



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

DRŽÁK PLASTOVÝCH STRUN PRO PROFESIONÁLNÍ TECHNOLOGII 3D TISKU FDM

HOLDER OF PLASTIC FILAMENT FOR PROFESSIONAL 3D PRINTING
TECHNOLOGY FDM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Puchta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2017

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je vyvinout držák strun pro technologii 3D tisku metody FDM, který umožní monitoring zbývajících a spotřebovaného materiálu během tisku a který zajistí bezproblémové odvíjení cívky s tiskovou strunou. Držák strun je primárně určen pro profesionální tiskárnu Stratasys Dimension SST 1200. Práce se dělí na konstrukční část, jež spočívá v konstrukci všech použitých dílů, a elektronickou část, která řeší program zajišťující definované funkce držáku strun. Elektronická část spočívá v propojení sensorů a elektronických komponent pomocí vývojové platformy Arduino. Funkci elektroniky poté zajišťuje program, jehož zdrojový kód je napsán v jazyce Arduino. V práci jsou experimentálně ověřeny dílčí funkce držáku strun.

KLÍČOVÁ SLOVA

držák strun, 3D tisk, FDM, Arduino, Stratasys Dimension, spotřebovaný filament, zbývajících filament

ABSTRACT

The aim of the Bachelor's thesis is to develop a spool holder for FDM 3D printing technology which allows to monitor the remaining and consumed material during printing and to ensure unwinding of the spool. The spool holder is intended for professional 3D printer Stratasys Dimension SST 1200. The first part of the thesis is focused on the construction. The second part of the thesis deals with electronics. The sensors and electronics are connected by Arduino which ensures their function. The source code has been written in Arduino. Partial functions of the spool holder have been experimentally verified.

KEYWORDS

spool holder, 3D printing, FDM, Arduino, Stratasys Dimension, remaining filament, consumed filament

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PUCHTA, D. *Držák plastových strun pro profesionální technologii 3D tisku FDM*
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 59 s.
Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a za cenné rady a připomínky.

PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Držák plastových strun pro profesionální technologii 3D tisku FDM vypracoval sám pod vedením doc. Ing. Davida Palouška, Ph.D.. Prohlašuji, že všechny zdroje a informace jsou řádně citovány dle normy ISO 690 a uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne

.....

Daniel Puchta

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	12
2.1	Projekt RepRap	12
2.2	Technologie FDM.....	13
2.2.1	Popis hlavních částí tiskárny	13
2.3	Stratasys Dimension SST 1200.....	14
2.4	Držák strun.....	15
2.4.1	Definování funkcí držáku strun	15
2.4.2	Definování chyb tisku souvisejících s tiskovou strunou	15
2.5	Uložení cívky	17
2.5.1	Uložení na hřídeli	17
2.5.2	Uložení pomocí ložisek	19
2.6	Vedení tiskové struny	21
2.6.1	Vedení pomocí vodicí trubice	21
2.6.2	Vedení pomocí vodicích otvorů	22
2.7	Čištění tiskové struny.....	23
2.8	Senzory	24
2.8.1	Odměrování rotačním enkodérem	24
2.8.2	Odměrování měřením hmotnosti	26
2.9	Vývojové desky	27
2.9.1	Arduino.....	27
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	30
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ.....	31
4.1	Návrh konstrukce	31
4.1.1	Uchycení na vertikální hřídeli	31
4.1.2	Uchycení na válečkovém systému.....	32
4.2	Elektronika.....	33

5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	34
5.1	Uchycení konstrukce	34
5.1.1	Kazeta	34
5.1.2	Přichycení ke kazetě	35
5.1.3	Hliníková tyč 15x15x1,5.....	35
5.1.4	Platforma.....	36
5.1.5	Základna.....	36
5.1.6	Kryt elektroniky	38
5.2	Vedení filamentu	39
5.2.1	Kladkový podavač	40
5.2.2	Měření délky	40
5.3	Elektronika	43
5.3.1	Napájení	43
5.3.2	Tenzometrický snímač	44
5.3.3	Displej I2C 20x4	44
5.4	Program	44
5.4.1	Zadání parametrů	45
5.4.2	Měření filamentu.....	48
5.5	Přepočítání měřených veličin	50
5.5.1	Přepočítání na cm^3	50
6	DISKUZE	52
7	ZÁVĚR	53
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	54
9	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	56
10	SEZNAM OBRÁZKŮ	57
11	SEZNAM PŘÍLOH.....	59
11.1	Výkresová dokumentace	59

1 ÚVOD

Rapid prototyping je progresivně se vyvíjející technologie, která se s výhodou používá pro výrobu prototypů. Mezi nejrozšířenější metody rapid prototypingu patří 3D tisk technologií FDM. Tiskárny této technologie se pak dělí na profesionální a amatérské.

Tato práce se primárně zabývá návrhem konstrukce a elektroniky držáku strun pro profesionální tiskárnu Stratasys Dimension SST 1200. I přes pokročilost konstrukce této tiskárny existuje několik problémů, při jejichž odstranění dojde ke zkvalitnění obsluhy tisku a snížení možnosti ztracení několikahodinovou práci tiskárny vlivem chyby tisku. Mezi jednu z nejčastějších chyb tisku patří vypotřebování materiálu během tisku kvůli chybějící informaci o zbývajícím materiálu při použití materiálu navinutého na cívce.

Tiskárna Stratasys Dimension SST 1200 používá materiál, který je dodáván formou kazet. Kazety pak vždy obsahují přibližně $917,7 \text{ cm}^3$ materiálu. Během tisku je množství zbývajících materiálu zapisováno na čip kazety a poté je zobrazováno v procentech zbývajících materiálu na displeji kazety. Pokud ale uživatel chce používat filament navinutý na cívce, je nutné filament provléct vnitřkem kazety a cívku uchytit na držák strun. Pak je informace o zbývajícím materiálu zobrazovaná na displeji tiskárny neplatná.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

U technologie 3D tisku je očekávána revoluce v navrhování produktů, jejich výroby a distribuování konečným uživatelům. O tuto technologii projevuje zájem jak akademická, tak i průmyslová sféra. To je dáno díky její schopnosti vytvářet komplexní tvary a díky možnosti volby materiálů s různými vlastnostmi. [1]

Tuto schopnost umožňuje postupné nanášení vrstev materiálů, díky čemuž lze vyrobit výrobky složitých tvarů. Také je možno kombinovat různé materiály.



Obr. 1 Příklady výrobků 3D tisku [2]

2.1 Projekt RepRap

Reprap je open source projekt, jehož autorem je Adrian Bowyer. Cílem projektu bylo vytvoření 3D tiskárny, která dokáže replikovat sama sebe. Všechny návrhy projektu byly publikovány pod licencí GNU. Projekt závisí na 25 klíčových lidech a velké komunitě podporovatelů. Mnoho osob věnujících se 3D tisku je zároveň členy komunity projektu RepRap. V rámci projektu RepRap vznikají také programy pro 3D tisk, které jsou rovněž šířeny zdarma. [3]

Komunita RepRap má význam i pro profesionální 3D tiskárny. Je to díky tomu, že členové komunity RepRap vyvíjí a poté zdarma šíří další součásti zlepšující 3D tisk. Mezi tyto součásti patří i držáky strun.

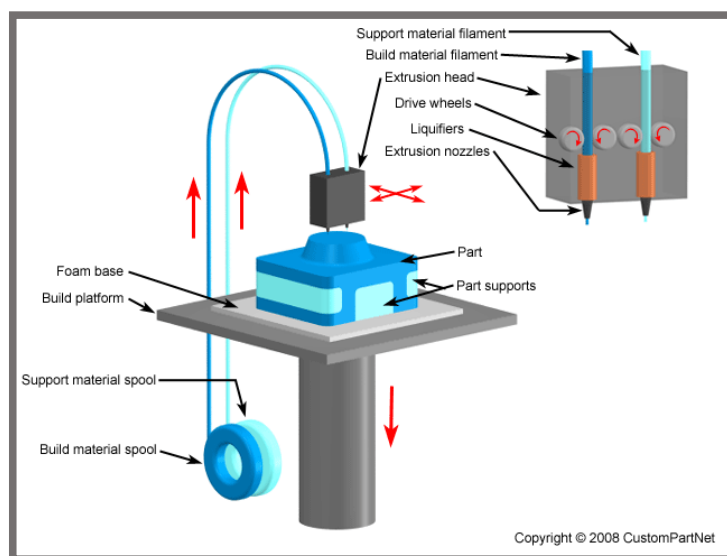
2.2 Technologie FDM

Technologie FDM používá polohovatelnou hlavu, která nanáší vlákno nataveného termoplastického materiálu na podklad. Materiál je ohřát na teplotu skelného přechodu, takže tuhne ihned po vytlačení a následně se navařuje na předchozí vrstvy. Hlava systému FDM může obsahovat jednu, nebo dvě trysky. Pokud obsahuje dvě trysky, první tryska je určena na nanášení základního materiálu a druhá pro nanášení podpůrného materiálu. Výhodou 3D tiskáren technologie FDM je, že mohou být díky používání levného materiálu a díky svým rozměrům používány jako stolní zařízení pro výrobu prototypů. [4]

2.2.1

2.2.1 Popis hlavních částí tiskárny

- **Extruder** - slouží k ohřátí materiálu na teplotu skelného přechodu.
- **Tisková struna** – základní i podpůrný materiál jsou dodávány formou tiskové struny navinuté na cívce.
- **Základní materiál** – je to základní materiál daného výrobku, který má požadované vlastnosti.
- **Podpůrný materiál** – při 3D tisku vzniká u složitějších tvarů potřeba podepírat daný materiál. Bez podpůrných struktur by došlo ke zborcení tisknuté sestavy. Podpůrný materiál je z finálního výrobku odstraňován.
- **Držák strun** – slouží primárně k uchycení cívky s navinutou strunou tak, aby došlo k bezproblémovému odebírání tiskové struny.
- **Pracovní deska** – na pracovní desku se tiskne daná sestava.



Obr. 3 Schéma technologie FDM [15]

2.3**2.3 Stratasys Dimension SST 1200**

Tiskárna Stratasys Dimension SST 1200 je profesionální 3D tiskárna technologie FDM střední třídy. Materiál je dodáván ve formě kazety (cartridge), v níž je vložena cívka s navinutou strunou.

Kazety vždy obsahují 917,7 cm³ tiskové struny, tiskárna pak poskytuje informaci o množství zbývajících materiálu v procentech uvnitř kazety na základě množství materiálu odebraného tiskárnou. Tato informace je zapisována na čip kazety. Informace pak platí pouze pro kazety určené pro tuto tiskárnu. Při potřebě vložení materiálu od jiného výrobce je nutné uchytit cívku na držák strun a kazetu upravit tak, aby jejím vnitřkem procházel filament. Pak informace o zbývajícím množství, která se zobrazuje na tiskárně, neodpovídá skutečnosti.



Obr. 6 Tiskárna Stratasys Dimension SST 1200

2.4 Držák strun

2.4

2.4.1 Definování funkcí držáku strun

2.4.1

- Uchycení cívky – primární funkcí držáku strun je uchycení a bezproblémové zajištění odvíjení tiskové struny během tisku.
- Zabránění chybám tisku – sekundární funkcí držáku strun by mělo být zabránění častým chybám tisku souvisejícím s tiskovou strunou. Tyto chyby budou popsány níže.
- Odměrování a monitorování spotřebovaného materiálu – 3D tiskárny technologie FDM většinou nedisponují žádnou informací o tiskové struně. Chybí tak informace o skutečném množství spotřebovaného materiálu.
- Informace o zbývajícím materiálu – je nutné znát množství zbývajících materiálu na dané cívce. Při novém tisku se velmi často vyměňují cívky, protože je potřeba tisknout z jiného materiálu. Do držáku se pak v některých případech uchytí cívka, u níž je část tiskové struny již odvinuta.

Většinu současných držáků strun si uživatelé 3D tiskáren vyrábí sami. Tyto držáky slouží většinou pouze k uchycení a bezproblémovému zajištění odvíjení struny. Zabraňování chybám tisku buď držák neumožňuje, nebo se zajišťují pomocí samostatných senzorů, které se přidávají mezi výstup držáku a vstup do tiskárny.

2.4.2 Definování chyb tisku souvisejících s tiskovou strunou

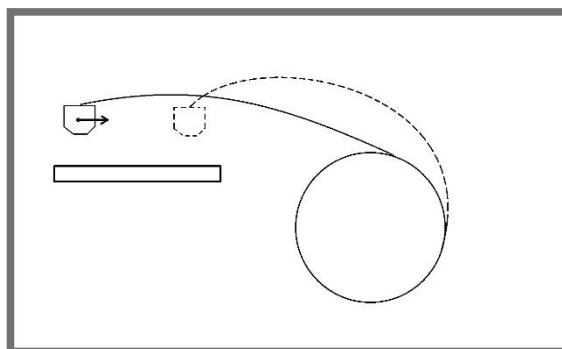
2.4.2

Chyby tisku mohou znehodnotit celou tisknutou sestavu. Pokud dojde k snížení pravděpodobnosti jejich výskytu, dojde k zvýšení efektivity tisku a tím ke snížení výrobních nákladů. Konstrukce držáku strun může zabránit pouze chybám tisku souvisejících s tiskovou strunou.

Zaseknutí struny před vstupem do tiskárny

Struna se může zaseknout před vstupem do tiskárny. Vlivem toho není možné dále odebírat tiskovou strunu, a tiskárna toto většinou nepozná. K tomu může dojít vlivem pohybu extruderu při tisku, kdy se tisková struna odvine mimo cívku a poté může způsobit přitáhnutí držáku strun k tiskárně a zaseknutí tiskové struny.

Vhodné uložení cívky a vedení tiskové struny do zásobovacího mechanismu tiskárny snižuje pravděpodobnost zaseknutí tiskové struny.



Obr. 9 Pohyb extruderu při tisku

Tisknutí bez tiskové struny

Zejména u větších tisknutých sestav dochází k vypotřebování veškeré tiskové struny během tisku. Pokud tiskárna nemá informaci o odebrání struny, bude nadále pokračovat v tisku. Extruder se tedy bude pouze pohybovat nad tisknutým výrobkem, ale nebude docházet k nanášení materiálu na povrch výrobku. Využitím informace o množství zbývající struny na cívce lze této chybě předejít. Případně uživatel může být předem informován o vypotřebování tiskové struny během tisku.

Zvýšená vlhkost tiskové struny

Hydrofilní materiály, jako například PLA nebo PVA, absorbují vlhkost ze vzduchu. Pak mohou molekuly vody obsažené v tiskové struně vést k neočekávaným situacím:

- Poškození 3D tiskárny – vlivem absorbování vlhkosti se mění objem tiskové struny. Tak dochází k deformování průměru. Při podávání struny do extruderu a následnému vytlačování může dojít k ucpání extruderu.
- Špatná kvalita tisku – vlhkost navázaná v tiskové struně se při ohřevu v extruderu přemění na páru. Pára pak v extruderu zasahuje do toku plastické hmoty. [5]
- Ovlivnění vlastností – molekuly vody negativně ovlivňují vlastnosti tiskové struny. [5] Průměr vlákna je deformován, dochází k degradaci, ulomení a zvýšené křehkosti. [6]

Zvýšení vlhkosti tiskové struny se zabraňuje pomocí:

- Vhodného skladování
- Umístěním látek o vyšší hydrofilii (např. do cívky), než je materiál dané tiskové struny

Nečistoty na tiskové struně

Vlivem skladování tiskové struny se na jejím povrchu mohou vyskytovat různé nečistoty. Tyto nečistoty poté ovlivňují vlastnosti tiskové struny a znečišťují tiskárnu. Tomuto lze předejít čistícím filtrem vloženým před vstup do tiskárny, který zároveň může sloužit k mazání tiskové struny a tím usnadní zásobování tiskárny.

Neschopnost otáčení cívky

Tento problém nastává zejména u cívek těžších než 2 kg. Vlivem váhy cívky a vlivem konstrukce držáku tiskárna není schopna otáčet s cívkou během tisku (podávací mechanismus tiskárny nevyvíjí dostatečnou sílu potřebnou pro odvíjení tiskové struny).

2.5 Uložení cívky

2.5

Uložení jsou navržena tak, aby zajistila bezproblémové odvíjení struny. Uložení by mělo zabránovat samovolnému odvíjení tiskové struny.

2.5.1 Uložení na hřídeli

2.5.1

Hřídel je buď pevný, a cívka se na něm protáčí, nebo otočný a otáčí se spolu s cívkou. Otočné uložení je realizováno buď pomocí ložisek, nebo jiným způsobem. Pokud má hřídel menší průměr, než je průměr otvoru v cívce, je cívka vystředěna pomocí adaptačních členů (například pomocí kuželů). U uložení na otočném hřídeli lze zajistit brzdění cívky tak, aby nedocházelo k nežádoucímu odvíjení tiskové struny.

Uložení na hřídeli s vertikální osou

- **Výhody**

Menší síla podávacího mechanismu – díky tomuto uložení je potřebná menší síla vyvinutá podávacím mechanismem tiskárny při odvíjení.

Menší namáhání – vlivem vertikálního umístění osy hřídele je namáhání hřídele na ohyb zanedbatelné. Konstrukce držáku nemusí být i při uchycení těžších cívek robustní.

Zabránění skluzu – je-li na spodní základně protiskluzový povrch, pak při otáčení cívky nedochází k jejímu skluzu. To je dáno tím, že váha cívky spočívá na této základně.

- **Nevýhody**

Níže položený výstup – u tiskáren s výše položeným vstupem tiskové struny může docházet vlivem nízkého výstupu z tohoto uložení ke kroucení a zasekávání tiskové struny



Obr. 16 Uložení na vertikální ose [11]

V tomto případě je cívka uložena na otočném hřídeli umístěném vertikálně. Pomocí červeného kužele je přitlačena na spodní kruhovou stěnu, tak dochází k otáčení hřídele spolu s cívkou. Zároveň je pomocí červeného kužele vystředěna.

Uložení na hřídeli s horizontální osou

- **Výhody**

Vyšší poloha výstupu – poloha výstupu tiskové struny z držáku je vyšší.

Způsob uchycení k tiskárně – držák s horizontální osou bývá velmi často uchycen na rámu tiskárny.

- **Nevýhody**

Robustnější konstrukce – při uchycení těžších cívek je nutné, aby držák měl robustnější konstrukci.

Složitější vložení nové cívky – hřídel je ve většině případů uchycena na obou koncích. Při vložení nové cívky je nutné povolit uchycení na jednom z konců a poté vložit novou cívku.



Obr. 18 Uložení na horizontální ose [7]

2.5.2 Uložení pomocí ložisek

2.5.2

Cívka může být buď v přímém kontaktu s ložisky, nebo může být uchycena na adaptačním členu, který je poté uložen na ložiscích a protáčí se na hřídeli. U obou způsobů je osa rotace cívky nejčastěji horizontální.

Přímé uložení na ložiscích

- **Výhody**
Jednoduché zavádění nové cívky – cívku postačuje pouze položit na ložiska
Jednoduchá konstrukce – levné a jednoduché řešení
- **Nevýhody**
Nízká stabilita – vlivem velmi jednoduchého uložení cívky může dojít k vypadnutí cívky, nebo k zaseknutí tiskové struny



Obr. 19 Přímé uložení na ložiscích [10]

Uložení cívky na válečkovém systému

Jedná se o dva válečky rotačně uloženy pomocí ložisek. Cívka se pak pokládá na tyto válečky. Protože u cívek těžších než 2 kg je problém s odvíjením (síla vyvinutá podávacím mechanismem tiskárny nemusí postačovat k bezproblémovému odebrání filamentu), výrobce těžších cívek Monsterfil vyvinul držák strun Monsterfeed. Ve verzi Lite jsou použity pouze dva válečky uchycené k ocelovému rámu, ale verze Pro zajišťuje otáčení válečků pomocí motoru. Navíc je držák vybaven výstražným systémem, který upozorní, nastane-li s odvíjením struny problém. [8]

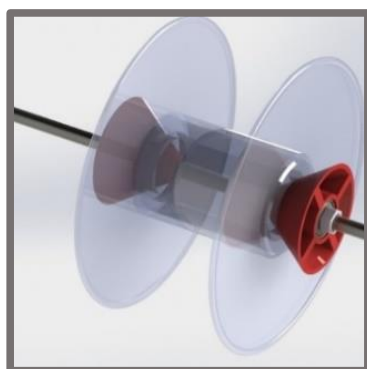


Obr. 20 Držák strun Monsterfeed Pro [19]

Množství odvinutého filamentu se zjišťuje pomocí napnutí filamentu vystupujícího z držáku. Je-li filament napnut, držák strun pootočí cívku a dojde tak ke snížení napnutí filamentu. Následně toto napětí zvýší podávací mechanismus tiskárny při odběru tiskové struny. Tento princip se pak stále opakuje.

Uložení na adaptačním členu

V tomto případě jsou v přímém kontaktu s otvorem cívky adaptační členy, které jsou pomocí ložisek rotačně uloženy na přírubách. Příruby mají vnitřní závit, tak je možné nastavení vzdáleností mezi danými adaptačními členy.



Obr. 21 Uložení na adaptačním členu [11]

2.6 Vedení tiskové struny

2.6

Mezi výstupem tiskové struny z cívky a vstupem do tiskárny je nutné zajistit vedení tiskové struny tak, aby kladla co nejmenší odpor vůči odvíjení a aby nedocházelo k jejímu kroucení a zasekávání.

2.6.1 Vedení pomocí vodicí trubice

2.6.1

Tisková struna prochází skrze vnitřek trubice. Ta zabraňuje kroucení tiskové struny během tisku. Trubice je vyrobena z materiálu, který je elastický a má nízký součinitel tření. Například z teflonu (PTFE).

- **Výhody**

Nízký odpor vůči tření – materiály jako teflon mají velmi nízký součinitel tření, kladou tak malý odpor vůči odebrání tiskové struny

Spolehlivé vedení tiskové struny – tisková struna je vedena celým povrchem trubice

- **Nevýhody**

Složitější zavádění tiskové struny – po vložení nové cívky do držáku strun je nutné zavést tiskovou strunu do trubice

Pohyb během tisku – při pohybu během tisku dochází i k pohybu trubice. Vzniká tak nutnost zajištění trubice proti pohybování

2.6.2

2.6.2 Vedení pomocí vodicích otvorů

Takto může být uchycena buď vodicí trubice, nebo tisková struna. V obou případech je ideální použití více úchytek pro spolehlivější vedení.

- **Výhody**

Jednoduché zavádění – zavádění je jednodušší, než v případě vodicí trubice

Malý odpor vůči pohybu – způsobeno vlivem malé kontaktní plochy

- **Nevýhody**

Vedení – pro spolehlivé vedení nutnost použít více úchytek

Přichycení úchytek – konstrukce musí obsahovat povrchy určené pro přichycení úchytek



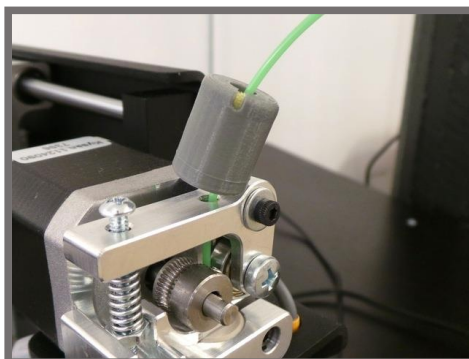
Obr. 22 Vedení pomocí vodicích otvorů [18]

Spolehlivějšího vedení docílíme kombinací obou těchto metod.

2.7 Čištění tiskové struny

2.7

Vložením jednoduchého filtru před vstup tiskové struny do tiskárny se docílí jejího čištění, případně i mazání. Filtr se skládá z pouzdra, uvnitř něhož je vložen materiál, který zajišťuje čištění a mazání struny. Tento materiál může být např. z molitanu, nebo jiného vhodného materiálu.



Obr. 23 Čištění tiskové struny [11]

Mazání se nejčastěji docílí nanesením oleje dovnitř filtru. Tisková struna pak klade menší odpor zásobovacímu mechanismu tiskárny.

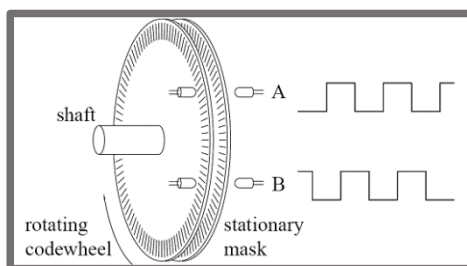
2.8 Senzory

Aby se eliminovali ostatní chyby tisku, je nutno použít senzory. Senzory se propojí pomocí vývojové desky a vývojová deska poté přeměňuje vstupní data ze senzorů na výstupní data pomocí softwaru a zajišťuje požadované funkce.

2.8.1 Odměřování rotačním enkodérem

Digitální optický enkodér je zařízení, které přeměňuje pohyb na sekvenci digitálních pulzů. Počítáním jednoho impulsu nebo dekódováním skupiny impulsů mohou být impulsy přeměněny na relativní nebo absolutní měření pozice. Absolutní rotační enkodér je enkodér, kde každý digitální signál koresponduje s danou pozicí hřídele. Inkrementální enkodér, který generuje digitální signály v závislosti na rotaci hřídele, umožňuje měření relativní pozice hřídele. [9]

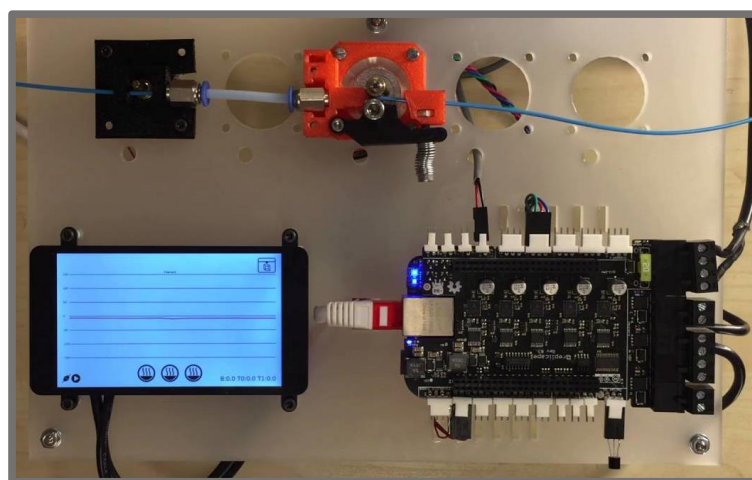
Rotační enkodér je klíčová součást v mnoha systémech, například v zařízeních snímajících pohyb, v průmyslových aplikacích pro monitorování rotace mechanických částí. Přesné enkodéry mohou být rozděleny na optické a magnetické. [10]



Obr. 24 Princip rotačního enkodéru [12]

Signál pulsů A je využit k určení rychlosti rotace, zatímco signál pulsů B určuje směr rotace. Při použití pro měření tiskové struny je tedy tento typ senzoru schopen rozeznat i zpětné odvíjení.

Pomocí známého průměru válečku, který je uchycen na rotačním enkodéru, lze snadno zjistit množství odebírané struny i rychlost jejího odebrání



Obr. 25 Měření tiskové struny rotačním enkodérem [16]

U tohoto způsobu měření je nutné zajistit přitlačování tiskové struny k měřicímu válečku tak, aby tisková struna vždy při svém pohybu otáčela měřicím válečkem.

- **Výhody**

Vysoká přesnost – měření rotačním enkodérem je velmi přesné.

Spolehlivé měření – pokud je tisková struna vhodně přitlačována k měřicímu válečku, dosahuje tento způsob měření vysoké spolehlivosti. Přesnost měření nezávisí na síle odebrání tiskové struny, ani na zbývajícím množství navinutém na cívce.

- **Nevýhody**

Určení zbývajících množství navinutého na cívce – pro určení zbývajících množství na cívce je nutné ukládat informace o odebrání tiskové struny. Dále je nutné znát hustotu a délku tiskové struny navinuté na nepoužité cívce. Určení zbývajících množství je příliš složité.

2.8.2**2.8.2 Odměrování měřením hmotnosti**

Při známé hmotnosti prázdné cívky a známé celkové hmotnosti cívky s navinutou strunou lze určit množství materiálu navinutého na cívce.

- **Výhody**

Určení zbývajícího množství navinutého na cívce – pomocí známé hmotnosti cívky bez navinuté struny dokáže určit hmotnost zbývající tiskové struny.

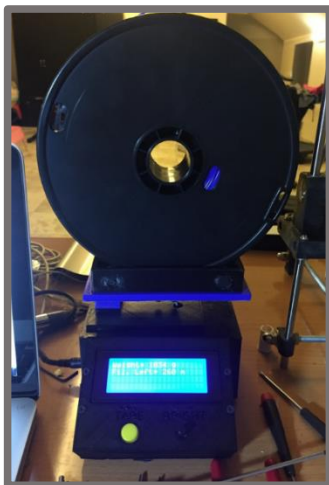
- **Nevýhody**

Nízká přesnost – tento způsob odměrování je málo přesný (přesnost pro držák na obr. 16 - ± 1 metr, pokud je na zařízení celá cívka a ± 5 metrů během odebírání tiskové struny – pro 5 kg PLA tiskové struny na cívce). [11]

Odlišné hmotnosti cívek – hmotnosti prázdné cívky se liší v závislosti na hmotnosti tiskové struny, pro níž jsou určeny, a v závislosti na výrobci.

Určení zbývajícího objemu – pro určení zbývajícího objemu je nutné znát hustotu dané tiskové struny, která se pro stejný materiál liší v závislosti od výrobce. Může se i lišit při porovnání dvou stejných cívek o stejné hmotnosti a stejného výrobce.

Při menším zbývajícím množství tiskové struny na cívce může být síla způsobená odebíráním tiskové struny vyšší než gravitační síla samotné cívky s navinutou tiskovou strunou. [11] V tomto případě je zařízení velmi nepřesné. Tento způsob je tedy vhodné použít pro určení, zda dojde k vypotřebování tiskové struny před samotným tiskem. To z důvodu, že před tiskem nebude měření hmotnosti ovlivněno odebíráním tiskové struny.



Obr. 26 Měření tiskové struny odměrováním hmotnosti [11]

Přesnost měření hmotnosti dále ovlivňuje:

- Množství nečistot a absorbované vlhkosti v tiskové struně
- Odlišná hustota tiskové struny (při přepočtu na objem/délku)

Přesnost je tedy hlavně ovlivňována ostatními faktory, samotné měření hmotnosti je velmi přesné (např. pomocí tenzometrů).

2.9 Vývojové desky

U sofistikovanějších systémů zabraňujícím chybám tisku souvisejících s tiskovou strunou je nutno použít senzory, hodnoty naměřené senzory pomocí softwaru převést na výstup a pomocí nich komunikovat s uživatelem, nebo 3D tiskárnou. K tomu slouží vývojové desky.

2.9.1 Arduino

Arduino je open-source elektronický, platformní hardware a software. Desky arduino se dělí podle použitého procesoru a počtu pinů na dvě základní verze – Uno a Mega. Výhodou těchto desek je jejich nízká cena a open-source software. [12]

Desky se poté programují pomocí jazyku Arduino, který je ve skutečnosti složen z funkcí naprogramovaných pomocí jazyků C a C ++. Syntaxe jazyku Arduino je tak velmi podobná jazykům C a C ++, s tím rozdílem, že pro ulehčení se používají specifické funkce definované přímo v jazyku Arduino. Pro další ulehčení je možno použít knihovny, což jsou sady příkazů ulehčující například vykreslování na displeji, používání výstupních senzorů a tak dále.



Obr. 27 Deska Arduino Uno [12]

2.9

2.9.1

Program je rozdělen do tří částí. První část se nachází před příkazem **void setup ()**. V této části se definují použité knihovny a proměnné. Knihovny jsou sady příkazů, které poté zjednodušují programování. Místo složitého definování opakujících se funkcí lze použít vhodnou knihovnu a poté použít některou z jejích funkcí příkazem s požadovanými parametry. Na obr. 18 je příklad vykreslování hodnoty proměnné využitím knihovny `LiquidCrystal_I2C`, přičemž příkazy využívající funkci této knihovny jsou psány ve tvaru: `lcd.příkaz(parametry)`.



```
sketch_may14b | Arduino 1.8.2 (Windows Store 1.8.3.0)
Soubor Úpravy Projekt Nástroje Nápověda

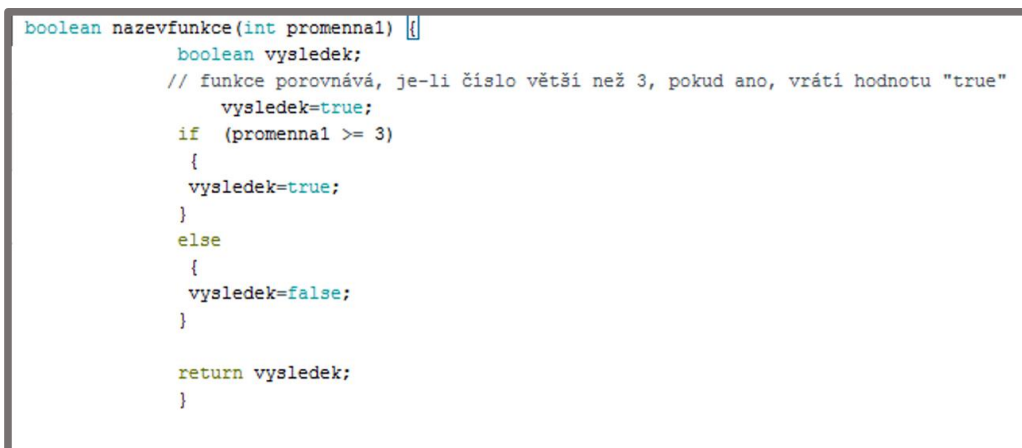
sketch_may14b $
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // definování použité knihovny
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // inicializace displeje
int promenna;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  promenna = 4;
}

void loop() {
  lcd.print("Promenna");
  lcd.println(promenna);
}
```

Obr. 28 Základní struktura programu Arduino

Funkce slouží pro vykonávání příkazů, které se opakují. Jejich princip je podobný knihovnám, s tím rozdílem, že funkce je nutné definovat na začátku programu. Funkce pak vrací ve svém názvu výsledek požadovaných příkazů. Proměnné funkce pak vznikají pouze při volání funkce, po provedení příkazů funkce pak tyto proměnné zanikají.



```
boolean nazevfunkce(int promennal) {
  boolean vysledek;
  // funkce porovnává, je-li číslo větší než 3, pokud ano, vrátí hodnotu "true"
  vysledek=true;
  if (promennal >= 3)
  {
    vysledek=true;
  }
  else
  {
    vysledek=false;
  }

  return vysledek;
}
```

Obr. 29 Příklad funkce

Proměnné jsou psány ve tvaru: datový typ_název proměnné. Datový typ určuje množství paměti vyhrazené pro danou proměnnou a hodnoty, kterých může proměnná nabývat.

V části **void setup()** se provádějí příkazy při nahrávání zdrojového kódu na desku, nebo při novém spuštění desky. Příkazy uvedené v této části se provedou jen jednou. Typicky se zde určují vstupní hodnoty proměnných.

Příkazy hlavního programu se nacházejí v části **void loop()**. Jak název napovídá, program neustále běží ve smyčce až do jeho zastavení.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3D tiskárny střední třídy většinou neposkytují obsluhu informaci o množství zbývajících filamentu. U 3D tiskárny Stratasys Dimension SST 1200 tato informace poskytována je, ale pouze za předpokladu používání kazety určené pro tuto tiskárnu. Při používání filamentu navinutého na cívce je nutné upravit kazety a poté cívku uchytnout na držák strun. Jak ale bylo popsáno v přehledu současného stavu poznání, během tisku může dojít k několika typům chyb, kterým se dá vhodnou konstrukcí držáku strun předejít. Především u náročnějších tisknutých sestav může být při výskytu chyby tisku ztracena několikahodinová práce tiskárny. Pokud bude držák poskytovat informace o materiálu, zjednoduší pak i obsluhu tiskárny.

Primárními parametry jsou jednoduchost používání, spolehlivost a univerzálnost. Jednoduchostí se rozumí intuitivní ovládání držáku strun. Vložení nové cívky by mělo být co nejjednodušší a pokud možno časově nenáročné. Konstrukce držáku (mechanická i elektronická část) by měla být taková, aby při používání držáku byla co nejvíce snížena pravděpodobnost výskytu chyb tisku a aby umožnila přesný monitoring spotřeby materiálu a určení množství zbývajících materiálu na cívce. Univerzálností se rozumí možnost vložení cívek různých velikostí od různých výrobců, ale také možnost použít držák strun i u jiné tiskárny při zachování těchto parametrů.

Protože držák strun bude primárně určen pro cívky o hmotnosti 2,5 kg, bude nutné zajistit spolehlivé odvíjení cívky buď volbou vhodného uložení, nebo jiným způsobem.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4

4.1 Návrh konstrukce

4.1

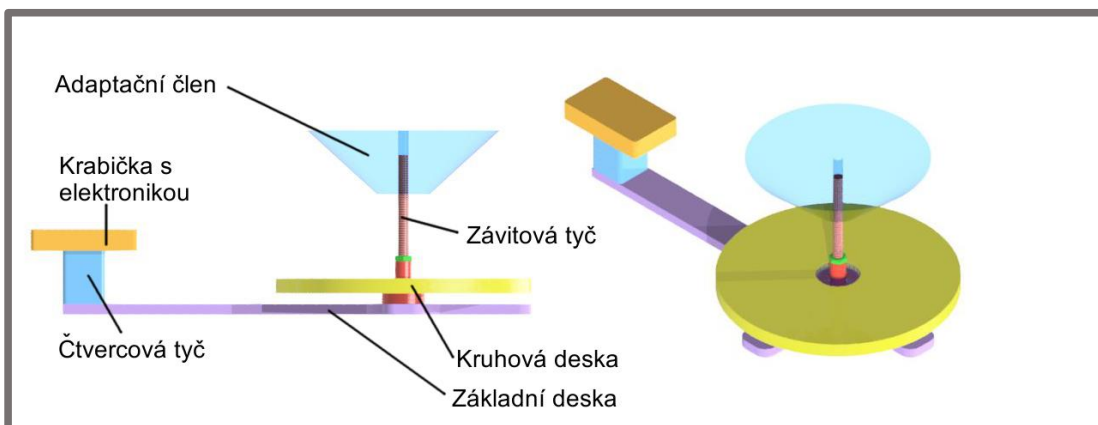
Vhodná konstrukce držáku strun zjednoduší obsluhu tiskárny a může vézt i ke snížení nákladů na tisk. Držák strun bude možno používat s cívkami od různých výrobců, ale primárně bude určen pro těžší cívky. Dimenzován bude na 2.5 kg cívku.

Díky jednoduchosti vkládání cívky byly na začátku vybrány dva základní typy uchycení, a to uchycení na vertikální hřídeli a uchycení na válečkovém systému.

4.1.1 Uchycení na vertikální hřídeli

4.1.1

Základem konstrukce je závitová tyč, našroubovaná na základní desce. Na závitové tyči je pak našroubovaná hřídel pro kontakt s ložiskem. Kuželový adaptační člen má průchozí otvor a na cívku působí vlivem své hmotnosti. Cívka je položena na kruhové desce, která se přes ložisko protáčí na hřídeli. Na nejdelším ramenu základní desky je čtvercová tyč, na níž je umístěna krabička s elektronikou a jejímž vnitřkem bude procházet filament.



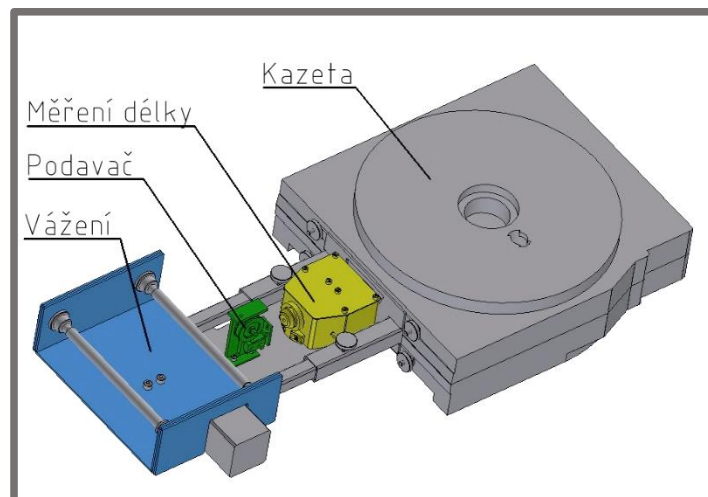
Obr. 30 Uchycení na vertikální hřídeli

Výhodou tohoto řešení je stabilní uchycení cívky. Bude-li mít adaptační člen dostatečnou hmotnost, cívka se při odběru nebude pohybovat. U těžších cívek ale bude vlivem větší celkové hmotnosti cívky problém zajistit bezproblémové odvíjení. Další nevýhodou tohoto řešení je, že aby se zabránilo zaseknutí filamentu vlivem pohybu extruderu při tisku, je nutné držák umístit v dostatečné vzdálenosti od tiskárny. Při použití u tiskárny Stratasys Dimension SST 1200 by pak byl požadavek na příliš velké místo vyhrazené pro držák strun. Tyto dvě skutečnosti byly hlavním důvodem pro návrh odlišného typu uchycení cívky.

4.1.2 Uchycení na válečkovém systému

Hlavním cílem návrhu bylo zmenšit prostor, který bude nutný pro používání držáku. Jak bylo popsáno v kapitole 2.3, při použití cívek od jiných výrobců je nutné upravit kazetu tiskárny SST 1200 tak, aby filament procházel jejím vnitřkem. Dále je možno využít kazetu pro uchycení držáku. Protože držák bude sloužit pro uchycení těžších cívek, bylo rozhodnuto, že odvíjení cívky nebude zajišťovat podávací mechanismus tiskárny, ale držák strun. Toho lze docílit pohonem jednoho z válečků pomocí krokového motoru.

Cívka tedy bude položena na dvou válečcích, přičemž jeden z nich bude poháněný krokovým motorem. Aby bylo zajištěno bezproblémové odvíjení a vedení filamentu, bude filament vstupovat přes podavač, dále bude procházet přes senzory kontrolující napnutí filamentu a množství odebraného filamentu (elektronická část bude popsána níže). Držák strun bude možno použít i u jiných tiskáren – pak se držák vydělá z konstrukce pro přichycení ke kazetě a položí se na vhodné místo poblíž požadované tiskárny.

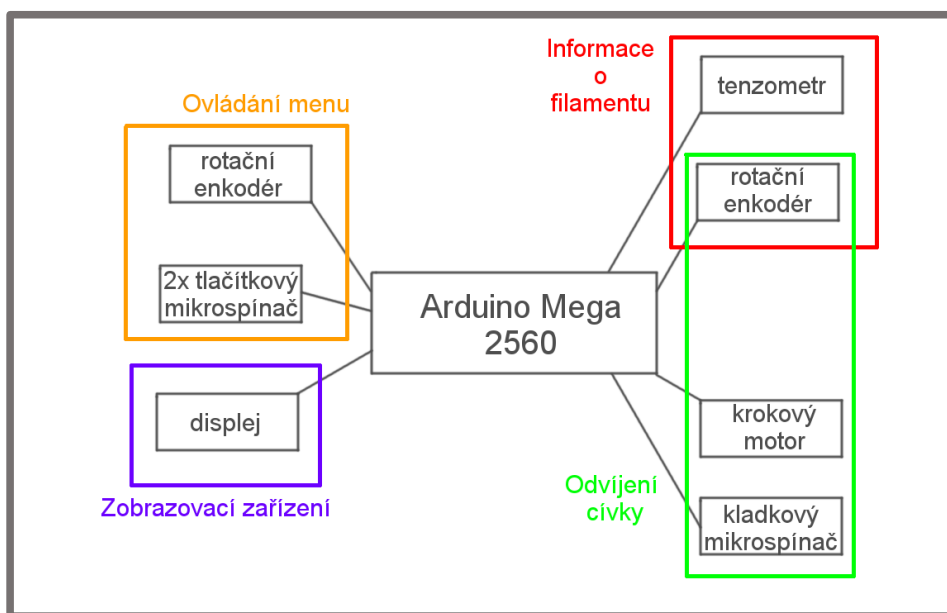


Obr. 31 Uložení na válečkovém systému

4.2 Elektronika

4.2

Elektronika bude zajišťovat následující funkce: Monitoring spotřebovaného materiálu, odvíjení filamentu a zobrazování hodnot. Použitá elektronika je znázorněna na blokovém schématu na obr. 22.



Obr. 32 Blokové schéma použité elektroniky

- Ovládání menu – uživatel bude pomocí rotačního enkodéru vybírat řádky menu, stiskem výběr potvrdí. Dále bude pomocí enkodéru a tlačítek zadávat parametry (např. hmotnost prázdné cívky).
- Zobrazovací zařízení – během tisku zobrazuje informace o zbývajícím a spotřebovaném materiálu. Mimo tisk zobrazuje menu a nastavování parametrů.
- Informace o filamentu – tenzometr slouží pro určení hmotnosti zbývajícího filamentu, rotační enkodér odměřuje materiál spotřebovaný během jednoho tisku.
- Odvíjení cívky – krokový motor je spuštěn, je-li kladkový mikropínač v poloze “zapnuto“, rychlost odvíjení určí podle údaje z rotačního enkodéru.

Hlavním mikrokontrolerem je vývojová deska Arduino Mega 2560, která bude pomocí programu napsaného v jazyce Arduino provádět výše popsané funkce. Ovládání krokového motoru zajišťuje ovladač Pololu DRV8825. Protože signál z tenzometru je analogový, byl pro převod do digitálního signálu použit A/D převodník HX711. Pro větší přehlednost blokového schématu v něm nejsou tyto dvě součásti zobrazeny.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

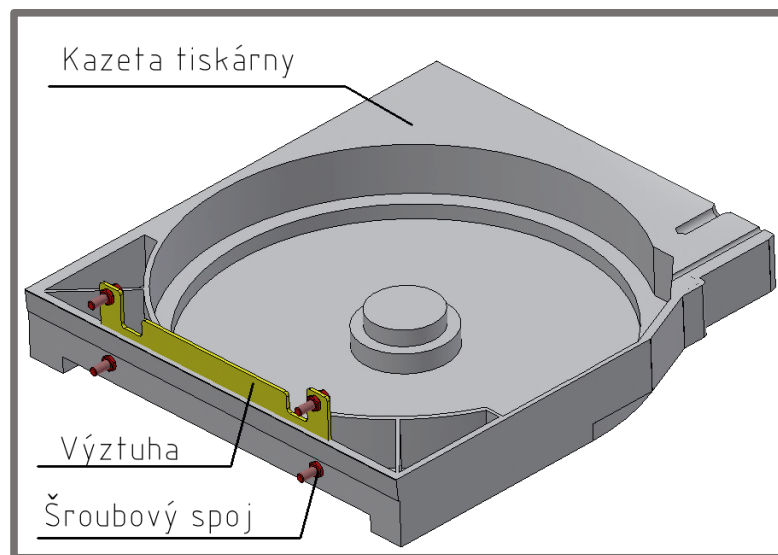
Nejvhodnější variantou řešení je varianta č. 2 – uchycení na válečkovém systému. Její hlavní výhodou je velice jednoduché vkládání nové cívky a jednoduchá konstrukce uložení cívky.

5.1 Uchycení konstrukce

Protože konstrukce bude uchycena ke kazetě tiskárny SST 1200, celá konstrukce je navrhována s ohledem na výslednou hmotnost. Proto je většina dílů z hliníkové slitiny AlSiMg, nebo z termoplastů.

5.1.1 Kazeta

Jako základ posloužila originální kazeta tiskárny SST 1200, z níž byla vyjmuta cívka s filamentem. Do kazety byly vyvrtány 4 otvory a kazeta byla ještě zevnitř vyztužena pomocí plechu z AlMgSi. Zevnitř kazety byly vloženy šrouby M5, které poté slouží k uchycení další části konstrukce. Pro názornost není vrchní strana kazety na obr. 2 zobrazena.

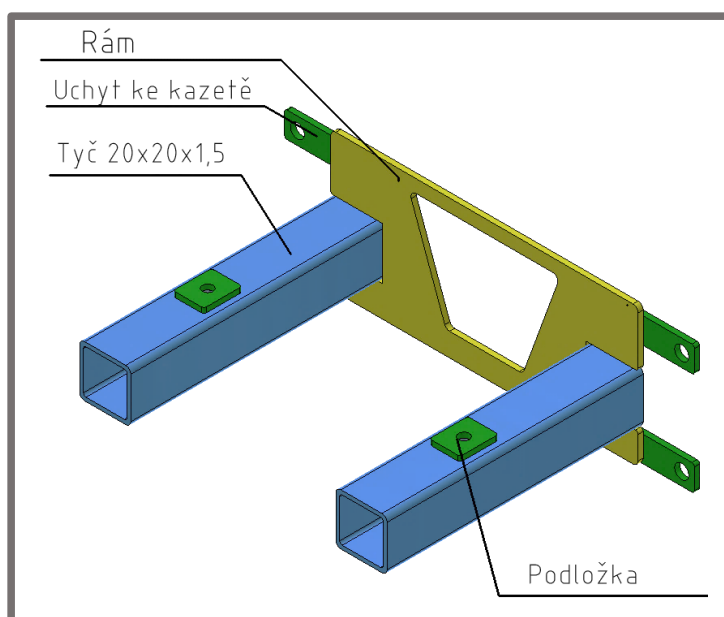


Obr. 33 Kazeta pro uchycení držáku strun

5.1.2 Přichycení ke kazetě

Jedná se o svarek složený z hliníkových plechů a dvou hliníkových čtvercových tyčí o rozměru 20x20x1,5. Dovnitř hliníkových tyčí se bude zasouvat konstrukce samotného držáku strun, a bude uchycena pomocí aretačních šroubů se závitem M5 přišroubovaných na vrchní straně hliníkových tyčí. Protože by síla stěny byla pro závit M5 příliš tenká, na vrchní stranu čtvercových tyčí byly přivařeny podložky, aby došlo k zvětšení délky závitu.

Celá konstrukce se vloží pomocí 4 děr na šrouby kazety a dotáhne se pomocí vroubkovaných matic DIN 467 M5. Matice s vroubkováním byly voleny kvůli nutnosti sundat celou konstrukci, pokud by vevnitř kazety došlo k zaseknutí filamentu.



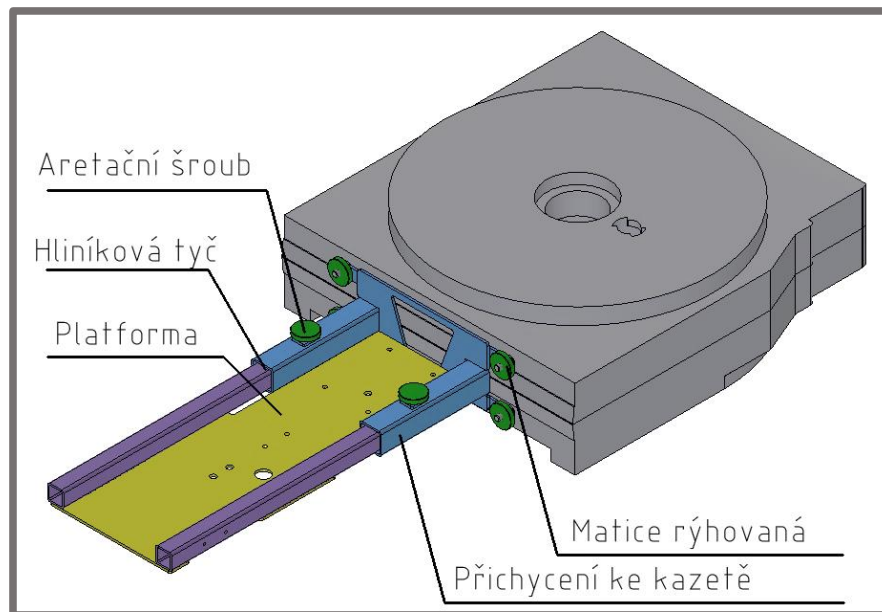
Obr. 34 Přichycení ke kazetě

5.1.3 Hliníková tyč 15x15x1,5

V konstrukci budou použity 2 tyto tyče. Tato součást bude vložena dovnitř hliníkové tyče 20x20x1,5 a pomocí díry a šroubu s rýhovanou hlavou bude aretována. Kvůli vymezení menší vůle je z vrchní strany součásti přivařena podložka o tloušťce 1 mm. Ze spodní strany součásti jsou vyvrtány 3 díry a následně jsou do nich nalisovány matice M5 (opět je tloušťka 1,5 mm příliš malá). Pomocí těchto děr jsou pak obě tyče přichyceny k platformě. Z boční strany tyčí jsou vyvrtány dva otvory pro uchycení krytu elektroniky.

5.1.4**5.1.4 Platforma**

Platforma je hliníkový plech vypálený laserem. Jedná se o základ konstrukce držáku strun, na němž jsou poté uchyceny další součásti. Všechna přichycení jsou realizována pomocí průchozích děr, skrz které se pomocí šroubů a matic přitáhne daná součást. Platforma je uchycena k hliníkovým tyčím o velikosti 15x15x1,5 pomocí 6 děr pro šrouby M5

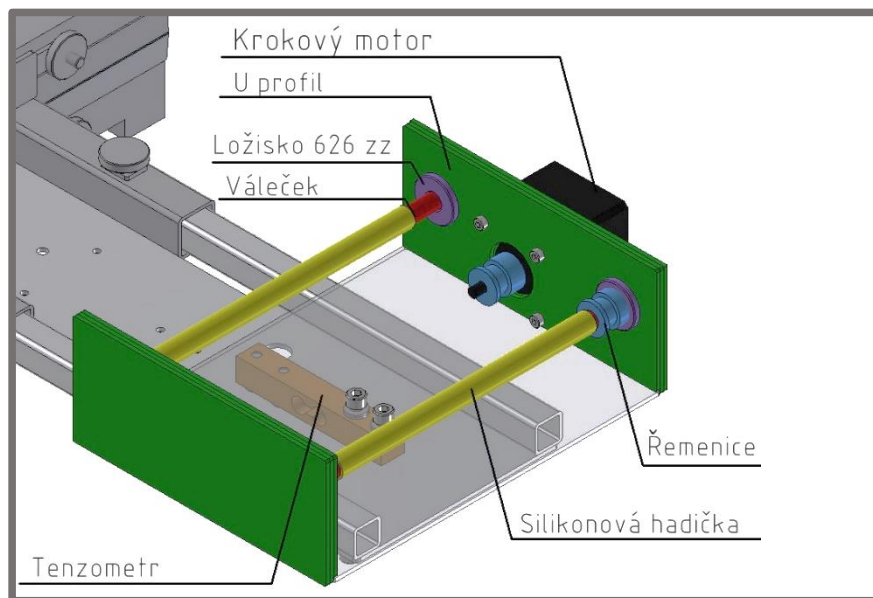


Obr. 35 Sestava platformy

5.1.5**5.1.5 Základna**

Funkcí této sestavy je uchycení cívky a vážení pro odhad zbývajících filamentu na cívce. Celá základna je uchycena na tenzometru, který je poté uchycen k platformě. Jedná se o ohybový tenzometr, vůle mezi platformou a tenzometrem byla dosažena pomocí podložek. Základna se skládá z lepených plastových desek, které poté tvoří U profil. Ve dvou protějších stranách základny jsou vloženy válečky z tažené oceli, které jsou rotačně uloženy v ložiscích.

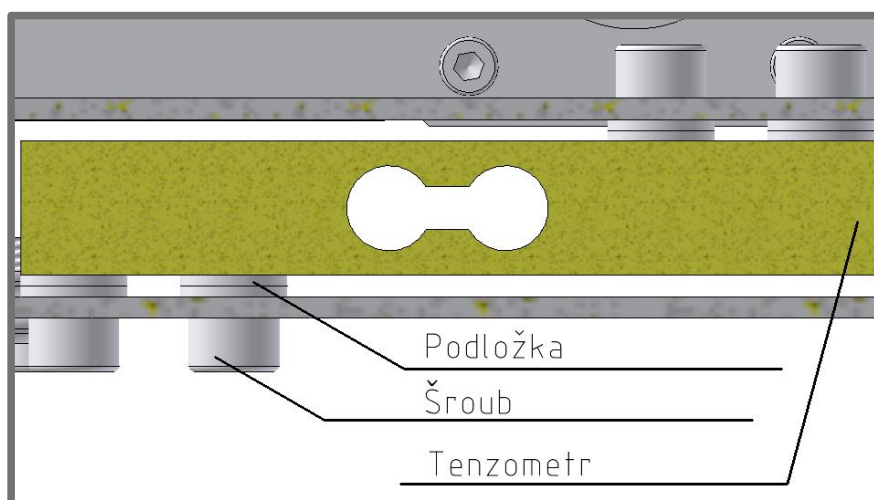
Válečky jsou axiálně zajištěny třemi stavěcími kroužky a řemenicí. Na pravé straně základny je uchycen krokový motor, který přenáší krouticí moment na jeden z válečků pomocí řemenového převodu. Na válečcích jsou poté vloženy gumové hadičky pro zvýšení adheze cívky.



Obr. 36 Základna

Při realizaci byl mezi šrouby uchycujícími základnu k tenzometru vložen ocelový plech, který výrazně zmenší průhyb základny. Průhyb základny je tak minimální i při vložení 2,5 kg cívky na držák strun.

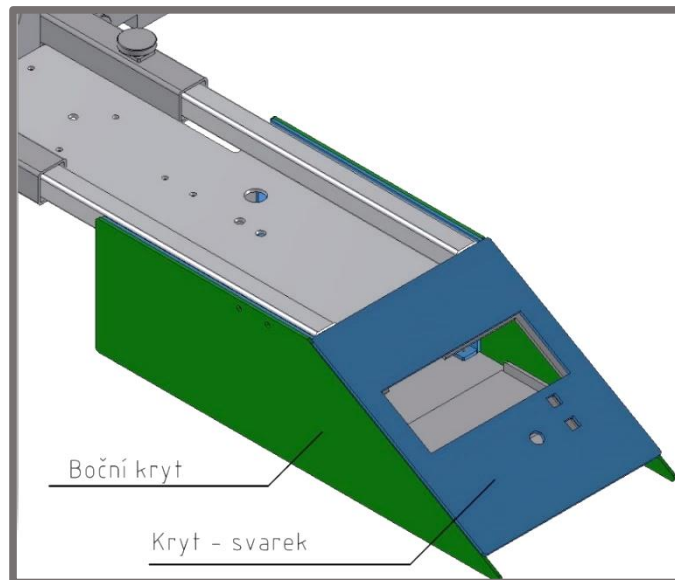
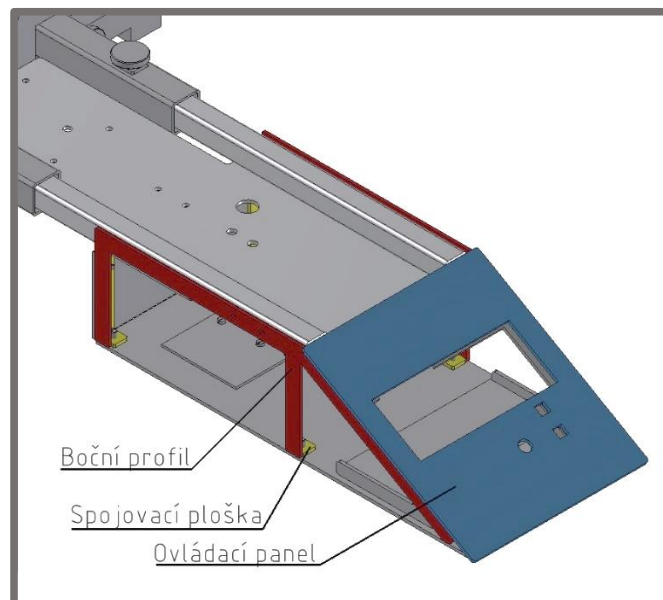
Experimentálně bylo ověřeno, že silikonové hadičky zabraňují prokluzu cívky. Tento fakt byl ověřen při vložení prázdné 2,5 kg cívky, jejíž váha byla 612 g.



Obr. 37 Tenzometr

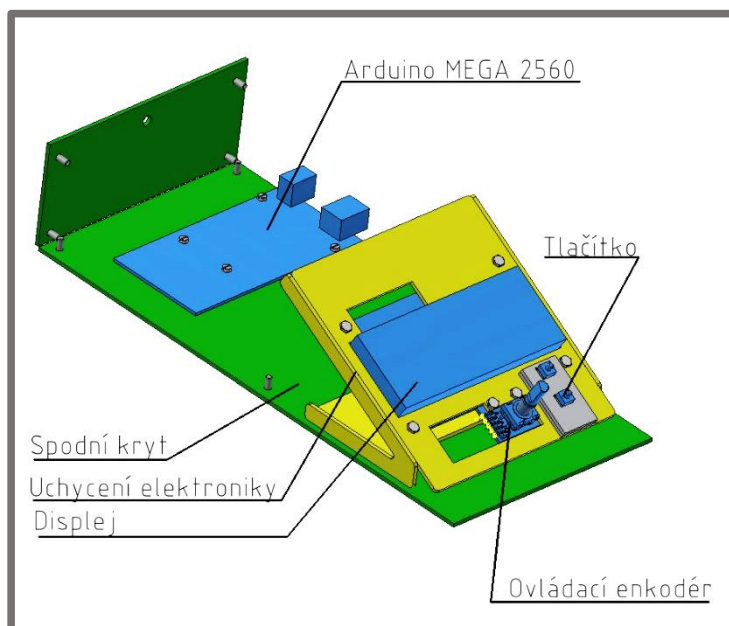
5.1.6**5.1.6 Kryt elektroniky**

Základem krytu elektroniky je svarek hliníkových výpalků. Skládá se ze dvou výpalků, na kterých jsou navařeny úchytné plochy pro plastové kryty a na přední straně je navařen přední kryt elektroniky. Poté jsou na svarek našroubovány plastové desky, které jej zakryjí. Kryt je pomocí čtyř šroubů umístěných naboku poté přišroubován k tyčím 15x15x1,5. Z vrchní strany je kryt elektroniky zakryt platformou.

**Obr. 38** Kryt elektroniky**Obr. 39** Rám krytu elektroniky

Protože elektronické součásti mají zespodu výstupky kvůli pájeným spojům, byly uchyceny k dílu z lepených plastových výpalků přes svou horní stranu pomocí šroubových spojů. Celá sestava sloužící pro úchyt potom je přilepena na spodní část

krytu elektroniky. Na spodní části krytu je uchycena vývojová deska Arduino Mega 2560, přičemž vůle kvůli vystupujícím částem desky je docíleno pomocí podložek pod šrouby.

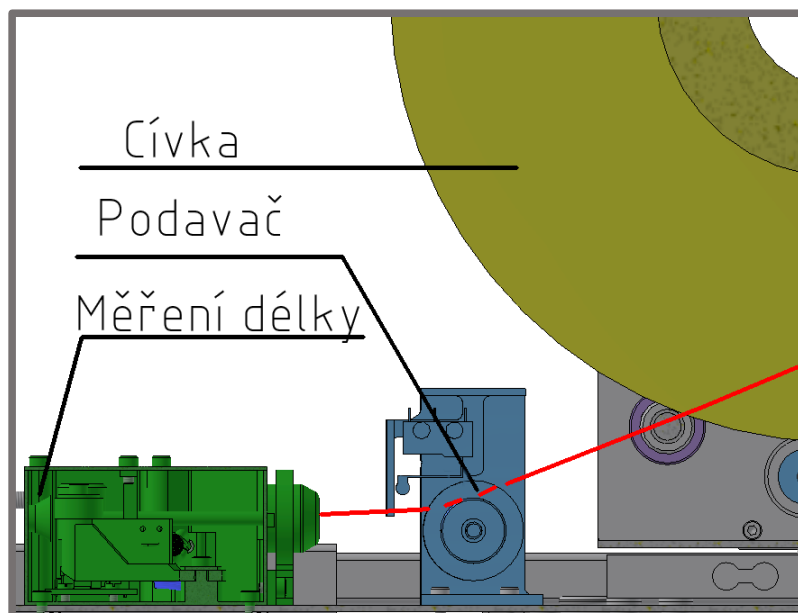


Obr. 40 Uchycení elektronických součástí

5.2 Vedení filamentu

5.2

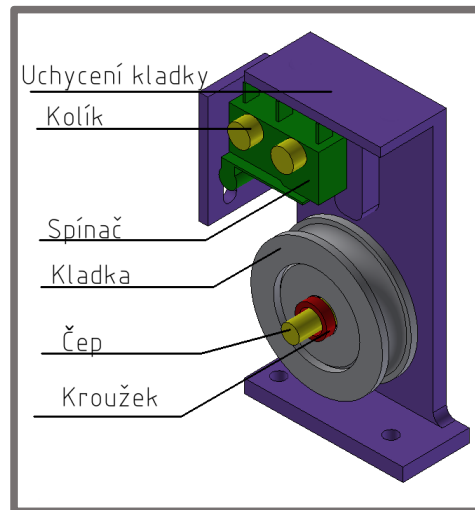
Filament nejprve vstupuje do kladkového podavače. Poté vstupuje přes čistící filtr do sestavy měření délky, kde je pomocí rotačního enkodéru měřena délka filamentu.



Obr. 41 Vedení filamentu

5.2.1**5.2.1 Kladkový podavač**

Funkcí podavače je zajistit správné odvíjení filamentu při různém průměru návinu na cívce. Filament se provleče kladkou a poté je provlečen drážkou tvarem připomínající drážku pro pero. Pod kladkou je umístěn kladkový mikrospínač. Je-li filament napnut, znamená to, že došlo k vypotřebování množství odvinutého filamentu pro odběr tiskárny. Filament vlivem svého napnutí sepne kladkový mikrospínač a ten poté vydá signál pro zapnutí odvíjení filamentu z cívky.

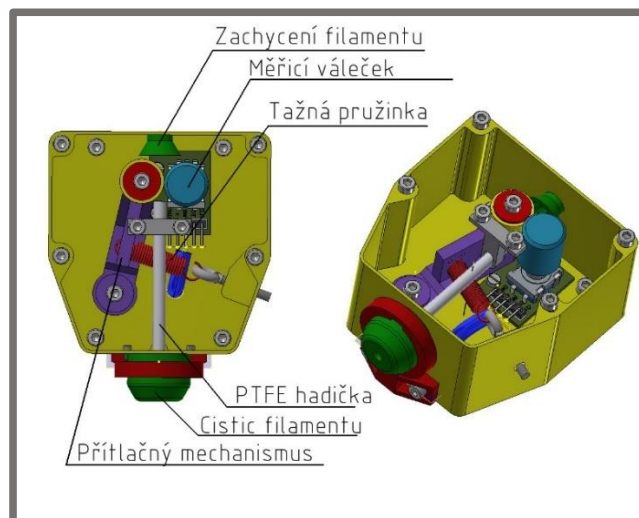


Obr. 42 Kladkový podavač

Pokud by filament spínal spínač pouze vlivem své gravitace, je možné kladkový podavač otočit a uchytit pomocí jeho vrchní strany.

5.2.2**5.2.2 Měření délky**

Základem je krabíčka. Protože jde o prototyp, krabíčka je vytištěna 3D tiskem metodou FDM. Dovnitř krabíčky je vložen rotační enkodér sloužící pro měření vypotřebovaného filamentu a pro určení otáček krokového motoru (bude popsáno v kapitole 5.2). Z vrchu je pak krabíčka uzavřena krytem z čirého polykarbonátu.



Obr. 43 Měření délky sestava

Kryt musí být průhledný, aby uživatel při chybě tisku mohl zkontrolovat, zda se filament v této části nezaseknul.

Při vkládání nové cívky je přítlačný mechanismus odtlačen začátkem filamentu a následně je protáhnut přes součást Zachycení filamentu – průhledný kryt usnadní navedení filamentu do této součásti.

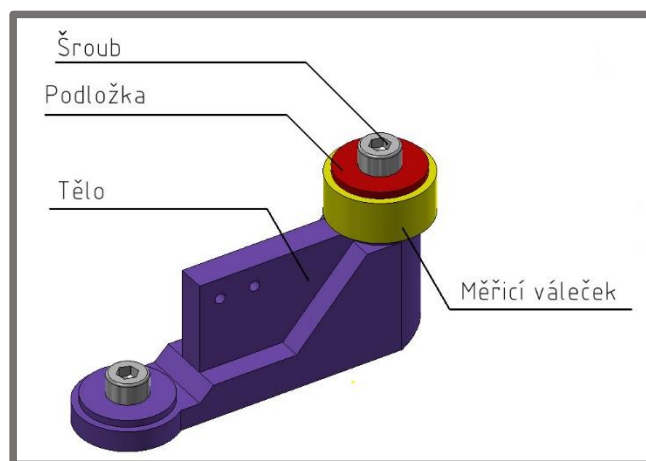
Všechna závitová spojení jsou realizována pomocí mosazných závitových vložek. Závitové vložky se nejprve nahřejí, vlivem teploty přejdou do plastického stavu a vloží se do díry. Po ochlazení se závitové vložky pevně přichytí v dané díře a vytvoří tak závitový spoj.

Přítlačný mechanismus

Slouží k vyvinutí přítlačné síly. Tato síla poté přitlačuje přes přítlačný váleček filament k měřicímu válečku. Tak je snížena možnost prokluzu a ztráty dat. Přítlačnou sílu vyvíjí tažná pružina, která je přichycena jedním koncem ke krabičce pomocí šroubu s okem a druhý konec je provlečený dírou vnitřkem přítlačného mechanismu. Tažná pružina byla zvolena kvůli jednoduchému přichycení k mechanismu. Přítlačný váleček je rotačně uložen na těle přítlačného mechanismu a axiálně zajištěn šroubem s podložkou.

Všechny díly přítlačného mechanismu kromě spojovacích součástí byly vytištěny 3D tiskárnou metody FDM.

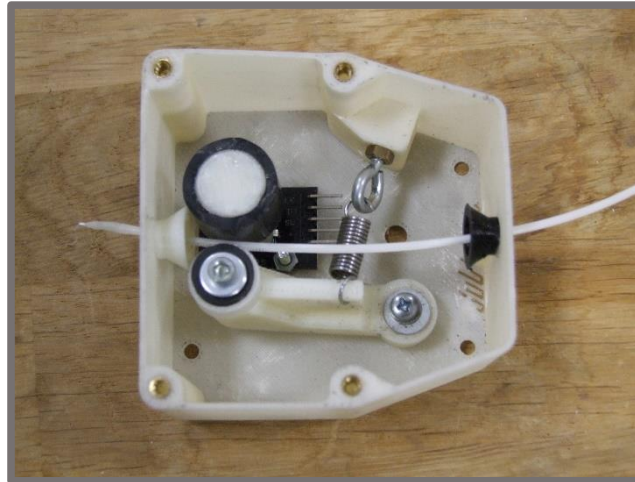
Původně byl šroub pro přichycení přítlačného mechanismu zašroubován do závitové vložky. Při vyvinutí předpětí přítlačného mechanismu ale byla vložka vlivem síly od pružinky vytržena z díry, proto byl spoj poté nahrazen pomocí šroubu a matice.



Obr. 44 Přítlačný mechanismus

Povrch měřicího válečku je pogumovaný. Toho bylo docíleno vložením PVC hadičky dovnitř měřicího válečku a jejím přilepením.

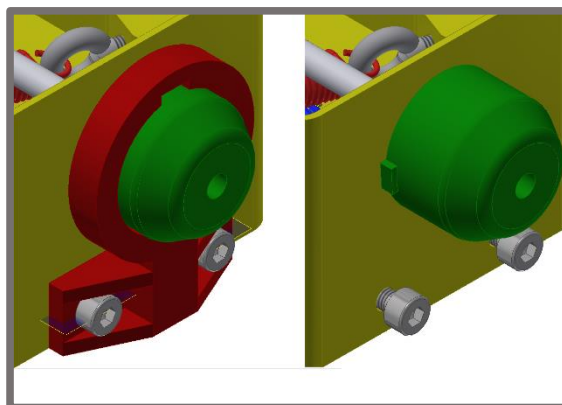
Velikost síly přitlačující filament k měřicímu válečku je ovlivněna typem zvolené tažné pružinky a velikostí deformace pružinky. Velikost deformace pružinky se nastavuje pomocí zašroubování šroubu s okem. Při realizaci byla nastavena vhodná velikost, díky níž je zajištěno, že měřicí váleček se vždy otáčí, dochází-li k odběru filamentu tiskárnou.



Obr. 45 Přítlačný mechanismus

Čisticí náboj

Jedná se o rotační součást vytištěnou pomocí 3D tisku. Dovnitř náboje se vloží molytan, který zajistí samotné čištění. Na vrchní straně je poté umístěn výstupek. Náboj se uchytí přes součást uchycení náboje, kde je drážka tvarem podobná drážce pro pero. Poté se náboj otočí tak, aby výstupek zajistil náboj axiálně z jedné strany, z druhé strany je náboj zajištěn stěnou měření délky



Obr. 46 Uchycení čisticího náboje

5.3 Elektronika

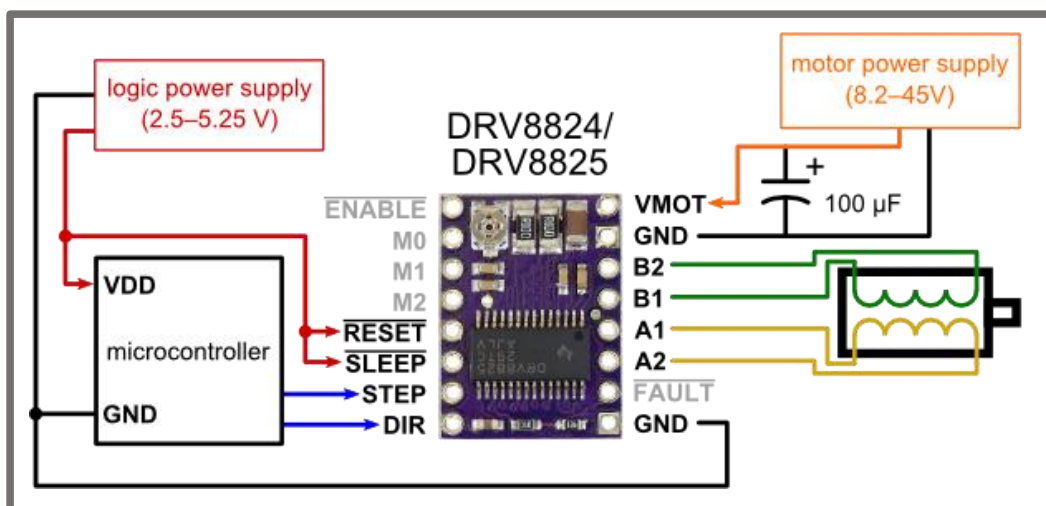
Součásti, které nejsou uvedeny v této kapitole, byly připojeny standartním způsobem k desce Arduino. Vždy byly připojeny požadované vstupní/výstupní piny a poté byl připojen pomocí svorkovnice napájecí okruh. Napájecí okruh těchto součástí je napájen pomocí desky Arduino. Použitá elektronika je blokově zobrazena v kapitole 4.2 .

5.3.1

5.3.1 Napájení

Kvůli použití krokového motoru byly použity dva zdroje. První zdroj slouží k napájení desky Arduino MEGA 2560, pomocí níž jsou pak napájeny všechny použité sensory s logickým vstupem/výstupem. Deska Arduino je do držáku vložena tak, aby z boční části krytu elektroniky byly přístupné její standartní konektory. Díky tomu je možno upravovat program bez nutnosti odšroubování krytů.

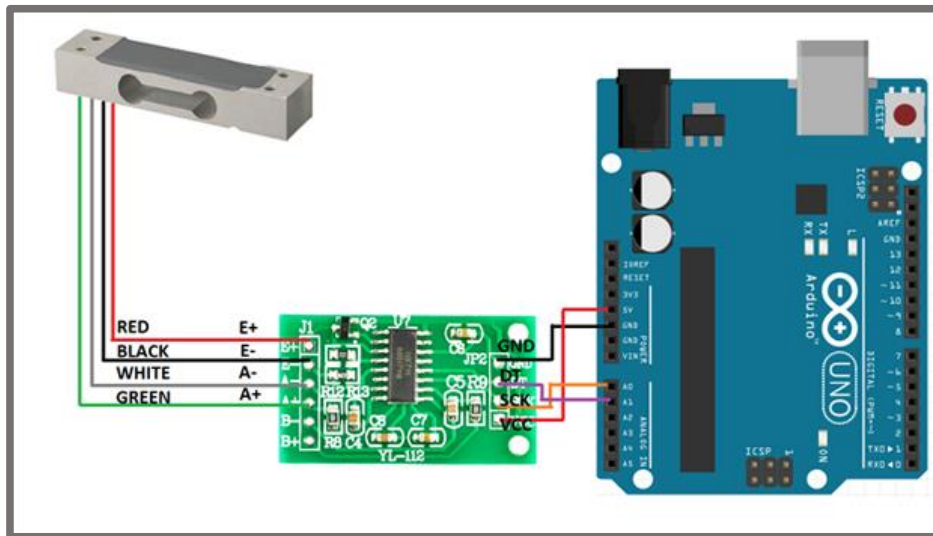
Druhý zdroj slouží k napájení ovladače krokového motoru DRV8825, který poté napájí a řídí krokový motor. K tomuto účelu bylo použito 12V zdroj stejnosměrného proudu. Kvůli proudovým nárazům byl mezi svorky zdroje vložen kondenzátor s kapacitou 100 μ F.



Obr. 47 Schéma zapojení driveru [13]

5.3.2**5.3.2 Tenzometrický snímač**

Pro správnou funkci tenzometru bylo nutné transformovat signál pomocí analogově/digitálního převodníku HX711.



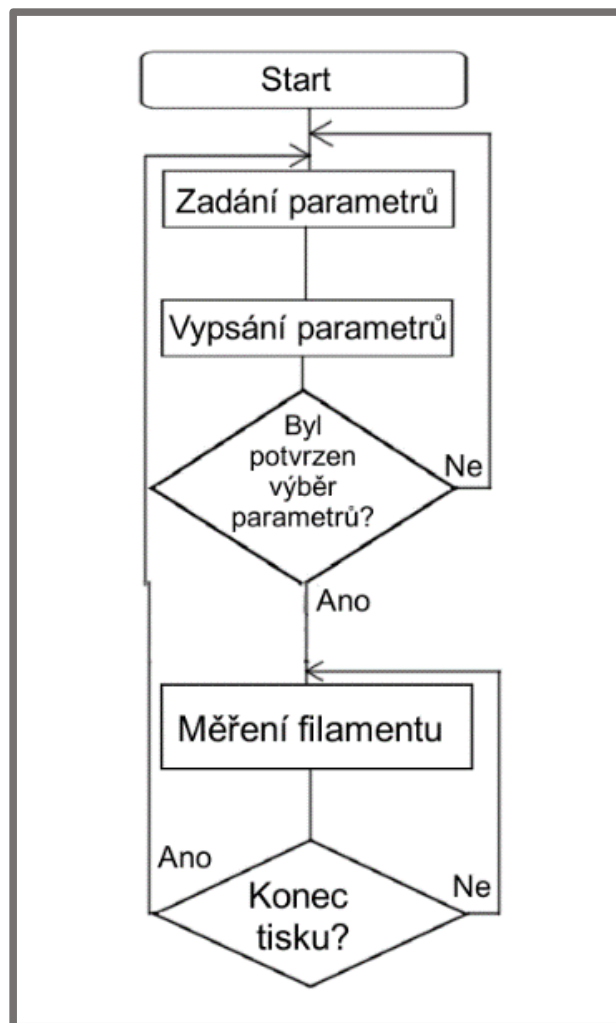
Obr. 48 Zapojení tenzometrického snímače [14]

5.3.3**5.3.3 Displej I2C 20x4**

Pro jednoduchost zapojení a i pro jednoduchost programování vykreslení displeje byl zvolen 4 řádkový displej s připojenou sběrnicí I2C. Tak je možné zapojit displej namísto 6 pinů pouze pomocí dvou pinů (analogové piny 4 a 5).

5.4**5.4 Program**

V této kapitole je popsán program, který zajišťuje funkce uvedené v kapitole 4.2. Protože samotný zdrojový kód programu má přes 1000 řádků, bude zde uveden pouze formou vývojových diagramů, případně zde budou uvedeny kódy důležitých dílčích částí programu. Na obr. 39 je uveden zjednodušený vývojový diagram celého programu, jednotlivé dílčí části budou popsány v podkapitolách.



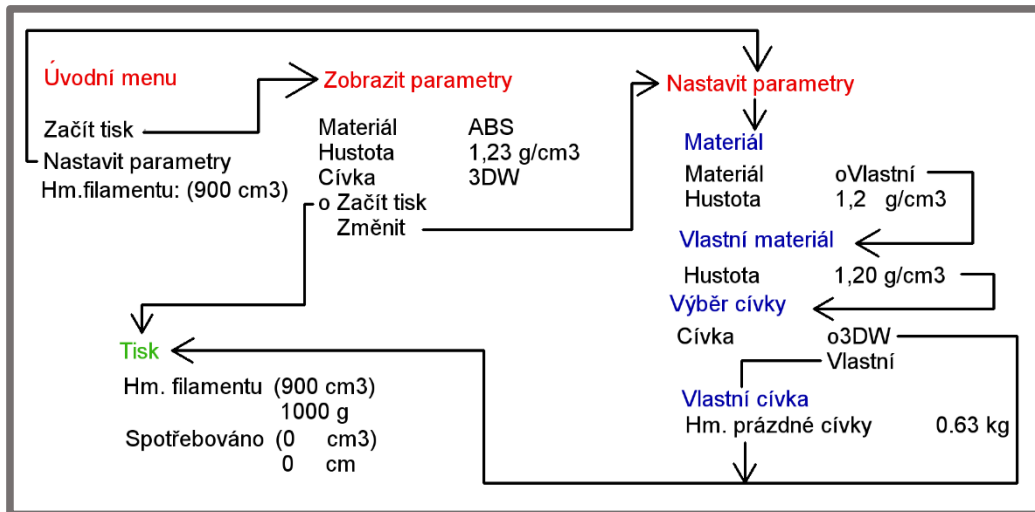
Obr. 49 Princip činnosti programu

5.4.1 Zadání parametrů

Celé zadávání parametrů je prováděno pomocí víceúrovňového menu. V jednotlivých úrovních buď uživatel vybírá parametry popsané textem (například Výběr materiálu – ABS), nebo zadává vlastní číselné hodnoty. Potvrzení číselné hodnoty a přejití do další úrovně menu je provedeno pomocí zmáčknutí tlačítkového enkodéru. Aby vykreslovaný řádek neblikal, byla využita funkce delay(), která program pozastaví na počet milisekund uvedený v závorce.

5.4.1

Na obr. 40 je zobrazeno víceúrovňové menu. Jednotlivé názvy víceúrovňového menu jsou barevně odlišeny oproti názvům parametrů a při zobrazování na displeji se názvy menu nezobrazují. Znak “o” znamená, že v daném řádku lze přepsat daný parametr za parametr uvedený pod ním. Pro přehlednost nejsou zobrazeny všechny možnosti zadávání parametrů. Výběr materiálu a cívky lze nastavit vlastní – pak je využita funkce nastavování číselné hodnoty, nebo lze vybrat z přednastaveného parametru.



Obr. 50 Zadávání pomocí víceúrovňového menu

Přecházení úrovní menu

Pro výběr řádku slouží rotační enkodér. Při otočení rotačního enkodéru ve směru hodinových ručiček je vybrána další úroveň menu. Při otočení v opačném směru se prochází menu opačným směrem. Pokud uživatel otočí v poslední úrovni tak, aby vybral další úroveň menu, je vrácen na začátek daného výběru, a naopak. Do vyšší úrovně menu se uživatel dostane stiskem rotačního enkodéru, do nižší úrovně stiskem tlačítka esc.

Zadání číselné hodnoty

V tomto případě je vypnuto přecházení úrovní menu a rotační enkodér slouží pro nastavení čísla v rozmezí 0 až 9. Potvrzení čísla a přepnutí na další řád čísla je provedeno pomocí zmáčknutí enkodéru. Pro určení, jaká hodnota čísla (jestli jednotka, setina nebo desetina) je právě nastavována, slouží proměnná `prepinac`.

```
if (zmacknuteTlacitko == 1) { //Funkce prepínace - po stisku enter nastav vyssi rad vyberu
    zmacknuteTlacitko=0;
    prepinac=prepinac+1;
    zmacknuteTlacitko=0;
    if (prepinac>5) { // po vyberu vseh 3 radu a po dvojkliku
        menu=4; // enter prepni do vyssiho radu menu.
    }
}
if (zmacknuteTlacitkoesc==1) { //pri stisku esc proved o rad nizsi vyber
    prepinac=prepinac - 1; }
if (prepinac<0) { // pokud je hodnota mensi nez nula, preskok do nizsiho radu
    menu=2; }
if (prepinac<3) { // vybirej, nez je vybrana hodnota 2. radu
    delay(50);
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Hustota ");
    if (prepinac==0) {
        jednotky=poziceEnkod;
        lcd.setCursor(prepinac,1);
    }
    else if (prepinac==1){
        desetiny=poziceEnkod;
        lcd.setCursor(prepinac+1,1);
    }
    else if (prepinac==2){
        setiny=poziceEnkod;
        lcd.setCursor(prepinac+1,1);
    }
    lcd.println(poziceEnkod);
    lcd.setCursor(prepinac+2,1);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(1,1);
    lcd.print(",");
    lcd.setCursor(10,1);
    lcd.print("g/cm3");
}
else {
    hustotauz=jednotky+desetiny*0.1 + setiny*0.01;
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.println(hustotauz);
    lcd.setCursor(4,1);
    lcd.print(" ");
}
```

Obr. 51 Nastavování číselných hodnot

Pomocí číselné hodnoty uživatel zadává hustotu materiálu, nevybere-li hustotu pomocí přednastavených parametrů materiálu. Tato možnost byla zahrnuta z důvodu, že hustoty materiálů se liší mezi výrobci filamentu. A hustota od stejného výrobce se vždy pohybuje v určitém intervalu – například hustota materiálu PLA od výrobce 3D World na 1 kg cívce se pohybuje v intervalu 1,24 až 1,32 g/cm³.

5.4.2

5.4.2 Měření filamentu

Měření filamentu se dělí na materiál zbývající na cívce a materiál spotřebovaný během jednoho tisku. Je patrné, že není možno používat funkci `delay()`, protože není možné program pozastavit při měření spotřeby filamentu. Tak by došlo ke ztrátě měřených dat, proto byla na počátku definována funkce měření času, která v části měření filamentu nahradí funkci `delay`.

```
// Deklarace funkce pro mereni casu
boolean merenicasu(unsigned long soucasnycasfunkce,unsigned long predchozicasfunkce,boolean zapis, int pauzafunkce) {
boolean vysledek;
// hodnota nezapsat = true znamena, ze jeste nedoslo k zapsani
vysledek=true;

if (soucasnycasfunkce-predchozicasfunkce >= pauzafunkce)
{
// hodnota nezapsat = false znamena, ze se ma vysledek zapsat - zobrazit na monitoru
vysledek=false;

}
// zapsani vysledku do funkce
return vysledek;
}
// Konec deklarace funkce, priklad zapisu
nezapsat = merenicasu(soucasnycas, predchozicas, nezapsat,interval); // volani funkce
}
predchozistav = soucasnystav;
if (nezapsat==false) {
// provedeni prikazu, ubehnul-li daný interval
}
```

Obr. 52 Funkce měření času

Princip funkce části programu Měření filamentu je uveden na vývojovém diagramu na Obr. 42.

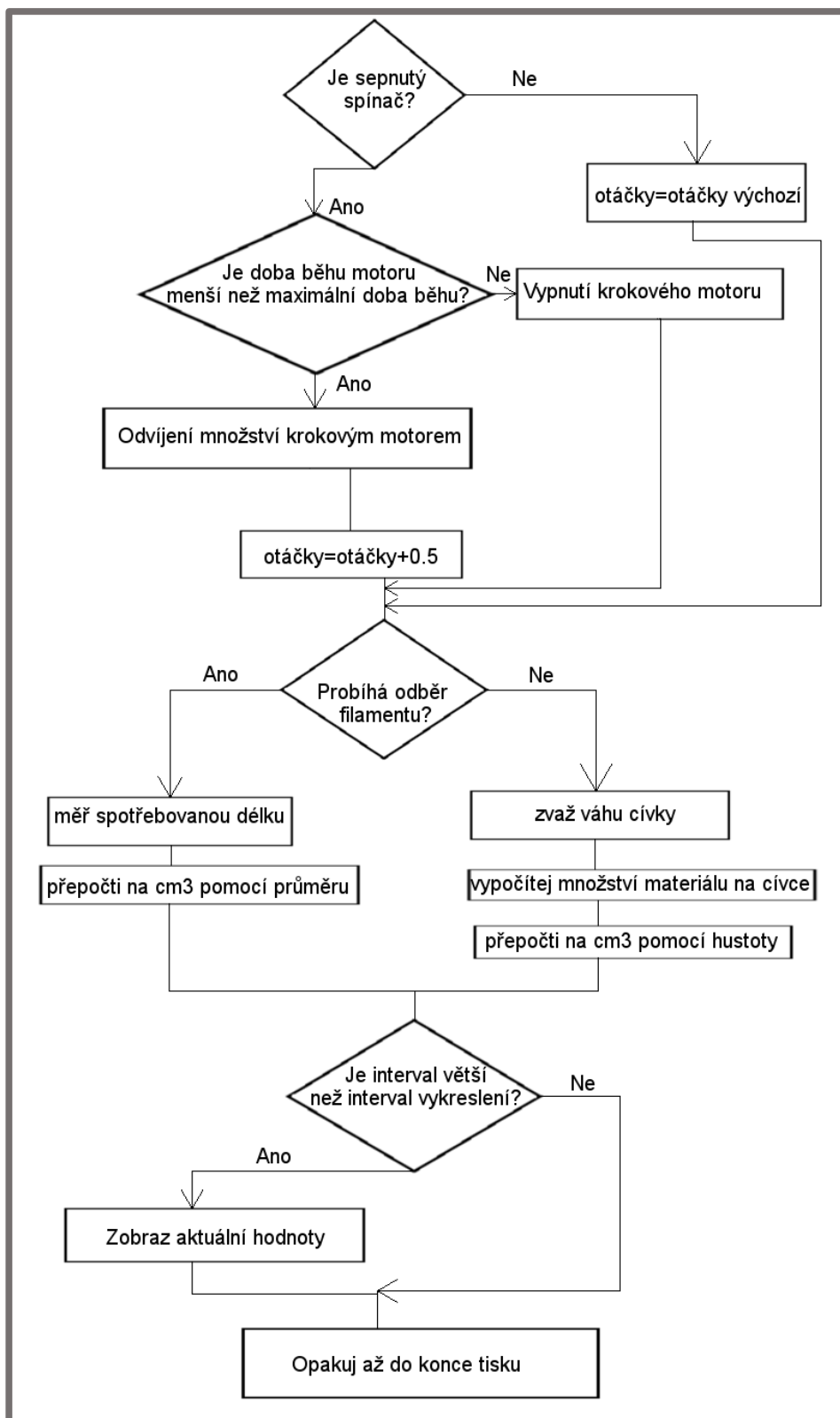
Protože se může stát, že spínač bude sepnut příliš dlouhou dobu, ať už vlivem příliš rychlého odběru tiskárny, nebo vlivem výskytu neočekávané situace, je v programu sledována doba běhu motoru. Při překročení maximální doby běhu motoru je krokový motor pomocí ovladače DRV8825 vypnut (je vypnut napájecí proud motoru). Tak krokový motor nepůsobí záběrným momentem a tiskárna tak může odvíjet filament vlastní silou podávacího mechanismu. Následně držák upozorňuje na vypnutí odvíjení krokového motoru zvukovým signálem.

Aby bylo dosaženo pokud možno co nejpřesnější hodnoty vážení filamentu, probíhá vážení ve větvi algoritmu, ve které nedochází k odběru filamentu.

V poslední části programu je uvedeno vypsání měřených hodnot na displej po uplynutí určitého intervalu.

Ve všech částech programu, kde je potřeba sledovat čas dané části a po uplynutí určitého času provést sadu příkazů, je použita funkce měření času. Princip použití funkce je uveden na obr. 43.

Protože je sada příkazů prováděna v části void loop, dochází k opakování sad příkazů až do skončení tisku.



Obr. 53 Vývojový diagram měření filamentu

5.5**5.5 Přepočet měřených veličin**

Nejprve je nutné vypočítat množství zbývajících filamentu na cívce.

Přepočet výstupu z tenzometru popisuje regresní přímka.

Hmotnost měřená pomocí tenzometru

$$m_t = k \cdot x + q \quad (5-1)$$

kde:

m_t g je hmotnost měřená pomocí tenzometru

x - hodnota naměřená pomocí A/D převodníku

k - směrnice regresní přímky

q - posunutí regresní přímky

Poté je nutné vypočítat délku spotřebovaného filamentu pomocí rotačního enkodéru.

Délka filamentu

$$l = \frac{2 \cdot n}{n_c} \cdot d_m = \frac{2 \cdot n}{20} \cdot 18 \cdot \text{mm} \quad (5-2)$$

kde:

l mm je délka spotřebovaného filamentu

n - pozice enkodéru

n_c - celkový počet pozic na jednu otáčku

d_m mm - průměr měřicího válečku

5.5.1**5.5.1 Přepočet na cm³**

Slicer tiskárny Stratasys Dimension 1200 ES poskytuje informaci o materiálu potřebném pro tisk v cm³. Pro jednoduché porovnávání odhadované spotřeby s údaji na držáku strun proto je nutné údaje na displeji držáku zobrazovat také v cm³.

Parametry materiálu nejsou z praktických důvodů uváděny v jednotkách soustavy SI. Hustota je uváděna v jednotce g/cm³ a hmotnost určená pomocí tenzometru je v programu uváděna v jednotce g.

Přepočet spotřebovaného materiálu

Přepočet je proveden pomocí průměru filamentu.

Objem spotřebovaného materiálu

$$V_s = \pi \cdot d^2 \cdot l = \pi \cdot (1.75 \text{ mm})^2 \cdot l \cdot \text{mm} = \pi \cdot (1.75 \text{ cm})^2 \cdot l \cdot \text{cm} \cdot 10^{-3} \quad (5-3)$$

kde:

V_s cm^3 je objem spotřebovaného materiálu

d mm - průměr filamentu

l mm - délka spotřebovaného materiálu

Přepočet zbývajících materiálu

Nejprve je nutné vypočítat hmotnost materiálu na cívce

Hmotnost materiálu

$$m = m_t - m_c = m_t \cdot g - m_c \cdot g \quad (5-4)$$

kde:

m g je hmotnost materiálu

m_t g - hmotnost změřená tenzometrem

m_c g - hmotnost prázdné cívky

Objem zbývajících materiálu

$$V_z = \frac{m}{\rho} = \frac{m \cdot \text{g}}{\rho \cdot \text{g/cm}^3}$$

kde (5-5)

V_z cm^3 je objem zbývajících materiálu

m g - hmotnost materiálu

ρ g/cm^3 - hustota materiálu

6 DISKUZE

Hlavním cílem bakalářské práce bylo vyvinout držák strun pro technologii 3D tisku plastových dílů, který by poskytoval informace o množství tiskové struny zbývající na cívce s tiskovou strunou a o spotřebě materiálu během jednoho tisku. Tento cíl byl splněn.

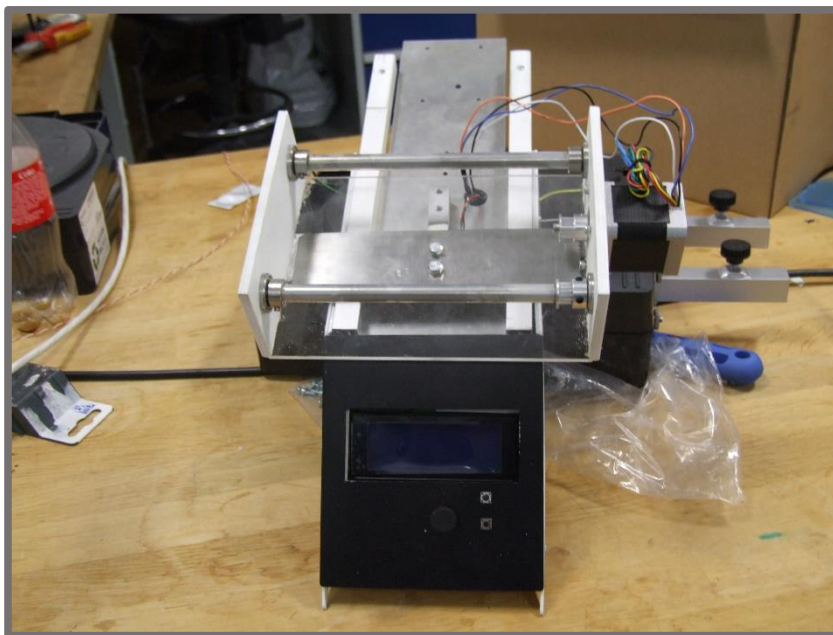
Kvůli zvolenému konstrukčnímu řešení byl materiál všech dílů volen s ohledem na výslednou hmotnost konstrukce. Proto je většina dílů buď ze slitiny AlMgSi3, nebo z termoplastů.

Zvolený způsob uchycení cívky je volen s ohledem na co nejjednodušší vkládání nové cívky. Povrch válečků, které jsou v kontaktu s cívkou, byl potažen silikonovými hadičkami. Tak bylo dosaženo dostatečné adheze mezi cívkou a válečky. Nedochozí tak k prokluzu cívky při otáčení válečku. Tento fakt byl experimentálně ověřen.

U profil, v němž jsou vloženy válečky, byl ze spodní části vyztužen ocelovým plechem. Tak došlo k snížení průhybu i při vložení cívky s plně navinutým filamentem.

Tažná pružina, která vyvíjí přítlačnou sílu na filament tak, aby nedocházelo k prokluzu rotačního enkodéru, byla nastavena pomocí délky zašroubování šroubu s okem. Hypotéza, že vlivem přítlačné síly mechanismu nebude docházet při odběru filamentu k prokluzu a vlivem toho ke ztrátě dat, byla ověřena.

Funkčnost programu byla ověřována v průběhu psaní programu, kdy byly vždy zapojeny vybrané součásti a poté byla experimenty ověřena funkčnost programu. Tímto způsobem byla ověřena správná činnost krokového motoru, ovládání menu včetně zobrazování na displeji a funkce části programu uvedené v kapitole 5.4.2. Následně byly tyto části vloženy do jednoho programu a opět byla ověřena funkčnost.



Obr. 54 Realizace držáku strun

7 ZÁVĚR

Hlavní cíl bakalářské práce – navrhnutí držáku strun pro profesionální technologii 3D tisku FDM – byl splněn. Na držák strun je možno vložit cívky o různých velikostech, přičemž maximální povolená hmotnost cívky je 3 kg. Při vložení těžší cívky by došlo k přetížení tenzometrického snímače.

Konstrukce držáku strun byla přichycena ke kazetě tiskárny Stratasys Dimension SST 1200. Tento způsob byl zvolen kvůli tomu, že není možné používat cívku od jiného výrobce, aniž by byla v tiskárně vložena kazeta. Údaje o zbývajícím materiálu zobrazované na displeji tiskárny jsou poté neplatné. Pravdivé údaje jsou zobrazovány na displeji držáku strun.

Funkčnost konstrukce byla ověřena dílčími experimenty. Jednalo se o ověření průhybu při vložení 2.5 kg cívky, dostatečné adhezi mezi cívkou a válečky, dostatečné přítlačné síle přitlačující filament k měřicímu válečku. Poté byla ověřena funkčnost dílčích částí programu, a nakonec funkčnost kompletního programu.

Pro další vývoj držáku strun by bylo vhodné vyřešit komunikaci s tiskárnou. Tak by mohlo dojít k zamezení chybě tisku vlivem zaseknutí nebo vypotřebování filamentu. Toho by bylo docíleno porovnáním informace o odběru filamentu a porovnáním informace tiskárny. Nastal-li by mezi těmito informacemi konflikt, držák strun by automaticky pozastavil tisk a upozornil by obsluhu tiskárny. Software tiskárny by pak přes server uložil přesnou polohu, kde došlo k přerušení tisku. Po odstranění problému by tiskárna mohla pokračovat v tisku dané sestavy. Tak by bylo docíleno snížení možnosti ztráty práce tiskárny. Časová úspora by u složitých tisknutých sestav byla až 7 a více hodin.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. GAOA, W. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design* [online]. 2015, č. 12 [cit. 2015].
2. RAO, B. M. E. 3D printing: On its historical evolution and the implications for business. In: *Management of Engineering and Technology* [online]. 2015. Portland: IEEE, 2015 [cit. 2015-09-24]. ISBN 978-1-8908-4331-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7273052/>
3. BECHTOLD, S. 3D Printing, Intellectual Property and Innovation Policy. *ILC - International Review of Intellectual Property and Competition Law* [online]. Springer Berlin Heidelberg, 2016, č. 44 [cit. 2016-06-11]. ISSN 2195-0237. Dostupné z: 10.1007/s40319-016-0487-4
4. CHRYSSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. London: Springer London, 2016, č. 83, s. 389-405 [cit. 2016-03]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7576-2>
5. *reprage* [online]. 2014. Dostupné také z: <http://reprage.com>
6. *3dprintinggeeks* [online]. 2016 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://www.3dprintinggeeks.com/>
7. *Pinterest* [online]. [cit. 2017-Duben-22]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com>
8. CAD. *CAD* [online]. 2015 [cit. 2017-Březen-19]. Dostupné z: <https://www.cad.cz>
9. *hades.mech.northwestern* [online]. 2010. Dostupné také z: <http://hades.mech.northwestern.edu/>
10. TAMEH, T. Novel Analog Ratio-Metric Optical Rotary Encoder for Avionic Applications. *IEEE Sensors Journal*. Manchester: IEEE Sensors Council, 2016, č. 16, s. 6586 - 6595. 1530-437X.
11. <http://www.thingiverse.com/> [online]. [cit. 2013-08-31]. Dostupné z: <http://www.thingiverse.com/>
12. *arduino* [online]. 2016. Dostupné také z: <https://www.arduino.cc>
13. *Pololu* [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <https://www.pololu.com>
14. *Layadcircuits* [online]. 2015 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.layadcircuits.com>

15. *3devo* [online]. 2015. Dostupné také z: <http://3devo.eu/>
16. *thing-printer* [online]. 2016 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.thing-printer.com/>
17. *cel-robox* [online]. 2014. Dostupné také z: <http://www.cel-robox.com/>
18. *3dprinting-blog.com* [online]. 2016 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://3dprinting-blog.com>
19. 3D printing industry. *3D printing industry* [online]. 2015 [cit. 2017-Březen-19]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/>

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	- trojrozměrný prostor
ABS	- akrylonitrilbutadienstyren
esc	- escape
FDM	- fused deposition modeling
GNU	- GNU's Not Unix! – zde ve významu otevřená licence
I2C	- inter-integrated circuit
PLA	- polyactic acid
PTFE	- polytetrafluorethylen
PVA	- polyvinyl alkohol
RepRap	- replicating rapid prototyper

d	[mm]	- průměr filamentu
d_m	[mm]	- průměr měřicího válečku
l	[mm]	- délka spotřebovaného filamentu
m	[kg]	- hmotnost materiálu na cívce
m_c	[kg]	- hmotnost prázdné cívky
n	[-]	- pozice enkodéru
n_c	[-]	- celkový počet pozic za jednu otáčku enkodéru
V_s	[cm ³]	- objem spotřebovaného materiálu
V_z	[cm ³]	- objem zbývajícího materiálu
x	[-]	- hodnota změřená tenzometrickým snímačem
ρ	[g/cm ³]	- hustota materiálu

..

10 SEZNAM OBRÁZKŮ**10**

Obr. 1 Příklady výrobků 3D tisku [2].....	12
Obr. 2 Schéma technologie FDM [15]	13
Obr. 3 Tiskárna Stratasys Dimension SST 1200	14
Obr. 4 Pohyb extruderu při tisku 2.4.2	15
Obr. 4 Pohyb extruderu při tisku	15
Obr. 5 Uložení na vertikální ose [11]Obr. 6 Pohyb extruderu při tisku	15
Obr. 4 Pohyb extruderu při tisku	15
Obr. 5 Uložení na vertikální ose [11]Obr. 6 Pohyb extruderu při tisku	15
Obr. 7 Uložení na vertikální ose [11]2.5.1	17
Obr. 7 Uložení na vertikální ose [11]	18
Obr. 7 Uložení na vertikální ose [11]	18
Obr. 8 Uložení na horizontální ose [7]	19
Obr. 9 Přímé uložení na ložiscích [10]	20
Obr. 10 Držák strun Monsterfeed Pro [19].....	20
Obr. 11 Uložení na adaptačním členu [11].....	21
Obr. 12 Vedení pomocí vodících otvorů [18].....	22
Obr. 13 Čištění tiskové struny [11]	23
Obr. 14 Princip rotačního enkodéru [12].....	24
Obr. 15 Měření tiskové struny rotačním enkodérem [16]	24
Obr. 16 Měření tiskové struny odměřováním hmotnosti [11].....	26
Obr. 17 Deska Arduino Uno [12]	27
Obr. 18 Základní struktura programu Arduino	28
Obr. 19 Příklad funkce	28
Obr. 20 Uchycení na vertikální hřídeli	31
Obr. 21 Uložení na válečkovém systému	32
Obr. 22 Blokové schéma použité elektroniky	33
Obr. 23 Kazeta pro uchycení držáku strun	34

Obr.	24	Přichycení	ke	kazetě	
.....					35
Obr. 25		Sestava platformy			36
Obr. 26		Základna			37
Obr. 27		Tenzometr			37
Obr. 28		Kryt elektroniky			38
Obr. 29		Rám krytu elektroniky			38
Obr.	30	Uchycení	elektronických	součástí	
.....					39
Obr. 31		Vedení filamentu			39
Obr. 32		Kladkový podavač			40
Obr. 33		Měření délky sestava			40
Obr. 34		Přítlačný mechanismus			41
Obr. 35		Přítlačný mechanismus			42
Obr. 36		Uchycení čistícího náboje			42
Obr. 37		Schéma zapojení driveru [13]			43
Obr. 38		Zapojení tenzometrického snímače [14]			44
Obr. 39		Princip činnosti programu			45
Obr. 40		Zadávání pomocí víceúrovňového menu			46
Obr. 41		Nastavování číselných hodnot			47
Obr. 42		Funkce měření času			48
Obr. 43		Vývojový diagram měření filamentu			49
Obr. 44		Realizace držáku strun			52

11	SEZNAM PŘÍLOH	11
11.1	Výkresová dokumentace	11.1
0-D1-01	Výkres sestavy	
