

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



Ekologická výroba desek plošných spojů

Autor: Jakub Zdráhal

Vedoucí práce: Ing. Petr Veselý, Ph.D.

Konzultant pro ekonomickou část: Ing. Lukáš Dvořáček

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Praha 2023



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zdráhal** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **498941**  
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:

**Ekologická výroba desek plošných spojů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Ecological Production of Printed Circuit Boards**

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši na tematiku výroby desek plošných spojů, zaměřte se na použití ekologicky nezávadných materiálů jako substrátů. Dále se seznamte s technologií 3D tisku a vytváření vodivých vrstev pomocí tisku vodivých inkoustů.
2. Navrhněte design a postup výroby desky plošných spojů, která bude využívat ekologicky "přívětivé" (tj. recyklované/recyklovatelné) polymery.
3. Navržený postup a materiály ověřte testováním kvality a spolehlivosti. Vyhodnoťte výsledky experimentu.
4. Navrhněte ekonomický model pro porovnání konvenční výroby DPS a Vámi navrženého postupu. Zhodnoťte přínos Vašeho řešení v praxi jak z technického, tak ekonomického hlediska.

Seznam doporučené literatury:

- [1] B. Redwood, F. Schöffler, and B. Garret, The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications, 1st edition. Amsterdam: 3D Hubs, 2017.
- [2] MACH, Pavel, SKOČIL, Vlastimil a URBÁNEK, Jan. Montáž v elektronice: pouzďení aktivních součástek, plošné spoje. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [3] M. N. Nassajfar, I. Deviatkin, V. Leminen, and M. Hortanainen, "Alternative Materials for Printed Circuit Board Production: An Environmental Perspective," Sustainability, vol. 13, no. 21, p. 12126, Nov. 2021, doi: 10.3390/su132112126.

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: **20.01.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

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



## **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.

V Praze dne .....

.....



## **Poděkování**

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Veselému, Ph.D, za jeho čas, přátelský přístup a odborné rady při řešení dané problematiky. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi Ing. Lukáši Dvořáčkovi za cenné rady a pomoc s ekonomickou částí. Za korekturu textu bych rád poděkoval kolegovi Miloši Kvasničkovi. V neposlední řadě bych rád poděkoval celé své rodině a dlouholeté přítelkyni Amálii Dostalíkové za neustálou podporu a motivaci k dopsání této práce.





## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá testováním a vývojem nové alternativní metody výroby desek plošných spojů, ověření funkčnosti v testovacích podmínkách a závěrečné porovnání s klasickou výrobou desek plošných spojů. Na výrobu desek plošných spojů byly použity recyklované materiály, které umožňují i další recyklaci. Konkrétně byly použity materiály r-PLA, r-PET-G a r-PET. Nová metoda spočívá v návrhu 3D modelu potřebné desky plošných spojů, vytisknutí modelu na 3D tiskárně metodou Fused Deposition Modeling (FDM), osazení součástkami a následné potisknutí vodivých cest stříbrnou pastou. Práce je rozdělena na tři části. V první části je podrobně popsána technologie 3D tisku a výroba desek plošných spojů. Jsou zde uvedeny odlišné technologie 3D tisku na základě formy použitého materiálu. Druhým popsaným tématem je výroba desek plošných spojů. V praktické části byl popsán proces výroby desek plošných spojů novou metodou, která spojuje technologii 3D tisku a technologii nanášení tlustých vrstev. K prověření elektrických vlastností a mechanické odolnosti kontaktů byly vyrobeny vzorky uzpůsobené pro měření přechodového odporu a odporu na čtverec. Testovací vzorky byly následně použity k testování v šokové a vlhkostní komoře. Posledním vytvořeným typem vzorku je testovací model jednoduchého obvodu pro demonstrování funkčnosti nové technologie. Dalším aspektem práce je porovnání výroby desek plošných spojů s konvenční metodou výroby. V poslední, třetí části je nová alternativní metoda výroby desek plošných spojů porovnávána s klasickou metodou z ekonomického hlediska na modelovém příkladu, který má simulovat reálné použití v praxi.

**Klíčová slova:** 3D tisk, výroba desek plošných spojů, recyklované materiály, stříbrná pasta, ekologie, zelená elektronika

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the testing and development of a new alternative method of printed circuit boards (PCB) production, verification of functionality under test conditions and final comparison with conventional PCB production. Recycled materials were used for the production of the PCBs, which also allows further recycling. Specifically, r-PLA, r-PET-G and r-PET materials were used. A new method consists of designing a 3D model of the required circuit board, printing it on a 3D printer using the Fused Deposition Modeling (FDM) method, and then printing the conductive paths with silver ink. The work is divided into three parts. The first part describes the 3D printing technology and PCB fabrication in detail. Different 3D printing technologies are presented based on the form of the used material. The second part describes the fabrication of printed circuit boards. In the practical part, the process of manufacturing printed circuit boards using a new method that combines 3D printing technology and thick film deposition technology is described. In order to verify the properties and resistance of the contacts, samples adapted for measuring the contact resistance and sheet resistance were produced. The test samples were then used for testing in temperature shock and humidity chambers. The last type of the produced samples was a test model of a simple circuit to demonstrate the functionality of the new technology. Another aspect of the work was a comparison of printed circuit board fabrication with the conventional fabrication method. In the last third part, the new alternative PCB manufacturing method was compared with the conventional method from an economic point of view using a model example to simulate a real-life application.

**Keywords:** 3D printing, production of printed circuit boards, recycled materials, silver ink, ecology, green electronics

# Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Teoretický rozbor</b> .....	<b>14</b>
2.1. Formativní výroba.....	14
2.2. Subtraktivní výroba.....	14
2.3. Aditivní výroba .....	15
2.4. 3D tisk.....	15
2.4.1. 3D tisk z pevného materiálu v podobě struny .....	15
2.4.2. Tisk z kapalného materiálu.....	18
2.4.3. 3D tisk z práškového materiálu.....	20
2.5. Výroba desek plošných spojů .....	22
2.5.1. Výroba jednovrstvé desky plošného spoje .....	23
2.5.2. Výroba dvouvrstvé desky plošného spoje.....	24
2.5.3. Substráty pro desky plošných spojů.....	25
2.5.4. Ekologické substráty pro desky plošného spoje.....	25
2.5.5. Ekologie desek plošných spojů .....	27
2.5.6. Recyklace desek plošných spojů .....	27
<b>3. Vývoj nové technologie výroby DPS</b> .....	<b>29</b>
3.1. Materiály pro 3D tisk.....	30
3.2. Parametry nastavení 3D tisku .....	30
3.3. Nastavení zařízení Voltera V-One .....	31
3.4. Vývojový diagram procesu výroby.....	32
3.5. Měření přechodového odporu .....	33
3.5.1. Odpor rezistorů.....	34
3.5.2. Vytvrzení vzorků.....	34
3.5.3. Zhotovené vzorky.....	35
3.6. Měření odporu na čtverec .....	36
3.6.1. Zhotovené vzorky.....	37
3.7. Výsledky měření přechodového odporu .....	38
3.8. Výsledky měření odporu na čtverec .....	40
3.9. Testování vzorků.....	41
3.9.1. Testování v šokové komoře.....	41

3.9.2.	Výsledky testování v šokové komoře.....	42
3.9.3.	Elektronová mikroskopie .....	42
3.9.4.	Testování ve vlhkostní komoře .....	44
3.9.5.	Výsledky testování ve vlhkostní komoře .....	44
3.10.	Výroba demonstrativního obvodu.....	45
3.10.1.	Proces výroby blikáče .....	46
3.10.2.	Výsledné provedení blikáče .....	48
3.10.3.	Ilustrace výroby blikáče .....	49
3.11.	Diskuse k výrobě DPS .....	49
<b>4.</b>	<b>Ekonomický model .....</b>	<b>52</b>
4.1.	Vstupní náklady .....	53
4.2.	Náklady na provoz a výrobu .....	53
4.2.1.	Náklady na materiál.....	53
4.2.2.	Náklady na součástky.....	55
4.2.3.	Náklady na zaměstnance .....	55
4.2.4.	Náklady na elektrickou energii.....	56
4.2.5.	Náklady na opravy zařízení.....	57
4.2.6.	Náklady na nefunkční blikáče (zmetkovitost).....	59
4.2.7.	Součet nákladů na provoz a výrobu .....	60
4.3.	NPV.....	62
4.3.1.	Výpočet NPV pro jednotlivé vyrobené blikáče.....	62
4.3.2.	Výpočet NPV při nakupování vzorků .....	66
4.3.3.	Porovnání vlastní výroby a nakupování DPS.....	67
4.3.4.	Citlivostní analýza.....	68
4.4.	Zhodnocení ekonomického modelu .....	70
<b>5.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>71</b>
<b>6.</b>	<b>Reference .....</b>	<b>73</b>
<b>7.</b>	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>79</b>
<b>8.</b>	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>81</b>

# 1. Úvod

---

Elektrotechnika je obor zabývající se výrobou, přenosem a využitím elektrické energie. Díky elektrické energii lidstvo v posledních dvou stoletích dosahuje největších pokroků a nikdo z nás si život bez ní nedokáže představit. Zařízení využívajících elektrickou energii existuje celá řada a běžně se vyskytují i ve věcech, ve kterých bychom to nečekali. Můžeme je najít například v elektrických strojích, domácích spotřebičích, telefonech nebo počítačích. Na tvorbu elektronických zařízení se využívá obrovské množství různých materiálů od kovů po plasty. Většinu elektronických zařízení ale spojuje jedna věc. Deska plošného spoje (DPS) obsahující nejrůznější součástky potřebné ke správnému fungování daného zařízení. Deska plošného spoje je v dnešní době vyráběna z kompozitních materiálů a vodivé cesty jsou tvořené mědí. Pro připojení součástek k desce plošného spoje je převládající technologií pájení.

V posledním desetiletí je jedním z hlavních témat probíraných po celém světě téma klimatické změny podnebí na Zemi a ekologie. Množství vypuštěných skleníkových plynů nebo toxických látek lidskou činností se v poslední době výrazně zvyšuje a tato skutečnost vede například k urychlení oteplování planety. Společnost v rozvinutých státech se rozhodla omezit používání látek, které negativně ovlivňují životní prostředí, a snížit množství vypouštěných skleníkových plynů. Velká část odvětví lidských činností se proto začala potýkat se změnami a regulacemi. Obor elektrotechniky nebyl výjimkou. V roce 2006 Evropská unie rozhodla o zákazu používání olova a dalších potenciálně nebezpečných či toxických látek v elektronických zařízeních. Pájecí pasty s obsahem olova byly proto nahrazeny bezolovnatými pastami, které ale disponují horšími vlastnostmi.

Dominantní část desek plošných spojů je tvořena ze sklolaminátu (FR4) a součástky jsou připojeny pomocí pájecích past. Výroba desky plošného spoje z materiálu FR4 vyžaduje použití toxických látek a vzniká při tom značné množství odpadního materiálu. Možnost recyklace materiálu FR4 je pouze minimální. Pomocí různých technologií existují možnosti recyklace kovů z desek plošných spojů. Tyto metody jsou ale vysoce energeticky náročné a vyžadují použití dalších toxických látek.

Cílem této bakalářské práce je prozkoumat nové možnosti výroby desek plošných spojů pomocí nové alternativní metody, která bude v porovnání s klasickou metodou šetrnější k životnímu prostředí. Na výrobu desek plošných spojů bude použita technologie 3D tisku s využitím recyklovaných polymerů (filamentů), které umožňují i další recyklaci. Zároveň bude kontaktování součástek provedeno speciální stříbrnou pastou (spolu s vodivým motivem) a nebude proto zapotřebí použití vysokých teplot při výrobě na rozdíl od klasických metod, jako například pájení. Při výrobě nebudou použity žádné toxické látky.

## 2. Teoretický rozbor

---

V dnešní době se pro výrobu dílů (nejen v oblasti elektrotechniky) využívá mnoho druhů technologií a postupů. Každá technologie má své výhody a nevýhody. Výběrem adekvátní metody můžeme dosáhnout kvalitnějších výrobků, efektivní výroby nebo ekonomicky úsporného řešení. Existuje celá řada různých možností, ale obecně se výrobní procesy dají rozdělit na 3 typy:

- Formativní
- Subtraktivní
- Aditivní

Všechny možnosti jsou popsány v teoretickém rozboru. Aditivní technologie výroby byla využita v praktické části, a proto je popsána podrobněji. Nejvíce popsanou technologií v teoretickém rozboru je 3D tisk ve všech jeho podobách.

Ve slaboproudé elektronice se výroba elektronických zařízení v současné době neobejde bez využití desek plošných spojů. Existuje několik druhů desek plošných spojů a na jejich výrobu se používá mnoho různých materiálů. V druhé části teoretického rozboru je popsána výroba desek plošných spojů spolu s nejčastěji používanými materiály.

### 2.1. Formativní výroba

Proces formativní výroby spočívá ve formování daného materiálu do předem navrhnutého tvaru za pomoci tlaku, tepla nebo kombinací obojího. Formativní metodou můžeme vyrábět díly z různých materiálů, od kovů po plasty. Nejpoužívanějšími formativními technikami jsou odlévání, lisování, kování nebo vstřikování. Při odlévání se materiál nejdříve roztaví a následně nalije do připravené formy. Vstřikování funguje na podobném principu, ale materiál je po roztavení vytlačen do formy pod tlakem. U lisování nebo kování se pomocí tlaku materiál vytvaruje do požadovaného tvaru. Velkou nevýhodou je nutnost výroby forem, které jsou finančně nákladné a mohou sloužit pouze pro jeden konkrétní výrobek. Proto například při změně rozměrů výrobku je potřeba vyrobit i novou formu. Pokud se ale jedná o velkovýrobu, je tato metoda ve většině případů nejlevnější a nejrychlejší. Díky tomu se formativní výroba nejčastěji používá pro masovou výrobu. [1]

### 2.2. Subtraktivní výroba

Subtraktivní metoda výroby funguje na principu opracování materiálu, kdy postupným odebráním suroviny vznikne požadovaný tvar. Opět se zde používá celá řada materiálů, jako kovy, dřevo nebo plasty. Typickými subtraktivními metodami jsou všechny druhy třískového

obrábění (frézování, vrtání nebo řezání). Největší výhodou subtraktivní metody je její vysoká přesnost s perfektní povrchovou úpravou. Jako nevýhodu lze označit mnoho zbytkového odpadního materiálu. [1]

## **2.3. Aditivní výroba**

Jedná se o moderní technologii, která spočívá v postupném nanášení materiálu do výsledného tvaru. Hlavním a nejznámějším zástupcem aditivní výroby je 3D tisk. Technologie 3D tisku umožňuje tvorbu výrobků z širokého spektra materiálů. Kovy, beton, plasty i další jiné druhy materiálů. Největší výhodou jsou nízké počáteční náklady při výrobě jednoho vzorku (prototypu), kdy není potřeba žádných drahých nástrojů (forem). Proto se 3D tisk často používá při vývoji prototypů předtím, než budou zavedeny ve velkovýrobě. Nevýhodou výrobků vytvořených touto metodou jsou jejich vlastnosti. V porovnání s formativní a subtraktivní metodou disponují výrobky vyrobené aditivní metodou horšími vlastnostmi. Často se také vyskytují malé odchylky mezi jednotlivými kusy vlivem odlišných podmínek při výrobě (vlhkost, teplota). [1, 2]

## **2.4. 3D tisk**

Technologie 3D tisku má mnoho provedení, a i zde je proto vhodné udělat jednoduché rozdělení na tři způsoby, které se odlišují formou materiálu při vytváření výrobku:

- Z pevného materiálu v podobě struny
- Z kapalného materiálu
- Z práškového materiálu

### **2.4.1. 3D tisk z pevného materiálu v podobě struny**

V současné době se 3D tisk stává čím dál oblíbenějším jak pro širokou veřejnost, tak pro komerční využití. Z největší části se na této popularitě podílí tisk z pevného materiálu, který je nejrozšířenější. Metoda, která funguje na tomto principu, se jmenuje Fused Deposition Modeling (FDM). V roce 1988 si tuhle metodu nechal patentovat spoluzakladatel Stratasys S. Scott Crump. Častěji se používá pojem Fused Filament Fabrication (FFF), což je termín pro totožnou technologii, který používají ostatní společnosti [1, 3]. Princip fungování spočívá v postupném nanášení jednotlivých vrstev na sebe. Základními prvky každé tiskárny využívající tento princip jsou tisková podložka, extruder, řídicí jednotka a tělo tiskárny. [1, 3]

Primární funkcí tiskové podložky je stabilní přichycení roztaveného materiálu. Pokud během tisku dojde k odlepení materiálu od podložky, tisk bude pravděpodobně neúspěšný. Tisková podložka se v dnešní době vyrábí z různých materiálů, a díky tomu může mít různé

vlastnosti. V dnešní době jsou nejpoužívanější podložky z temperovaného skla a magnetické flexibilní podložky. Temperované sklo má výhodu v tom, že je dokonalé rovné, a proto je nejjednodušší pro kalibraci první vrstvy. Magnetická podložka má zase výhodu ve snadnějším sundávání výrobků. Po dokončení tisku se podložka jednoduše sejme z tiskárny a pouhým prohnutím se výrobek oddělí od podložky.

Extruder se jinak označuje jako tisková hlava. Do extruderu se vkládá filament v podobě struny a jeho hlavním úkolem je zahřát filament na teplotu tání a následně roztátý materiál nanášet na potřebné místo. Poslední část extruderu, ze které vychází roztátý filament, se nazývá tryska. Volbou velikosti průměru trysky a materiálem, ze kterého je tryska vyrobena, můžeme ovlivňovat kvalitu nebo dobu tisku. Standardní velikost průměru trysky je 0,4 mm. Při ní jsme schopni tisknout vrstvy o výškách zhruba od 0,05 mm do 0,35 mm. Při použití větší trysky, například 0,6 mm, můžeme tisknout větší vrstvy a tisk tak sice bude rychlejší, ale nebude dosahovat stejné kvality jako s použitím 0,4 mm trysky. [3]

Řídicí jednotka slouží k ovládání chodu celé tiskárny. Má mnoho úkolů, které se liší podle kvality a možností dané tiskárny. Obecně by se dalo konstatovat, že má za úkol přečíst a zpracovat data ze vstupního souboru. Ze získaných informací následně řídí teplotu podložky, teplotu trysky, ventilátory a ovládá chod krokových motorů. [3]



**Obrázek 1 - FFF tiskárna PRUSA MK3S+ [4]**

Tělo tiskárny je tvořeno různými způsoby z různých materiálů. Druh materiálu ovlivňuje kvalitu, životnost a výslednou cenu tiskárny. Díky použití kvalitnějších materiálů (ocel) a robustní konstrukce můžeme dosáhnout kvalitnějšího tisku. Při použití levnějších a méně kvalitních

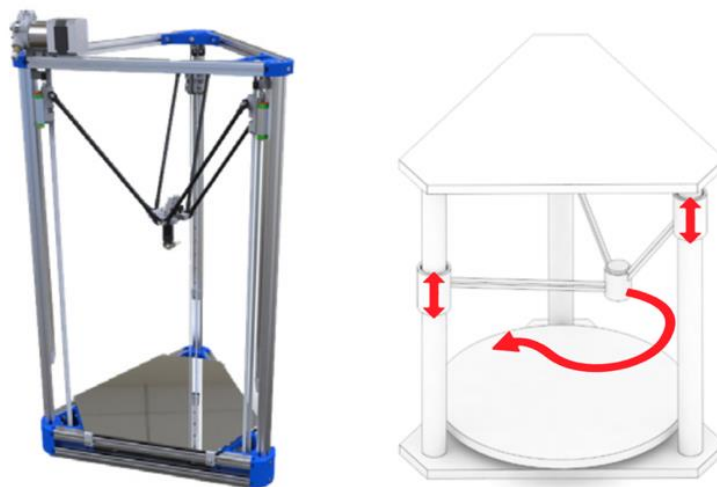


materiálů mohou vznikat vibrace, které zhorší kvalitu tisku. Konstrukce je závislá na druhu pohybu tiskové hlavy v trojrozměrném prostoru. Existují tři základní typy [3]:

- Kartézská
- Delta
- Polar

První a nejvíce používanou tiskárnou je kartézská. Tato tiskárna, jak už z názvu vyplývá, spoléhá na pohyby ve třech lineárních směrech (X, Y, Z). Většinou se pohybuje tisková podložka a extruder, kdy tisková podložka se pohybuje pouze v jednom směru (Y) a extruder se pohybuje ve dvou směrech (X, Z). U některých tiskáren se ve dvou směrech pohybuje tisková podložka a v jednom směru extruder. [3, 5]

Druhým typem je delta tiskárna. Na rozdíl do kartézské se delta tiskárna skládá ze tří ramen, které jsou spojené v extruderu. Ramena se posouvají nahoru a dolů, díky tomu umožňují pohyb extruderu. U této tiskárny je velmi důležitá přesnost kalibrace. Nevýhodou jsou složité výpočty pro pohyb ramen. [3, 5]



**Obrázek 2 - Tiskárna s delta konstrukcí [6]**

Posledním a také nejméně využívaným typem je polar tiskárna. Konstrukčně je tato tiskárna velice jednoduchá. Většinou má pouze jedno rameno, které zajišťuje lineární pohyb nahoru a dolů a lineární pohyb do jedné strany. Poté obsahuje rotační podložku. Pouze jedno rameno a rotační podložka tiskárně stačí pro zhotovení výrobku. Opět jsou zde velice složité výpočty pro pohyby tiskáry. [3]



Obrázek 3 - Tiskárna s polar konstrukcí [7]

#### 2.4.2. Tisk z kapalného materiálu

Tisk z kapalných fází je další metodou vytváření trojrozměrných objektů. Konstrukce a princip jsou avšak od tisknutí z pevného materiálu rozdílné. Opět se výrobek tvoří vrstvou po vrstvě. Průběh je však odlišný. V následující kapitole bude popsána stereolitografie a polyjet. Stereolitografie neboli SLA se udává jako první technologie 3D tisku. V roce 1986 ji patentoval Charles W. Hull [2, 8]. Princip této metody je v naplnění vaničky organickou fotocitlivou pryskyřicí (resin), která bude vytvrzována pomocí světla. Vytvrzují se jednotlivé vrstvy jedna po druhé až do zhotovení kompletního výrobku. Stereolitografii můžeme rozdělit podle pohybu podložky na pohyb „nahoru“ nebo pohyb „dolů“. [1]



Obrázek 4 - SLA tiskárna [9]

Tiskárny, u kterých se položka pohybuje „nahoru“, fungují následujícím způsobem. Speciální vanička je naplněna pryskyřicí. Podložka je celá potopená a nachází se u dna vaničky. Vzdálenost mezi vaničkou a podložkou určuje tloušťku následně vytvořené vrstvy. Pod vaničkou je umístěn zdroj světelného záření spolu se zrcadly, které určují přesné místo dopadu paprsků. Dno vany

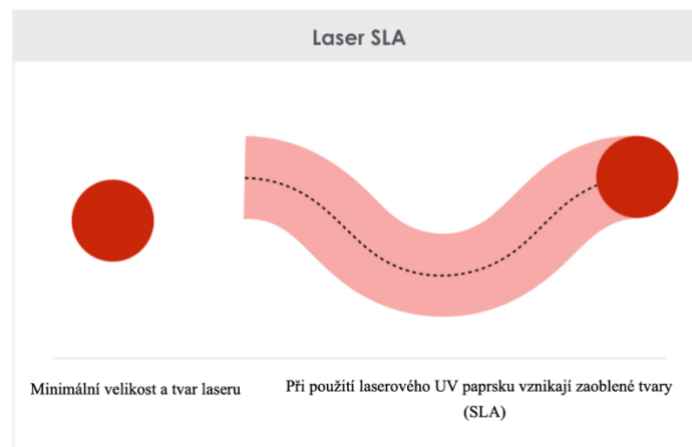
je tvořeno ze speciálního materiálu, kterým paprsky prochází a dopadají na podložku. Při dopadu paprsky vytvrdí pryskyřici, která se nachází mezi podložkou a dnem vany. Po ozáření potřebných míst se podložka posune nahoru o výšku jedné vrstvy. Díky tomu se zaplní místo pod podložkou další pryskyřicí a proces se může opakovat až do doby vytvoření navrženého výrobku. Dno vanečky musí být tvořeno ze speciální vrstvy, aby nedošlo k přilnutí vytvrzené pryskyřice ke dnu. [1]

Tiskárny s pohybující se podložkou směrem „dolů“ fungují podobným způsobem, ale s opačným pohybem podložky. Podložka je opět celá potopená, ale tentokrát se nachází u hladiny. Vzdálenost mezi hladinou a podložkou je výška jedné vrstvy. Zdroj světelného záření přichází z horní strany podložky a vytvrdí pryskyřici mezi podložkou a hladinou v daných místech. Po vytvrzení se podložka posune dolů o výšku další vrstvy a proces se opakuje. [1]

Podle způsobu vytvrzování pryskyřice můžeme rozdělit tiskárny na:

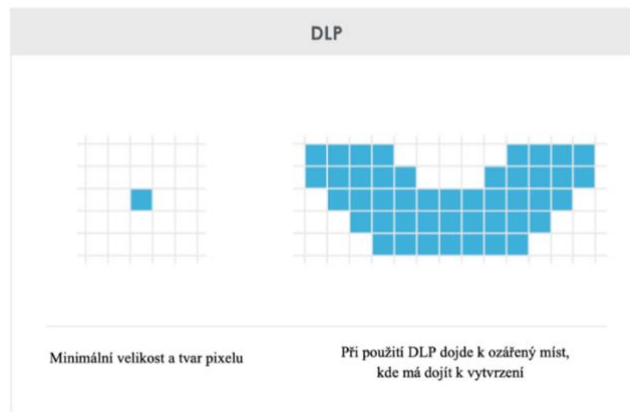
- SLA
- DLP
- MSLA

Klasická SLA tiskárna využívá k vytvrzení pryskyřice UV laser. Laserový paprsek je nasměrován na dvě zrcadla, která určují místo dopadu paprsku. Jedno je nastaveno pro osu X, druhé pro osu Y. Vytvrzení se proto skládá z bodů a čar. [3]



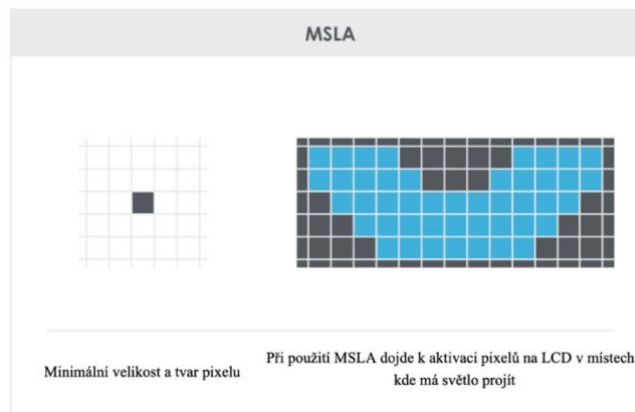
**Obrázek 5 - SLA vytvrzování [10]**

Při dalším typu vytvrzování se používá digitální projektor, který osvítí potřebná místa jedné vrstvy v jeden okamžik. Díky tomu, že všechna místa v dané vrstvě vytvrzuje najednou, bude doba tisku jedné vrstvy pořád stále stejná. Nezáleží proto na počtu vytvrzovacích míst ani na složitosti tisku. Tato metoda se jmenuje Digital Light Processing, zkráceně DLP. [3, 8]



**Obrázek 6 - DLP vytvrzování [10]**

Posledním zmíněným typem vytvrzování bude mask stereolitografie – MSLA. Jak už z názvu vyplývá, jedná se vytvrzování přes masku. Většinou je zdrojem UV záření z LED, které prochází přes masku v podobě LCD displeje. Tam, kde pixely svítí bíle, dojde k vytvrzení. Díky tomu zde opět nezáleží na složitosti a počtu vytvrzovaných míst, protože každá vrstva se vytvrzuje stejně dlouho a tisk je tak rychlejší. [3, 8]



**Obrázek 7 - MSLA vytvrzování [10]**

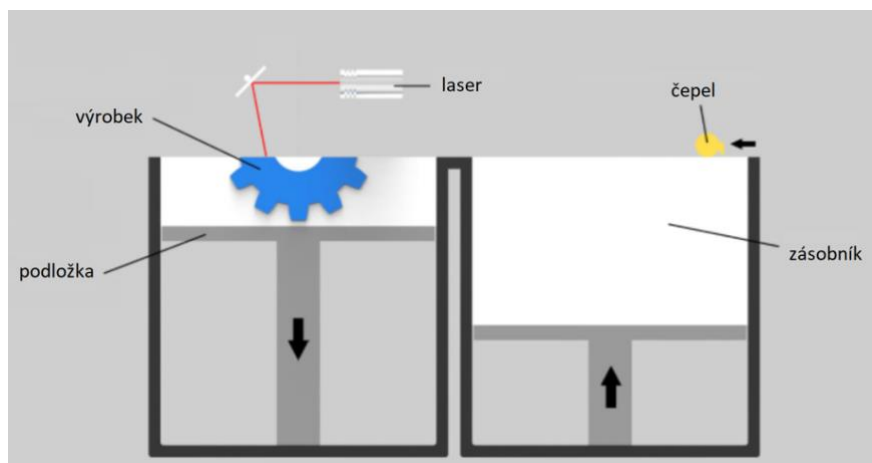
Mezi poslední zmíněné technologie patří pyjet. Tato technologie se od výše zmíněných liší nejvíce. Opět zde sice dochází k vytvrzování fotocitlivé pryskyřice, ale průběh je podobný klasickým inkoustovým 2D tiskárnám. Prostor na podložce je neustále ozařován UV světlem. Tiskovou hlavici je pryskyřice vystřikována na potřebná místa a ihned ozářena a vytvrzena. Takto vrstva za vrstvou postupně vytvoří potřebný tvar výrobku.

### 2.4.3. 3D tisk z práškového materiálu

Posledním druhem materiálu určeného pro 3D tisk je speciální prášek. Tento prášek je pomocí koncentrovaného toku energie z laseru spékán po jednotlivých vrstvách. Na rozdíl od stereolitografie jsou zde využívány tepelné účinky laseru, kdy se například u SLS zrna

na potřebných zacílených místech spečou k sobě. Kvůli tomu dosahují tyto tiskárny velkých rozměrů a mají velkou spotřebu energie. Nejpoužívanějšími technologiemi jsou SLS a SLM.

První zmíněné SLS nebo selecting laser sintering je metoda, při které se využívají CO<sub>2</sub> lasery [1, 2]. Proces začíná naplněním zásobníku práškem. Práškový materiál se skládá ze dvou složek. První, základní je tvořen materiálem s vysokou teplotou tání. Druhým materiálem je pojivo, které má nižší teplotu tání. Po naplnění zásobníku čepel (nebo váleček) vytvoří rovnoměrnou vrstvu prášku. Cíleně zaměřený laser následně speká zaměřovaná místa. Po „spečení“ všech potřebných míst v první vrstvě se platforma posune o výšku vrstvy dolů a poté čepel znovu vytvoří novou vrstvu z práškového materiálu. Proces se opakuje až do vytvoření výrobku. Díky tomu, že je výrobek podpírán okolním práškem, není potřeba žádných podpor, což se dá považovat za výhodu SLS. Zároveň lze nespečený prášek znovu použít a vzniká pouze minimální množství odpadního materiálu. Při výrobě dutých modelů je potřeba myslet na vytvoření otvorů pro vysypání nespečeného prášku uvnitř výrobku. [1–3, 11]



**Obrázek 8 - Metoda SLS [12]**

Další metodou je SLM neboli selective laser melting. Jak už z názvu vyplývá, jedná se o velmi podobnou metodu jako SLS, ale prášek je plně roztaven. Tisk probíhá v uzavřené komoře s inertním plynem. Proces opět začíná vložením prášku do zásobníku. Čepel následně vytvoří rovnoměrně vysokou vrstvu na podložce. Vysoce výkonný laser poté roztaví potřebná místa s práškem. Plošina se posune o výšku vrstvy dolů a čepel opět vytvoří rovnoměrnou vrstvu na podložce a proces se opakuje až do hotového výrobku. Díky tomu, že je prášek kompletně roztaven, vzniká homogenní výrobek. Oproti SLS má tedy výrobek lepší fyzikální vlastnosti. Během procesu mohou vzniknout nedokonalosti, které zapříčiňují zhoršení vlastností výrobku. Těmi mohou být například mikrotrhliny, póry, nebo dokonce může dojít k delaminaci vrstev. Kvůli tomu je potřeba kontrolovat nastavení a průběh procesu, zejména nastavení výkonného laseru. [11]

## 2.5. Výroba desek plošných spojů

Jak už bylo zmíněno, desky plošných spojů jsou součástí většiny elektrických a elektronických zařízení. Díky jejich širokému a častému používání prošla výroba velkým vývojovým procesem. V současné době mohou osazené desky plošných spojů dosahovat miniaturních rozměrů. Typicky se deska plošného spoje skládá ze součástek (rezistory, kondenzátory...), které jsou mezi sebou propojeny pomocí vodivých cest. Prostor mezi vodivými cestami je tvořen z izolačního materiálu, aby nedošlo k jejich nechtěnému propojení. Důležitými vlastnostmi pro všechny desky plošných spojů jsou [13]:

- Mechanická podpora upevněných součástek
- Elektrické propojení součástek pomocí vodivých cest
- Označení typů součástek, vývodů nebo velikostí pouzder

Na výrobu desek plošných spojů existuje několik druhů postupů. Volba metody výroby má vliv na cenu, kvalitu nebo rychlost výroby. Mezi hlavní druhy technologií pro výrobu desek plošných spojů se řadí [13]:

- Subtraktivní
- Aditivní
- Semiaditivní

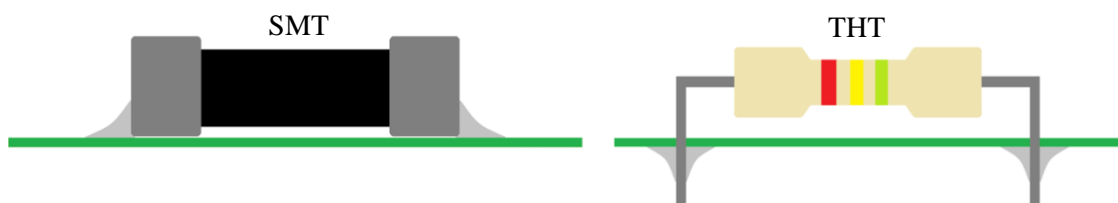
Při subtraktivní metodě je na povrchu souvislá vrstva vodivého materiálu (například měděné fólie) odstraněna z míst, kde mají být izolační mezery. Odstranění může být provedeno pomocí leptání nebo frézování. Aditivní proces funguje opačným způsobem. Na izolačním podkladu je vytvářen vodivý motiv postupným nanášením vodivého materiálu. Nanášení může probíhat pomocí síta nebo šablony.

I samotné desky plošných spojů mají spoustu variant provedení, a kvůli tomu i mnoho různých rozdělení. Nejvíce používané rozdělení je rozdělení podle počtu vrstev, což zároveň částečně odpovídá složitosti dané desky plošného spoje. Dělení desek plošných spojů podle počtu vrstev je následující [13, 14]:

- Jednovrstvé
- Dvouvrstvé
- Vícevrstvé

Na osazování desek plošných spojů se používají dvě odlišné technologie. První a starší technologií je THT (through-hole technology). Vývody součástek pro THT technologii jsou tvořeny drátky, které se prostrčí otvory v DPS a na druhé straně se zapájí. Novější technologií

je SMT (surface mount technology) neboli povrchová montáž. U této technologie už není potřeba otvorů a součástky se připájí přímo na povrch desky plošného spoje. Ilustrace osazovacích technologií je uvedena níže (Obrázek 9).

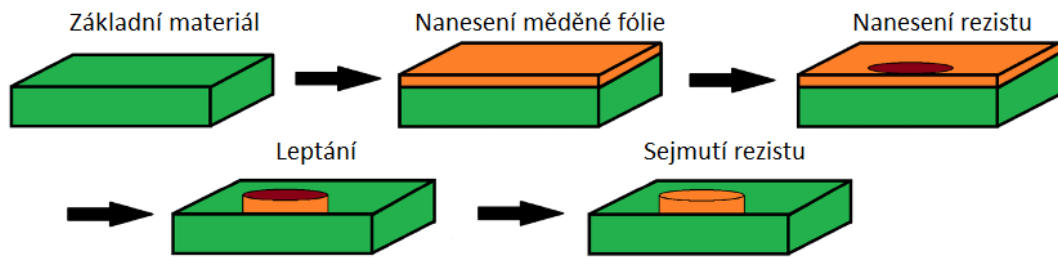


**Obrázek 9 - THT a SMT**

Na výrobu desek plošných spojů se používá mnoho materiálů, které musí splňovat hned několik požadavků. Hlavními elektrickými veličinami pro izolační substrát je rezistivita, relativní permitivita a ztrátový činitel. Tepelné a mechanické atributy jsou dalšími důležitými vlastnostmi izolačního materiálu. Například tepelná roztažnost substrátu musí být kompatibilní s roztažností součástek. Aby došlo ke splnění těchto podmínek a vlastností, používají se kompozitní materiály. Nejčastěji se výztuž skládá ze skleněných vláken a výplň je tvořena pryskyřicí. Dominantní podmínkou pro vodivý motiv je dobrá elektrická vodivost. Jako vodivý materiál se nejvíce používá měděná elektrolytická fólie s čistotou větší než 99,5 %. Typická tloušťka mědi v deskách plošných spojů je 35  $\mu\text{m}$ . [13]

### 2.5.1. Výroba jednovrstvé desky plošného spoje

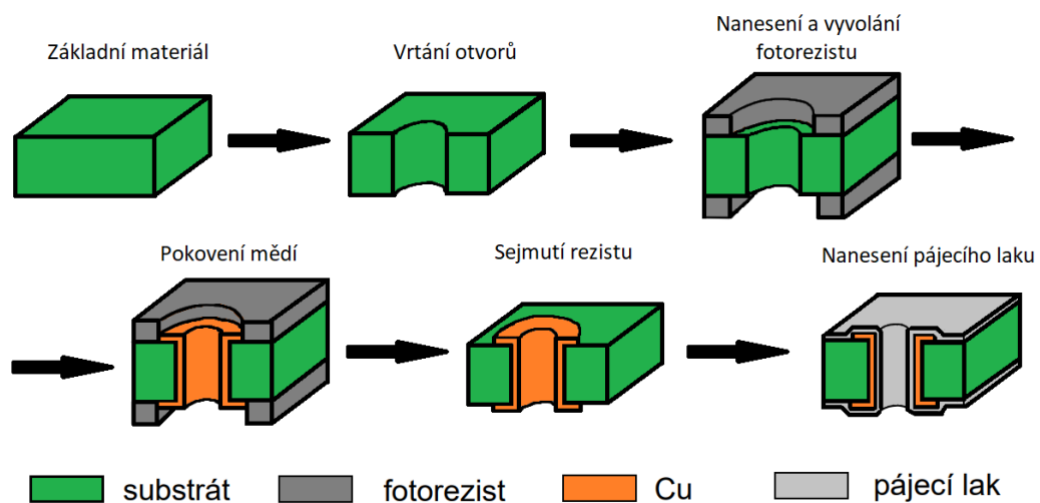
Prvními zástupci DPS byly jednovrstvé plošné spoje. Proces výroby je jednoduchý. Nejčastěji se na výrobu používá technologie sítotisku a leptání. Proces subtraktivní metody výroby je zobrazen na ilustraci níže (Obrázek 10). Základní izolační substrát je potažen měděnou fólií z jedné strany. Povrch se důkladně mechanicky nebo chemicky očistí. Nesmí obsahovat žádné mastnoty, prach nebo nečistoty. Měděnou fólii je také někdy nutné jemně přebrousit, aby se na povrchu nevyskytovaly vrstvy oxidů. Následně je nutné na měděnou fólii nanést rezist, který je odolný vůči leptání. Nanesení rezistu probíhá buď pomocí sítotisku, nebo fotoprocsem. Při fotoprocsemu se na celý povrch měděné fólie nanese fotocitlivý materiál. Motiv vodivých cest je zakryt šablonou a zbytek je osvícen. Na povrchu tedy zůstane pouze rezist ve tvaru vodivých cest. Při sítotisku se na povrch měděné fólie nanese přímo motiv vodivých cest. Poté, co má rezist požadovaný motiv, se vytvrzuje nebo suší. Následuje leptání, které z povrchu odstraní nepotřebnou měď. Rezist se po leptání smyje a celá deska plošného spoje se důkladně opláchně. Na povrchu zůstane pouze měď ve tvaru vodivých cest. Posledním krokem je mechanické opracování do vyžadovaného tvaru. [13]



Obrázek 10 - Výroba jednovrstvé DPS

### 2.5.2. Výroba dvouvrstvé desky plošného spoje

Proces výroby dvouvrstvých desek plošných spojů je velice podobný výrobě jednovrstvých. Postup se pouze aplikuje na obě strany základního materiálu. Jediná změna spočívá ve vzájemném elektrickém propojení stran. Propojení lze vyřešit několika způsoby, ale jako nejvhodnější se jeví pokovování vyvrtaných otvorů. Při vrtání otvorů mohou vzniknout chyby jako otřepy nebo vytažená skleněná vlákna. Těmto nedokonalostem je potřeba předejít zvolením vhodného postupu tvorby otvorů. Na ilustraci níže (Obrázek 11) je uveden aditivní proces výroby dvouvrstvých desek plošných spojů. Prvním krokem je vyvrtání děr potřebných pro propojení obou stran desky plošného spoje. Na základní materiál je poté nanesen fotorezist. Šablona pro osvětlení je oproti subtraktivní metodě tvořena negativem vodivého motivu. Po expozici světla tedy zůstane rezist pouze na místech, kde se nemají vyskytovat žádné vodivé cesty. Rezist se poté vytvrdí nebo vysuší. Místa, kde se rezist nevyskytuje, se následně pokovují mědí. Po vytvoření měděné vrstvy se sejme fotocitlivý rezist. Posledním krokem je nanesení pájecího laku. [13]



Obrázek 11 - Aditivní metoda výroby DPS [13]



### 2.5.3. Substráty pro desky plošných spojů

Dobré elektrické a mechanické vlastnosti substrátů pro desky plošných spojů jsou velmi důležité, jak už bylo zmíněno výše. Existuje mnoho druhů materiálů, které tyto vlastnosti splňují a jsou tedy používány pro výrobu desek plošných spojů. Běžně se využívají organické nebo kompozitní substráty. Organické substráty mají izolant tvořený z organické pryskyřice. Přestože je výběr pryskyřic široký, až 90 % produkce je založeno na fenolické nebo epoxidové pryskyřici [13].

Výhodou fenolických substrátů je poměrně nízká cena a dobré elektrické vlastnosti, nevýhodami jsou navlhavost a špatná odolnost vůči elektrickému oblouku. Obsah pryskyřice ve fenolických substrátech se pohybuje od 35 % do 58 % a výztuž je tvořena papírem [13]. Fenolický laminát s 58% obsahem fenolické pryskyřice se označuje XXXPC.

Etylenchlorhydrin a bisfenol A jsou hlavními složkami epoxidových substrátů. Vlastnosti těchto látek jsou sice lepší než u fenolických materiálů, ale na druhou stranu jsou výrazně dražší. Výztuž je tvořena skleněnými vlákny a výsledkem jsou tak skloepoxidové materiály. Nejčastějším zástupcem je FR4, který se v dnešní době stal standardem ve výrobě desek plošných spojů [13].

Představitelem kompozitních materiálů je například CEM-1, který je nejpoužívanější. Jádrem je tvořeno z celulózového papíru impregnovaného epoxidem. Po obou stranách je jedna vrstva skloepoxidového prepregu (epoxidem impregnovaná skleněná tkanina). Díky tomu kombinuje vlastnosti substrátů na bázi skla a papíru. [13]

Pro porovnání vlastností jednotlivých materiálů jsem sestrojil tabulku [13]:

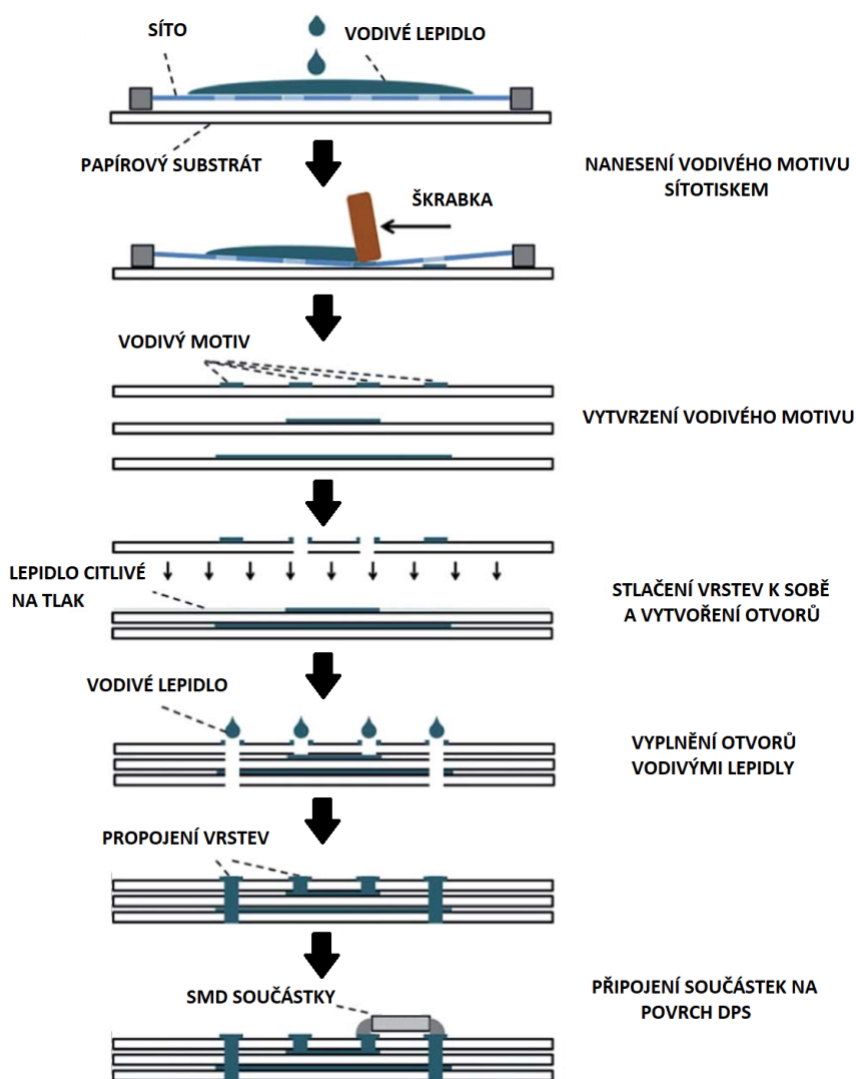
**Tabulka 1 - Vlastnosti materiálů pro DPS**

Vlastnosti	XXXPC	FR4	CEM-1
Povrchová rezistivita ( $\Omega$ )	$10^9$	$10^{10}$	$10^{10}$
Vnitřní rezistivita ( $\Omega\text{cm}$ )	$10^9$	$10^{12}$	$10^{12}$
Nasákavost vodou (% hmotnosti)	0,75	0,25	0,3
Elektrická pevnost (kV)	15	40	40
Relativní permitivita – při 1 MHz	4,8	5,4	5
Ztrátový činitel – při 1 MHz	0,04	0,035	0,04

### 2.5.4. Ekologické substráty pro desky plošného spoje

Snížení dopadu výroby a zpracování desek plošných spojů na životní prostředí se v současné době stalo velmi diskutovaným tématem. Výroba desek plošných spojů z materiálů šetrných k životnímu prostředí se stala jedním z nich. Výzkumy ukazují, že fáze výroby DPS má na životní

prostředí srovnatelný vliv jako fáze po konci životního cyklu [15]. Použití biokompatibilních materiálů snižuje dopad na životní prostředí během výroby i po ukončení životního cyklu. Vlastnosti těchto materiálů jsou ale horší než vlastnosti klasických substrátů pro DPS. Nicméně biologické materiály by mohly najít uplatnění v méně náročné elektronice, kde není požadována vysoká spolehlivost [16]. Aktuálně zkoumanými ekologickými materiály jsou například substráty na bázi papíru, dřeva nebo jejich derivátů [17, 18]. Aditivní proces výroby vícevrstvé desky plošného spoje na bázi papíru vypadá následujícím způsobem [18]. Na základní destičky v podobě papíru (polyuretanu) je pomocí sítotisku nanesen vodivý motiv z vodivých lepidel, který je následně vytvrzen. Poté se vrstvy přilepí (lepidlem citlivým na tlak) k sobě tak, aby byly zarovnané polohy vodivých motivů. Vyvrtáním otvorů, které se zakápnou vodivými lepidly, dojde k elektrickému propojení jednotlivých vrstev. Posledním krokem je montáž SMD součástek na povrch desky plošného spoje. Ilustrace postupu výroby je na obrázku níže (Obrázek 12). Velkou nevýhodou desek plošných spojů na bázi papíru je rychlá rozložitelnost. [18]



Obrázek 12 - Výroba DPS na bázi papíru [18]

Další možností je použití polymerů na biologické bázi nebo biologicky odbouratelných polymerů. Těmi mohou být například kyselina polylactonová (PLA), polykaprolakton (PCL) nebo kyselina polyglykolová (PGA) [16, 19]. Některý z těchto materiálů by teoreticky mohl v budoucnu nahradit klasický substrát FR4, jelikož je možné tyto materiály použít i v běžném postupu výroby DPS. Současným hlavním problémem těchto materiálů je nízká teplotní odolnost. Například při pájení tak může dojít k poškození povrchu. Nicméně laserové pájení v kombinaci s nízkoteplotními pájkami přináší uspokojivé výsledky s minimální deformací povrchu [16]. Pro nahrazení substrátu FR4 biokompatibilními variantami je potřeba další vývoj k docílení požadovaných vlastností.

Nejen použití vhodných materiálů při výrobě desek plošných spojů může snížit dopad na životní prostředí. Další možností je přechod ze subtraktivní výroby DPS na aditivní výrobu, kde také dochází k signifikantnímu snížení dopadu na životní prostředí [20].

### **2.5.5. Ekologie desek plošných spojů**

Ukazuje se, že industrializace a následné zlepšení ekonomické situace obyvatelstva vede k rapidnímu zvýšení spotřeby elektronických zařízení, a tím pádem i nárustu OEEZ (označení pro odpad z elektronických nebo elektrických zařízení) [21]. Celosvětová produkce ročního odpadu OEEZ přesahuje hranici 50 milionů tun a pouze 17,4 % z tohoto odpadu je řádně zpracováno nebo recyklováno [21]. Desky plošných spojů se vyskytují ve většině elektronických zařízení a odhaduje se, že tvoří zhruba 3 % z celkového objemu elektrického odpadu [14]. Nakládání s OEEZ je velkým problémem, se kterým se společnost musí potýkat. Recyklace je důležitá hned z několika důvodů. Prvním důvodem je, že desky plošných spojů obsahují mnoho různých prvků a některé se řadí mezi toxické látky. Únik toxických látek negativně působí na životní prostředí a může způsobit i poškození lidského organismu. Druhým důvodem je obsah neobnovitelných prvků, které se na Zemi vyskytují pouze v omezeném množství. Správnou recyklací můžeme dosáhnout účinnějšího využití přírodních zdrojů. [14, 21]

Dopad na životní prostředí se neřeší pouze při ukončení životnosti elektrického či elektronického zařízení. Důležitý je i proces výroby desek plošných spojů. Konvenční metody výroby desek plošných spojů se neobejdou bez použití nejrůznějších toxických látek, které spolu s vysokou energetickou náročností procesu výroby mají dopad na životní prostředí [22].

### **2.5.6. Recyklace desek plošných spojů**

Proces recyklace desek plošných spojů (DPS) je velmi obtížný. Dominantním problémem při recyklaci je složitost struktury spolu s širokým spektrem použitých materiálů. I samotní výrobci často neznají kompletní seznam prvků, které se v DPS vyskytují. Prvním krokem

při recyklaci je tedy analýza složení. Správné zvolení recyklačního postupu vyžaduje souhrnné informace o složení daných desek plošných spojů. Tyto informace zároveň slouží pro představu výše nákladů vynaložených na recyklaci. K analýze prvků, které DPS obsahuje, je nejprve nutná příprava. Ta spočívá ve vytvoření homogenního prášku pomocí řezacích nebo odstředivých mlýnů. Výsledné rozměry částic jsou menší než 500  $\mu\text{m}$  [14]. Následně se informace o složení získávají pomocí analytických nebo chemických metod, mezi které patří například atomová absorpční spektroskopie. Prvky se od sebe oddělují pomocí různých separačních technik (magnetická a elektrostatická separace nebo separace vířivými proudy). Díky rozměrům částic o velikosti několika stovek  $\mu\text{m}$  je úspěšnost oddělení mědi až 90 % [14]. Nejedná se o čistou měď, ale prášek s vysokým obsahem mědi. Takový prášek je kvalitním zdrojem pro rafinaci a je dokonce možné ho dále přeprodávat. Dalším práškem získaným separací je prášek pryskyřice se skleněnými vlákny. Ten se skládá z pryskyřice (32 % z hmotnosti prášku), skleněných vláken (65 % z hmotnosti prášku) a nečistot [14]. Prášek z pryskyřice a skleněných vláken se dá použít jako plnivo do výrobků z epoxidové pryskyřice (barvy nebo lepidla). [14]

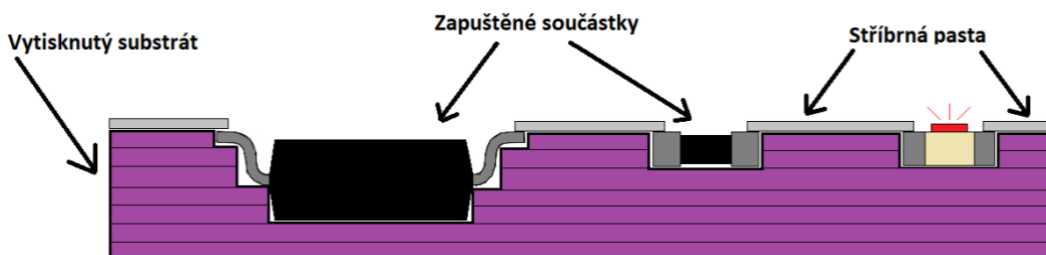
Z většiny desek plošných spojů se stále nedaří recyklovat keramické a plastové části, které tak končí v odpadu. I když se daří pomocí separace navzájem oddělit velkou část prvků, pořád zůstává většina na skládkách. Recyklace desek plošných spojů je tedy v současné době ne příliš úspěšným procesem. Je potřeba se tímto problémem zabývat a zmírnit dopady na životní prostředí. [14]

### 3. Vývoj nové technologie výroby DPS

V praktické části se budu zabývat vývojem nové alternativní metody výroby desek plošných spojů (DPS). Tato metoda spojuje dvě v dnešní době populární technologie. Testovací vzorky desek plošných spojů byly vyrobené z recyklovaných materiálů, které umožňují recyklaci opakovat i v budoucnu. První použitou technologií byl 3D tisk, který sloužil k výrobě základních destiček (substrátu). Zde byly použity zmíněné recyklované filamenty. K uskutečnění vodivých cest byla použita druhá technologie nanesení tlustých vrstev. Vodivé cesty byly nanесeny pomocí zařízení Voltera V-One, která používá speciální vodivou pastu s obsahem stříbrných šupinek. Kontakty mezi vodivými cestami a součástkami (rezistory, kondenzátory...) byly také provedeny pomocí stříbrné pasty a tlustých vrstev. Při výrobě tedy není potřeba použít pájecí pasty ani vodivého lepidla. Ilustrace desky plošného spoje vyrobeného takovým způsobem je na obrázku níže (Obrázek 13). Díky použití recyklovaných materiálů, absenci toxických látek a možnosti další recyklace by měla být nová metoda výroby desek plošných spojů v porovnání s klasickou metodou šetrnější k životnímu prostředí.

V první části jsem se věnoval provedení kontaktu a použitím vodivé pasty na substrát z polymerů umožňujících 3D tisk. Provedl jsem vyhodnocení vlastností a kvalit kontaktů v porovnání s klasickou konvenční metodou. Kontakty byly hodnoceny podle velikosti přechodového odporu. Vhodnost použitého materiálu na substrát jsem hodnotil pomocí měření a výpočtu odporu na čtverec. Odolnost a kvalita kontaktu byla nakonec prověřena testem v šokové komoře a testem ve vlhkostní komoře.

V druhé části jsem se zabýval zhotovením jednoduchého demonstrativního obvodu, který má simulovat použití v praxi. Zhotovený vzorek reprezentuje jednoduchý obvod blikáče. Aby nejlépe odrážel dění v praxi, byly použity součástky, které reprezentují ty běžně používané. Těmi jsou rezistory, kondenzátor, časovač NE555 a jedna dioda. Ilustrace řezu desky plošného spoje (obvodu blikáče) je na obrázku níže (Obrázek 13).



Obrázek 13 - Ilustrace DPS se zapuštěnými součástkami

### 3.1. Materiály pro 3D tisk

Pro výrobu desek plošných spojů jsem použil tři různé filamenty pro 3D tiskárnu. Materiály byly použity k výrobě základní desky (substrátu), která je následně osazena součástkami a potisknuta na zařízení Voltera V-One. Všechny filamenty jsou recyklované a byly zakoupeny v internetovém obchodě EKO MB [23]. Pro lepší rozlišování jsem zvolil 3 různé barvy. Jedná se o r-PLA (fialová barva), r-PET-G (bronzová barva) a r-PET (zelená barva). Odlišné barvy mají na vlastnostech pouze minimální vliv [24]. Materiály r-PLA i r-PET zmíněná firma nakupuje jako hotový recyklovaný granulát a r-PET-G kupuje v podobě odpadního materiálu bez znečištění od jiných firem, který je nadrcen a poslán do další firmy, kde je zregranulován. V případě potřeby je zde vloženo barvivo pro chtěnou barvu. Materiál v podobě granulí je vloženo do specializované sušárny a odtud je veden do extruzní linky. Zde je roztaven a tahán přes chladičí vany, speciální měřák a kompenzátor délky až na cívku [25].

### 3.2. Parametry nastavení 3D tisku

Každý materiál disponuje jinými vlastnostmi, a proto si žádá i jiné nastavení parametrů při tisku. Mezi hlavní a nejdůležitější parametry 3D tisku patří teplota trysky a teplota vyhřívané podložky. Nastavení hlavních parametrů pro tisk vzorků má zásadní vliv na jejich kvalitu. Jak už bylo zmíněno výše, tisknul jsem ze tří vlastnostmi odlišných materiálů. Proto bylo zaprvé potřeba vyladit takzvané tiskové profily (souhrnné nastavení tiskových parametrů), abych mohl dosáhnout co nejlepších výsledků. Pro kalibraci nastavení parametrů se používají testovací modely. Jedním z testovacích modelů jsou teplotní věže, které fungují na principu tisku věže s různými hodnotami teplot trysky pro jednotlivá patra. Ideální teplota trysky poté odpovídá teplotě, při které bylo tisknuto patro bez chyb tisku a s dobrou adhezí mezi vrstvami. Teplotní věže byly použity i v mém případě a teplotní rozsah byl zvolen podle pokynů výrobce [26–28]. Pro tisk vzorků byla použita tiskárna Creality Ender 3 S1 a tiskárna Original Prusa i3 MK3S+. Základní parametry tisku pro jednotlivé materiály byly na základě testování zvoleny následovně:

Pro tisk z recyklovaného PLA:

**Tabulka 2 - Parametry nastavení 3D tisku pro r-PLA**

r-PLA	Ender 3 S1	PRUSA MK3S+
Teplota trysky pro první vrstvu:	210 °C	210 °C
Teplota trysky pro další vrstvy:	205 °C	210 °C
Teplota podložky:	60 °C	60 °C

Pro tisk z recyklovaného PET-G:

**Tabulka 3 - Parametry nastavení 3D tisku pro r-PET-G**

r-PET-G	Ender 3 S1	PRUSA MK3S+
Teplota trysky pro první vrstvu:	240 °C	240 °C
Teplota trysky pro další vrstvy:	240 °C	250 °C
Teplota podložky:	70 °C	80 °C

Pro tisk z recyklovaného PET:

**Tabulka 4 - Parametry nastavení 3D tisku pro r-PET**

r-PET	Ender 3 S1	PRUSA MK3S+
Teplota trysky pro první vrstvu:	240 °C	260 °C
Teplota trysky pro další vrstvy:	240 °C	260 °C
Teplota podložky pro první vrstvu:	80 °C	85 °C
Teplota podložky pro další vrstvy:	80 °C	90 °C

Pro tisk z materiálu r-PET jsou zásadní i další parametry tisku. Materiál r-PET rychle krystalizuje, pokud je zahřátý na vysokou teplotu a je pomalu chlazen [29]. Je proto nutné zajistit, aby byl rozehřátý filament v trysce co nejkratší dobu. Retrakci filamentu jsem zvolil nulovou, větráčky jsou po celou dobu tisku vypnuté a velikost maximální objemové rychlosti jsem zvolil 12 mm<sup>3</sup>/s. Všechny parametry nastavení jsou důležité proto, aby v extruderu nedošlo k ucpaní trysky r-PET materiálem. S výše uvedenými hodnotami jsem při testování dosáhl nejkvalitnějších výsledků, a z tohoto důvodu jsem se je rozhodl použít i pro následný tisk vzorků.

### 3.3. Nastavení zařízení Voltera V-One

Dalším krokem ve výrobě desek plošných spojů je potisknutí základních destiček vodivými cestami a zároveň vytvoření kontaktů mezi vodivými cestami a součástkami. K tomuto účelu jsem použil zařízení Voltera V-One. Toto zařízení dokáže vytvořit podle navrhnutého programu vodivé propojení mezi potřebnými místy. Zařízení Voltera V-One vytváří tlusté vrstvy nanášením speciální vodivé pasty. Tuto technologii jsem použil také k vytvoření kontaktů. Použitá speciální pasta obsahuje šupinky stříbra, které je díky své nízké rezistivitě vhodným materiálem pro tvorbu proudové cesty.

Proces potisknutí je jednoduchý. Vzorek se upevní na podložku, Voltera si následně pomocí „jehly“ najde polohu vzorku a ověří nerovnosti na povrchu vzorku, aby nedošlo k poškození trysky. Pokud je povrch v pořádku, může proběhnout tisk. Důležité je správné upevnění vzorku, aby se během potisku nepohnul, protože to by vedlo k nedokonalému či špatnému výsledku. Zároveň je v případě používání malých součástek, v mém případě rezistorů, důležité přesné nastavení polohy destičky, aby vodivé cesty vedly k potřebným místům a došlo k vytvoření

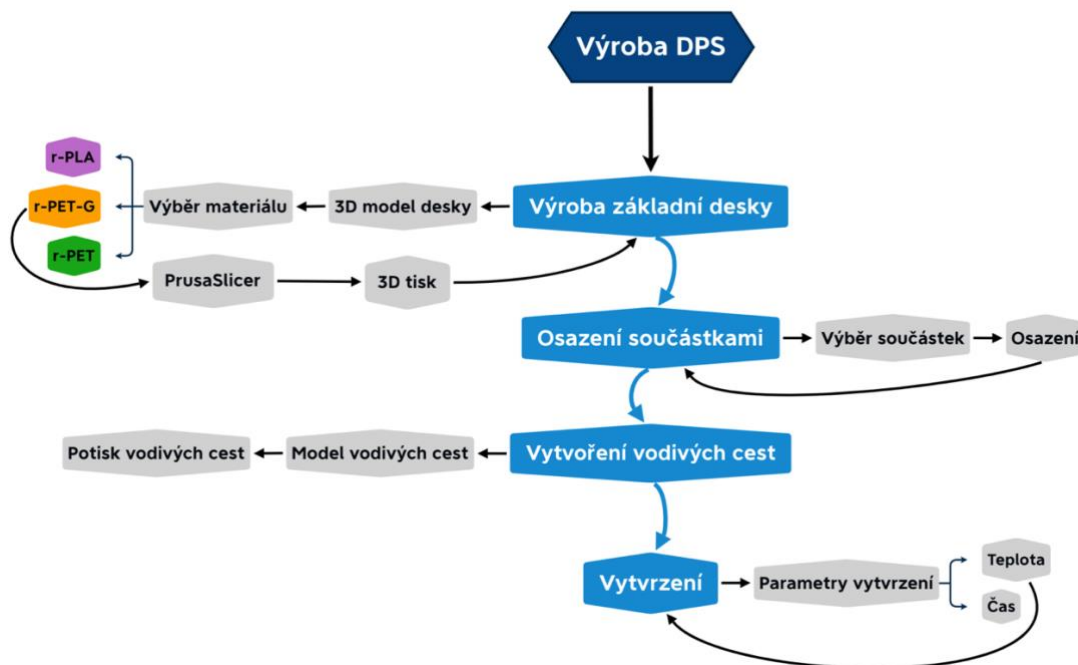
kontaktu se součástkou. Pokud Voltera zaznamenala nerovný povrch, použil jsem brusný papír, abych tyto nerovnosti srovnal a nedošlo k poškození trysky.



Obrázek 14 - Zařízení Voltera V-One

### 3.4. Vývojový diagram procesu výroby

Pro lepší přehled jsem vytvořil vývojový diagram procesu výroby desek plošných spojů. Skládá se ze čtyř hlavních částí, které jsou označeny modrou barvou. V každé části se vyskytuje i několik nezbytných mezikroků, které jsou znázorněny šedou barvou.



Obrázek 15 - Vývojový diagram

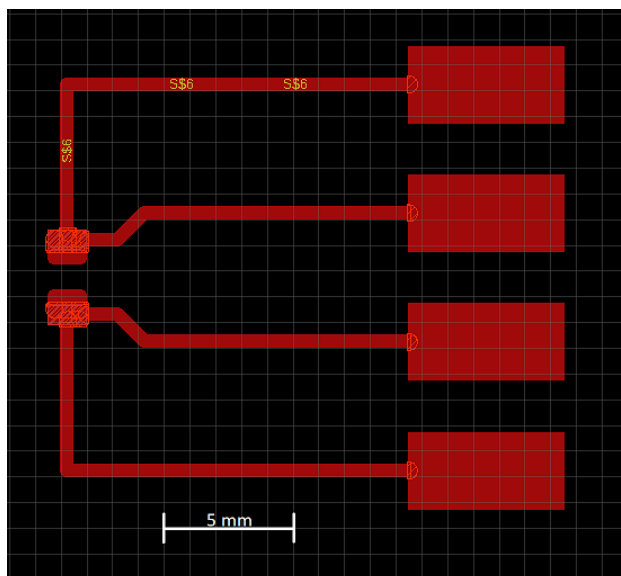


### 3.5. Měření přechodového odporu

Místo, kde dochází ke spojení (dotyku) dvou vodičů, se nazývá elektrický kontakt. Tímto spojem protéká elektrický proud. V důsledku toho, že každá plocha obsahuje nerovnosti a žádná není absolutně hladká, se vyskytují v dotyku dvou vodičů mezery a vzniká přechodový odpor („odpor kontaktu“). Ke správné funkci a spolehlivosti kontaktů se snažíme dosáhnout co nejmenších hodnot přechodového odporu. [30]

Prvními zkoumanými tématy v této práci jsou možnosti kontaktování součástek pomocí speciální vodivé pasty a vlivy použitého materiálu substrátu při výrobě. Pro měření přechodového odporu jsem vyrobil dvacet vzorků z každého recyklovaného materiálu. Abych mohl výsledky porovnat s klasickými metodami výroby desek plošných spojů, vytvořil jsem 14 vzorků s použitím vodivých lepidel a 28 vzorků metodou pájení. Měření přechodového odporu bylo provedeno pomocí čtyřvodičové metody, abych dosáhl co nejpřesnějších výsledků.

Proces výroby začíná navrhnutím destičky s místem pro rezistor, jelikož budou rezistory zapuštěné. 3D objekt jsem navrhnul v programu Fusion 360. Z hotového modelu jsem následně v programu PrusaSlicer vytvořil soubor s označením gcode pro tiskárnu, na které jsem 3D model vytisknul a osadil rezistorem. Dalším krokem bylo navrhnutí vodivých cest. Na to jsem použil program EAGLE. Poté jsem na zařízení Voltera V-One natisknul vodivé cesty. Posledním krokem bylo vypečení vzorků v peci. Model vodivých cest je uveden na obrázku převzatém z programu EAGLE.



Obrázek 16 - Motiv pro měření přechodového odporu

### 3.5.1. Odpor rezistorů

Pro větší přesnost měření byly použity rezistory s co nejmenším odporem. Výrobce použité rezistory považuje za rezistory s nulovým odporem, a proto je i udávaná hodnota odporu rezistoru  $0 \Omega$ . Pro zpřesnění jsem se rozhodl pro měření odporu pomocí čtyřvodičové metody.

**Tabulka 5 - Hodnoty odporů rezistorů**

Měření odporů	
Vzorek číslo:	R (m $\Omega$ )
1	16,2
2	18,0
3	15,0
4	14,4
5	14,2
6	14,8
7	15,3
8	15,4
9	15,8
10	16,6
Průměr:	15,57

Průměrný odpor rezistorů vyšel 15,57 m $\Omega$ .

### 3.5.2. Vytvrzení vzorků

Aby vodivá pasta získala správné elektrické a mechanické vlastnosti, je potřeba ji po natisknutí vytvrdit. Při klasickém použití se pasta vytvrzuje při 200 °C několik desítek minut na zařízení Voltera V-One. Základní materiál destiček (substrát) je ale vytvořen z polymerů, které takto vysokou teplotu nevydrží bez deformace. Proto jsem vzorky vytvrzoval při menší nastavené teplotě a po delší dobu. Jak už bylo zmíněno, různé materiály základních destiček mají různé vlastnosti. Z tohoto důvodu byla teplota pro vytvrzení zvolena podle materiálu, ze kterých byly vzorky vyrobeny. Na základě předešlého testování jsou použité teploty uvedeny v tabulce níže. Všechny vzorky byly vytvrzovány po stejnou dobu.

Tabulka s teplotou pece pro první sadu vzorků.

**Tabulka 6 - Parametry nastavení pece (1)**

Materiál	Teplota (°C)	Čas (h)
r-PLA	50	6
r-PET-G	70	6
r-PET	70	6

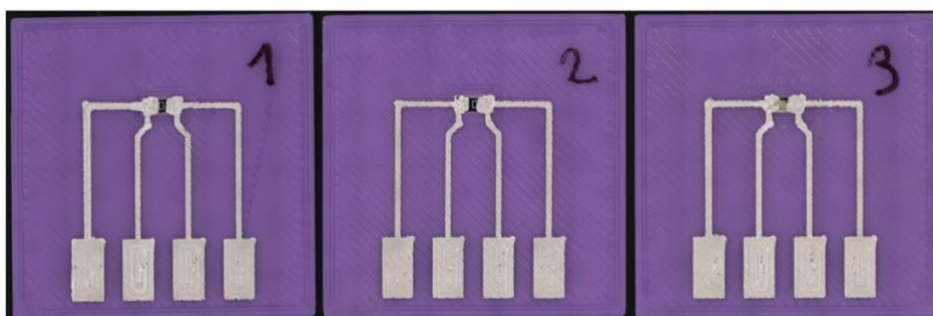
Tabulka s teplotou pece pro druhou sadu vzorků.

**Tabulka 7 - Parametry nastavení pece (2)**

Materiál	Teplota (°C)	Čas (h)
r-PLA	50	6
r-PET-G	50	6
r-PET	50	6

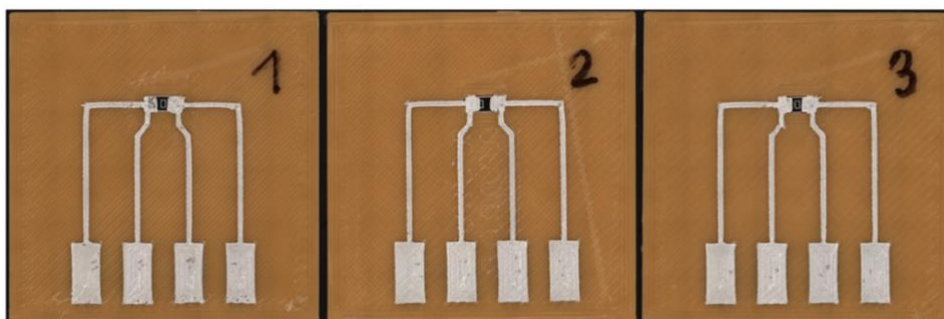
### 3.5.3. Zhotovené vzorky

Zhotovené vzorky s použitím materiálu r-PLA:



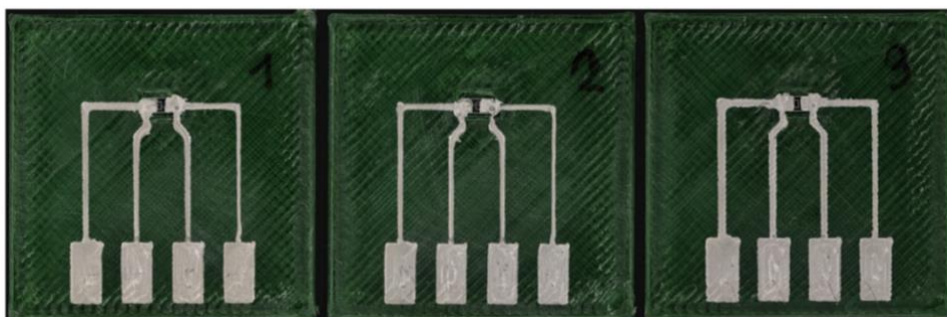
**Obrázek 17 - Vzorky pro měření přechodového odporu (r-PLA)**

Zhotovené vzorky s použitím materiálu r-PET-G:



**Obrázek 18 - Vzorky pro měření přechodového odporu (r-PET-G)**

Zhotovené vzorky s použitím materiálu r-PET:



**Obrázek 19 - Vzorky pro měření přechodového odporu (r-PET)**

### 3.6. Měření odporu na čtverec

Dalším zkoumaným tématem v této práci je závislost odporu vodivé cesty na základě substrátu, na kterém se vodivá cesta nachází. Různé materiály mají různě členitý povrch. K měření jsem opět využil čtyřvodičovou metodu a následně použil výpočet odporu na čtverec, abych mohl výsledné hodnoty mezi sebou jednoduše porovnat. Vytvořil jsem tedy deset vzorků pro každý z mých recyklovaných materiálů a poté deset vzorků na klasickém substrátu FR4.

Prvním krokem při výrobě vzorků pro měření odporu na čtverec bylo vytvoření 3D modelu destičky. Jedná se o rozměrově stejnou destičku, jako model pro měření přechodového odporu, ale bez místa pro rezistor. Po vytisknutí 3D modelu jsem opět potiskl vodivou cestu na zařízení Voltera V-One. V tomto případě nebyla nutná tak vysoká přesnost nastavení polohy destičky oproti předešlému vzorku. Důležité bylo pouze, aby se vodivá cesta na destičku celá vešla. Vodivou cestu jsem opět vytvořil v programu EAGLE. Zároveň jsem si zaznamenal potřebné hodnoty parametrů vodivé cesty pro budoucí výpočet odporu na čtverec. Důležité parametry:

Délka vodivé cesty:

$$l = 82 \text{ mm}$$

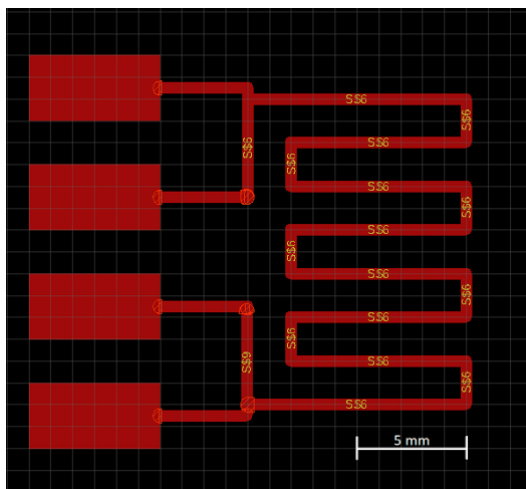
Šířka vodivé cesty:

$$w = 0,5 \text{ mm}$$

Pro vypočítání výsledného odporu na čtverec použiji vztah:

$$R_{\square} = \frac{R}{\frac{l}{w}} \quad (1)$$

Motiv vodivé cesty:



Obrázek 20 - Motiv vodivé cesty pro měření odporu na čtverec

Po potisknutí destiček vodivou cestou se musí pasta vytvrdit v peci. Parametry nastavení pece byly zvoleny následující:

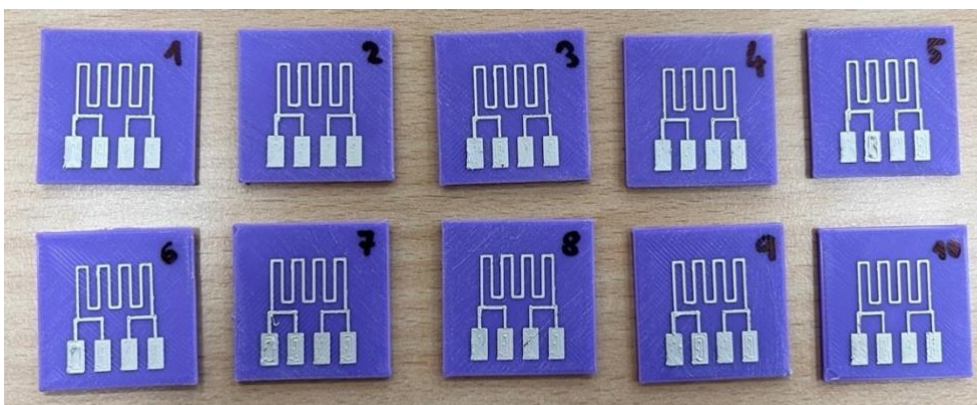
**Tabulka 8 - Parametry nastavení pece (3)**

Materiál	Teplota (°C)	Čas (hodin)
r-PLA	50	6
r-PET-G	50	6
r-PET	50	6

Pro vytvrzení vodivé cesty vyrobené na substrátu z FR4 jsem postupoval podle běžného postupu doporučeného výrobcem. Vytvrzení tedy probíhalo na zařízení Voltera V-One, kde byla destička vystavena teplotě 200 °C po dobu 50 minut a následně teplota plynule klesala na hodnotu 60 °C dalších 10 minut.

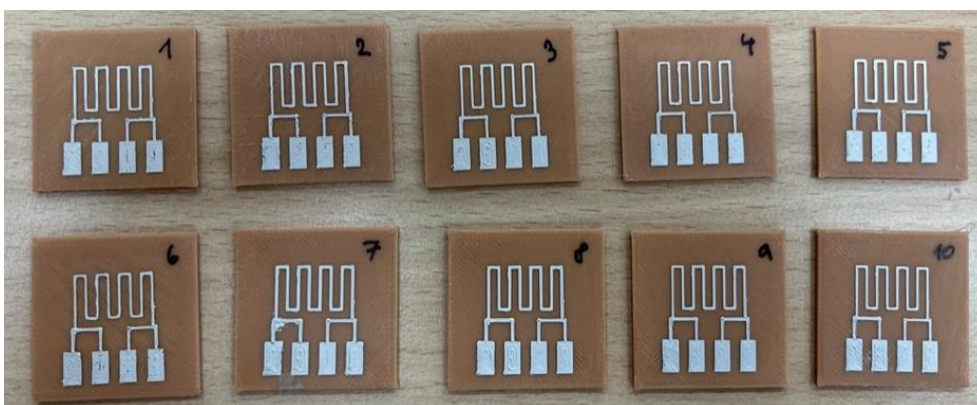
### 3.6.1. Zhotovené vzorky

Vzhled zhotovených PLA vzorků pro měření odporů na čtverec:



**Obrázek 14.** PLA vzorky proměření odporu na čtverec

Vzhled zhotovených PET-G vzorků pro měření odporů na čtverec:

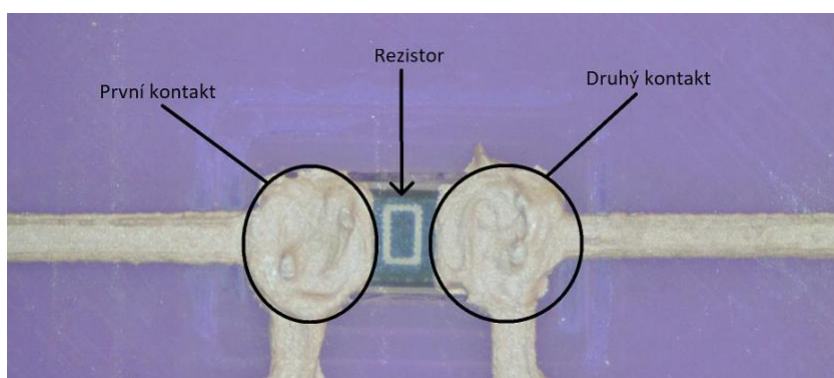


**Obrázek 15.** PET-G vzorky proměření odporu na čtverec

### 3.7. Výsledky měření přechodového odporu

Na výrobu prvních vzorků byla použita starší pasta, která dříve sloužila na jiné školní účely. Obsah tuby se stříbrnou pastou byl také během výroby vzorků zcela vypotřebován. Z těchto důvodů mohly být výsledky prvních vzorků horší než u následujících vzorků. Při výrobě druhých vzorků již byla použita nová stříbrná pasta a nové trysky.

Změřené hodnoty odporu vzorků neodpovídají přechodovému odporu jednoho kontaktu, ale odpovídají přechodovému odporu dvou kontaktů a rezistoru umístěného mezi nimi. Tato situace je zobrazena na obrázku níže (Obrázek 21), který byl pořízen mikroskopem:



Obrázek 21 - Kontakty rezistoru

Pro získání hodnoty jednoho přechodového odporu jsem hodnoty přepočítal podle vztahu (spolu s příkladem výpočtu):

$$R = \frac{\text{změřený odpor} - \text{odpor rezistoru}}{2} = \frac{97,54 - 15,56}{2} \text{ m}\Omega = 40,98 \text{ m}\Omega \quad (2)$$

Průměrné změřené a přepočítané hodnoty odporu pro první vzorky:

Tabulka 9 - Průměrné hodnoty odporu (1)

Materiál:	Změřený odpor (mΩ):	Přechodový odpor (mΩ):
r-PLA	97,54	40,98
r-PET-G	151,22	67,83
r-PET	227,23	105,83

Průměrné změřené a přepočítané hodnoty odporu pro druhé vzorky:

Tabulka 10 - Průměrné hodnoty odporu (2)

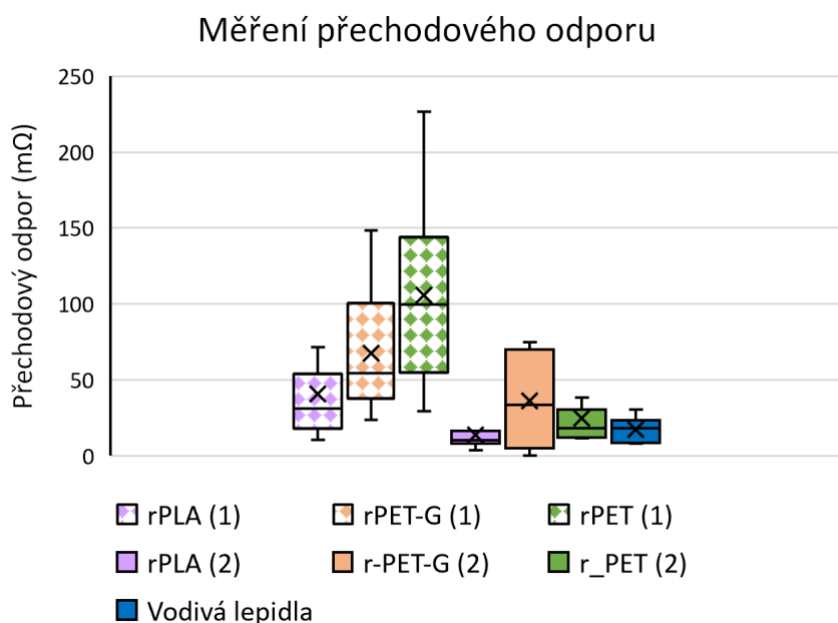
Materiál:	Změřený odpor (mΩ):	Přechodový odpor (mΩ):
r-PLA	43,08	13,76
r-PET-G	108,07	52,60
r-PET	64,53	24,50

Pro porovnání s klasickými metodami výroby desek plošných spojů jsem vytvořil stejné vzorky pomocí dvou nejběžněji používaných metod. V první metodě bylo použito vodivé lepidlo ELPOX ER 55 MN od firmy Amepox. Nanášení lepidla bylo provedeno pomocí dispenzoru a vzorky byly následně vytvrzované v peci vyhřáté na teplotu 150 °C po dobu 25 minut. V druhém případě byla použita pájecí pasta SAC305 NC257-2 od firmy AIM. Ta byla nanášena šablonovým tiskem. Ohřev pájecí pasty byl uskutečněn horkým vzduchem v horkovzdušné peci se třemi vyhřívanými pásmy (175 °C, 225 °C a 255 °C). Vodivá lepidla i pájecí pasty byly naneseny na substrát FR4 s plátovanou mědí. Výsledné hodnoty těchto metod jsou uvedeny v následující tabulce:

**Tabulka 11 - Výsledné hodnoty přechodových odporů**

Technologie:	Odpor (mΩ):
Pájení	1,12
Vodivá lepidla	14,91

Z výše uvedených hodnot (Tabulka 9, Tabulka 10) vytvořil graf (Obrázek 22). První vzorky jsou označeny jedničkou a mají tečkovanou výplň, druhé vzorky jsou označeny dvojkou a mají plnou výplň.



**Obrázek 22 - Porovnání velikostí přechodových odporů**

Z výsledných hodnot (Obrázek 22) je zřejmé, že nejlepšími hodnotami (nejnižší hodnoty) přechodového odporu dosahují vzorky vyrobené z materiálu r-PLA. To je podle mého názoru způsobené nejpřesnějším tiskem. Vzdálenosti kolem zapuštěné součástky (mezi součástkou a základní destičkou) jsou nejmenší a výsledný spoj provedený potiskem stříbrnou pastou je tak nejkvalitnější. Na výsledcích je zřejmé, že druhé vzorky s použitím nové pasty a trysek mají

menší hodnoty přechodových odporů. Do grafu jsou zároveň přidány hodnoty přechodového odporu vodivých lepidel, které dosahují podobných hodnot přechodového odporu jako druhé vzorky vyrobené novou alternativní metodou.

### 3.8. Výsledky měření odporu na čtverec

Ze změřeného odporu vodivé cesty lze vypočítat průměrný odpor na čtverec podle vztahu (1).  
Příklad výpočtu:

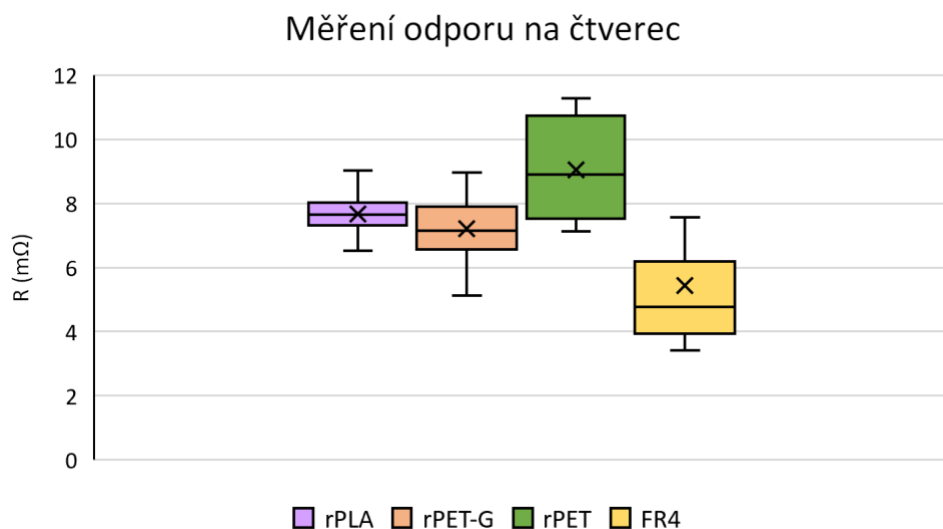
$$R_{\square} = \frac{R}{\frac{l}{w}} = \frac{1255,6}{\frac{82}{0,5}} \text{ m}\Omega = 7,656 \text{ m}\Omega \quad (3)$$

Průměrné změřené a přepočítané hodnoty odporu vodivých cest:

Tabulka 12 - Průměrné změřené hodnoty odporu (3)

Materiál:	Odpor cesty (mΩ):	Odpor na čtverec (mΩ):
r-PLA	1255,6	7,66
r-PET-G	1180,2	7,20
r-PET	1593,1	9,71
FR4 – stříbrná pasta	888,5	5,42

Pro větší přehled a lepší porovnání velikostí odporů vodivých cest při použití různých materiálů jsem vytvořil graf (Obrázek 23):



Obrázek 23 – Porovnání velikostí odporů na čtverec

Rozdílné hodnoty odporu na čtverec jsou pravděpodobně způsobené různou drsností povrchu materiálů. Čím je povrch hladší, tím lépe se nanáší stříbrná pasta a vytváří se homogennější vrstva. Materiál r-PET má největší drsnost povrchu kvůli horší tiskové kvalitě, a proto jsou hodnoty odporu na čtverec největší v porovnání s ostatními materiály.



### 3.9. Testování vzorků

Vlastnosti okolního prostředí, ve kterém se výrobky nacházejí, mají velký vliv na fungování a spolehlivost daných výrobků. Napodobení vlastností prostředí je efektivní cesta, jak přijít na případné nedostatky ve výrobě nebo na problematická místa výrobku. V elektrotechnice patří mezi nejčastěji testované vlastnosti odolnost vůči vlhkosti a teplotě. Při špatné odolnosti proti vlhkosti dochází nejčastěji ke korozi materiálů, neočekávaným zkratům a dalším problémům, se kterými je třeba se potýkat. Při špatné tepelné odolnosti dochází k různým deformacím, od deformací dvou přilehlých materiálů s různou tepelnou roztažností až po kompletní zničení vysokou teplotou. Takovým problémům je třeba předcházet a zjistit je nejlépe předtím, než jde výrobek do sériové výroby. K tomuto slouží nejrůznější testy.

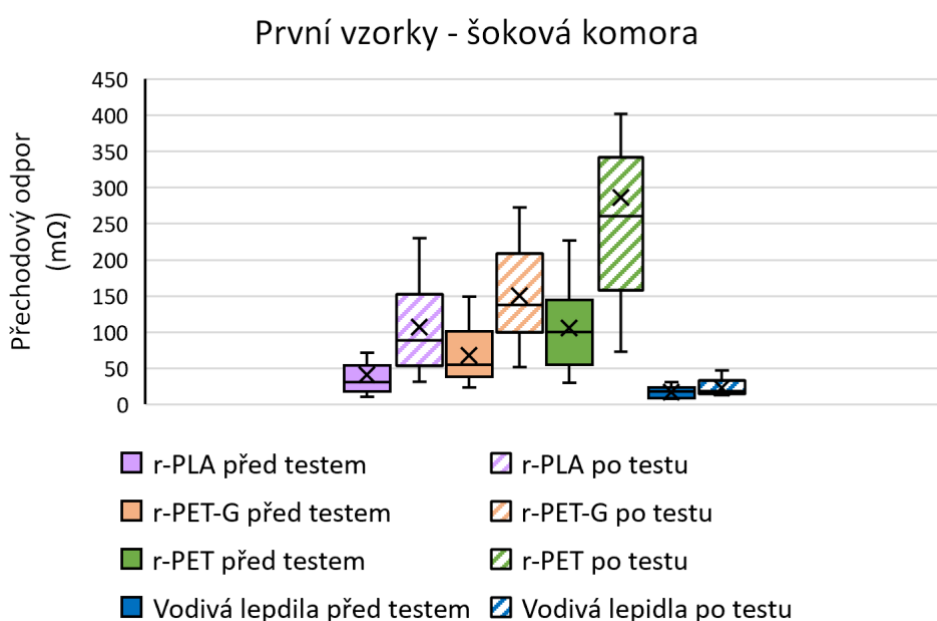
Vyrobené vzorky novou alternativní metodou byly podrobeny testům proti vnějším vlivům. Prvním testem byla teplotní odolnost v šokové komoře. Druhým testem byla zkouška zrychleného stárnutí ve vlhkostní komoře. Tyto testy byly provedeny na všech třech různých materiálech a následně byly výsledky mezi sebou porovnány.

#### 3.9.1. Testování v šokové komoře

První zhotovené vzorky pro měření přechodového odporu jsem použil k testování v šokové komoře. Tato zkouška slouží k testování chování výrobků při prudké změně teploty (šoku). Hlavním cílem tohoto testu bylo zjistit, zda nedojde k poškození vzorku vlivem změny teploty. Při velkém rozdílu teplotní roztažnosti substrátu a vodivé pasty může dojít k odtržení pasty od základní destičky nebo k přerušení vodivých cest vlivem popraskání pasty. Šoková komora se skládá ze dvou dobře od sebe izolovaných částí (komor) a košíku se vzorky, který mezi těmito prostory přejíždí. Každá z těchto komor je nastavená na jinou teplotu, aby výrobky během přechodu čelily teplotnímu šoku. Teploty by měly být zvoleny podle toho, do jakých podmínek bude výrobek určen k použití. Pro mé testovací vzorky jsem zvolil teplotu 50 °C pro teplejší komoru a -20 °C pro studenější komoru. To hlavně z důvodu teploty skelného přechodu materiálu r-PLA, která je 57,3 °C [31]. Nemělo by smysl překračovat tuto teplotu, protože by došlo k jisté deformaci. Vzorky tedy čelily změně teploty ve velikosti  $\Delta T = 70$  °C. Celá zkouška v mém případě obsahovala 1 000 cyklů, což odpovídá běžné hodnotě pro tyto typy testů. Každý jeden cyklus se skládal z 15 minut v teplé komoře a 15 minut v komoře studené. Přesun z jedné komory do druhé je proveden během několika málo vteřin. Doba jednoho cyklu je 30 minut a doba celé zkoušky je v mém případě 500 hodin. Vzorky byly během této doby vystaveny 2 000 prudkých teplotních rozdílů. Z důvodu malé hmotnosti mých vzorků docházelo k jejich pohybu v košíku během přejíždění mezi komorami, nicméně nepředpokládám, že by to na výsledek mělo nějaký vliv.

### 3.9.2. Výsledky testování v šokové komoře

Z naměřených hodnot (Obrázek 24) je zřejmé, že došlo ke zvětšení přechodového odporu, a to pravděpodobně z namáhání spoje během prudkých změn teplot. K funkční poruše nedošlo a k vícenásobné změně přechodového odporu došlo pouze u jednoho vzorku ze třiceti, kdy velikost odporu byla devítinásobně větší, než průměrná velikost přechodového odporu ostatních vzorků ze stejného materiálu. Pájené vzorky nebyly testem v šokové komoře téměř vůbec ovlivněny a jejich hodnota přechodového odporu se před testem i po testu pohybovala kolem 1,12 mΩ. Po lepší viditelnost a porovnání s původními hodnotami přechodového odporu jsem sestrojil graf:



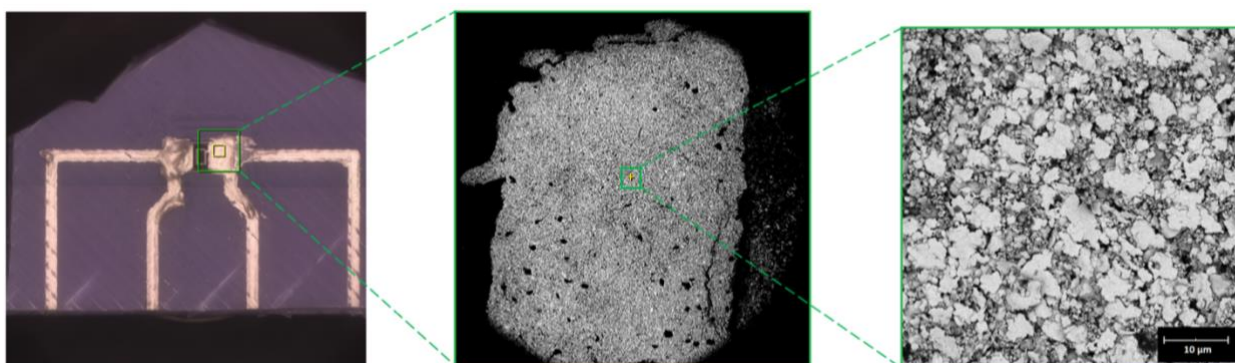
Obrázek 24 - Výsledky přechodových odporů po testování (1)

### 3.9.3. Elektronová mikroskopie

Při dalším vyhodnocování odolnosti nebo kvality spojů je potřeba se podívat na strukturu vzorků, popřípadě změnu struktury vzorků po testování. K jedné z metod vyhodnocování patří mikroskopování. Při použití klasického světelného mikroskopu ale detailní strukturu vzorků nelze prověřit. Světelné fokální mikroskopy mají omezenou rozlišovací schopnost ohybem světla. Aby byla struktura lépe prověřena, bylo potřeba zvolit jinou metodu. V elektrotechnice se na tyto účely používá elektronová mikroskopie. Při dalším vyhodnocování kvality a odolnosti jsem tedy použil elektronový mikroskop. Konkrétně byl využit elektronový mikroskop Phenom Pro X. Zde byly prověřeny vzorky jak před testem, tak po testu v šokové komoře. Abych mohl vzorky sledovat v elektronovém mikroskopu, musel jsem zmenšit jejich velikost. Pomocí kleští jsem vystříhal potřebná místa, která jsem chtěl prověřit. Byly to zejména kontakty a vodivé cesty.

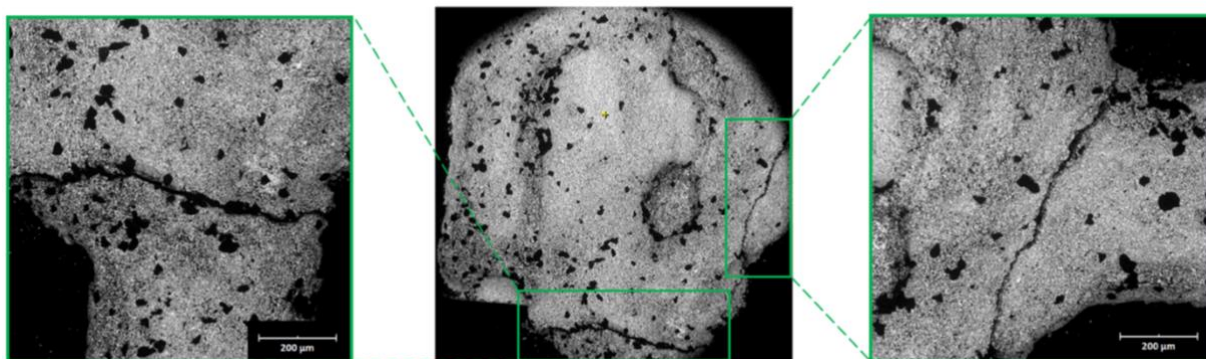
Jako první jsem prověřil čerstvé vzorky, které nebyly testovány. Na těchto vzorcích jsem místy našel korozi stříbra, a to i u vzorků, které byly jenom týden staré. Předpokládám, že korozi stříbra mohlo urychlit nevhodné zacházení se vzorky. Například nepoužíváním rukavic při manipulaci se vzorky. Soli z potu na ruku mohly urychlit proces koroze.

Snímky vzorků před testem z elektronového mikroskopu jsou uvedeny níže (Obrázek 25). Na prvním, fokálním snímku vlevo je vystřihnutá část vzorku. Na prostředním snímku je kontakt pod elektronovým mikroskopem. Černé tečky jsou pravděpodobně různé nečistoty, které se nepodařilo sfouknout stlačeným vzduchem. Snímek vpravo je 5000krát zvětšený povrch pasty, na kterém si lze všimnout celé struktury pasty. Jsou zde vidět jednotlivé stříbrné šupinky a mezi nimi nanočástice, které zlepšují vodivost pasty.



**Obrázek 25 - Elektronová mikroskopie – vzorky před testem**

Na další kombinaci snímků z elektronového mikroskopu jsou vzorky ze stejného materiálu po testování v šokové komoře (Obrázek 26). Na prostředním snímku je opět uveden celý kontakt pod elektronovým mikroskopem. Z tohoto snímku je zřejmé, že se na povrchu vyskytuje výrazně více nečistot. Na krajních obrázcích jsou 500krát přiblížené hranice kontaktů a vodivých cest. Zde jsou vidět velké praskliny po celé délce kontaktu. Zvětšení přechodového odporu vzorků pravděpodobně způsobily tyto velké praskliny. Při dalším detailním pozorování elektronovým mikroskopem jsem narazil na další mikroskopické praskliny přímo na povrchu pasty, které byly několik desítek mikrometrů dlouhé a šířka byla řádek desítek nanometrů. I na těchto vzorcích se objevovala koroze stříbra.



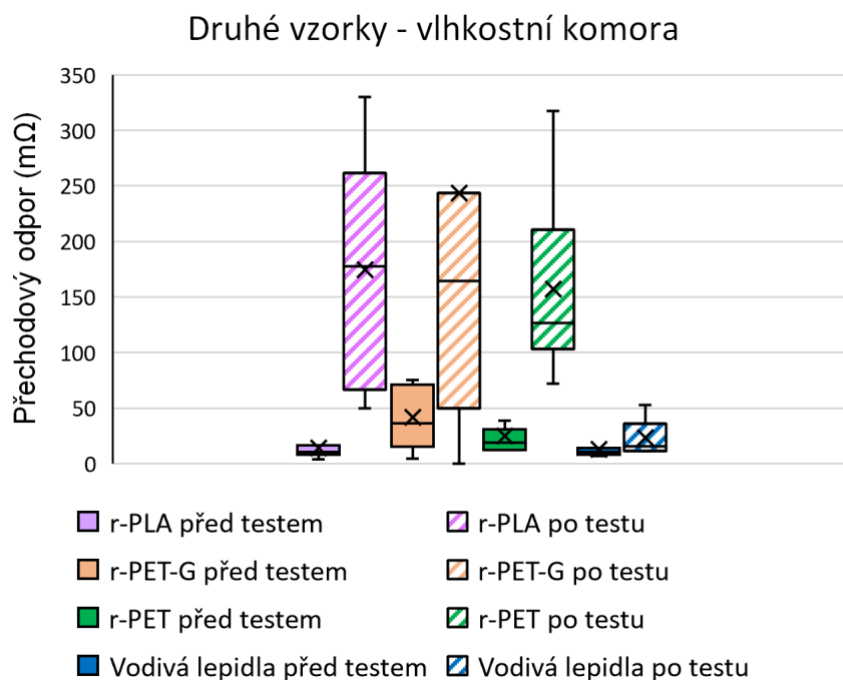
**Obrázek 26 - Elektronová mikroskopie – vzorky po testu**

### 3.9.4. Testování ve vlhkostní komoře

Druhým testem, kterým jsem vyrobené vzorky prověřil, byl test ve vlhkostní komoře. Tento test slouží k prověření funkčnosti vzorků v méně obvyklých podmínkách. Někdy bývají podobné testy označovány jako testy zrychleného stárnutí. Hlavním cílem tohoto testu je prověřit chování kontaktu provedeného alternativní metodou výroby desek plošných spojů v prostředí s vysokou hodnotou vlhkosti vzduchu a zjistit, jak budou reagovat na zvýšený obsah vodní páry ve vzduchu. Testovací vzorky byly vloženy do vlhkostní komory, která byla nastavena na následující parametry: teplota vzduchu 50 °C a relativní vlhkost vzduchu 85 %. Vzorky byly těmito podmínkám vystaveny po dobu 250 hodin.

### 3.9.5. Výsledky testování ve vlhkostní komoře

Z výsledných změřených hodnot odporů vzorků si lze všimnout, že vzorky po testování mají vyšší hodnotu přechodového odporu. Z přepočítaných hodnot přechodových odporů jsem sestrojil graf (Obrázek 27). Nejvýraznější změny přechodového odporu měl materiál r-PET-G. U téměř poloviny vzorků byly hodnoty přechodového odporu o několik řádů vyšší a byly proto označeny za kompletně zdeformované (jejich hodnoty přechodového odporu nejsou zahrnuty v grafu) (Tabulka 13). U materiálu r-PLA a r-PET dosahoval pouze jeden vzorek řádově vyššího odporu. Z výsledků testování v šokové komoře lze tedy usuzovat, že nejhůře na vlhkost reaguje materiál r-PET-G.



Obrázek 27 - Výsledky přechodových odporů po testování (2)

**Tabulka 13 - Tabulky s nefunkčními vzorky**

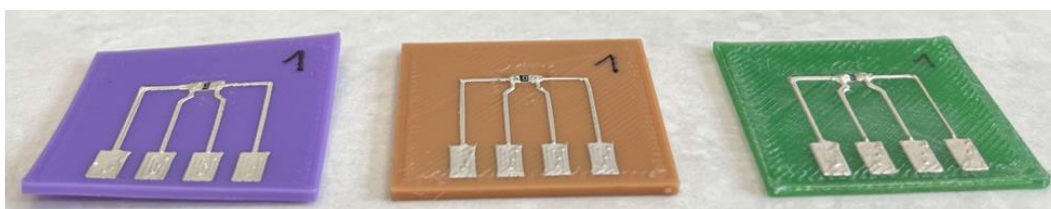
<b>Materiál</b>	<b>Počet nefunkčních vzorků (ks)</b>	<b>Procentuální vyjádření</b>
r-PLA	1	10 %
r-PET-G	5	50 %
r-PET	0	0 %

Vzorky, u kterých byl naměřen přechodový odpor větší než 500 mΩ, byly označeny jako nefunkční. Jak už bylo zmíněno výše, nejhůře dopadl materiál r-PET-G. Celkem pět vzorků (50 %) z tohoto materiálu bylo označeno za nefunkční.

Do vlhkostní komory byly zároveň vloženy i vzorky s použitím vodivých lepidel a pájecí pasty. Pájené vzorky nebyly opět ani testem ve vlhkostní komoře téměř vůbec ovlivněny a jejich hodnota přechodového odporu se před testem i po testu pohybovala kolem 1,05 mΩ.

Výsledky dopadly podle očekávání. Vzorky z r-PLA měly nejlepší kvalitu tisku, díky tomu měly i nejlepší kvalitu nanesené stříbrné pasty, a proto pravděpodobně dopadly lépe než vzorky z r-PET-G. Z použitých materiálů má r-PET největší teplotní odolnost a z tohoto důvodu se nejspíš žádný vzorek ani nepřiblížil hranici 500 mΩ (hranice označení za nefunkční).

U materiálu r-PLA (fialová barva) nedošlo během testování pouze ke zvětšení přechodového odporu, ale došlo i na mechanické poškození v podobě zkroucení vzorků (Obrázek 28). Mechanicky deformované byly po testování všechny vzorky z tohoto materiálu. Zkroucení vzorků bylo pravděpodobně způsobeno teplotou blízkou se teplotě skelného přechodu r-PLA v kombinaci s vysokou hodnotou vlhkosti vzduchu, ve kterém se vzorky nacházely.



**Obrázek 28 - Prohnutí r-PLA**

### **3.10. Výroba demonstrativního obvodu**

Možnost použití této alternativní metody výroby desek plošných spojů jsem se pokusil demonstrovat výrobou jednoduchého obvodu, který obsahoval velikostně běžně používané součástky v dnešní elektrotechnice. Jednalo se o klasický blikáč s jednou elektroluminiscenční diodou. Model blikáče byl inspirován originálním testovacím modelem blikáče od společnosti Voltera Inc. Tento model je tedy odzkoušený a není třeba dopočítávat velikosti odporů a velikost kondenzátoru. Není nutné ani testování teoretické funkčnosti obvodu.



Obrázek 29 - Ilustrace originálního obvodu [32]

### 3.10.1. Proces výroby blikače

Oproti originálnímu obvodu obsahuje vyrobený blikač pouze jednu diodu namísto tří. Kvůli tomu bylo nutné přepočítat i velikost předřadného odporu, aby diodou netekl nebezpečně velký proud. Další změna oproti klasickému obvodu je v zapuštění součástek a čipu NE555. Tento čip se musí při zapuštění „otočit“ o 180°, aby mohlo dojít ke kontaktování s jeho vývody. Kvůli tomu se návrh musí „stranově převrátit“, aby došlo ke správnému propojení čipu NE555 s rezistory, diodou a kondenzátorem. To je ale poslední změna oproti originálnímu testovacímu modelu.

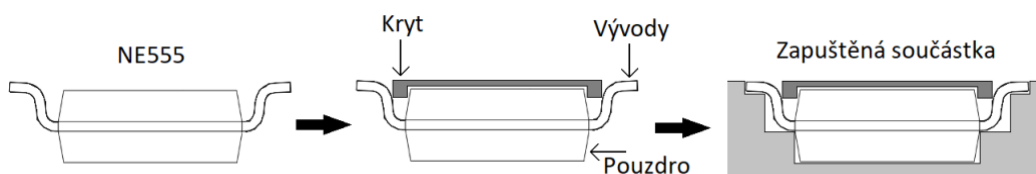
Jednoduchý obvod blikače se tedy skládá z následujících součástek:

- Rezistor 390  $\Omega$ , SMD, pouzdro 1206
- Rezistor 100 k  $\Omega$ , SMD, pouzdro 1206
- Rezistor 47 k  $\Omega$ , SMD, pouzdro 1206
- Keramický kondenzátor 10  $\mu\text{F}$ , 25 V, pouzdro 1206
- Časovač NE555, 500 kHz, 16 V

Prvním krokem při výrobě blikače je návrh 3D modelu základní destičky. Na modelování jsem opět použil program Fusion 360. Model jsem vytvořil tak, aby do něj bylo možné zapustit jednotlivé součástky s co nejmenší mezerou mezi součástkami a destičkou. Při výrobě bylo zjištěno, že s klasickou tryskou 0,4 mm na 3D tiskárně nejsem schopný dosáhnout požadované přesnosti modelu kolem čipu NE555, protože vzdálenost mezi vývody pouzdra je na tuto přesnost příliš malá při použití 0,4 mm trysky. Naskytla se dvě řešení. Prvním je provést tisk modelu vertikálně. Tímto způsobem bych dosáhl větší přesnosti tisku v požadovaném místě vývodů pouzdra za cenu horších mechanických vlastností destičky. Druhou možností bylo použít menší trysku 0,25 mm a tím si výrazně prodloužit délku tisku. Rozhodl jsem se pro druhou variantu, abych zachoval stejné mechanické vlastnosti jako u testovacích vzorků. Po pár testovacích vzorcích jsem dosáhl požadovaných výsledků v dostatečné kvalitě s materiálem r-PLA a r-PET-G. Materiál r-PET není vhodný pro detailní tisk. Jak už bylo zmíněno dříve, zahřátí

a pomalém chlazení materiálu r-PET vede ke krystalizaci [29] a dochází k ucpávání trysky. Při použití trysky s menším průměrem je materiál v trysce delší dobu zahřátý a rychleji krystalizuje. Z tohoto důvodu nebylo možné vytvořit vzorek z materiálu r-PET a pro model blikače byly použity pouze materiály r-PLA a r-PET-G.

V modelovém příkladu je potřeba vést vodivé cesty přes čip NE555, tedy ho „přetisknout“ vodivými cestami. Při testování této myšlenky jsem zjistil, že pouzdro nemá ideální tvar na tuto technologii a zapuštění vzorku není dostatečné na následný potisk vodivých cest. Konkrétně jde o vzdálenost mezi vývody pouzdra a pouzdrem samotným na spodní straně. Tato vzdálenost je příliš velká a vodivé cesty v tomto případě nejsou celou dobu v kontaktu s povrchem. Tuto situaci jsem vyřešil vytvořením nového modelu krytu, který překryje pouzdro a vytvoří rovnoměrný povrch mezi vývody a pouzdrem čipu NE555. Pro lepší pochopení je tato situace zobrazena na obrázcích níže (Obrázek 30). Na levé straně je půdorys čipu, kde je vidět problémová mezera. Uprostřed je použit kryt pro vytvoření rovnoměrného povrchu. Díky použití krytu je zároveň časovač lépe a pevněji zapuštěn do destičky viz. obrázek vpravo.



**Obrázek 30 - Kryt pouzdra NE555**

Po vytisknutí je potřeba základní destičku osadit součástkami. Aby zapuštěné součástky lépe držely, použil jsem klasické tubové lepidlo a potřel spodní stranu součástek. Při osazování je potřeba dbát na polaritu diody a na správné osazení čipu NE555, aby byly vývody správně propojeny s vodivými cestami. Další částí je potisknutí vzorku vodivými cestami. Tyto cesty jsem nejprve na základě 3D modelu základní destičky navrhl tak, aby bylo uskutečněno všechno potřebné propojení mezi součástkami a zapojení bylo funkční. Bylo potřeba, aby model vodivých cest dokonale odpovídal 3D modelu destičky. Návrh vodivých cest byl opět vytvořen v programu EAGLE. Po vytvoření modelu jsem na zařízení Voltera V-One potiskl základní destičku vodivými cestami. Posledním krokem ve výrobě tohoto blikače je vytvrzení vodivých cest v peci. Parametry vytvrzování jsou uvedeny v následující tabulce:

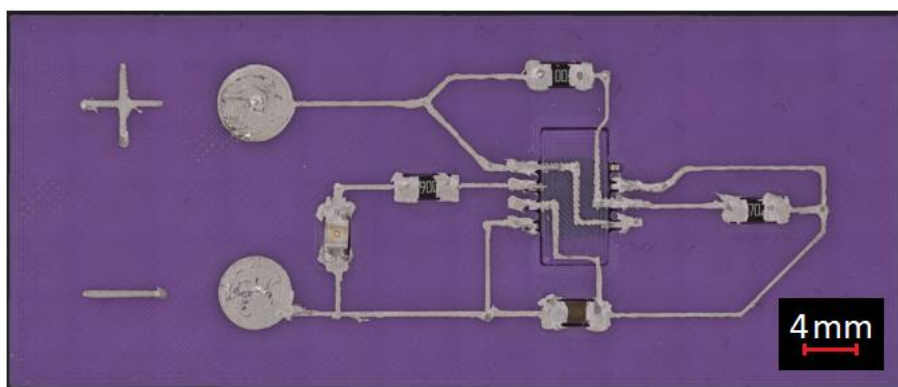
**Tabulka 14 - Parametry nastavení pece (4)**

Materiál	Teplota (°C)	Čas (hodin)
r-PLA	50	5
r-PET-G	60	5

### 3.10.2. Výsledné provedení blikače

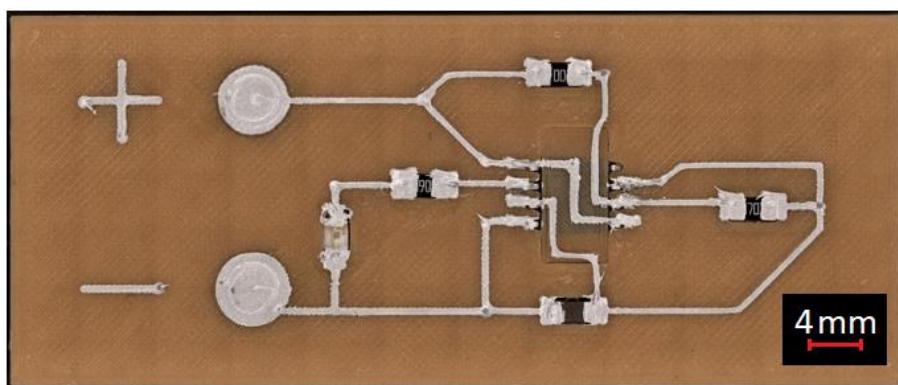
Vytvořil jsem dvacet vzorků jednoduchého blikače. Deset bylo vyrobeno z materiálu r-PLA a deset bylo vyrobeno z materiálu r-PET-G. Pro ověření funkčnosti jsem použil klasickou 9 V baterii, kterou jsem použil jako zdroj napětí. Kontakt je tvořen pouze přiložením na dva kruhy, které byly vytvořeny z vodivé pasty. Vzdálenost mezi kruhy je stejná jako je rozteč běžných 9 V baterií a nejsou tak potřeba žádné další připojovací kabely. Pro otestování funkčnosti bylo zjištěno, že ne všechny blikače jsou funkční. Z materiálu r-PLA bylo funkčních 9 z 10 vzorků, u materiálu r-PET-G bylo funkčních pouze 5 z 10 vzorků. Celkově bylo funkčních 14 z 20 vzorků. Pustil jsem se proto do diagnostiky pomocí mikroskopu a multimetru. U pěti nefunkčních vzorků jsem našel přerušení některé z vodivých cest. Tyto chyby jsem manuálně opravil stříbrnou pastou a vzorky opět nechal vytvrdit v peci na další dvě hodiny. Jeden ze vzorků se mi opravit nepodařilo, protože jsem při diagnostice nenalezl žádnou chybu. Jednalo se o vzorek z materiálu r-PET-G a tento vzorek považuji za nefunkční. Výsledné provedení blikače:

Z materiálu r-PLA:



Obrázek 31 - Blikač r-PLA

Z materiálu r-PET-G:

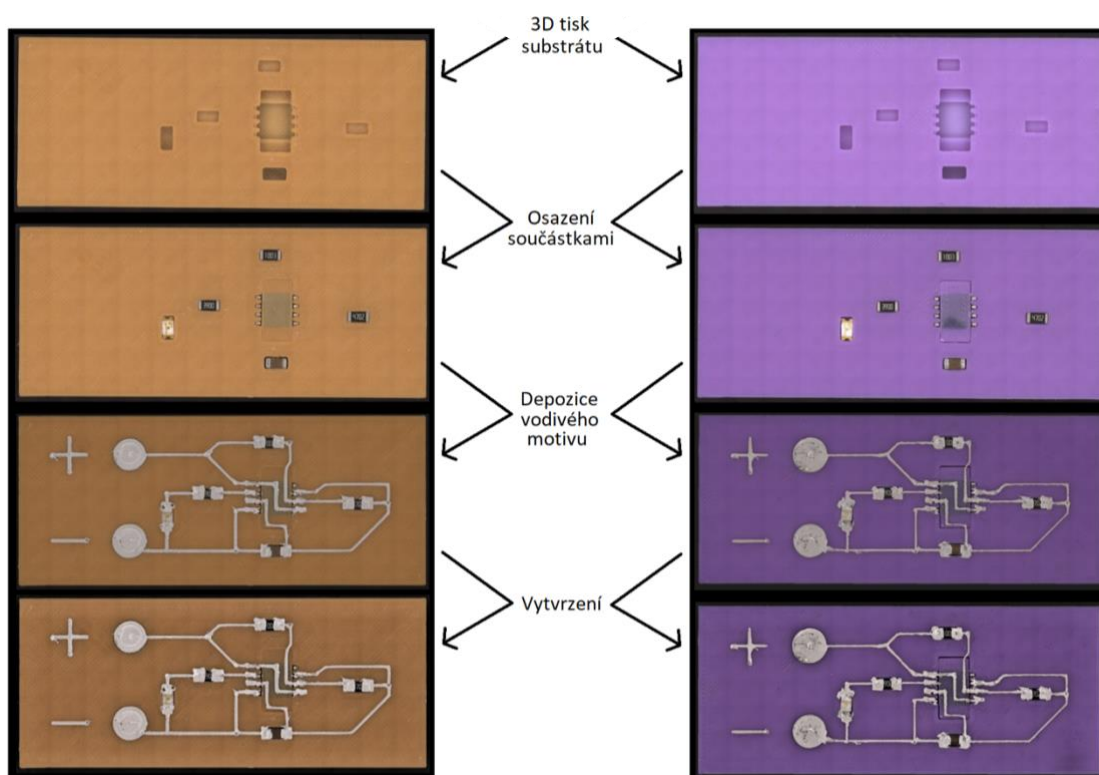


Obrázek 32 - Blikač r-PET-G



### 3.10.3. Ilustrace výroby blikáče

Na schématické ilustraci (Obrázek 33) jsou vyznačeny hlavní čtyři kroky při výrobě jednoduchého obvodu v podobě blikáče. Na levé straně je na výrobu základní destičky (substrátu) použit materiál r-PET-G a na pravé straně je použit materiál r-PLA. V prvním kroku se vytiskne model základní destičky z recyklovaného materiálu (r-PET-G, r-PLA). Ve druhém kroku se vloží součástky do předem připravených míst. Třetím krokem je depozice vodivého motivu, který odpovídá modelu základní destičky. Posledním krokem je vytvrzení stříbrné pasty ve vytvrzovací peci.



Obrázek 33 - Ilustrace výroby DPS

## 3.11. Diskuse k výrobě DPS

Výroba desek plošných spojů novou alternativní metodou má mnoho úskalí a pro širší využití v sériové výrobě je ještě potřeba otestovat a vyřešit hned několik nedokonalostí.

V této práci je uvedena výroba s použitím tří různých recyklovaných polymerů pro tvorbu základní destičky (r-PLA, r-PET-G a r-PET). Jeden z materiálů (r-PET) se v současnosti jeví jako nepoužitelný z důvodu horší kvality tisku. Špatné tiskové vlastnosti má r-PET kvůli své krystalizaci při zahřátí na vysokou teplotu a pomalém chlazení [29]. Tato situace nastává

u 3D tisku při použití trysky s malým průměrem (0,25 mm). Při použití trysky s větším průměrem (0,4 mm) už lze dosáhnout bezproblémového tisku, ale tisk nedosahuje požadované kvality. Nejlepší tiskové vlastnosti z použitých materiálů měla r-PLA. Tisk byl nejpřesnější a povrch byl nejhladší. Drsnost povrchu vzorků je ale v porovnání s materiálem FR4 pořád výrazně vyšší. Pokud by byla vyžadována větší kvalita povrchu (menší drsnost), je možné využít například broušení nebo leštění a tím lze dosáhnout hladšího povrchu. I tak při použití materiálu r-PLA nelze dosáhnout stejné kvality a přesnosti jako při klasické výrobě. Rozsah použitelných součástí je tedy menší – nelze použít rozměrově nejmenší součástky.

Další problémy spočívají v použití stříbrné pasty. Depozice stříbrné pasty slouží k vytvoření vodivých cest a zároveň ke kontaktování součástí. Použitá stříbrná pasta vykazovala po testech v šokové a vlhkostní komoře jisté formy deformace, například praskliny (Obrázek 26). Je však možné, že jiné, odolnější pasty by mechanickému namáhání odolaly lépe. Například přímo kanadská společnost Voltera Inc prodává flexibilní vodivou pastu, která by měla mít lepší ohybové vlastnosti. Použití pasty, která se vytvrzuje při nižších teplotách, může být další cesta k lepším výsledkům (lepším hodnotám elektrické vodivosti). Recyklované polymery nesou vytvrzování při vyšších teplotách, a proto byla použita nižší teplota po delší dobu. Jiným řešením by mohl být další krok ve výrobě v podobě zatisknutí. Po osazení a depozici vodivého motivu by se povrch desky plošného spoje přetiskl dalšími vrstvami z recyklovaných polymerů. Díky tomu by došlo ke kompletnímu zapouzdření jak součástí, tak vodivých cest, které by pak nebyly vystaveny žádným vnějším vlivům. Povrch desky plošného spoje by bylo také možné potříť různými laky. Tento krok by ale zhoršil ekologii celého procesu.

Na druhou stranu kontaktování pomocí nové alternativní metody dosáhlo podobných hodnot přechodového odporu jako při použití vodivých lepidel. Druhé vzorky z materiálu r-PLA měly hodnoty přechodového odporu dokonce lepší (nižší hodnotu odporu) než vzorky vyrobené pomocí vodivých lepidel. Dá se předpokládat, že při zdokonalení vytvrzovacích parametrů (teplota a čas) spolu s vhodně použitou stříbrnou pastou může vést ke stejným, či dokonce lepším hodnotám přechodového odporu než u vodivých lepidel (Obrázek 22). Zároveň při zdokonalení celého výrobního procesu by tato nová technologie mohla dosahovat stabilních hodnot přechodového odporu.

Vývoj nové technologie byl použit pouze na výrobu jednovrstvých desek plošných spojů. Tato technologie má ale potenciál i pro výrobu oboustranných případně vícevrstvých desek plošných spojů. V případě oboustranných DPS se vodivých motiv jednoduše nanese i na spodní stranu základní destičky (po vytvrzení vodivého motivu na vrchní straně). Propojení vrchní a spodní strany by mohlo fungovat podobně jako u klasických metod – pomocí otvorů v DPS. Otvory by se nemusely vrtat, jelikož je možné je navrhnout už ve 3D modelu. Elektrické propojení

by se mohlo realizovat vložením kovových válečků do otvorů nebo pokovením otvorů samotných. Vícevrstvé desky plošných spojů by teoreticky bylo taky možné vyrobit pomocí této alternativní metody. Hotová jednovrstvá deska plošného spoje by se přetiskla další vrstvou z recyklovaného polymeru na 3D tiskárně a poté se osadila dalšími součástkami. Následně by se na vrstvu polymeru nanesl další vodivý motiv ze stříbrné pasty a po vytvrzení by se vytvořila druhá elektricky funkční vrstva. Při opakování procesu (přetisknutí, osazení, depozicí vodivého motivu a vytvrzení) by se vytvořila další vrstva. Součástky by tak byly kompletně zapouzdrazené.

Desky plošných spojů vyrobené v této práci byly vytvořeny z recyklovaných materiálů. Po ukončení používání lze tyto desky následně znovu recyklovat. Stříbro z vodivého motivu a kontaktů lze oddělit chemickými procesy [33]. Součástky se následně dají oddělit buď ručně, nebo automatickou demontáží [14]. Poté už zbývá pouze základní destička, vyrobená z recyklovaných polymerů. Další recyklace těchto polymerů je možná hned několika způsoby. Materiál r-PLA lze recyklovat mechanickým nebo chemickým způsobem [34]. Tento materiál lze také ekologicky zpracovat pomocí kompostování [34]. Tato metoda nevede k možnosti opětovného použití materiálu, ale pouze k jednoduchému zpracování, které nezatěžuje životní prostředí. Materiál r-PET se jevil jako špatně použitelný pro tuto novou alternativní metodu, jak už bylo zmíněno výše. Využití odpadního PET pro tuto technologii by mělo být dalším předmětem výzkumů.

## 4. Ekonomický model

---

V ekonomické části uvažuji nad modelovým příkladem fiktivní firmy, která kompletuje elektroniku do různých zařízení a uvažuje nad rozhodnutím, jestli se nadále vyplatí nakupovat hotové desky plošných spojů od jiných společností, nebo si raději bude celé desky plošných spojů vyrábět sama ekologickou alternativní metodou. Firma běžně nakupuje nevýkonové desky plošných spojů do nejrůznějších menších spotřebičů a zařízení na základě poptávky od odběratelů. Firma zaměstnává zhruba 10 až 15 zaměstnanců a na kompletaci výrobků disponuje dvěma linkami a několika vyhřívacími pecemi pro nejrůznější potřeby během výroby. Na vyšetření funkčnosti a kvality společnost disponuje dostatečným množstvím multimetrů a fokálních mikroskopů. Nejčastěji vyrábí málo rozměrná elektronická zařízení jako například ovladače nebo vysavače.

Modelový příklad spočívá v obdržení nové nabídky pro danou fiktivní společnost. Jedná se o dlouhodobou zakázku v rozsahu sedmi roků, během kterých má být dodáno 1000 (1 500 nebo 2 000) kusů výrobků obsahujících jednoduchý blikáč. Potřebné blikáče mají rozměry 35 × 60 cm a skládají se ze tří rezistorů, jednoho kondenzátoru, časovače NE555 a diody. Při takové nabídce firma běžně nakupuje hotovou desku plošného spoje, další potřebné materiály na výrobek a kompletaci provádí sama. Aktuálně však přemýšlí nad variantou vlastní výroby blikáče pomocí nové alternativní metody.

Pro analyzování jednotlivých uvažovaných variant sestavím ekonomický model, který porovná jak variantu vlastní výroby desek plošných spojů v podobě blikáčů, tak i stávající cestu nákupu desek plošných zdrojů od externího dodavatele. U vlastní výroby desek plošných spojů budou propočítány dvě situace, které se budou lišit použitým materiálem na výrobu základní desky (substrátu). Tyto dvě varianty budou porovnány s variantou nákupu desek plošných spojů od dodavatelů. Zbytek procesu výroby výrobku je pro všechny tři varianty stejný, a proto zde nebude propočítán.

Protože se firma svých zaměřením již výrobě věnuje, dodatečné navýšení ampérové hodnoty jističů není vyžadováno. Nutné bude pouze vymezení pracovního prostoru, investice do nákupu nutných zařízení pro výrobu desek plošných spojů a proškolení jednoho zaměstnance. Místnost, ve které bude zaměstnanec pracovat, je používána i k jiným potřebám, a proto se nebudou měnit náklady na vytápění, popřípadě ventilaci vzduchu nebo klimatizaci. Budu se zabývat vstupními náklady, provozními náklady a zhodnocením výhodnější alternativy pro danou firmu. Všechny ceny materiálů, trysek nebo 3D tiskárny budou uvedeny včetně DPH.

## 4.1. Vstupní náklady

Mezi vstupní náklady uvažuji investiční náklady na koupi zařízení potřebných ve výrobním procesu. Jedná se o:

- 3D tiskárna Original Prusa MK3S+
- Voltera V-One

Jako 3D tiskárnu budu používat stavebnici Original Prusa i3 MK3S+, která se prodává za 20 990 Kč [4]. Jedná se o velice kvalitní tiskárnu od českého výrobce s malou poruchovostí, velkou spolehlivostí a dobrou podporou. Tato tiskárna bude využita na tisk desek plošných spojů z recyklovaných materiálů. Dalším vstupním nákladem je zařízení Voltera V-One, která se prodává za 5 199,98 \$ [35] a to podle kurzu ČNB ze dne 18. 11. 2022 odpovídá 122 163,13 Kč. Toto zařízení bude sloužit k potisknutí vodivých cest. Vytvrzovací pec do vstupních nákladů není započítána. Firma vytvrzovacími pecemi již disponuje a používá je k nejrůznějším potřebám během výroby poptávaných výrobků, například k nahřátí plastových dílů nebo k vytvrzování lepidel. Celkové vstupní náklady jsou tedy:

$$n_{vstupni} = n_{3Dtiskarna} + n_{voltera} = 20\,990 + 122\,163,13 = 143\,153,13 \text{ Kč} \quad (4)$$

## 4.2. Náklady na provoz a výrobu

Náklady na provoz a výrobu zahrnují všechny variabilní náklady, které souvisí s výrobou testovacích vzorků. Tyto náklady můžeme rozdělit na několik skupin:

- Náklady na materiál
- Náklady na součástky
- Náklady na zaměstnance
- Náklady na elektrickou energii
- Náklady na opravy zařízení
- Náklady na nefunkční blikáče (zmetkovitost)

### 4.2.1. Náklady na materiál

Pro výrobu blikáčů jsem na 3D tiskárně použil dva různé filamenty a na potisknutí vodivých cest jsem následně použil jednu stříbrnou pastu. Materiály pro 3D tisk jsou z recyklovaného materiálu, který zároveň umožňuje i další recyklaci. Prvním použitým materiálem byla recyklovaná r-PLA – 1 kg (fialová barva), které bylo zakoupeno za 469 Kč [27]. Druhým materiálem je recyklovaný r-PET-G – 0,75 kg (oranžová barva), který byl zakoupeno za 379 Kč [28].

Oba tyto materiály byly zakoupeny v internetovém obchodě EkoMB, který se specializuje na výrobu recyklovaných filamentů do 3D tiskáren.

**Tabulka 15 - Porovnání cen jednotlivých materiálů**

Materiál:	Nakoupené množství (kg):	Nákupní cena (Kč):	Cena za kg (Kč):
r-PLA	1	469	469
r-PET-G	0,75	379	505

V programu typu slicer je možno vyčíst, kolik je potřeba materiálu pro jednotlivé vzorky blikačů. Pro blikač vyrobený z recyklovaného r-PLA je potřeba 2527,7 mm<sup>3</sup>, což odpovídá 3,13 g nebo 1,05 m materiálu. Z těchto informací lze dopočítat cenu materiálu na jeden blikač.

Cena za gram materiálu:

$$n_{gramPLA} = \frac{\text{cena}}{\text{hmotnost}} = \frac{469}{1000} = 0,469 \text{ Kč} \quad (5)$$

Cena materiálu na jeden blikač:

$$n_{PLA} = n_{gramPLA} \cdot 3,13 = 0,469 \cdot 3,13 = 1,468 \text{ Kč} \quad (6)$$

Pro blikač vytisknutý pomocí recyklovaného r-PET-G je také potřeba 2527,7 mm<sup>3</sup>, avšak kvůli jiné hustotě materiálu si tisk vyžádá 3,21 g materiálu. Spotřebovaná délka filamentu zůstává stejná, tedy 1,05 m.

Cena za gram materiálu:

$$n_{gramPETG} = \frac{\text{cena}}{\text{hmotnost}} = \frac{379}{750} = 0,505 \text{ Kč} \quad (7)$$

Cena materiálu na jeden blikač:

$$n_{PETG} = n_{gramPETG} \cdot 3,21 = 0,505 \cdot 3,21 = 1,621 \text{ Kč} \quad (8)$$

Poslední materiál, který je při výrobě spotřebováván, je stříbrná vodivá pasta. Tuto speciální pastu prodává kanadská společnost a prodejní cena je 99,99 \$ [36]. Podle kurzu ČNB ze dne 18. 11. 2022 se jedná o 2349,07 Kč. Objem vodivé pasty je 2 ml, tedy 2 000 mm<sup>3</sup>.

Jeden mm<sup>3</sup> vodivé pasty vyjde na:

$$n_{pastamm^3} = \frac{\text{cena}}{\text{objem}} = \frac{2349,07}{2000} = 1,175 \text{ Kč} \quad (9)$$

Po propočítání vzdáleností v programu EAGLE a výsledcích na laserovém mikroskopu odhadují, že na výrobu blikače bylo použito 5,88 mm<sup>3</sup> stříbrné pasty.

Cena stříbrné pasty použité na jeden blikač:

$$n_{pasta} = n_{pastamm^3} \cdot 5,88 = 1,175 \cdot 5,88 = 6,909 \text{ Kč} \quad (10)$$

Celková cena za materiálu na výrobu jednoho blikače:

Při použití materiálu r-PLA:

$$n_{mPLA} = n_{PLA} + n_{pasta} = 1,468 + 6,909 = 8,377 \text{ Kč} \quad (11)$$

Při použití materiálu r-PET-G:

$$n_{mPETG} = n_{PETG} + n_{pasta} = 1,621 + 6,909 = 8,53 \text{ Kč} \quad (12)$$

#### 4.2.2. Náklady na součástky

K výrobě každého z blikačů je zapotřebí použít šest součástek. Všechny součástky jsou určeny pro povrchovou montáž (SMD). Cenu součástek přebírám z internetového obchodu - světsoučástek.cz - při zakoupení 1 000 kusů. Pro větší přehlednost jsou ceny za jednotlivé součástky uvedeny v následující tabulce:

**Tabulka 16 - Ceny součástek**

Typ součástky:	Cena za kus: (Kč)
Časovač NE555, 16 V, 500 kHz	5,6199
Rezistor 390 Ω, pouzdro 1206	0,3306
Rezistor 47 kΩ, pouzdro 1206	0,4132
Rezistor 100 kΩ, pouzdro 1206	0,3306
Kondenzátor 10 μF, 25 V, pouzdro 1206	0,8265
LED SMD, velikost 1206	0,8265

Celkové náklady na součástky se rovnají součtu cen:

$$n_s = 5,6199 + 0,3306 + 0,4132 + 0,3306 + 0,8265 + 0,8265 \quad (13)$$

$$n_s = 8,347 \text{ Kč}$$

#### 4.2.3. Náklady na zaměstnance

Při určování nákladů na zaměstnance předpokládám, že dojde pouze k rozšíření pracovní náplně stávajícího zaměstnance o obsluhu 3D tiskárny a zařízení Voltera V-One. Práci pro zaměstnance bych klasifikoval jako nenáročnou, stačí pokud bude řádně zaškolen na obsluhu a servis 3D tiskárny, na práci se zařízením Voltera a práci s pecí na vytvrzování vzorků. Práce na těchto zařízeních nevyžaduje žádné vzdělání ani pokročilé manuální dovednosti. Může ji vykonávat téměř kdokoli ihned po školení, které již každý ze zaměstnanců firmy absolvoval. Z výše uvedených důvodů uvažuji hrubou hodinovou mzdu zaměstnance ve výši 200 Kč. U 3D tiskárny v případě bezporuchovosti stačí pouze zapnout tisk a po vytisknutí sundat vzorky a vyčistit tiskovou podložku. To odpovídá práci na dobu 10 minut. Doba potisknutí vodivých cest

pro jeden vzorek, včetně osazení součástek a manipulace na zařízení Voltera, je zhruba pět minut. Denně je zaměstnanec schopen udělat maximálně 12 blikačů, a to pouze při celodenním tisknutí. 3D tiskárna nemusí být během tisku pod dohledem a zvládne tak tisknout i přes noc. Práce s pecí spočívá pouze v zapnutí pece, vložení vzorků, přičemž po vytvrzení stačí vzorky jednoduše vyndat. Tímto pracovní úkonem tak zaměstnanec stráví maximálně 10 minut. Zaměstnanec tedy při běžné osmihodinové směně stráví 10 minut obsluhou 3D tiskárny, hodinu osazením a potiskem vodivých cest a 10 minut prací s vytvrzovací pecí. Při započítání rezervy dohromady odhaduji práci zaměstnance na hodinu a půl.

Náklady na zaměstnance na jeden vyrobený blikač se vypočítá následovně:

$$n = \frac{\text{čas} \cdot \text{hodinová mzda}}{\text{počet vzorků}} = \frac{1,5 \cdot 200}{12} = 25 \text{ Kč} \quad (14)$$

Po započítání sociálního a zdravotního pojištění budou výsledné náklady na zaměstnance pro jeden vzorek:

$$n_{\text{zaměst.}} = n \cdot 1,34 = 25 \cdot 1,34 = 33,5 \text{ Kč} \quad (15)$$

#### 4.2.4. Náklady na elektrickou energii

Náklady na elektrickou energii se budou lišit v závislosti na použitém materiálu pro 3D tisk, jelikož se každý materiál tiskne při různém tiskovém profilu. Největší roli v energetické náročnosti hraje teplota nahřátí tiskové podložky a teplota nahřátí trysky. Zároveň se budou lišit náklady na elektrickou energii pro vytvrzovací pec, protože každý materiál je vytvrzován při různé teplotě. Náklady na elektrickou energii pro zařízení Voltera V-One se lišit nebudou, protože nezáleží, na jaký povrch zařízení tiskne vodivou pastu a doba procesu je také materiálově nezávislá. Hodnoty spotřebované energie jsou změřeny pomocí multimetru (UNI-T UT71E). Předpokládám, že se jedná o firmu, která už energii odebírá a poplatky za jistič budou stejné, protože změna ochranných prvků ve firmě nebude zapotřebí. Cenu elektrické energie jsem převzal z ceníku Innogy pro tarif C03d pro Prahu. Za jednu kWh firma zaplatí 9,019 Kč [37].

Náklady na elektrickou energii pro 3D tiskárnu:

Při použití r-PLA:

$$n_{E3DPLA} = E_{PLA} \cdot \text{cenakWh} = 0,188 \cdot 9,019 = 1,696 \text{ Kč} \quad (16)$$

Při použití r-PET-G:

$$n_{E3PETG} = E_{PETG} \cdot \text{cenakWh} = 0,206 \cdot 9,019 = 1,858 \text{ Kč} \quad (17)$$

Náklady na elektrickou energii pro zařízení Voltera V-One:

$$n_{EVoltera} = E_{Voltera} \cdot \text{cenakWh} = 0,00289 \cdot 9,019 = 0,0261 \text{ Kč} \quad (18)$$



Vytvrzovací pec, kterou jsem použil pro vytvrzování a měření spotřeby energie, byla ručně vyrobená na ČVUT. Nejedná se o pec určenou k vytvrzování a požadavky na úsporu energií jsou malé. Regulace teploty a těsnění dvířek tak nebylo dokonalé a výsledné změřené hodnoty spotřebované energie jsou spíše orientační. Moderní vytvrzovací pece mají výrazně lepší regulaci teploty a spotřebovaná energie je také podstatně menší.

Náklady na elektrickou energii pro vytvrzovací pec:

Při vypékání r-PLA:

$$n_{EpecPLA} = E_{pecPLA} \cdot cenakWh = 0,379 \cdot 9,019 = 3,418 \text{ Kč} \quad (19)$$

Při vypékání r-PET-G:

$$n_{EpecPETG} = E_{pecPETG} \cdot cenakWh = 0,448 \cdot 9,019 = 4,041 \text{ Kč} \quad (20)$$

Celkové náklady na elektřinu pro jednotlivé vzorky se rovnají součtu spotřebované elektrické energie během výroby:

Při použití r-PLA:

$$\begin{aligned} n_{EcelkemPLA} &= n_{E3DPLA} + n_{EVoltera} + n_{EpecPLA} = 1,696 + 0,0261 + 3,418 \\ n_{EcelkemPLA} &= 5,140 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (21)$$

Při použití r-PET-G:

$$\begin{aligned} n_{EcelkemPETG} &= n_{E3DPETG} + n_{EVoltera} + n_{EpecPETG} = 1,858 + 0,0261 + 4,041 \\ n_{EcelkemPETG} &= 5,925 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (22)$$

#### 4.2.5. Náklady na opravy zařízení

Náklady na opravy jsou náklady vynaložené na opravení a údržbu zařízení nutných pro výrobu. Ne všechny komponenty 3D tiskárny a zařízení Voltera V-One mají stejně dlouhou životnost jako celé zařízení. Například tryska u 3D tiskárny má životnost 800 tiskových hodin [38]. Po uplynutí je nutná výměna. Cena nové trysky pro 3D tiskárnu stojí 349 Kč [39]. Doba tisku blikáče je dvě hodiny a je stejná pro oba druhy materiálu. Náklad na výměnu trysky můžeme vztáhnout na jeden vyrobený blikáč:

Počet vytisknutých vzorků za dobu životnosti trysky:

$$x_1 = \frac{\text{doba životnosti}}{\text{doba tisku jednoho blikáče}} = \frac{800}{2} = 400 \quad (23)$$

Náklady na jednu součástku:

$$n_{3Dtryska} = \frac{\text{cena trysky}}{x_1} = \frac{349}{400} = 0,873 \text{ Kč} \quad (24)$$

Dále je potřeba započítat čas zaměstnance potřebný k provedení výměny trysky na 3D tiskárně. Výměna trysky není nijak složitá operace a čas strávený výměnou odhaduji na maximálně na 10 minut.

$$n_{3Dtryskazamestnanec} = \frac{\text{čas} \cdot \text{mzda}}{x_1} = \frac{10 \cdot \frac{(200 \cdot 1,34)}{60}}{400} = 0,112 \text{ Kč} \quad (25)$$

Celkové náklady na výměnu trysky 3D tiskárny promítnuté do nákladů za jednu součástku:

$$n_{3Dtryskacelkem} = n_{3Dtryska} + n_{3Dtryskazamestnanec} = 0,873 + 0,112 = 0,985 \text{ Kč} \quad (26)$$

U zařízení Voltera V-One se používá plastová tryska, která je sice výrazně levnější, ale její životnost je podstatně kratší. Trysky se prodávají v balení po 25 kusech za cenu 24,99 \$ [40], podle kurzu ČNB ze dne 18.11.2022 to odpovídá 587,09 Kč. Jedna tryska vyjde na 23,48 Kč. Opět je doba potisku vodivých cest nezávislá na použitém materiálu podložky. Životnost na základě vlastního pozorování během výroby vzorků odhaduji pouze na 20 tiskových hodin. Doba potisku vodivých cest na jeden blikáč je 5 minut.

Počet vytisknutých vzorků za dobu životnosti trysky:

$$x_2 = \frac{\text{doba životnosti}}{\text{doba potisku jednoho blikáče}} = \frac{20 \cdot 60}{5} = 240 \quad (27)$$

Náklady na jednu součástku:

$$n_{Vtryska} = \frac{\text{cena rysky}}{x_2} = \frac{23,48}{240} = 0,0978 \text{ Kč} \quad (28)$$

Následně je opět potřeba započítat čas zaměstnance potřebný k provedení výměny trysky na zařízení Voltera V-One. Výměna trysky je v tomto případě ještě jednodušší a nezabere více než jednu minutu.

$$n_{Vtryskazamestnanec} = \frac{\text{čas} \cdot \text{mzda}}{x_2} = \frac{1 \cdot \frac{(200 \cdot 1,34)}{60}}{240} = 0,0186 \text{ Kč} \quad (29)$$

Celkové náklady na výměnu trysky zařízení Voltera V-One promítnuté do nákladů za jeden blikáč:

$$n_{Vtryskacelkem} = 0,0978 + 0,0186 = 0,1164 \text{ Kč} \quad (30)$$

Celkové náklady na opravy jeden blikáč jsou:

$$n_{opravy} = n_{3Dtryskacelkem} + n_{Vtryskacelkem} = 0,985 + 0,1164 = 1,101 \text{ Kč} \quad (31)$$

#### 4.2.6. Náklady na nefunkční blikače (zmetkovitost)

Výroba desek plošných spojů se skládá z mnoha kroků. V každém kroku výrobu může dojít k chybě, která zapříčiní nefunkčnost výrobku. V některých případech je však možné výrobek opravit, taková operace si však navíc vyžádá další náklady spojené s časem zaměstnance. Ten musí strávit další nadstandardní čas diagnostikou a následnou opravou vadného kusu, aby uvedl výrobek do požadované funkčnosti a kvality. V mém případě během výroby blikače bylo potřeba opravit hned několik vzorků z 20 vyrobených (10 z r-PLA a 10 z r-PET-G).

Při použití materiálu r-PLA bylo potřeba opravit jeden z deseti vzorků. Oprava se skládala z diagnostiky chyby na mikroskopu nebo pomocí multimetru a z manuální opravy nalezené chyby. V průměru, na základě zkušeností získaných při výrobě odhaduji, že zaměstnanec opravou nefunkčního vzorku stráví 4 minuty. Předpokládám, že bude potřeba opravit každý desátý vzorek. Náklady na opravy nefunkčních blikačů přepočítané na jeden kus:

$$n_{zPLA} = \frac{4 \cdot \frac{(200 \cdot 1,34)}{60}}{10} = 1,787 \text{ Kč} \quad (32)$$

Při použití materiálu r-PET-G bylo potřeba opravit celkem čtyři vzorky z deseti vyrobených. Jedná se o stejné blikače, které jsou pouze vyrobené z jiného materiálu. Průběh opravy je shodný s opravou blikačů vyrobených z materiálu r-PLA a skládá se z diagnostiky a manuálních oprav. Ve většině případů se jedná o chybu vodivého propojení součástí nebo vzniku nechtěného propojení vodivých cest (zkratu). K diagnostice se využívá multimetr, pomocí kterého se zkontrolují vodivé cesty. Při přerušení vodivé cesty vlivem nerovného povrchu dojde k ručnímu „zakápnutí“ místa vodivou pastou. Při nalezení místa, kde dochází k nechtěnému propojení vodivých cest, se pomocí pinzety vodivé propojení ručně „seškrábne“. Délku diagnostiky a opravy odhaduji na 4 minuty. Přepočítané náklady na opravy nefunkčních blikačů přepočítaných na jeden kus:

$$n_{z1PETG} = \frac{4 \cdot \frac{(200 \cdot 1,34)}{60}}{10} \cdot 4 = 7,147 \text{ Kč} \quad (33)$$

Při výrobě často dochází k vyrobení nefunkčních vzorků neumožňujících opravu. Mohlo dojít k chybě, u které není možnost nápravy, nebo při diagnostice nedošlo k nalezení chyby. V mém případě považuji za nefunkční vzorek každý blikač, u kterého během diagnostiky multimetrem nebyla nalezena žádná chyba.

Další náklad, který je tedy potřeba zohlednit, je náklad na neopravitelný blikač. Tento náklad se skládá z celkových nákladů, které byly potřeba na vyrobení daného vzorku. Při výrobě blikačů z materiálů r-PLA byly po opravě všechny vzorky funkční. U materiálu r-PET-G nebyla u jednoho nefunkčního blikače (z deseti vyrobených) při diagnostice nalezena žádná chyba

a blikač byl tak označen za neopravitelný. Náklady na neopravitelný vzorek přepočítané na jeden blikač:

$$n_{zm} = \frac{n_{mPETG} + n_{zaměst.} + n_S + n_{EcelkemPETG} + n_{opravy} + n_{z1PETG}}{10} = 6,46 \text{ Kč} \quad (34)$$

Celkové náklady na nefunkční blikač pro materiál r-PET-G přepočítané na jeden blikač:

$$n_{zPETG} = n_{z1PETG} + n_{zm} = 7,147 + 6,46 = 13,6 \text{ Kč} \quad (35)$$

Při opravě nefunkčních vzorků je dobré položit si otázku, jestli není náklad na opravu vzorků větší než náklad na výrobu celého vzorku. V takovém případě by bylo efektivnější nefunkční vzorek neopravovat a místo toho vyrobit nový. V mém případě je odpověď na tuto otázku jednoznačná.

Náklady na výrobu jednoho blikače z materiálu r-PLA:

$$n_{PLAcelkem} = n_{mPLA} + n_{zaměst.} + n_S + n_{EcelkemPLA} + n_{opravy} = 56,425 \text{ Kč} \quad (36)$$

Náklady na výrobu jednoho blikače z materiálu r-PET-G:

$$n_{PETGcelkem} = n_{mPETG} + n_{zaměst.} + n_S + n_{EcelkemPETG} + n_{opravy} = 57,403 \text{ Kč} \quad (37)$$

Náklady na opravy jednoho blikače jsou pro materiál r-PLA a r-PET-G jsou stejné:

$$n_{opravavzorkz} = 4 \cdot \frac{(200 \cdot 1,34)}{60} = 17,87 \text{ Kč} \quad (38)$$

Z uvedených rovnic vyplývá, že náklady na opravu nefunkčního blikače jsou výrazně menší než náklady na výrobu blikače nového, a proto se vyplatí blikače opravovat.

$$\begin{aligned} 57,403 \text{ Kč} &> 17,87 \text{ Kč} \\ 56,425 \text{ Kč} &> 17,87 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (39)$$

#### 4.2.7. Součet nákladů na provoz a výrobu

Zde bude nutné sečíst všechny výše uvedené náklady potřebné na výrobu jednotlivých blikačů. Jedná se tedy o součet těchto nákladů:

- Náklady na materiál
- Náklady na součástky
- Náklady na zaměstnance
- Náklady na elektrickou energii
- Náklady na opravy
- Náklady na nefunkční blikače

Při použití materiálu r-PLA jsou celkové náklady:

$$n_{PLAcelkem} = n_{mPLA} + n_{zaměst.} + n_S + n_{EcelkemPLA} + n_{opravy} + n_{zPLA} \quad (40)$$

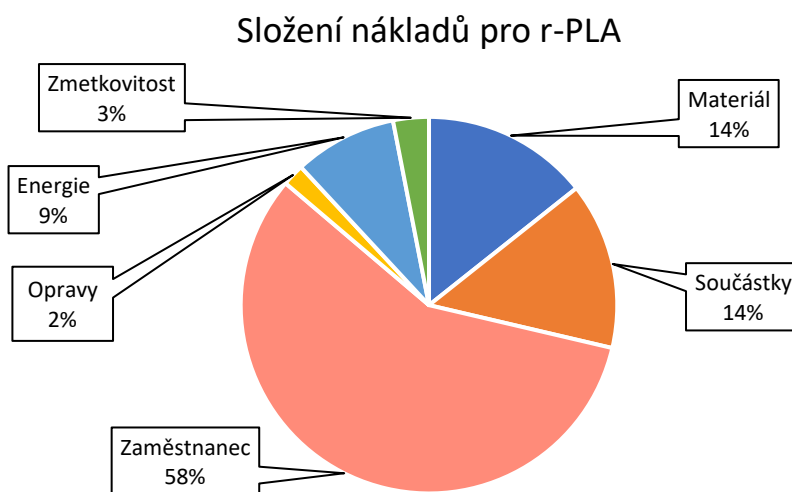
$$n_{PLAcelkem} = 8,377 + 33,5 + 8,347 + 5,14 + 1,101 + 1,787 = 58,21 \text{ Kč}$$

Při použití r-PET-G jsou celkové náklady:

$$n_{PETGcelkem} = n_{mPETG} + n_{zaměst.} + n_S + n_{EcelkemPETG} + n_{opravy} + n_{zPETG} \quad (41)$$

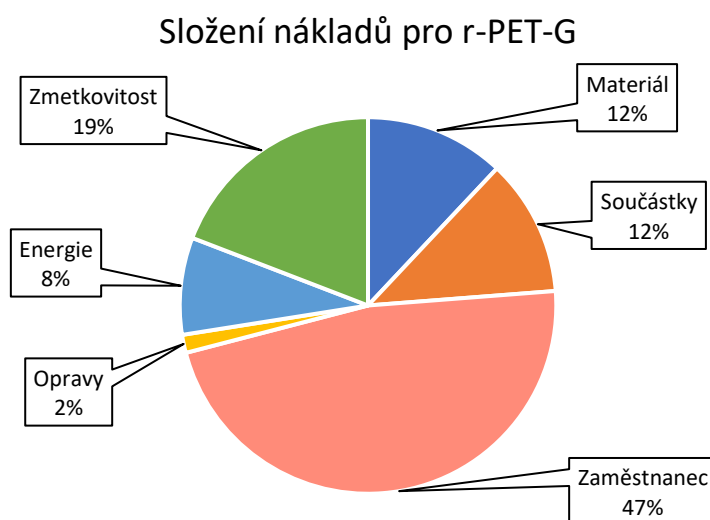
$$n_{PETGcelkem} = 8,53 + 33,5 + 8,347 + 5,925 + 1,101 + 13,6 = 71,00 \text{ Kč}$$

Porovnání složení nákladů na jeden vzorek s použitím materiálu r-PLA:



**Obrázek 34 - Složení nákladů r-PLA**

Porovnání složení nákladů na jeden vzorek s použitím materiálu r-PET-G:



**Obrázek 35 - Složení nákladů r-PET-G**

Z uvedených grafů (Obrázek 34, Obrázek 35) si lze všimnout, že největším nákladem je plat zaměstnance, který je u variant s vlastní výrobou desky plošného spoje kolem 50 %. Hlavním rozdílem v nákladech při použití různých materiálů (r-PLA a r-PET-G) je náklad na zmetkovitost (opravu nefunkčních blikáčů). U r-PET-G tvoří 19 % (13,60 Kč z 71,003 Kč) a u r-PLA pouze 3 % (1,787 Kč z 58,212 Kč) z celkové ceny blikáče.

### 4.3. NPV

NPV neboli Net Present Value je jedna z metod vyhodnocování investic, kterou použiji v mém případě. Tato metoda počítá s budoucími hodnotami cash flow a bere v potaz i délku investice (životnosti). Vztah pro výpočet NPV vypadá následovně:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (42)$$

Kde  $t$  jsou roky,  $CF$  je cash flow,  $r$  je diskont a  $T$  je délka investice (životnosti). Budu počítat s diskontem 7 %. V hodnotě tohoto diskontu není započítaná velikost inflace, která je v současné době na velmi vysokých hodnotách například kvůli válečnému konfliktu na Ukrajině a vrcholící energetické krizi v Evropě. Počítám se stálými cenami, a velikost diskontu je tedy dána pouze rizikovostí investice. Obdobný diskont byl i v minulosti zvolen u bakalářských prací s podobným zaměřením [41, 42]. Doba investice bude počítána 7 let, tuto dobu by měla obě zařízení vydržet i s vyšším zatížením.

#### 4.3.1. Výpočet NPV pro jednotlivé vyrobené blikáče

Hodnotu NPV vypočítám pro tři různé počty vyrobených vzorků za rok:

- 1 000 vzorků
- 1 500 vzorků
- 2 000 vzorků

Pro výpočet hodnoty NPV budu potřebovat hodnoty cash flow v jednotlivých letech. Cash flow neboli peněžní tok vyjadřuje příjem nebo výdej peněžních prostředků. Hodnota cash flow představuje rozdíl mezi příjmy a výdaji v daném sledovaném období. V mém případě budou cash flow tvořit investiční náklady v nultém roce a následně roční náklady na výrobu vzorků. Spolu hodnotami NPV spočítám hodnoty RCF (roční ekvivalenční peněžní tok) a přepočítané náklady na jeden blikáč.

Hodnoty cash flow pro jednotlivé roky pro 1 000 vyrobených vzorků ročně:

**Tabulka 17 - Hodnoty cash flow – 1 000 vzorků**

Roky	0	1	2	3	4	5	6	7
Investice	143 153	0	0	0	0	0	0	0
CF <sub>r-PLA</sub>	0	-58 212	-58 212	-58 212	-58 212	-58 212	-58 212	-58 212
CF <sub>r-PETG</sub>	0	-71 003	-71 003	-71 003	-71 003	-71 003	-71 003	-71 003
Kumulované CF <sub>r-PLA</sub>	-143 153	-201 365	-259 577	-317 789	-376 001	-434 213	-492 425	-550 637
Kumulované CF <sub>r-PETG</sub>	-143 153	-214 156	-285 159	-356 162	-427 165	-498 168	-569 171	-640 174

Z hodnot cash flow lze následně dopočítat všechny ostatní hodnoty. RCF budu počítat pomocí následujícího vztahu:

$$RCF = \text{anuita} \cdot NPV$$

$$\text{anuita} = \frac{q^T \cdot (q - 1)}{q^T - 1} \quad (43)$$

Kde T je doba investice a  $q = 1 + \text{diskont}$ .

Celkové náklady na jeden blikáč se rovnají celkovým nákladům děleným celkovým počtem vyrobených blikáčů:

$$n = \frac{\text{celkové náklady}}{\text{celkový počet vyrobených kusů}} \quad (44)$$

Výsledné hodnoty NPV pro 1 000 vyrobených vzorků ročně:

**Tabulka 18 - Hodnoty NPV – 1 000 vzorků**

NPV (Kč)	
r-PLA	-456 874
r-PET-G	-525 809

Výsledné hodnoty RCF pro 1 000 vyrobených vzorků ročně:

**Tabulka 19 - Hodnoty RCF – 1 000 vzorků**

RFC (Kč)	
r-PLA	-84 775
r-PET-G	-97 566

Celkové náklady na jeden vzorek pro 7 000 vyrobených vzorků během 7 let:

**Tabulka 20 - Celkové náklady na jeden vzorek (1)**

Náklady na jeden blikáč (Kč)	
r-PLA	78,66
r-PET-G	91,45

Hodnoty cash flow pro jednotlivé roky pro 1 500 vyrobených vzorků ročně:

**Tabulka 21 - Hodnoty cash flow – 1 500 vzorků**

Roky	0	1	2	3	4	5	6	7
Investice	143 153	0	0	0	0	0	0	0
CF <sub>r-PLA</sub>	0	-87 318	-87 318	-87 318	-87 318	-87 318	-87 318	-87 318
CF <sub>r-PETG</sub>	0	-106 505	-106 505	-106 505	-106 505	-106 505	-106 505	-106 505
Kumulované CF <sub>r-PLA</sub>	-143 153	-230 471	-317 789	-405 107	-492 425	-579 743	-667 061	-754 379
Kumulované CF <sub>r-PETG</sub>	-143 153	-249 658	-356 162	-462 667	-569 171	-675 676	-782 180	-888 685

Výsledná hodnota NPV pro 1 500 vyrobených vzorků ročně:

**Tabulka 22 - Hodnoty NPV – 1 500 vzorků**

NPV (Kč)	
r-PLA	-613 735
r-PET-G	-717 137

Výsledné hodnoty RCF pro 1 500 vyrobených vzorků ročně:

**Tabulka 23 - Hodnoty RCF – 1 500 vzorků**

RFC (Kč)	
r-PLA	-113 881
r-PET-G	-133 067

Celkové náklady na jeden vzorek pro 10 500 vyrobených vzorků během 7 let:

**Tabulka 24 - Celkové náklady na jeden vzorek (2)**

Náklady na jeden blikáč (Kč)	
r-PLA	71,85
r-PET-G	84,64



Hodnoty cash flow pro jednotlivé roky pro 2 000 vyrobených vzorků ročně:

**Tabulka 25 - Hodnoty cash flow – 2 000 vzorků**

Roky	0	1	2	3	4	5	6	7
Investice	143 153	0	0	0	0	0	0	0
CF <sub>r-PLA</sub>	0	-116 424	-116 424	-116 424	-116 424	-116 424	-116 424	-116 424
CF <sub>r-PETG</sub>	0	-142 006	-142 006	-142 006	-142 006	-142 006	-142 006	-142 006
Kumulované CF <sub>r-PLA</sub>	-143 153	-259 577	-376 001	-492 425	-608 849	-725 273	-841 697	-958 121
Kumulované CF <sub>r-PETG</sub>	-143 153	-285 159	-427 165	-569 171	-711 177	-853 183	-995 189	-1 137 195

Výsledná hodnota NPV pro 2 000 vyrobených vzorků ročně:

**Tabulka 26 - Hodnoty NPV – 2 000 vzorků**

NPV (Kč)	
r-PLA	-770 596
r-PET-G	-908 464

Výsledné hodnoty RCF pro 1 500 vyrobených blikačů ročně:

**Tabulka 27 - Hodnoty RCF – 2 000 vzorků**

RFC (Kč)	
r-PLA	-142 987
r-PET-G	-168 569

Celkové náklady na jeden blikač pro 14 000 vyrobených vzorků během 7 let:

**Tabulka 28 - Celkové náklady na jeden vzorek (3)**

Náklady na jeden blikač (Kč)	
r-PLA	68,44
r-PET-G	81,23

### 4.3.2. Výpočet NPV při nakupování vzorků

Zde vypočítám hodnoty NPV při kupování desek plošných spojů (blikačů) od jiné firmy. Pro tuto variantu jsem si zvolil nákup od české firmu PRINTED s. r. o.. Na webových stránkách disponují ceníkem, ve kterém jsem si zadal desku plošného spoje, která odpovídá vyrobeným blikačům. Podobnou desku plošného spoje si lze u této firmy zakoupit za cenu zhruba 21 Kč a cena za osazení jedné takové desky plošného spoje vychází zhruba na 44 Kč [43]. Ceny jsou uvedeny při odběru 1 000 kusů desek plošných spojů. Součástky je potřeba firmě dodat. Cena součástek je stejná jako v prvních dvou variantách vlastní výroby. Jedná se o částku 8,347 Kč. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl počítat s částkou 73,5 Kč za kus. Tuto cenu tedy použiji na výpočet NPV pro tři různé roční nákupy blikačů, stejně jako v případě vlastní výroby blikačů.

Hodnoty cash flow pro jednotlivé roky pro 1 000 koupených vzorků ročně:

**Tabulka 29 - Hodnoty cash flow – 1 000 nakoupených vzorků**

Roky	1	2	3	4	5	6	7
CF	-73 500	-73 500	-73 500	-73 500	-73 500	-73 500	-73 500
Kumulované CF	-73 500	-147 000	-220 500	-294 000	-367 500	-441 000	-514 500

Hodnoty cash flow pro jednotlivé roky pro 1 500 koupených vzorků ročně:

**Tabulka 30 - Hodnoty cash flow – 1 500 nakoupených vzorků**

Roky	1	2	3	4	5	6	7
CF	-110 250	-110 250	-110 250	-110 250	-110 250	-110 250	-110 250
Kumulované CF	-110 250	-220 500	-330 750	-441 000	-551 250	-661 500	-771 750

Hodnoty cash flow pro jednotlivé roky pro 2 000 koupených vzorků ročně:

**Tabulka 31 - Hodnoty cash flow – 2 000 nakoupených vzorků**

Roky	1	2	3	4	5	6	7
CF	-147 000	-147 000	-147 000	-147 000	-147 000	-147 000	-147 000
Kumulované CF	-147 000	-294 000	-441 000	-588 000	-735 000	-882 000	-1 029 000

Výsledné hodnoty NPV a RCF:

**Tabulka 32 - Výsledné hodnoty NPV a RCF**

Počet kusů:	NPV (Kč)	RFC (Kč)
1 000	-396 113	-73 500
1 500	-594 169	-110 250
2 000	-792 226	-147 000

### 4.3.3. Porovnání vlastní výroby a nakupování DPS

Pro porovnání mezi vlastní výrobou a kupováním osazených desek plošných spojů (DPS) jsem se rozhodl použít rozdíl hodnot NPV, kdy budu počítat úsporu peněžních prostředků při vlastní výrobě desek plošných spojů. Jak již bylo zmíněno, počítám s cenou zakoupené desky plošného spoje 73,5 Kč. Při vlastní výrobě je cena jedné součástky při použití materiálu r-PLA 58,21 Kč a při použití materiálu r-PET-G 71,00 Kč. Při vlastní výrobě DPS dojde k úspoře zhruba 15 Kč (r-PLA) a 3 Kč (r-PET-G) na jednu vyrobenou desku plošného spoje. Investiční náklady na vlastní výrobu jsou 143 153 Kč a životnost odhaduji na 7 let. Rozdíl hodnot NPV budu počítat pomocí následujícího vztahu:

$$NPV_{\text{rozdíl}} = NPV_{\text{vlastní výroba}} - NPV_{\text{nakupování}} \quad (45)$$

Příklad výpočtu pro materiál r-PLA a 2 000 vyrobených kusů ročně:

$$NPV_{\text{rozdíl}} = (-770\,596) - (-792\,226) = 21\,630 \text{ Kč} \quad (46)$$

Pro větší přehlednost jsem vytvořil detailnější tabulku (Tabulka 33) a graf (Obrázek 36) pro 1 000 až 2 750 vyrobených desek plošných spojů ročně. S jednou 3D tiskárnou a zařízeními Voltera V-One není firma schopná vyrobit více než 3 000 vzorků ročně. Výsledné rozdílové hodnoty NPV jsou uvedeny v následující tabulce:

**Tabulka 33 - Rozdílové hodnoty NPV**

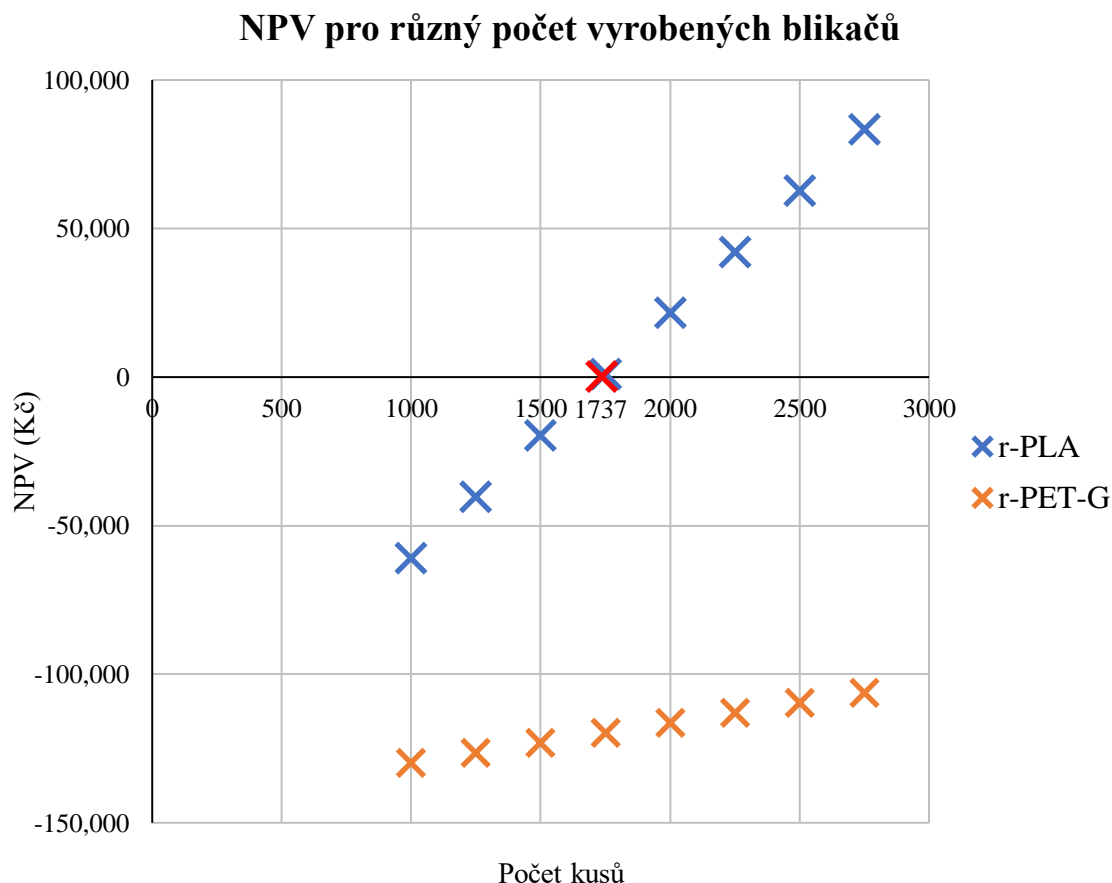
Počet kusů		1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
NPV (Kč)	r-PLA	-60 762	-40 164	-19 566	1 032	21 630	42 228	62 826	83 424
	r-PET-G	-129 696	-126 332	-122 967	-119 603	-116 239	-112 875	-109 510	-106 146

Aby byla vlastní výroba desek plošných spojů rentabilní, musí být výsledné hodnoty NPV kladné (příklad rovnice (46)). Z výše uvedené tabulky si lze všimnout, že kladných hodnot dosahuje NPV pouze v jednom případě – při výrobě 2 000 kusů ročně a použití materiálu r-PLA. Ve všech ostatních výše uvedených případech je výhodnější nakupovat hotové desky plošných spojů (hodnoty NPV jsou záporné).

Z níže uvedeného grafu (Obrázek 36) si lze všimnout, že při použití materiálu r-PLA je možno dosáhnout kladných hodnot NPV. Bod zvratu (NPV = 0 Kč) je v grafu označen červenou barvou a jeho hodnota je 1 737 kusů. Při výrobě více než 1 737 kusů blikáčů ročně jsou hodnoty NPV kladné, dojde k úspoře peněžních prostředků a investice do vlastní výroby desek plošných spojů (blikáčů) se firmě vyplatí.

Při použití materiálu r-PET-G jsou všechny uvedené hodnoty NPV záporné. Bod zvratu (NPV = 0 Kč) je 10 638 kusů a není vyznačen na grafu. Aby se investice firmě vyplatila, musela by vyrobit více než 10 638 kusů blikáčů ročně, to ale není technicky možné. Maximální počet

vyrobených vzorků ročně se pohybuje kolem 3 000 kusů. Proto při použití materiálu r-PET-G nedojde k úspoře peněžních prostředků a investice do vlastní výroby z tohoto pohledu není rentabilní.



Obrázek 36 - Graf hodnot NPV

#### 4.3.4. Citlivostní analýza

Citlivostní analýza je vhodný nástroj na zkoumání vlivu změny vstupních parametrů. V mém případě je citlivostní analýza zaměřena na hodnoty NPV v závislosti na změně počtu vyrobených kusů a změně velikosti diskontu. Opět se jedná o rozdílové hodnoty NPV podle rovnice (45), kde roční cash flow bude tvořit úspora peněžních prostředků při vlastní výrobě desek plošných spojů. Pro přehlednost jsem z výsledných hodnot NPV sestrojil dvě tabulky. První je zaměřena na vlastní výrobu blikáčů a použití materiálu r-PLA. Druhá tabulka je také zaměřena na vlastní výrobu blikáčů, ale použití materiálu r-PET-G. Ve sloupcích tabulek se projevuje změna diskontu a v řádcích tabulek se projevuje změna počtu vyrobených desek plošných spojů (blikáčů) ročně. Počet vyrobených kusů se bude pohybovat od 1 000 do 2 750 kusů a rozpětí diskontu je 5–11 %. Pokud je hodnota NPV v dané buňce kladná, je buňka vyplněna zelenou barvou. Pokud je hodnota NPV záporná, je buňka vyplněna barvou červenou.

Tabulka s výsledkem citlivostní analýzy při použití materiálu r-PLA:

**Tabulka 34 - Citlivostní analýza při použití materiálu r-PLA**

r-PLA	Diskont:							
	<del>X</del>	5 %	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %
Počet kusů:	1000	-54 691	-57 810	-60 762	-63 558	-66 209	-68 725	-71 113
	1250	-32 575	-36 474	-40 164	-43 659	-46 973	-50 118	-53 103
	1500	-10 460	-15 138	-19 566	-23 761	-27 737	-31 510	-35 093
	1750	11 656	6 198	1 032	-3 862	-8 501	-12 903	-17 083
	2000	33 771	27 534	21 630	16 037	10 735	5 704	927
	2250	55 887	48 870	42 228	35 936	29 971	24 311	18 937
	2500	78 002	70 206	62 826	55 834	49 206	42 918	36 947
	2750	100 118	91 541	83 424	75 733	68 442	61 525	54 957

Tabulka s výsledkem citlivostní analýzy při použití materiálu r-PET-G:

**Tabulka 35 - Citlivostní analýza při použití materiálu r-PET-G**

r-PET-G	Diskont:							
	<del>X</del>	5 %	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %
Počet kusů:	1000	-128 704	-129 214	-129 696	-130 153	-130 586	-130 997	-131 387
	1250	-125 092	-125 729	-126 332	-126 903	-127 444	-127 957	-128 445
	1500	-121 480	-122 244	-122 967	-123 653	-124 302	-124 918	-125 503
	1750	-117 868	-118 759	-119 603	-120 402	-121 160	-121 879	-122 562
	2000	-114 256	-115 275	-116 239	-117 152	-118 018	-118 840	-119 620
	2250	-110 644	-111 790	-112 875	-113 902	-114 877	-115 801	-116 679
	2500	-107 032	-108 305	-109 510	-110 652	-111 735	-112 762	-113 737
	2750	-103 419	-104 820	-106 146	-107 402	-108 593	-109 723	-110 796

Z výše uvedených tabulek je zřejmé, že při použití materiálu r-PET-G jsou všechny hodnoty NPV záporné. Investice se vlastní výroby desek plošných spojů (blikačů) a použití materiálu r-PET-G se tedy nevyplatí ani při změně diskontu. Použití materiálu r-PLA má pozitivnější výsledky. Hodnoty v tabulce jsou téměř z poloviny kladné. Investice se firmě v tomto případě vyplatí, pokud bude ročně vyrábět více než 2 000 kusů. Pokud bude firma vyrábět 1 750 kusů, kladných hodnot NPV firma dosáhne pouze při diskontu 5-7 %.

## 4.4. Zhodnocení ekonomického modelu

Cílem ekonomického modelu v bakalářské práci bylo zjistit, zda použití nové alternativní metody výroby desek plošných spojů může najít uplatnění v praxi. Konkrétně šlo o ekonomické porovnání vlastní výroby desek plošných spojů s nákupem již hotových osazených desek plošných spojů. Zároveň byla vlastní výroba desek plošných spojů propočítána s použitím dvou odlišných materiálů s cílem najít výhodnější variantu pro danou společnost. K porovnání jsem použil běžně používané ekonomické ukazatele NPV a RCF. Na závěr jsem vytvořil citlivostní analýzu, abych prozkoumal vliv změn počátečních parametrů (počet vyrobených kusů, diskont).

Investiční náklady na vlastní výrobu blikáčů jsou 143 153 Kč (4). Cena se skládala z nákupu 3D tiskárny a zařízení Voltera V-One. Provozní náklady na vlastní výrobu blikáčů se skládají z nákladů na materiál, součástky, zaměstnance, elektrickou energii, opravy a zmetkovitost. Celkové provozní náklady na výrobu jednoho blikáče při použití materiálu r-PLA jsou 58,212 Kč (36) a při použití materiálu r-PET-G 71,003 Kč (37). Provozní náklady na materiál r-PLA jsou o 12,8 Kč menší v porovnání s materiálem r-PET-G.

K porovnání vlastní výroby blikáčů s nákupem hotových blikáčů jsem využil rozdíl hodnot NPV podle vztahu (45). Cenu nakoupeného blikáče jsem stanovil na 73,5 Kč. Z výsledných hodnot je zřejmé, že vlastní výroba blikáčů se vyplatí pouze při použití materiálu r-PLA a zároveň při výrobě více než 1 737 kusů blikáčů (bod zvratu). Pokud by společnost do výrobců potřebovala méně kusů blikáčů, bude pro společnost rentabilnější nakoupit hotové blikáče od dodavatelů.

Citlivostní analýzu jsem vytvořil ke zjištění změn rentability investice při změně vstupních parametrů. Mezi měněnými vstupními parametry byly počet vyrobených kusů (1 000 až 2 750 kusů) a velikost hodnoty diskontu (5–11 %). Materiál r-PET-G dosahoval ve všech případech záporného NPV (Tabulka 35). Pro společnost by bylo rentabilnější nakupovat hotové blikáče. Použití vlastní výroby a materiálu r-PLA je rentabilní při výrobě více než 2 000 kusů, nebo při výrobě 1 750 kusů a diskontu 5–7 % (Tabulka 34). Použití materiálu r-PET-G není rentabilní z důvodu velké zmetkovitosti. Pokud by při dalším vývoji této technologie došlo ke zvýšení spolehlivosti, lze předpokládat, že i při použití materiálu r-PET-G může být investice rentabilní.

Nediskutovanou myšlenkou v ekonomickém modelu je ekologie při vlastní výrobě blikáčů. Ekologie je v dnešním světě velice diskutovaným tématem, které se v rámci snahy o udržitelnost produkce promítá do vyšších cen za výrobek, a to v různých výrobních odvětvích (technologie, potraviny...). Za zařízení, které je vyrobeno z recyklovaných materiálů nebo ekologickým způsobem, jsou někteří spotřebitelé ochotni zaplatit vyšší částky. V takovém případě by společnost mohla výrobky obsahující ekologicky vyrobené blikáče prodávat za vyšší ceny – odhadem o 20–40 %.

## 5. Závěr

---

V této bakalářské práci jsem se věnoval novému procesu výroby desek plošných spojů alternativní metodou, která bude v porovnání s klasickými metodami výroby šetrnější k životnímu prostředí. Vyvinutá alternativní metoda výroby desek plošných spojů se skládá ze čtyř kroků – vytisknutí základní izolační destičky na 3D tiskárně s použitím recyklovaných polymerů (r-PLA, r-PET-G nebo r-PET), osazení součástkami, depozice vodivého motivu a vytvrzení. Tato technologie nevyžaduje použití toxických látek a v porovnání s klasickou metodou výroby je méně energeticky náročná. Mechanická odolnost je vyřešena zapuštěním součástek do izolačního substrátu.

K ověření funkčnosti, kvality a spolehlivosti této nové metody výroby desek plošných spojů jsem navrhl a zhotovil tři typy vzorků. První vzorky sloužily pro testování kvality kontaktování nové metody. Kvalita kontaktů byla vyhodnocena pomocí přechodového odporu, který byl podobný přechodovým odporům vzorků při použití vodivých lepidel (desítky mΩ). Druhé testovací vzorky byly vytvořeny pro zjištění závislosti vodivosti stříbrné pasty na základě použitého substrátu. K vyhodnocení byl použit výpočet odporu na čtverec. Hodnoty odporu na čtverec se pohybovaly kolem 7–10 mΩ. Třetí vzorky byly vytvořeny pro demonstrování reálného použití v podobě jednoduchého blikáče. Celkem jsem vytvořil 30 vzorků, z nichž 29 bylo po menších manuálních opravách plně funkčních.

Pro další otestování spolehlivosti nové metody desek plošných spojů byly první vzorky podrobeny testům v šokové a vlhkostní komoře. Výsledky v šokové komoře odhalily zvýšení přechodového odporu až na čtyřnásobek původní hodnoty. Výsledky odporů vzorků z vlhkostní komory vykazovaly také zvýšené hodnoty. Nejhuře reagoval na vlhkost materiál r-PET-G, u kterého byly naměřené hodnoty odporů o několik řádů vyšší.

Poslední část bakalářské práce je věnována ekonomickému modelu, který porovná investice do vlastní výroby desek plošných spojů novou alternativní metodou s nákupem desek plošných spojů. K porovnání byl použit rozdíl hodnot NPV a pro zjištění rentability na základě změn vstupních parametrů byla použita citlivostní analýza. Z výsledků vyplývá, že investice do vlastní výroby desek plošných spojů se vyplatí pouze s použitím materiálu r-PLA a roční minimální produkcí 1 737 kusů blikáčů.

Tato alternativní metoda výroby desek plošných spojů by mohla najít uplatnění v nevýkonových zařízeních nebo levné elektronice, kde nejsou vysoké požadavky na spolehlivost. Další možné uplatnění by tato metoda mohla najít v oblasti prototypování.

Vybrané výsledky uvedené v této bakalářské práci byly zároveň publikovány jako příspěvek na mezinárodní konferenci International Spring Seminar on Electronics (ISSE), která se konala v květnu roku 2023 v rumunském Temešváru. Příspěvek bude dostupný ve sborníku konference v digitální knihovně IEEE pod názvem "Solderless Component Assembly: Novel Ecological Approach to Electronics Production". Hlavním přínosem této bakalářské práce je právě zpracovaný postup výroby desek plošných spojů novým alternativním způsobem, který by měl mít v porovnání s klasickou metodou výroby výrazně menší dopad na životní prostředí. Další vývoj této technologie by se mohl zabývat procesem výroby vícevrstvých desek plošných spojů, kompletnímu zapouzdření desky plošného spoje pro získání lepších vlastností nebo možností využití odpadního PET. Právě vývojem vícevrstvých desek plošných spojů bych se rád věnoval v rámci budoucí diplomové práce nebo v rámci výzkumného projektu.



## 6. Reference

---

- [1] REDWOOD BEN, FILEMON SCHÖFFER a GARRET BRIAN. *The 3D Printing Handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, 2017. ISBN 9789082748505.
- [2] JIMÉNEZ, Mariano, Luis ROMERO, Iris A. DOMÍNGUEZ, María Del Mar ESPINOSA a Manuel DOMÍNGUEZ. Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. *Complexity* [online]. 2019, **2019** [vid. 2023-04-18]. ISSN 10990526. Dostupné z: doi:10.1155/2019/9656938
- [3] STRÍTESKÝ, ONDŘEJ PRŮŠA, JOSEF PRŮŠA a MARTIN BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa research, 2020. ISBN 978-80-907798-0-8.
- [4] *Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S+ | 3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši* [online]. [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>
- [5] HORVATH, Joan. *Mastering 3D Printing* [online]. Berkeley, CA: Apress, 2014 [vid. 2023-05-08]. ISBN 978-1-4842-0026-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4842-0025-4
- [6] *Typy tiskáren a rozdíly mezi nimi | Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezimi-nimi\\_112464](https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezimi-nimi_112464)
- [7] *Polar 3D Printer and Polar Cloud | Sargent Welch* [online]. [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.sargentwelch.com/store/product/21104232/polar-3d-printer-and-polar->
- [8] PRABHAKAR, M. Manoj, A. K. SARAVANAN, A. Haiteer LENIN, I. Jerin LENO, K. MAYANDI a P. Sethu RAMALINGAM. A short review on 3D printing methods, process parameters and materials. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **45**, 6108–6114 [vid. 2023-05-08]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.10.225
- [9] *SLA 3D tiskárna Creality LD-002R | TSBOHEMIA.CZ* [online]. [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: [https://www.tsbohemia.cz/sla-3d-tiskarna-creality-ld-002r\\_d373798.html](https://www.tsbohemia.cz/sla-3d-tiskarna-creality-ld-002r_d373798.html)
- [10] *Laser SLA vs DLP vs Masked SLA 3D Printing Technology - The Ortho Cosmos* [online]. [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://theorthocosmos.com/laser-sla-vs-dlp-vs-masked-sla-3d-printing-technology-compared/>

- [11] PADMAKUMAR M. Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2020, **7**(3), 338–371 [vid. 2023-05-08]. ISSN 2196-7229. Dostupné z: doi:10.1007/s40516-020-00124-0
- [12] *SLS 3D printing service | makexyz.com* [online]. [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.makexyz.com/printer-services/process/SLS-3D-printing-services>
- [13] PAVEL MACH, JAN URBÁNEK a VLASTIMIL SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [14] LI, Jianzhi, Puneet SHRIVASTAVA, Zong GAO a Hong Chao ZHANG. Printed circuit board recycling: A state-of-the-art survey. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* [online]. 2004, **27**(1), 33–42 [vid. 2023-05-08]. ISSN 1521334X. Dostupné z: doi:10.1109/TEPM.2004.830501
- [15] DENG, Yelin, Dimos PARASKEVAS, Yajun TIAN, Karel VAN ACKER, Wim DEWULF a Joost R. DUFLOU. Life cycle assessment of flax-fibre reinforced epoxidized linseed oil composite with a flame retardant for electronic applications. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, **133**, 427–438 [vid. 2023-05-08]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.05.172
- [16] GÉCZY, Attila, Vilmos LÉNER, István HAJDU a Zsolt ILLYEFALVI-VITÉZ. Low temperature soldering on biopolymer (PLA) printed wiring board substrate. In: *Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* [online]. 2011, s. 57–62 [vid. 2023-05-08]. ISBN 9781457721120. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2011.6053550
- [17] JIA, Dongmei, Jingyi XIE, Mahmut DIRICAN, Dongjun FANG, Chaoyi YAN, Yi LIU, Chunxing LI, Meng CUI, Hao LIU, Gang CHEN, Xiangwu ZHANG a Jinsong TAO. Highly smooth, robust, degradable and cost-effective modified lignin-nanocellulose green composite substrates for flexible and green electronics. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2022, **236** [vid. 2023-05-08]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2022.109803
- [18] LIU, Jingping, Cheng YANG, Haoyi WU, Ziyin LIN, Zhexu ZHANG, Ronghe WANG, Baohua LI, Feiyu KANG, Lei SHI a Ching Ping WONG. Future paper based printed circuit boards for green electronics: Fabrication and life cycle assessment. *Energy and*

- Environmental Science* [online]. 2014, **7**(11), 3674–3682 [vid. 2023-05-08]. ISSN 17545706. Dostupné z: doi:10.1039/c4ee01995d
- [19] HWANG, Suk Won, Jun Kyul SONG, Xian HUANG, Huanyu CHENG, Seung Kyun KANG, Bong Hoon KIM, Jae Hwan KIM, Sooyoun YU, Yonggang HUANG a John A. ROGERS. High-performance biodegradable/transient electronics on biodegradable polymers. *Advanced Materials* [online]. 2014, **26**(23), 3905–3911 [vid. 2023-05-08]. ISSN 15214095. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201306050
- [20] NASSAJFAR, Mohammad Naji, Ivan DEVIATKIN, Ville LEMINEN a Mika HORTTANAINEN. Alternative materials for printed circuit board production: An environmental perspective. *Sustainability (Switzerland)* [online]. 2021, **13**(21) [vid. 2023-05-08]. ISSN 20711050. Dostupné z: doi:10.3390/su132112126
- [21] FRANZ, Nádia Mara a Christian Luiz DA SILVA. Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE): global and contemporary challenge to production chains and the urban environment. *Gestao e Producao* [online]. 2022, **29** [vid. 2023-05-08]. ISSN 18069649. Dostupné z: doi:10.1590/1806-9649-2022v29e6621
- [22] ALCARAZ OCHOA, Maria Lourdes, Haoyang HE, Julie M. SCHOENUNG, E. HELMINEN, Tom OKRASINSKI, Bill SCHAEFFER, B. SMITH, John DAVIGNON, L. MARCANTI a Elsa A. OLIVETTI. Design parameters and environmental impact of printed wiring board manufacture. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **238** [vid. 2023-05-08]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.117807
- [23] *Recyklované filamenty pro 3D tiskárny, e-shop - EKO MB* [online]. [vid. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.ekomb.cz/>
- [24] WITTBRODT, Ben a Joshua M. PEARCE. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing* [online]. 2015, **8**, 110–116 [vid. 2023-05-08]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2015.09.006
- [25] MARTIN DVOŘÁK. *Recyklované filamenty* [elektronická pošta]. Message to: jakubzdrahal1@seznam.cz. 18. října 2022 [vid. 2022-12-12]
- [26] *Recyklovaný filament z PET - Zelená, 1 Kg - EKO MB* [online]. [vid. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.ekomb.cz/produkt/recyklovany-filament-z-pet-zelena/>
- [27] *Recyklovaný filament z PLA – Fialová, 1 KG - EKO MB* [online]. [vid. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.ekomb.cz/produkt/recyklovany-filament-z-pla-fialova-1-kg/>

- [28] *Recyklovaný filament z PET-G - Bronzová zlatá, 0,75 KG - EKO MB* [online]. [vid. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.ekomb.cz/produkt/recyklovany-filament-z-pet-g-bronzova-zlata-075-kg/>
- [29] JABARIN, S. A. Crystallization kinetics of polyethylene terephthalate. II. Dynamic crystallization of PET. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 1987, **34**(1), 97–102 [vid. 2023-05-08]. ISSN 10974628. Dostupné z: doi:10.1002/app.1987.070340108
- [30] PETR MALÝ. *Měření mechanických a elektrických vlastností pájeného spoje*. Plzeň. 2013, Diplomová práce: Západočeská univerzita v Plzni, Elektrotechnická fakulta, Vedoucí práce: Doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D. 2013
- [31] SIRJANI, Elaheh, Peter J. CRAGG a Marcus K. DYMOND. Glass transition temperatures, melting temperatures, water contact angles and dimensional precision of simple fused deposition model 3D prints and 3D printed channels constructed from a range of commercially available filaments. *Chemical Data Collections* [online]. 2019, **22** [vid. 2023-05-08]. ISSN 24058300. Dostupné z: doi:10.1016/j.cdc.2019.100244
- [32] *3. Getting Started with your First Print - V-One* [online]. [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://docs.voltera.io/v-one/getting-started/hello-world-project/3.-getting-started-with-your-first-print>
- [33] FAYAZ, S. M., M. A. ABDOLI, M. BAGHDADI a A. R. KARBASSI. Extraction of silver from computer printed circuit boards wastes by supercritical fluids: pretreatment study. *International Journal of Environmental Science and Technology* [online]. 2022, **19**(6), 4883–4890 [vid. 2023-05-08]. ISSN 17352630. Dostupné z: doi:10.1007/s13762-021-03679-3
- [34] COSATE DE ANDRADE, Marina F., Patrícia M.S. SOUZA, Otávio CAVALETT a Ana R. MORALES. Life Cycle Assessment of Poly(Lactic Acid) (PLA): Comparison Between Chemical Recycling, Mechanical Recycling and Composting. *Journal of Polymers and the Environment* [online]. 2016, **24**(4), 372–384 [vid. 2023-05-08]. ISSN 15662543. Dostupné z: doi:10.1007/s10924-016-0787-2
- [35] *Voltera V-One with Drill Attachment - Voltera* [online]. [vid. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://www.voltera.io/store/v-one-c>
- [36] *Conductor 3 Ink Cartridge - 2mL - Voltera* [online]. [vid. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.voltera.io/store/conductor-3-ink-cartridge-3ml>

- [37] *innogy (RWE) - tarif innogy (RWE) - elektrina Start 15* | Kurzy.cz [online]. [vid. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/elektrina/innogy-rwe/innogy-rwe-elektrina-start-15>
- [38] *FAQ - Často kladené otázky* | Prusa Knowledge Base [online]. [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/faq-casto-kladene-otazky\\_1932](https://help.prusa3d.com/cs/article/faq-casto-kladene-otazky_1932)
- [39] *E3D V6 tryska 0.25 mm* | 3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši [online]. [vid. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/e3d-v6-tryska-0-25-mm/>
- [40] *Disposable Nozzles - 25 Pack - Voltera* [online]. [vid. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.voltera.io/store/nozzles-disposable>
- [41] JAN KALTMAYER. *Technologie výroby DPS*. Praha. 2018, Bakalářská práce: České vysoké učení technické v Praze, Elektrotechnická fakulta, Vedoucí práce: Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D
- [42] FILIP HOLÝ. *Elektricky vodivé polymery pro 3D tisk*. Praha. 2019, Bakalářská práce: České vysoké učení technické v Praze, Elektrotechnická fakulta, Vedoucí práce: Ing. Petr Veselý, PhD.
- [43] *Ceník / Printed - plošné spoje a osazování* [online]. [vid. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://printed.cz/cenik/>



## 7. Seznam obrázků

---

Obrázek 1 - FFF tiskárna PRUSA MK3S+ [4] .....	16
Obrázek 2 - Tiskárna s delta konstrukcí [6].....	17
Obrázek 3 - Tiskárna s polar konstrukcí [7] .....	18
Obrázek 4 - SLA tiskárna [9].....	18
Obrázek 5 - SLA vytvrzování [10] .....	19
Obrázek 6 - DLP vytvrzování [10] .....	20
Obrázek 7 - MSLA vytvrzování [10].....	20
Obrázek 8 - Metoda SLS [12].....	21
Obrázek 9 - THT a SMT.....	23
Obrázek 10 - Výroba jednovrstvé DPS.....	24
Obrázek 11 - Aditivní metoda výroby DPS [13] .....	24
Obrázek 12 - Výroba DPS na bázi papíru [18] .....	26
Obrázek 13 - Ilustrace DPS se zapuštěnými součástkami .....	29
Obrázek 14 - Zařízení Voltera V-One .....	32
Obrázek 15 - Vývojový diagram.....	32
Obrázek 16 - Motiv pro měření přechodového odporu .....	33
Obrázek 17 - Vzorky pro měření přechodového odporu (r-PLA) .....	35
Obrázek 18 - Vzorky pro měření přechodového odporu (r-PET-G).....	35
Obrázek 19 - Vzorky pro měření přechodového odporu (r-PET).....	35
Obrázek 20 - Motiv vodivé cesty pro měření odporu na čtverec.....	36
Obrázek 21 - Kontakty rezistoru.....	38
Obrázek 22 - Porovnání velikostí přechodových odporů .....	39
Obrázek 23 – Porovnání velikostí odporů na čtverec .....	40
Obrázek 24 - Výsledky přechodových odporů po testování (1) .....	42
Obrázek 25 - Elektronová mikroskopie – vzorky před testem .....	43
Obrázek 26 - Elektronová mikroskopie – vzorky po testu .....	43
Obrázek 27 - Výsledky přechodových odporů po testování (2) .....	44
Obrázek 28 - Prohnutí r-PLA.....	45
Obrázek 29 - Ilustrace originálního obvodu [32].....	46
Obrázek 30 - Kryt pouzdra NE555 .....	47
Obrázek 31 - Blikač r-PLA .....	48
Obrázek 32 - Blikač r-PET-G .....	48
Obrázek 33 - Ilustrace výroby DPS .....	49
Obrázek 34 - Složení nákladů r-PLA.....	61
Obrázek 35 - Složení nákladů r-PET-G.....	61
Obrázek 36 - Graf hodnot NPV .....	68





## 8. Seznam tabulek

---

Tabulka 1 - Vlastnosti materiálů pro DPS .....	25
Tabulka 2 - Parametry nastavení 3D tisku pro r-PLA .....	30
Tabulka 3 - Parametry nastavení 3D tisku pro r-PET-G.....	31
Tabulka 4 - Parametry nastavení 3D tisku pro r-PET .....	31
Tabulka 5 - Hodnoty odporů rezistorů.....	34
Tabulka 6 - Parametry nastavení pece (1).....	34
Tabulka 7 - Parametry nastavení pece (2).....	35
Tabulka 8 - Parametry nastavení pece (3).....	37
Tabulka 9 - Průměrné hodnoty odporu (1) .....	38
Tabulka 10 - Průměrné hodnoty odporu (2) .....	38
Tabulka 11 - Výsledné hodnoty přechodových odporů.....	39
Tabulka 12 - Průměrné změřené hodnoty odporu (3).....	40
Tabulka 13 - Tabulky s nefunkčními vzorky.....	45
Tabulka 14 - Parametry nastavení pece (4).....	47
Tabulka 15 - Porovnání cen jednotlivých materiálů.....	54
Tabulka 16 - Ceny součástek .....	55
Tabulka 17 - Hodnoty cash flow – 1 000 vzorků.....	63
Tabulka 18 - Hodnoty NPV – 1 000 vzorků.....	63
Tabulka 19 - Hodnoty RCF – 1 000 vzorků .....	63
Tabulka 20 - Celkové náklady na jeden vzorek (1) .....	63
Tabulka 21 - Hodnoty cash flow – 1 500 vzorků.....	64
Tabulka 22 - Hodnoty NPV – 1 500 vzorků.....	64
Tabulka 23 - Hodnoty RCF – 1 500 vzorků .....	64
Tabulka 24 - Celkové náklady na jeden vzorek (2) .....	64
Tabulka 25 - Hodnoty cash flow – 2 000 vzorků.....	65
Tabulka 26 - Hodnoty NPV – 2 000 vzorků.....	65
Tabulka 27 - Hodnoty RCF – 2 000 vzorků .....	65
Tabulka 28 - Celkové náklady na jeden vzorek (3) .....	65
Tabulka 29 - Hodnoty cash flow – 1 000 nakoupených vzorků .....	66
Tabulka 30 - Hodnoty cash flow – 1 500 nakoupených vzorků .....	66
Tabulka 31 - Hodnoty cash flow – 2 000 nakoupených vzorků .....	66
Tabulka 32 - Výsledné hodnoty NPV a RCF.....	66
Tabulka 33 - Rozdílové hodnoty NPV.....	67
Tabulka 34 - Citlivostní analýza při použití materiálu r-PLA .....	69
Tabulka 35 - Citlivostní analýza při použití materiálu r-PET-G .....	69