

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PŘÍSTROJOVÉ A ŘÍDÍCÍ
TECHNIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
RECYKLÁTOR PLASTŮ PRO 3D TISK

2021

VÁCLAV KASAL

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kasal** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **473669**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Recyklátor plastů pro 3D tisk

Název bakalářské práce anglicky:

Device for recycling plastics for 3D printing

Pokyny pro vypracování:

Cílem je návrh zařízení na recyklaci již jednou vytištěného plastu do 3D tiskárny.

- 1) Navrhněte zařízení pro recyklaci plastů pro 3D tisk
- 2) Zařízení realizujte, včetně řízení
- 3) Otestujte a prokažte funkčnost

Seznam doporučené literatury:

Christiyan, Jaya. (2016). Fabrication Of Basic Screw Extruder To Manufacture 3d Printers Filament. International Journal of Research in Engineering and Technology. 5.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D., odbor elektrotechniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze dne 1. 7. 2009.

V Praze dne 9. června 2021

Václav Kasal

Anotace

Autor:	Václav Kasal
Název BP:	Recyklátor plastů pro 3D tisk
Rozsah práce:	63 stran, 33 obrázků
Akademický rok vyhotovení:	2020/2021
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav přístrojové a řídicí techniky
Vedoucí BP:	doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
Využití:	Výroba Recyklátoru plastů pro 3D tisk
Klíčová slova:	3D tisk, Extrudér, filament. Arduino, Bluetooth, automatizace
Anotace:	Tato práce se zabývá vývojem a stavbou extrudéru filamentu do 3D tiskárny. V práci je zdokumentován celý proces vývoje a následné výroby prototypu. V závěru je diskutována úspěšnost experimentu a další možné kroky.

Annotation

Author:	Václav Kasal
Title of bachelor dissertation:	Device for Recycling Plastics for 3D Printing
Extent:	63 pages, 33 pictures
Academic year:	2020/2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Instrumentation and Control Engineering
Supervisor:	doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
Application:	
Keywords:	3D printing, extruder, filament. Arduino, Bluetooth, automation
Annotation:	This thesis deals with the development and construction of a filament extruder for a 3D printer. The paper describes the whole process of development and subsequent production of a prototype. Finally, the success of the experiment and other possible steps are discussed.

Obsah

1	Úvod	8
2	Stav řešené problematiky	9
2.1	Domácí výroba	9
2.2	Výrobci extruderů filamentu pro domácí užití	10
2.2.1	Filastruder	10
2.2.2	Felfil	19
2.2.3	3devo	20
2.2.4	Srovnání komerčně dostupných extruderů	21
3	Cíle práce	23
4	Mechanická část	25
4.1	Šroub	25
4.2	Trubky	26
4.3	Rám	26
4.4	Přenos kroutícího momentu z motoru na šroub	27
4.5	Zajištění kolmosti součástí vůči rámu a vzájemné souososti rotačních součástí	29
4.6	Axiální síly ve vrtáku a zajištění spojky	30
4.7	Trychtýř	31
4.8	Potrubí pro extruzi	32
5	Návrh a výroba navíječe filamentu	34
6	Elektrotechnická část	36
6.1	Řízení	36
6.2	Ovládání vývojové desky	36
6.3	Topná tělesa	36
6.3.1	Měření teploty	36
6.3.2	PID regulace	37
6.3.3	Aktivní chlazení mechanismu	37

6.4	Řízení extruze	38
6.5	Ovládání navinování extrudovaného materiálu	38
7	Software	39
7.1	Data z telefonu	39
7.2	Data z Arduina	39
7.3	Aplikace na Android	40
7.4	Hlavní obrazovka	40
7.5	Obrazovka Settings	41
7.6	Funkce aplikace na chytré telefony	42
7.6.1	Blok na Bluetooth připojení k desce	42
7.6.2	Blok na odesílání potřebných dat	43
7.6.3	Blok na příjem dat	44
7.7	Funkce split	45
7.8	Blok pro tlačítka Update a přepínání obrazovek	45
7.9	Program na vývojové desce Arduino Mega 2560	45
7.9.1	Fáze před programem	46
7.9.2	Fáze setup	46
7.9.3	Fáze loop	47
7.9.4	Problém časování operací v rozhraní ArduinoIDE	47
8	Praktická část	49
8.1	Rám	49
8.2	Potrubí	51
8.3	Elektrická část	52
8.4	Softwarová část	53
8.5	Průběh experimentu	53
9	Závěr	58
10	Seznam použité literatury	60
11	Seznam použitých obrázků	63

1 Úvod

3D tisk je velice moderní a progresivní způsob výroby. Jedná se o aditivní metodu, při které extruder taví materiál, jež po vrstvách nanáší nejdříve na podložku, a poté nanáší vrstvy na sebe. Tisknout se dá skoro z jakéhokoli materiálu, který taje a tuhne – např. z kovů, plastů, cementu nebo čokolády. 3D tisk je den ode dne s klesajícími cenami 3D tiskáren dostupnější. S narůstajícím počtem 3D tiskáren samozřejmě také roste potřeba materiálu, ze kterého tiskárna vyrábí výtisky. Největší zastoupení na trhu mají 3D tiskárny, které tisknou z plastu. Nejběžnější z plastů pak je PLA (kyselina polyléčná).

Na základě těchto faktů docent Novák zadal téma této bakalářské práce, tedy výrobu extruderu plastového filamentu do 3D tiskárny. Jedná se o malý a konstrukčně jednoduchý stroj, který zahřívá granulovaný plast a pomocí kompresního šroubu ho pak vytlačuje skrze trysku, čímž vzniká struna, která se svine do cívky. Cívka se pak přímo zavádí do 3D tiskárny.

Ve své práci se věnuji návrhu, výrobě a ladění extruderu filamentu do 3D tiskárny. Nejdříve porovnáám několik komerčně dostupných extruderů pro domácí užití, neboť budu vyrábět extruder rovněž pro soukromé užití, který se ani kvalitou, ani objemem nemůže rovnat profesionálním extruderům. Dále podrobněji popíšu princip funkce extruderu na filament. Veliké průmyslové extrudery se od malých domácích extruderů v principu nijak neliší, všechny extrudery jsou v principu stejné a nejedná se o nové zařízení.

K návrhu extruderu použiji vlastní konstruktérské zkušenosti se značným přihlédnutím ke konstrukci komerčně dostupných extruderů.

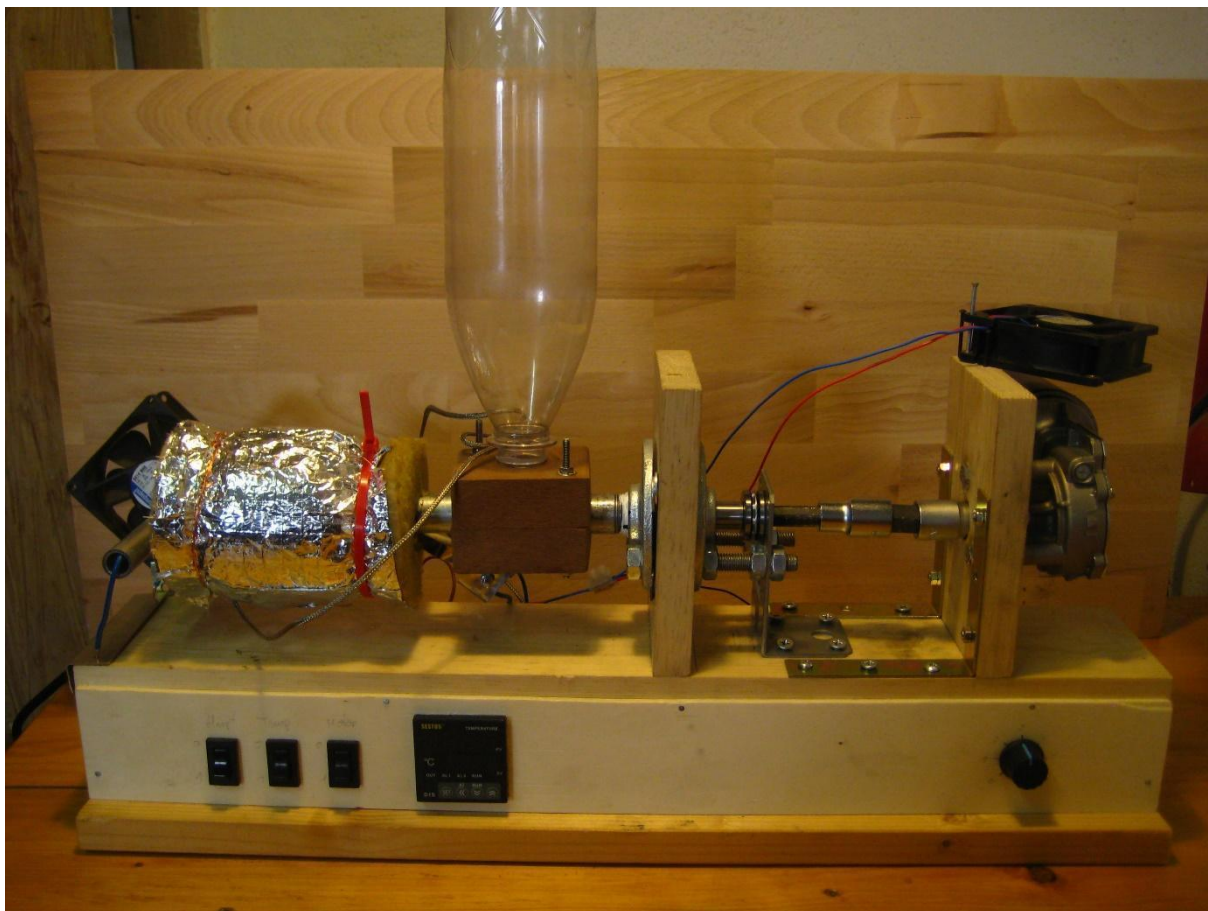
2 Stav řešené problematiky

V této kapitole představím různé extrudery a ke konci kapitoly jejich specifikace přehledně porovnam. Zjištěné poznatky se stanou důležitým východiskem pro mé vlastní řešení.

2.1 Domácí výroba

Jelikož princip výroby protlačováním materiálu pod tlakem skrze trysku je znám již dlouho, na internetu se nachází mnoho návodů na výrobu extruderu na filament. Většinou se jedná o tentýž design podomácku vytvořený, viz např. Obrázek 2-1. Jedná se o principiálně stejný extruder, jako jsou komerčně využívané jednotky, které vyrábí rámy oken či bezešvé plastové trubky. Stroj má šest základních podsestav: motor a převodovku, šroub pro posuv materiálu, topné těleso, trysku, rám a řídicí jednotku.

Obrázek 2-1 - Doma vyrobený extruder na filament [1]



2.2 Výrobci extruderů filamentu pro domácí užití

Na světě není mnoho firem vyrábějících extrudery filamentu pro domácí užití, neboť trend vyrábět si filament doma je relativně mladý, stejně jako celý průmysl v oblasti 3D tisku. Mezi nejvýznamnější firmy, které se touto problematikou zabývají, patří Filastruder, Felfil a 3devo.

2.2.1 Filastruder

Filastruder [2] je menší americká firma sídlící ve státě Georgie. Firma vyrábí velmi sofistikovaný extruder plastu. Tento extruder je nejbližší mému prototypu, je jednoduchý, levný a snadno modifikovatelný. Firma jej neprodává připravený k užívání, ale prodává kit, který si zákazník doma sám sestaví dle přiloženého návodu. V tomto odvětví průmyslu se nejedná o nic zvláštního. Většina kupujících jsou zruční stavitelé malých mechanismů.

Extruder vykazuje mnoho předností. K extruzi používá jednoduchý hadovitý vrták do dřeva. Největší výhodou takového řešení je nízká cena vrtáku oproti profesionálním kompresním šroubům. Vrták se otáčí v pozinkovaném vodovodním potrubí o rozměru 1/2“. K roztáčení vrtáku používá extruder malý motor s převodovkou s přímým ozubením, aby docílil nízkých otáček a vysokého točivého momentu. Velikou část rámu a mechanických součástí si firma sama tiskne na 3D tiskárnách. Vytištěné díly jsou sice kusově dražší, zároveň je mnohonásobně jednodušší měnit design stoje. K měření teploty používá firma snadno dostupný a levný termočlánek typu K. Pod trysku extruderu je chytrě umístěn jemný filtr zajištěný pojistným kroužkem, tzv. ségrovkou.

Nedostatků v jeho designu není mnoho. Většina nedostatků je zapříčiněna snahou, aby byl extruder co nejlevnější na výrobu, což vede k užití věcí, které jsou standardizované, avšak mají naprosto odlišný účel. Kompresní šroub má proměnný objem závitů, tak aby se v něm tavenina natlakovala a tím docházelo k homogenní extruzi. Druhou předností kompresního šroubu je, že natlakovaná tavenina přirozeně vytlačuje vzduch a vodní páry z taveniny místem nejmenšího odporu, tedy opačným směrem, než kterým se tavenina pohybuje. Kdyby vzduch cestoval s taveninou, dostal by se pak do trysky, kde by mohl přerušit extruzi a „přetrhnout“ tak extrudovanou strunu. Dalším problémem způsobeným snahou o nižší cenu je užití pozinkovaného vodovodního potrubí. Pro co nejlepší extruzi musí být veliký průměr vrtáku co nejbližší vnitřnímu průměru trubky, aby byl materiál tlačěn šroubovicí a neprotékal mezi šroubovicí a trubkou. Při použití netolerované trubky a netolerovaného vrtáku nemůže být zaručena dovolená vůle. Dále bude nevyhnutelně docházet ke kontaktu vrtáku s vnitřní stěnou trubky. Protože trubka je stavěna pro přenos vody, nikoliv odírání kaleným vrtákem, bude vrták postupně vymílat stěnu trubky, v důsledku čehož by mohlo dojít k protržení trubky a výbuchu taveniny, jelikož tlaky v tavenině mohou dle odhadů Ing. Krebse dosahovat 200 bar. Na Obrázku 2-2 je vidět, že na konci pozinkované trubky 1/2“ je použit nátrubek, ve kterém je zašroubovaná zátka. V místě nátrubku tak dochází ke skokovému zvětšení průměru potrubí, což vede ke ztrátě rychlosti a tlaku proudění taveniny.[3] Na tomto

místě by bylo lepší použít 1/2" víčko na potrubí, jež se přímo šroubuje na závit na 1/2" trubce, jak ukazuje Obrázek 2-3.

Obrázek 2-2 - Rozpad extruderu firmy Filastruder [4]



Obrázek 2-3 - 1/2" víčko na potrubí [5]



Obrázek 2-4 - 1/2" zátka na potrubí [6]



Dalším z nedostatků je nedostatečná délka pro ohřev. Dle doporučení odborníka na extruzi Ing. Stefana Krebse by délka určená pro ohřev plastových pelet měla být mezi dvaceti- až třicetinasobkem průměru šroubu. Délka určená pro ohřev v extruderu firmy Filastruder je 200 mm. Avšak pro průměr jimi užitého šroubu 16 mm je doporučená délka 320 až 480 mm.

$$l_{doporučenáMIN} = D_{vrtaku} * 20 = 16 * 20 = 320mm$$

$$l_{doporučenáMAX} = D_{vrtaku} * 30 = 16 * 30 = 480mm$$

Jelikož extruder nemá dostatečně dlouhou topnou zónu, nemůže dojít k rovnoměrnému ohřevu taveniny, což může vést až k nedostatečnému roztavení materiálu a vzniku hrudek ve filamentu, viz Obrázek 2-5.

Obrázek 2-5 – Hrudky ve filamentu[4]



Popsaný problém je možné eliminovat výrazným snížením rychlosti extruze, což je ale velice nežádoucí. Kvůli krátké topné zóně navíc dochází k přetěžování topného tělesa, jež je nuceno zahřívat se na vyšší teploty, aby bylo schopné předat dostatečné množství energie, což má za následek zvýšenou pravděpodobnost častější výměny tělesa. Problém krátké topné zóny je úzce spjat s dalším nedostatkem designu. Firma Filastruder používá pouze jednu topnou zónu s jedním topným tělesem. Průmyslové extrudery mají mezi 4 a 5 topnými zónami.

Obrázek 2-6 – Profesionální extrudéry firmy PMH GmbH [7]



Ing. Stefan Krebs doporučuje pro malý domácí extruder alespoň tři topné zóny – více topných zón má za následek rovnoměrnější ohřev a také možnost rozložení ohřevu do více sektorů. V technické specifikaci Filastruder uvádí typickou rychlost extruze 5–8 hodin na kilogram filamentu nebo také 10 až 36 palců za minutu (25,4 až 91,44 centimetrů za minutu). Samozřejmě záleží na mnoha podmínkách: čistotě plastových pelet, typu materiálu, průměru extruze atd.

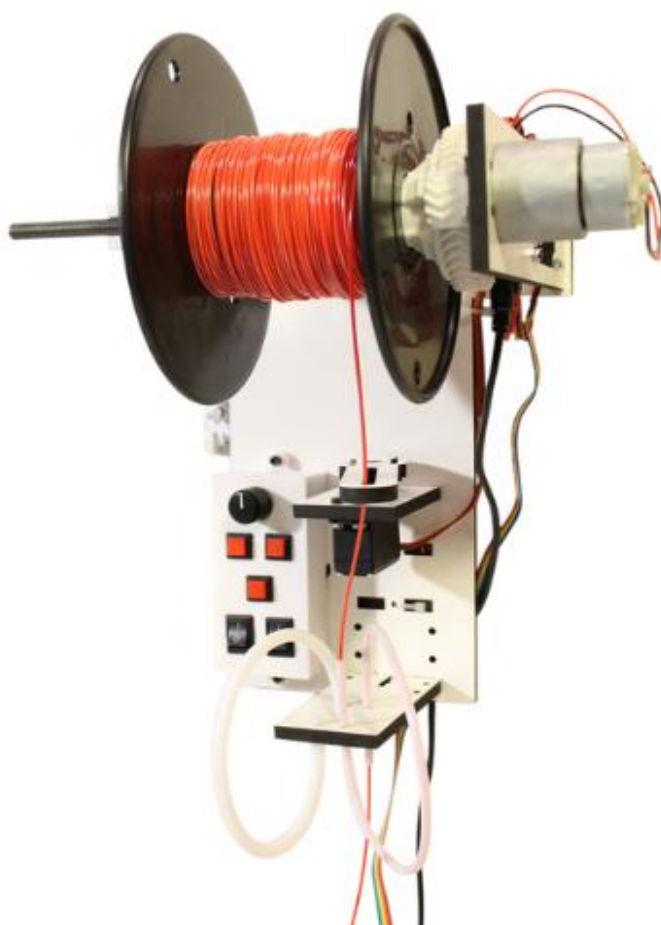
Velice zajímavým produktem od firmy Filastruder je Filawinder (viz Obrázek 2-7, Obrázek 2-8 a Obrázek 2-9). Jedná se o mechanismus, který nemá na trhu obdoby. Tento stroj se specializuje na namotávání extrudovaného filamentu. Skládá se v podstatě ze dvou částí: motoru, který otáčí cívku, a optického senzoru, který slouží jako řídicí jednotka. Tento mechanismus je principiálně ještě jednodušší než samotný extruder. Optický senzor ovládá otáčky motoru tak, aby délka prověšeného filamentu byla přesně v předem vytvořených mezích. Takovéto prověšení filamentu má za následek dvojí: konstantní sílu na právě extrudovaný materiál a dostatečné chlazení materiálu, neboť pro navinutí musí mít filament nižší

teplotu, aby byl ještě tvárný, ale aby se zároveň na sebe už nezačal lepit. Z vlastní zkušenosti mohu říci, že vhodná teplota se pohybuje v rozmezí 40–60 °C. Uvedený způsob chladnutí filamentu má však jeden významný nedostatek. Plast, stejně jako kovy, má tendenci pohlcovat vlhkost vzduchu a jiné nečistoty, přičemž tato nežádoucí schopnost se u obou materiálů projevuje více s rostoucí teplotou. [8] Dále je takto roztavený plast velice lepkavý, kvůli čemuž se na něj mohou přichytit prachové částice ze vzduchu a tím dále zhoršovat vlastnosti filamentu. Je tedy vhodné minimalizovat v místnosti s extruderem vzdušnou vlhkost a snížit počet prachových částic.

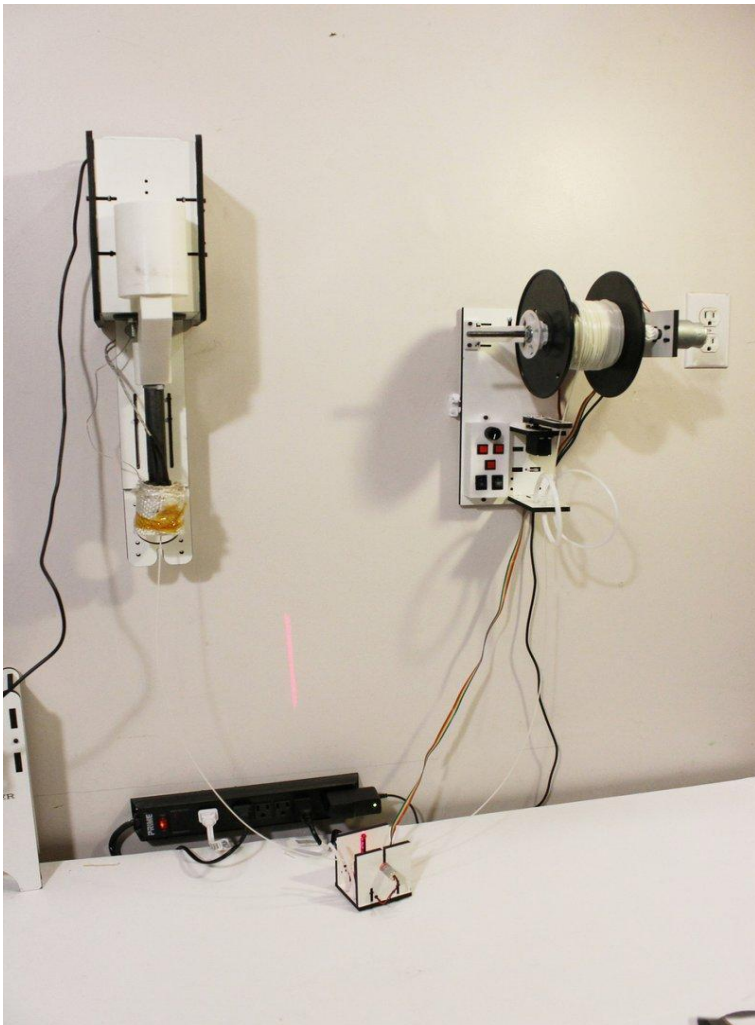
Ačkoliv tento stoj není předmětem mé bakalářské práce, považuji za vhodné jej představit pro jeho jedinečnost, zdánlivě promyšlenou konstrukci a také možnou úzkou návaznost na moji práci.

Přístroj například velmi jednoduše řeší vytvoření nutného napětí pro správné navíjení cívky: Napětí v závitech cívky umožňuje navinutí více závitů na cívku a tím poskytuje snazší skladování filamentu.

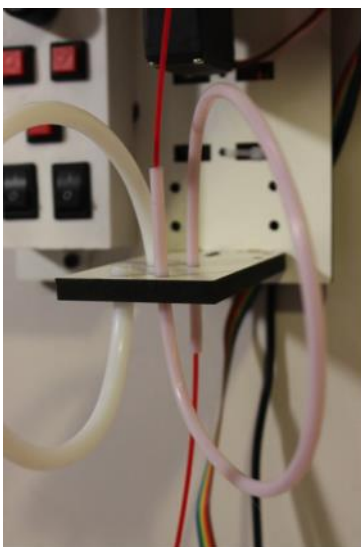
Obrázek 2-7 – Filawinder firmy Filastruder [2]



Obrázek 2-8 – Filawinder firmy Filastruder [2]



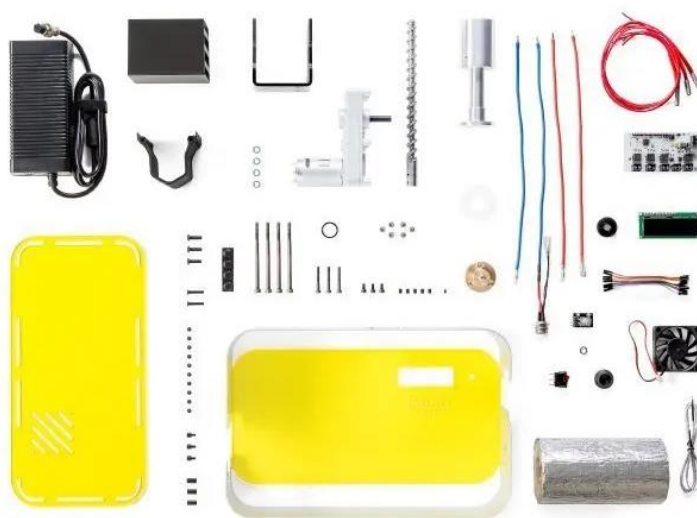
Obrázek 2-9 – Detail stroje Filawinder [2]



2.2.2 Felfil

Felfil [9] je italská společnost sídlící v Turíně a její zařízení nese název Felfil Evo. Firma se snaží vyrábět kompaktnější zařízení, extruder od ní lze koupit buď sestavený a kalibrovaný, nebo je možné nechat si poslat pouze součásti, jak je patrné na obrázku dole. Koupě nesestaveného stroje je významně levnější a kupujícímu nabízí možnost získat při sestavování stroje mnohé poznatky o jeho konstrukci a funkcích. Vystává ovšem otázka, jestli je běžný uživatel dostatečně zručný, aby mechanismus poskládal a zkalibroval správně.

Obrázek 2-10 – Felfil Evo firmy Felfil [9]



Popisované zařízení již obsahuje kompresní šroub, avšak ve srovnání s extruderem od firmy Filastruder tomuto vylepšení odpovídá také výrazně vyšší cena. Již na první pohled je zřejmé, že firma Felfil cílí spíše na bohatší klientelu, do níž jsou pravděpodobně zahrnuti především menší podnikatelé, kteří se 3D tiskem živí, ale nemají ještě takovou spotřebu filamentu, aby se jim vyplatil nákup profesionálního velkoobjemového extruderu. Konstrukcí se tento stroj velice podobá stroji od firmy Filastruder. Dalo by se říci, že oba stroje mají stejné přednosti i nevýhody. Mechanismus má také velice krátkou topnou zónu. Z technické dokumentace je dohledatelné, že tento extruder obsahuje 3 topné zóny, což znamená, že se jedná o sofistikovanější systém extruze. V technické specifikaci je rovněž uvedena obvyklá rychlost extruze 1,15 metrů za minutu.

Firma Felfil také vyrábí Felfil Spooler, což je stroj určený k namotávání extrudovaného plastu. Ve srovnání s modelem od firmy Filastruder se jedná o poněkud sofistikovanější model. Má v sobě kalibrační jednotku – automaticky měří tloušťku extrudovaného filamentu údajně s přesností na 10 mikronů. [9] Dále má zabudovaný displej (viz Obrázek 2-11), který je schopen podávat velké spektrum informací o probíhající výrobě, např. kolik metrů bylo dosud vyrobeno atd.

Obrázek 2-11 – Displej na stroji Felfil Spooler [9]



2.2.3 3devo

Firma 3devo [10] sídlí v Utrechtu v Nizozemsku. Vyrábí čtyři modely plastového extruderu. Firma se zaměřuje na bohatou klientelu – osoby a podniky, kteří požadují nejvyšší kvalitu, čemuž samozřejmě odpovídá i cena. Jedná se o nejdražší kompaktní extruder dostupný na evropském trhu. Extruder obsahuje kompresní šroub na posuv taveniny a 4 topné zóny. Extruder se dále pyšní přesností +/- 0,05 mm průměru vyrobeného filamentu. Přístroj je osazen OLED displejem, který podává detailní informace o běhu extruze. Tento displej je vybaven otočným tlačítkem, kterým se celý přístroj ovládá.

Přístroj firmy 3devo kombinuje oba mechanismy zmíněné u předešlých výrobců, tzn. jak extruder, tak navíječ filamentu do jednoho zařízení. Rychlost navíjení je regulována tloušťkou extrudovaného filamentu, která je

měřena přesným optickým senzorem. Tak dochází k ideální extruzi. Filament samozřejmě musí být aktivně chlazen, neboť se hned po extruzi navíjí. K tomu slouží vestavěné větráky. Stroj navíjí filament na standardní cívku, na níž se dodává nově zakoupený filament.

Tato nizozemská firma také vyrábí produkt SHR3D IT. Jedná se o stroj, který drtí výrobky nebo recyklované materiály na pelety vhodné pro extruder. Drtič je schopen drtit i víčka od PET lahví či jiné drobnější předměty. Možnost drtit víčka je velice zajímavá vzhledem k tomu, že je snadné sehnat si plastová víčka ve velkém objemu. Víčka jsou standardně vyráběna z vysokohustotního polyethylenu, zkráceně HDPE. HDPE je termoplast, což znamená, že ho lze znovu roztavit a znovu použít. Tato funkce stroje SHR3D IT může být velice zajímavá z důvodu možné recyklace plastů. Recyklace plastů je velice moderní trend prosazovaný na celém světě mezinárodními společnostmi, především v Evropské unii.

Firma také vyrábí sušič.

2.2.4 Srovnání komerčně dostupných extruderů

Následující tabulka přehledně srovnává výše popsané extrudery z hlediska ceny a technických specifikací.

Tabulka 2-1 – Srovnání komerčně dostupných extruderů

Vyrábějící firma	3devo	3devo	Felfil	Filastruder
Model	Composer Series	Precision Series	Felfil Evo	Filastruder
Cena	€ 5 350,00 – € 6 350,00	€ 4 850,00 – € 5 850,00	€ 599,00 – € 1 159,00	\$ 299,99 – \$ 469,96 (€ 251,62 – € 394,19)
Rychlost extruze	-	-	1,15 m/min	0,25–0,91 m/min
Přesnost extrudovaného materiálu	43 mikronů	44 mikronů	10 mikronů	20 mikronů
Hmotnost	27 kg	27 kg	9 kg	-
Rozměry	506 × 448 × 216 mm	506 × 448 × 216 mm	1000 × 180 × 100 mm	457,2 × 152,4 × 101,6 mm

Maximální teplota taveniny	350 °C / 450 °C	350 °C / 450 °C	260 °C	250° C
Počet topných zón	4	4	3	-
Typ šroubu posouvající materiál	kompresní šroub	kompresní šroub	kompresní šroub	hadovitý vrták
Možný průměr filamentu	0,5–3 mm	0,5–3 mm	0,5–3 mm	-
Objem trychtýře na pelety	2 l	2 l	1 l	-
Průměrný elektrický příkon	300–400 W	300–400 W	110 W	50 W

3 Cíle práce

Téma práce zadal doc. Martin Novák, protože získal na jemno rozdrčený plast od firmy vyrábějící filament, jedná se o plast z nepovedených cívek filamentu (viz Obrázek 3-1) Domácí výroba filamentu z pelet je významně levnější než nákup filamentu vyrobeného. Námi vyrobený filament by měl mít srovnatelnou kvalitu jako profesionální filament.

Obrázek 3-1 – Pelety pro výrobu filamentu



Navržený extruder by měl být malý a lehký, rozměry by neměl přesahovat 0,5 m a hmotností 10 kg. Měl by být pokud možno přenosný, jednoduchý na ovládání a obsluhu a nejlépe nástěnný, aby zabíral v dílně co nejméně místa a nepotřeboval svůj stolec.

Součástí práce je také stroj, který bude navíjet vyrobený filament.

V úvodu předchozí kapitoly jsem zmínil podomácku vyrobené extrudery. Jejich design pro mne byl velice dobrým opěrným bodem. Mým plánem tedy nebylo vytvořit úplně nový mechanismus, ale jen za pomoci odborníků a vlastního úsudku zdokonalit toto konstrukční řešení. Své návrhy pro vylepšení toho designu, v němž bylo mnoho nedostatků, jsem konzultoval s

doc. Martinem Novákem, Ing. Stefanem Krebsem a s dalšími odborníky z Fakulty strojní, především pak s odborníky z Ústavu konstruování a částí strojů.

4 Mechanická část

Nejdříve bylo zapotřebí zaměřit se na mechanickou část stroje, neboť výroba rámu a dalších mechanických součástí zabere nejvíce času.

4.1 Šroub

První věc, kterou jsem musel zvážit, byla volba šroubu posouvající taveninu, neboť od typu šroubu se odvíjí jeho průměr a délka. V komerčních extruderech se používá kompresní šroub, který lépe vytlačuje plast a zároveň z taveniny odstraňuje bublinky vzduchu. Kompresní šroub má na rozdíl od konvenčního vrtáku proměnnou hloubku závitů, čímž stlačuje taveninu tak, že se pod vyšším tlakem z extruderu extruduje homogenněji. Vyšší tlak také působí vztlakovou silou na bublinky vzduchu, které „stoupají“ proti směru komprese, tj. putují opačným směrem než tavenina, neboť jsou lehčí než tavenina.

Obrázek 4-1 – Srovnání proměnného objemu posouvaného materiálu v kompresním šroubu s konstantním objemem hadovitěho vrtáku [11]



I přes značné výhody kompresního šroubu jsem se rozhodl použít běžný hadovitý vrták do dřeva, protože kompresní šroub je mnohonásobně dražší a jen cena samotného šroubu by převýšila celý rozpočet uvolněný fakultou. Hadovitý vrták sice nemá takovou povrchovou tvrdost jako profesionální kompresní šroub, ale pro naši aplikaci domácí výroby filamentu nebude snížená tvrdost povrchu a tudíž kratší trvanlivost vadit. Další nevýhodou hadovitěho vrtáku je jeho netolerovaný, a tedy nedostatečně přesný **válcový povrch**. Abych předešel zmatení, budu dále o hadovitěm vrtáku mluvit jako o šroubu.

4.2 Trubky

Druhým krokem k výrobě extruderu byla volba trubek, v nichž se šroub otáčí. Volil jsem standardizované potrubí dle DIN 2440, které je velice dobře dostupné – rozměry dle normy viz Tabulka 4-1. Díky standardizovaným závitům, jimiž se spojují, bude celý mechanismus rozebíratelný a tedy velice snadno modifikovatelný. Dle normy se řídí pouze jeden rozměr trubky – vnitřní průměr má celé číslo, protože se však jedná se o průměr 16 mm, je trubka dobře použitelná (vnitřní průměr musí být celé číslo, jelikož šrouby se dělají pouze v celočíselných průměrech).

Tabulka 4-1 – Trubka se závitem odpovídající DIN 2440 [12]

Nominální průměr DN vnitřní	Trubkový závit R.	Vnější průměr v mm	Vnitřní průměr v mm
6	1/8"	10,2	6,2
8	1/4"	13,5	8,8
10	3/8"	17,2	12,5
15	1/2"	21,3	16,0
20	3/4"	26,9	21,6
25	1"	33,7	27,2
32	1 1/4"	42,4	35,9
40	1 1/2"	48,3	41,8
50	2"	60,3	53,0
65	2 1/2"	76,1	68,8
80	3"	88,9	80,8
100	4"	114,3	105,3
125	5"	139,7	130,0
150	6"	165,1	155,4

4.3 Rám

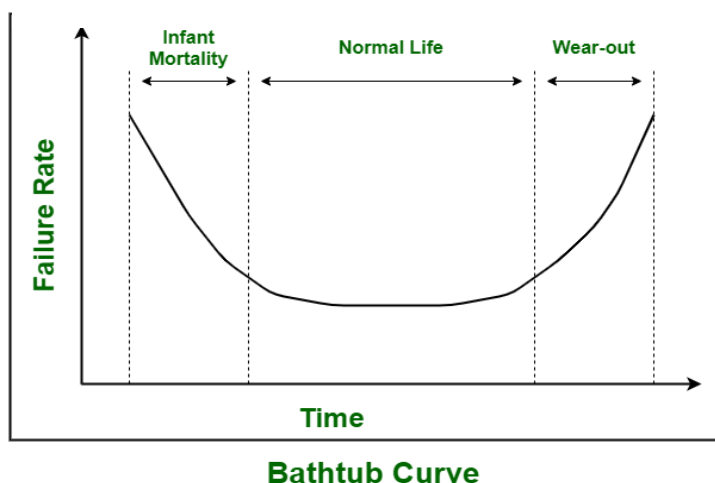
Celý rám byl svařen z výpalků z plechu o tloušťce 5 mm a přimontován na zeď pomocí několika nosných šroubů. Nejdůležitější detaily v rámci návrhu rámu jsou následující:

1. Je důležité efektivně propojit všechny součásti v sestavě. Je třeba aby byl mechanismus připevněný ke zdi a zabíral co nejmenší možný prostor. Přidělení ke zdi bude realizováno pomocí čtyř šroubů přivrtnaných ke zdi.
2. Je třeba, aby rám byl dostatečně tuhý a odolával silám vyvolaným při chodu mechanismu. Rám se nesmí deformovat a prohýbat, aby

nedocházelo k deformacím trubek. Je třeba minimalizovat oděr vrtáku o stěny potrubí, aby se prodloužila životnost stroje.

3. Rám by měl být co možná nejjednodušší, protože jednodušší předměty mívají vyšší životnost než předměty složité.
4. Cena rámu by měla být co možná nejnižší.
5. Celý rám by měl být snadno smontovatelný.
6. Rám by měl být dobře modifikovatelný. Snadná modifikovatelnost je mnohem výhodnější vzhledem k tomu, že se jedná o prototyp a může tudíž nastat potřeba následného vylepšování rámu.
7. Rám musí být snadno opravitelný. Jak bylo již výše zmíněno, jedná se o prototyp a v prototypch je vysoká pravděpodobnost poruchy, jak ukazuje křivka poruchovosti na Obrázku 4-2. Zobrazená křivka popisuje poruchovost prototypů v závislosti na čase. Z grafu vycházejí dva logické závěry: Největší poruchovost je zaprvé na začátku prototypování, jelikož mechanismus není optimalizován, zadruhé na konci, když jsou součásti opotřebované a mohou se porouchat.

Obrázek 4-2 – Křivka poruchovosti prototypů [13]



4.4 Přenos kroutícího momentu z motoru na šroub

Vstupní hřídel hadovitého vrtáku je šestihran s rozměrem od plochy k ploše 10 mm. Výstupní hřídel šnekové převodovky připojené k motoru je ukončena závitovou tyčí se závitem M8. Jako možné propojení těchto

hřídelů by tedy bylo vhodné použít trubku, která by měla na jedné straně 10mm šestihran a na druhé straně 14mm šestihran (tento šestihran odpovídá šestihranné matici M8). Avšak takovýto kus není standardizovaný, musel by se tedy nechat zakázkově obrobit na CNC obráběcím centru a jeho výroba by tedy byla pravděpodobně velice nákladná. Je tedy potřeba najít jinou spojku. Podle mého úsudku by nejlepším řešením bylo udělat dvojspojku, tj. převést oba rozlišné šestihrany na jeden normalizovaný tvar a pak pomocí tohoto tvaru obě spojky propojit.

Nabízí se jednoduché řešení, a sice využít dvou nástrčných šestihranných hlavic (ořechů) propojených čtvrtalcovým kvádrem s čtvercovou podstavou. Tyto součásti jsou normované a v porovnání se zakázkovou výrobou spojky velice levné. Většinou jsou vyráběny z vysokolegovaných nástrojových ocelí a jsou dimenzované na obrovské utahovací momenty (největší ořech ze sady je rozměru 30, tedy pro šroub M20, pro pevnostní třídu 8.8 je doporučený utahovací moment 406 Nm[14]), neměl by tedy být problém přenést moment z motoru (5,5 Nm, měřeno staticky) na hřídel vrtáku. Mezikus, čtvrtalcový čtyřhranný kvádr, je velice snadné a časově nenáročné vyrobit téměř z jakékoli plně tyče. Ovšem z hlediska namáhání na krut by mohl být tento čtyřhran, pokud by byl vyroben z běžné konstrukční oceli, nevyhovující.

Výpočet maximálního krouťícího momentu přenositelného pomocí čtyřhranu.

$$M_{krutmax} = \tau_D * W_k = \tau_D * \frac{J_k}{n_{max}} = \tau_D * \frac{\frac{1}{3} * a^4}{\frac{a}{2}} = 70 * \frac{\frac{1}{3} * 12,7^4}{\frac{12,7}{2}} = 95 Nm^2$$

Za normálních podmínek je tento čtyřhran součástí gola klíče, tudíž je vyroben ze stejného materiálu jako nástrčné šestihranné hlavice, tj. z vysokolegované nástrojové oceli. Rozměry čtyřhranu jsou tak sice dimenzovány na stejné krouťící momenty jako nástrčné hlavice, tyto momenty jsou však počítány s pevnostními vlastnostmi vysokolegované, nikoli konstrukční oceli ze které budu čtyřhran vyrábět já.

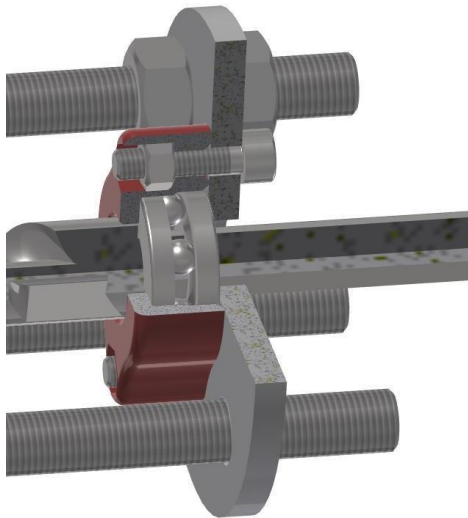
Spojka je schválně konstruována s malými vůlemi tak, aby se díly mohly volně naklánět a aby mohla spojka odebírat nepřesnosti v uložení. Spojka se chová jako zdvojený Kardanův kloub.

Během montáže a raného testování vyšlo najevo, že vrták se musí točit doleva, aby vytlačoval materiál kupředu, neboť je konstruován na pravotočivé motory a má vytlačovat piliny zpět, tedy ven z vrtaného otvoru, v naší realizaci je ale třeba vytlačování materiálu dopředu. Problém však je, že přenos momentu z motoru je realizován pomocí matice našroubované na hřídelce a při točení vrtáku doleva se tato matice může povolit. Daný problém jsem konzultoval s konstruktéry z Ústavu konstruování a částí strojů a shodli jsme se, že jediné možné řešení je matici zavařit na hřídel. Na hřídelce totiž není dost místa na dvě matice dotažené proti sobě, aby se nepovolovaly, a použití korunové matice také není možné, jelikož na matici se musí nasadit nástrčná šestihranná hlavice, která neumožňuje umístění závlačky. Matice tedy byla přivařena na hřídel třemi malými bodovými svary.

4.5 Zajištění kolmosti součástí vůči rámu a vzájemné sousosti rotačních součástí

Dále bylo nutné zajistit kolmost a sousost uložení vrtáku vůči svařnému rámu a zachytit axiální síly z vrtáku způsobené extruzí plastu. K uchycení normovaných trubek k rámu byla použita matice s normovaným závitem G 1/2“, kterou jsem přivařil k rámu. Matice zajišťuje kolmost a sousost potrubí s rámem. K zajištění kolmosti vrtáku k rámu, sousosti s potrubím a k axiálnímu zajištění vrtáku jsem navrhl 3D tištěný domek pro axiální ložisko společně s plechovou podložkou uchycenou čtyřmi šrouby s jemným závitem pro možnost citlivějšího kalibrování kolmosti. Axiální zajištění vrtáku je dobře patrné na obrázku dole.

Obrázek 4-3 – Axiální zajištění vrtáku



4.6 Axiální síly ve vrtáku a zajištění spojky

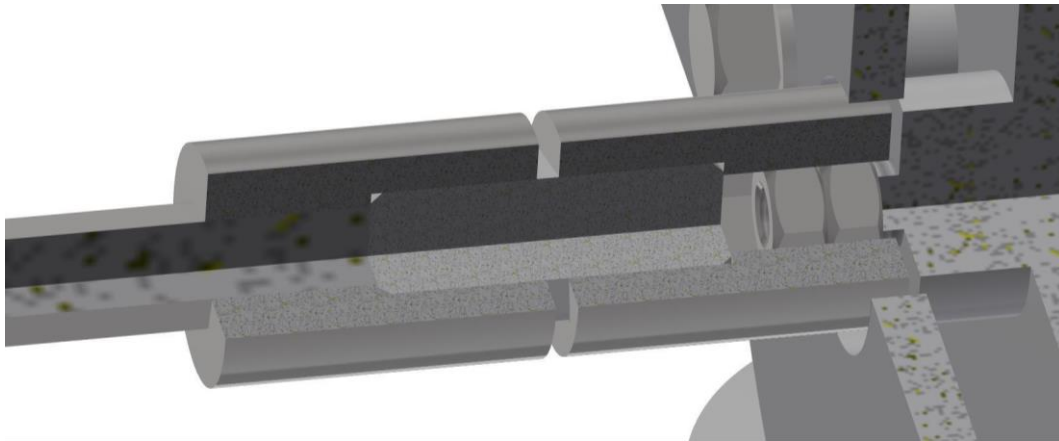
Dle odhadů pana Ing. Stefana Krebse, odborníka na extruzi plastů z Ústavu strojírenské technologie, bude na konci extruderu vznikat nejvýše 200 bar a axiální síla ve vrtáku tudíž bude 4 kN.

Výpočet síly ve vrtáku

$$F = p * S = 200 * 100\,000 * \pi * 0,008^2 = 4021N$$

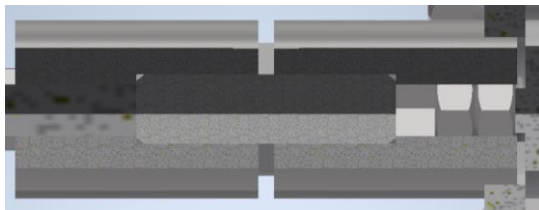
Je tedy nutné užít axiální ložisko. Kdybychom axiální síly z vrtáku neodebrali ložiskem, všechna tato síla by se přes spojku přenesla do šnekové převodovky, která na takové axiální zatížení není dimenzována. Motor by se pravděpodobně zadřel a neotáčel by se, kvůli čemuž by došlo k spálení vinutí.

Obrázek 4-4 – Detail spojky



Dále bylo také třeba axiálně zajistit posuv článku spojky (její detail viz nahoře). Avšak z logiky uspořádání mechanismu je zjevné (motor je pevně spojen s rámem a vrták je zajištěn axiálním ložiskem a z silou z extruze), že axiální posuvy spojky nejsou možné. Celý mechanismus bude zleva zajištěn axiální silou vrtáku, jak je vidět na obrázku dole a zprava motorem, pevně sešroubovaným s rámem.

Obrázek 4-5 – Axiální zajištění dvojspojky



4.7 Trychtýř

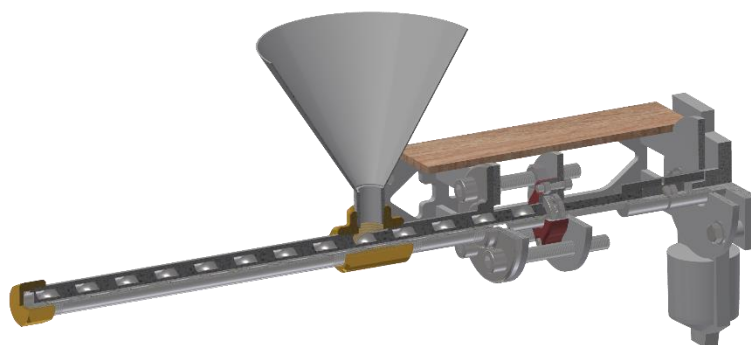
Umístění trychtýře je ovlivněno orientací extruderu, přičemž ta může být dvojitá: je možné vést osu vrtáku buď vodorovně, či svisle. Každá poloha má přitom jak výhody, tak nevýhody.

Vodorovná osa vrtáku je obecně v průmyslu běžnější, neboť v této orientaci se stroj lépe ovládá a také se lépe skládá, jelikož nejsou třeba vysoké stropy a složitější podpory, aby se extruder nehroutil pod vlastní vahou – stroj se pouze podepře na několika místech, aby se neohýbal. Veliká výhoda je také snazší dodávání surového materiálu, protože materiál samovolně padá do vrtáku vlivem gravitace.

U svisle orientovaného extruderu je veliký problém s podáváním materiálu pouze pomocí trychtýře: Nejen že by trychtýř jako takový musel být tvarově složitější, aby byl schopen dodávat materiál ze strany, navíc zde může docházet k častějšímu zasekávání pelet filamentu kvůli jejich komplikovanější cestě. Svislý extruder má však i mnoho výhod. Filament se vytlačuje z extruderu a samovolně pokračuje souose s vrtákem díky gravitačnímu poli a není hned po extruzi ohýbán, jak tomu může být u vodorovného extruderu. Také zde vzniká větší prostor na samovolné odvzdušňování taveniny.

Ve svém řešení jsem zvolil konvenční vodorovnou orientaci vrtáku a také obyčejnou konstrukci trychtýře pro dodávání materiálu určeného k přeformování na filament. Trychtýř jsem si musel vyrobit svépomocí, protože se na trhu nevyskytují trychtýře, jež by odpovídaly mým požadavkům. Trychtýř jsem si vymodeloval podle potřebných rozměrů a objemu, následně jsem si nechal vypálit z plechu potřebný tvar a pak jsem ho ručně vytvaroval a svařil. Obrázek 4-6 zobrazuje celý model strojků i s trychtýřem.

Obrázek 4-6 – Model strojků



4.8 Potrubí pro extruzi

Jak jsem již výše zmiňoval, rozhodl jsem se použít normované potrubí podle DIN 2440 o rozměru 1/2“. Tato podsestava se skládá z matice přivařené k rámu kratšího kusu potrubí, následuje T kus a pak dlouhý kus potrubí, na kterém jsou topná tělesa. K T kusu je připojen trychtýř na dodávání materiálu pro tavení. Na konci je potrubí uzavřeno zátkou, ve které je přesný

otvor pro extruzi filamentu o průměru 1,75 mm. Dle doporučení Ing. Stefana Krebse jsem díru v zátce udělal cca o 20 % menší, než je požadovaný průměr filamentu. Filament se po protlačení tryskou trochu zvětší.

Potrubí má na koncích průmyslově vyřezané kuželové závity R 1/2“. Protože se jedná o kuželový závit vytvářený průmyslově, byla vnitřní stěna potrubí na okrajích zborcená od výroby kuželového závitu a bylo třeba potrubí výstružníkem začistit, aby mělo potrubí po celé délce průměr 16 mm.

5 Návrh a výroba navíječe filamentu

Součástí mé bakalářské práce je také stroj, který bude navíjet vyrobený filament, aby bylo možné snadno využít filament přímo pro 3D tisk.

Navíjet se bude na standardní buben od již využitého filamentu. Je potřeba velice přesně kontrolovat otáčky bubnu, aby docházelo k správné extruzi filamentu. Otáčky bubnu budou přímo regulovat tloušťku filamentu, protože ho budou vytahovat z trysky. U konvenčních strojů je běžně udávána extruze kolem 1 m/min, což při středním průměru bubnu 120 mm činí cca 2,5 otáčky za minutu.

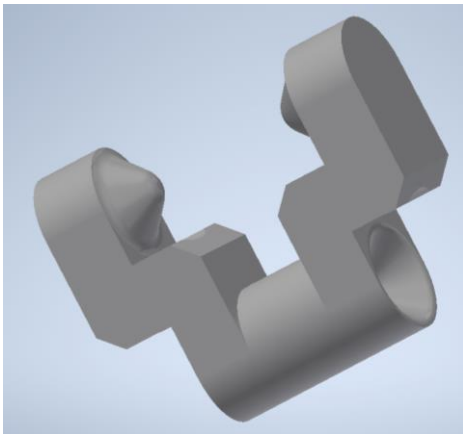
$$n = \frac{v_{extruze}}{o_{bubnu}} = \frac{v_{extruze}}{\pi * d} = \frac{1}{\pi * 0,12} = 2,65 \text{ min}^{-1}$$

Je tedy třeba opravdu nízký počet otáček s velkou přesností regulace otáček. Volil jsem proto krokový motor NEMA 17. K převodu momentu z hřídele motoru na hřídel s navíjecím bubnem jsem použil řetězový převod, protože pevně svazuje otáčky obou hřídelů.

Cena mechanismu musela zůstat co nejnižší, proto jsem se rozhodl kompletně celý mechanismus vytisknout na 3D tiskárně, a to včetně řetězu. Při návrhu řetězu jsem se inspiroval normou DIN8187. Rozteč a průměr čepů jsem volil dle rozměru 05B-1, avšak ostatní rozměry museli být nestandardní z důvodu technologie výroby. Na obrázku 5-1 je znázorněn jeden článek řetězu.

Toto řešení výroby pomocí 3D tisku bylo možné také proto, že síly, které se budou v převodu přenášet, jsou minimální. Řetěz jsem tiskl po celých segmentech, tedy mnoho článků najednou v “smontovaném” stavu. Tento způsob významně ušetřil čas potřebný pro montáž.

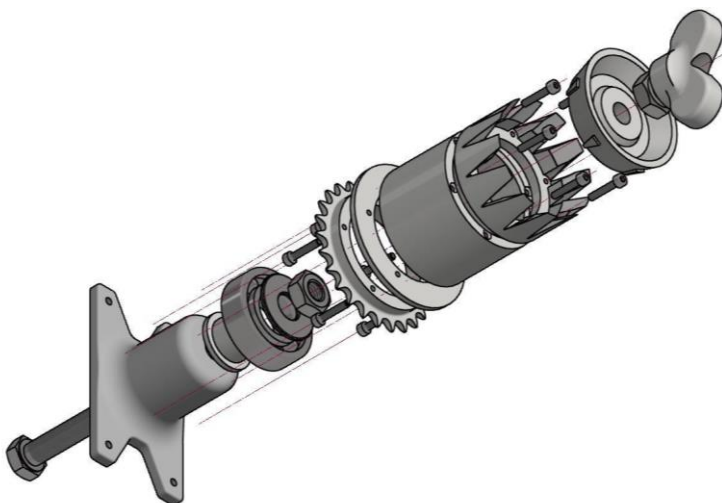
Obrázek 5-1 – Článek řetězu



Normou jsem se inspiroval hlavně z důvodu potencionálních úprav během prototypování. Tloušťku materiálu, ze kterého by články řetězu sestávaly, pokud by byly vyrobeny z plechů, jsem ztrojnásobil, jelikož plast nemá takovou pevnost v tahu, a kdybych stěnu nerozšířil, mohlo by docházet k trhání řetězu. Pokud by i přes rozšíření stěny docházelo k trhání řetězu, je možné zapojit více řetězů paralelně, protože další zvětšování tloušťky stěn není možné. Z testování pevnosti řetězu vyplývá, že maximální síla přenositelná řetězem je cca 157 N. Dodržení normy má svoji výhodu především pro případ, kdyby bylo potřeba měnit rozměr řetězových kol kvůli změně převodového poměru. Modelování jiných řetězových kol tak bude v budoucnu jednoduché.

Jedno řetězové kolo jsem nalisoval na hřídel krokového motoru, druhé je usazeno na ložisku a unáší buben s filamentem, jak je vidět na obrázku dole.

Obrázek 5-2 – Sestava navíječe filamentu



6 Elektrotechnická část

6.1 Řízení

Jako řídicí jednotku jsem použil Arduino MEGA 2560. Většinu vývoje a testování jsem prováděl na desce Arduino UNO. Testoval jsem na ní jednotlivé podsestavy, na řízení celého mechanismu by však tato deska nestačila, protože má nedostatečné množství pinů a také málo operační paměti.

6.2 Ovládání vývojové desky

Na vývojovou desku MEGA 2560 je napojen, mimo jiné, Bluetooth modul HC-05. Deska skrze tuto modul komunikuje s chytrým telefonem, na kterém je nainstalovaná uživatelsky přívětivá aplikace, kterou jsem si sám naprogramoval (o ní viz níže). Bluetooth modul přijímá povely z telefonu a odesílá zpětnou vazbu, jako je teplota topných zón, otáčky motorů apod.

Celé řízení však probíhá čistě na vývojové desce, připojení telefonu tudíž není nutné a je pouze koncipováno jako HID (human interface device, zařízení pro interakci s člověkem). Zvolené řešení je podstatně robustnější; zařízení by se totiž nemělo spoléhat na přenos dat k svému chodu, neboť se nejedná o spolehlivé připojení. Navíc není vhodné, aby byl telefon připojen stále, protože by nebylo možné se vzdálit a efektivně používat mobilní telefon.

6.3 Topná tělesa

Arduino ovládá tři topná tělesa, každé o příkonu 500 W, jež jsou napájena ze 230V zásuvky, Arduino je tedy nemůže řídit přímo. Aby bylo ovládání topných těles možné, užil jsem SSR (solid state relay, polovodičové relé) s funkcí spínání v nule, což znamená, že relé má v sobě zabudovaný triak. Tato funkce umožní jemněji regulovat napětí na topných tělesech.

6.3.1 Měření teploty

Na každou topnou zónu je napojen jeden termočlánek typu K. Tento článek je nutný z důvodu zpětnovazební regulace PID. Termočláanky fungují na principu termoelektrického jevu. Protože termočláanky jsou schopny vytvořit

pouze velice malé napětí, potřebují předřadník, který mění signál z termočlánků do formátu, který je pro Arduino srozumitelný. Použil jsem termočlánekový převodník MAX6675. Jedná se o velice snadno dostupný a levný převodník, který je schopný měřit teplotu až do 1000 °C s rozlišením 0,25 °C.

6.3.2 PID regulace

Každá ze tří topných zón je zvlášť regulována PID regulátorem pro dosažení optimálních výsledků extruze. Přepočítání PID regulace probíhá v intervalech 300 ms. Program nejdříve načte teplotu z termočlánků a uživatelem požadovanou teplotu. Poté vypočítá potřebný okamžitý příkon topení pro optimální udržení či dosažení požadované teploty. Výsledný požadovaný okamžitý příkon se pak pomocí protokolu PWM nastaví na SSR. Nejedná se tedy o přímo spojitě řízení. Hlavní důvod implementace těchto intervalů je ten, že s ohledem na tepelnou setrvačnost soustavy častější výpočet nemá smysl.

Druhým problémem je, že termočlánek prakticky nedokáže teplotu měřit spojitě. Logicky bez spojitěho měření teploty nelze regulovat spojitě, jelikož by informace o teplotě nebyla vždy aktuální a PID regulátor by se pravděpodobně nechoval podle předpokladů.

Arduino regulaci přepočítává významně rychleji, než je časová konstanta soustavy, lze tedy říci, že se systém bude chovat jako by byl spojitý.

6.3.3 Aktivní chlazení mechanismu

Mechanismus je vybaven dvěma větráky na ochlazení součástí, které by se neměly zahřívat, nebo by dokonce měly být úplně chladné.

Na jedné straně mezi tyto součásti patří trychtýř, ve kterém je nasypán surový materiál určený pro extruzi. Pokud by docházelo k ohřevu trychtýře, mohl by se materiál tavit už v něm a lepil by se na stěny. Jelikož extrudovaný plast je amorfni materiál, nemá přesně daný bod tání a pouze se s teplotou mění jeho viskozita. Takto částečně natavený materiál nalepený na stěnách trychtýře by bránil přirozeném sesuvu materiálu do potrubí extruderu a docházelo by tak k „ucpání“ extruderu.

Na druhé straně se jedná o trysku extruderu, ze které je vytlačován materiál. Materiál je třeba co nejrychleji ochlazovat, aby mohl být snadno navíjen na bubnu. Roztavený plast je poměrně lepkavý, takže je náchylný k zachycování vzdušného prachu, zároveň natavený plast v atmosféře pohlcuje vlhkost. Je tedy třeba, aby se extrudovaný plast ochladil z teploty extruze okolo 250 °C na teplotu navíjení (cca 60 °C) co možná nejrychleji.

6.4 Řízení extruze

Na řídicí člen Arduino je také připojen motor se šnekovou převodovkou, který otáčí vrtákem a tím extruduje plast. Tento motor je rovněž ovládán pomocí PWM. Arduino posílá PWM signál na dva paralelně zapojené H-můstky. H-můstky propojují obvod motoru se zdrojem stejnosměrného napětí. Zde by místo dvou H-můstek stačilo zapojit jeden tranzistor, protože není třeba měnit otáčky motoru

6.5 Ovládání navinování extrudovaného materiálu

Jelikož navinovač se musí točit velmi pomalu a relativně přesně, použil jsem k navinování malý krokový motor. Z mnoha druhů krokových motorů jsem užil nejběžnější malý krokový motor s dvěma cívkami NEMA 17. Arduino samozřejmě nemůže řídit krokové motory přímo, musí se užít mezičlen, který unese protékající proud nutný pro chod motoru, a zároveň jej bude možné řídit Arduinem. Za tento mezičlen mi posloužil microstep driver TB6600. Tento driver snese až 4,5 A, což je více než trojnásobek maximálního dovoleného proudu na krokový motor, jako mezičlen je tedy více než dostatečný.

Krokový motor je řízen jednotlivými pulzy a jeden pulz indikuje jeden krok motoru. Kroky motoru mohou být různě dlouhé. Počet kroků a jejich rozměr je určen počtem vinutí na statoru. Čím jsou kroky delší tím je motor rychlejší ale ztrácí přesnost. Navíc Arduino má omezen maximální počet pulzů za sekundu, který je schopno vydat frekvencí taktu procesoru. Z vlastní zkušenosti vím, že není vhodné po Arduinu požadovat více než 4000 pulzů za sekundu. Pak už Arduino nemusí stíhat vyslat všechny pulzy a může docházet k občasnému přeskočení kroku.

7 Software

Softwarová část práce se v podstatě dělí na dvě části. Na aplikaci v telefonu, která funguje jako dálkové ovládání a umožňuje snadné ovládání uživatelem. Druhá část programu je nahrána na desce Arduina – na mikroprocesoru je nahrán program, který čte data z aplikace a senzorů a podle všech těchto informací upravuje chod stroje jako takového. Mezi těmito členy je nastavena komunikace pomocí Bluetooth protokolu. Aplikace a deska si vyměňují data v podobě Stringu (řetězci) dvakrát za sekundu.

7.1 Data z telefonu

Z telefonu se do desky posílají požadované teploty všech topných zón, otáčky motoru pohánějící šroub, jenž extruduje plast, otáčky navíječe namotávající filament a požadované hodnoty P, I, a D pro všechny tři PID regulátory regulující teplotu.

7.2 Data z Arduina

Z vývojové desky se do aplikace odesílají data potřebná pro kontrolu uživatelem. Jedná se o aktuálně naměřené teploty v jednotlivých topných zónách, nastavené (požadované) teploty v topných zónách, aktuální otáčky a nastavené otáčky navíječe a motoru otáčejícího šroub. Arduino také posílá všechny nastavené hodnoty pro veškeré PID regulátory. Tolik dat je třeba odesílat z dvou důvodů.

Jednak se může stát, že se spojení mezi deskou a telefonem přeruší, ať už záměrně, nebo samovolně. Deska je koncipována tak, aby fungovala samostatně, a připojení telefonu je potřebné pouze pro změnu nastavení. Deska tedy neustále odesílá všechna data, aby uživatel mohl vidět všechny informace a nastavení na desce, i když se telefon připojí během chodu stroje.

Druhý závažnější důvod odesílání všech dat je poruchovost a snadnější ladění. Kdyby program požadované hodnoty četl a zobrazoval přímo v aplikaci, mohlo by se stát, že by se data k desce z nějakého důvodu nedostala, ale v aplikaci by vše vypadalo správně. Jedná se tedy o jistou míru zpětnovazební korekce systému. Tato metoda sice přidává zpoždění

v odezvě aplikace, ale je to nejlepší řešení pro prototypování. Pokud by se jednalo o produkt již určený na trh, toto zpoždění by se pravděpodobně eliminovalo a užilo by se pouze dopředné řízení.

7.3 Aplikace na Android

Aplikaci jsem psal v rozhraní MIT App Inventor. Jedná se o původní projekt Googlu, jenž měl za cíl zjednodušit tvorbu aplikací pro rozhraní Android. Google však později od projektu odešel a zdálo se, že nemalý potenciál této iniciativy zůstane nevyužitý. Nakonec se však americká univerzita Massachusetts Institute of Technology rozhodla této platformě dát druhý život a systém nyní funguje pod záštitou univerzity. [15] Jedná se o velice uživatelsky příjemné rozhraní, které umožní i začínajícím programátorům tvořit pokročilé aplikace pro chytré telefony. Aplikace umí využít téměř všechny funkce telefonu včetně GPS systému, Bluetooth antény, fotoaparátu, záznamníku, gyroskopu, kompasu a mnohého dalšího. Existence takových platforem má bezesporu mnoho výhod, neboť se díky nim není třeba učit programovat a ovládat komplexní systémy chytrých telefonů, čímž je jakákoli tvorba aplikací významně usnadněna.

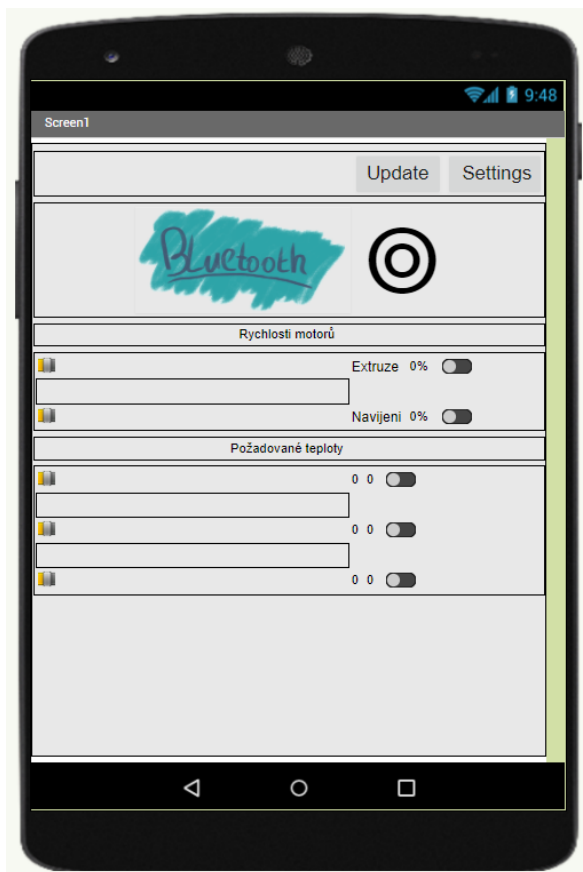
7.4 Hlavní obrazovka

Aplikace, již jsem napsal, má velice jednoduchý vzhled, který ukazuje Obrázek 7-1. V hlavním uživatelském rozhraní se ukazuje základní přehled teplot a otáček motorů. Každá teplota lze nastavit zvlášť pomocí digitálního potenciometru, stejně jako rychlost extruze a rychlost navíjení. Každý digitální potenciometr má vedle sebe vypínač, který nastaví na posouvátku minimální hodnotu, čímž danou podsestavu de facto vypne, s jedním rozdílem: když se na PID regulátoru nastaví 0, nemusí hned PID regulátor vypnout topný článek a může ještě pár sekund topit. Až poté se topné těleso kompletně odpojí od proudu.

V tomto menu je také možnost připojení přes Bluetooth k extrudéru. Jako tlačítko slouží samotný nápis Bluetooth, kterým se otevře seznam momentálně spárovaných Bluetooth zařízení. Poté, co si uživatel vybere příslušné zařízení, je telefon připojen, začíná přenos dat a aplikace může

fungovat správně. Vedle samotného tlačítka Bluetooth je ukazatel připojení, který po připojení svítí modře, a červeně, když je spojení přerušeno.

Obrázek 7-1 – Hlavní obrazovka



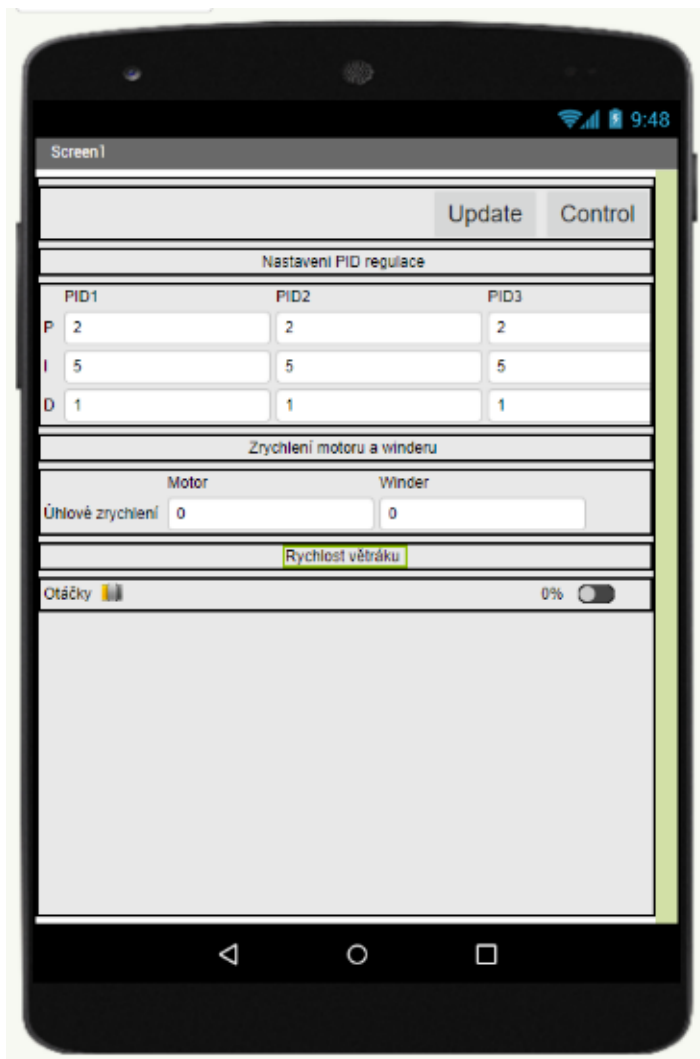
V horní liště jsou dvě tlačítka. Tlačítko Update, česky Aktualizovat, aktualizuje informace na displeji. K aktualizaci naměřených teplot v topných zónách dochází automaticky, toto tlačítko tak slouží k aktualizaci pozic posouvátek a tím i aktualizaci nastavených teplot. Tlačítko Update je v aplikaci z důvodu případného odpojení telefonu od extruderu: po opětovném připojení uživatel toto tlačítko stiskne, aby se mu zobrazilo aktuální nastavení extruderu. Druhé tlačítko Settings, česky Nastavení, slouží k přechodu do druhé obrazovky, tedy do pokročilého nastavení extruderu.

7.5 Obrazovka Settings

V tomto vyobrazení, jež znázorňuje Obrázek 7-2, je tabulka s hodnotami P, I a D pro PID regulátory. Uživatel může do příslušných políček vpisovat jejich hodnoty a ty se automaticky posílají do Arduina.

Regulátor je vždy naladěn pouze na jeden daný systém a funguje úplně správně pouze pro tento daný systém. Když se například zhorší kvalita izolace topných zón, nemusí už regulátor pracovat správně. Uživatel by také mohl chtít využít extrudér na extruzi jiného plastu, který může mít jiné termodynamické vlastnosti.

Obrázek 7-2 – Obrazovka Settings



7.6 Funkce aplikace na chytré telefony

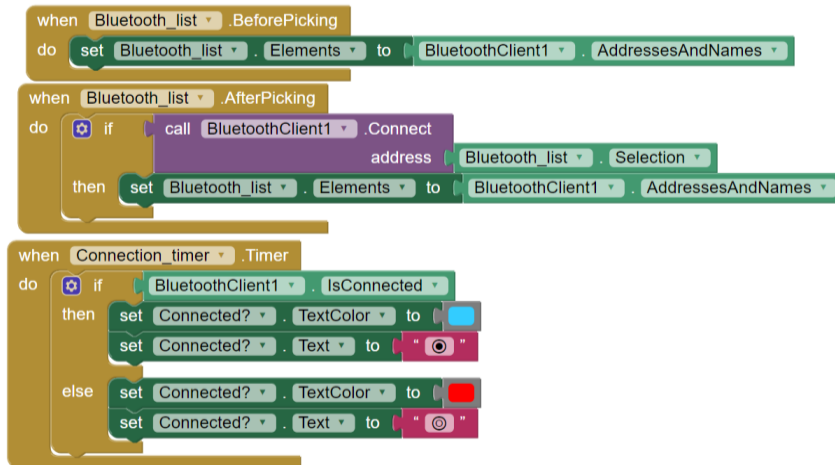
Program aplikace se skládá ze tří hlavních částí, jež popíšeme v následujících podkapitolách.

7.6.1 Blok na Bluetooth připojení k desce

Funkce toho bloku, který je zobrazen na Obrázku 7-3, je relativně přímočará. Po stisknutí tlačítka se uživateli ukáže okno s možnými

zařízeními, uživatel si vybere příslušnou desku, program se na ni připojí a zobrazí uživateli, že je připojen, pomocí zbarvení a vyplnění kroužku, který byl vidět v náhledu aplikace.

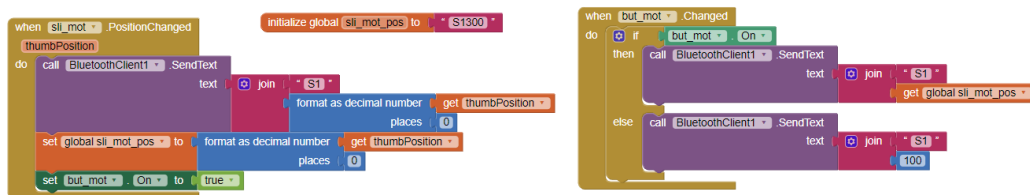
Obrázek 7-3 – Blok na Bluetooth připojení k desce



7.6.2 Blok na odesílání potřebných dat

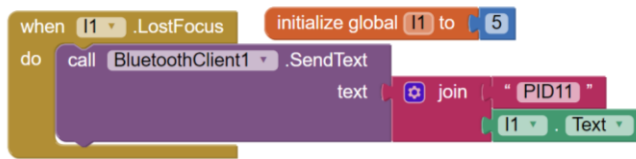
Tento blok, zobrazený na Obrázku 7-4, bere data z pozice digitálního potenciometru a odesílá je do desky. Aby se aplikace nepřetěžovala, jsou data odesílána, pouze když je pozice na potenciometru změněna. Tato změna potenciometru také opticky zapne vypínač, aby se data mohla odeslat. Pozice se také vždy ukládá, aby při zapnutí vypínače mohl vypínač odeslat poslední polohu potenciometru.

Obrázek 7-4 – Blok na odesílání potřebných dat



Tento blok se v programu opakuje mnohokrát pro každý digitální potenciometr. Vždy je ovšem logicky v bloku změněn název proměnných, viz obrázek dole.

Obrázek 7-5 – Blok na odesílání hodnot pro PID regulátory

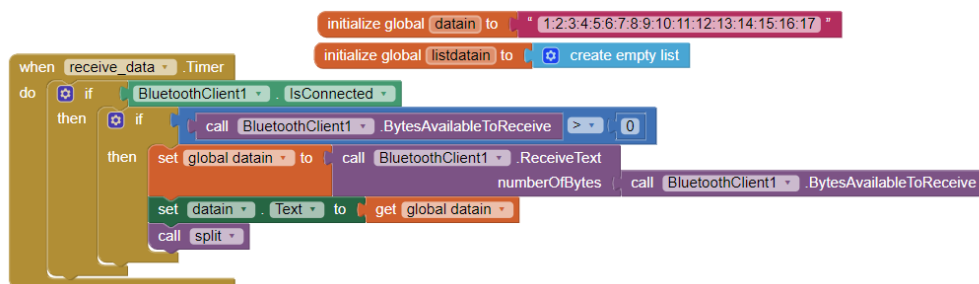


Blok odesílající potřebný koeficient PID regulátoru je samozřejmě jiný, neboť vstup PID regulátoru není digitální potenciometr, ale textové pole. Textové pole je zde výhodnější, jelikož uživatel může rovnou přesně nastavit vypočtenou hodnotu potřebnou pro správný chod regulátoru. Textové pole je výhodné také proto, že digitální potenciometr má jen daný rozsah a pro zvětšení rozsahu by se musel měnit program. Nastavit obrovský rozsah nelze, protože pak by rozlišení digitálního potenciometru nebylo dostatečné a nešla by tudíž zvolit přesná hodnota a regulátor správně naladit.

7.6.3 Blok na příjem dat

Tento blok (viz Obrázek 7-6) čte data z desky ve formátu Stringu a jednotlivé veličiny jsou zde odděleny dvojtečkou. V programu je přednastavená podoba přijímaného Stringu následovně: 1:2:3:4:5:6:7:8:9:10:11:12:13:14:15:16:17. Toto je nutné, aby měl program po spuštění data, která umí zpracovat, a nehlásil chybu před připojením na desku. Tento blok si pouze uloží přijatá data a pak je pomocí funkce split (česky rozděl, viz Obrázek 7-7) rozděljuje.

Obrázek 7-6 - Blok na příjem dat



Obrázek 7-7 - Prvních pár řádků funkce split



7.7 Funkce split

Tato funkce bere uložená přijatá data, rozděljuje je podle dvojteček a odesílá do příslušných informačních panelů. Funkce také konvertuje přijatá data do srozumitelných rozsahů, aby byla data přehledná pro uživatele, protože rychlosti motorů je přehlednější zobrazovat v procentech, nikoli v nativním rozsahu, který požaduje PWM regulace, či v rozsahu vhodném pro funkci krokového motoru.

7.8 Blok pro tlačítka Update a přepínání obrazovek

Tento blok (viz dole) umožňuje uživateli zobrazit to menu, které zrovna potřebuje. Jedná se o jednoduché přepnutí tak, že se jedno okno zneviditelní a druhé zviditelní. Také se aktualizují všechny zobrazené veličiny. V tomto bloku je také integrováno ovládání tlačítek Update, které aktualizují zobrazené veličiny bez nutnosti přepínat okna.

Obrázek 7-8 – Blok pro tlačítka Update a přepínání obrazovek



Zneviditelňování oken je výhodnější, neboť tvorba nového menu s sebou nese jistá úskalí, přenos informací mezi jednotlivými menu je poněkud komplikovanější, a navíc se při přechodu na jiné menu vytvoří nové rozhraní pro uživatele, čímž se přeruší Bluetooth připojení. Pro mne tedy nebyla jiná volba než takovéto nevšední řešení, neboť by bylo velice nepraktické připojovat se k desce opakovaně po každé změně okna.

7.9 Program na vývojové desce Arduino Mega 2560

Jedná se o jednoduchý program s relativně spolehlivým chodem. Program spouští čtení teplot na termočláncích a pak pomocí knihovny PID_v1.h přepočítává potřebný výkon na topných tělesech pro dosažení optimálního chodu. Pro čtení teplot z převodníkových desek max6675 určených pro termočlánců typu J a K jsem užil knihovny max6675.h, která mi umožnila

číst teplotu jen pomocí jednoho řádku kódu. Pro komunikaci s Bluetooth modulem jsem využil knihovny `SoftwareSerial.h`, která vytvoří softwarovou sériovou linku, na kterou je možno psát a zapisovat data, a tak komunikovat přes Bluetooth. Na desce Mega 2560 je sice více hardwarových sériových linek, které umožňují rychlejší přenos dat a jsou spolehlivější, mně se však tyto hardwarové sériové porty rozpohybovat nepodařilo. Jelikož se však jedná pouze o prototyp a přenesených dat je velice málo, považuji toto řešení prozatím za uspokojivé. Pokud by se však měl extruder vyrábět komerčně, hardwarovou sériovou komunikaci bych implementoval. Na chod extruderu tento detail nemá vliv.

7.9.1 Fáze před programem

Nejdříve se volají knihovny, aby se nahrály integrované funkce do paměti. Dále je třeba definovat proměnné potřebné pro chod extruderu, jako je třeba proměnná `temp_1_meas`, za kterou se ukládá aktuálně naměřená teplota v 1. topné zóně nebo například `mot_speed_PWM`, kam se ukládá již zpracovaný signál o požadovaných otáčkách motoru, který otáčí šroubem a pohání celou extruzi. Celý popsáný postup je proveden ještě před samotným chodem programu.

7.9.2 Fáze setup

Po proběhnutí přednastavení nastává setup (česky založení). V této fázi se nastaví jednotlivé piny neboli kontakty.

Deska má několik druhů pinů: digitální, analogové a digitální schopné PWM řízení a ostatní piny. Digitální piny umí přijmou či vypovědět pouze 1 nebo 0. Analogové umí číst a vypovídat analogové signály, tedy signály v polohách mezi 1 a 0. Digitální piny s umožněným PWM výstupem umí velice rychle střídat signál 1 a 0, viz výše ve vysvětlení funkce PWM.

Na desce se tedy nastaví některé piny jako vstupy a některé jako výstupy. U některých pinů se již rovnou nastaví pevná výstupní hodnota – např. otáčky motoru jsou za celého chodu požadovány pouze jedním směrem, proto se v programu rovnou napevno naprogramují otáčky správným směrem. Tato neměnnost směru otáček a neřiditelnost programem je velice výhodná, protože zde teoreticky nemůže nastat chyba. Takto se například definuje i

směr otáček větráků a jiné neměnné veličiny. Nakonec se vytvoří kanál pro sériovou komunikaci s Bluetooth modulem a definuje se rychlost přenosu dat v kanálu.

7.9.3 Fáze loop

Poslední je část loop (česky smyčka). Jedná se o nekonečnou smyčku příkazů, které se nekonečně opakují.

Jako první se uloží aktuální čas na desce, aby se podle něj mohl časovat chod dějů. Tato funkce časování bude vysvětlena dále.

Jako další je třeba změřit teploty v jednotlivých topných zónách. Ihned po změření teplot je třeba přepočítat potřebný výkon topných zón podle PID regulátorů, aby mohlo být dosaženo ideální teploty v topných zónách. Tyto informace o výkonech jsou pak okamžitě předávány pomocí PWM do SSR, které spínají proud v topných tělesech.

Pak se v programu nachází blok, který ukládá přijatá data, třídí je podle předem definované předpony a ukládá je za předdefinované veličiny. Například předpona S1 je pro požadovanou rychlost otáčení motoru extruze, S3 je zkratka pro požadovanou teplotu na 1. topné zóně. Na závěr tohoto bloku se proměnná s přijatými daty maže, aby program nemusel kontrolovat a třídit data s každým průchodem smyčky, ale aby je prošel a roztřídil jednou a byl spuštěn až s příchodem nových dat.

Následně se podle požadovaného intervalu signalizuje jeden krok pro krokový motor, který ovládá navíjení cívky. Na závěr celé smyčky se všechna potřebná data odesílají zpět do aplikace na telefonu, tím způsobem, že se zapíše do softwarového sériového portu určeného pro Bluetooth komunikaci.

Tato smyčka se takto nekonečně opakuje, a tím je zařízen chod celého programu.

7.9.4 Problém časování operací v rozhraní ArduinoIDE

Arduino má jedno úskalí, se kterým je třeba počítat. Deska není schopna vykonávat více věcí najednou: deska čte kód a vykonává jednotlivé úkony

tak, jak je čte. V kódu bývá nekonečná smyčka, která se opakovaně prochází, a všechny úkony jsou vykonávány dokola. V konvenčním jednoduchém kódu je běžné užívat příkaz delay (česky zpoždění) a tím chod jednotlivých příkazů časovat, např. pulzy pro krokový motor, měření teploty nebo odesílání dat.

V mé aplikaci bylo třeba dělat všechny tyto věci „naráz“. Musel jsem užít jiného způsobu časování, a sice odpočtu času od poslední iterace, kterou je třeba opakovat. Program si uloží momentální čas a pak s každým průchodem smyčkou kontroluje, zda již neproběhl delší čas, než má trvat perioda opakování cyklu. Takovýchto smyček s odpočtem času mám v programu více. Například jeden takový časovač odesílá naměřené teploty každou sekundu, aby měl uživatel přehled o aktuálních teplotách v topných zónách, jiný časovač spouští měření teploty dvakrát za sekundu a s každým změřením teploty spustí přepočítání potřebného výkonu PID regulátorem.

8 Praktická část

8.1 Rám

Po zkompletování výkresové dokumentace jsem dle doporučení vedoucího odeslal výkresy potřebných plechů do výroby, aby mi je vypálili podle výkresů. Celý rám byl navržen z plechů z konstrukční oceli o tloušťce 5 mm. Tato relativně velká tloušťka je odůvodněna nízkou cenou za kov – protože firma si účtovala více za chod stroje než za vlastní hutní materiál, dohodli jsme se s vedoucím, že všechny díly nechám udělat z takto tlustého plechu. Díly nejsou příliš velké, hmotnost tlustých plechů tedy není problematická.

Po přijetí plechů od firmy jsem je sám svařil. Rám jsem nejdříve jemně přibodoval, abych jej mohl později snadno modifikovat, kdyby to bylo nutné. Také jsem na rám přivařil očko na zemnicí kabel z důvodu elektrické bezpečnosti. Na rám jsem rovnou přivařil matici na 1/2“ potrubí. Matici jsem také napoprvé pouze jemně nabodoval několika krátkými svary, abych mohl matici dorovnat, kdyby to bylo později nutné, a dodržet tak souososti. Pro přesné zasazení matice jsem si vytiskl přípravek na svojí 3D tiskárně. Tento přípravek má 1/2“ závit, který do matice přesně zapadá, na přípravku je zároveň vystouplé osazení 4 mm vysoké, které přesně zapadá do otvoru ve výpalku. Osazení je logicky o něco málo nižší než tloušťka plechu, aby bylo matici umožněno dosednout a aby bylo možno ji zavařit na místo. Matici jsem kupoval ocelovou se zinkovou povrchovou úpravou, nikoliv mosaznou. Před zavařením bylo pouze nutné po obvodu odstranit povrchovou úpravu. Na druhé straně je vytištěný šestihran, aby se matice na přípravek dala zatáhnout a aby se vše správně vystředilo. Po zavaření jsem přípravek jednoduše odstranil.

V místě určeném pro uchycení motoru se šnekovou převodovkou bylo třeba v rámu vyvrtat přesné díry pro uchycení motoru. Protože jsem při návrhu rámu neměl výkresovou dokumentaci k motoru, ani jsem ještě neměl motor jako takový, nechal jsem rám vypálit bez otvorů, s plánem vrtat otvory pro motor později. Když jsem měl motor i plechy na rám, musel jsem pozice děr odhadnout. Pro tento účel jsem si na 3D tiskárně vytiskl další přípravek, kterým jsem odhadoval pozici děr na motoru (viz Obrázek 8-1 a Obrázek 8-

2). Nejprve bylo třeba odhadnout pozici relativně k hřídeli uprostřed. Poté jsem si vytiskl přípravek, který měl místo otvoru pro hřídel výstupek uprostřed, který přesně zapadl do otvoru pro hřídel. Podle tohoto přípravku jsem poté přesně vrtal díry do rámu. Touto metodou jsem mohl relativně přesně odhadnout pozici děr a umožnilo mi to vyvrtat díry přesně na první pokus.

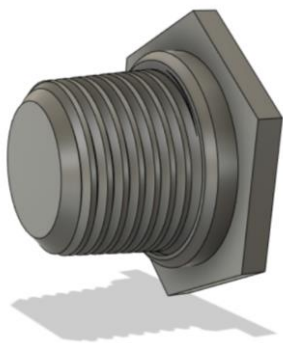
Obrázek 8-1 – Přípravek na díry pro odhad pozic děr



Obrázek 8-2 – Přípravek na díry pro vrtání otvorů



Obrázek 8-3 – Přípravek vymezující umístění pro 1/2" matici



Součástí rámu je také podsestava s uložením pro axiální ložisko. Axiální ložisko sedí v 3D tištěném domku a opírá se o desku vypálenou také z 5mm plechu. Tato deska je držena čtyřmi šrouby velikosti M10, které slouží nejen jako podpora, ale také pro kalibraci. Dotahováním šroubů je možné

regulovat axiálně pozici ložiska a tím regulovat pozici vrtáku. Také je možné ladit rovnoběžnost desky s deskou, ke které je přišroubované potrubí, v němž se otáčí vrták, a tím dále zpřesňovat souosost vrtáku s potrubím. Pro tyto šrouby mi bylo doporučeno volit jemný závit, aby bylo možné přesněji doladit rovnoběžnost desek, avšak šrouby s jemným závitem jsem nemohl získat kvůli pandemické situaci.

8.2 Potrubí

Potrubí jsem nakoupil tak, abych mohl experimentovat s různými pozicemi trychtýře relativně vůči topným zónám atd., neboť ing. Krebs klade důraz na nutnou vzdálenost axiálního ložiska, zajišťující síly vyvolávané vrtákem, od trychtýře. Zároveň byla také důležitá celková délka potrubí, jelikož vrták jako takový měl pouze omezenou délku. Rovněž bylo třeba myslet na délku vyhrazenou pro topná tělesa. Nakoupil jsem tedy více různých délek potrubí, abych mohl vyzkoušet, jaké rozložení vzdáleností funguje nejlépe. Bylo třeba zajistit dostatečnou vzdálenost topných těles od trychtýře, aby se pelety nenatavovali již v trychtýři a zároveň nechat co nejdelší prostor pro umístění topných těles. To vše samozřejmě s pevně danou délkou vrtáku. Zjistil jsem, že teoreticky nejvhodnější kombinace potrubí se ukázala jako nejvhodnější také v praxi, tedy nejkratší možná délka mezi axiálním ložiskem a největší možná délka určená pro topné zóny.

K vlastnímu překvapení jsem byl nucen zakoupit vrták o průměru 16 mm, abych začistil vnitřní průměr potrubí. Nejvhodnější by samozřejmě bylo použít k jemnému dočištění potrubí výstružník, ale v době řešení problému vnitřního průměru potrubí byl v České republice lockdown, v důsledku čehož nebylo možné zajít do specializovaných obchodů ani do dílny na ČVUT. Bylo tedy nutno řešit problém v rámci dostupných prostředků. Potrubí bylo třeba začistit ze dvou důvodů. Zaprvé, trubky, jež jsem koupil, byly zevnitř svařované, a svár překážel snadnému chodu vrtáku. Zadruhé, vnitřní strana konců trubek byla zborcena dovnitř, což bylo pravděpodobně způsobeno technologií výroby závitů na potrubí – vnější závit na potrubí 1/2“ je kuželový a během průmyslové výroby závitů jsou pravděpodobně použity stroje, které disponují obrovskými silami a při tvorbě kuželového závitu deformují potrubí natolik, že se stěna zbortí dovnitř.

Nakonec bylo potřeba vyvrtat otvor do zátky potrubí o přesném průměru, aby mohl stroj extrudovat filament o přesném rozměru. Požadovaný průměr filamentu je 1,75 mm, ale dle doporučení ing. Krebse je třeba při extruzi otvor dělat o 20 až 30 % menší, protože se plast po extruzi roztáhne. Bylo tedy třeba vyvrtat otvor o průměru 1,3 mm +/- 0,1 mm. Tomuto problému jsem bohužel rovněž čelil během kompletního lockdownu. Problému jsem si však byl vědom již při objednávání materiálu a objednal jsem víčka z mosazi, nikoli z ocele. Mosaz je, jak známo, mnohokrát měkčí než ocel, mohl jsem tedy otvor vytvořit jinak než vrtáním. Nabrousil a zakalil jsem obyčejný stavební hřebík, kterým jsem pak do víčka vytvořil malý otvor. Víčko se také v místě otvoru vypoulo a tím odstranilo skokový přechod průměrů a tím se zlepšili podmínky extruze. Jak známo, skokové změny průměru potrubí mají tendenci zpomalovat tok. Otvor jsem pak začistil jemným pilníkem.

Jako poslední část potrubí jsem musel vyrobit trychtýř, který by podával filament do extruze. Trychtýř musel být kovový, protože je velice blízko první topné zóně, a kdyby byl tištěný na 3D tiskárně, mohl by se roztavit. Nechal jsem si vypálit plech na trychtýř spolu s ostatními plechy, pouze jsem u plechu na trychtýř volil tloušťku 0,5 mm. Uvedená tloušťka se mi prokázala již v minulosti jako vhodná pro takovouto součást. Plech 0,5 mm je ještě dostatečně tenký, aby šel velmi snadno formovat do požadovaných tvarů, a zároveň ještě dost tlustý, abych jej mohl svařit v domácích podmínkách.

8.3 Elektrická část

Můj experiment má tři jednotlivé napěťové obvody: 5 V DC napěťový obvod napájí řídicí techniku včetně vývojové desky, 12 V DC napěťový obvod napájí motor se šnekovou převodovkou a krokový motor, 230 V AC napájí topná tělesa.

K napájení 5 V obvodu jsem použil transformátor upravený tak, aby jej bylo možné snadno zapojit do testovací desky. V tomto obvodu nehrozilo spálení součástí, protože transformátor je vybaven ochranou proti překročení nominálního proudu 1 A. V rámci testování zařízení jsem použil podomácku vyrobený zdroj stejnosměrného napětí, který jsem nastavil na 12 V, a

monitoroval jsem dodávaný proud. Takto jsem mohl kontrolovat správný chod stroje a při nečekaných potížích jsem si velice rychle mohl všimnout náhlého nárůstu proudu a napájení odpojit. Toto bylo obzvlášť důležité kvůli zapojeným motorům, jelikož by se mohly snadno přetížit a spálit se. Pro samotný chod by bylo vhodnější použít komerční transformátor na 12 V. Napětí 230 V bylo zajištěno jističem na 6 A.

8.4 Softwarová část

Oba programy jsem si psal sám, bylo tedy třeba po každé změně kód otestovat. Každou novou část kódu jsem testoval zvlášť, aby se mi v programu nesčítaly chyby. V komunikaci přes Bluetooth mezi aplikací a deskou bylo potřeba jasně definovat formát přenášených dat, protože text se automaticky konvertuje pomocí ASCII tabulky na číselný kód, aby jej šlo odeslat. Problém tedy nastává v případě odesílání čísel jako textu, protože v ASCII tabulce je 0 vedena jako 48, 1 jako 49 atd. Programátor tedy předpokládá odeslání a přijetí stejných čísel, čísla přijatá však naprosto neodpovídají číslům odeslaným. Toto jednoduché zjištění mi způsobilo nemalé počáteční potíže.

Druhým problémem byl formát dat potřebný pro chod krokového motoru. Krokový motor potřebuje informaci pro každý krok, nikoliv jako konvenční stejnosměrný motor, který pouze potřebuje napětí na kartáčích. Bylo tedy potřeba konvertovat data z aplikace do periodicky se opakujících pulzů. Řešení je jednoduché, hodnota zvolená uživatelem v rozmezí od 0 do 99 % maximální rychlosti je převrácenou hodnotou zpoždění mezi jednotlivými pulzy.

8.5 Průběh experimentu

Po navržení a smontování zařízení bylo třeba celý mechanismus otestovat. Během testování jsem narazil na několik přehlédnutí v návrhu.

První problém nastal s plánovaným směrem otáček motoru. Motor má na konci hřídele závit M8, kterým přenáší moment. Šroub na posun materiálu je samozřejmě pravotočivý, avšak problém nastává, když je třeba posouvat materiál vrtákem ke špičce vrtáku. Pravotočivý vrták je navržen tak, aby

vytlačoval piliny ke stopce vrtáku, tedy ven z vrtaného otvoru při pravotočivém otáčení. Potíže nastávají proto, že vrták je třeba otáčet doleva, aby byl materiál posouvám správným směrem, avšak při otáčení doleva se povoluje hřídel motoru. Po konzultaci s konstruktéry z Ústavu konstruování a částí strojů bylo zřejmé, že jediná možnost, jak spolehlivě zajistit hřídel proti povolování, je na hřídel zavařit matici.

Druhým problémem byl nedostatečný moment motoru s převodovkou. V domácích podmínkách jsem nemohl změřit maximální moment motoru v nominálních otáčkách, ale pouze moment v nulových otáčkách. Moment motoru při nulových otáčkách činí 5,5 Nm. Celý mechanismus se mi podařilo rozpohybovat pouze s ručním pohonem a dle mého měření bylo třeba 12 Nm pro plynulý chod. Pro komerční použití by tedy byl nutný silnější motor, nebo by se za šnekovou převodovku integrovanou do motoru ještě přiřadila další převodovka. Popsaný problém nebylo možné snadno předvídat, neboť takto natavený plast není newtonovská kapalina a nelze jej snadno simulovat.

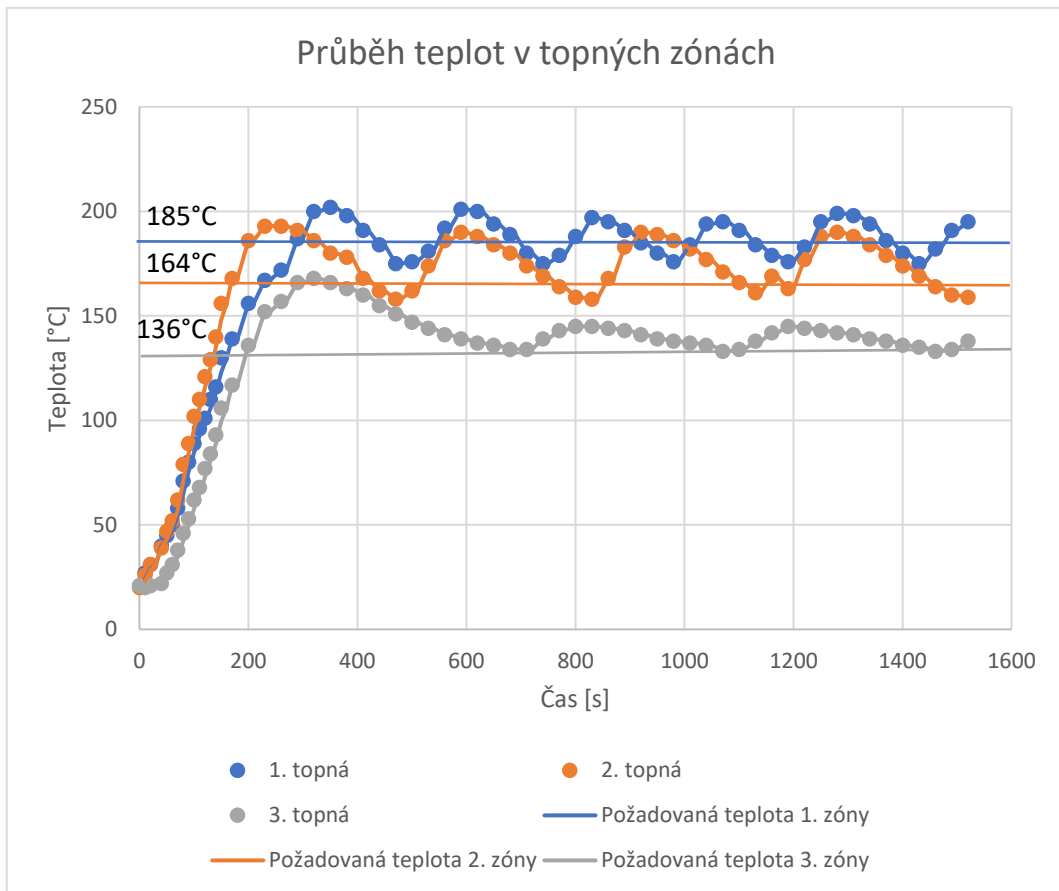
Dalším problémem se ukázalo uzemnění termočlánků. Uzemněné termočlánky jsou náchylnější k rušení než termočlánky neuzemněné. Motor s převodovkou při chodu indukoval cca 100 V AC na kostře. Toto napětí významně ovlivňovalo naměřené teploty na termočláncích. Avšak ani po uzemnění motoru rušení nezmizelo, bylo tedy třeba termočlánky kompletně elektricky izolovat od vodivých částí mechanismu. Po izolování termočlánků od extruderu bylo měření teplot přesné.

Největší vada takovéto extruze je ovšem křehkost extrudovaného materiálu. Filament lze vytlačit a smotat do cívky, ale po vychladnutí jej již nelze rozmotat a použít k tisku. Filament je křehký skoro jako sklo. Z mých zkušeností s 3D tiskem můžu říci, že tento problém je pravděpodobně způsoben vlhkostí filamentu před extruzí, protože plast do sebe absorbuje vzdušnou vlhkost, a tím křehne. Lze tedy předpokládat, že kdyby se pelety před extruzí důkladně vysušily, nebyl by extrudovaný filament křehký a bylo by možné jej použít pro 3D tisk. Druhou možnou příčinou křehkosti filamentu může být jeho recyklovaný původ. Když jsem konzultoval výrobu filamentu s Ing. Krebsem, bylo mi řečeno, že když se plast zahřívá na vysoké

teploty či udržuje dlouhou dobu horký, dochází k lámání dlouhých řetězců polymerů na kratší řetězce, čímž plast ztrácí své kladné vlastnosti. Plast tedy nelze donekonečna recyklovat, jelikož by se postupně všechny dlouhé řetězce rozlámaly a z plastu by vznikla hmota převážně složená z uhlíku, tedy uhlí. Řešení tohoto problému je relativně přímočaré: Je nutno před extruzí pelety vysušit, ať už skladováním v bezprostřední blízkosti oxidu křemičitého (také známý jako silica gel), nebo aktivním vysoušením pomocí nějakého přístroje, který odstraňuje vlhkost. Problém recyklovaného materiálu lze řešit přidáním nerecyklovaných pelet, a tím „omladit“ celou směs.

Poslední problém, na který jsem narazil, je regulace teplot v topných zónách. Po rozsáhlém testování jsem došel k závěru, že PID regulátor pravděpodobně není vhodný pro takovéto zařízení. Vhodnější by byl zřejmě dvoupolohový regulátor s hysterezí. PID regulátor je zbytečně složitý a jeho ladění přináší více škody než užitku. Snažil jsem se regulátory naladit pomocí AutoTune knihovny, ale celý proces by pravděpodobně trval několik hodin, což bylo nepřijatelné, protože z důvodu nedostatečného kroutícího momentu motoru jsem musel motor pohánět výhradně ručně. Je ale pravděpodobné, že kdybych měl motor, který by dokázal dlouhodobě pohánět extruzi, bylo by pak možné PID regulátor správně naladit a celý extruder by mohl fungovat bez chyb. S nedostatečným momentem motoru také souvisí komplikace, že kvůli nekonzistentnímu otáčení šroubu, způsobeného ručním pohonem, se přehříval trychtýř, plast se v něm předčasně taval a nesespával se přirozeně do potrubí. Kdyby šroub odebíral plast konzistentně, nedocházelo by k tak rychlému prohřátí celého mechanismu – procházející pelety spolu s chladícím větrákem by zamezily přehřívání trychtýře, a tím by se zamezilo předčasnému tavení pelet.

Graf 8-1 – Průběh teplot v topných zónách



9 Závěr

V této práci jsem popsal celý proces výroby recyklátoru plastů pro 3D tisk, a to od nezbytné rešerše přes vývoj a konstrukci až po testování stroje. V rámci stavby stroje jsem napsal aplikaci pro chytrý telefon, která slouží jako dálkový ovladač k zařízení a také pro monitoring průběhu extruze. Během testování jsem narazil na několik problémů, avšak i přes tyto nedostatky se mi podařilo vyrobit několik metrů filamentu. Filament je sice momentálně nevhodný pro 3D tisk z důvodu své křehkosti, nicméně mohu říci, že experiment byl úspěšný. Pro možné uvedení extruderu na trh by bylo vhodné zdokonalit nějaké aspekty mechanismu, jako je například přesnější naladění PID regulátorů nebo osazení stroje silnějším motorem. Práce mi posloužila k upevnění teoretických znalostí nabytých při studiu na Fakultě strojní a pomohla mi propojit si jednotlivé disciplíny moderního strojírenství.

Obrázek 9-2 – Vyrobený filament



Obrázek 9-1 – Vyrobený filament navinutý na cívce



Obrázek 9-3 - Navíječ



Obrázek 9-4 - Kompletní extruder



10 Seznam použité literatury

- [1] ianmcmill. Build Your Own 3d Printer Filament Factory. Instructables.com [online]. instructables.com, 2018 [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/Build-your-own-3d-printing-filament-factory-Filame/>
- [2] *FILASTRUDER* [online]. 4002 Highway 78 #530-146 Snellville, GA 30039: Tim Elmore, 2020 [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: <https://www.filastruder.com/>
- [3] Enlargement, Flow and Pressure Change. THERMOPEdia [online]. Danbury v Connecticut: Begell House, 2011 [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: <https://thermopedia.com/content/730/>
- [4] CNC Kitchen, 2018, Recycle your failed 3D prints! Make new filament at home. YouTube video [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=vqWwUx8l_Io&ab_channel=CNCKitchen
- [5] Víčko mosaz v2. SIGMASHOP.CZ [online]. Hranice: SIGMA PUMPY HRANICE, 2021 [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: https://www.sigmashop.cz/images/sklady/vicko_mosaz_v2.jpg
- [6] Mosazná zátka 1/4." Insta-mat [online]. Kostelec nad Černými Lesy: Vávra-Vávrová s.r.o, 2021 [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: https://www.insta-mat.eu//data/product/712_2466.jpg
- [7] Plastic-maschinen handels-gesellschaft mbh [online]. Koenigswinter: PMH, 2021 [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: <https://www.pmh-extruder.com/en/home/>
- [8] DENG, H., C. T. REYNOLDS, N. O. CABRERA, N.-M. BARKOULA, B. ALCOCK a T. PEIJS. The water absorption behaviour of all-polypropylene composites and its effect on mechanical properties. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2010, (41), 268-275 [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: <http://mss-nde.uoi.gr/publications-pdf/journal-papers/Periodika%20Nektaria/The%20Water%20Absorption%20Behaviour%20of%20All->

Polypropylene%20Composites%20and%20its%20Effect%20on%20Mechanical%20Properties.pdf

[9] FELFIL [online]. C.so Castelfidardo 30/a Torino – 10129: Relfil, 2020 [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: <https://felfil.com/?v=5ea34fa833a1>

[10] 3devo [online]. Atoomweg 478 3542 AB Utrecht The Netherlands: 3devo, 2019 [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: <https://3devo.com/>

[11] Werbewunder, 2019, DIY Desktop Filament Extruder #6 [ENG] Bonus: Wood Drill vs. (Plastic Screw / Compression Screw). YouTube video [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=TkZ1h22KqbU&ab_channel=Werbewunder

[12] Trubka se závitem. Trubka se závitem [online]. [cit. 2020-10-18]. Dostupné z: <http://www.marinfo.cz/foto/htm/technickenormy/tabulkatrubek.html>

[13] Short Note on Bathtub Curve. GeeksforGeeks [online]. Noida: GeeksforGeeks, 2020 [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/short-note-on-bathtub-curve/>

[14] Utahovací momenty šroubů. BRIOL [online]. Čistá u Litomyšle: BRIOL, 2013 [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: <https://www.briol.cz/technicke-informace/utahovaci-momenty-sroubu>

[15] PATTON E.W., TISSENBAUM M. a HARUNAMIH F. MIT App Inventor: Objectives, Design, and Development. *Computational Thinking Education* [online]. Singapore: Springer, 2019, s. 31-49. ISBN 978-981-13-6528-7. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-6528-7_3

[16] KŮTA, Aleš. VLASTNOSTI STĚRAČOVÉHO MOTORU [online]. Brno, 2008 [cit. 2020-10-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=9508. Bakalářská. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Marcel Janda.

[17] NÁVRH EXTRUDÉRU: Extruder design [online]. CVUT, 2019 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/81174/F2-DP-2019-Jezek-David-Navrh%20extruderu.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. CVUT.

[18] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.

11 Seznam použitých zkratk

$l_{\text{doporučeníMIN}}$	[mm]	Minimální doporučená délka extruderu pro průměr vrtáku 16 mm
$l_{\text{doporučeníMAX}}$	[mm]	Maximální doporučená délka extruderu pro průměr vrtáku 16 mm
D_{vrtaku}	[mm]	Průměr vrtáku
M_{krutmax}	[Nm]	Maximální kroutící moment
τ_D	[Nmm ⁻²]	Dovolené napětí v krutu
W_k	[Nmm ⁻³]	Modul průřezu v krutu
J_k	[Nmm ⁻⁴]	Kvadratický moment průřezu
n_{max}	[min ⁻¹]	Otáčky navíječe
a	[mm]	Strana čtvercové podstavy kvádru ve spojce
F	[F]	Síla působící na vrták
p	[pa]	Teoretický maximální tlak v tavenině
S	[mm]	Plocha průřezu vrtáku

12 Seznam použitých obrázků

Obrázek 2-1 - Doma vyrobený extruder na filament [1].....	10
Obrázek 2-2 - Rozpad extruderu firmy Filastruder [4].....	12
Obrázek 2-3 - 1/2“ víčko na potrubí [5].....	12
Obrázek 2-4 - 1/2“ zátka na potrubí [6]	13
Obrázek 2-5 – Hrudky ve filamentu[4]	14
Obrázek 2-6 – Profesionální extrudéry firmy PMH GmbH [7]	15
Obrázek 2-7 – Filawinder firmy Filastruder [2].....	17
Obrázek 2-8 – Filawinder firmy Filastruder [2]	18
Obrázek 2-9 – Detail stroje Filawinder [2]	18
Obrázek 2-10 – Felfil Evo firmy Felfil [9]	19
Obrázek 2-11 – Displej na stroji Felfil Spooler [9]	20
Obrázek 3-1 – Pelety pro výrobu filamentu.....	23
Obrázek 4-1 – Srovnání proměnného objemu posouvaného materiálu v kompresním šroubu s konstantním objemem hadovitého vrtáku [11].....	25
Obrázek 4-2 – Křivka poruchovosti prototypů [13]	27
Obrázek 4-3 – Axiální zajištění vrtáku	30
Obrázek 4-4 – Detail spojky	31
Obrázek 4-5 – Axiální zajištění dvojspojky	31
Obrázek 4-6 – Model strojku.....	32
Obrázek 5-1 – Článek řetězu	35
Obrázek 5-2 – Sestava navíječe filamentu	35
Obrázek 7-1 – Hlavní obrazovka.....	41
Obrázek 7-2 – Obrazovka Settings	42
Obrázek 7-3 – Blok na Bluetooth připojení k desce	43
Obrázek 7-4 – Blok na odesílání potřebných dat	43
Obrázek 7-5 – Blok na odesílání hodnot pro PID regulátory.....	44
Obrázek 7-6 - Blok na příjem dat.....	44
Obrázek 7-7 - Prvních pár řádků funkce split.....	44
Obrázek 7-8 – Blok pro tlačítka Update a přepínání obrazovek.....	45
Obrázek 8-1 – Přípravek na díry pro odhad pozic děr	50
Obrázek 8-2 – Přípravek na díry pro vrtání otvorů	50
Obrázek 8-3 – Přípravek vymezující umístění pro 1/2" matici	50
Obrázek 9-1 – Vyrobený filament navinutý na cívce.....	58

Obrázek 9-2 – Vyrobený filament	58
Obrázek 9-3 - Navíječ	59
Obrázek 9-4 - Kompletní extruder	59