

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Elektricky vodivé polymery pro 3D tisk

Filip Holý

Vedoucí: Ing. Petr Veselý, Ph.D.

Konzultant: Ing. Michaela Makešová

Specializace: Elektrotechnika a management

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Holý** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **486407**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Elektricky vodivé polymery pro 3D tisk

Název bakalářské práce anglicky:

Electrically Conductive Polymers for 3D Printing

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte rešerši na tématiku 3D tisku, zaměřte se na oblasti vodivých polymerů a jejich praktických aplikací. 2. Provedte charakterizaci vybraných materiálů z hlediska jejich elektrických vlastností. 3. Na základě výsledků předchozího měření navrhnete konkrétní realizaci praktické aplikace těchto materiálů. Ověřte funkčnost navržené realizace a zhodnotte praktický přínos, navrhnete další případná využití měřených materiálů. 4. Navržené řešení podrobte ekonomické analýze a srovnání s existujícími řešeními.

Seznam doporučené literatury:

[1] B. Redwood, F. Schöffer, and B. Garret, The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications, 1st edition. Amsterdam: 3D Hubs, 2017. [2] D. G. Bekas, Y. Hou, Y. Liu, and A. Panesar, '3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review', Compos. Part B Eng., vol. 179, p. 107540, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107540. [3] Zheng Y, Huang X, Chen J, Wu K, Wang J, Zhang X. A Review of Conductive Carbon Materials for 3D Printing: Materials, Technologies, Properties, and Applications. Materials. 2021; 14(14):3911. <https://doi.org/10.3390/ma14143911>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Veselý, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Petr Veselý, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Ing. Petru Veselému Ph.D. za konstruktivní připomínky a vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantce Ing. Michaele Makešové za pomoc s ekonomickou částí této bakalářské práce. Jako poslední bych chtěl poděkovat členům rodiny a přátelům za jejich podporu.

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.

20. května 2022

Filip Holý

Abstrakt

V této bakalářské práci jsem se zaměřil na možnosti využití vodivých filamentů pro 3D tisk metodou Fused Deposition Modeling (FDM). Tato práce obsahuje teoretický rozbor obecného členění typů výroby a popis různých druhů 3D tisku. Dále se práce zaměřuje na popis 3D tisku pomocí metody FDM a rozbor materiálů pro tisk touto metodou. V praktické části jsem se zaměřil na charakterizaci vodivého filamentu složeného z PLA a aplikace vodivých filamentů, které jsou je odporový senzor dotyku a tenzometr. V ekonomické části této práce jsem porovnal využití komerčně dostupných senzorů dotyku s vlastní výrobou těchto senzorů z ekonomického hlediska. Závěrem práce je zhodnocení možnosti výroby senzorů z technického i ekonomického hlediska.

Klíčová slova: 3D tisk, elektricky vodivé polymery, dotykový senzor, odporové dotykové tlačítko, tenzometr

Abstract

In this bachelor thesis I focused on the possibilities of using conductive filaments for 3D printing using Fused Deposition Modeling (FDM). This work contains a theoretical analysis of the general division of production types and a description of different types of 3D printing. Furthermore, the work focuses on the description of 3D printing using the FDM method and analysis of materials for printing using this method. In the practical part I focused on the characterization of a conductive filament composed of PLA and the application of conductive filaments, which are a resistance touch sensor and a strain gauge. In the economic part of this work, I compared the use of commercially available touch sensors with the actual production of these sensors from an economic point of view. The conclusion of the work is the evaluation of the possibility of manufacturing sensors from a technical and economic point of view.

Keywords: 3D printing, electrically conductive polymers, touch sensor, resistance touch button, strain gage

Obsah

1 Úvod	1
2 3D tisk	3
2.1 Subtraktivní způsob výroby	3
2.2 Formativní způsob výroby	3
2.3 Aditivní způsob výroby	4
2.4 3D tisk	4
2.4.1 Typy 3D tisku	4
2.4.2 Metody 3D tisku z kapaln é f á ze	5
2.4.2.1 Stereolitografie	5
2.4.2.2 MSLA	6
2.4.2.3 PolyJet	7
2.4.3 3D tisk z pr á šku	7
2.4.3.1 SLS	8
2.4.3.2 SLM	9
2.4.3.3 3D Ink Jet Printing	9
2.4.3.4 LMD	10
2.4.4 Tisk z pevn é f á ze	10
2.4.4.1 FDM	10
2.5 Filamenty pro 3D tisk metodou FFF	12
2.5.1 Termoplasty	12
2.5.1.1 ABS	13
2.5.1.2 PLA	13
2.5.1.3 PC	14
2.5.1.4 PEEK	14

2.5.1.5 PEI	14
2.5.2 Kompozitní filamenty pro 3D tisk	14
2.5.3 Vodivé filamenty pro 3D tisk	15
2.5.3.1 Příklady plnidel vodivých filamentů	16
2.5.3.2 Uhlíková čern	16
2.5.3.3 Uhlíková vlákna	17
2.5.3.4 Uhlíkové nanotrubičky	17
2.5.3.5 Grafen	18
2.5.3.6 Možnosti využití vodivých filamentů pro 3D tisk	18
3 Praktická část	19
3.1 Filamenty využití v praktické části bakalářské práce	19
3.2 Charakterizace filamentů z hlediska rezistivity	19
3.2.1 Rezistivita v kolmém směru	19
3.2.2 Rezistivita v rovnoběžném směru na tisk	20
3.3 Výsledky měření rezistivity filamentů	21
3.3.1 Výsledky měření rezistivity v kolmém směru	21
3.3.2 Výsledky měření rezistivity ve směru rovnoběžném na tisk	24
3.4 Princip odporového dotykového tlačítka	25
3.5 3D tisk prototypu tlačítka pomocí tiskárny Original Prusa i3 MK3S	25
3.6 Ověření možnosti využití vodivých filamentů ve výrobě součástek	29
3.7 Výsledky měření proudů součástkami	29
3.8 Návrh přípravku pro zaznamenání dotyku	30
3.9 Měření napětí na odporu	30
3.10 Výsledky měření napětí na odporu přiřazeném za tlačítko	32
3.11 Praktická konstrukce tlačítka a ověření funkčnost	32

3.12 Tenzometr jako aplikace vodivých filamentů ve 3D tisku	37
3.13 Zhodnocení praktické části	42
4 Ekonomická část	45
4.1 Úvod.....	45
4.2 Výrobní zařízení a jeho životnost	45
4.3 Náklady na provoz a výrobu	45
4.3.1 Náklady na zaměstnance	46
4.3.2 Náklady na materiál.....	46
4.3.3 Náklady na elektřinu	46
4.3.4 Náklady na opravy výrobního zařízení	47
4.3.5 Měrné variabilní náklady	47
4.4 Zhodnocení investice	48
4.4.1 Výpočet NPV	48
4.4.2 Výpočet NPV pro různé počty vyráběných součástí	48
4.4.2.1 Výpočet NPV pro 500 součástí za rok	49
4.4.2.2 Výpočet NPV pro 1000 součástí za rok	50
4.4.2.3 Výpočet NPV pro 1500 součástí za rok	51
4.4.3 Citlivostní analýza	52
4.5 Zhodnocení ekonomické části	56
5 Závěr	57
Literatura	59
Obrázky	63
Tabulky	67
A Seznam symbolů	69

B Seznam zkratk	71
C Seznam příložených souborů	73

Kapitola 1

Úvod

V této bakalářské práci se budu zabývat 3D tiskem vodivých filamentů. 3D tisk je aditivní způsob výroby, při kterém vytváříme 3D objekt vrstvením materiálu pomocí přesného počítačem řízeného procesu. Díky tomu můžeme vytvářet přesné modely různých tvarů. Detailněji 3D tisk a jeho podoby popíši v první kapitole této práce. Dále jsem se v první kapitole zaměřil na metodu 3D tisku známou jako Fused filament fabrication a na materiály využívané pro výrobu filamentů pro 3D tisk touto metodou. V poslední části první kapitoly jsem se věnoval kompozitním filamentům pro 3D tisk, ke kterým patří také vodivé filamenty. Kompozitní filamenty jsou tvořeny zpravidla plastem, který propůjčuje tomuto materiálu vlastnosti termoplastů, a přidaných částic, které dodávají tomuto filamentu jeho specifické vlastnosti. V případě vodivých filamentů se jedná o přidání dostatečného množství vodivých částic tak, aby výsledný kompozit nabyl vlastnosti vodivého materiálu.

V praktické části této bakalářské práce se budu zaměřovat na charakterizaci vodivých filamentů z hlediska jejich elektrického odporu, budu tedy měřit jejich odpor. Poté, co charakterizuji tyto filamenty z tohoto hlediska, budu konstruovat zařízení využívající těchto vodivých filamentů pro zaznamenání dotyku. Jako další aplikaci jsem zvolil aplikaci tenzometru. Tenzometr je součástka, která mění svůj odpor v závislosti na ohybu samotné součástky.

V ekonomické části budu porovnávat dva scénáře. První je nákup součástky vyrobené pomocí klasických technologií. Druhý je vlastní výroba součástky pomocí 3D tiskárny, kterou by si mnou uvažovaná firma zakoupila. Porovnání provedu pomocí čistých současných hodnot a provedu citlivostní analýzu pro danou investici.

Kapitola 2

3D tisk

V dnešní době se využívají tři základní způsoby výroby:

1. Subtraktivní způsob výroby
2. Formativní způsob výroby
3. Aditivní způsob výroby

Při výrobě určitých součástek můžeme tyto typy výroby kombinovat (například výroba desek plošných spojů, kde můžeme použít leptání - subtraktivní způsob a galvanické pokovování - aditivní způsob)

2.1 Subtraktivní způsob výroby

Subtraktivní způsob výroby je jeden z nejrozšířenějších způsobů výroby, jež lidsvo používá již velice dlouhou dobu. Tento způsob výroby převládá v dnešním průmyslu. Je používán pro výrobu částí točivých elektrických strojů, spalovacích motorů automobilů, součástek pro výrobu letadel, výrobu elektroniky a dalších aplikací. Subtraktivní způsob výroby spočívá v odebrání materiálu z bloku materiálu tak, abychom dostali požadovaný výrobek. Subtraktivní metody výroby generují odpad díky přebytečnému materiálu, který při tvorbě konečného výrobku odstraňujeme. Subtraktivní metody mají omezení v oblasti geometrie výrobků, které lze těmito metodami vyrobit. Mezi subtraktivní metody se řadí například: řezání, vrtání broušení frézování a jiné další metody [1].

2.2 Formativní způsob výroby

Mezi formativní způsoby výroby, se řadí způsoby výroby, při kterých dochází k plastické deformaci kusu materiálu v jeho pevném skupenství, dokud nedosáhneme požadovaného tvaru výsledného výrobku. Mezi tyto formy výroby se řadí například kování a ohýbání. Odlévání je formativní způsob výroby při kterém dochází k vlévání roztaveného materiálu do formy, která má za úkol udržet roztavený materiál v požadovaném tvaru do té doby, dokud nez tuhne. Oproti subtraktivním metodám při těchto metodách výroby nedochází k tvorbě odpadu, nebo pouze v minimálním množství [2].

2.3 Aditivní způsob výroby

Termín "aditivní způsob výroby" označuje jakýkoliv způsob výroby, při němž přidáváme materiál k výrobku. Je to také způsob tvorby fyzických 3D objektů pomocí vrstvení materiálu. Jedná se o způsob výroby značně jednodušší, než ostatní způsoby výroby, protože aditivní způsob výroby nevyžaduje přílišné plánování procesu výroby. Vyžaduje pouze námi vytvořený digitální 3D model, software pro převedení modelu na úkony pro výrobní zařízení a dané výrobní zařízení. Oproti tomu při subtraktivním způsobu výroby musíme velice pečlivě analyzovat geometrii výrobku, abychom mohli zvolit správný výrobní postup a následně vyrobit žádaný předmět. Aditivní způsob výroby založený výhradně na výrobě 3D objektů po jednotlivých vrstvách, je nazýván "layer-based technology", v překladu technologie na bázi vrstev. Layer-based technology je velice rozšířeným aditivním způsobem výroby, protože je používána většinou dostupných 3D tiskáren na trhu. Layer-based technology realizujeme pomocí softwaru, který náš 3D model převede na jednotlivé vrstvy a vytvoří soubor s instrukcemi pro námi zvolené výrobní zařízení, které následně vytvoří námi požadovaný objekt [3].

2.4 3D tisk

Stereolitografie byla patentována v roce 1986 Charlesem W. Hullem zakladatelem firmy 3D systems, která se specializuje na výrobu 3D tiskáren využívající nejen stereolitografii. Počátky 3D tisku tedy můžeme najít již v polovině 80. let. 3D tisk je aditivní způsob výroby využívající různé materiály například plasty či kovy. V dnešní době se díky cenově dostupným 3D tiskárnám 3D tisk rozšířil mezi běžné uživatele. Jednou z nejvyužívanějších metod 3D tisku je metoda Fused Filament Fabrication (FFF) využívající běžně dostupné termoplasty [4]. 3D tisk postupně proniká do různých odvětví průmyslu, jsou to například:

- Kosmonautika - Výroba částí mars roveru pomocí FFF v NASA
- Stavebnictví - Tisk budov z betonu
- Automobilový průmysl - Prototypování
- Zdravotnictví - Zubní implantáty, Kostní implantáty, 3D tisk léčiv [5]

2.4.1 Typy 3D tisku

3D tisk můžeme provádět z různých fází využití různých technologií. Výčet jednotlivých druhů 3D tisku dle fáze vstupního materiálu:

- Metody 3D tisku z kapalné fáze
- Metody 3D tisku z prášku
- Metody 3D tisku z pevné fáze

■ 2.4.2 Metody 3D tisku z kapaln  fáze

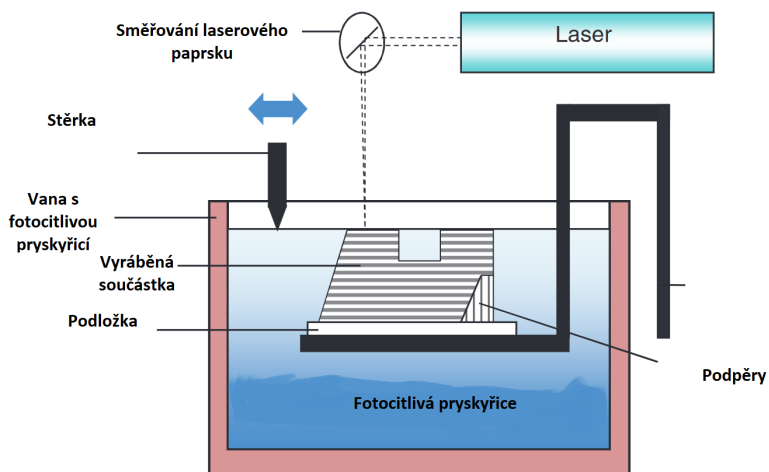
Řada metod 3D tisku z kapaln  fáze využívá k tvoření výrobků kód s fotocitlivou organickou pryskyřicí, která se vytvrzuje pomocí světelného záření. Vlnov  délka světelného záření se zpravidla nachází v oblasti vlnových délek UV záření. Sv teln  záření vytvrzuje pryskyřici na hladině a v malé hloubce pod n , čímz vytvoří tenkou vytvrzenou vrstvu. Jakmile je cel  vrstva vytvrzena, mechanismus ovládající podlozku, na kter  vytváříme výrobek, sjede o definovanou výšku, t m ponoří j z vytvrzenou  st výrobku pod hladinu a dovol  vytvrzení další vrstvy pryskyřice. Tento proces se opakuje, dokud není výrobek dokončen. Samotn m vytvrzováním fotopolymeru ale nemusí cel y proces výroby skončit, protože n kter  pryskyřice vyžadují další kroky nezbytn  k dostate n  kvalitě výrobku, jako je například dovytvrzov n . Další metoda 3D tisku z kapaln  fáze je zalozena na tryskání kapiček tekutého fotopolymeru na podlozku, př čemz je vrstvu po vrstv  vytvrzována zdrojem UV světla [5] [6].

■ 2.4.2.1 Stereolitografie

Proces vyuz van  v tiskárnách tohoto typu vytváří trojrozm rn  objekty přímo z CAD (computer aided design) souborů. Proces výroby začíná napln n m k d  světlem vytvrzitelnou pryskyřicí a s podlozku pro vytvrzování těsně pod hladinou pryskyřice. Pomocí softwaru pro danou tiskárnu vytvoříme sadu pokynů pro tiskárnu, pomocí n z tato tiskárna vyrobí námi požadovan  produkt. Tiskárna vytváří 3D objekty pomocí fotopolymerace, tedy polymerace vyvolan  expozicí například UV zářením. Záření vyvolávající fotopolymeraci lze generovat buďto pomocí laseru, ale také pomocí LED emitujících v UV oblasti spektra. Záření v podobě laserového paprsku se dostane k fotopolymeru pomocí speciálního systému optiky řízeného po ta em, kter  zaostřuje a sm ruje paprsek tak, aby vytvrdil tvar vrstvy podle pokynů vytvořených po ta em. Tento proces se opakuje dokud není výrobek vytvořen. Tento princip je schematicky zobrazen na obrázku 2.1.

Po tomto kroku je potřeba u některých užit ch pryskyřic výrobek dovytvrdit, tedy dodate n  osv tit a dokončit fotopolymeraci, a umět vytvořen y objekt od zbytků pryskyřice.

Hlavn  předností stereolitografie je dobr  rozlišení, hodn  pouz iteln ch materiálů, velikost tisku (od rozměrů 250x250x250 mm do 1500x750x550 mm) a dobr  povrchov   prava. Hlavními nevýhodami je nutnost pouz t  podpěr, nutnost odstranění těchto podpěr a nutnost dalších procesů po dokon en  samotného tisku [4]. V této době j z prob h j   sp šn  pokusy s tiskem l k  pomocí SLA [7].



Obrázek 2.1: Princip stereolitografie s užitím laseru a speciální optiky [4]

■ 2.4.2.2 MSLA

MSLA neboli masked stereolithography je forma stereolitografie, při níž je vytvrzován tekutý polymer uložený v kádli. Oproti klasické SLA využívá MSLA fotopolymerace na dně nádoby které je průsvitné, což je rozdíl oproti klasické stereolitografii, při které dochází k polymeraci na povrchu. Po dokončení fotopolymerace jedné vrstvy, podložka odtrhne vytvrzený polymer ode dna. Poté dochází k přiblížení podložky případně poslední vytisknuté vrstvy na definovanou vzdálenost a opakování procesu dokud není výrobek dokončen.

Komerčně dostupnou verzi této tiskárny uvedla na trh například i firma Prusa Research, která pro vytvrzování používá LED vyzařující v UV pásmu. Pro požadovaný tvar užívá masku v podobě monochromatického LCD displaye [8].

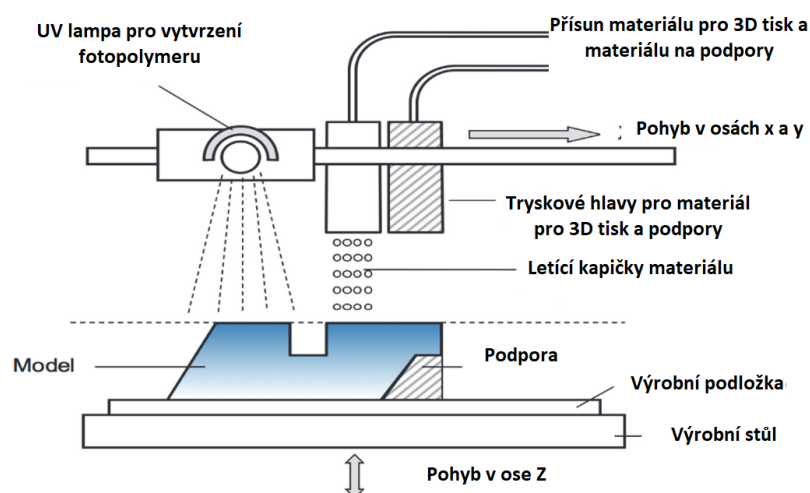


Obrázek 2.2: Ukázka vytvrzovací a mycí stanice a tiskárny používající stereolitografii od firmy Prusa Research [9]

2.4.2.3 PolyJet

3D tisk technologií PolyJet je podobný jako v tiskárnách typu ink-jet. Zatímco tiskárna tryská na papír inkoust, 3D tiskárna tryská na podložku vrstvu pryskyřice a následně ji okamžitě vytvrzuje pomocí UV světla. Tímto postupem se vytvoří celý výrobek, jak je schematicky naznačeno na obrázku 2.3. Na rozdíl od stereolitografie u tohoto postupu není potřeba následné vytvrzování v dalším zařízení. Spolu s materiálem 3D tisku tiskárna používá další materiál užívaný jako podpěru při tisku jinak těžko dosažitelných tvarů. Tento materiál je poté lehko sejmutelný rukou, nebo smytelný vodou. Mezi materiály použitelné pro tento typ 3D tisku se řadí čiré, pružné a biokompatibilní fotopolymery i termoplasty s velice dobrými vlastnostmi pro výrobu. Tato širší materiálu dovoluje uživatelům této technologie postupovat od ranných stupňů prototypů až k malovýrobám, které simulují vlastní hotové výrobky [4].

Hlavní výhody tohoto typu 3D tisku jsou vysoká kvalita tisku díky tloušťce vrstvy až $16\mu\text{m}$, vysoké rozlišení tisku, rychlý tisk, hladký povrch výrobku po tisku a velký výběr materiálů pro tisk. Hlavní nevýhodou je nutnost odstranění podpěr po tisku a tím vzniklý odpad [4].



Obrázek 2.3: Principiální schéma PolyJet 3D tisku [4]

2.4.3 3D tisk z prášku

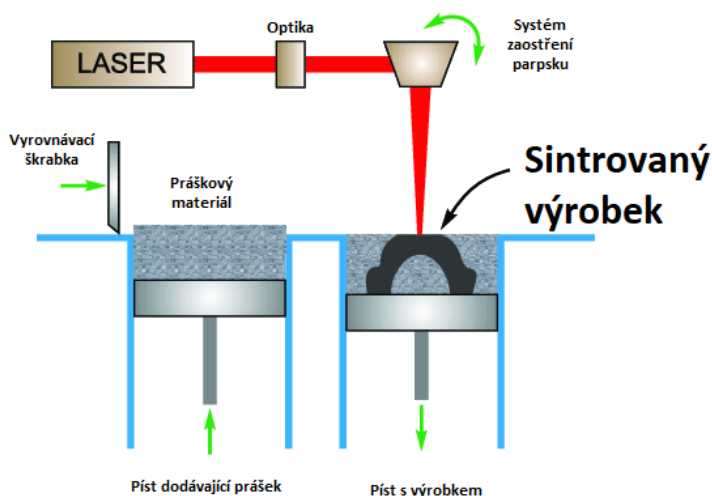
Výroba 3D objektů pomocí technologií, které využívají materiál v podobě prášku probíhá například spékáním jednotlivých zrn pomocí energie dodané laserem, což je podobná technika, jako je využívána ve Stereolitografii, ale zde místo fotopolymerace využíváme tepelné účinky energetických svazků (proudu fotonů nebo proud elektronů). Oproti fotopolymeraci je ale energie potřebná pro tyto technologie až 500 krát větší. Tímto způsobem 3D tisku můžeme vytvářet objekty z kovů především díky vysoké hustotě energie obsažené v energetických svazcích (elektronovém a laserovém) [4].

2.4.3.1 SLS

SLS neboli selective laser sintering je technologie 3D tisku založená na spékání jednotlivých vrstev prášku do předem definovaných tvarů, které nám určuje 3D model předem vytvořený v CAD programu. Jednotlivé vrstvy spékáme pomocí laseru (používají se CO₂ a Nd:YAG lasery [10]), jehož paprsek je usměrněn speciální počítačem ovládanou optikou. Pomocí této optiky je laser směřován tak, aby vytvořil správný tvar dané vrstvy, jak je schematicky naznačeno na obrázku 2.4. Po dokončení spékání dané vrstvy je tato vrstva překryta další tenkou vrstvou prášku, na které je následně vytvořena další sintrovaná vrstva výrobku. Tento proces se opakuje, dokud není vytvořen celý požadovaný 3D objekt. Při této technologii výroby není potřeba podpěr, protože nesintrovaný prášek, který zůstává v okolí vytvářeného 3D objektu, slouží jako podpora. Díky tomu šetříme materiál pro tisk, protože prášek sloužící jako podpora může být použit při dalším tisku, a není potřeba dalšího výrobního kroku [4].

Pro SLS lze použít velmi široké spektrum materiálů, pokud je materiál dostupný ve formě prášku a tento prášek má tendenci se spojovat nebo sintrovat při přivedení tepla. Pokud tuto schopnost nemají, pak je nutné k tomuto typu prášku přidat pojivo. Toto pojivo je poté třeba odstranit. Polymery byly první užitými materiály pro SLS a jsou stále nejrozšířenějším materiálem používaným v SLS 3D tiskárnách. SLS je jedna z mála metod 3D tisku, při níž můžeme vytvořit výrobky z kovu [11].

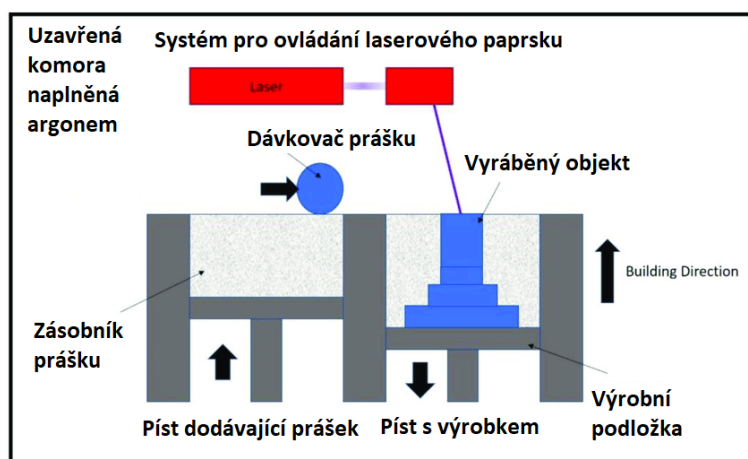
Hlavními výhodami SLS je dobrá využitelnost vytvořených částí jako hotových výrobků, široké spektrum použitelných materiálů, nepotřeba podpěr pro tisk složitých tvarů a nízká potřeba dodatečných technologických procesů. Hlavními nevýhodami této technologie jsou velké rozměry 3D tiskárny, vysoká spotřeba energie kvůli vysokému výkonu laseru, objekty vytvořené touto metodou mohou mít špatnou povrchovou úpravu, což je většinou způsobeno velikostí jednotlivých zrn prášku. SLS je možno využít k tvorbě prototypů a lze jej také zařadit do sériové výroby díky dobrým parametrům výrobků vytvořených touto technologií [4].



Obrázek 2.4: Schematické zobrazení SLS [12]

2.4.3.2 SLM

Selective laser melting (SLM) je metoda 3D tisku velice podobná dalším metodám 3D tisku, protože se také jedná o metodu založenou na skládání jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Předností této metody je, že může být použita pro vytváření 3D objektů z velkého množství kovových prášků, což u jiných metod není možné. Podobně jako u SLS používáme při SLM laser, který je směřován pomocí speciální počítačem řízené optiky tak, aby byla vytvořen požadovaný tvar jednotlivých vrstev. Odlišností oproti SLS je, že materiál použitý pro SLM je plně roztaven, zatímco u SLS se materiál spojí pouze sintrováním. To dává 3D objektům vyrobeným pomocí SLM vyšší pevnost a vyšší přesnost tisku, než objektům vytvořeným pomocí SLS. Úplným roztavením prášku a vysokým teplotním gradientům mohou v materiálu vzniknout zbytková napětí uvnitř materiálu. Tato vnitřní pnutí mohou vést k chybám v tisku, jako jsou například mikropraskliny v materiálu hotového výrobku [4] [11] [13].



Obrázek 2.5: Schematické zobrazení SLM [14]

2.4.3.3 3D Ink Jet Printing

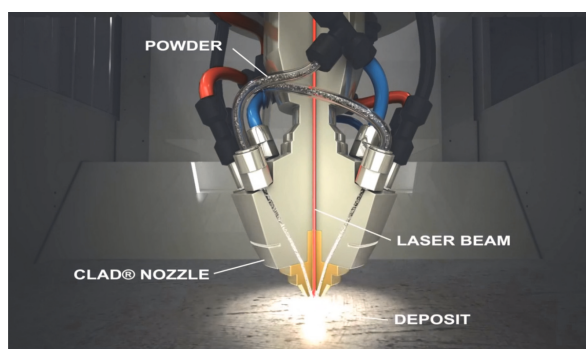
Výroba 3D objektu touto metodou zde probíhá pomocí dvou nádob. V jedné je zásoba prášku, kterou používáme pro tisk, a v druhé se tvoří požadovaný výrobek. Tvorba námi zvoleného objektu znovu probíhá po definované tlustých vrstvách. Lepidlo nanáší na svrchní vrstvu prášku tisková hlava podle tvaru řezu vytvářeným objektem v dané výšce. Po vytvrzení lepidla se na již dokončenou vrstvu nahrne nová vrstva prášku, a proces je opakován dokud není výrobek hotov.

Hlavními výhodami je vysoká rychlost tisku. U tiskáren využívající tuto metodu s vysokou rychlostí tisku jsou jednotlivé vrstvy vytvářeny v řádech sekund. Dalšími výhodami jsou velká různorodost využití výrobků, minimální produkce odpadu díky znovupoužití materiálu využitého na podpory. Nevýhodami této technologie jsou menší možnost využití výrobků kvůli tvrdosti dané lepidlem a horší kvalita povrchu a je tedy velice často nutná dodatečná povrchová úprava [4].

2.4.3.4 LMD

LMD neboli laser metal deposition, známá také pod názvy direct metal laser deposition (DMLD), laser powder deposition (LPD) nebo direct laser deposition (DLD).

Během LMD je pomocí laserového paprsku, elektronového paprsku nebo elektrického oblouku vytvořen tzv. melt pool, což je malý objem roztaveného materiálu. Do tohoto melt poolu přidáváme kovový prášek, který se zde roztaví a začne tvořit další vrstvu finálního výrobku. Díky tomuto postupu tedy můžeme vytvořit celý námi žádaný výrobek. Výrobek má podobné vlastnosti jako při výrobě pomocí SLM, protože se jedná o podobný postup. Pouze princip dopravy materiálu tam, kde má být roztaven, se liší. K tomu abychom dostali materiál do melt poolu používáme speciální hlavici, která má pro tento účel speciálně vytvořené kanály, jak můžeme vidět na Obrázku 2.6 [4] [15].



Obrázek 2.6: Hlavice pro 3D tisk metodou LMD. [4]

2.4.4 Tisk z pevné fáze

Metody tisku z pevné fáze užívají materiál v pevné fázi k vytváření 3D objektu. Jako vstupní materiál můžeme využít například plastový filament (tisková struna), využívaný u metody 3D tisku FDM. Jako další může být použit drát, který poté postupně tavíme (například pomocí elektronového svazku). Jako poslední metodou k vytvoření 3D objektu zmíním metodu lepení vyřezaných listů papíru na sebe, pomocí kterého dosáhneme požadovaného tvaru. Dále se budu věnovat detailněji pouze metodě FDM[4].

2.4.4.1 FDM

Fused deposition modeling (FDM) je metoda 3D tisku z pevné fáze, kterou v roce 1988 vyvinul Scott Crump. Patentována byla v roce 1992 v USA. Tato metoda vytváří 3D objekt pomocí nanášení jednotlivých vrstev roztaveného termoplastu. Termoplasty pro metodu FDM se dodávají ve formě filamentu. Pokyny pro tiskárnu vytváříme pomocí softwaru obecně nazývaného slicer, který převede digitální 3D model na vrstvy a poté na instrukce pro tiskárnu, aby mohl být digitální předmět vytvořen. Pro každou tiskárnu máme vlastní software, který vytvoří instrukce pro námi užívanou tiskárnu. 3D objekt je vytvářen zpravidla od nejnižší vrstvy k té nejvyšší. Během tisku složitějších struktur pomocí FDM jsou třeba podpory[4].

Hlavní část, která je pro různé typy FDM tiskáren společná, je extruder. Extruder je část 3D tiskárny, která zajišťuje přísun a tavení filamentu. Hlavní části extruderu jsou [16]:

- Motor a ústrojí pro posun filamentu
- Cold-end
- Hot-End

Motor a ústrojí pro posun filamentu je jedna z hlavních částí. Ve většině komerčně dostupných 3D tiskáren je použit krokový motor, který je spojen s ozubeným kolem. Ozubené kolo je v přímém kontaktu s filamentem. Naproti ozubenému kolu připojenému na motor je umístěno druhé kolo, které pnutím pružiny udržuje tlak ozubeného kola na filament tak, aby byl zajištěn dostatečný kontakt k posunutí filamentu skrz extruder. Přílišný tlak na filament může způsobit broušení filamentu a tedy negativně ovlivnit průběh tisku. Nedostatečný tlak na filament má za následek prokluzování kol a tedy špatnou extruzi [16].

Cold-end je část extruderu zpravidla vybavená chladičem spojující motor a Hot-end. Cold-end zabraňuje roztavení filamentu před Hot-endem a přenosu tepla z Hot-endu do motoru a do ústrojí pro posun filamentu. Kdyby došlo k tavení materiálu v Cold-Endu, pak by mohlo docházet k zastavení extruze. Tuhý filament totiž funguje jako píst, který protlačuje filament skrz trysku. Pokud by tedy filament změkkl, tak by to znamenalo zhoršení extruze a s největší pravděpodobností selhání tisku z důvodu snížení toku materiálu [16].

Hot-end je část extruderu, ve které je topné tělísko, které dodává teplo nutné pro roztavení termoplastu. Zakončením Hot-endu je tryska, která je jednou z nejdůležitějších částí tiskárny. Vstupní průměr trysky se pro běžně dostupné tiskárny pohybuje mezi 1,75 a 2,85 mm, což je také rozmezí nejběžnějších průměrů filamentů užívaných pro tuto tiskárnu. Výstup trysky má typicky průměr od 0,15 do 1 mm. Volbou průměru trysky ovlivníme rozlišení tisku. Volbou nižšího průměru dostaneme lepší detaily, ovšem tím se také prodlouží doba tisku [17].

Výhodou této metody je její velké rozšíření. V současné době je tato technologie cenově dostupná (ceny nejjednodušších modelů 3D tiskáren se pohybují od pěti tisíc korun). Cena tiskáren koresponduje s kvalitou tisku [16].



Obrázek 2.7: Obrázek FDM tiskárny od firmy PrusaResearch Original Prusa i3 MK3S+ [18]

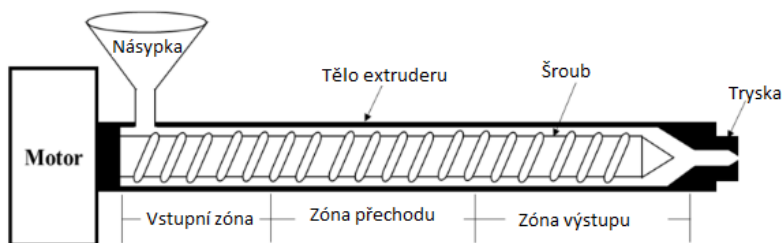
2.5 Filamenty pro 3D tisk metodou FFF

Filamenty pro 3D tisk metodou FFF můžeme rozdělit na čisté termoplasty (např. PET) a kompozitní materiály (filamenty dopované různými druhy vláken nebo částic).

2.5.1 Termoplasty

Termoplasty jsou plasty, které jsou při pokojové teplotě tuhé, ale při jejich zahřátí je lze znovu tvarovat. Tohoto poznatku se využívá právě při 3D tisku. Termoplasty mají nevýhodu v podobě teploty skelného přechodu, což je teplota při které termoplast, stále zůstává v pevné fázi, ale jeho mechanická pevnost se velice snižuje. Tato teplota je různá pro různé druhy plastů.

Mnoho termoplastů je dostupných ve formě filamentů pro FFF 3D tiskárny. Filamenty se připravují v extruderu filamentu, který je schematicky znázorněn na obrázku 2.8. Proces výroby začíná vložením surového materiálu ve formě granulí nebo pelet do těla extruderu skrz násypku. V extruderu se nachází otočný šroub, který posunuje vložený materiál. Při průchodu extruderem se termoplast postupně roztaví ve třech zónách, ve kterých je teplota nastavena podle druhu materiálu. Poté se pomocí šroubu materiál vytlačuje skrze mosaznou trysku o průměru 2,5-3,5 mm, která se většinou používá pro výrobu filamentů o průměru 1,75 mm. Kvalita filamentu je silně závislá na rychlosti tuhnutí plasty po extruzi. K řízení rychlosti tvrdnutí se používají různé druhy chlazení, například chlazení vodou nebo vzduchem. Procesem tažení poté upravíme průřez filamentu na požadovanou hodnotu [19].



Obrázek 2.8: Schéma stroje na výrobu filamentu pro 3D tiskárnu [19]

Termoplasty se liší svými vlastnostmi, tudíž volba konkrétního filamentu se odvíjí od potřeb aplikace, kterou realizujeme.

■ 2.5.1.1 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je jeden z nejpoužívanějších filamentů pro tisk technologií FFF. Jedná se o amorfní polymer, který není považován za biodegradabilní. To, že není biodegradabilní, ovšem vyváží jeho výhody, jako jsou odolnost proti nárazům, otěru a chemickým sloučeninám. Další výhodou ABS je jeho tvrdost. Hlavní nevýhodou ABS je zmenšení objemu a deformace před a po vytisknutí finálního produktu. Teplota tání ABS je mezi 200°C a 250°C. ABS může při procesu 3D tisku vylučovat plyny, které mohou negativně ovlivnit lidi citlivé na chemické látky nebo lidi s respiračními problémy. ABS našlo své využití v automobilovém průmyslu, zdravotnictví a letectví [19].

■ 2.5.1.2 PLA

Kyselina polymléčná (PLA) je bioplast patřící do kategorie termoplastů. Bioplast je to proto, protože základ tohoto plastu tvoří kyselina mléčná, kterou lze získat pomocí fermentace. Fermentace je proces, při kterém se přemění vhodný karbohydrát působením mikroorganismů na kyselinu mléčnou [19]. K vytvoření vysokomolekulárního PLA využíváme polykondenzaci za vhodných podmínek (přidáním anhydridů, epoxidů nebo isokyanátů), nebo pomocí depolymerizace nízkomolekulárního PLA a následné polymerace laktidu (dehydrovaný cyklický dimer kyseliny mléčné) tzv. polymerací s otevřením kruhu (ROP). Těmito metodami jsme schopni vytvořit PLA s vlastnostmi, které nám dovolují jeho uplatnění v 3D tisku [20].

Teplota tání PLA se pohybuje mezi 160-180°C, teplota skelného přechodu mezi 55-65°C a obsah krystalické fáze dosahuje až 60%. Obsah krystalické fáze přímo ovlivňuje obě tyto hodnoty. Jeho hustota se pohybuje mezi 1,21-1,25 g/cm³ [21].

PLA je biodegradabilní plast, který se za přítomnosti mikroorganismů schopných rozložit PLA a vzduchu rozpadá na mikrobiální biomasu, CO₂ a vodu. Za nepřístupu vzduchu se rozpadá na mikrobiální biomasu, metan, oxid uhličitý a vodu. Biodegradace tohoto plastu v půdě je ovšem velice pomalá a vyžaduje přítomnost specifických mikroorganismů v daném prostředí. Pokud ovšem budeme PLA kompostovat při teplotě okolo 50°C, můžeme vidět, že PLA je v tomto prostředí biodegradabilní mnohem lépe a mikroorganismy jsou schopny rozložit výrobky PLA z 80-100% [22].

Dlouhodobá trvanlivost PLA z hlediska uchování si původních parametrů je omezená vícero vlivy, jako jsou například tepelný rozklad, hydrolýza (tedy degradace vodou), foto-oxydace a přirozená eroze PLA vlivem vnějšího prostředí [23].

Využití PLA je například v biomedicíně, zkoumá se možnost jejího využití jako obalového materiálu na potraviny a využití v oděvním průmyslu. PLA je jeden z nejrozšířenějších materiálů pro filamenty užívané při 3D tisku metodou FFF. V dnešní době je tedy dobře dostupný [24].

■ 2.5.1.3 PC

Polykarbonát (PC) je termoplast, o kterém je známé, že má dobré mechanické vlastnosti, vysokou teplotu skelného přechodu a je průhledný. Jedná se o amorfni termoplast podobně jako ABS. Na druhou stranu jsou polykarbonáty náchylné na přítomnost vlhkosti a jejich teplota tisku je vysoká. Z polykarbonátů můžeme vyrobit funkční prototypy a našly své využití v automobilním a leteckém průmyslu [19].

■ 2.5.1.4 PEEK

Polyetheretherketon (PEEK) má výhodu ve vysoké teplotě skelného přechodu, která je 143°C. U tohoto plastu je výhodou jeho mechanická pevnost, nízká hmotnost výrobků, teplotní a chemická odolnost výrobků z PEEK a jeho biodegradabilita. U PEEK je nevýhoda jeho vysoká teplota při tisku, která se pohybuje nad 340°C [19].

■ 2.5.1.5 PEI

Polyetherimid je plast, který se vyznačuje lehkostí, dobrou mechanickou odolností a odolností proti telpu a kouři. Dalšími dobrými vlastnostmi PEI je je biokompatibilita a vysoká teplota skelného přechodu (217°C) [19].

■ 2.5.2 Kompozitní filamenty pro 3D tisk

Nyní používané čisté termoplastické filamenty mají omezení, jako je nízká pevnost a tuhost, tedy nesplní požadavky na výrobek v určitých aplikacích. Termoplasty také změknu při vyšších teplotách. V mnoha případech tak produkt vytvořený z termoplastů nesplní požadavky na materiál pro daný výrobek a jeho použití. Vlastnosti součástí vytvořených metodou FFF jsou často horší, než vlastnosti součástí vytvořených pomocí vstřikování plastů do formy. V dnešní době probíhají snahy najít filamenty, které budou lehké, pevné a budou mít dobrou kvalitu povrchu. Kompozitní materiály jsou považovány za jednu z možných variant materiálů, které splňují tyto požadavky [19].

Pro dosažení požadovaných vlastností výsledného výrobku mohou být do filamentů přidány různé druhy plnidel. Potřeba nových materiálů, které jsou zároveň šetrné k životnímu prostředí, nás vede k použití kompozitních filamentů. Kompozitní filamenty vykazují lepší vlastnosti oproti filamentům tvořeným z čistých termoplastů. Názvosloví spojené s kompozitními filamenty pro FFF je následující [19]:

- **Kompozitní filamenty:** Kompozitní filament je materiál skládající se z dvou rozdílných komponentů, což dává výslednému produktu vlastnosti, které nemohou být dosaženy ani u jednoho z komponentů v čisté formě. Ve většině kompozitů se jeden z komponent nazývá matrice a druhý plnidlo. Cílem vývoje kompozitních materiálů je především vylepšení vlastností matrice.
- **Matrice:** Plasty, polymery, kovy a keramiky jsou užívány jako matrice kompozitních materiálů. Polymery jsou v dnešní době stále častěji užívány jako matrice kompozitních materiálů. Kompozity s polymerní maticí mají unikátní vlastnosti při srovnání s čistými polymery, což je způsobeno vlastnostmi plnidla. Kompozitní termoplasty jsou vhodné pro použití jako filamenty pro 3D tisk metodou FFF.
- **Plnidla:** Různé typy plnidel, jako jsou částice nebo vlákna, jsou vloženy do polymerní matrice jako podpurný materiál k dosažení specifických mechanických, teplotních či elektrických vlastností kompozitů s polymerní maticí. Vlastnosti polymerních kompozitů závisí na materiálu plnidla, velikosti částic a orientaci vláken pro plnidlo složené z vláken.

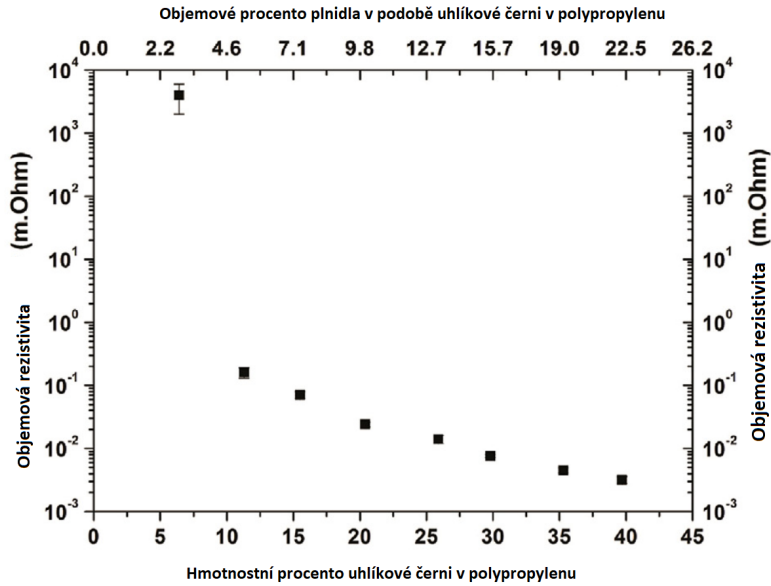
Na filamenty užití při FFF 3D tisku jsou kladeny nároky na tvar, tažnost a další vlastnosti. Výběr materiálu pro kompozitní filament je náročný z důvodu možného zlomení filamentu nebo zacpání trysky. Tyto problémy mohou nastat při tisku 3D objektů a způsobit selhání tisku. Dále kvůli vícelátkovému složení kompozitních filamentů jsou tyto látky hůře recyklovatelné. Recyklovatelnost a uhlíková stopa jednotlivých komponent kompozitních materiálů by tedy měla být brána v potaz [19].

■ 2.5.3 Vodivé filamenty pro 3D tisk

Vodivé filamenty pro 3D tisk jsou kompozitní materiály tvořené z termoplastického materiálu fungujícího jako matrice a vodivých částic plnících funkci plnidla. Vodivé částice mohou být z různých vodivých materiálů, jako jsou například: uhlíkové saze, tenké grafenové nanočástice, stříbrné lupínky, uhlíkové nanotrubičky a další, které nejsou tvořené pouze atomy uhlíku [25] [26].

Pro zajištění vodivosti filamentů je nutné překročit perkolační práh, což je takové hmotnostní procento vodivých částic, při kterém strmě poklesne elektrický odpor materiálu. Například u kompozitního vodivého filamentu tvořeného maticí z polypropylenem a plnidlem tvořeným sazemí rozebíraného v [27] byl perkolační práh stanoven na 11,3 hmotnostních procent plnidla (11,3% hmotnosti kompozitu je tvořeno plnidlem). Naměřenou závislost objemové rezistivity na hmotnostním procentu můžeme vidět na Obrázku 2.9.

Pro dobré vlastnosti během 3D tisku je ovšem nutné zvolit obsah vodivých částic tak, aby byla zachována tisknutelnost filamentu. Pokud se stane, že je filament například příliš křehký, tak se může během tisku zlomit a může dojít k úplnému selhání tisku. Další problém s tiskem kompozitních materiálů obecně je možnost zacpání trysky například kvůli přílišné velikosti vodivých částic.



Obrázek 2.9: Naměřená závislost objemového odporu na hmotnostním procentu [27]

■ 2.5.3.1 Příklady plnidel vodivých filamentů

Velkou skupinou plnidel užívaných pro vytvoření vodivých filamentů pro 3D tisk jsou plnidla tvořená materiály na bázi uhlíku. Tyto materiály můžeme dělit podle uspořádání elektronů v orbitalech a druhu krystalizace uhlíku [28]. Podle těchto kritérií dělíme uhlíková plnidla na:

- Uhlíková čern
- Uhlíková vlákna
- Uhlíkové nanotrubičky
- Grafen
- Uhlíkové destičky

■ 2.5.3.2 Uhlíková čern

Uhlíková čern je jeden z nejrozšířenějších uhlíkových materiálů. Tento materiál je lehký, levný a má dobrou vodivost. Je to jeden z prvních materiálů, který byl použit jako plnidlo ve vodivých kompozitech. Výzkum tohoto materiálu ukazuje, že velikost částic nepřímo ovlivňuje vodivost kompozitů využívajících uhlíkovou čern jako plnidlo. Čím jsou tyto částice menší tím je vodivost koncového materiálu vyšší. Klasická plnicí metoda využívá vysoké množství uhlíkové černi k dosažení perkolačního prahu, tedy k přechodu kompozitu z izolantu na vodič. Vysoké množství uhlíkové černi nepříznivě ovlivňuje proces výroby a mechanické vlastnosti výsledného materiálu. V současné době se další výzkum v oblasti užití uhlíkové černi jako

plnidla pro vodivé kompozity zaměřuje na využití jiné metody plnění a snížení perkolačního prahu [28].

Jednou z metod, pomocí kterých bylo dosaženo snížení perkolačního prahu, je metoda využívající "double percolation structure", což je struktura tvořená ze dvou plastů. Tyto dva plasty se mohou a nemusí smísit dohromady. Hlavní výhodou této metody je to, že vodivé částičky plnidla zůstávají pouze v jednom z plastů a tím dojde k zvodivění kompozitu a zároveň druhý plast není ovlivněn částicemi plnidla a mechanické vlastnosti takového kompozitu se tak mohou zlepšovat [29].

■ 2.5.3.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou speciální vlákna složená převážně z atomů uhlíku. Uspořádání atomů uhlíku v krystalické struktuře, která je podobná šestiúhelníkové krystalické struktuře [30], tvořící uhlíkové vlákno je takové, že tato výsledná vlákna jsou velice pevná a lehká. Toho se využívá ve mnoha aplikacích. Kompozity vyrobené z uhlíkových vláken můžeme najít například v letectví, motorsportu, automobilovém průmyslu, cyklistice a v dalších oblastech, kde je potřeba lehké konstrukce s velkou pevností [31]. Uhlíková vlákna mají také velice dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, kterou mají společnou s dalšími uhlíkovými fázemi.

Uhlíková vlákna se také používají jako plnidlo do kompozitních filamentů pro 3D tisk, kde se využívá jejich dobré elektrické a tepelné vodivosti. Perkolační práh takovýchto kompozitů se pohybuje od 7 do 8,5 hmotnostních procent. Při dosažení 10 hmotnostních procent dojde ke snížení rezistivity až k hodnotám v řádech jednotek až desetin $\Omega \cdot m$ [29].

■ 2.5.3.4 Uhlíkové nanotrubičky

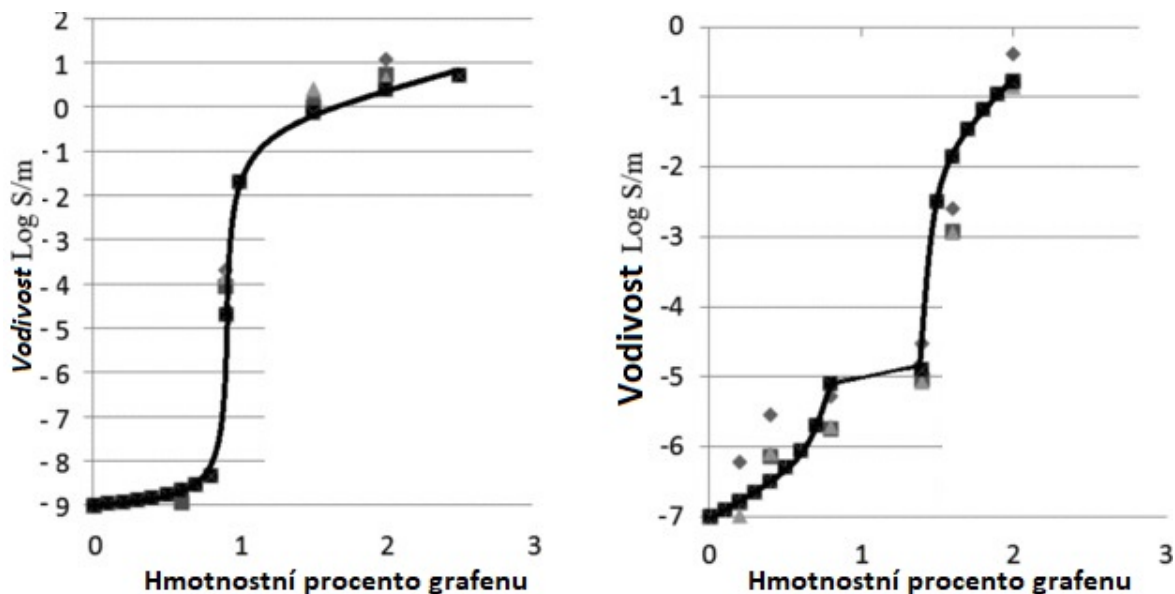
Uhlíkové nanotrubičky byly objeveny v roce 1991 japonským vědcem Sumio Iijimou. Uhlíkové nanotrubičky jsou uhlíkové útvary s průměrem v řádu nanometrů. Uhlíkové nanotrubičky lze vyrobit pomocí hoření stejnosměrného oblouku mezi uhlíkovými elektrodami, nebo pomocí metody CVD (carbon vapor deposition - napařování uhlíku). Dle uspořádání atomů uhlíku v nanotrubičkách lze měnit jejich vlastnosti například mechanickou pevnost, elektrickou vodivost a jejich chemické vlastnosti. Elektrické vlastnosti uhlíkových nanotrubiček se mohou podobat kovům (uspořádání atomů do uspořádání armchair), nebo se mohou podobat polovodičům (uspořádání atomů do uspořádání zigzag a chiral). Většina vyrobených uhlíkových nanotrubiček je využívána v kompozitech jako plnidlo pro zvýšení tuhosti těchto materiálů převážně kvůli jejich velice dobrým mechanickým vlastnostem. Tyto materiály jsou využívány hlavně v automobilovém a leteckém průmyslu [32]. Díky jejich vodivým nebo polovodivým vlastnostem mohou být využity v elektrických nanozařízeních, elektrochemických úložištích energie a dalších aplikacích.

Jako plnidlo použili uhlíkové nanotrubičky při zkoumání kompozitu vytvořeného z ABS a uhlíkových nanotrubiček ve studii vytvořené polskými vědci [33]. V této studii se výzkumníci zaměřili na vliv přimíchání uhlíkových nanotrubiček do plastu ABS. Výsledkem jejich výzkumu je, že při plnění 4,76 hmotnostních procent (4,76% hmotnosti je tvořeno uhlíkovými nanotrubičkami) se začne kompozit chovat jako vodivá látka s rezistivitou $2,5\Omega \cdot m$. Při plnění

9,09 hmotnostních procent dojde k výraznému zmenšení rezistivity o jeden řád na $0,15 \Omega \cdot m$. Z výsledků této studie také vidíme, že vlastnosti kompozitu se zlepšily také po mechanické stránce.

2.5.3.5 Grafen

Grafen je forma uhlíku tvořená jednovrstvou plochou atomů uspořádaných do šestiúhelníkové struktury. Grafen lze vytvořit buď odtržením jednotlivých vrstev grafitu nebo růstem 2D krystalů. Odtržení jednotlivých vrstev grafitu lze provést několika způsoby, například s pomocí ultrazvuku. Růst 2D krystalů lze provést pomocí růstu těchto krystalů na jiném krystalu epitaxním růstem. Grafen je velice zajímavý materiál, protože dobře vede elektrický proud, vede teplo a lze ho vyrobit z krystalů grafitu. Při použití v kompozitu se zdá, že perkolační práh bude celkem na nízkých hmotnostních procentech. Podle [34] je vidět, že perkolační práh je zhruba při jednom až jednom a půl hmotnostním procentu grafenu. Závislost vodivosti na obsahu grafenu v kompozitu můžeme vidět na 2.10. Oproti tomu u jiných plnidel je perkolační práh ve vyšších jednotkách až desítkách hmotnostních procent.



Obrázek 2.10: Grafy závislosti vodivosti na hmotnostním procentu grafenu v kompozitních materiálech tvořených maticí polystyrenu (vlevo) a polypropylenu (vpravo). [34].

2.5.3.6 Možnosti využití vodivých filamentů pro 3D tisk

Možnosti využití vodivých filamentů jsou omezené vzhledem k jejich relativně vysokému odporu. I tak lze z vodivých filamentů zkonstruovat funkční elektrotechnické elementy, například funkční cívku či kondenzátor jako v [35]. Další možnosti využití vodivých filamentů jsou senzory. Pomocí vodivých filamentů můžeme zkonstruovat například senzor teploty [27], tenzometr, nebo odporový dotykový senzor, jehož principu a ověření funkce bude věnována praktická část této práce.

Kapitola 3

Praktická část

V kapitole věnované praktické části se budu zabývat charakterizací vodivých filamentů z hlediska jejich elektrického odporu a také realizaci vybraných aplikací vodivých filamentů. Pomocí těchto filamentů se budu snažit ukázat možnost uplatnění elektricky vodivých filamentů ve výrobě nevýkonových elektronických součástek.

3.1 Filamenty využití v praktické části bakalářské práce

V praktické části bakalářského projektu byly využity filamenty od firem Prusa Polymers a Proto-pasta. Jednalo se o filament jak z čistého PLA, tak filamenty kompozitní. Kompozitní filamenty byly tvořeny maticí z termoplastu PLA a plnidlem ve formě uhlíkových sazí. Kompozitní filament vyrobený firmou Prusa Polymers je tvořen z 30% uhlíkovými sazemi a ze 70% maticí z PLA. Firma Proto pasta tento údaj neudává. Vybrané parametry vytisknutých filamentů jsem zanesl do tabulky níže.

Tabulka 3.1: Typické vlastnosti materiálů z technických listů výrobce [36][37]

Filament	Nevodivý	Vodivý Prusa	Proto-pasta
Teplota tání [°C]	145-160	145-160	155
Teplota skelného přechodu[°C]	55-60	60	-
Hustota [g/cm ³]	1,24	-	1,24

3.2 Charakterizace filamentů z hlediska rezistivity

3.2.1 Rezistivita v kolmém směru

Charakterizaci filamentů z hlediska povrchové a objemové rezistivity jsem provedl pomocí měřící aparatury skládající se z multimetru Keithley 6517A, který byl při charakterizaci použit jako měřič odporu, a přípravku pro měření odporu Keithley 8009. Je nutno podotknout, že všechna měření jsem prováděl na vzorcích až po tisku.

Z každého filamentu jsem vytiskl 10 vzorků, jejichž tloušťka byla od 0,5 do 1 mm. K tisku byla použita tiskárna Original Prusa i3 MK3S. Pomocí sestavy pro měření odporu jsem určil odpor takzvanou dvacetiminutovou zkouškou, při které jsem nechal odpor ustalovat 20 minut a poté odečetl hodnotu. Měřič odporu nám ovšem ukazuje pouze odpor měřeného vzorku.

Pro získání rezistivit jednotlivých vzorků je nutno tyto odečtené hodnoty přepočítat. Tyto přepočty jsou následující.

Přepočet pro povrchovou rezistivitu je

$$\sigma = 53,4 \cdot R \Omega \quad [38], \quad (3.1)$$

kde R je odečtená hodnota povrchového odporu a σ je povrchová rezistivita.

Přepočet pro objemovou rezistivitu

$$\rho = \frac{22,9 \cdot R}{h} \Omega \cdot \text{cm} [38], \quad (3.2)$$

kde R je odpor odečtený z přípravku pro měření odporu a h je změřená průměrná tloušťka vzorku. Pro čisté PLA očekáváme rezistivitu v řádech 10^{14} - $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ [39]. Pro vodivé filameny očekáváme rezistivitu nižší až o 10 řádů, což je způsobeno jejich dopováním vodivými částicemi. Touto metodou jsem charakterizoval rezistivitu ve svislém směru.

Vzorky pro tuto metodu jsou ve tvaru destičky o velikosti 10x10x0,5 mm.

■ 3.2.2 Rezistivita v rovnoběžném směru na tisk

Ve směru rovnoběžném s pohybem tiskové hlavy jsem zvolil čtyřvodičovou metodu měření. Tato metoda je zde výhodná díky tomu, že nemusíme počítat s odporem přívodů, budeme brát v úvahu pouze odpor natištěného filamentu. Pro tuto metodu můžeme použít obecně známý Ohmův zákon

$$U = R \cdot I, \quad (3.3)$$

kde U je napětí na měřené části vzorku, jejíž délku šířku a délku známe, a I je proud jí procházející. Pro dopočtení rezistivity využijeme vzorec

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.4)$$

kde R je vypočtený odpor, l je délka měřeného vzorku, S je jeho průřez a ρ je hledaná hodnota rezistivity. Všechny tyto hodnoty známe, tudíž upravím vzorec do tvaru

$$\rho = \frac{R}{l} \cdot S. \quad (3.5)$$

Z tohoto vztahu tedy dopočítáme rezistivitu daného vodivého filamentu ve vytištěné formě v rovnoběžném směru pohybu tiskové hlavy.

3.3 Výsledky měření rezistivity filamentů

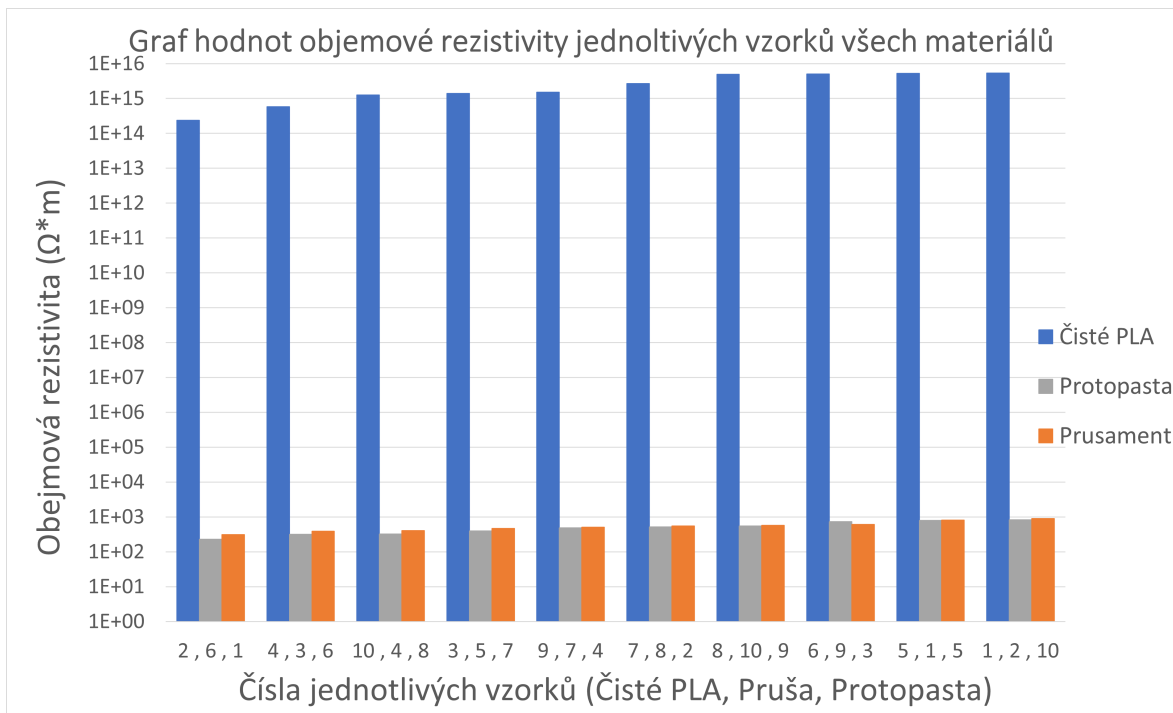
3.3.1 Výsledky měření rezistivity v kolmém směru

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky měření objemového a povrchového odporu jednotlivých filamentů. Napětí zdroje pro měření odporu nevodivého filamentu bylo 1 kV a pro testování vzorků z vodivého filamentu firmy Proto-pasta bylo 70 mV, vzorky z vodivého filamentu firmy Prusa Polymers byli testovány při napětí zdroje 50 mV. Tyto výsledky jsem také vynesl do grafů. Průměrné hodnoty rezistivit jsem shrnul v následující tabulce 3.2.

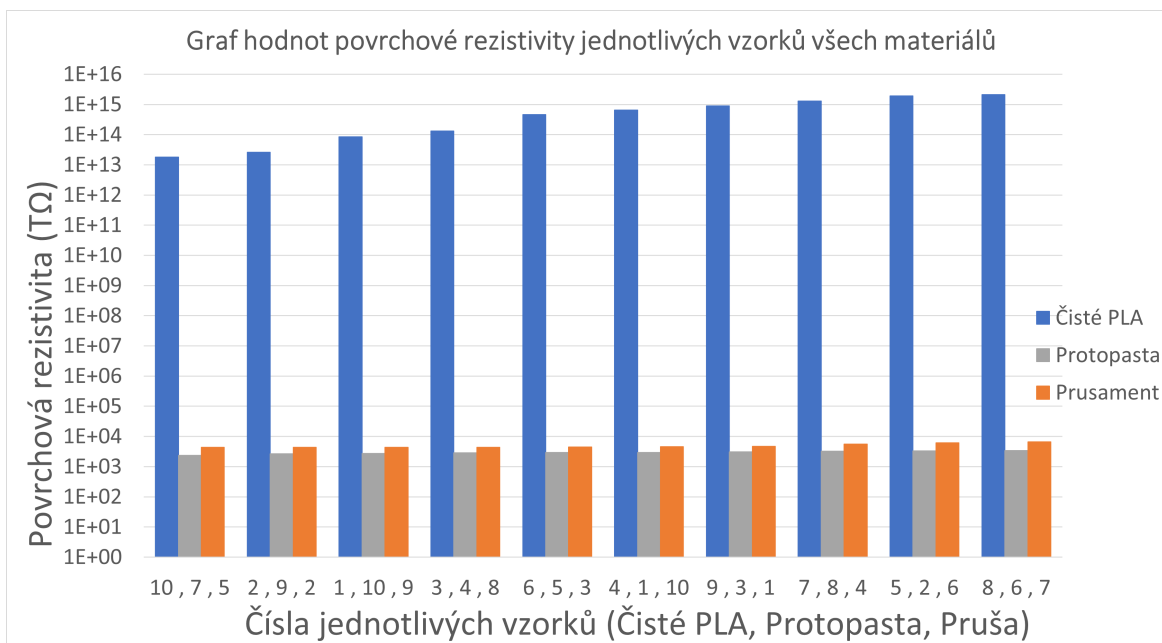
Tabulka 3.2: Tabulka výsledků měření rezistivity

Měření objemové rezistivity	
Měřený materiál	Průměrná hodnota [$\Omega \cdot m$]
Čisté PLA od firmy Prusa polymers	$2827,54 \cdot 10^{12}$
Vodivý filament od firmy Prusa Polymers	551,63
Vodivý filament od firmy Proto-Pasta	689,92
Měření povrchové rezistivity	
Měřený materiál	Průměrná hodnota [Ω]
Čisté PLA od firmy Prusa polymers	$757,16 \cdot 10^{12}$
Vodivý filament od firmy Prusa Polymers	4940,03
Vodivý filament od firmy Proto-Pasta	2960,50

V následujících grafech jsou vyneseny hodnoty rezistivit jednotlivých vzorků v grafech. V první dvojici grafů na Obrázcích 3.1 a 3.2 jsem vynesl hodnoty rezistivity pro všechny vzorky. Vzhledem k velkému rozdílu rezistivit mezi vodivými vzorky a nevodivými jsem využil logaritmickou svislou osu. Hodnoty odporů jednotlivých součástek jsem seřadil od nejnižších po nejvyšší.

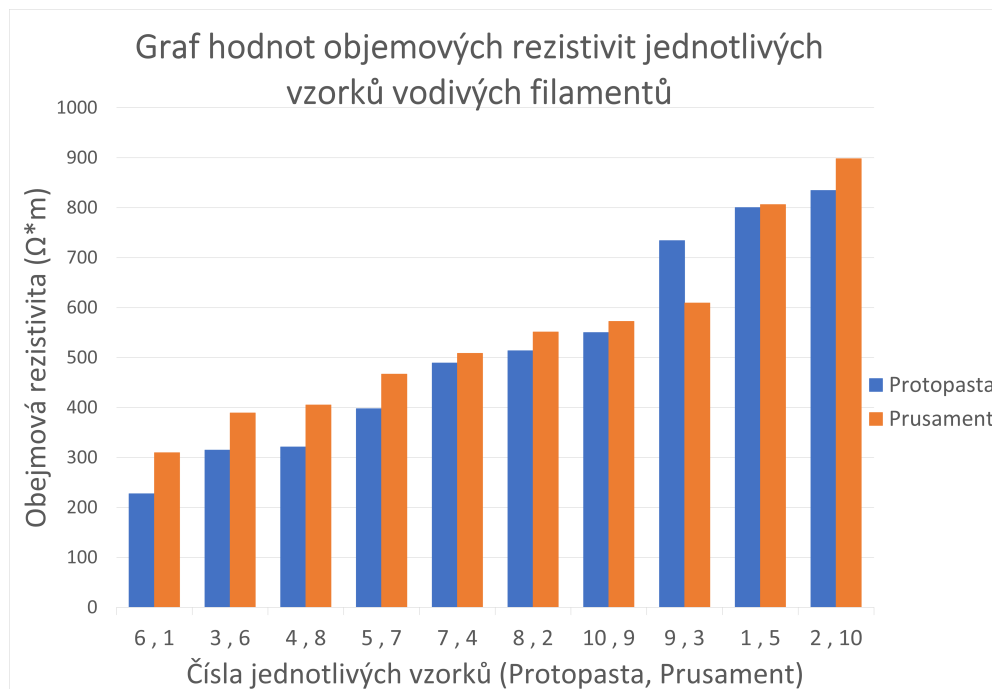


Obrázek 3.1: Graf hodnot objemové rezistivity jednotlivých vzorků vytvořených ze všech materiálů

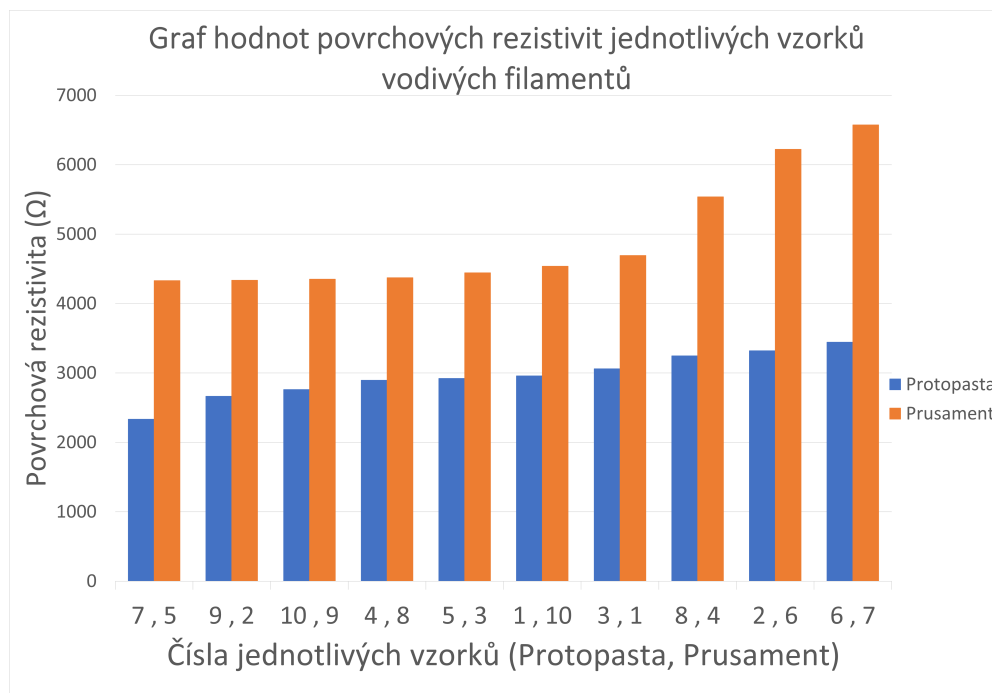


Obrázek 3.2: Graf hodnot povrchové rezistivity jednotlivých vzorků vytvořených ze všech materiálů

Pro lepší porovnání vodivých filamentů mezi sebou jsem vytvořil separátní grafy pro tyto dva materiály. Tyto grafy můžeme vidět na Obrázcích 3.3 a 3.4. Z těchto grafů můžeme vidět, že vzorky vytvořené z filamentu od výrobce Proto-pasta mají nižší hodnoty rezistivity než vzorky od firmy Prusa Polymers.



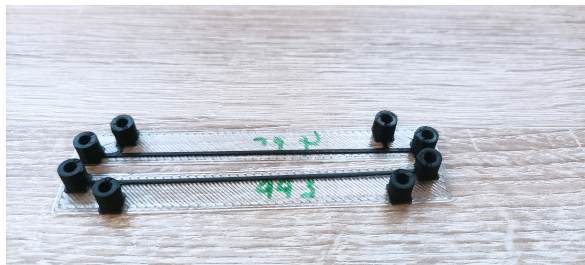
Obrázek 3.3: Graf hodnot objemových rezistivit pro jednotlivé vzorky vytvořené z vodivých filamentů



Obrázek 3.4: Graf hodnot povrchových rezistivit pro jednotlivé vzorky vytvořené z vodivých filamentů

3.3.2 Výsledky měření rezistivity ve směru rovnoběžném na tisk

K provedení tohoto měření čtyřvodičovou metodou jsem vytvořil po pěti vzorcích z obou filamentů, které jsou na Obrázku 3.5, a provedl jsem měření čtyřvodičovou metodou pomocí multimetru HP34401A.



Obrázek 3.5: Ukázka vzorků pro čtyřvodičovou metodu

Výsledky měření odporů vzorků získané pomocí čtyřvodičové metody jsou níže v tabulkách 3.3 a 3.4

Tabulka 3.3: Tabulka naměřených odporů a vypočtených rezistivit vzorků vodivého filamentu firmy Prusa Polymers

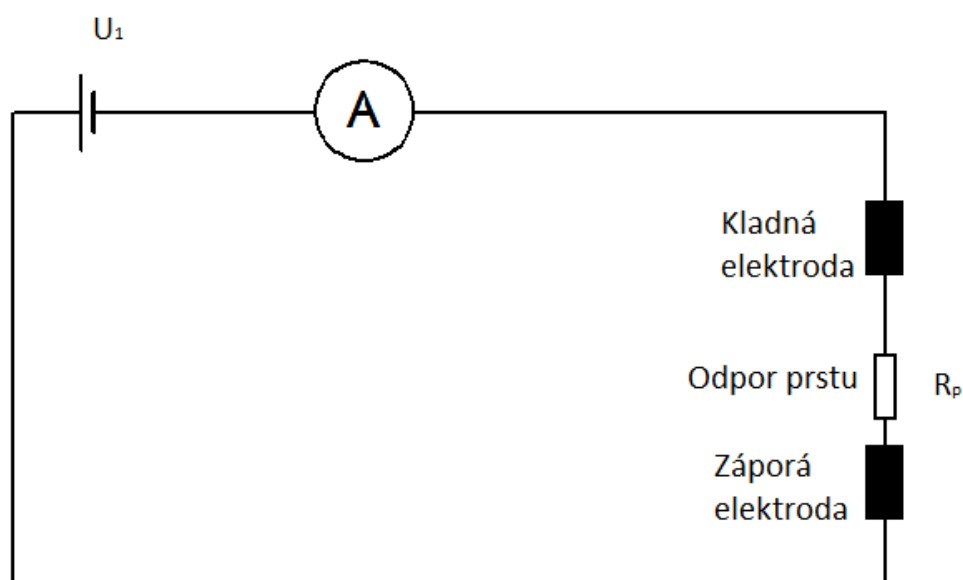
Součástka číslo	Odpor [Ω]	Rezistivita [$\Omega \cdot m$]
1	43000	2,69
2	50000	3,13
3	45000	2,81
4	46000	2,88
5	51000	3,19
Průměrná hodnota	47000	2,94

Tabulka 3.4: Tabulka naměřených odporů a vypočtených rezistivit vzorků vodivého filamentu firmy Proto-pasta

Součástka číslo	Odpor [Ω]	Rezistivita [$\Omega \cdot m$]
1	9300	0,58
2	9600	0,60
3	9300	0,58
4	9400	0,59
5	9300	0,58
Průměrná hodnota	9380	0,59

3.4 Princip odporového dotykového tlačítka

Princip dotykového odporového tlačítka se zakládá na tom, že při spojení dvou elektrod se uzavře vodivá cesta a tlačítkem začne procházet proud. Tímto způsobem můžeme detekovat dotyk prstu pomocí sledování protékajícího proudu obvodem. Schéma tohoto obvodu je na Obrázku 3.6.



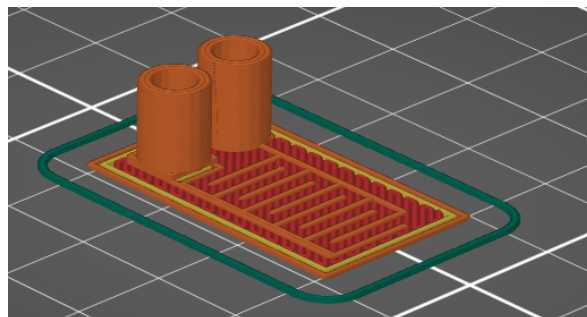
Obrázek 3.6: Schéma obvodu jednoduchého odporového tlačítka

Na předchozím schématu můžeme vidět zdroj napětí U_1 , kladnou a zápornou elektrodu součástky a odpor R_p reprezentující odpor prstu.

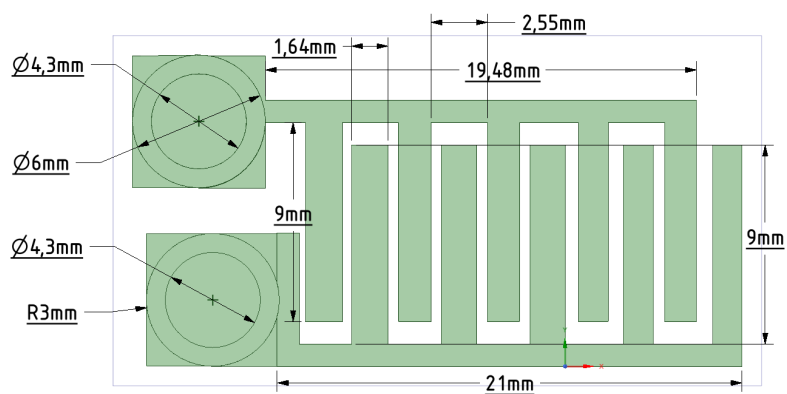
3.5 3D tisk prototypu tlačítka pomocí tiskárny Original Prusa i3 MK3S

Prototyp tlačítka jsem vytiskl pomocí FDM tiskárny od firmy Prusa Research Original Prusa i3 MK3S, kterou můžeme vidět na Obrázku 2.7. Inspiraci na design tohoto tlačítka jsem si vzal z tlačítek používaných na deskách plošných spojů např. v dálkových ovladačích. Poté jsem vytvořil v softwaru základní návrh pro měření. Tento digitální 3D návrh jsem pomocí softwaru PrusaSlicer převedl na instrukce pro tiskárnu. Výsledná podoba součástky stále v digitální podobě je na Obrázku 3.7 a 3.8.

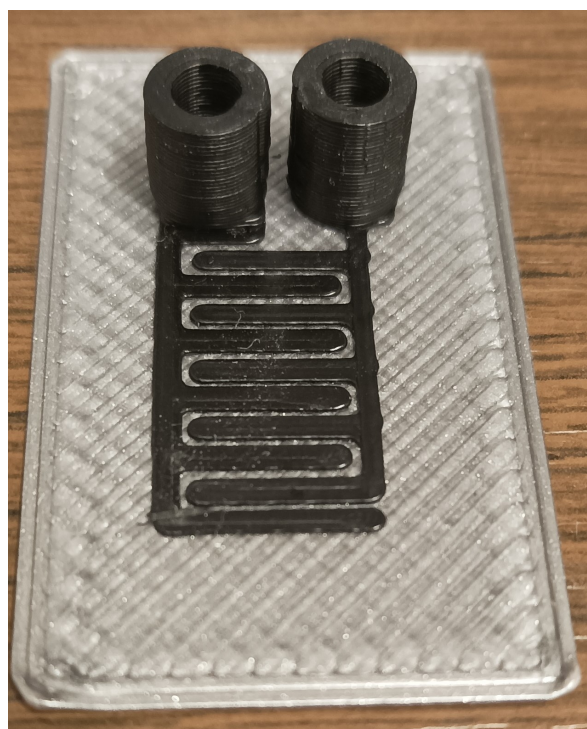
Poté jsem vytiskl několik vzorků tohoto modelu z nevodivého filametru Prusament PLA Galaxy Silver a vodivých filamentů od firmy Prusa Polymers a Proto pasta. Výsledek tisku je na Obrázku 3.9. Vzorky byly tisknuty tryskami s průměrem výstupu 0,4 a 0,8 mm.



Obrázek 3.7: Náhled dotykové tlačítka v programu PrusaSlicer (oranžově vodivý filament, ostatní barvy jsou filament nevodivý)

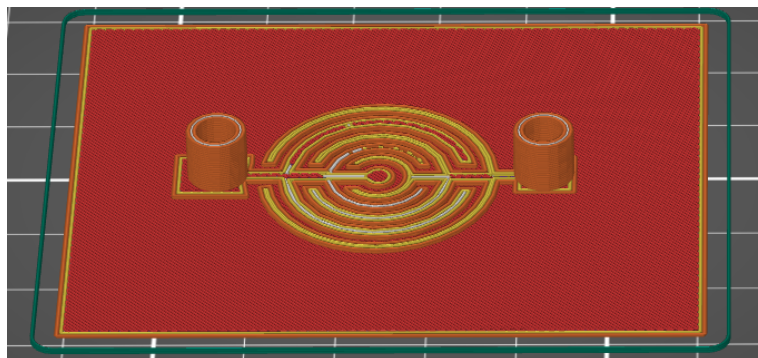


Obrázek 3.8: Nákres součástky

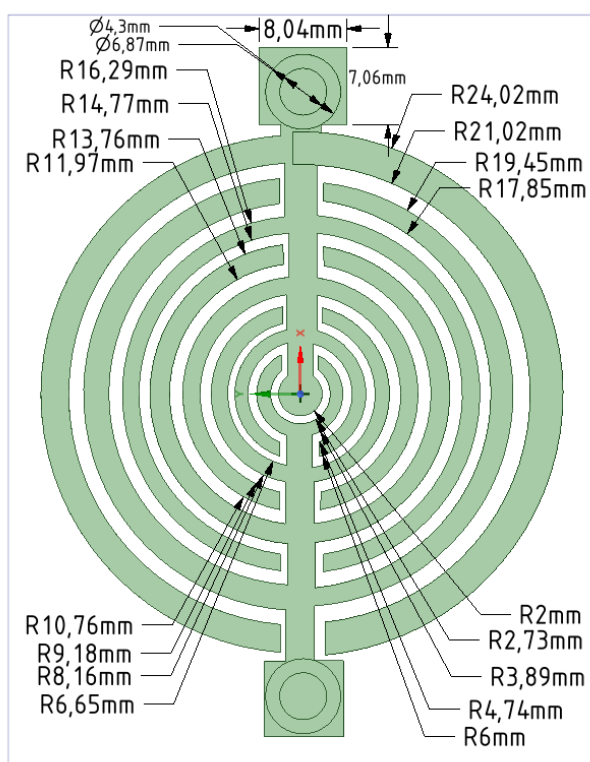


Obrázek 3.9: Prototyp senzoru dotyku vyrobený pomocí 3D tisku

Dále jsem vytvořil další model toho, jak by mohla součástka vypadat. Tento model jsem vytvořil, protože proud procházející součástkou prvního designu při přiložení prstu se mi zdál nedostačující. Při napětí 10V se totiž pohyboval pouze v hodnotách do 50 mA. Zvolil jsem konstrukční řešení se dvěma elektrodami, které se skládají ze střídajících se soustředných kružnic. Náhled tohoto modelu v programu PrusaSlicer je na Obrázku 3.10 a náhled z CAD softwaru je na Obrázku 3.11.



Obrázek 3.10: Náhled součástky s kruhovými elektrodami v programu PrusaSlicer



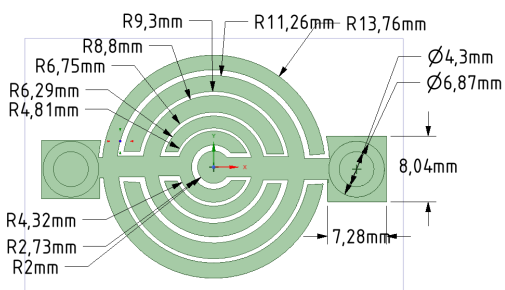
Obrázek 3.11: Nákres součástky s kruhovými elektrodami v CAD programu

Tuto součástku jsem poté vytvořil pomocí technologie 3D tisku. Jeden z výsledků procesu můžeme vidět na Obrázku 3.12.

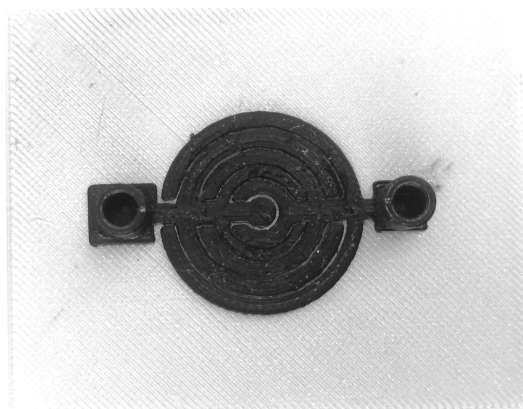


Obrázek 3.12: Výsledek tisku senzoru s kruhovými elektrodami

Součástku jsem poté zmenšil tak, aby byla velká přibližně na jeden lidský prst. Tato verze součástky je vyobrazena na následující fotografii 3.13b a Obrázku 3.13a.



(a) : Náčres zmenšené verze součástky



(b) : Obrázek zmenšené verze součástky

3.6 Ověření možnosti využití vodivých filamentů ve výrobě součástek

Ověření možnosti využití vodivých filamentů pro tvorbu součástek budu provádět tak, že budu sledovat průchod proudu obvodem pomocí ampérmetru při přiložení prstu k elektrodám. Hodnotu proudu budu sledovat při napětí zdroje 3,3 V, 5 V a 10 V. Proud budu zkoumat při přiložení každého z prstů jedné ruky při všech hodnotách napětí.

Jako zdroj napětí použiji zdroj od firmy Zhaoxin electronix RXN-302D-II a jako ampérmetr použiji multimetr HP 34401A.

Pro tato měření jsem využil součástky a jejich ekvivalenty, které jsou na Obrázku 3.12 a 3.13b.

3.7 Výsledky měření proudů součástkami

Měření jsem provedl u 4 součástek s elektrodami ve tvaru kružnic. Jednalo se o dvě součástky vyrobené z vodivého filamentu od firmy Prusa Polymers, které byly vytisknuty pomocí trysky o průměru 0,4mm (součástka 1 a 2), součástku z filamentu od firmy Prusa Polymers vytisknuté tryskou o 0,8mm (součástka 3) a součástku z filamentu od firmy Proto-pasta vytisknuté tryskou o průměru 0,8mm (součástka 4). Výsledky měření jsem zpracoval do Tabulek 3.5a, 3.5b, 3.6a a 3.6b. Průměrné hodnoty proudů jsem zpracoval do grafu, jež je na Obrázku 3.14. Vzhledem k tomu, že proudy naměřené zmenšenou součástkou jsou srovnatelné jako při měření proudů součástkou větší, budu dále používat součástku zmenšenou.

(a) : Tabulka naměřených hodnot proudu pro součástku 1

Součástka 1	Proud při daném napětí			
	Přiložený Prst	$I_{3,3V}$ [μA]	I_{5V} [μA]	I_{10V} [μA]
Palec		35	60	340
Ukazováček		17	60	340
Prostředníček		25	64	355
Prsteníček		20	60	284
Malíček		18	41	272
Průměrná hodnota		23	57	318.2

(b) : Tabulka naměřených hodnot proudu pro součástku 2

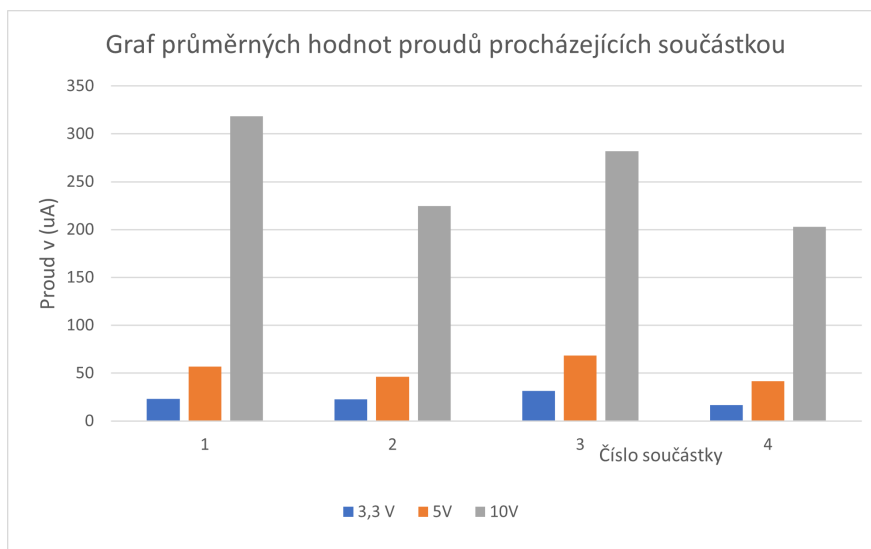
Součástka 2	Proud při daném napětí V			
	Přiložený Prst	$I_{3,3V}$ [μA]	I_{5V} [μA]	I_{10V} [μA]
Palec		30	50	250
Ukazováček		22	60	250
Prostředníček		30	53	233
Prsteníček		19	43	200
Malíček		13	26	190
Průměrná hodnota		22.8	46.4	224.6

(a) : Tabulka naměřených hodnot proudu pro součástku 3

Součástka 3	Proud při daném napětí			
	Přiložený prst	$I_{3,3V}$ [μA]	I_{5V} [μA]	I_{10V} [μA]
Palec		18	53	215
Ukazováček		15	48	230
Prostředníček		19	37	220
Prsteníček		17	43	190
Malíček		14	26	160
Průměrná hodnota		16.6	41.4	203

(b) : Tabulka naměřených hodnot proudu pro součástku 4

Součástka 4	Proud při daném napětí			
	Přiložený prst	$I_{3,3V}$ [μA]	I_{5V} [μA]	I_{10V} [μA]
Palec		44	82	290
Ukazováček		35	72	310
Prostředníček		40	75	300
Prsteníček		20	67	290
Malíček		19	47	220
Průměrná hodnota		31.6	68.6	282



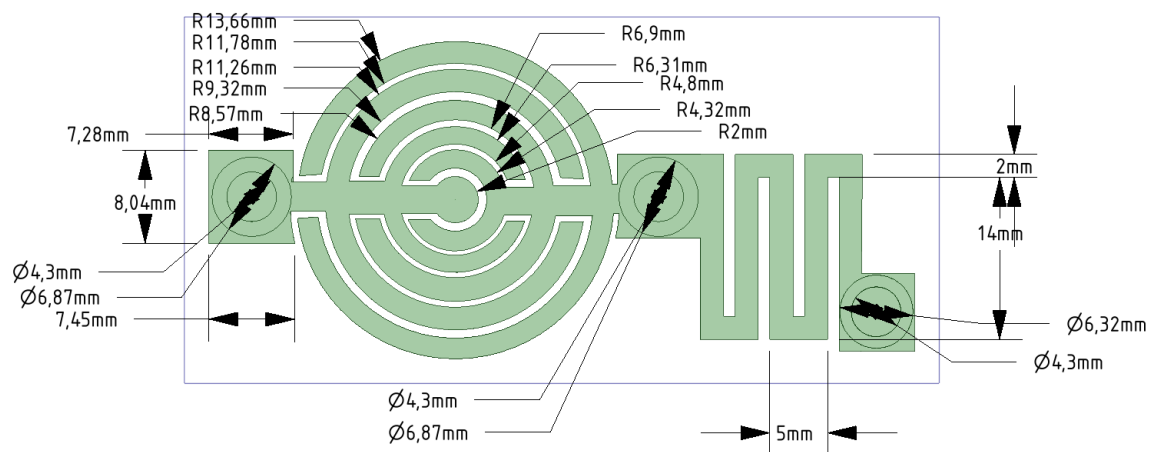
Obrázek 3.14: Graf průměrných proudů součástkami při jednotlivých hodnotách napětí

3.8 Návrh přípravku pro zaznamenání dotyku

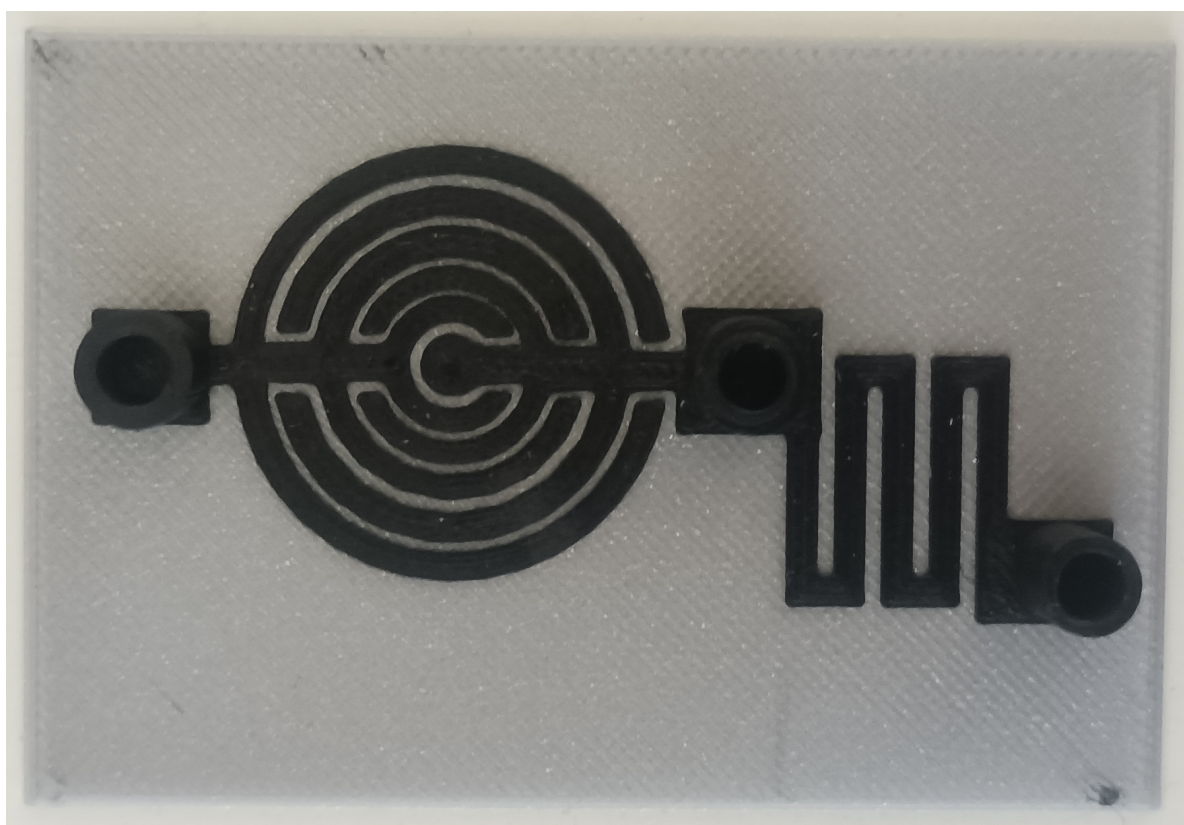
Tento přípravek se skládá ze senzoru dotyku a odporu natištěného z vodivého filamentu, MOSFET, předřadného odporu tranzistoru o hodnotě 330Ω a LED. Z minulých měření jsem stanovil hodnotu odporu tlačítka s přiloženým prstem řádově na $30 \text{ k}\Omega$ při přiloženém napětí 10V . S tímto napětím budu pokračovat. Za toto tlačítko jsem přiřadil odpor, na kterém budu mít napětí, které dále otevře MOSFET, který je ovládaný napětím. Vzhledem k tomu, že odpor by měl být okolo $10 \text{ k}\Omega$, bude na tomto odporu napětí od 2 do 4 V v závislosti na síle stisknutí a vodivosti povrchu lidského prstu. Po přiložení prstu by se měl obvod uzavřít a obvodem by měl začít téci proud. Při protékání proudu obvodem na přiřazeném odporu vznikne napětí a na tranzistor MOSFET bude přivedeno řídicí napětí. Po přivedení řídicího napětí by se tranzistor měl otevřít a procházející proud by měl rozsvítit LED.

3.9 Měření napětí na odporu

Toto napětí je třeba změřit pro vybrání správného tranzistoru, tak aby tranzistor sepl při přiložení prstu na tlačítko. Toto měření jsem provedl pomocí multimetru HP 34401A a pro napájení jsem použil zdroj Zhaoxin electronix RXN-302D-II nastavený na 10V . Model součástky využitý při měření je znázorněn na Obrázku 3.15. Pro toto měření jsem podle modelu na 3D tiskárně vytvořil součástku, která je na Obrázku 3.16.



Obrázek 3.15: Tlačítko se zařazeným odporem pro měření napětí na odporu



Obrázek 3.16: Tlačítko se zařazeným odporem pro měření napětí na odporu

3.10 Výsledky měření napětí na odporu přiřazeném za tlačítko

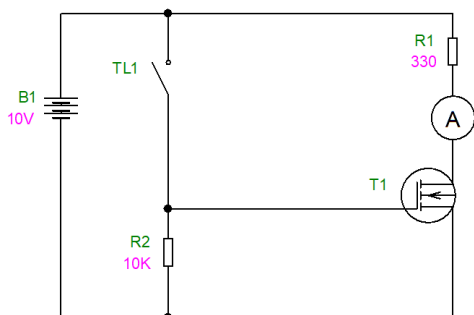
V následující tabulce je přiložena hodnota napětí na přiřazeném odporu při přiložení prstu na senzor dotyku. Tyto hodnoty napětí byly poté použity pro vybrání MOSFET pro tuto konkrétní aplikaci. Hodnota napětí závisí na přiloženém prstu, proto jsem změřil napětí na odporu pro jednotlivé prsty.

Tabulka 3.7: Tabulka hodnot napětí na odporu při napájecím napětí 10V

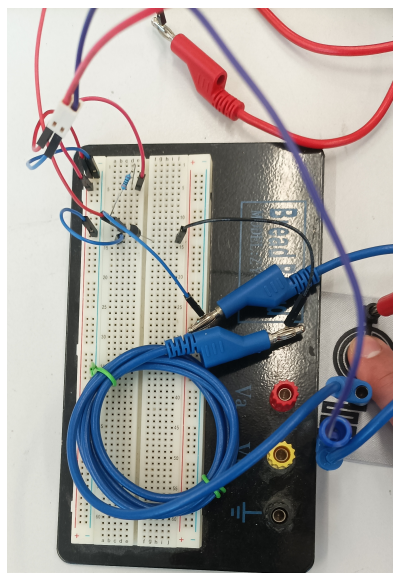
Přiložený prst	Hodnota napětí na odporu [V]			
Palec	3,6	3,5	3,6	3,6
Ukazováček	3,2	3,4	3,6	3,2
Prostředníček	3,3	3,0	4,0	3,8
Ukazováček	3,6	3,0	4,2	4,0
Malíček	3,5	3,0	4,3	4,2

3.11 Praktická konstrukce tlačítka a ověření funkčnosti

Pro konstrukci tlačítka jsem použil ty samé vzorky jako pro měření napětí na odporu. Pro ověření funkčnosti jsem použil napětí 10 V a zapojení pomocí nepájivého pole. Obrázek obvodu tohoto tlačítka je na následujícím obrázku. Ověření funkčnosti jsem provedl pomocí ampérmetru zapojeného do série s odporem a tranzistorem [40]. Zároveň s ověřením funkčnosti jsem také změřil proud procházející ampérmetrem důležitý pro výběr diody, tak aby proudy procházející diodou nepřesáhli její jmenovitou hodnotu. Pokud by ji přesáhl, bylo by třeba zvýšit odpor zapojený do série s diodou a tranzistorem.



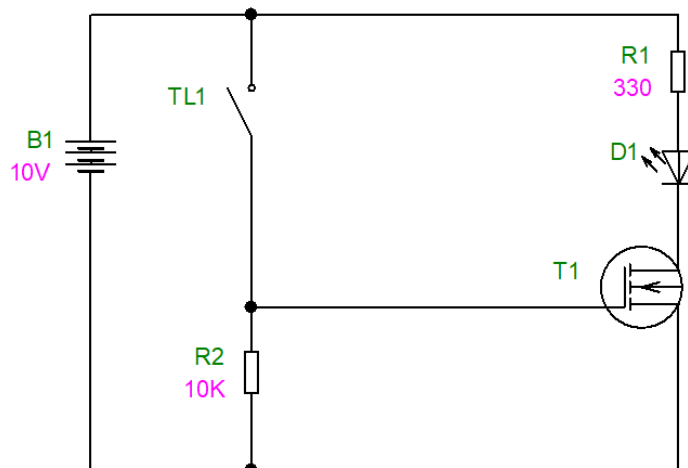
(a) : Schéma zapojení pro ověření funkce obvodu



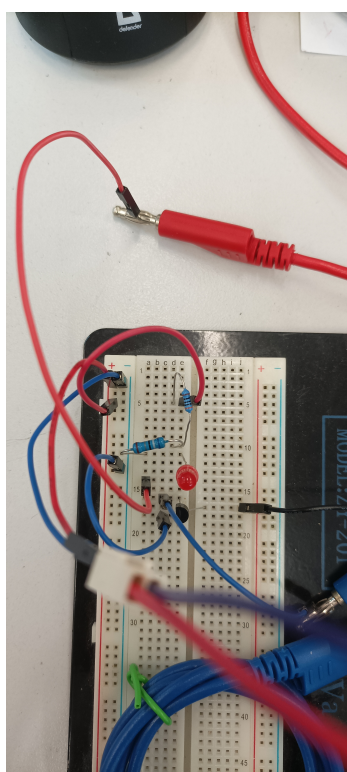
(b) : Fotografie zapojení obvodu tlačítka pomocí nepájivého pole podle předchozího schématu

Obrázek 3.17: Obvod pro měření procházejícího proudu

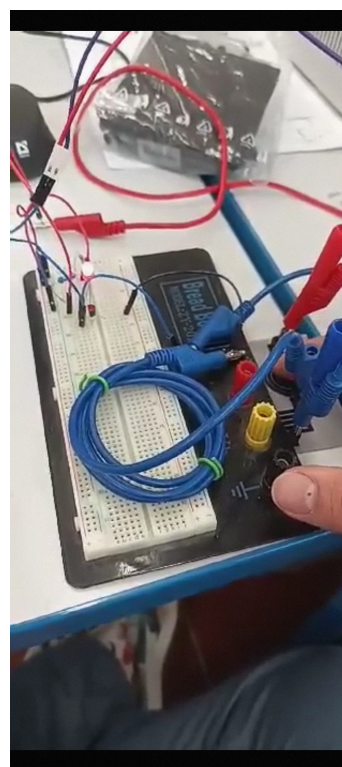
Poté co jsem ověřil funkčnost obvodu, tak jsem místo ampérmetru připojil LED [41]. Tato dioda indikuje rozsvícením protékající proud a tedy otevření tranzistoru při procházejícím proudu. Schéma tohoto obvodu je na Obrázku 3.18. Obrázky zapojení jsou pak na Obrázku 3.19a a 3.19b.



Obrázek 3.18: Schéma zapojení s LED



(a) : Obrázek při nečinnosti obvodu

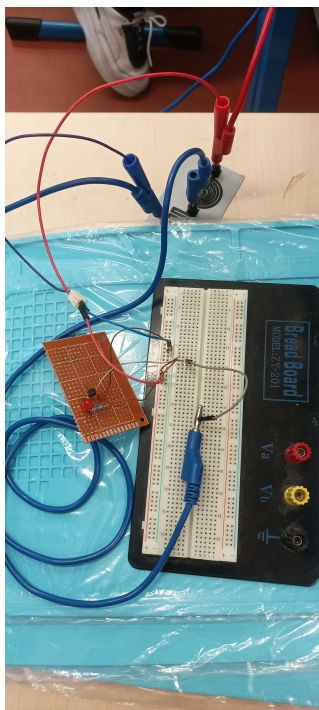


(b) : Obrázek obvodu po přiložení prstu a rozsvícení LED

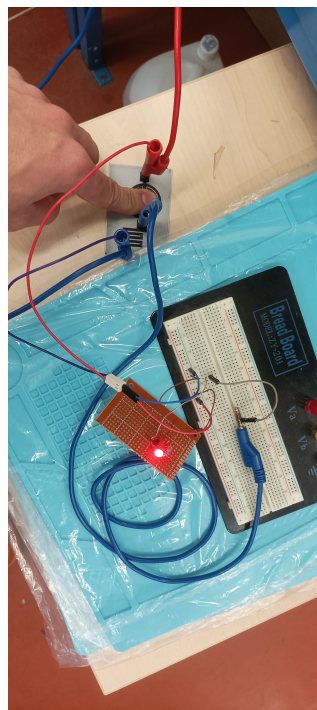
Obrázek 3.19: Zapojení senzoru dotyku pomocí nepajivého pole

Obvod jsem vytvořil také pomocí univerzální desky plošného spoje a vyzkoušel zda tento

obvod také funguje.



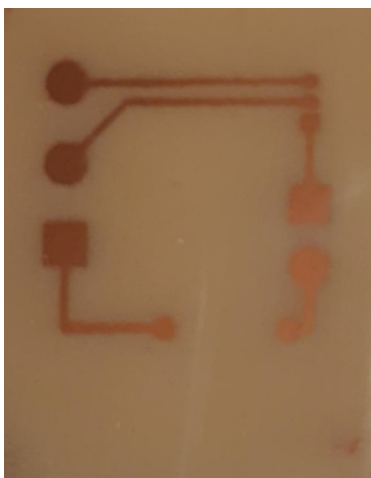
(a) : Obvod s rozsvícenou LED



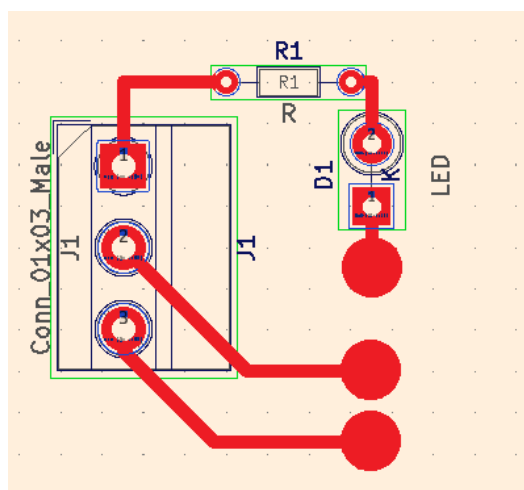
(b) : Obvod s rozsvícenou LED

Obrázek 3.20: Test obvodu napájeného na DPS

Když jsem ověřil funkci pomocí univerzální desky plošného spoje, tak jsem přikročil k leptání desky plošného spoje přesně pro tuto aplikaci. Tuto desku jsem navrhl pomocí softwaru KiCad. Poté jsem desku vyrobil pomocí zaběhlých postupů, tedy osvětlení desky, odmytí fotorezistu vývojkou, odleptání přebytečné mědi a následně vyvrtání děr. Deska před vrtáním je na Obrázku 3.21a a jeho nákres na Obrázku 3.21b. Na tuto desku jsem poté připájel stejné součástky jako ty, které jsem využil při předchozích zapojeních.



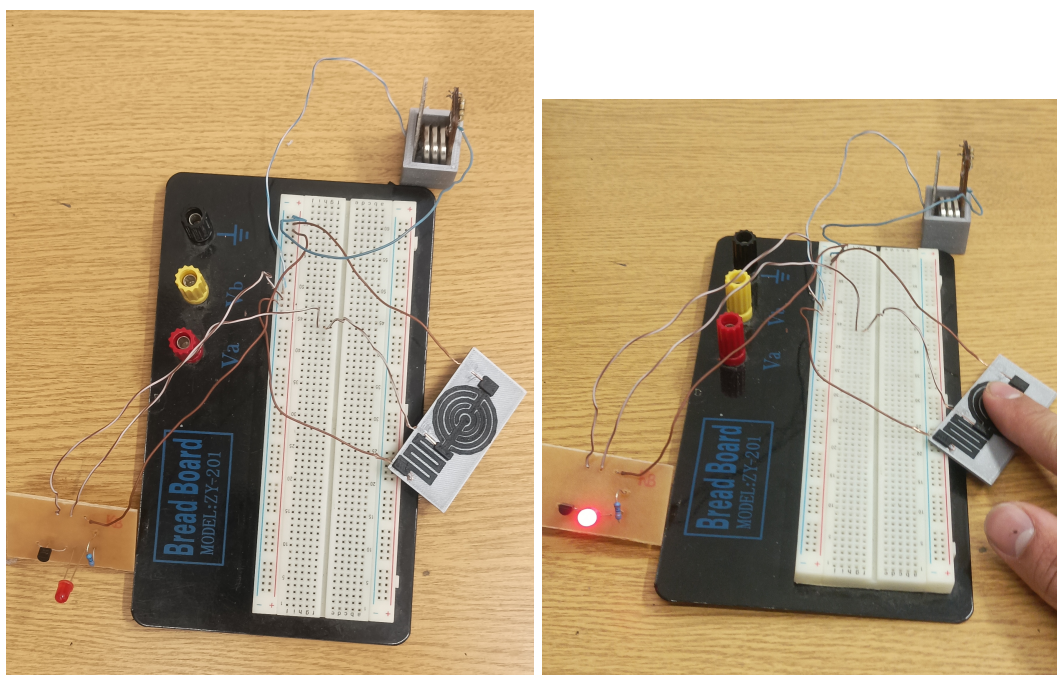
(a) : Obrázek vyleptané desky plošného spoje



(b) : Nákres desky plošného spoje v softwaru KiCad

Obrázek 3.21: Návrh a realizace plošného spoje

Poté co jsem ověřil funkčnost této součástky se zdrojem napětí 10 V, jsem přešel na napájení obvodu z trojce baterií o nominálním napětí 3,3 voltu, což odpovídá napětí na zdroji napětí. Tento experiment lze vidět na Obrázku 3.22a a 3.22b. K tomuto zapojení jsem použil zapojení bez banánků. Vodiče jsem zastrčil přímo do struktury vytvořené z vodivého filamentu, které jsou připevněny pomocí konstrukce samotné součástky. Tato součástka je na Obrázku 3.23 a 3.24



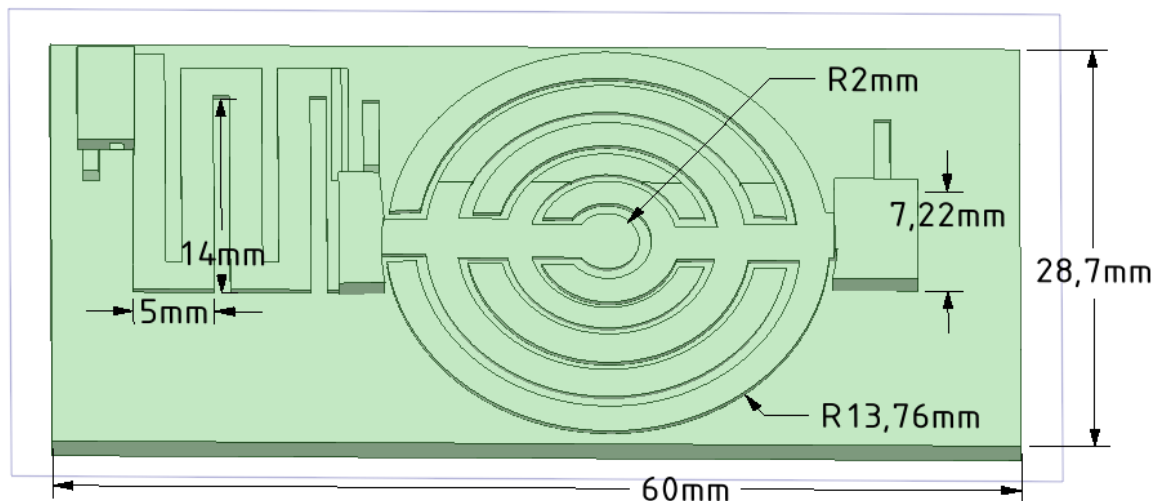
(a) : Obvod napájený z baterií, zapojení bez banánků bez přiloženého prstu

(b) : Obvod napájený z baterií, zapojení bez banánků s přiloženým prstem

Obrázek 3.22: Zapojení bez banánků s napájením ze tří baterií

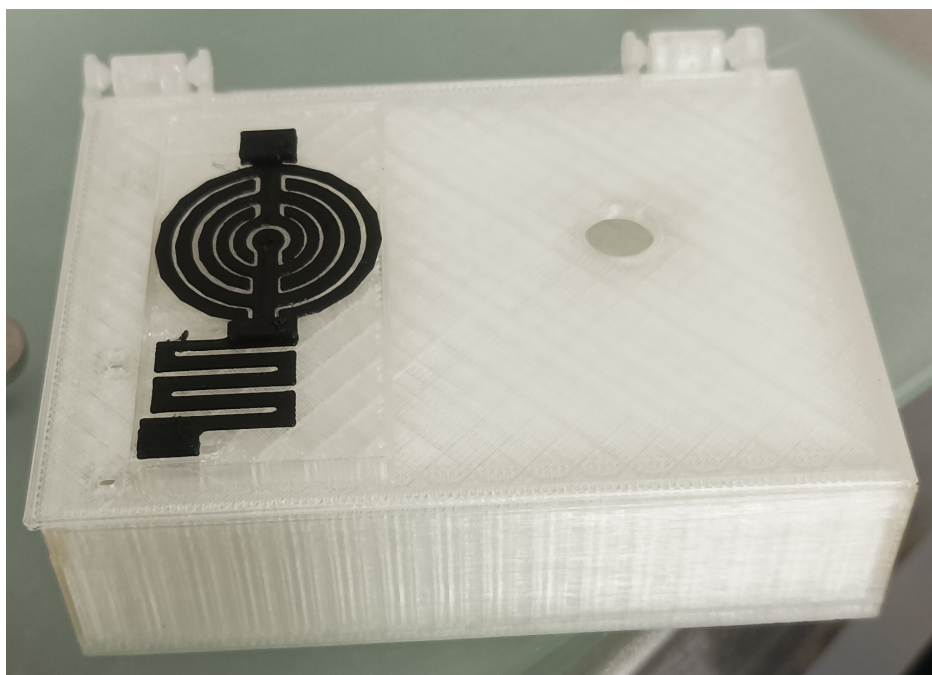


Obrázek 3.23: Tlačítko se zastrčenými vodiči

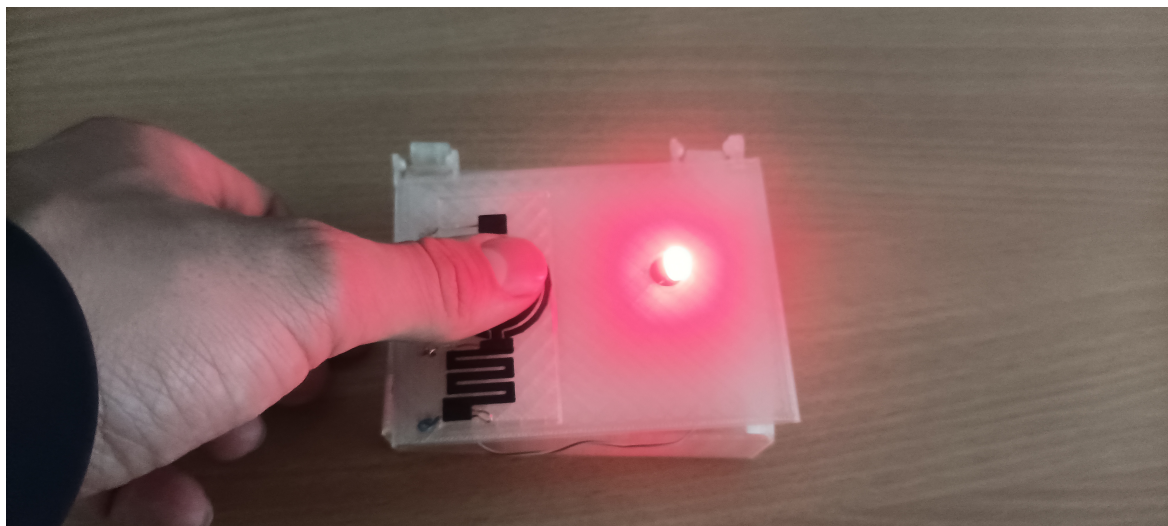


Obrázek 3.24: Model tlačítka

Když jsem vyzkoušel tento design v praxi a vše fungovalo dobře, tak jsem vytvořil krabičku z PLA, do které jsem vložil baterie a desku plošného spoje. Na víčko krabičky jsem vytiskl součástku, která je prakticky stejná jako v předchozím případě. Do víčka krabičky jsem vytvořil 3 díry pro protažení drátů a jednu pro LED. Tato krabička je na Obrázku 3.25. Poté jsem vše zapojil uvnitř krabičky a při přiložení prstu na tlačítko se rozsvítí LED, jako na Obrázku 3.26. Toto je finální produkt mého snažení při zkoumání aplikace vodivého filamentu jako odporového senzoru dotyku.



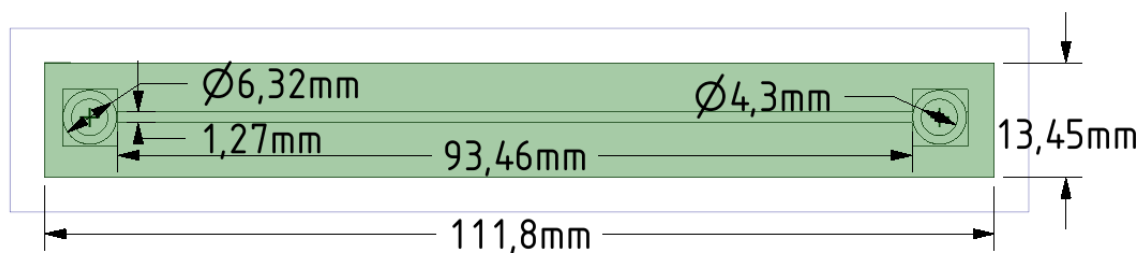
Obrázek 3.25: Krabička na desku plošného spoje a baterie



Obrázek 3.26: Demonstrace funkce krabičky pomocí svítící LED při přiložení prstu na tlačítko

3.12 Tenzometr jako aplikace vodivých filamentů ve 3D tisku

Jako další aplikaci jsem zvolil tenzometr. Tenzometr je elektronická součástka, která při deformaci změjí svůj odpor. Tuto součástku jsem vyrobil pomocí 3D tisku jako předešlé vzorky. Tenzometr jsem navrhl tak, aby součástka vytištěná na 3D tiskárně měla hodnotu elektrického odporu blízkou 100 k Ω . Nákres prvního návrhu je na následujícím Obrázku 3.27 a vyfocený je na Obrázku 3.28.

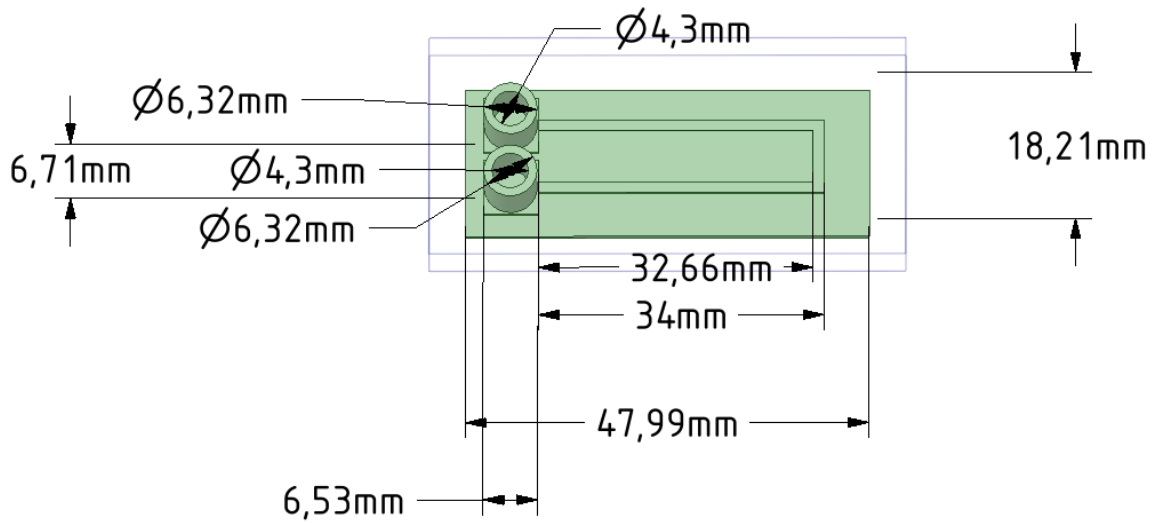


Obrázek 3.27: 3D model jednoduchého tenzometru



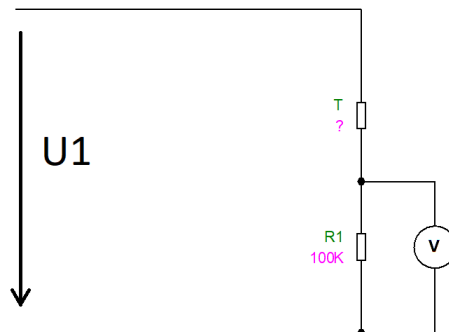
Obrázek 3.28: Fotografie tenzometru vyrobeného technologií 3D tisku

Toto byl 1. návrh tenzometru, který jsem použil pro ověření funkce této součástky. Poté jsem přešel k lépe implementovatelnému designu součástky, který má kontakty u sebe tak, aby mohl být lépe zapojen a je tvaru písmene U. Model tohoto tenzometru je na Obrázku 3.29.



Obrázek 3.29: Model druhého designu tenzometru

Pro určení odporu v reálném čase jsem použil přípravek Arduino UNO, který zde plní funkci zdroje napětí a voltmetru. Voltmetr budeme potřebovat pro určení odporu tenzometru v reálném čase při změně jeho geometrie. Zapojení obvodu realizujeme pomocí následujícího schématu na Obrázku 3.30.



Obrázek 3.30: Schéma zapojení pro tenzometr

Voltmetr měří napětí na známém odporu $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$. Protože známe vstupní napětí $U_1 = 5\text{V}$, pak můžeme určit proměnnou hodnotu odporu tenzometru T . Určení neznámé hodnoty odporu T provedeme pomocí následujících rovnic pro napěťový dělič zobrazený na předchozím Obrázku 3.30.

$$U = U_1 \cdot \frac{R_1}{R_1 + T} \quad (3.6)$$

$$T = R_1 \cdot \left(\frac{U_1}{U} - 1 \right) \quad (3.7)$$

Pomocí předchozí rovnice dokážeme vypočítat neznámou hodnotu tenzometru T , protože napětí U , které je na tenzometru změříme pomocí desky Arduino. Vzhledem k tomu, že měříme napětí U přímo na desce Arduino, můžeme s ní dále pracovat a přímo implementovat kód, díky kterému můžeme jednou za sekundu vypočítat a zobrazit hodnotu odporu tenzometru. Program na výpočet odporu běžící na desce Arduino je vyobrazen na Obrázku 3.31.

```
int analogPin = 0;
int raw = 0;
int Vin = 5;
int Time = 0;
float Vout = 0;
float R1 = 100000;
float R2 = 0;
float buffer = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

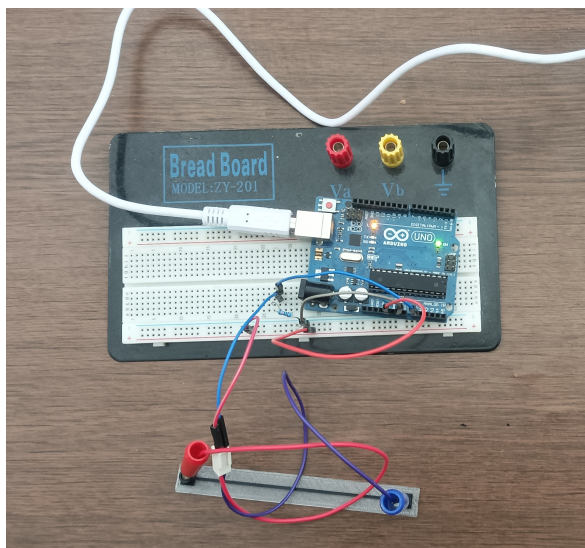
void loop() {
  raw = analogRead(analogPin);
  if(raw) {
    buffer = raw * Vin;
    Vout = (buffer)/1024.0;
    buffer = (Vin/Vout) - 1;
    R2= R1 * buffer;
    Serial.print("R2: \t");

    Serial.println(R2);

    delay(1000);
  }
}
```

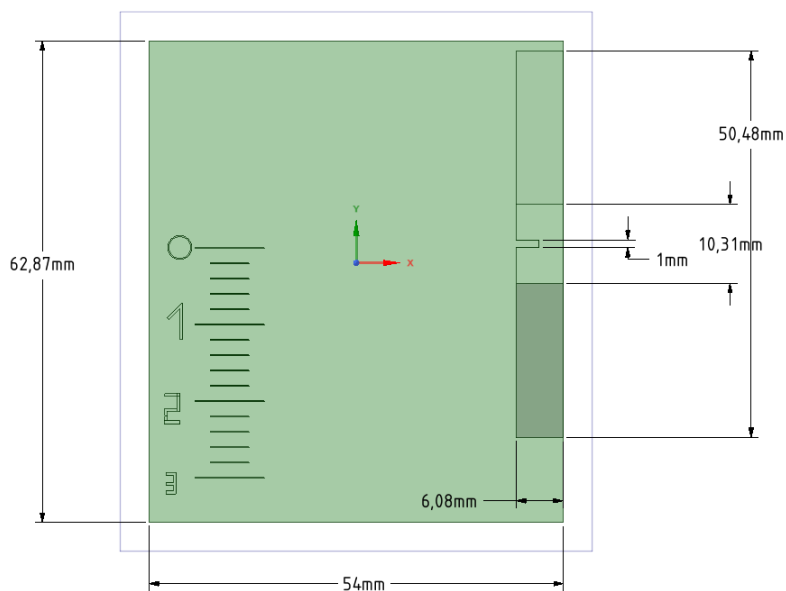
Obrázek 3.31: Program, který běží na Arduino a vypisuje na obrazovku hodnoty odporu

Zapojení obvodu pro měření odporu tenzometru je na Obrázku 3.32.



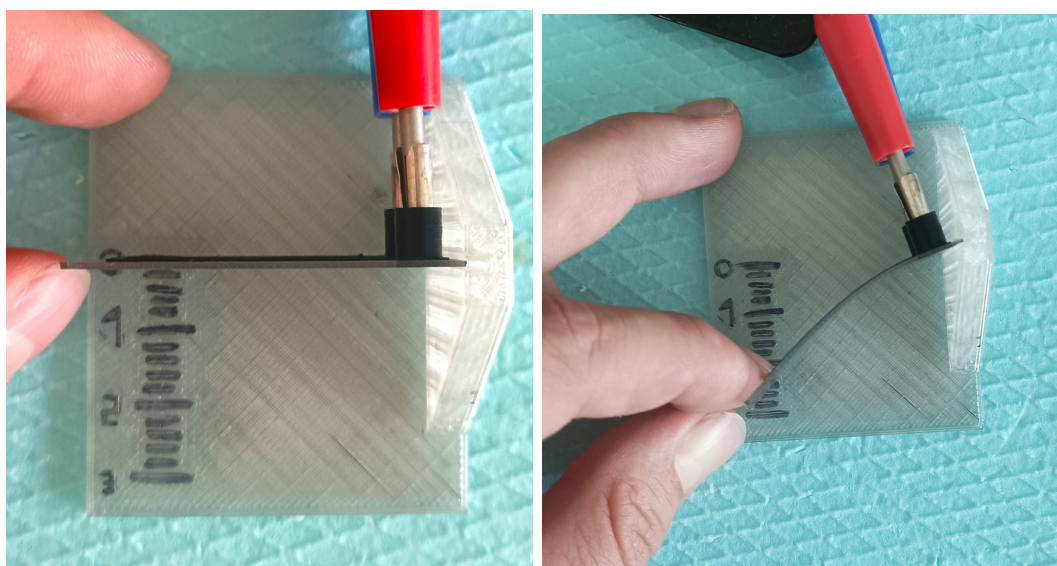
Obrázek 3.32: Obrázek zapojení tenzometru se známým odporem $100\text{ k}\Omega$ a Arduinem

Pro snadnější měření jsem nejdříve navrhl přípravek pro měření odporu při deformaci tenzometru ohybem. Na tomto přípravku se nachází stupnice, která je odstupňovaná po dvou milimetrech a dlouhá 3 cm. Na přípravku je také výstupek s mezerou širokou 1 mm pro zasazení tenzometru. Pomocí stupnice budu určovat míru ohnutí a při ohnutí sledovat změnu odporu pomocí Arduino. 3D modelu tohoto přípravku je na Obrázku 3.33.



Obrázek 3.33: Model přípravku pro určení ohybu ohybu

Na Obrázku 3.34a je vidět měření odporu tenzometru při ohýbání na vyrobeném přípravku.

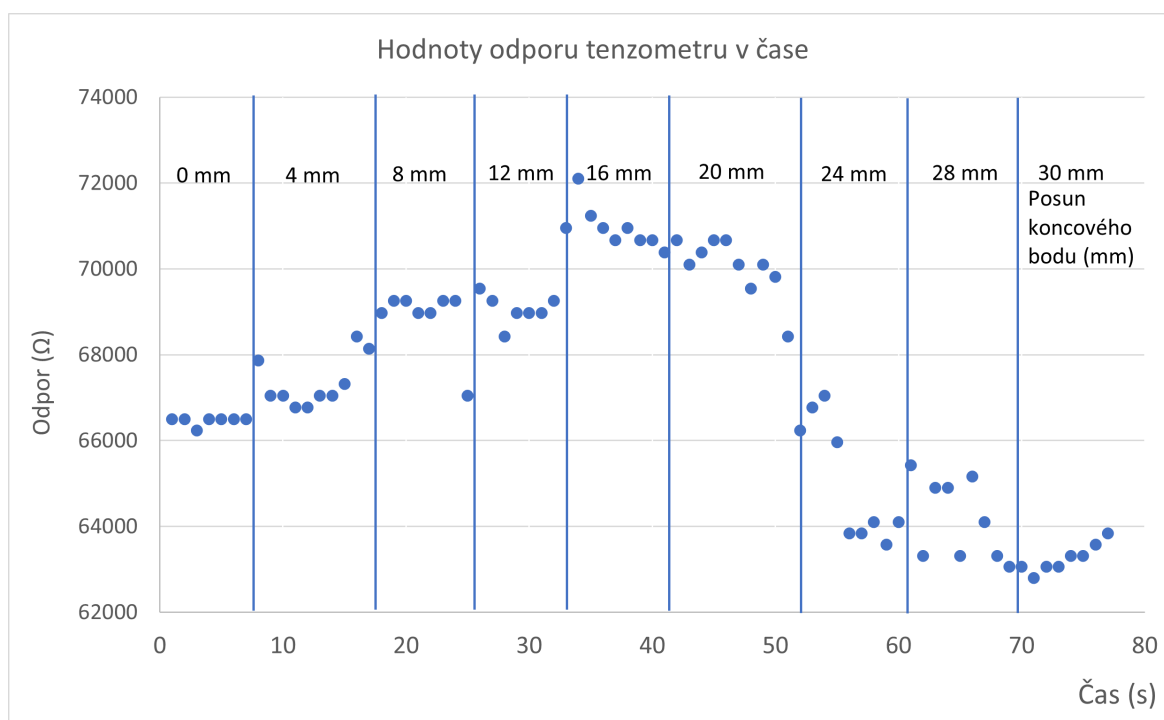


(a) : Tenzometr ve výchozí poloze

(b) : Tenzometr v ohnuté poloze

Obrázek 3.34: Obrázky měření odporu tenzometru

Odpor tenzometru budu měřit při posunu konce tenzometru po stupnici. Při tomto posunu dojde k fyzické deformaci vodivé cesty natištěné na podložce tenzometru. Hodnoty naměřené pomocí desky Arduino jsem převedl do CSV a poté vynesl do grafu na Obrázku 3.35. Na tomto grafu můžeme vidět odpor měnící se v závislosti na poloze koncového bodu tenzometru. Odpor se při určitém ohnutí začne snižovat. To může být způsobeno zvýšenou koncentrací vodivých částic v povrchových vrstvách filamentu a snížení jejich odporu.

**Obrázek 3.35:** Graf hodnot odporu tenzometru naměřených při měření pomocí Arduino

3.13 Zhodnocení praktické části

V první části měření, tedy charakterizaci filamentů z hlediska objemové a povrchové rezistivity byla u vzorků z čistého PLA naměřena průměrná objemová rezistivita $2,83 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$, což je hodnota odpovídající materiálu PLA a průměrná povrchová rezistivita $7,57 \cdot 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$. U vodivých filamentů byla naměřena hodnota o několik řádů menší, čímž jsme ověřili předpoklady pro měření. Průměrná hodnota objemové rezistivity vzorků vytvořených z vodivého filamentu od firmy Prusa Polymers je $551,63 \Omega \cdot \text{m}$ a průměrná hodnota povrchové rezistivity těchto vzorků 4940Ω . Průměrná hodnota objemové rezistivity vzorků vytvořených z vodivého filamentu od firmy Proto-pasta $689,92 \Omega \cdot \text{m}$ a průměrná hodnota povrchové rezistivity těchto vzorků $2960,5 \Omega$. Vidíme tedy, že oba dva vodivé filamenty jsou mezi sebou srovnatelné z hlediska jejich elektrických rezistivit ve svislém směru. Ve směru rovnoběžném s pohybem tiskové hlavy je rezistivita nižší. To je pravděpodobně způsobeno tím, že je zde materiál kompaktní a nenachází se zde přechody mezi jednotlivými vrstvami tisknutého filamentu. Tato rezistivita byla pro filament vyrobený firmou Prusa Polymers $2,94 \Omega \cdot \text{m}$ a pro filament vyrobený firmou Proto-pasta $0,59 \Omega \cdot \text{m}$.

V další části jsem se zabýval ověřením možnosti využití vodivých filamentů pro výrobu odporového snímače dotyku. Tuto možnost jsem ověřil pomocí snímání proudu procházejícího odporovým senzorem dotyku při přiložení jednotlivých prstů. Proudů které jsem naměřil, byly v závislosti na napájecím napětí od desítek mikroampér do stovek mikroampér. U naměřených proudů jsem pozoroval rozdíly mezi jednotlivými součástkami danými různým materiálem, nebo různou přesností tisku. Pomocí odporu zařazeného v sérii s tlačítkem vytisknutého ze stejného materiálu jako daný senzor, kterým protékal proud jsem vytvořil napětí, které dokázalo otevřít MOSFET. Otevřením MOSFETu se rozsvítí LED. To nám ukáže, jestli senzor funguje. Vzhledem k tomu, že 3D tisk patří mezi aditivní způsoby výroby, mohl by být využit multiflamentový tisk. Pomocí této technologie by mohl být senzor vytisknut jako součást těla 3D objektu. Bez využití multiflamentového tisku tohoto nedosáhli.

Jako další aplikaci vodivých filamentů jsem zvolil konstrukci tenzometru. Tenzometr jsem zkonstruoval jako vodivou cestu natisknutou na nevodivé podložce vytisknuté ze stejného materiálu jako je matrice vodivého filamentu. U tenzometru jsem zkoumal odpor v závislosti na prohnutí této součástky. Tento odpor jsem určoval za pomoci desky Arduino Uno, odporu $100 \text{ k}\Omega$ a nepájivého pole. Tenzometr byl zkonstruován tak, aby hodnota odporu vodivé cesty byla blízká $100 \text{ k}\Omega$. Měření změny odporu tenzometru jsem provedl pomocí přípravku s stupnicí pro měření průhybu s rozestupem 2 mm . U tohoto tenzometru ovšem dochází během několika týdnů k degradaci materiálu a jeho zkřehnutí při velkých průhybech, proto bych tento materiál (PLA) doporučil pouze jako testovací přípravek, nikoliv jako koncový produkt. Tento problém by mohl vyřešit filament využívající matrice tvořené ohebným plastem jako je například filament tvořený matricí z TPU (termoplastický polyuretan) a grafenovým plnidlem.

Do zhodnocení praktické části bych rád zahrnul zkušenosti s tiskem vodivých filamentů. Vzhledem k tomu, že se jedná o kompozitní filamenty, ve kterých se nacházejí malé částice tak trpí tisknutelnost materiálu. Problém byl jak s filamentem od firmy Proto-pasta, tak s filamentem od firmy Prusa Polymers. Filament od firmy Proto-pasta se nepodařilo vytisknout tryskou s průměrem výstupního otvoru $0,4 \text{ mm}$ kvůli ucpání výstupního odporu trysky. Tento problém se mi nepodařilo vyřešit pomocí zvýšení teploty při tisku. Filament jsem tedy tiskl pomocí trysky s průměrem výstupního otvoru $0,8 \text{ mm}$. Tento problém by byl pravděpodobně

vyřešen využitím menších částic filleru. Filament firmy Prusa Polymers bylo možné vytisknout tryskou s průměrem výstupního otvoru 0,4 mm. Toto sice velice pomůže s vyšším rozlišením tisku, ale tento filament je velice křehký. Kvůli této křehkosti hrozí zlomení filamentu v extruderu i mimo něj při tisku, zvláště když tiskárna vykonává rychlé pohyby při tisku. Tento problém by mohl být vyřešen zvolením jiného termoplastu jako matrice, nebo přidáním dalších složek do filamentu, které přidají filamentu potřebnou pružnost. Největší výhodou vidím v samotné technologii 3D tisku, kdy můžeme modifikovat součástky vytvořené z vodivých filamentů v CAD softwaru a po této modifikaci je můžeme v krátkém časovém sledu vyrobit a otestovat. Také můžeme zakomponovat součástku přímo do těla součástky.

V dalším zkoumání vodivých filamentů je třeba se zaměřit především na rozdíly v degradaci kompozitního filamentu oproti filamentu tvořeném pouze čistým PLA a také na problematiku dlouhodobého kontaktování vodivých filamentů do obvodů, které používají klasické materiály.

Kapitola 4

Ekonomická část

4.1 Úvod

Obsahem této ekonomické části je modelový příklad firmy, která se rozhoduje mezi pořízením vlastní kusové výroby dotykových tlačítek využívající 3D tisk elektricky vodivých filamentů a nákupem podobných komerčně dostupných součástek vyrobených klasickými metodami výroby plošných spojů. Tato ekonomická část se tedy bude zaměřovat především na náklady spojené s investicí do vlastní výroby a problémy spojené s realizací této investice a následující porovnání investice pomocí NPV. Porovnání investic při různých počtech vyrobených kusů a cen kupované součástky. Dále je třeba uvést že uvažovaná firma není plátce DPH, tedy všechny uvedené ceny jsou bez DPH.

4.2 Výrobní zařízení a jeho životnost

Jako výrobní zařízení, které modelová firma uvažuje do porovnání jsem zvolil 3D tiskárnu od výrobce Prusa Research Original Prusa i3 MK3S+, která je již několikátou verzí 3D tiskáren produkovaných touto firmou. Životnost tiskárny jako celku výrobce udává na 800 tiskových hodin, což je průměrná životnost trysky. Po jejím vyměnění by tiskárna měla být bez problému dále funkční. Cena této tiskárny je 16 520,66 Kč za tiskárnu jako stavebnici a 22 305,79 Kč jako hotový produkt. Tiskárnu, kterou, pořídím zvolím ve formě stavebnice, protože její sestavení je středně složitý problém a nemělo by zabrat více než několik hodin a její cena je o 5785 korun nižší. Celková doba porovnání investice je 5 let.

4.3 Náklady na provoz a výrobu

Do nákladů na provoz a výrobu budu počítat následující položky:

- Náklady na zaměstnance
- Náklady na materiál
- Náklady na elektřinu

4.3.1 Náklady na zaměstnance

3D tiskárna je nepřilíš nenáročná na obsluhu. Proto by byl vybrán jeden zaměstnanec, který by byl zaškolen a dokáže obsluhovat a opravit námi pořízenou 3D tiskárnu. Tento zaměstnanec také bude zaškolen v práci s CAD softwarem. Vzhledem k nenáročnosti práce jak po fyzické stránce, tak po stránce odborných znalostí operátora jsem určil odměnu za jednu vyrobenou součástku na 7 korun za součástku. Tuto hodnotu jsem zvolil, protože čas vynaložený na součástku se pohybuje od jedné do dvou minut, i když je obsluha i málo zkušená.

$$\text{Mzdové náklady} = 7 \text{ Kč/součástku} \quad (4.1)$$

4.3.2 Náklady na materiál

Součástka je vyrobena z PLA. K výrobě byly použity dva filamenty. Prvním z nich byl nevodivý filament Prusament PLA jehož cena za jeden kg je 578 Kč. Druhým z filamentů byl vodivý filament od značky Proto-Pasta, kde 0,5 kg tohoto filamentu stojí 1314 Kč. Pro výrobu jedné součástky je třeba 0,55 cm³ vodivého filamentu a 1,7 cm³ nevodivého. Hustota čistého PLA je shodná s hustotou vodivého PLA 1,24 g/cm³[36][37]. S těmito hodnotami vypočtu kolik gramů jednotlivých filamentů potřebuji k a vypočítám cenu filamentu spotřebovaného na jednu součástku, protože vím cenu za 1 kg, respektive za 0,5 kg. Hmotnost vodivého a nevodivého materiálu spočtu jako

$$m_{\text{vodiveho}} = \rho_m \cdot V = 1,15 \cdot 0,55 = 0,63 \text{ g} \quad (4.2)$$

$$m_{\text{nevodiveho}} = \rho_m \cdot V = 1,24 \cdot 1,7 = 2,11 \text{ g} \quad (4.3)$$

$$\cdot \quad (4.4)$$

Cenu za gram jednotlivých filamentů $p_{\text{nevodiveho}} = 2,62 \text{ Kč/g}$ vodivého filamentu a $p_{\text{vodiveho}} = 0,6 \text{ Kč/g}$ nevodivého filamentu. Náklady na výrobu jedné součástky jsou tedy

$$p_{\text{materialu}} = m_{\text{vodiveho}} \cdot p_{\text{vodiveho}} + m_{\text{nevodiveho}} \cdot p_{\text{nevodiveho}} = \quad (4.5)$$

$$= 0,63 \cdot 2,62 + 2,11 \cdot 0,6 = 1,66 + 1,26 = 2,92 \text{ Kč/ks.} \quad (4.6)$$

4.3.3 Náklady na elektřinu

Náklady na elektřinu stanovím na jednu vytvořenou součástku změřením elektrické energie spotřebované 3D tiskárnou při jejím tisku multimetrem Lini-T UT71E. Cenu za energii jsem zjistil z ceníku PRE pro rok 2022 při lokalizaci výrobních prostor v Praze a využití tarifu pro střední využití energie C02d. Cena $p_{el} = 5 \text{ 835,59 Kč/MWh}$ [42].

Změřená elektrická energie spotřebovaná na výrobu jedné součástky $E_{\text{souč}} = 40 \text{ Wh/ks.}$ Náklady na energii potřebnou pro výrobu jedné součástky v korunách jsou

$$p_{el} = E_{\text{souč}} \cdot p_{el} = 40 \cdot \frac{5 \text{ 835,59}}{10^6} = 0,23 \text{ Kč/ks.} \quad (4.7)$$

■ 4.3.4 Náklady na opravy výrobního zařízení

Náklady na opravy stoje jsou dané délkou používání stroje. Pokud stanovím dobu tisku jedné součástky na 15 minut, dobu životnosti trysky na 800 tiskových hodin (za tuto dobu tedy vyrobím 3200 součástek) a dobu životnosti PTFE trubičky na 100 tiskových hodin (za tuto dobu tedy vyrobím 400 součástek), tak mohu orientačně určit náklady na opravy. PTFE trubičku lze zakoupit na stránkách výrobce 3D tiskárny za 20 Kč/ks. Náklady spojené s výměnou PTFE trubičky na jednu součástku jsou

$$p_{PTFE} = \frac{15,7}{400} = 0,04 \text{ Kč/součástku.} \quad (4.8)$$

Vzhledem k tomu, že k tisku používáme kompozitní materiál s přidávanými částicemi, které mohou zapříčinit vyšší opotřebení trysky, zvolím trysku z odolnějšího materiálu, která je ovšem dražší. Cena jedné této trysky bez DPH je 355.37 Kč. Náklady spojené s výměnou trysky na jednu součástku jsou

$$p_{tryska} = \frac{355.37}{3\,200} = 0,111 \text{ Kč/součástku.} \quad (4.9)$$

Dále připočtu do nákladů na opravy výrobního zařízení položku, která bude zahrnovat neočekávané výdaje na opravy. Pokud budu počítat, že tento neočekávaný výdaj proběhne průměrně jednou za 1 000 hodin tisku a jeho výše bude 1 000 Kč. Tento náklad poté mohu zahrnout do nákladů na opravy vztažené na jednu součástku. Náklady spojené s neočekávanými závadami jsou

$$p_{neoč} = \frac{1\,000}{4\,000} = 0,25 \text{ Kč/součástku.} \quad (4.10)$$

Celkové náklady spojené s opravami výrobního zařízení jsou

$$p_{opravy} = p_{PTFE} + p_{tryska} + p_{neoč} = 0,04 + 0,111 + 0,25 = 0,401 \text{ Kč/součástku.} \quad (4.11)$$

■ 4.3.5 Měrné variabilní náklady

Měrné variabilní náklady jsou v našem případě náklady spojené s výrobou jedné součástky. Jedná se tedy o součet všech variabilních nákladů. V mém případě se jedná o součet následujících nákladů:

- Náklady na materiál
- Nákladů na elektrickou energii
- Náklady na opravy
- Mzdové náklady

Měrné variabilní náklady jsou tedy

$$p_c = p_{materialu} + p_{el} + p_{opravy} + p_{mzdy} = 2,92 + 0,23 + 0,401 + 7 = 10,551 \text{ Kč/součástku.} \quad (4.12)$$

4.4 Zhodnocení investice

Zhodnocení investice do vlastní výroby provedu pomocí výpočtu NPV a porovnání s NPV při druhém scénáři nákupu již hotových součástek. Diskont pro výpočet NPV jsem zvolil na 10% z důvodu právě probíhající energetické krize, která spolu s pandemií onemocnění COVID-19 a právě probíhající válkou na Ukrajině zapříčinila růst meziroční inflace, která v dubnu roku 2022 činila 14,1%[43]. Dále budu počítat s průměrným ročním nárůstem nákladů na výrobu součástky ve výši 3% a průměrným ročním nárůstem nákupní ceny součástky 2%.

4.4.1 Výpočet NPV

NPV je ekonomické kritérium investic, pomocí kterého hodnotíme investice. NPV je kritérium, které bere v potaz časovou hodnotu peněz. NPV se vypočte jako suma diskontovaných cash flow, tedy jako

$$NPV = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} = \sum_{i=0}^n DCF_i, \quad (4.13)$$

kde CF_i je cash flow v roce i , r je diskontní míra a n doba hodnocení za které počítám NPV. Pro výpočet NPV tedy musím znát CF a diskontní míru pro jednotlivé investice. DCF_i je diskontované cash flow v roce i .

4.4.2 Výpočet NPV pro různé počty vyráběných součástek

V této části provedu výpočet NPV pro různé počty vyráběných součástek ročně. Tyto varianty jsou:

1. 500 součástek ročně
2. 1000 součástek ročně
3. 1500 součástek ročně

Dále přiložím citlivostní analýzu, která se bude zabývat rozdílem NPV mezi variantou nákupu součástek a vlastní výrobou. Tato citlivostní analýza zkoumala dopad změny nákupní ceny součástek, změny počtu výroby, změny diskontu, změny průměrného ročního nárůstu výrobních nákladů a změny průměrného ročního nárůstu ceny součástky.

4.4.2.1 Výpočet NPV pro 500 součástek za rok

Pro výrobu 500 součástek ročně potřebujeme jednu 3D tiskárnu. Investice do výrobní kapacity je tedy 16 521 Kč. Náklady na výrobu jedné součástky jsou 10,7 Kč. Roční náklady při výrobě pěti set součástek ročně jsou 5 354 Kč. V následujícím výpočtu NPV je uvažován tří procentní průměrný roční nárůst nákladů na výrobu.

Tabulka 4.1: Výpočet hotovostních toků při výrobě 500 součástek pro jednotlivé roky

Rok	0	1	2	3	4	5
Investice	16 521	0	0	0	0	0
Náklady na výrobu	0	5 354	5 514	5 680	5 850	6 026
CF	16 521	5 354	5 514	5 680	5 850	6 026
Kumulované CF	16 521	21 875	27 389	33 069	38 919	44 945
DCF	16 521	4 696	4 243	3 834	3 464	3 130
Kumulované DCF	16 521	21 217	25 460	29 294	32 758	35 887

Čistá současná hodnota při výrobě 500 součástek za rok je

$$NPV_{výroba\ 500} = -35\ 887\ \text{Kč.} \quad (4.14)$$

RCF neboli roční ekvivalentní peněžní tok je

$$RCF_{výroba\ 500} = -9\ 467\ \text{Kč.} \quad (4.15)$$

Náklady na výrobu jednoho kusu součástky při výrobě 500 součástek ročně jsou

$$\text{Náklady na kus} = 18,93\ \text{Kč.} \quad (4.16)$$

Výpočet NPV pro nákup 500 ročně při nákupní ceně 20 Kč za kus při uvažování průměrného dvouprocentního ročního nárůstu nákupní ceny součástky je v následující tabulce.

Rok	0	1	2	3	4	5
Investice	0	0	0	0	0	0
Náklady na nákup	0	10000	10200	10404	10612	10824
CF	0	10000	10200	10404	10612	10824
Kumulované CF	0	10000	20200	30604	41216	52040
DCF	0	9091	8430	7817	7248	6721
Kumulované DCF	0	9091	17521	25337	32586	39307

Tabulka 4.2: Výpočet hotovostních toků pro cenu součástky 20 Kč

Čistá současná hodnota při nákupu 500 součástek je

$$NPV_{nákup\ 500} = -39\ 307\ \text{Kč.} \quad (4.17)$$

RCF neboli roční ekvivalentní peněžní tok je

$$RCF_{nákup\ 500} = -10\ 369\ \text{Kč.} \quad (4.18)$$

Rozdíl NPV a RCF pro nákup a výrobu je:

$$NPV_{rozdl} = -35\,887 - (-39\,307) = -3\,419 \text{ Kč} \quad (4.19)$$

$$RCF_{rozdl} = -9\,467 - (10\,369) = -902 \text{ Kč.} \quad (4.20)$$

Vidíme tedy, že při nákupu součástek za 20 korun za kus můžeme říct, že se nám za těchto podmínek, diskontu, cenám energie, vstupních surovin, ohodnocení pracovníků a nárůstu nákladů na výrobu a nárůstu nákupní ceny, vyplatí investovat do vlastní výroby.

4.4.2.2 Výpočet NPV pro 1000 součástek za rok

Pro výrobu 1000 součástek za rok budeme potřebovat jednu 3D tiskárnu. Investice do výrobní kapacity je tedy 16 521 Kč. Roční náklady na výrobu 1000 součástek jsou při nákladech na výrobu jedné součástky 10,7 Kč. Roční náklady na výrobu jsou 10 708 Kč. V následujícím výpočtu NPV je uvažován tří procentní průměrný roční nárůst nákladů na výrobu.

Tabulka 4.3: Výpočet hotovostních toků pro výrobu součástek v jednotlivých letech

Rok	0	1	2	3	4	5
Investice	16 521	0	0	0	0	0
Náklady na výrobu	0	10 708	11 029	11 360	11 701	12 052
CF	16 521	10 708	11 029	11 360	11 701	12 052
Kumulované CF	16 521	27 228	38 257	49 617	61 318	73 369
DCF	16 521	9 393	8 486	7 668	6 928	6 259
Kumulované DCF	16 521	25 913	34 400	42 067	48 995	55 254

Čistá současná hodnota při výrobě 1000 součástek za rok je

$$NPV_{výroba\ 1000} = -55\,254 \text{ Kč.} \quad (4.21)$$

RCF neboli roční ekvivalentní peněžní tok je

$$RCF_{výroba\ 1000} = -14\,576 \text{ Kč.} \quad (4.22)$$

Náklady na výrobu jednoho kusu součástky při výrobě 1000 součástek ročně jsou

$$\text{Náklady na kus} = 14,58 \text{ Kč.} \quad (4.23)$$

Výpočet čisté současné hodnoty při nákupu 1000 součástek ročně za cenu 20 Kč je v následující tabulce. Roční náklady na nákup součástek jsou 20 000 Kč. Uvažovaný průměrný nárůst nákupní ceny součástky jsou 2%.

Tabulka 4.4: Výpočet jednotlivých hotovostních toků pro nákup součástek

Rok	0	1	2	3	4	5
Investice	0	0	0	0	0	0
Náklady na nákup	0	20000	20400	20808	21224	21649
CF	0	20000	20400	20808	21224	21649
Kumulované CF	0	20000	40400	61208	82432	104081
DCF	0	18182	16860	15633	14496	13442
Kumulované DCF	0	18182	35041	50675	65171	78613

Čistá současná hodnota při nákupu 1000 ročně součástek je

$$NPV_{\text{nákup } 1000} = -78\,613 \text{ Kč.} \quad (4.24)$$

RCF neboli roční ekvivalentní peněžní tok je

$$RCF_{\text{nákup } 1000} = -20\,738 \text{ Kč.} \quad (4.25)$$

Rozdíl čistých současných hodnot je

$$NPV_{\text{rozdíl}} = -55\,254 - (-78\,613) = 23\,359 \text{ Kč.} \quad (4.26)$$

Rozdíl ročních ekvivalentních peněžních toků je:

$$RCF_{\text{rozdíl}} = -14\,576 - (-20\,738) = 6\,126 \text{ Kč.} \quad (4.27)$$

Vidíme tedy, že náklady na nákup součástky jsou vyšší pro nákup součástky, tedy při těchto vstupních hodnotách nákupní ceny, výrobních nákladů, nárůstu výrobních nákladů, nárůstu nákupní ceny součástky a diskontu. Pro tento případ bych tedy zvolil investici do 3D tiskárny.

4.4.2.3 Výpočet NPV pro 1500 součástek za rok

Pro výrobu 1 500 součástek za měsíc budeme potřebovat stále jednu 3D tiskárnu. Investice do výrobní kapacity je tedy 16 521 Kč. Náklady na výrobu 1500 součástek jsou ročně 16 062 Kč při nákladech na výrobu jedné součástky 10,7 Kč. V následujícím výpočtu NPV je uvažován tří procentní průměrný roční nárůst nákladů na výrobu.

Tabulka 4.5: Výpočet hotovostních toků pro výrobu součástek v jednotlivých letech

Rok	0	1	2	3	4	5
Investice	16 521	0	0	0	0	0
Náklady na výrobu	0	16 062	16 543	17 040	17 551	18 077
CF	16 521	16 062	16 543	17 040	17 551	18 077
Kumulované CF	16 521	32 582	49 126	66 165	83 716	101 794
DCF	16 521	14 089	12 730	11 501	10 392	9 389
Kumulované DCF	16 521	30 610	43 339	54 841	65 232	74 621

NPV pro při výrobě 1500 součástek ročně je

$$NPV_{\text{výroba } 1500} = -74\,621 \text{ Kč.} \quad (4.28)$$

RCF neboli roční ekvivalentní peněžní tok při výrobě 1500 součástek ročně je

$$RCF_{výroba\ 1500} = -19\ 685\ \text{Kč.} \quad (4.29)$$

Náklady na výrobu jednoho kusu součástky při výrobě 1000 součástek ročně jsou

$$\text{Náklady na kus} = 13,12\ \text{Kč.} \quad (4.30)$$

Tabulka 4.6: Výpočet jednotlivých hotovostních toků pro nákup součástek

Rok	0	1	2	3	4	5
Investice	0	0	0	0	0	0
Náklady na nákup	0	30000	30600	31212	31836	32473
CF	0	30000	30600	31212	31836	32473
Kumulované CF	0	30000	60600	91812	123648	156121
DCF	0	27273	25289	23450	21745	20163
Kumulované DCF	0	27273	52562	76012	97757	117920

Čistá současná hodnota při nákupu 1500 součástek při nákupní ceně 20 Kč/ks je

$$NPV_{nákup\ 1500} = -117\ 920\ \text{Kč.} \quad (4.31)$$

RCF neboli roční ekvivalentní peněžní tok při nákupní ceně je

$$RCF_{nákup\ 1500} = -31\ 107\ \text{Kč.} \quad (4.32)$$

Rozdíl čistých současných hodnot je:

$$NPV_{rozdíl} = -74\ 621 - (-117\ 920) = -22\ 535\ \text{Kč} \quad (4.33)$$

Rozdíl ekvivalentních ročních toků je:

$$RCF_{rozdíl} = -19\ 685 - (-31\ 107) = 11\ 422\ \text{Kč.} \quad (4.34)$$

Z porovnání NPV a RCF pro dva scénáře vidíme, že hodnoty pro scénář nákupu součástek jsou zápornější, tedy nižší, a za daných vstupních hodnot veličin se vyplatí investovat do 3D tiskárny.

4.4.3 Citlivostní analýza

V této citlivostní analýze jsem provedl porovnání jednotlivých možností pro posuzovanou investici. V jednotlivých zkoumáních jsem vždy určil jeden proměnlivý faktor a změnu rozdílu NPV jsem vynesl do grafů nebo do tabulky. Zbylé vstupy jsem určil jako:

- Náklady na výrobu jedné součástky 10,71 Kč
- Nákupní cenu jedné součástky 20 Kč
- Diskont 10%

- Počet vyrobených součástek za rok 500
- Průměrný roční nárůst nákladů na výrobu součástek 3%
- Průměrný roční nárůst ceny kupované součástky 2 %

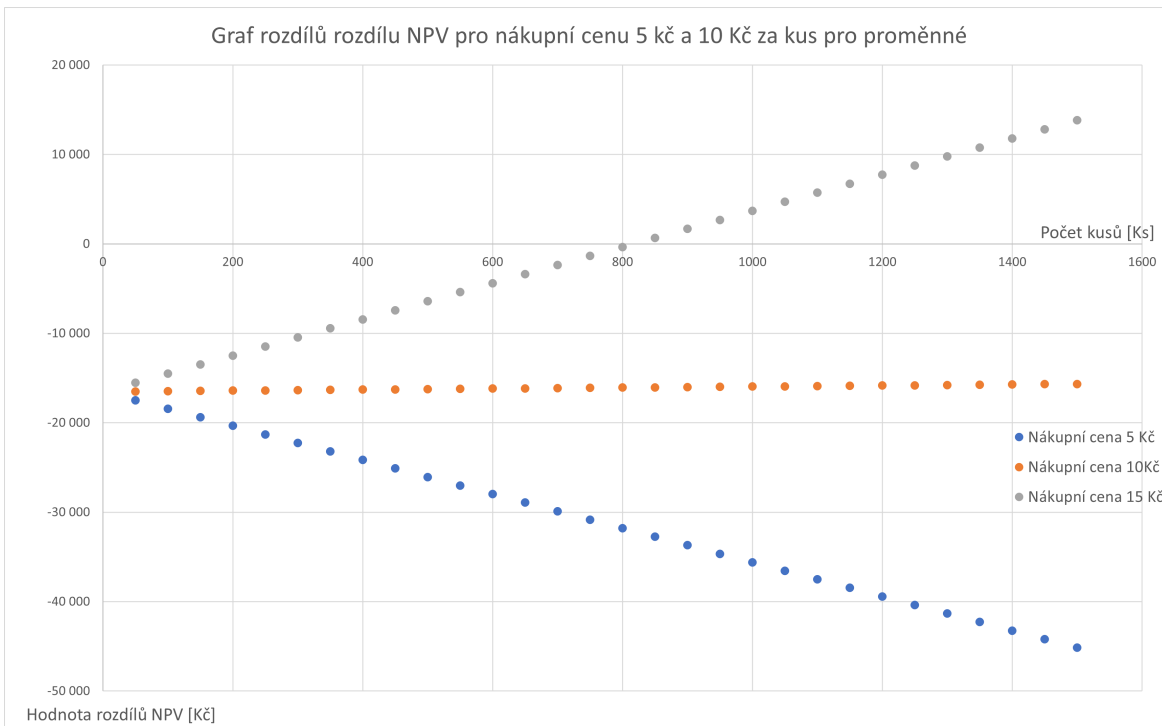
Jako první jsem zkoumal vliv počtu vyrobených součástek součástek (svislá osa) a ceny pořízené součástky. V tabulce 4.7 jsem vynesl výsledky rozdílu NPV pro dva různé scénáře. Těmito vstupy jsou: v 2. řádku je cena jednoho kusu součástky a v prvním sloupci se jedná o počet vyrobených součástek ročně. Ostatní Pokud je rozdíl NPV záporný, pak se investice do 3D tisku nevyplatí a pokud je rozdíl NPV kladný, tak se nám za těchto předpokladů investice vyplatí. Z výsledné tabulky můžeme vidět, že pro nákupní cenu součástky 5 a 10 korun za kus se nevyplatí investice do vlastní výroby pro žádnou z možností. Jednotlivé hodnoty vynesené do grafu pro tyto nákupní ceny jsou na Obrázku 4.1 Pro nákupní cenu součástky 5 korun vidíme, že s rostoucím počtem vyrobených součástek rozdíl čistých současných hodnot klesá, tudíž se tato investice nevyplatí, pokud dokážeme součástku nakoupit takto levně.

$$a_{ij} = NPV_{výroba} - NPV_{nákup} \quad (4.35)$$

Kde buňka a_{ij} představuje rozdíl NPV v případě vlastní výroby součástek a NPV v případě nákupu.

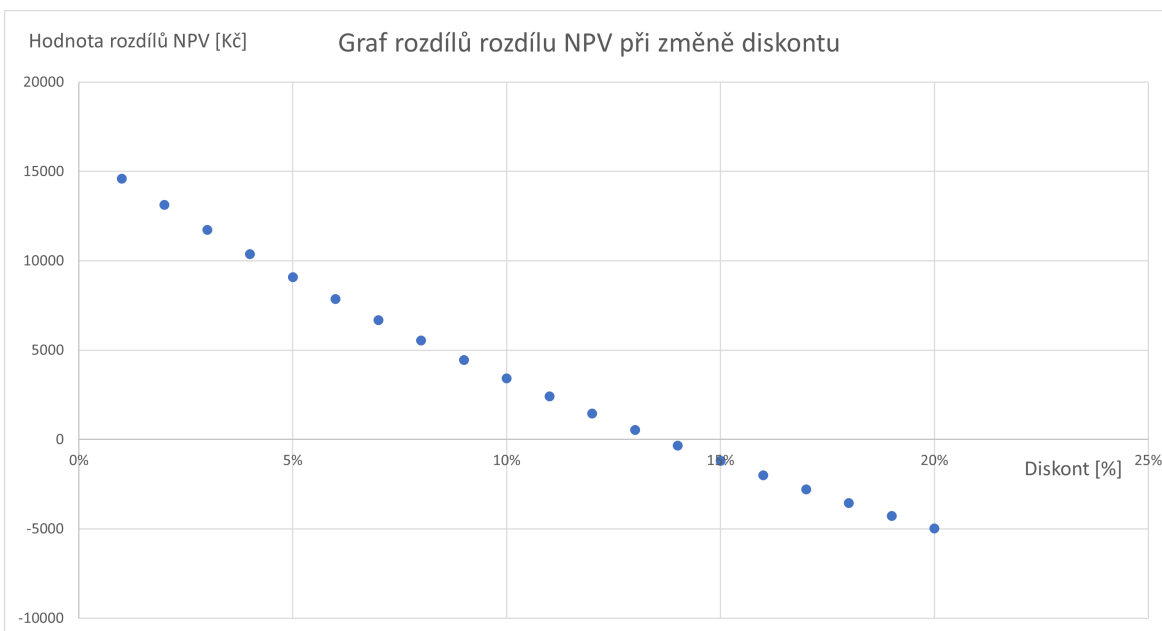
Tabulka 4.7: Tabulka výsledků citlivostní analýzy

Počet	Cena součástky									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
50	-17 475	-16 492	-15 509	-14 527	-13 544	-12 561	-11 579	-10 596	-9 613	-8 631
100	-18 429	-16 463	-14 498	-12 533	-10 567	-8 602	-6 637	-4 671	-2 706	-741
150	-19 383	-16 435	-13 487	-10 539	-7 591	-4 643	-1 695	1 253	4 201	7 149
200	-20 337	-16 406	-12 475	-8 545	-4 614	-683	3 247	7 178	11 109	15 039
250	-21 291	-16 377	-11 464	-6 551	-1 637	3 276	8 189	13 103	18 016	22 929
300	-22 245	-16 349	-10 453	-4 557	1 339	7 235	13 131	19 027	24 923	30 819
350	-23 199	-16 320	-9 441	-2 563	4 316	11 194	18 073	24 952	31 830	38 709
400	-24 153	-16 291	-8 430	-569	7 292	15 154	23 015	30 876	38 738	46 599
450	-25 107	-16 263	-7 419	1 425	10 269	19 113	27 957	36 801	45 645	54 489
500	-26 061	-16 234	-6 408	3 419	13 246	23 072	32 899	42 726	52 552	62 379
550	-27 015	-16 206	-5 396	5 413	16 222	27 032	37 841	48 650	59 460	70 269
600	-27 969	-16 177	-4 385	7 407	19 199	30 991	42 783	54 575	66 367	78 159
650	-28 923	-16 148	-3 374	9 401	22 176	34 950	47 725	60 500	73 274	86 049
700	-29 877	-16 120	-2 362	11 395	25 152	38 910	52 667	66 424	80 182	93 939
750	-30 831	-16 091	-1 351	13 389	28 129	42 869	57 609	72 349	87 089	101 829
800	-31 785	-16 062	-340	15 383	31 106	46 828	62 551	78 274	93 996	109 719
850	-32 739	-16 034	672	17 377	34 082	50 788	67 493	84 198	100 903	117 609
900	-33 693	-16 005	1 683	19 371	37 059	54 747	72 435	90 123	107 811	125 499
950	-34 647	-15 976	2 694	21 365	40 036	58 706	77 377	96 047	114 718	133 389
1000	-35 601	-15 948	3 706	23 359	43 012	62 665	82 319	101 972	121 625	141 279
1050	-36 555	-15 919	4 717	25 353	45 989	66 625	87 261	107 897	128 533	149 169
1100	-37 509	-15 890	5 728	27 347	48 965	70 584	92 203	113 821	135 440	157 059
1150	-38 463	-15 862	6 740	29 341	51 942	74 543	97 145	119 746	142 347	164 949
1200	-39 417	-15 833	7 751	31 335	54 919	78 503	102 087	125 671	149 255	172 839
1250	-40 371	-15 804	8 762	33 329	57 895	82 462	107 029	131 595	156 162	180 728
1300	-41 325	-15 776	9 773	35 323	60 872	86 421	111 971	137 520	163 069	188 618
1350	-42 279	-15 747	10 785	37 317	63 849	90 381	116 913	143 445	169 976	196 508
1400	-43 233	-15 718	11 796	39 311	66 825	94 340	121 855	149 369	176 884	204 398
1450	-44 187	-15 690	12 807	41 305	69 802	98 299	126 797	155 294	183 791	212 288
1500	-45 141	-15 661	13 819	43 299	72 779	102 259	131 739	161 218	190 698	220 178



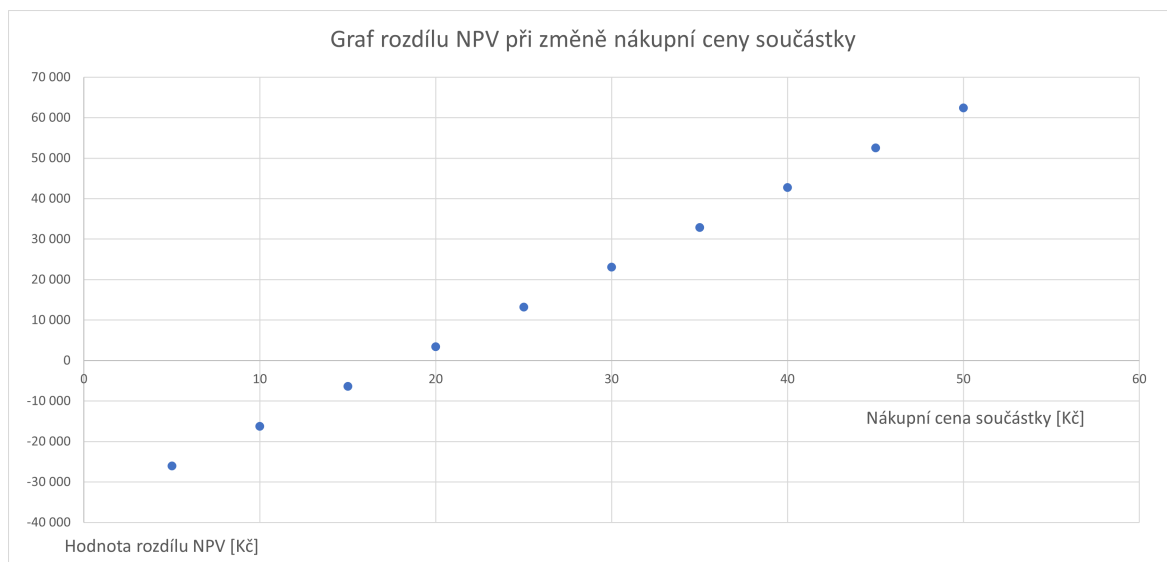
Obrázek 4.1: Graf rozdílů NPV pro nákupní ceny součástky 5, 10 a 15 Kč při změně počtu vyrobených kusů za rok.

Na následujícím grafu na Obrázku 4.2 jsem vynesl změnu rozdílu NPV dvou variant pro různé hodnoty diskontu. Z tohoto grafu vidíme, že při zvýšení diskontu se hodnota rozdílu sníží. Také zde můžeme vidět, že hodnota rozdílu NPV rovna nule je při diskontu rovném 13,61%.



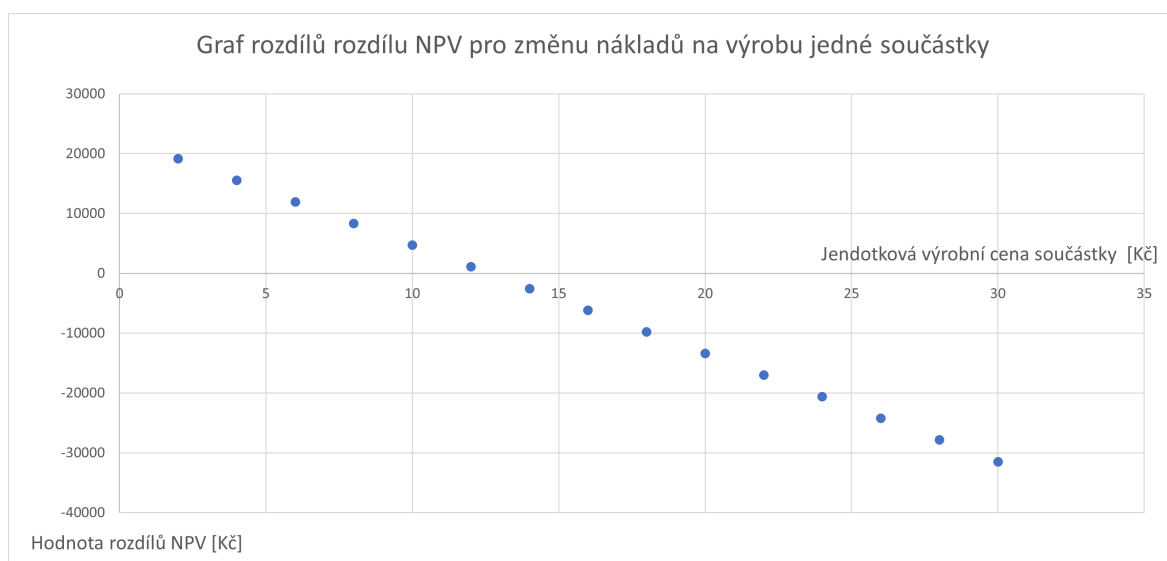
Obrázek 4.2: Graf změny rozdílu NPV při změně diskontu.

V grafu na Obrázku 4.3 vidíme, že při nárůstu nákupní ceny součástky se také zvyšuje rozdíl NPV. Hodnota kdy rozdíl NPV se rovná nule je nákupní cena součástky 18,26 Kč za kus. Z grafu vidíme, že změna rozdílu NPV je strmější než změna, kterou můžeme pozorovat na Obrázku 4.4. Z tohoto můžeme vyvodit, že změna rozdílu NPV je větší při změně nákupní ceny pořízené součástky.



Obrázek 4.3: Graf změny rozdílu NPV při změně nákupní ceny součástky.

Jako poslední jsem sledoval vliv změny nákladů na výrobu kusu jedné součástky na rozdíl NPV. Vývoj změny NVP při změně nákladů na výrobu jedné součástky je na Obrázku 4.4. Pro dané vstupy porovnání pomocí čisté současné hodnoty je hodnota nákladů na jednu součástku, při které se rovná tento rozdíl nule je 12,6 Kč na vyrobenou součástku.



Obrázek 4.4: Graf změny rozdílu NPV při změně nákladů na výrobu jedné součástky.

4.5 Zhodnocení ekonomické části

V této ekonomické části jsem se soustředil na náklady spojené s investicí do vlastní výroby a následnému ekonomickému porovnání pořízení vlastní výroby tlačítka pomocí 3D tisku oproti nákupu tlačítka dostupného na trhu. Při jednom konkrétním případě, kde je nákupní cena součástky 20 korun za kus, výrobní cena 10,71 korun za kus a počet kusů za rok 500, se vyplatí investovat do vlastní výroby. Výpočet NPV je ovšem závislý na námi zvolené ceně peněz. Tato cena peněz je zvolena samostatně a zvolit ji, v dnešní době na pět let, není úplně nejjednodušší, protože do této veličiny vstupují proměnlivé faktory, například inflace. V České republice byla inflace dlouho na úrovni 2%. V dubnu roku 2022 se inflace dostala na hodnotu 14,4% [43]. Dále také nevíme, jak se bude vyvíjet cena energií a materiálu, ať už se jedná o materiál na naši výrobu součástky nebo na výrobu součástky kupované. Toto jsem se pokusil zahrnout do diskontu a nárůstů nákladů a cen. Diskont jsem z tohoto důvodu zvolil 10%, průměrný roční nárůst nákladů na výrobu součástky 3% a průměrný roční nárůst ceny kupované součástky 2%. Diskont jsem takto zvolil z toho důvodu, že dle mého názoru není pravděpodobné, že inflace bude na takovýchto hodnotách po celou dobu porovnání investic, mohu se ovšem mýlit. Nárůst nákladů a kupní ceny jsem zařadil do výpočtu kvůli nestabilní geopolitické situaci. Z provedené citlivostní analýzy jsem vyvodil, že největší vliv na rozdíl čistých současných hodnot dvou scénářů mají náklady na výrobu jedné součástky.

Pro menší produkce by se investice do vlastní výrobní kapacity mohla vyplatit například jako rezervní zdroj výrobních kapacity vzhledem k relativně nízké pořizovací ceně a také možnosti využití této technologie k jiným účelům, než pouze k produkci výrobků, ale také k vývoji a prototypování. Díky této případné rezervě by nedošlo k výpadkům výrobní kapacity například při dlouhodobém výpadku dodávek námi objednaných součástek. Výpadky výrobních kapacit jsou velice nákladné (ve větších podnicích se může jednat o částky v řádech milionů korun za hodinu).

Kapitola 5

Závěr

V první kapitole této bakalářské práce jsem se zaměřil na různé metody 3D tisku využívané v minulosti a nyní. Dále jsem se blíže zaměřil na 3D tisk metodou FDM a na některé termoplasty, které jsou využívány pro výrobu filamentů pro tento typ 3D tiskáren. V poslední části této kapitoly jsem se zaměřil na kompozitní filamenty pro 3D tisk. Podmnožinou kompozitních filamentů jsou filamenty s vodivými vlastnostmi. Tyto vodivé filamenty jsou tvořeny přidáním vodivých částic. Tyto vodivé částice mohou být na bázi uhlíku. V tom případě se jedná například o elektrovodivé saze, které byly využity jako plnidlo ve filamentech využitých v praktické části této bakalářské práce.

V praktické části jsem se věnoval charakterizaci filamentů z hlediska odporu a praktickému využití vodivých filamentů. Charakterizoval jsem celkem 3 filamenty. Filament tvořený čistým PLA, kompozitní filament tvořený matricí PLA a plnidlem v podobě uhlíkové černi vyrobený firmou Prusa Polymers a filament také tvořený matricí PLA, jehož plnidlo jsou elektricky vodivé saze produkovaný firmou Proto-pasta. Čisté PLA je z hlediska odporu izolant, jelikož jeho rezistivita je v řádu $T\Omega$ metrů. Pokud ovšem přidáme do PLA vodivé částice, pak jeho rezistivita poklesne až o 13 řádů. Průměrné hodnoty rezistivity filamentu Prusa Polymers byly ve všech měřeních vyšší, než u filamentu od firmy Proto-pasta. Filamenty jsou těžko tisknutelné kvůli obsahu vodivých částic. U filamentu firmy Proto-pasta toto způsobuje ucpání trysky a filamentu firmy Prusa Polymers vysokou křehkost filamentu. Zajímavým poznatkem je, že rezistivita vytisknutého filamentu je anizotropní. Hodnota rezistivity ve směru kolmém k ose Z se liší od rezistivity ve směru rovnoběžném na směr pohybu tiskové hlavy až o dva řády.

Jako praktické využití vodivých filamentů jsem zkonstruoval odporové dotykové tlačítko, pomocí kterého lze ovládat LED, a tenzometr. Odporové tlačítko pracuje na tom principu, že při dotyku obou elektrod tlačítka se uzavře elektrický obvod a pomocí tohoto obvodu můžeme ovládat polovodičové prvky, v mém případě to byl MOSFET. Tenzometr je součástka, jejíž funkce se zakládá na změně odporu při deformaci vodivé cesty. Tuto změnu jsem sledoval pomocí desky Arduino UNO. Hlavní nevýhodou PLA (kyselina polymléčná) je jeho sklon k degradaci a nízká teplota skelného přechodu. Tyto dvě vlastnosti tohoto materiálu jsou jeho největší problémy, které značně limitují možnost jeho využití. Tyto problémy by se ovšem daly vyřešit tím, že využijeme jinou matrici pro vodivý filament. Na druhou stranu je PLA biodegradabilní bioplast, který lze vyrobit například z fermentované kukuřice. Jako největší výhodu využití 3D tisku při výrobě součástek je jejich snadná modifikovatelnost pro konkrétní aplikaci díky softwaru pro modelování 3D součástek.

V ekonomické části jsem se věnoval modelovému příkladu firmy, která se rozhoduje mezi investicí do vlastní kusové výroby těchto součástek z ekonomického hlediska v porovnání s druhým scénářem, kterým bylo pořízení komerčně dostupných alternativ. Toto srovnání jsem

provedl pro různý počet vyrobených kusů za rok. Výpočty jsem provedl pro 500, 1000 a 1500 vyrobených a nakoupených součástek ročně. Pro tyto hodnoty jsem vypočetl rozdíl čisté současné hodnoty pro jednotlivé scénáře. Podle hodnoty tohoto rozdílu jsem poté určoval, jestli se investice do vlastní výroby vyplatí. Z výpočtů vyšlo, že nižší náklady jsou při daných vstupech při realizaci vlastní výroby pomocí 3D tisku. V citlivostní analýze jsem se zaměřil na vliv jednotlivých vstupů na výsledek rozdílu čistých současných hodnot.

Závěrem bych rád řekl, že využití vodivých polymerů pro výrobu elektronických součástek je jistě možné, ale má své omezení. Omezení jsou hlavně z hlediska vlastností materiálů, které mají nízkou teplotu skelného přechodu a podléhají degradaci, vodivosti zkoumaných materiálů, která byla oproti klasickým vodičům o několik řádů nižší a v poslední řadě také kontaktování součástek vytvořených pomocí 3D tisku s konvenčními materiály.



Literatura

- [1] J. Watson and K. Taminger, “A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 1316–1322, 2018.
- [2] B. DeBoer, N. Nguyen, F. Diba, and A. Hosseini, “Additive, subtractive, and formative manufacturing of metal components: a life cycle assessment comparison,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1–20, 2021.
- [3] K. V. Wong and A. Hernandez, “A review of additive manufacturing,” *International scholarly research notices*, vol. 2012, 2012.
- [4] C. K. Chua and K. F. Leong, *3D Printing and Additive Manufacturing*. WORLD SCIENTIFIC, 5th ed., 2017.
- [5] A. Ramya and S. L. Vanapalli, “3d printing technologies in various applications,” *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 396–409, 2016.
- [6] A. Bagheri and J. Jin, “Photopolymerization in 3d printing,” *ACS Applied Polymer Materials*, vol. 1, no. 4, pp. 593–611, 2019.
- [7] X. Xu, P. Robles-Martinez, C. M. Madla, F. Joubert, A. Goyanes, A. W. Basit, and S. Gaisford, “Stereolithography (sla) 3d printing of an antihypertensive polyprintlet: Case study of an unexpected photopolymer-drug reaction,” *Additive Manufacturing*, vol. 33, p. 101071, 2020.
- [8] I. Valizadeh, A. Al Aboud, E. Dörsam, and O. Weeger, “Tailoring of functionally graded hyperelastic materials via grayscale mask stereolithography 3d printing,” *Additive Manufacturing*, vol. 47, p. 102108, 2021.
- [9] “Ukázka msla tiskárny a vytvřzovací stanice.” https://blog.prusaprinters.org/cs/predstavujeme-original-prusa-slis-speed-nejrychlejsi-stolni-sla-3d-tiskarnu_51436/. Accessed: 2021-11-25.
- [10] J.-P. Kruth, X. Wang, T. Laoui, and L. Froyen, “Lasers and materials in selective laser sintering,” *Assembly Automation*, 2003.
- [11] J.-P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen, and M. Rombouts, “Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting,” *Rapid prototyping journal*, 2005.
- [12] “A schematic diagram of the sls machine.” https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-the-SLS-machine_fig6_260094770. Accessed: 2021-11-24.

- [13] J. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, and B. Lauwers, “Selective laser melting of iron-based powder,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, no. 1, pp. 616–622, 2004. 14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV).
- [14] “A schematic diagram of the slm machine.” https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-selective-laser-melting-SLM-process_fig1_326891428. Accessed: 2021-11-24.
- [15] R. Hedayatnejad, H. Sabet, S. Rahmati, and A. Salemi Golezani, “Investigation of additive manufacturing process by lmd method, affecting process parameters on microstructure and quality of deposition layers,” *Journal of Environmental Friendly Materials*, vol. 5, no. 1, pp. 47–58, 2021.
- [16] B. Shaqour, M. Abuabiah, S. Abdel-Fattah, A. Juaidi, R. Abdallah, W. Abuzaina, M. Qarout, B. Verleije, and P. Cos, “Gaining a better understanding of the extrusion process in fused filament fabrication 3d printing: a review,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1–13, 2021.
- [17] M. Zuza, “<https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruzny-m-prumerem/>,” 2018.
- [18] “3d tiskárna original prusa i3 mk3s+.” <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-5/>. Accessed: 2021-12-28.
- [19] A. Dey, I. N. Roan Eagle, and N. Yodo, “A review on filament materials for fused filament fabrication,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 5, no. 3, 2021.
- [20] R. A. Auras, L.-T. Lim, S. E. Selke, and H. Tsuji, *Poly (lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, and applications*, vol. 10. John Wiley & Sons, 2011.
- [21] J. Brožek, V. Benešová, L. Malinová, R. Kalousková, K. Šanda, and Z. Ledrová, “Kyselina polymlečná – materiál pro biodegradovatelné oděvní a technické textilie,” *Chemické listy*, vol. 4, no. 109, pp. 291–297, 2015.
- [22] X. Qi, Y. Ren, and X. Wang, “New advances in the biodegradation of poly(lactic) acid,” *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 117, pp. 215–223, 2017.
- [23] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, “Physical and mechanical properties of pla, and their functions in widespread applications — a comprehensive review,” *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, pp. 367–392, 2016. PLA biodegradable polymers.
- [24] S. Domenek and V. Ducruet, “Characteristics and applications of pla,” *Biodegradable and biobased polymers for environmental and biomedical applications*, pp. 171–224, 2016.
- [25] Z. Lei, Z. Chen, H. Peng, Y. Shen, W. Feng, Y. Liu, Z. Zhang, and Y. Chen, “Fabrication of highly electrical conductive composite filaments for 3d-printing circuits,” *Journal of Materials Science*, vol. 53, no. 20, pp. 14495–14505, 2018.
- [26] J. Horst, P. de Andreade, C. A. Duvoisin, and R. Vieira, “Fabrication of conductive filaments for 3d-printing: Polymer nanocomposites,” *Biointerface Research In Applied Chemistry*, vol. 10, no. 6, pp. 6577–6586, 2020.
- [27] S. W. Kwok, K. H. H. Goh, Z. D. Tan, S. T. M. Tan, W. W. Tjiu, J. Y. Soh, Z. J. G. Ng, Y. Z. Chan, H. K. Hui, and K. E. J. Goh, “Electrically conductive filament for 3d-printed circuits and sensors,” *Applied Materials Today*, vol. 9, pp. 167–175, 2017.

- [28] Y. Zheng, X. Huang, J. Chen, K. Wu, J. Wang, and X. Zhang, “A review of conductive carbon materials for 3d printing: Materials, technologies, properties, and applications,” *Materials*, vol. 14, no. 14, 2021.
- [29] J. Chen, X. Cui, K. Sui, Y. Zhu, and W. Jiang, “Balance the electrical properties and mechanical properties of carbon black filled immiscible polymer blends with a double percolation structure,” *Composites Science and Technology*, vol. 140, pp. 99–105, 2017.
- [30] X. Huang, “Fabrication and properties of carbon fibers,” *Materials*, vol. 2, no. 4, pp. 2369–2403, 2009.
- [31] T. K. Das, P. Ghosh, and N. C. Das, “Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: a review,” *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 2, no. 2, pp. 214–233, 2019.
- [32] B. R. C. de Menezes, K. F. Rodrigues, B. C. da Silva Fonseca, R. G. Ribas, T. L. do Amaral Montanheiro, and G. P. Thim, “Recent advances in the use of carbon nanotubes as smart biomaterials,” *Journal of Materials Chemistry B*, vol. 7, no. 9, pp. 1343–1360, 2019.
- [33] B. Podsiadły, P. Matuszewski, A. Skalski, and M. Słoma, “Carbon nanotube-based composite filaments for 3d printing of structural and conductive elements,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 1272, 2021.
- [34] Y. V. Syurik, M. G. Ghislandi, E. E. Tkalya, G. Paterson, D. McGrouther, O. A. Ageev, and J. Loos, “Graphene network organisation in conductive polymer composites,” *Macromolecular Chemistry and Physics*, vol. 213, no. 12, pp. 1251–1258, 2012.
- [35] F. Pizarro, R. Salazar, E. Rajo-Iglesias, M. Rodriguez, S. Fingerhuth, and G. Hermosilla, “Parametric study of 3d additive printing parameters using conductive filaments on microwave topologies,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 106814–106823, 2019.
- [36] “Datasheet nevodivého filamentu prusament pla.” <https://www.prusa3d.com/cs/file/370479/technicky-list.pdf>. Accessed: 8-5-2022.
- [37] “Datasheet vodivého filamentu - protopasta conductive pla.” https://cdn.shopify.com/s/files/1/0717/9095/files/TDS__Conductive_PLA_1.0.1.pdf?1771. Accessed: 8-5-2022.
- [38] K. instruments, “Model 8009 resistivity test fixture instruction manual,”
- [39] P. Veselý, E. Horynová, T. Tichý, and O. Šefl, “Study of electrical properties of 3d printed objects,” *POSTER 2018*, pp. 1–4, 2018.
- [40] “Tranzistor vybraný pro aplikaci.” <https://www.gme.cz/unipolarni-tranzistor-bs170-to92>. Accessed:17-5-2022.
- [41] “Tranzistor vybraný pro aplikaci.” <https://www.gme.cz/led-3mm-red-0-3-35-bl-b5141-1>. Accessed:17-5-2022.
- [42] “Ceník elektřiny pro podnikatele platný od 1. 1. 2022 na distribučním území predistribuce, a. s.na distribučním území predistribuce, a. s.” <https://www.pre.cz/Files/firmy/elektrina/archiv-produktu/2021/12/pre-proud-start-predi/>. Accessed: 8-5-2022.

- [43] “Míra inflace.” https://www.czso.cz/csu/czso/inflace_spotrebitelske_ceny. Accessed: 2022-5-15.



Obrázky

2.1 Princip stereolitografie s užitím laseru a speciální optiky [4]	6
2.2 Ukázka vytvrzovací a mycí stanice a tiskárny používající stereolitografii od firmy Prusa Research [9]	6
2.3 Principiální schéma PolyJet 3D tisku [4]	7
2.4 Schematické zobrazení SLS [12]	8
2.5 Schematické zobrazení SLM [14]	9
2.6 Hlavice pro 3D tisk metodou LMD. [4]	10
2.7 Obrázek FDM tiskárny od firmy PrusaResearch Original Prusa i3 MK3S+ [18]	11
2.8 Schéma stroje na výrobu filamentu pro 3D tiskárnu [19]	12
2.9 Naměřená závislost objemového odporu na hmotnostním procentu [27]	16
2.10 Grafy závislosti vodivosti na hmotnostním procentu grafenu v kompozitních materiálech tvořených maticí polystyrenu (vlevo) a polypropylenu(vpravo).[34].	18
3.1 Graf hodnot objemové jednotlivých vzorků vytvořených ze všech materiálů.....	22
3.2 Graf hodnot povrchové rezistivity jednotlivých vzorků vytvořených ze všech materiálů	22
3.3 Graf hodnot objemových rezistivit pro jednotlivé vzorky vytvořené z vodivých filamentů	23
3.4 Graf hodnot povrchových rezistivit pro jednotlivé vzorky vytvořené z vodivých filamentů	23
3.5 Ukázka vzorků pro čtyřvodičovou metodu	24
3.6 Schéma obvodu jednoduchého odporového tlačítka	25
3.7 Náhled dotykové tlačítka v programu PrusaSlicer (oranžově vodivý filament, ostatní barvy jsou filament nevodivý)	26

3.8 Nákres součástky	26
3.9 Prototyp senzoru dotyku vyrobený pomocí 3D tisku	26
3.10 Náhled součástky s kruhovými elektrodami v programu PrusaSlicer	27
3.11 Nákres součástky s kruhovými elektrodami v CAD programu	27
3.12 Výsledek tisku senzoru s kruhovými elektrodami	28
3.14 Graf průměrných proudů součástkami při jednotlivých hodnotách napětí	30
3.15 Tlačítko se zařazeným odporem pro měření napětí na odporu	31
3.16 Tlačítko se zařazeným odporem pro měření napětí na odporu	31
3.17 Obvod pro měření procházejícího proudu	32
3.18 Schéma zapojení s LED	33
3.19 Zapojení senzoru dotyku pomocí nepajivého pole	33
3.20 Test obvodu napájeného na DPS	34
3.21 Návrh a realizace plošného spoje	34
3.22 Zapojení bez banánků s napájením ze tří baterií	35
3.23 Tlačítko se zastrčenými vodiči	35
3.24 Model tlačítka	36
3.25 Krabíčka na desku plošného spoje a baterie	36
3.26 Demonstrace funkce krabíčky pomocí svítící LED při přiložení prstu na tlačítko ..	37
3.27 3D model jednoduchého tenzometru	37
3.28 Fotografie tenzometru vyrobeného technologií 3D tisku	37
3.29 Model druhého designu tenzometru	38
3.30 Schéma zapojení pro tenzometr	38
3.31 Program, který běží na Arduinu a vypisuje na obrazovku hodnoty odporu	39
3.32 Obrázek zapojení tenzometru se známým odporem 100 k Ω a Arduinem	40
3.33 Model přípravku pro určení ohybu ohybu	40

3.34	Obrázky měření odporu tenzometru	41
3.35	Graf hodnot odporu tenzometru naměřených při měření pomocí Arduina	41
4.1	Graf rozdílů NPV pro nákupní ceny součástky 5, 10 a 15 Kč při změně počtu vyrobených kusů za rok.	54
4.2	Graf změny rozdílu NPV při změně diskontu.	54
4.3	Graf změny rozdílu NPV při změně nákupní ceny součástky.	55
4.4	Graf změny rozdílu NPV při změně nákladů na výrobu jedné součástky.	55



Tabulky

3.1 Typické vlastnosti materiálů z technických listů výrobce [36][37]	19
3.2 Tabulka výsledků měření rezistivity	21
3.3 Tabulka naměřených odporů a vypočtených rezistivit vzorků vodivého filamentu firmy Prusa Polymers	24
3.4 Tabulka naměřených odporů a vypočtených rezistivit vzorků vodivého filamentu firmy Proto-pasta	24
3.7 Tabulka hodnot napětí na odporu při napájecím napětí 10V	32
4.1 Výpočet hotovostních toků při výrobě 500 součástek pro jednotlivé roky	49
4.2 Výpočet hotovostních toků pro cenu součástky 20 Kč	49
4.3 Výpočet hotovostních toků pro výrobu součástek v jednotlivých letech	50
4.4 Výpočet jednotlivých hotovostních toků pro nákup součástek	51
4.5 Výpočet hotovostních toků pro výrobu součástek v jednotlivých letech	51
4.6 Výpočet jednotlivých hotovostních toků pro nákup součástek	52
4.7 Tabulka výsledků citlivostní analýzy	53

Příloha A

Seznam symbolů

$^{\circ}\text{C}$ - Jednotka teplotní stupnice

A - Ampér jednotka elektrického proudu

a_{ij} - i jtá buňka tabulky

g/cm^3 - Jednotka hustoty

h - tloušťka vzorku

I - elektrický proud

Kč - koruna česká

l - délka

m - hmotnost

$\Omega\cdot\text{m}$ - Ohm metr jednotka rezistivity

Ω - jednotka elektrického odporu

p - náklady na kus

R - elektrický odpor

r - diskontní míra

ρ_m - hustota

ρ - objemová rezistiva

S - průřez

σ - plošná rezistivita

T - odpor tenzometru

U - elektrické napětí

V - Volt jednotka elektrického napětí

Příloha B

Seznam zkratek

2D - dvojrozměrný

3D - trojrozměrný

ABS - akrylonitrilbutadienstyren

CF_i - cashflow v roce i

CVD - carbon vapor deposition

CAD - computer aided design

DCF_i - Diskontované Cashflow v roce i

FDM - Fused deposition modeling

FFF - fused filament fabrication

LED - light emitting diode

NPV - čistá současná hodnota

MOSFET - metal oxide semiconductor field effect transistor

MSLA - masked stereolithography

PC - polykarbonát

PEEK -polyetheretherketon

PEI - polyetherimid

PLA - kyselina polyléčná

RCF - roční ekvivalentní peněžní tok

SLA - stereolithography

TPU - termoplastický polyuretán



Příloha C

Seznam přiložených souborů

Ekonomická_část_výpočty.xlsx

Měření_rezistivit.xlsx