tiskáren. Je zde ale doporučeno využívat svorkovnice s přichycením kabelů pomocí šroubů. Dalším možným vlivem je stejnosměrný drift, pro jehož eliminaci by mohl být použit kvalitnější převodník, ideálně přímo navržený pro aplikaci na 3D tiskárně.

#### 6.2.4 Určení množství materiálu potřebného pro tisk

Množství materiálu potřebné pro tisk bude porovnáno se skutečným množstvím filamentu navinutým na cívce. Množství potřebné pro tisk lze přímo určit z g-kódu. Část g-kódu pro model pištálky je uvedena na Obr. 82), kdy hodnoty určující délku filamentu jsou podtrženy.

```

M107
M115 U3.1.1-RC4 ; tell printer latest fi
M83 ; extruder relative mode
M104 S215 ; set extruder temp
M140 S60 ; set bed temp
M190 S60 ; wait for bed temp
M109 S215 ; wait for extruder temp
G28 W ; home all without mesh bed level
G80 ; mesh bed leveling
G1 Y-3.0 F1000.0 ; go outside print area
G92 E0.0
G1 X60.0 E9.0 F1000.0 ; intro line
G1 X100.0 E12.5 F1000.0 ; intro line

```

Obr. 82) Část g-kódu pro tisk píšťalky na 3D tiskárně Prusa i3 mk3/S [26]

Hodnota E9.0 znamená, že osa E – tedy osa extruderu – se musí pootočit tak, aby došlo k extrudování 9 jednotek. Tato hodnota tedy přímo určuje délku. Hodnota E-1.0 znamená, že má dojít k retrakci filamentu (tedy k vsunutí filamentu zpět do trysky) o jednu jednotku.

Na základě známého přepočtu použitého pro daný g-kód lze zjistit sečtením s ohledem na znaménko, jaká je celková délka filamentu nutná pro tisk daného g-kódu.

### 6.2.5 Určení zbývajícího materiálu na cívce

Uživatel při vložení cívky do tiskárny definuje její hustotu a hmotnost prázdné cívky a dále typ materiálu (např. ABS). Díky těmto hodnotám bude určena délka filamentu zbývající na dané cívce, která bude porovnána s délkou pro daný tisk určenou g-kódem.

Kvůli tomu, že přesnost měření snímače je +/- 2 gramy, k čemuž je ještě nutné připočítat přesnost určení hustoty, bude displej tiskárny upozorňovat uživatele v předstihu zprávou: „Na cívce je nedostatek materiálu. Hrozí pozastavení tisku.“, přičemž ale nemusí skutečně dojít k vypotřebování materiálu během tisku. Pokud bude koncový spínač (zobrazený na Obr. 38 na straně 55) rozepnut, tiskárna tisk pozastaví.

Přepočet probíhá ve zdrojovém kódu dle vztahu (8):

$$(8) l = 4 \cdot \frac{m}{\rho \cdot \pi \cdot d^2}$$

Kde  $l$  je délka zbývajícího materiálu na cívce,  $m$  je hmotnost materiálu včetně uvažované přesnosti měření daná vztahem (9),  $\rho$  je hustota materiálu zadaná uživatelem a  $d$  je průměr filamentu (2,85 mm).

$$(9) m = m_{\text{souč}} - m_{\text{cívky}} - m_{\text{kompence}} - m_{\text{přesnost vážení}}$$

Kde  $m_{\text{souč}}$  je současná hmotnost na vážicím senzoru po vynulování snímače;  $m_{\text{cívky}}$  je hmotnost prázdné cívky zadaná uživatelem;  $m_{\text{kompence}}$  je hmotnost kompenzace tak, aby snímač začínal od nulové hodnoty – tato proměnná tedy reprezentuje nulování snímače;  $m_{\text{přesnost vážení}}$  je odchylka snímače – tedy 2 gramy.

Pro stanovení, jakým způsobem se má při výpočtu přepočítávat nepřesnost určení hustoty, nebyl proveden dostatek experimentů s různými materiály od různých výrobců. Z tohoto důvodu zdrojový kód přesnost určení hustoty nezohledňuje.

Uvažované řešení v tiskárně, jež se vyvine z tiskárny uvedené v této práci, by mohlo například zohledňovat typ tiskového materiálu a při zadání hustoty by vyžadovalo, aby hustota ležela v daném intervalu specifickém pro daný typ materiálu. Pak by se k přesnosti určení hmotnosti přidala kompenzační přesnost pro daný typ materiálu vzniklá vynásobením uživatelem zadanou hodnotou hustoty konstantou specifickou pro daný typ materiálu. Přepoččet pro zohlednění hustoty je uveden ve vztahu (10) a nahradil by pak vztah (9).

$$(10) m = m_{\text{souč}} - m_{\text{cívky}} - m_{\text{kompenzace}} - m_{\text{přesnost vážení}} - \rho \cdot C$$

Kde  $C$  je konstanta specifická pro daný typ materiálu.

Zdrojový kód, který reprezentuje všechny funkce podavače materiálu v 3D tiskárně, je uveden v externích přílohách pod názvem „Weight\_add\_on.ino“ ve složce Zdrojové kódy. Princip funkce zdrojového kódu je popsán v následující kapitole.

## 6.3 Podavač materiálu

### 6.3.1 Módy podavače materiálu

Tím, že podavač materiálu bude integrován do 3D tiskárny, bude možno využít informací tiskárny. Mezi takovéto informace patří: režim tiskárny a informace o otáčení motoru extruderu.

Režimy tiskárny, které ovlivňují podavač materiálu, jsou následující:

#### Režim tisku

V tomto režimu je aktivní odvíjení cívky. Během celého režimu musí být zavřen horní kryt tiskárny. Pokud je kryt otevřen, bude tisk automaticky pozastaven – to je z důvodu vysoké spolehlivosti odvíjení – uživatel by neměl mít důvod do horní části jakkoliv zasahovat během tisku. Z důvodu proveditelnosti experimentu ale funkce monitorování uzavření horního krytu není ve zdrojovém kódu naprogramována.

Dále je aktivní odvíjení extruderu a podavač má informaci o tom, otáčí-li se krokový motor extruderu (u 3D tiskáren dochází k řízení krokových motorů způsobem, že v čase jsou generovány pulsy pro driver motoru, které následně pohání krokový motor. Pokud je motor přetížen, odvíjení se zastaví a pokud tiskárna nevyužívá dokonalejší drivery, nemá o tomto zastavení žádnou informaci – pokračuje, jako by došlo k požadovanému otočení).

Vážicí senzor je v tomto režimu využit pro zjištění, nehrozí-li přetržení filamentu. Pokud by přetržení hrozilo, je automaticky přepnut mód podavače (a tím by došlo i k přepnutí módu uvažované tiskárny) do režimu pauzy tisku.

#### Režim naložení filamentu

Oproti režimu tisku se tento režim liší pouze tím, že extruder se otáčí do doby, než je zastaven uživatelem potvrzením naložení filamentu. Ve zdrojovém kódu je toto simulováno tím, že při změně na režim naložení filamentu je automaticky zapnuto odvíjení extruderu.

## Režim vyložení filamentu

Oproti režimu naložení filamentu zde dochází k tomu, že extruder má opačný smysl otáčení. Otáčení se na tiskárně zastaví potvrzením uživatele. A odvíjení cívky v tomto režimu je vypnuto. Bylo zkoušeno pomocí motoru pohánějícího odvíjení cívky navinout filament zpět na cívku (reverzací logiky – motor odvíjení je spuštěn v opačném smyslu, pokud je optická závora zakryta. Vypne se odkrytím závory). Nicméně motor odvíjení nemá pro toto dostatečný moment – při experimentu docházelo k jeho přetížení a vynechání kroku/kroků.

## Režim manipulace uživatele

V tomto režimu je neaktivní otáčení extruderu i odvíjení cívky. Tiskárna nevyžaduje uzavření horního krytu. Uživatel nejprve vynuluje vážící systém, vloží cívku do tiskárny včetně zavedení filamentu, poté potvrdí, že cívka byla úspěšně vložena. Následně určí hodnoty cívky, kterou vložil – zdrojový kód pro experiment počítá se stejnou cívku, jejíž hodnoty jsou určeny ve zdrojovém kódu.

## Režim spánku

Z toho důvodu, že v budoucnu se počítá s propojením tiskárny s PC pomocí sítě, existuje zde i režim spánku. Na podavači způsobuje, že veškeré motory jsou neaktivní.

## Režim pauzy tisku

V realizovaném experimentu podavače materiálu se režimy spánku a pauzy tisku neliší, nicméně u tiskárny režim pauzy tisku znamená pozastavení tisku tak, aby mohlo být navázáno na tisk po zásahu uživatele, a režim spánku znamená, že tiskárna čeká na pokyn uživatele – ať už interakcí přímo s tiskárnou nebo případným posláním instrukcí přes síť – přičemž veškeré motory a další prvky jsou v úsporném módu, případně vypnuty.

### 6.3.2 Naprogramování funkcí podavače materiálu

Mezi funkce patří určení zbývajícího materiálu a zabránění přetržení filamentu. Tyto funkce jsou využívány v závislosti na tom, v jakém režimu se podavač materiálu právě nachází a jsou v části void loop – jsou tedy cyklicky vykonávány při běhu programu, pokud program neběží jinou částí vlivem větvení if.

#### Určení hmotnosti

Určení hmotnosti se využívá pro dvě hlavní funkce – pro zabránění přetržení filamentu a pro určení zbývajícího materiálu na cívce. Princip určení zbývajícího materiálu je stejný jako v kapitole 6.2.5.

Na Obr. 83) je zobrazeno, jakým způsobem je určení hmotnosti naprogramováno ve zdrojovém kódu Weight\_add\_on.ino.

```
if (global_time - previous_global_time_2 >= interval_vazeni) {
    previous_global_time_2 = global_time;
    current_weight = ((scale.get_units(average_of_readings) * 1000));
    lcd.setCursor(12, 0);
    lcd.print(global_time);
    lcd.setCursor(12, 1);
    lcd.print(current_weight);

}
}
```

Obr. 83) Měření hmotnosti ve zdrojovém kódu Weight\_add\_on.ino

Princip měření je stejný jako v kapitole 6.2.2, pouze je využito pro stanovení hmotnosti průměrovaného měření. Příkaz “scale.get\_units(average\_of\_readings)” tedy vrátí průměrovanou hodnotu senzoru hmotnosti na základě proměnné “average\_of\_readings“, která se liší v závislosti na režimu podavače materiálu. Pokud potřebujeme přesnou hodnotu, vypočítáme výsledek měření z více hodnot, pokud naopak potřebujeme vyšší výpočetní rychlost nebo okamžitou hodnotu, využijeme nezprůměrovanou okamžitou hodnotu měření – proměnná “average\_of\_readings“ je v tomto případě rovna jedné.

Příkazy vykreslování displeje (začínající předponou lcd) byly využity pouze pro sledování přesnosti vážícího senzoru během experimentu.

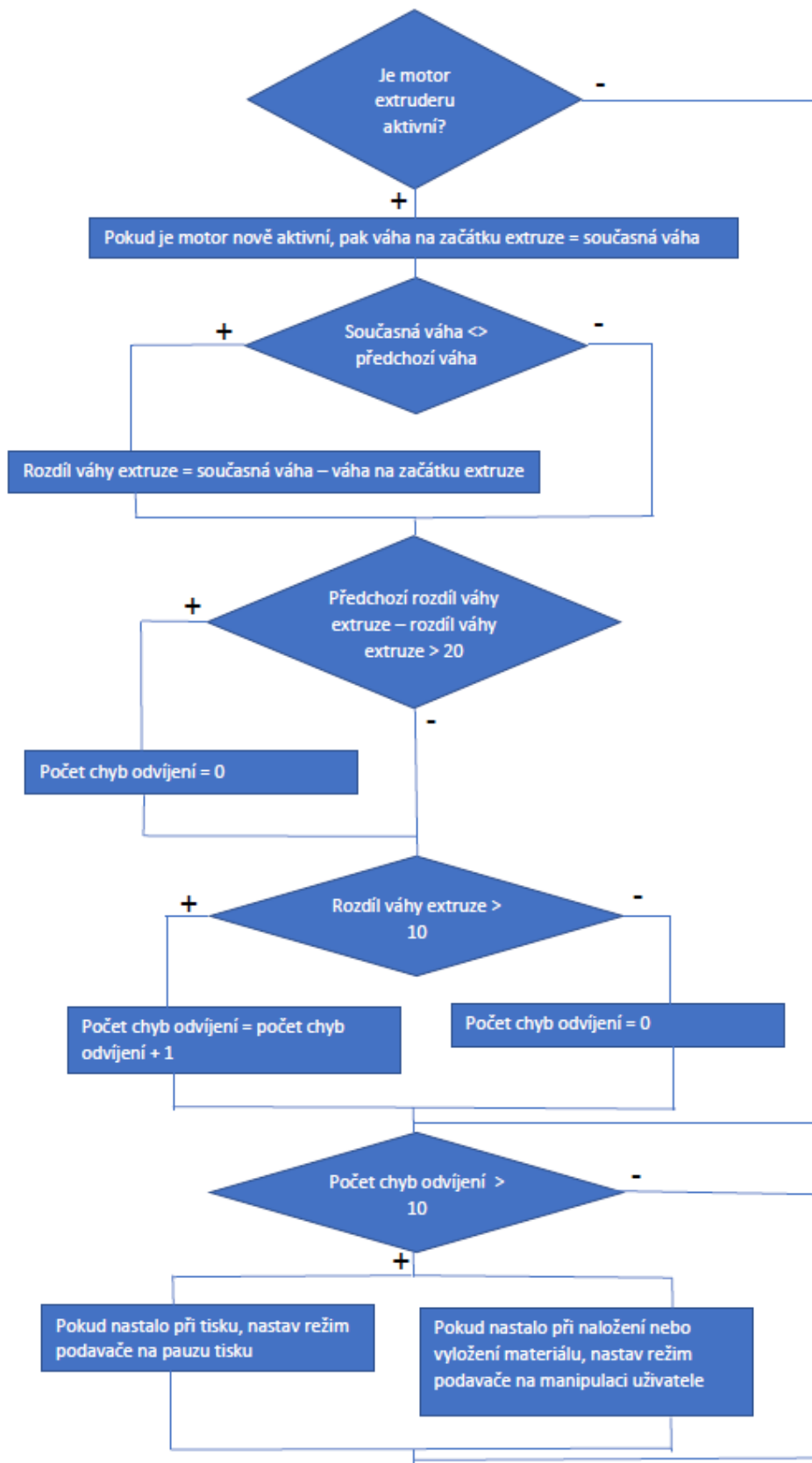
### **Zabránění přetržení filamentu**

Měření hmotnosti a spolehlivé odvíjení filamentu lze využít i pro zabránění přetržení filamentu. Pokud je horní kryt tiskárny uzavřen – což je při tisku vyžadováno – jediný způsob, kterým může dojít ke zvýšení zatížení tenzometrického snímače, je vlivem chyby odvíjení.

Díky řízenému odvíjení cívky při tisku napětí filamentu nikdy nepřesáhne za běžných podmínek hodnotu, která je vyšší než napětí, které způsobí odkrytí optické závory a tím spuštění odvíjení. Spuštěním odvíjení cívky dojde opět k poklesu napětí filamentu.

Princip funkce zdrojového kódu zobrazuje Obr. 84). Pokud je motor extruderu aktivní, sleduje se rozdíl váhy extruze. Vlivem faktu, že měření probíhá po určité periodě, která je krátká, není očekáváno, že mezi předchozím měřením a současným měřením bude příliš velká odchylka. Pokud ano, pravděpodobně došlo k náhodnému vnějšímu otřesu nesouvisejícím s procesem tisku. Pokud rozdíl hmotnosti na začátku odvíjení a hmotnosti v současné době odvíjení je vyšší než 10 gramů, je tato chyba započítána. O chybě je rozhodnuto, pokud těchto chyb je více než 10. Pokud chyba nastala při režimu tisku, je režim podavače změněn na mód pauzy tisku (a tak by byl změněn i režim tiskárny). Pokud chyba nastala při režimech naložení nebo vyložení filamentu, je mód změněn na mód manipulace uživatele.

V příloženém zdrojovém kódu se naprogramování této funkcionality nachází na řádcích 652 až 683. Pro využití na 3D tiskárně je doporučeno provést ladění parametrů této části zdrojového kódu experimentováním s různými materiály od různých dodavatelů.



Obr. 84) Princip funkce zabránění přetržení filamentu



### 6.3.3 Návod na vyzkoušení funkce podavače materiálu

V Tab 7) jsou zobrazeny potřebné komponenty:

Tab 7) Seznam komponent pro vyzkoušení funkce podavače materiálu

Součást	Poznámka	Funkce
PC a kabel USB 2.0 A – USB 2.0 B		Komunikace s uživatelem přes sériovou linku
Rotační enkodér	Rotační enkodér s piny CLK, DT, SW a napájecími piny	Otočením enkodéru lze změnit mód tisku. Při otočení přes sériovou linku vypíše, který mód je vybrán. Stisknutí enkodéru volbu potvrdí. Pouze stisknutí bez předchozího otočení spustí odvíjení extruderu.
LCD I2C displej 20x4	Volitelné	Vypisuje naměřenou hmotnost.
Tlačítko	Tlačítko s napájecími piny a DT pinem	Stisknutí tlačítka zastaví odvíjení extruderu
Arduino Mega 2560		Řízení
Tenzometrický snímač	Snímač s podobným zapojením jako v katalogu snímače L6D v externích přílohách	Měření hmotnosti pro účely řízení/ pro odhad zbývajícího materiálu
Modul HX711		A/D převodník pro tenzometrický snímač
Krokový motor	Běžný bipolární krokový motor	Slouží pro pohon disku
Extruder s vestavěným krokovým motorem	Doporučeno E3D Titan	Vyvození napětí filamentu pro účely řízení
Driver krokového motoru DRV8825 nebo A4988 (2x)		Generování pulsů pro krokové motory
Zdroj pro napájení krokového motoru přes driver (viz. manuál použitého driveru) o minimálním výkonu 100 W, 12 V, stejnosměrné napětí	Lze využít i pro napájení Arduina (pozor většina klonů Arduina nesmí být napájena zároveň přes USB a přes externí zdroj)	Napájení krokových motorů, případně napájení všech komponent

Pro zapojení komponent lze použít návody dostupné na internetu. Zapojení komponent do příslušných pinů Arduino Mega 2560 je patrné ze zdrojového kódu. Pro komunikaci s uživatelem a pro nahrání zdrojového kódu na desku autor doporučuje software Arduino IDE.

## 7 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

V této diplomové práci byla navržena 3D tiskárna FDM, která usnadní celý proces 3D tisku začínajícím uživatelům. Hlavní zjednodušení spočívá v inovaci manipulace tiskárny s tiskovým materiálem. Omezí se tak chyby tisku nezaviněné uživatelem a tiskárnu bude potřeba méně kontrolovat.

System manipulace s cívkou umožňuje varovat uživatele před přetrhnutím filamentu, ke kterému může dojít zejména, pokud je filament zajištěn pomocí děr v cívce proti nechtěnému odvíjení. U současných tiskáren zajištění filamentu způsobí vypadnutí cívky z držáku, případně přetržení filamentu a pozastavení tisku nebo chybný tisk.

Dále tiskárna uživatele před spuštěním tisku informuje o riziku vypotřebování veškerého tiskového materiálu porovnáním množství materiálu určeného v g-kódu a zbývajícím množstvím ve vložené cívce, díky čemuž budou omezeny prostoje tiskárny a plýtvání materiálem.

V neposlední řadě nová 3D tiskárna umožňuje použít těžší cívky – podporuje celkovou hmotnost cívky až 6 kg o průměru 260 a výšce 100 mm, ze kterých dokáže tisknout spolehlivěji než současné tiskárny s použitím cívek o nižší hmotnosti (nejčastěji používané cívky jsou do celkové váhy cívky 1,5 kg). Spolehlivost byla experimentálně ověřena a činnost odvíjení je zaznamenána na přiloženém videu. Hmotnost 6 kg je pro dané maximální rozměry cívky předimenzovaná, protože se počítá s možnou podporou těžších materiálů (například s kovovými aditivami).

Tiskový prostor zde navržené konstrukce je poměrně malý – 250x200x200 mm, nicméně v případě single-extruze je možné tento úpravou konstrukce zvětšit a zvýšit také maximální rozměry podporované cívky. Konstrukce je nicméně limitujícím faktorem pro případ dual-extruze, kdy je typicky využit základní materiál pro finální výtisk, a pro podpory materiál rozpustný ve vodě. Konstrukce je limitující zejména kvůli uchycení cívky – u dual-extruze je nutné využívat dva materiály a gramofonová konstrukce podavače materiálu použitá v této práci není z tohoto důvodu nejvhodnější, ale nejedná se o technicky neřešitelný problém.

Další problém může nastat kvůli vedení tiskové podložky. Překážkou je, že výchylka způsobená deformací podložky zatíženou hmotností výtisku může u hmotných výtisků být vyšší než výška minimální vrstvy – tedy vyšší než 0,1 mm. Nicméně tiskárna je navržena tak, aby oslovila uživatele s běžnými požadavky na tisk, přičemž přidaná hodnota spočívá v jednoduchosti obsluhy – není předpokládáno, že by budoucí uživatelé tiskárny často tiskli příliš hmotné výtisky, a to zejména z toho důvodu, že tisk hmotných výtisků zabere řádově dny.

Jednoduchost obsluhy snižuje fakt, že tiskárna nemá schopnost autokalibrace – nicméně samotná gramofonová konstrukce toto nevyklučuje a je tak možné tuto vlastnost později doplnit.

System měření hmotnosti, jímž poskytnutá data jsou poté dále využita pro další optimalizaci tisku, byl realizován a experimentálně ověřen v rámci realizace gramofonové konstrukce podavače materiálu, přičemž výsledky a funkce programu jsou prezentovány v kapitole 6. Výsledná přesnost při měření statické zátěže po dobu 14,6 hodin je +/- 2 gramy, což pro potřeby využití dat 3D tiskárnou postačuje.

V rámci této diplomové práce byl poskytnut a experimentálně ověřen inovativní základ, který je možné dále rozvíjet různými směry. Jedním z nich je podpora pokročilých tiskových materiálů, které jsou obtížné na tisk. Tyto materiály se při tisku často lámou ještě před vstupem do hot-endu, což by řízené odvíjení filamentu mělo odstranit. Dalšími směry mohou být větší využití dat poskytnutých tenzometrickým snímačem pro další optimalizaci procesu tisku, nebo úprava konstrukce na dual-extruzi.



## 8 ZÁVĚR

3D tisk metodou FDM není doposud plně zvládnutá technologie a existuje zde řada problémů, které je třeba vyřešit. Jako jedna z hlavních nedořešených problematik se jeví skutečnost, že v současnosti je poměrně velké množství potenciálních uživatelů 3D tiskáren, kterým by 3D tisk ulehčil práci, ale pro které není žádná současná FDM 3D tiskárna vhodná, ať už z důvodu vysokých pořizovacích i provozních nákladů nebo z důvodu její nízké spolehlivosti, která způsobuje, že je nutno tiskárnu během tisku kontrolovat.

Cílem této práce bylo navrhnout 3D tiskárnu, která zjednoduší obsluhu a bude dosahovat vysoké spolehlivosti tisku, což osloví široký okruh potenciálních uživatelů, a to zejména nezkušené uživatele. Jako prostředek, který tento záměr umožní, byl zadáním této práce určen integrovaný podavač materiálu.

V rešeršní části této práce je popsán současný stav 3D tisku FDM, kdy na začátku je vysvětlen princip této technologie. Dále následuje popis kinematických struktur FDM 3D tiskáren, kdy na základě zde analyzovaných informací je v kapitole 4.2 vybrána vhodná kinematika pro danou konstrukci podavače materiálu. V kapitole 2.3 rešeršní části jsou popsány dva základní způsoby použití materiálu FDM 3D tiskárnou.

Systém s otevřenou volbou materiálu umožňuje použít tiskový materiál od libovolného dodavatele (pokud daný typ materiálu 3D tiskárna podporuje), ale nevýhodou je nižší uživatelský komfort a neschopnost garantovat konzistentní výtisk výrobcem tiskárny.

Systém s uzavřenou volbou materiálu naproti tomu umožňuje výrobcem garantovat vlastnosti výtisku, protože jsou známy vlastnosti materiálu a nabízí vyšší uživatelský komfort a spolehlivost.

Následně jsou v rešeršní části popsány další konstrukční celky tiskáren. Poté následuje popis elektronických komponent tiskáren – řídicí elektronika, krokové motory a jejich řízení a rovněž uživatelské rozhraní. Nejpodstatnější z popisu elektronických komponent je ta skutečnost, že zde existují otevřené řídicí platformy s veřejně dostupným zdrojovým kódem, který lze upravit a do kterého je možné vložit vlastní novou funkcionalitu. Tento fakt zásadně zjednoduší realizaci tiskárny navržené v rámci této práce a ovlivnil i volbu vývojové platformy pro realizaci podavače materiálu.

Závěrečné kapitoly rešeršní části obsahují popis volby tiskových parametrů určujících vlastnosti výtisků.

Následuje popis jednotlivých variant řešení a zdůvodnění provedeného výběru. Unikátní na této kapitole je, že výběr konstrukce byl proveden na základě testování hned dvou realizovaných prototypů podavače materiálu, nikoliv pouze na základě kvalifikovaného odhadu.

Konstrukční část je sestavena chronologicky tak, jak bude probíhat montáž 3D tiskárny. Pozitivem krytování tiskárny je, že z pohledových stran vizuálně neruší žádné konstrukční prvky (hlavy šroubů, čepů atd.). Kromě uživatelsky přívětivé obsluhy tak případného zájemce zaujme i líbivost a čistota tvarů.

V konstrukční části byly využity poznatky získané při testování prototypů. Aby bylo dosaženo spolehlivého odvíjení, musí být cívka na gramofonové konstrukci podavače přitlačena k disku silou minimálně 30 N, přičemž získání potřebné přitlačné síly bylo

dosaženo pružinovým mechanismem přitlačného kužele. Kužel představuje unikátní a uživatelsky přívětivé řešení. Dalším originálním prvkem je zásuvka na odřezky a úlomky filamentu, která usnadňuje obsluhu udržovat čistotu pracovního prostoru tiskárny. Kromě uvedených inovativních řešení jsou v konstrukční části popsány konstrukce osy Z, roviny XY a zakrytování 3D tiskárny. Nicméně zde současný stav poznání pro navrženou tiskárnu postačuje, proto byla využita již existující a spolehlivá řešení.

Závěrečnou částí je popsáno experimentální ověření vhodnosti tiskárny. Je zde uveden program řízení podavače materiálu a to, jakým způsobem bylo dosaženo přesného určení hmotnosti, která u statické zátěže po dobu měření 14,6 hodin dosáhla přesnosti  $\pm 2$  gramy. Dále se zde nachází tabulka popisující funkce jednotlivých elektronických komponent a ovládání podavače materiálu pro případné vyzkoušení funkce podavače materiálu. Program podavače materiálu popsán v této části je psán tak, aby jej bylo možné snadnou modifikací využít jako část řídicího systému 3D tiskárny a aby ze zdrojového kódu bylo patrné zapojení komponent do vývojové platformy. Použité zdrojové kódy jsou součástí příloh.

Všechny cíle diplomové práce byly splněny, přičemž vhodná konstrukce a využití dat poskytovaných podavačem materiálu bylo ověřeno experimentálně. Experimentální ověření potvrzuje správnost zvolené konstrukce a poskytuje tak základy pro vývoj nové 3D tiskárny, který bude autor dále rozvíjet.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-981-1008-115.
- [2] KLOSKI, Liza a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. 1. vydání. Brno: Computer Press, 2017, 211 stran : ilustrace. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [3] *RepRap* [online]. Bath: RepRap.org, 2018 [cit. 2018-09-24]. Dostupné z: <https://reprap.org>
- [4] BENIAK, Juraj. *Systémy Rapid Prototyping*. 1. vydanie. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-4287-0.
- [5] MK3 Filament sensor seems to be shipping with updated version now. In: *Reddit* [online]. San Francisco (California): Condé Nast Publications, Inc., 2018 [cit. 2018-10-05]. Dostupné z: [https://www.reddit.com/r/prusa3d/comments/8lkxil/mk3\\_filament\\_sensor\\_seems\\_to\\_be\\_shipping\\_with/](https://www.reddit.com/r/prusa3d/comments/8lkxil/mk3_filament_sensor_seems_to_be_shipping_with/)
- [6] PUCHTA, Daniel. *Držák plastových strun pro profesionální technologii 3D tisku FDM*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce David Paloušek.
- [7] SOOD, Anoop, Rajkumar OHDAR a Siba MAHAPATRA. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. *Materials & Designs* [online]. 2009. 2009, **2009**(30), 4244-4252 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.030>
- [8] ĆWIKŁA, Grzegorz, C GRABOWIK, K KALINOWSKI, I PAPROCKA a P OCIEPKA. The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. vol. 227. Bristol: IOP Publishing, 2017, **227**, s. 1-11. DOI: 10.1088/1757-899X/227/1/012033. ISBN 1757-8981. ISSN 1757-8981. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/227/i=1/a=012033?key=crossref.355a546adfa7c7f968ed4fc6be1ae0d6>
- [9] WOLSZCZAK, Piotr, Krystian LYGAS, Mateusz PASZKO a Radoslaw A. WALCH. Heat distribution in material during fused deposition modelling. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2018. 2018, **2018**(24), 615-622 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2017-0062>
- [10] MEBOLDT, Mirko, Bastian LEUTENECKER-TWELSIEK, ed. Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing. In: WANG, Lihui a Torsten KJELLBERG. *Procedia CIRP*. Brinellvägen: Elsevier B.V., 2016, s. 408-413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.016>. ISBN -. ISSN 2212-8271.

- [11] HALIDI, Siti a Jamaluddin ABDULLAH. Moisture effects on the ABS used for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Machine. In: *IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research*. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012, s. 839 - 843. ISBN 978-1-4673-1310-0. ISSN -.
- [12] Source Graphics :: BigRep One. *Source Graphics* [online]. Anaheim, California, USA: Source Graphics & Print Co Ltd, 2019 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://sourcegraphics.com/3d/printers/bigrep/bigrep-one/>
- [13] Ultimaker - Ultimaker PLA Black 750g Spool #UM-1609. *Mindkits 3D* [online]. Auckland, New Zealand: MindKits Limited, 2020 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <http://www.mindkits3d.nz/ultimaker-pla-2-85mm-black-750g-spool.aspx>
- [14] E3D Titan assembly with thumb screw. *E3D Online: The Home of 3D Printing. Buy 3D Printer Parts Online* [online]. E3D-Online Limited, Chalgrove, Oxfordshire, United Kingdom [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: [https://files.e3d-online.com/Titan/ASM\\_EX\\_THUMB\\_SCREW.stp](https://files.e3d-online.com/Titan/ASM_EX_THUMB_SCREW.stp)
- [15] HUMMELINK, Jos. RAMPS 1.4. *GrabCAD Community* [online]. Eden Prairie, Minnesota, USA: Stratasys, Inc., 2020 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/ramps-1-4>
- [16] TORSHIN, Sergey. Raspberry / Pi 3 model B / Single-board computer. *GrabCAD Community* [online]. Eden Prairie, Minnesota, USA: Stratasys, Inc., 2020 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://print.grabcad.com/library/raspberry-pi-3-model-b-single-board-computer-1>
- [17] SD Card Module. *GrabCAD Community* [online]. Eden Prairie, Minnesota, USA: Stratasys, Inc., 2019 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/sd-card-module-1>
- [18] EDWARDS, Tom. Rotary Encoder. *GrabCAD Community* [online]. Eden Prairie, Minnesota, USA: Stratasys, Inc., 2020 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: [https://grabcad.com/library/rotary-encoder-1/details?folder\\_id=2273653](https://grabcad.com/library/rotary-encoder-1/details?folder_id=2273653)
- [19] Desktop dc adapter 24V 5A 120W switching power supply. *Alibaba.com* [online]. Hangzhou, Zhejiang Province, China: Alibaba Co., Ltd, 2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: [https://sz-lyd.en.alibaba.com/product/60540607277-804143587/Desktop\\_dc\\_adapter\\_24V\\_5A\\_120W\\_switching\\_power\\_supply.html](https://sz-lyd.en.alibaba.com/product/60540607277-804143587/Desktop_dc_adapter_24V_5A_120W_switching_power_supply.html)
- [20] PETG vs PLA: The Differences – Simply Explained. *ALL3DP* [online]. Munich: ALL3DP, GmbH., 2020 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/petg-vs-pla-3d-printing-filaments-compared/>
- [21] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, Miloš VLK, ed. *Konstruování strojních součástí*. První. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [22] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. První. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-802-6067-801.



- [23] Arduino IDE and C/C++ language: I still don't get it. In: *Arduino* [online]. Turin, Italy: Arduino AG, 2013 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>
- [24] Load Cell Amplifier HX711 Breakout Hookup Guide. *Sparkfun* [online]. Niwot, Colorado, USA: SparkFun Electronics Inc., 2020 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/load-cell-amplifier-hx711-breakout-hookup-guide/all>
- [25] *How to use a Weight Sensor / Load Cell + HX711 with an Arduino* [online]. Vancouver, British Columbia, Canada: Brainy-bits, Inc., 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.brainy-bits.com/load-cell-and-hx711-with-arduino/>
- [26] Whistle : PrusaPrinters. *Prusaprinters Blog* [online]. Praha: Prusa Research s.r.o., 2019 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.prusaprinters.org/prints/65-whistle/files>
- [27] *Prusa research* [online]. Praha: Prusa Research s.r.o., 2018 [cit. 2018-09-26]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz>
- [28] *UGE* [online]. Cairo: UGE Electronics Co., 2018 [cit. 2018-09-27]. Dostupné z: <https://uge-one.com>
- [29] *Galil* [online]. Rocklin: Galil Ltd., 2018 [cit. 2018-09-27]. Dostupné z: [www.galilmc.com](http://www.galilmc.com)
- [30] Changing filament. In: *Ultimaker* [online]. Geldermalsen: Ultimaker B.V., 2018 [cit. 2018-10-05]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/resources/16955-changing-filament>
- [31] Universal stand-alone spool holder. In: *Shapeways* [online]. New York (New York): Shapeways Inc., 2018 [cit. 2018-10-05]. Dostupné z: <https://www.shapeways.com/product/Q5CE5P939/universal-stand-alone-filament-spool-holder>
- [32] *3D proto* [online]. Eschweiler: Adrian Aleksandrowicz, 2018 [cit. 2018-09-27]. Dostupné z: [www.3d-proto.de](http://www.3d-proto.de)
- [33] *Proto3000* [online]. Vaughan, Ontario: Proto3000 Inc., 2018 [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: <https://store.proto3000.com/>
- [34] *Stratasys F123 Series Shared Office 3D Printers Operation and Maintenance Guide*. Eden Prairie (Minnesota), 2017.
- [35] *Digital Trends* [online]. Portland, Oregon: Designtecnica Corporation, 2018 [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: <https://www.digitaltrends.com>
- [36] *Comsol* [online]. Burlington, Massachusetts: Comsol, Inc., 2018 [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/>
- [37] *AET Labs* [online]. Essex, Massachusetts: AET Labs, 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <http://aetlabs.com>
- [38] *Banggood* [online]. New York, New York: Banggood, 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://www.banggood.com/>

- [39] *SlashGear* [online]. London: SlashGear, 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://www.slashgear.com/>
- [40] *UltiBots* [online]. Vero Beach, Florida: UltiBots LLC, 2018 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: <https://www.ultibots.com>
- [41] *Alexnld* [online]. Tiberias: Alexnld.com, 2018 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: <https://alexnld.com>
- [42] *Flashforge* [online]. Zheijang: Flashforge Corporation, 2018 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: [www.flashforge.com](http://www.flashforge.com)
- [43] *Sintron online store* [online]. Zheijang: Sintron online store, 2016 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: [sintrononline.com](http://sintrononline.com)
- [44] *GM Electronic* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/>

## 10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

Zkratka	Význam
3D	Troj-rozměrný
FDM	Fused deposition modeling , jedna z technologií 3D tisku
RepRap	Samoreplikovatelná 3D tiskárna
G-kód	Kód popisující pohyb tiskárny pro dosažení výtisku
SD	Secure digital, typ výměnitelného úložiště
ROM	Read-only memory, nepřepisovatelná paměť
PLA	Polyactid acid, typ materiálu pro 3D tisk
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren, typ materiálu pro 3D tisk
LCD	Liquid crystal display
Ramps	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
Wi-Fi	Wireles fidelity, typ bezdrátové sítě
ESC	Escape tlačítko
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol-modified, typ materiálu pro 3D tisk
USB	Universal serial bus, typ počítačové sběrnice
PC	Personal computer, osobní počítač

Symbol	Jednotka	Popis
$\alpha$	°	Úhel profilu závitu
$a_{zmax}$	$m \cdot s^{-2}$	Maximální zrychlení osy Z
C	-	Konstanta zohledňující určení hustoty daného typu materiálu
d	mm	Průměr filamentu
$d_2$	mm	Střední průměr závitu
f	-	Součinitel tření v závitu
$F_z$	N	Zátěžná síla osy Z
$g$	$m \cdot s^{-2}$	Gravitační zrychlení Země
L	-	Osa Y experimentu
l	mm	Zbývající délka materiálu na cívce
m	g	Hmotnost materiálu na cívce
$m_{cívky}$	g	Hmotnost prázdné cívky
$m_{kompenzace}$	g	Hmotnost kompenzace
$M_{kon}$	kg	Hmotnost konstrukce osy Z
$M_{mat}$	kg	Teoretická maximální hmotnost výtisku
$m_{přesnost\ vážení}$	g	Přesnost určení hmotnosti snímače

$m_{souč}$	g	Hmotnost získaná z tenzometrického snímače
$M_{zv}$	N.m	Moment pro zvednutí břemene
$N_k$	-	Počet kroků motoru na otáčku
$P_h$	mm	Stoupání
$\rho$	$g \cdot cm^{-3}$	Hustota materiálu na cívce
$\rho_{PETG}$	$g \cdot cm^{-3}$	Hustota materiálu PETG
$s_m$	-	Mikrokrokování
$S_{min}$	-	Počet kroků potřebný pro posuv o minimální výšku vrstvy
$s_x$	mm	Maximální velikost výtisku v ose X
$s_y$	mm	Maximální velikost výtisku v ose Y
$s_z$	mm	Maximální velikost výtisku v ose Z
$s_{zmin}$	mm	Minimální dráha, na níž je možno dosáhnout maximální rychlosti a poté zpomalení na nulovou rychlost při daném zrychlení
T	-	Osa Z experimentu
$T_z$	s	Nejkratší doba najetí z nulové do maximální polohy osy Z
$Vt$	$dm^3$	Tiskový objem
$v_{zmax}$	$mm \cdot s^{-1}$	Maximální rychlost osy Z
W	-	Osa X experimentu
$z_{min}$	mm	Minimální výška vrstvy

## 10.1 Seznam tabulek

Tab 1) Hodnoty parametrů z grafu na Obr. 18) [8] .....	32
Tab 2) Hodnoty parametrů z grafu na Obr. 19) [8] .....	33
Tab 3) Změna parametrů pro rozměrovou přesnost v různých směrech [7] .....	35
Tab 4) Vyhodnocení kritérií při vložení cívky na válečky .....	43
Tab 5) Vyhodnocení kritérií gramofonové konstrukce podavače .....	48
Tab 6) Výběr vhodné kinematiky .....	51
Tab 7) Seznam komponent pro vyzkoušení funkce podavače materiálu .....	97

## 10.2 Seznam obrázků

Obr. 1)	Princip technologie FDM [28] .....	17
Obr. 2)	a) Prusa i3 mk3 [27] b) Tripodmaker [3] .....	19
Obr. 3)	Kinematika H-Bot [29] a) Kroucení vlivem různého směru pohybu..... řemene b) Bez kroucení díky stejnému směru pohybu řemene .....	20
Obr. 4)	Kinematika Core XY [28] .....	20
Obr. 5)	Kinematika FDM 3D tiskáren Stratasys [34] .....	21

Obr. 6)	Kinematika 3D tiskárny Ultimaker 2 [35].....	21
Obr. 7)	Držák strun 3D tiskárny Ultimaker [30].....	22
Obr. 8)	Držák strun – 3D model je dostupný z databáze Thingiverse [31].....	22
Obr. 9)	Laserový senzor vypotřebování filamentu 3D tiskárny Prusa i3 mk3 [32]	23
Obr. 10)	Speciální kazeta s tiskovým materiálem Stratasys [33].....	24
Obr. 11)	Schéma extruderu [36].....	25
Obr. 12)	a) Plastová podložka [37] b) Hliníková podložka [38] .....	26
Obr. 13)	Skleněná tisková podložka tiskárny Ultimaker 2 [39].....	26
Obr. 14)	a) Mikrokontroler Arduino Mega 2560 [40] b) Shield Ramps 1.4 [41] .....	27
Obr. 15)	Dotykové uživatelské prostředí 3D tiskárny Flashforge [42].....	29
Obr. 16)	Nejrozšířenější typ uživatelského prostředí RepRap 3D tiskáren [43].....	29
Obr. 17)	Tvorba dutin mezi jednotlivými vrstvami výtisku [7].....	31
Obr. 18)	Závislost pevnosti v tahu na deformaci pro vzorky o různých hustotách ..... výplně [8].....	32
Obr. 19)	Závislost pevnosti v tahu na procentuálním zatížení pro vzorky o různých ... hustotách [8] .....	33
Obr. 20)	Porozita materiálu [9] .....	34
Obr. 21)	Orientace os v experimentu – L – délka, W – šířka, T – tloušťka [7] .....	35
Obr. 22)	Graf vývoje velikosti vlhkosti v čase [11].....	36
Obr. 23)	Graf vývoje velikosti teploty skelného přechodu na čase [11].....	37
Obr. 24)	Vložení cívky na válečky – vizualizace 3D modelu .....	42
Obr. 25)	Vložení cívky na válečky .....	43
Obr. 26)	Držák cívky 3D tiskárny BigRep One [12].....	44
Obr. 27)	Cívka s filamentem vloženým v otvorech [13].....	44
Obr. 28)	Realizace podavače s uložením cívky na válečky .....	45
Obr. 29)	Gramofonová konstrukce podavače .....	46
Obr. 30)	Tenzometrický snímač a pohon disku.....	46
Obr. 31)	Vyosení snímače napnutí oproti extruderu .....	47
Obr. 32)	Optické závory, snímač napnutí v klidové poloze.....	48
Obr. 33)	Gramofonová konstrukce podavače.....	49
Obr. 34)	Vizualizace 3D tiskárny .....	52
Obr. 35)	Umístění podavače materiálu .....	53
Obr. 36)	Podavač materiálu.....	54
Obr. 37)	Otvory pro přichycení podavače materiálu umístěny v rozích.....	54
Obr. 38)	Komponenty zajišťující spolehlivé odvíjení filamentu .....	55
Obr. 39)	Cesta filamentu .....	56
Obr. 40)	a) Kužel v poloze, kdy vyvozuje dostatečnou sílu .....	57
Obr. 41)	Přítlačný kužel v poloze zajišťující dostatečnou sílu .....	57
Obr. 42)	Pohon odvíjení .....	58
Obr. 43)	Schéma pohonu odvíjení a měření hmotnosti .....	59
Obr. 44)	Snímač napnutí filamentu .....	60
Obr. 45)	Extruder podavače materiálu .....	61
Obr. 46)	Umístění řídicích desek v konstrukci podavače materiálu .....	63
Obr. 48)	Umístění sestavy komunikačního rozhraní.....	64
Obr. 49)	Uchycení komponent komunikačního rozhraní.....	65
Obr. 50)	Zadní pohled na uchycení komponent komunikačního rozhraní.....	66
Obr. 51)	Zdroj napětí [19] .....	67

Obr. 52)	Sestava osy Z.....	68
Obr. 53)	Plech rámu nahrazující matice.....	69
Obr. 54)	Svařenec dna.....	70
Obr. 55)	Sestava motoru osy Z .....	70
Obr. 56)	Tisková platforma.....	71
Obr. 57)	Sepnutí koncového spínače osy Z referenčním šroubem .....	71
Obr. 58)	Vedení osy Z .....	72
Obr. 59)	Komponenty roviny XY .....	75
Obr. 60)	Uchycení vertikálních podpěr k rámu .....	75
Obr. 61)	Sestava U pravá.....	76
Obr. 62)	Sestava U pravá – pohled na kladky.....	76
Obr. 63)	Sestava hot-endu.....	77
Obr. 64)	Vysunutá zásuvka na úlomky filamentu.....	77
Obr. 65)	Sestava zásuvky .....	78
Obr. 66)	Vnitřek tiskárny s vloženou zásuvkou .....	78
Obr. 67)	Stav sestavení .....	79
Obr. 68)	Sestava levého bočního krytu.....	80
Obr. 69)	Horní víko otevřeno .....	81
Obr. 70)	Přední dveře 3D tiskárny .....	82
Obr. 71)	Vnitřní kryt motoru osy Z.....	82
Obr. 72)	Zadní servisní kryt 3D tiskárny .....	83
Obr. 73)	Základní struktura zdrojového kódu.....	85
Obr. 74)	Nahrazení funkce delay().....	85
Obr. 75)	Prvotní schéma zapojení [24].....	86
Obr. 76)	Vizualizace displeje v části void setup() [44].....	87
Obr. 77)	Měření hmotnosti a vypisování hodnot .....	88
Obr. 78)	Textový soubor dat měření .....	88
Obr. 79)	Prvotní výsledky měření.....	89
Obr. 80)	Měření se zátěží 15 gramů .....	89
Obr. 81)	Měření 15 gramů s cyklickým vypínáním napětí .....	90
Obr. 82)	Finální výsledky měření 15 g .....	91
Obr. 83)	Část g-kódu pro tisk píšťalky na 3D tiskárně Prusa i3 mk3/S [26].....	92
Obr. 84)	Měření hmotnosti ve zdrojovém kódu Weight_add_on.ino.....	94
Obr. 85)	Princip funkce zabránění přetržení filamentu.....	96

## 11 SEZNAM PŘÍLOH

### Externí přílohy

- Příloha 1:** S020\_1/1/3 výkres Sestava os 3D tiskárny
- Příloha 2:** S020\_1/2/3 seznam položek 1 Sestava os 3D tiskárny
- Příloha 3:** S020\_1/3/3 seznam položek 2 Sestava os 3D tiskárny
- Příloha 4:** S051 výkres sestavení 3D tiskárny
- Příloha 5:** S030 výkres Svařenec hot-endu
- Příloha 6:** D009 výkres obráběného dílu Základna ložiska
- Příloha 7:** Rizene\_odvijeni\_civky.mp4
- Příloha 8:** Weight\_add\_on.ino
- Příloha 9:** Load\_Cell\_dlouhodobě.ino
- Příloha 10:** S010\_4.stp 3D model gramofonové konstrukce podavače
- Příloha 11:** S020\_1.stp 3D model 3D tiskárny