

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE**

Elektrické vlastnosti fotopolymerů pro 3D tisk

**Electrical Properties of Photopolymers Designated for
3D Printing**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Petr Veselý

Jan Půlpán

Praha 2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Půlpán** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **474590**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Elektrické vlastnosti fotopolymerů pro 3D tisk

Název bakalářské práce anglicky:

Electrical Properties of Photopolymers Designated for 3D printing

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši na tématiku technologie 3D tisku se zaměřením na technologii SLA, seznámte se s používanými materiály a jejich vlastnostmi. Prakticky se seznámte s SLA tiskárnou a možnostmi tisku.
2. Ve spolupráci s firmou vyberte soubor vhodných materiálů pro měření elektrických vlastností. Navrhněte zkušební metody a zkušební vzorky, pomocí SLA tiskárny vzorky vytiskněte.
3. Proveďte měření elektrických vlastností zkušebních vzorků (rezistivita, dielektrická konstanta a dielektrické ztráty, elektrická pevnost).
4. Získaná data vyhodnotte. Navrhněte možnosti zlepšení těchto vlastností, uveďte možné komplikace při aplikaci řešení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] B. Redwood, F. Schöffer, and B. Garret, The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications, 1st edition. Amsterdam: 3D Hubs, 2017.
- [2] J. K. Fink, 3D Industrial Printing with Polymers, 1st edition. Beverly, USA: Scrivener Publishing LLC, 2019.
- [3] O. Stříteský, J. Průša, and M. Bach, Základy 3D tisku s Josefem Průšou, 1. Praha: Prusa Research s.r.o., 2019.
- [4] V. Ducháček, Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2011.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Veselý, katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Petr Veselý
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 14. 5. 2020

.....

Jan Půlpán

Poděkování

Poděkovat bych chtěl především vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Petru Veselému, za jeho rady a připomínky k obsahu této práce a jeho vstřícnost a ochotu při práci na praktické části. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Šeflovi a Ing. Josefu Sedláčkovi za poskytnutí jejich laboratoří a pomoc při některých měřeních.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se skládá ze tří hlavních částí, a to z rešerše pojednávající o různých metodách 3D tisku s detailně zpracovanou kapitolou o technologii SLA, praktické části, ve které je popsán postup při přípravě vzorků pro měření, a konečně z naměření a vyhodnocení elektrických vlastností těchto vzorků. Účelem rešeršní části je seznámit čtenáře se základními technologiemi 3D tisku, především s technologií SLA, která byla použita pro vyhotovení zkoumaných vzorků pro tuto práci. Cílem praktické a laboratorní části je z vybraných materiálů připravit vzorky pro měření jejich elektrických vlastností a tyto materiály poté na základě těchto vlastností porovnat.

Klíčová slova

3D tisk, SLA, stereolitografie, fotopolymery, epoxidová pryskyřice, elektrické vlastnosti, objemová rezistivita, relativní permitivita, ztrátový činitel, elektrická pevnost

Abstract

This bachelor thesis consists of three major parts, namely a research on various 3D printing technologies with a comprehensive chapter about SLA technology, a practical part with a description of the methods used for the preparation of measured specimens and finally the measurement and evaluation of electrical properties of these specimens. The purpose of the research part is to acquaint the reader with basic 3D printing technologies, especially with the SLA technology which was used to print measured specimens. The goal of the practical and the laboratory parts is to prepare and print the specimens with selected materials, to measure and evaluate their electrical properties and to compare these materials based on these properties.

Keywords

3D printing, SLA, stereolithography, photopolymers, epoxy resin, electrical properties, volume resistivity, relative permittivity, dissipation factor, dielectric strength

Obsah

Abstrakt.....	8
Obsah	9
1 Úvod	12
2 Technologie 3D tisku	13
2.1 Technologie FFF.....	13
2.1.1 Materiály pro FFF 3D tisk	14
2.1.2 Tisk technologií FFF	15
2.2 Technologie SLS.....	16
2.2.1 Materiály pro SLS 3D tisk	16
2.2.2 Tisk technologií SLS	17
2.3 Technologie Material Jetting.....	18
2.3.1 Materiály pro Material Jetting 3D tisk	18
2.3.2 Tisk technologií Material Jetting	19
2.3.3 Technologie DOD.....	19
2.4 Technologie Binder Jetting.....	20
2.4.1 Materiály pro Binder Jetting 3D tisk	20
2.4.2 Tisk technologií Binder Jetting	21
2.5 Technologie DMLS/SLM	22
2.6 Využití 3D tisku v elektrotechnice.....	23
2.6.1 Desky plošných spojů	23
2.6.2 Konstrukční krabičky pro elektrotechnické výrobky	24
2.6.3 Kapacitory a induktory	25
3 Technologie SLA	26
3.1 Historie technologie SLA	26
3.2 Materiály pro SLA 3D tisk.....	27
3.3 Tisk technologií SLA.....	27
3.3.1 Následná úprava vytištěných objektů	29
3.4 Technologie DLP a MSLA	29
3.4.1 DLP	29
3.4.2 MSLA	30
3.5 Metody bottom-up, top-down a CLIP.....	30
3.5.1 Bottom-up.....	31
3.5.2 Top-down	31

3.5.3	CLIP	32
3.5.4	Porovnání těchto metod	32
3.6	Rozměrová přesnost SLA tiskáren	33
3.7	Výhody a nevýhody technologie SLA.....	33
3.8	Průmyslový a desktopový SLA tisk.....	34
3.9	Využití SLA 3D tisku	35
3.9.1	Prototypy.....	35
3.9.2	Šperkařství.....	35
3.9.3	Dentální průmysl	35
3.9.4	Naslouchátka	36
3.9.5	Zábava	37
4	Základní elektrické vlastnosti dielektrik	38
4.1	Dielektrika a izolanty	38
4.2	Relativní permitivita	38
4.3	Objemová rezistivita.....	38
4.4	Ztrátový činitel.....	39
4.5	Elektrická pevnost	39
5	Praktická část.....	40
5.1	Zkoumané materiály.....	40
5.1.1	Blue resin.....	40
5.1.2	Orange resin	40
5.2	Příprava vzorků.....	41
5.2.1	Návrh vzorků	41
5.2.2	Příprava modelů na 3D tisk	41
5.2.3	Tisk a následná úprava vzorků.....	42
5.3	Zhodnocení hotových vzorků	43
5.4	Měření elektrických vlastností vzorků.....	43
5.4.1	Měření permitivity a ztrátového činitele.....	43
5.4.2	Měření objemové rezistivity.....	44
5.4.3	Měření elektrické pevnosti.....	45
6	Vyhodnocení výsledků měření	47
6.1	Očekávané výsledky	47
6.2	Dosažené výsledky.....	47
6.2.1	Relativní permitivita	47
6.2.2	Ztrátový činitel.....	50
6.2.3	Objemová rezistivita.....	52

6.2.4	Elektrická pevnost	54
6.3	Porovnání dosažených a očekávaných výsledků.....	56
6.3.1	Souhrn naměřených výsledků	56
6.3.2	Relativní permitivita	57
6.3.3	Ztrátový činitel	57
6.3.4	Objemová rezistivita	57
6.3.5	Elektrická pevnost	58
6.4	Možné příčiny vzniku chyb při měření	58
6.4.1	Relativní permitivita a ztrátový činitel	58
6.4.2	Objemová rezistivita	59
6.4.3	Elektrická pevnost	59
7	Závěr.....	61
8	Seznam použité literatury	63
9	Seznam obrázků	66
10	Seznam příloh.....	67

1 Úvod

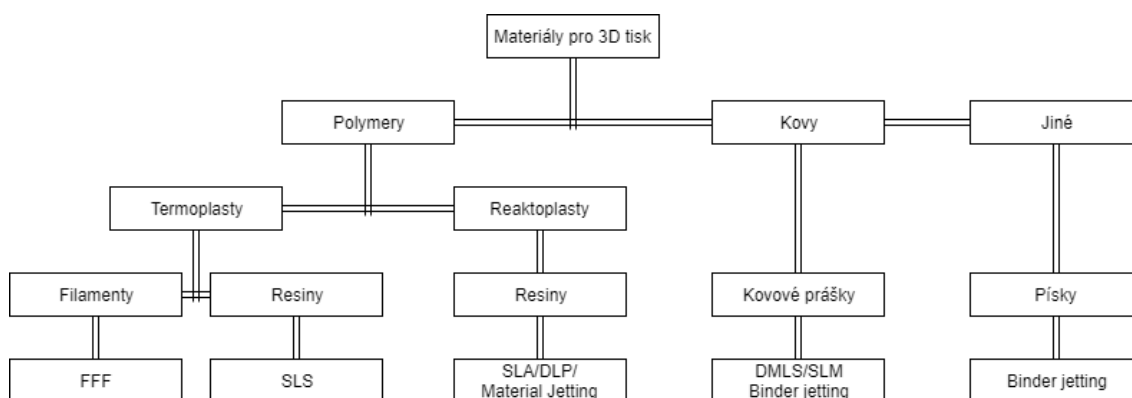
Při 3D tisku metodou stereolitografie (SLA) hraje podstatnou roli zvolení vhodného fotopolymery pro tištěný objekt. Různé fotopolymery mají různé vlastnosti. V rešeršní části této práce nejprve představím základní metody 3D tisku s detailním popisem metody SLA. Tyto metody porovnám a představím jejich možná využití v elektrotechnice. Dále se zaměřím na materiály používané pro 3D tisk a charakterizuji je. Na konci rešeršní části se budu zabývat zkoumanými elektrickými vlastnostmi.

V praktické části čtenáře seznámím s materiály vybranými pro měření a postupem při návrhu a přípravě vzorků pro měření. Hotové vzorky popíšu a zhodnotím z hlediska jejich rozměrové přesnosti a vzhledu. Dále představím měřicí aparatury použité pro jednotlivá měření zkoumaných vlastností včetně postupů při samotných měřeních.

Hlavním cílem této práce je prozkoumat různé fotopolymery používané pro SLA 3D tisk a charakterizovat je z hlediska jejich elektrických vlastností. Elektrické vlastnosti jsou důležité parametry izolantů sloužící k výběru vhodného izolantu pro odpovídající uplatnění. Poslední část této práce obsahuje očekávané a naměřené výsledky vlastností zkoumaných materiálů a jejich zhodnocení.

2 Technologie 3D tisku

Existuje mnoho různých technologií 3D tisku lišících se v různých ohledech. Všechny tyto technologie však spadají do oblasti aditivní výroby, kde tisk objektů probíhá po vrstvách. Jednotlivé technologie lze dělit z různých hledisek, nejjednodušší je ale rozdělit je dle materiálu použitého pro tisk. Toto rozdělení je na následujícím obrázku [1].



Obrázek 1: Rozdělení technologií 3D tisku dle materiálu použitého pro tisk [1]

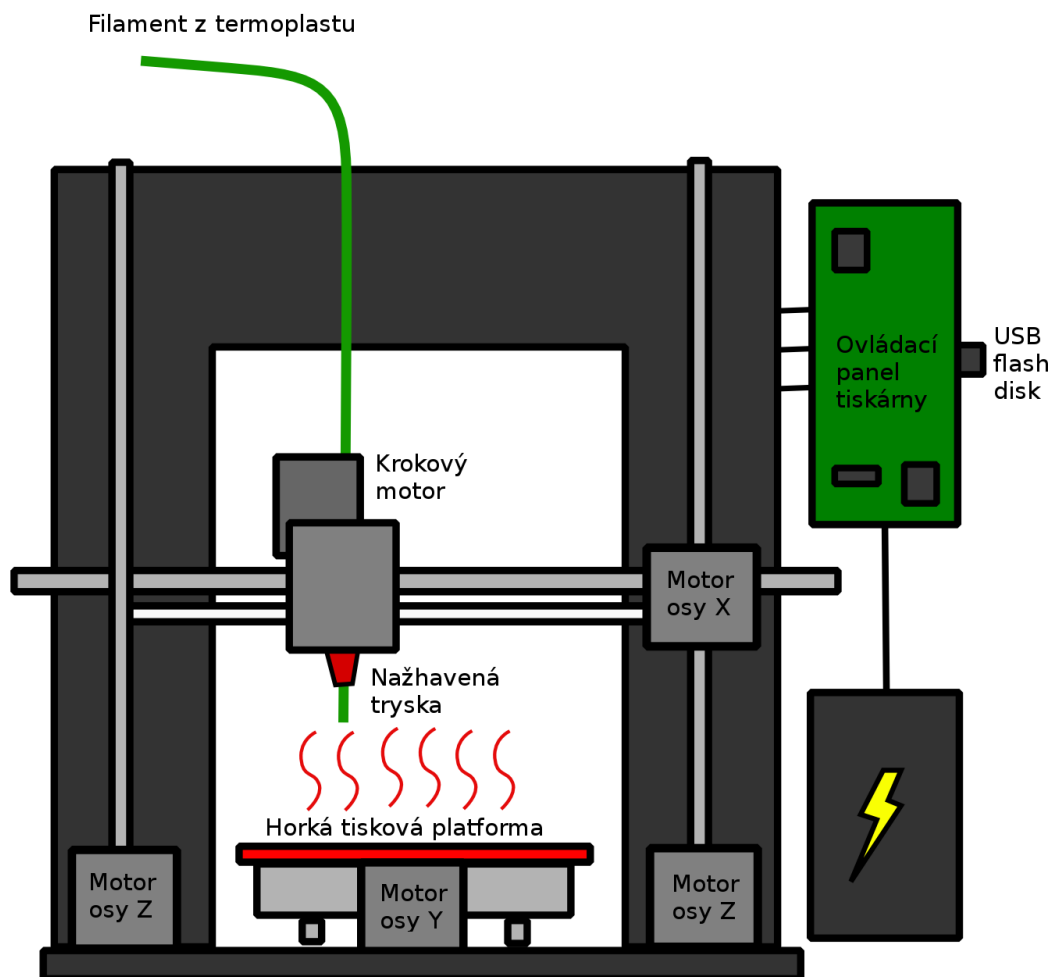
Jelikož obecně neexistuje univerzální technologie použitelná pro jakékoliv uplatnění, může být volba technologie pro 3D tisk rozhodující pro uplatnění tištěného objektu. V následujících podkapitolách budou popsány základní technologie 3D tisku, v kapitole 3 pak detailně technologie SLA.

2.1 Technologie FFF

FFF neboli Fused Filament Fabrication je nejrozšířenější technologií 3D tisku. Této technologii se také říká FDM (Fused Deposition Modeling), což je původní termín užívaný firmou Stratasys. Je to technologie fungující na principu vytlačování materiálu, kdy je materiál selektivně vytlačován přes trysku nebo distribučním otvorem. Tato technologie se používá pro tisk termoplastů [2].

Stavebním materiálem této technologie je tedy především roztavený plast, který je na sebe nanášen po vrstvách. Materiálem pro tisk je tisková struna neboli filament, který má nejčastěji průměr 1,75 mm. V porovnání s pryskyřicemi nebo jemným práškem využívaným v jiných technologiích jsou výhody tisku filamentem jednoduchost a bezpečnost. Na druhou stranu, nevýhoda této technologie je patrná viditelnost jednotlivých vrstev, jejichž výška je většinou 0,05÷0,3 mm. Další nevýhodou oproti např.

SLA je vyšší náchylnost na poruchy během tisku, zejména zacpání trysky filamentem nebo neuchycení vrstvy k stavěcí platformě nebo předešlé vrstvě [3].



Obrázek 2: Schéma FFF 3D tiskárny [4]

2.1.1 Materiály pro FFF 3D tisk

Nejpoužívanějšími a nejdostupnějšími materiály pro výrobu filamentů jsou ABS (akrylonitrilbutadienstyren) a PLA (polymléčná kyselina). ABS nabízí dobré mechanické vlastnosti a odolnost proti vyšším teplotám. PLA má v porovnání s ABS tyto vlastnosti poněkud horší, ale je vhodnější pro začátečníky a možná i proto je rozšířenější. Výhodou obou těchto materiálů je široká dostupnost ve velkém množství barev. Jako alternativa k ABS byl vytvořen materiál ASA (akrylonitrilstyrenakryl). Má zvýšenou odolnost proti větru a výbornou odolnost proti UV záření. Další, v dnešní době často používaný materiál, je PET-G (polyethylenglykol polyethylentereftalátu). Má podobné vlastnosti jako ABS, ale méně se smršťuje a praská a je nezávadný ze zdravotního hlediska. Trpí

však „stringováním“, které na vytištěných objektech zanechává viditelné nitě, které jsou náročné na odstranění [1], [5]–[7].

2.1.2 Tisk technologií FFF

Před samotným tiskem je k dispozici nastavení různých parametrů tisku, aby bylo dosaženo co nejspokojivějších výsledků. Uživatel si může nastavit rychlost tisku, rychlost vytlačování, teplotu trysky, výšku vrstvy a další. Některé FFF tiskárny mají tato (doporučená) nastavení předvolena automaticky v závislosti na použitém materiálu [1].

Při tisku technologií FFF je nejprve filament namotaný na cívce vložen do tiskové hlavy. Když tisková tryska dosáhne nastavené teploty, krokový motor protáhne filament skrz nažhavenou trysku, která jej roztaví. Poté tiskárna pohybuje tiskovou hlavou a vytlačuje na tiskovou plochu roztavený filament, který se ochladí a ztvdne. Takto se vytiskne první vrstva, po které se tisková plocha posune dolů o nastavenou výšku vrstvy a tento proces se opakuje až do vytištění poslední vrstvy [1].

Po vytištění objekt stačí sloupnout z tiskové plochy a odstranit z něj případná vlákna filamentu a podpěry. Takto je vytištěný předmět většinou připraven na svou aplikaci a není jej třeba po funkční stránce dále upravovat, což je velká výhoda oproti SLA, kde tištěný předmět musíme po vytištění omýt od nevytvrzeného resinu v isopropylalkoholu a dovytvrdit UV zářením. Z vizuálního hlediska můžeme následně objekty dopravit například zabroušením pro dosažení hladšího povrchu, nabarvením námi zvolenými barvami nebo vyhlazením výpary acetonu pro zahlazení a zvýšený lesk [5], [8].



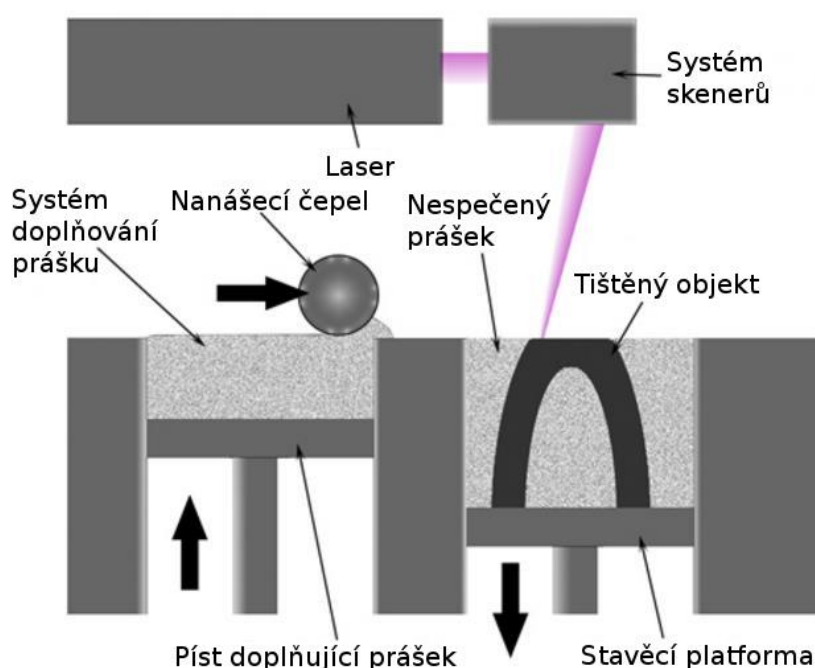
Obrázek 3: FFF 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S [9]

2.2 Technologie SLS

SLS neboli Selective Laser Sintering (v praxi často „sintrování“) je technologie 3D tisku pracující na principu spékání práškové vrstvy, kdy přivedená tepelná energie, což bývá laserový paprsek, spéká práškový resin vrstvu po vrstvě [2].

2.2.1 Materiály pro SLS 3D tisk

Nejvhodnější materiály pro spékání práškové vrstvy jsou obecně materiály s nízkou tepelnou vodivostí. Důvodem je stabilnější chování těchto materiálů během procesu sintrování. Takovými materiály, nejčastěji používanými pro SLS tisk, jsou polyamidy (PA). Předměty vytištěné z polyamidů mají výbornou dlouhodobou pevnost a dobrou chemickou odolnost. Nejběžnějším polyamidem je nylon. Ačkoliv se prášky pro SLS tisk vyrábějí většinou jen v bílé, šedé či černé barvě, vytištěné předměty se dají snadno nabarvit na požadovanou barvu. Vzhledem k velmi malé velikosti zrn prášku je nutné dbát pozornost zrnům odpadlým z vytištěných předmětů, jejichž vdechnutí by mohlo způsobit dýchací potíže. K dalšímu zlepšení mechanických vlastností a odolnosti proti chemikáliím či teplu nebo ke změně vzhledu tištěných předmětů, se do nylonu přidávají jiné materiály jako hliník, sklo, uhlík, grafit, písek či keramika, které společně s nylonem vytvářejí kompozitní prášek. Dále se pro tisk touto technologií používá například termoplastický polyuretan [1], [10], [11].



Obrázek 4: Schéma SLS 3D tiskárny [12]

2.2.2 Tisk technologií SLS

Před tiskem je uživateli umožněno nastavení různých parametrů tisku jako průměr laserového paprsku nebo výšku jedné vrstvy. Tyto parametry značně ovlivňují přesnost a vzhled povrchu tištěných objektů. Další významnou roli ve výsledném vzhledu hrají vlastnosti samotného prášku. Jemnější prášky zaručí hladší povrch objektů, ale jsou s nimi problémy při zacházení a nanášení vrstev během tisku. Hrubší prášky jsou sice snadnější při zacházení, ale povrch tištěného objektu je drsnější. Vzhled povrchu objektů tištěných SLS technologií je typicky matný a zrnitý na pohmat. Optimální nastavení tiskárny bývají přednastaveny výrobcem. Díky tomu uživateli stačí pouze zvolit používaný materiál a tiskárna sama zvolí správné nastavení. SLS tiskárny jsou autonomní během nahřátí, tisku a chladnutí, takže na uživateli zbývá jen doplnění a vyjmutí prášku a kontrolování samotného procesu tisku [1].

Proces SLS 3D tisku začíná tak, že se práškový resin v nádobě nahřeje na nejvyšší teplotu, při níž ještě netaje. Poté je vrstva prášku (většinou 0,1 mm) pomocí nanášecí čepele nanášena na celou plochu stavěcí platformy. Laserový paprsek CO₂ naskenuje povrch a selektivně spéká prášek, což vytvrzuje konkrétní tištěnou vrstvu. Následuje posun stavěcí platformy směrem dolů o tloušťku vrstvy a je nanášena nová vrstva prášku. Takto se proces opakuje až do vytištění poslední vrstvy. Nespečený prášek zůstává až do konce tisku na místě a díky tomu není při SLS tisku potřeba tisku podpěr, což je velká výhoda této technologie [1].

Výsledkem tisku je nádoba naplněná práškem a hotovými objekty. Jelikož lze tisknout více objektů zároveň, lze SLS použít také pro sériovou výrobu. Prášek je z padesáti procent recyklovatelný, takže úplné naplnění nádoby využije více materiálu a sníží odpad. Zbylých padesát procent tvoří spečené kousky prášku vzniklé jako vedlejší produkt při tisku, které jsou po tisku odstraněny pomocí filtrovacího síta. Umístění a orientace tištěných objektů je optimalizována tak, aby byla zvýšena obsazenost objektů v nádobě během každého tisku [1], [13].

Po dokončení tisku, když vytištěné objekty a nespečený prášek v nádobě vychladnou, je obsah nádoby vyjmut. Vytištěné objekty se odeberou od zbytku nespečeného prášku a jsou vyčištěny stlačeným vzduchem a tryskacím médiem. Vytištěné objekty jsou poté připraveny na použití nebo jejich další úpravu pro zlepšení jejich vzhledu. Běžná úprava po tisku je zabroušení, vzhledem k typické drsnosti povrchu objektů vytištěných metodou SLS. K tomu se používají speciální vibrační nádoby naplněné kousky keramiky. Vytištěný objekt se vloží dovnitř, nádoba začne vibrovat a keramické částice objekt krásně zabrousí. Tato metoda se však používá pouze u objektů, které nemají žádné části s drobnými detaily, které by se během broušení mohly ztratit [1], [14].



Obrázek 5: SLS 3D tiskárna Kit firmy Sintratec [15]

2.3 Technologie Material Jetting

Material Jetting neboli nanášení tryskáním je technologie 3D tisku fungující na principu selektivního ukládání kapiček materiálu (fotopolymery či vosky). Tato technologie připomíná 2D tisk inkoustovými tiskárnami. Kapičky materiálu, které tvrdnou při vystavení UV světlu, jsou nanášeny na sebe vrstvu po vrstvě. Tento princip umožňuje použití více materiálů při tisku jednoho objektu, čehož je běžně využíváno při tisku podpěr, které jsou tištěny z odlišného materiálu pro jejich snadnější odstranění [1], [2].

2.3.1 Materiály pro Material Jetting 3D tisk

Stejně jako technologie SLA, Material Jetting používá jako materiály pro tisk fotopolymery, které jsou vytvrzovány UV světlem. Aby tyto fotopolymery mohly být bez potíží tryskány ve formě kapiček, musí mít malou viskozitu. Tomu napomáhá nahřívání použitého fotopolymeru na teplotu 30 ± 60 °C, což zajišťuje samotná tiskárna. Na rozdíl od většiny ostatních technologií 3D tisku, technologie Material Jetting při tisku potřebuje dva rozdílné typy fotopolymerů – jeden jako hlavní materiál pro tištěný objekt a druhý pro tisk podpěr. Druhým nejčastějším materiálem pro tisk touto technologií jsou vosky. Vzhledem k výhodám technologie Material Jetting se v současnosti na výzkumu nových tiskových materiálů podílí mnoho firem. Například izraelská společnost Xjet vyvinula roztok s částicemi kovů či keramik, který se během sintrování vypaří a je s ním tedy možné tisknout i kovové nebo keramické objekty [1], [16].

2.3.2 Tisk technologií Material Jetting

Jak již bylo řečeno, technologie Material Jetting funguje podobně jako inkoustové 2D tiskárny. Po nanesení kapiček jedné vrstvy je vrstva osvícena UV světlem, což způsobí vytvrzení použitého fotopolymeru. Poté se stavěcí platforma posune dolů o tloušťku jedné vrstvy a tento proces se opakuje. Nastavení parametrů tiskárny probíhá většinou automaticky podle předvolby materiálu použitého pro tisk [1].

Výhodou této technologie je mimo jiné možnost tisku více objektů najednou, aniž by to ovlivňovalo dobu tisku. Toto je docíleno tiskem po „lajnách“, stejně jako u inkoustových 2D tiskáren, na rozdíl od např. SLS tiskáren, kde vytvrzování zajišťuje laserový paprsek. Díky tomu je docílena mnohem kratší doba potřebná pro výtisk více objektů v porovnání s jinými technologiemi. Další výhodou je vysoká přesnost tisku touto technologií, kdy možná výška jedné vrstvy začíná na 16 μm . Oproti metodě SLA, která taktéž využívá jako materiály pro tisk fotopolymery, je výhodou Material Jetting absence nutnosti následných úprav tištěných objektů pro zlepšení jejich vlastností. Vzhledem k velmi nízké výšce vrstvy u Material Jetting jsou použité fotopolymery dostatečně vytvrzené již po osvitě během tisku. V neposlední řadě je výhodou této technologie možnost tisku z několika barev či materiálů najednou. Vytištěné objekty se pak nemusí dále barvit a jednotlivé části objektů mohou mít různé vlastnosti podle použitých materiálů [1], [17].

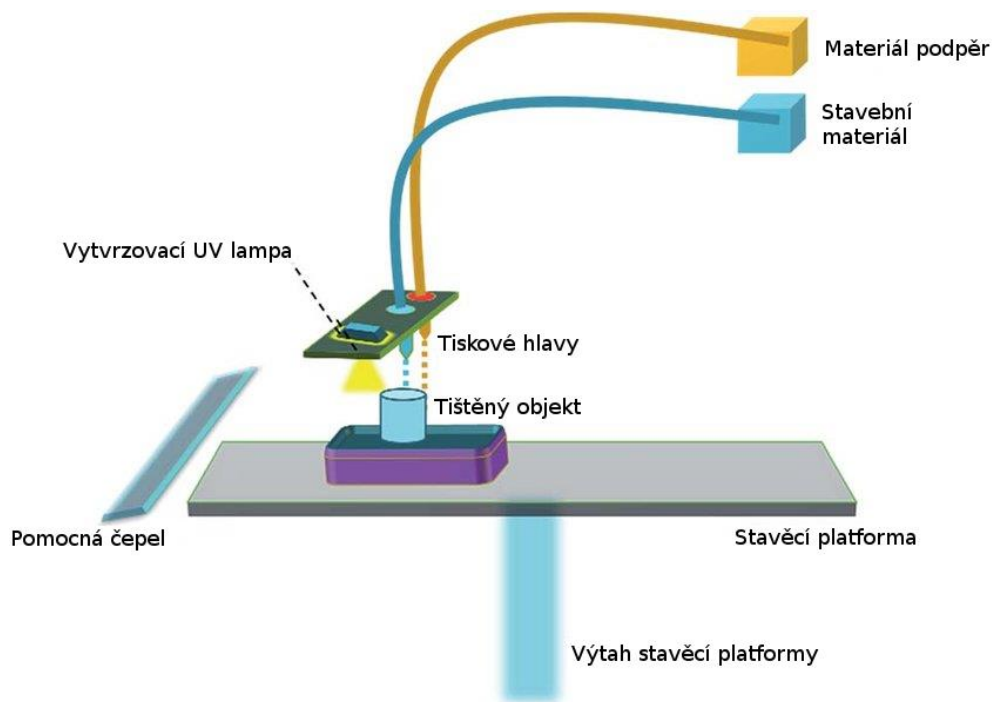
Nevýhodou je potřeba důkladné údržby tiskových hlavic, jelikož jsou náchylné na ucpání, vzhledem k malým průměrům jejich trysek a celková cena této technologie, která je v porovnání s jinými technologiemi vysoká. Jiné nevýhody se týkají vytištěných objektů, které mívají špatné mechanické vlastnosti, především pak prodloužení při přetržení. Jelikož jsou fotopolymery světlocitlivé, není dobré vytištěné objekty nechávat na světle, protože se tak dále zhoršují jejich mechanické vlastnosti [1], [17].

Tisk technologií Material Jetting vyžaduje použití podpěr u tištěných objektů. Podpěry jsou tištěny z rozpustného materiálu, který je snadno odstranitelný během konečných úprav. Tato technologie je jednou z mála technologií, které umožňují tisk z více materiálů současně. Nevýhodou tisku pevných podpěr je větší spotřeba materiálu, tudíž vyšší cena tisku [1].

2.3.3 Technologie DOD

DOD neboli Drop On Demand je technologie 3D tisku spadající pod technologii Material Jetting. DOD tiskárny mají 2 tiskové trysky – jednu pro materiál určený pro tisk chtěného objektu (typicky materiál připomínající vosk) a druhou pro materiál podpěr [1].

Nevýhodou DOD tiskáren je tisk vrstev po cestách (jako u FFF/SLS tiskáren), na rozdíl od jiných tiskáren technologie Material Jetting (tisk vrstev po „lajnách“). Naopak jejich výhodou je speciální čepel, která seřízne povrch každé nové vrstvy, a tím zaručí dokonale rovný povrch pro tisk další vrstvy. Tato technologie je používána zejména pro výrobu slévárenských modelů [1].



Obrázek 6: Schéma DOD 3D tiskárny [18]

2.4 Technologie Binder Jetting

Binder Jetting neboli tryskání pojiva je technologie 3D tisku, při které je tekuté pojivo vrstvu po vrstvě nanášeno za účelem spojení práškových materiálů (kovy, písek, keramika) [2].

2.4.1 Materiály pro Binder Jetting 3D tisk

První skupinu materiálů pro technologii Binder Jetting tvoří písky (sand). Sand Binder Jetting je nízkonákladová metoda na výrobu součástek z písku (nejčastěji pískovec nebo sádrovec). Výhodou písků je široká dostupnost ve spoustě barevných provedeníh [1].

Druhou skupinou materiálů pro Binder Jetting jsou kovy. Kovový prášek je slepován za použití polymerního pojiva. Výroba kovových součástek pomocí této

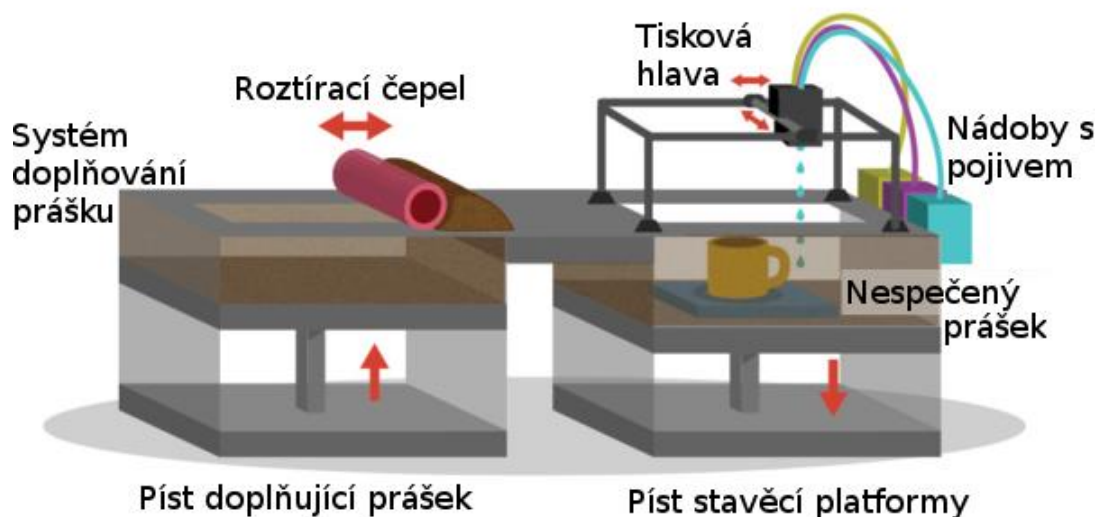
technologie umožňuje vytisknout komplexní geometrické tvary, jejichž výroba by pomocí tradičních metod nebyla možná. Funkční kovové součástky musí být po vytištění dále upraveny dalšími procesy (infiltrace nebo sintrování), jelikož bez toho mají špatné mechanické vlastnosti [1].

Dále je možné touto metodou tisknout z různých keramických materiálů, například ze skla, nebo z polymerů jako ABS (akrylonitrilbutadienstyren – typický pro metodu FFF), PA (polyamid – typický pro metodu SLS) nebo PC (polykarbonát) [19].

2.4.2 Tisk technologií Binder Jetting

Průběh tisku technologií Binder Jetting je podobný tisku na SLS tiskárně. Nejprve je na stavěcí platformu nanесena vrstva prášku (zde písek nebo kovový prášek) pomocí válečku. Tisková hlava poté přejíždí nad vrstvou prášku a nanáší kapičky pojiva (typicky průměru 80 μm), které na potřebných místech slepují zrnka prášku k sobě a vytváří tak právě tištěnou vrstvu. Po dokončení vrstvy se stavěcí platforma posune dolů o šířku vrstvy a je nanесena nová vrstva prášku. Tento postup se opakuje až do poslední vrstvy. Tisk jedné vrstvy většinou trvá kolem 30 s, což je méně než u většiny ostatních technologií. Po skončení tiskového procesu se vytištěný objekt ještě chvíli ponechá v prášku, aby pojivo spolehlivě ztvrdlo a objekt se tím zpevnil. Nakonec je objekt z prášku vyjmut a neslepený prášek je z něj odstraněn pomocí stlačeného vzduchu [1], [19].

Stejně jako u technologie SLS, tisk technologií Binder Jetting nevyžaduje tisknout podpěry, jelikož je tištěný objekt po celou dobu tisku obklopen neslepeným práškem. Díky tomu je šetřen materiál a konečné úpravy trvají kratší dobu. Na rozdíl od technologie SLS je velkou výhodou technologie Binder Jetting stoprocentní recyklovatelnost zbylého neslepeného prášku. Další výhodou této technologie je tisk bez použití zvýšené teploty, která by namáhala tištěné objekty při rychlém ohřívání a ochlazování. Tím se rovněž šetří energie a cena tisku je o to nižší. Cena samotného pojiva a pískových prášků je také nízká v porovnání s materiály pro jiné technologie. Kovové prášky jsou sice dražší než písky, ale celkové náklady na tisk z nich jsou stále mnohem nižší než u jiných technologií tisknoucích z kovů (DMLS/SLM). Hlavní nevýhodou technologie Binder Jetting jsou špatné mechanické vlastnosti vytištěných kovových součástek, které proto potřebují dodatečnou úpravu, což zvyšuje celkové náklady a povrchová textura konečného produktu je zrnitá [1], [19].



Obrázek 7: Schéma Binder Jetting 3D tiskárny [20]

2.5 Technologie DMLS/SLM

Technologie DMLS (Direct Metal Laser Sintering) a SLM (Selective Laser Melting) fungují na principu spékání práškové vrstvy, kdy přivedená tepelná energie (laserový nebo elektronový paprsek) spéká kovový prášek vrstvu po vrstvě. Zrnka prášku mají většinou průměr $20\div 40\ \mu\text{m}$. Takto tavit lze oceli, hliníkové a titanové slitiny, kobalt-chromové slitiny, exotické materiály a další. Tyto technologie jsou tedy principálně podobné technologii SLS [2], [21].

Hlavní rozdíl mezi těmito technologiemi spočívá v míře nahřátí kovového prášku. Technologie DMLS netaví prášek, ale pouze jej nahřeje na teplotu, při které se zrnka prášku spojí na molekulární úrovni. Technologie SLM používá laser, který kovový prášek úplně roztaví, a vytvoří tak zcela homogenní strukturu tištěného objektu. Díky tomu mají objekty vytištěné technologií SLM jednotnou teplotu tání. Toto je tedy hlavní rozdíl těchto technologií – DMLS vytváří objekt z kovových slitin, zatímco produktem SLM je objekt z jednoho kovu, např. titanu [1].

Stejně jako u technologie SLS, přesnost a kvalita povrchu objektů vytištěných technologiemi DMLS nebo SLM závisí na průměru laserového paprsku, tvaru zrn prášku a výšce vrstev. Typicky je ale průměr zrn prášku pro technologie DMLS a SLM menší než u SLS, tudíž tyto technologie mohou tisknout přesněji a detailněji. Tiskárny pracující na těchto technologiích jsou velmi náročné na obsluhu, takže většina z nich je používána v průmyslu. Na rozdíl od technologie SLS potřebují DMLS a SLM tiskárny navíc i materiál podpěr. Kvůli vysokým teplotám používaným při tisku jsou podpěry nezbytné pro poskytnutí opory tištěnému objektu. Zároveň podpěry fungují jako chladiče pro odvod tepla z tištěného objektu [1], [22].



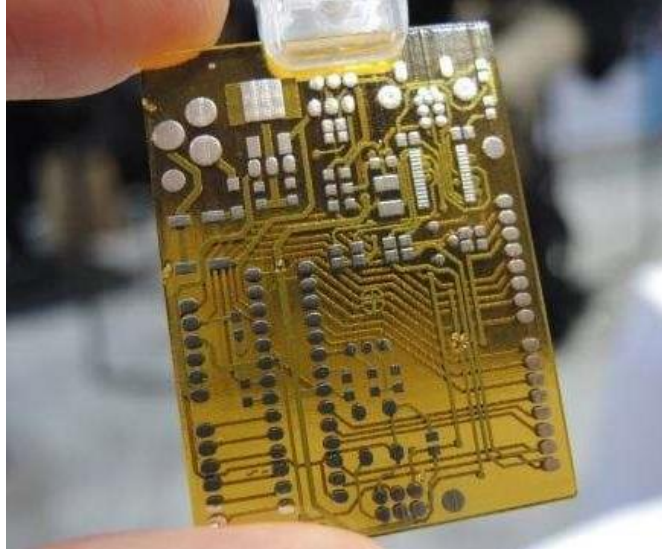
Obrázek 8: DMLS 3D tiskárna LASERTEC 65 firmy DMG Mori [23]

2.6 Využití 3D tisku v elektrotechnice

Vzhledem k možnosti 3D tisku nejen z plastů, ale i z kovů či keramik, nachází technologie aditivní výroby mnohá uplatnění i v elektrotechnice. Menší firmy nebo lidé vlastníci 3D tiskárnu doma si mohou lehce vytisknout náhradní díly, které se již nevyrábí nebo jsou příliš drahé a trvalo by týdny, než by byly k dispozici. V průmyslu nachází 3D tisk uplatnění zejména při výrobě prototypů. Díky rychlosti a přesnosti 3D tisku je tak možné vyrobit prototypy bez nutnosti investovat do drahých výrobních procesů. V následujících podkapitolách představím některá další zajímavá uplatnění 3D tisku v elektrotechnice.

2.6.1 Desky plošných spojů

Technologie Material Jetting umožňuje snadno nanášet kovy na nerovné povrchy, a proto se jí často využívá k tisku speciálních desek plošných spojů včetně jejich obvodů, senzorů, antén do mobilních telefonů, baterií a dalších [24].



Obrázek 9: Deska plošného spoje vytištěná tiskárnou Nano Dimension DragonFly 2020 [25]

2.6.2 Konstrukční krabičky pro elektrotechnické výrobky

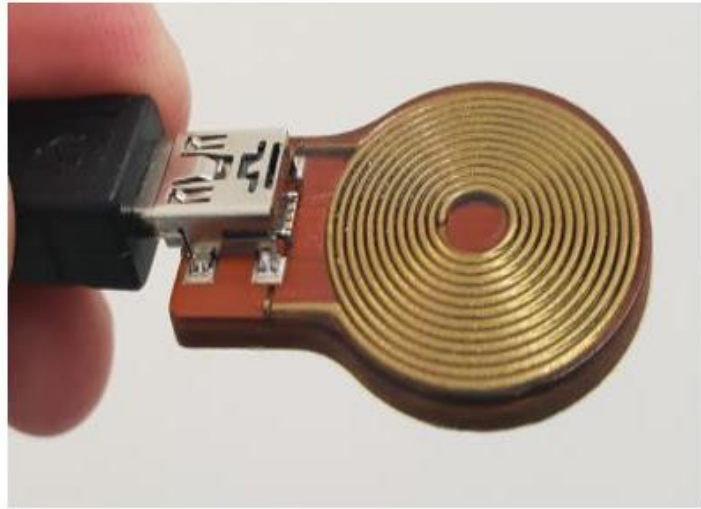
Rozsáhlé využití nachází 3D tisk při výrobě krabiček pro elektrotechnické výrobky jako různé senzory, USB flash disky a další. Hlavními výhodami tohoto uplatnění jsou nízká cena výrobku oproti tradiční výrobě a možnost vlastní customizace vzhledu výrobku [26].



Obrázek 10: Krabička pro Raspberry Pi Zero vyráběna firmou Adafruit na FFF 3D tiskárnách [27]

2.6.3 Kapacity a indukty

Dalším možným uplatněním 3D tisku v elektrotechnice je tisk induktorů a kapacitorů. Kapacity lze tisknout přímo na desky plošných spojů. Vytisknuté indukty mohou být použity například do senzorů točivého momentu, bezdrátových nabíječek nebo elektromagnetů [28], [29].



Obrázek 11: Induktor vytisknutý na tiskárně Nano Dimension DragonFly Pro [28]

3 Technologie SLA

Technologie SLA (stereolithography) a DLP (Direct Light Processing) fungují na principu fotopolymerace. Fotopolymerní kapalina v nádobě je vrstvu po vrstvě vytvářena polymeračním světlem (UV/laser). Zdrojovým materiálem pro vytváření je pryskyřice [2].

3.1 Historie technologie SLA

Technologie SLA je známá, jelikož je to první vynalezená technologie 3D tisku. Samotný termín stereolithography (stereolitografie) vymyslel Charles W. Hull, který si tuto technologii nechal patentovat v roce 1984 (patent mu byl uznán v roce 1986) a založil společnost 3D Systems, aby ji zkomercializoval. V roce 1987 tak vznikla první komerčně dostupná 3D tiskárna SLA-1. Před Hullem se touto technologií zabývali i jiní vědci, v Japonsku to byl Hideo Kodama, který s technologií experimentoval již v sedmdesátých letech minulého století, a ve Francii Alain Le Mehaute, Olivier de Witte a Jean Claude André. Nikdo však s touto technologií nedokázal prorazit až do Charlese W. Hulla [1], [30].

Stereolitografie byla vynalezena k nápomoci rychlejšímu a levnějšímu vyrábění prototypů. Hull definoval stereolitografii jako metodu vytváření 3D objektů pomocí postupného tištění tenkých vrstev z materiálu, který lze vytvrdit UV světlem. Stereolitografie využívá 3D modely a CAD software jako všechny ostatní technologie 3D tisku [31].

Stereolitografie se ze začátku vyvíjela velmi rychle v automobilovém průmyslu. Díky tomu si 3D tisk získal již v začátcích velkou důvěryhodnost a postupem času se dostal i do jiných oblastí, jako medicína (zejména dentální průmysl) nebo stavebnictví. 3D tisk se stále vyvíjí dodnes a stále se objevují nové oblasti, ve kterých se ho dá využít. V současnosti je technologie SLA stále jednou z rozměrově nejpřesnějších technologií 3D tisku a je používána především pro malovýrobu a výrobu jednotlivých součástek [31], [32].



Obrázek 12: První komerční SLA tiskárna - SLA-1 firmy 3D Systems [33]

3.2 Materiály pro SLA 3D tisk

Na rozdíl od jiných technologií 3D tisku, technologie SLA používá pro tisk objektů reaktoplastové fotopolymery. Fotopolymer je dodán ve formě viskózní kapaliny (pryskyřice), která je vytvrzována laserem. Cena těchto pryskyřic se pohybuje zhruba od 800 Kč za litr u běžných pryskyřic až do 12000 Kč za litr u speciálních pryskyřic pro profesionální použití (většinou dentální pryskyřice), což z SLA tisku nedělá nejlevnější technologii 3D tisku podle ceny tiskového materiálu. Fotopolymerní pryskyřice je nutno skladovat v tmavých nádobách, do kterých nemůže prosvítit světlo, aby nedošlo k nechtěnému vytvrzení fotopolymeru ještě před použitím. Takto skladované fotopolymery běžně vydrží jeden rok. Při tisku objektů technologií SLA je nutné po skončení tisku objekty dále dopravit, aby bylo dosaženo jejich optimálních mechanických vlastností. To obnáší mimo jiné dodatečné vytvrzení UV světlem. Doba dodatečného osvětlení se liší u jednotlivých materiálů, což můžeme zjistit z datasheetů poskytnutých k zakoupeným fotopolymerům [1].

3.3 Tisk technologií SLA

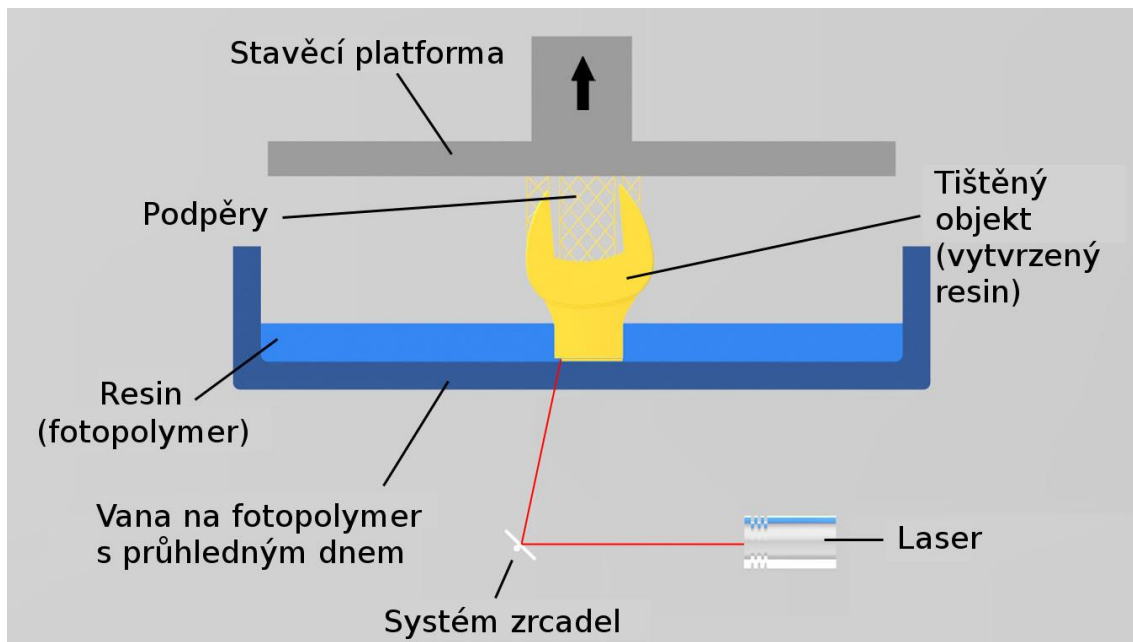
Při slicování (převedení 3D objektu do jazyku instrukcí 3D tiskárny) 3D objektů je uživateli k dispozici mnoho různých nastavení. Mezi hlavní z nich patří rozmístění tištěných objektů na tiskovou plochu, výška jedné vrstvy, nastavení tisku podpěr (případně podložek) a výběr konkrétního materiálu použitého pro tisk, podle kterého si

tiskárna sama nastaví některé parametry. U tiskáren technologií DLP a MSLA (viz. kapitola 3.4) lze dále nastavit parametry jako doba osvitů jedné vrstvy, doba osvitů počáteční vrstvy a počet počátečních vrstev.

Velikost tiskové plochy desktopových SLA tiskáren bývá až 145×145×175 mm, u průmyslových SLA tiskáren až 1500×750×500 mm. Běžná výška vrstvy je 25÷100 μm [34].

Mechanismus tisku využívá dvě zrcadla (jedno pro osu x a druhé pro osu y) k míření laserového paprsku na nádobu s fotopolymerem. Laserový paprsek (většinou pevnolátkový) vytvrzuje fotopolymer v místě, které osvítí. Tento proces rozdělí vstupní 3D objekt po vrstvách na skupiny bodů a čar, které jsou předány zrcadlům jako soubor souřadnic. Přesnost tisku je mimo jiné dána průměrem laserového paprsku, který má průměr 130÷150 μm. Po vytvrzení vrstvy se nádoba s fotopolymerem posune dolů (resp. nahoru, viz. kapitola 3.5) o výšku vrstvy a tento postup se opakuje. Po dokončení tisku vyjede stavěcí platforma nad nádobu s fotopolymerem, aby z ní nevytvrzený fotopolymer okapal a mohl být použit pro další tisk [1], [35].

Vytištěný objekt se ze stavěcí platformy sloupne např. pomocí špachtle a dále se musí doupravit. Před následujícím tiskem je nutné stavěcí platformu důkladně očistit isopropylalkoholem, aby došlo k bezproblémovému přichycení první vrstvy dalšího tištěného objektu.



Obrázek 13: Schéma bottom-up SLA 3D tiskárny [36]

3.3.1 Následná úprava vytištěných objektů

K očištění a zlepšení mechanických vlastností vytištěných objektů je většinou nutné je po skončení tisku následně doupravit. To obnáší několikaminutové mytí objektu v isopropylalkoholu, jelikož je po vytištění lepkavý od nevytvrzeného fotopolymery, který je nebezpečný pro styk s kůží. Následně se objekt omyje vodou, protože isopropylalkohol fotopolymery rozpouští a jeho delší kontakt s vytištěným objektem by mohl mít za následek vyblednutí barvy nebo zhoršení mechanických vlastností objektu. Nakonec se objekt od vody vysuší a několik minut se dovytvřuje UV světlem, což zlepšuje jeho mechanické vlastnosti jako pevnost v tahu (až téměř dvakrát) a pracovní teplotu. Následné dovytvřování má i negativní vliv, a to na maximální relativní prodloužení, které se může až dvakrát zmenšit, dovytvřené objekty jsou tedy křehčí. Samozřejmostí je odstranění případných podpěr z hotového produktu a zabroušení na místech, na kterých jsou viditelné pozůstatky podpěr. Právě proto je podpěry vhodné umístit na nejméně viditelná místa. Objekty vytištěné na SLA tiskárně se dají snadno nabarvit na požadovanou barvu [1], [3], [34], [35], [37].

3.4 Technologie DLP a MSLA

DLP (Direct Light Processing) a MSLA (Mask Stereolithography) patří společně s původní (laserovou) SLA mezi hlavní typy SLA procesu. Tyto typy se liší způsobem osvětlení a vytvrzování fotopolymery. Ačkoliv jsou si tyto technologie podobné, kvalita a rychlost tisku se u nich liší [3].

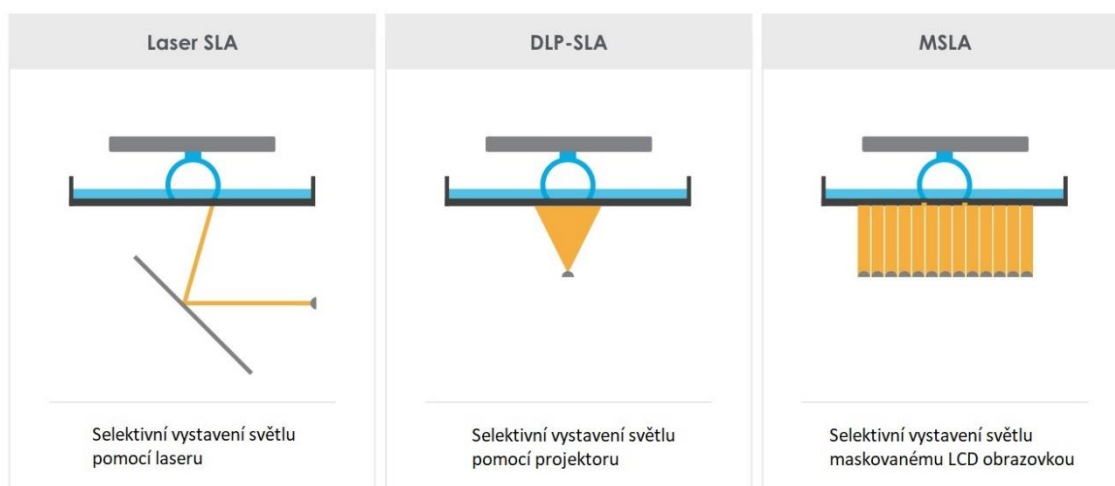
3.4.1 DLP

Technologie DLP používá pro vytvrzování fotopolymery digitální projektor, tudíž je každá vrstva vytvrzována naráz v místech osvětlení. Díky tomu je čas osvětlení jedné vrstvy fixní a tisk více objektů bude trvat stejnou dobu jako výtisk jednoho objektu, vejdou-li se na stavěcí platformu. To je výhoda této technologie oproti původní SLA, kde se doba osvětlení jednotlivých vrstev liší, jelikož jsou vrstvy vytvrzovány postupně paprskem laseru. Světlo je na fotopolymer projektováno LED obrazovkou nebo UV lampou, která je na stavěcí plošinu namířena pomocí skupiny malých zrcadel (DMD – Digital Micromirror Device), které ovládají projektované světlo. Vzhledem k tomu, že je obraz projektoru složen ze čtvercových pixelů se vrstvy skládají z malých kvádrů. Přesnost výtisků je potom v horizontální ose dána především rozlišením projektoru. Aby vytištěný objekt nebyl hranatý, používá se technologie zvaná antialiasing, která vyhlazuje ostré hrany na základě zprůměrování barev okolních pixelů [1], [3].

3.4.2 MSLA

Technologie MSLA používá pro osvit vrstvy UV LED diodu a celou tiskovou plochu maskuje LCD displejem. K vytvrzení fotopolymeru dojde pouze v místě, kam prostoupí UV světlo skrz aktivované pixely (svítící bíle) LCD displeje. Jelikož jsou pixely displeje čtvercové a displej má navíc pevně dané rozlišení, je rozlišení tištěného objektu v osách X a Y pevně dáno rozlišením displeje. Pro vyhlazování hran se také používá antialiasing. Stejně jako technologie DLP, i technologie MSLA vytvrzuje celou vrstvu najednou, a tudíž je čas osvitů jedné vrstvy fixní a výtisk více objektů trvá stejnou dobu, jako výtisk jednoho objektu. Osvit jedné vrstvy je uživatelsky nastavitelný, typicky ale trvá jednotky sekund. Při tisku prvních vrstev je vhodné v závislosti na použitém materiálu dobu osvitů zvýšit až na několik desítek sekund, aby došlo ke spolehlivému přichycení tištěného objektu ke stavěcí platformě [3], [38].

Právě technologií MSLA pomocí 3D tiskárny Original Prusa SL1 byly vytištěny vzorky použité pro měření elektrických vlastností v praktické části této práce.



Obrázek 14: Hlavní kategorie SLA procesu [38]

3.5 Metody bottom-up, top-down a CLIP

Tyto metody jsou základní metody SLA technologie. Jak jejich názvy napovídají, metody se liší orientací tisku. U metody bottom-up probíhá tisk vzhůru nahoru, stavěcí platforma se tedy posouvá směrem vzhůru a tištěný objekt se nachází „pod“ platformou. Tím pádem platforma stoupá z nádoby s fotopolymerem, která má průhledné dno, pod kterým se nachází osvětlovací zařízení. Naopak je tomu u metody top-down, kde se platforma posouvá směrem dolů (do nádoby) a tištěný objekt „stojí“ na platformě. Osvětlovací zařízení se tady nachází nad nádobou s fotopolymerem.

Metoda CLIP (Continuous Liquid Interface Production) je pouze zdokonalenou metodou bottom-up fungující na podobném principu [39].

3.5.1 Bottom-up

Tato metoda má zdroj světla umístěn pod nádobou s fotopolymerem s průhledným dnem. Na začátku tisku je stavěcí plošina umístěna tak, že mezi ní a dnem nádoby je mezera vysoká jako jedna vrstva. Zdroj světla vytvrdí vrstvu fotopolymeru, která zůstane přilepená ke dnu nádoby. Dno nádoby má většinou speciální povrchovou úpravu pro nižší přilnavost. Pro oddělení vytištěné vrstvy ode dna nádoby tiskárna posune stavěcí platformu nahoru a vrstva se ode dna odloupne. Tento krok je u většiny SLA tiskáren nejpomalejší částí tisku, jelikož je nutné provést ho opatrně, aby nedošlo při oddělování objektu ode dna k jeho poškození (zlomení), což nejvíce hrozí právě u první vrstvy. Některé bottom-up tiskárny proto používají mechanismy pro naklánění nádoby při odlupování vrstvy ode dna, aby došlo k postupnému odloupení a objekt byl tak méně namáhán. Platforma se po odloupení posune o výšku vrstvy nahoru, mezeru vyplní nevytvrzený fotopolymer a tento proces se opakuje [1], [39].

Některé bottom-up tiskárny mají také speciální stěrač, který vždy po odloupení poslední vytvrzené vrstvy a posunutí platformy rovnoměrně roztírá vrstvu fotopolymeru po dně nádoby, míchá fotopolymer a odstraňuje nečistoty a kousky vytvrzeného fotopolymeru. Tento stěrač také pomáhá oksyličovat dno nádoby, což způsobuje jeho nižší přilnavost k tištěným vrstvám. Jelikož velké horizontální plochy (stavební vrstvy) by potřebovaly při procesu odlupávání velkou sílu, která by mohla způsobit zlomení, probíhá tisk větších objektů většinou pod náklonem. Kvůli tomu je zapotřebí více podpěr, což je nevýhoda [1], [39].

3.5.2 Top-down

Tiskárny pracující na metodě top-down mají zdroj světla umístěn nad stavěcí platformou. Stavěcí platforma začíná ponořena těsně pod hladinou, aby na ní byl fotopolymer pouze o výšce vrstvy. Zdroj světla vytvrdí první vrstvu a platforma se posune o jednu vrstvu dolů. Na rozdíl od bottom-up tiskáren je u metody top-down fotopolymer ozařován nepřetržitě, protože není nutné každou novou vrstvu odloupnout ode dna nádoby. Díky tomu jsou top-down tiskárny obecně rychlejší při tisku. Jak pokračuje proces tisku, platforma postupně klesá níže do nádoby s fotopolymerem. Je důležité, aby se platforma neposunovala příliš rychle, aby na další vrstvě nevznikaly vzduchové bublinky, které negativně ovlivňují kvalitu výtisku. Když je tisk dokončen, vytištěný objekt je celý ponořen v nádobě s fotopolymerem. Platforma vyjede nahoru nad nádobu, nevytvrzený fotopolymer steče a okapá zpět do nádoby pro další použití

a vytištěný objekt je možno opatrně oddělit od platformy a následně upravit. Podpěry použité při top-down metodě jsou většinou tvarově shodné jako u FFF tiskáren [1], [39].

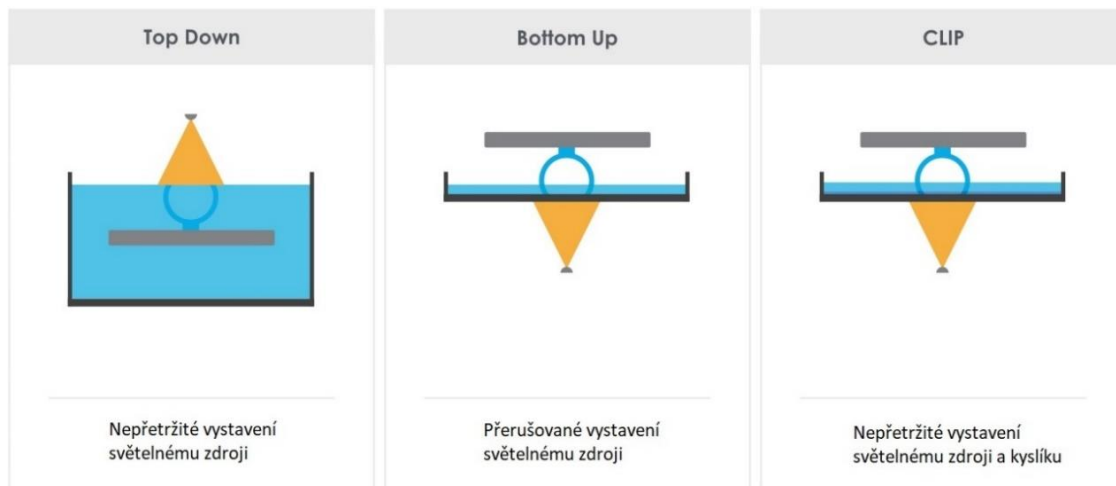
Stejně jako u bottom-up tiskáren, úspěšné vytištění první vrstvy je většinou nejkritičtější částí tisku. První vrstva musí pevně držet na stavěcí platformě. Navíc je důležité, aby po každém posunu stavěcí platformy byla na povrchu rovnoměrná vrstva fotopolymeru. Proto je třeba zajistit, aby fotopolymery používané pro top-down metodu měly adekvátní viskozitu. Kvůli tomu tiskárny této metody často používají speciální fotopolymery. Některé top-down tiskárny, stejně jako některé bottom-up tiskárny, používají speciální stěrač, který zajistí rovnoměrné rozprostření vrstvy nevytvrzeného fotopolymeru na hladině a zároveň ho promíchává a odstraní tak případně vzniklé bublinky po každém posunu stavěcí platformy [1], [39].

3.5.3 CLIP

Metoda CLIP (Continuous Liquid Interface Production) funguje na podobném principu jako metoda bottom-up. Stavěcí platforma se pohybuje směrem nahoru z nádoby s fotopolymerem a tištěný objekt se tiskne vzhůru nohama. Nádoby na fotopolymer metody CLIP mají dno ze speciálního materiálu, přes které může procházet kyslík. Vrstva kyslíku u dna nádoby zaručí, že se nově vytvrzená vrstva nepřilepí ke dnu nádoby. Tím pádem je možno fotopolymer ozařovat nepřetržitě, stejně jako je tomu u metody top-down, a vzhledem k nepotřebnosti odloupávání nově vytvrzených vrstev je tisk touto metodou zhruba stejně rychlý jako tisk právě metodou top-down [39].

3.5.4 Porovnání těchto metod

Z hlediska rychlosti tisku je výsledek zřejmý, metody top-down a CLIP jsou v porovnání s bottom-up jednoznačně rychlejší. Výhodou bottom-up a CLIP tiskáren je potřeba menšího množství fotopolymeru při tisku, jelikož se tištěný objekt pohybuje směrem nahoru z nádoby. Díky tomu je možné vyrobit tyto tiskárny rozměrově menší než top-down tiskárny. Navíc bottom-up tiskárny potřebují méně mechanických součástí než top-down tiskárny, tudíž je jejich cena obecně nižší a jsou komerčně dostupnější. Další faktor, kvůli kterému je větší nabídka bottom-up tiskáren, je potřeba pravidelných výměn průhledného dna nádoby s fotopolymerem, v závislosti na jeho opotřebení, což pro výrobce znamená větší profit. Nevýhodou bottom-up tiskáren je potřeba odloupávání vytištěných vrstev ode dna nádoby, což na tištěný objekt vyvíjí značnou sílu, která může objekt zničit. Top-down tiskárny je možné vyrábět i ve velkých rozměrech, tyto tiskárny se používají většinou pouze v průmyslu. CLIP tiskárny jsou v současnosti velmi drahé v porovnání s klasickými bottom-up tiskárnami, takže nejsou moc rozšířené [1], [39].



Obrázek 15: Srovnání metod top-down, bottom-up a CLIP [39]

3.6 Rozměrová přesnost SLA tiskáren

Jeden z největších problémů týkajících se přesnosti vytištěných objektů pomocí technologie SLA je tzv. warping (kroucení), které nejvíce hrozí u velkých rovných ploch. Když je vrstva vystavena zdroji vytvrzovacího světla, tak se během vytvrzování smrskne. Poté co se následující vrstva smrskne na předchozí vytištěné vrstvě, vznikne mezi vrstvami napětí v tahu, jehož následkem je kroucení tištěného objektu. Podpěry bývají kritické pro ukotvení tištěného objektu na citlivých místech, aby bylo zabráněno warpingu [1].

Dále je důležité naorientovat objekt tak, aby bylo tištěno co nejméně velkých rovných ploch. Během tisku také mohou nastat rozměrové nesrovnalosti. Ty nastávají vlivem procesu odloupávání u bottom-up tiskáren. Síly působící na tištěný objekt během odloupávání mohou způsobit ohnutí objektu. Tento jev se navíc může opakovat během tištění dalších vrstev a může způsobit prohnutí celého objektu. Proto jsou měkčí fotopolymery méně vhodné pro tisk objektů s využitím vyžadujícím vysokou přesnost. Konkrétní rozměrová přesnost většiny SLA tiskáren je $\pm 0,5 \%$ (spodní hranice $\pm 0,1 \div 0,25 \text{ mm}$) u desktopových tiskáren, $\pm 0,15 \%$ (spodní hranice $\pm 0,01 \div 0,03 \text{ mm}$) u průmyslových tiskáren [1], [34].

3.7 Výhody a nevýhody technologie SLA

Mezi hlavní výhody SLA tisku patří hladký povrch a vysoká přesnost vytištěných objektů. Právě díky hladkému povrchu výtisků je SLA jednou z nejvhodnějších technologií 3D tisku na replikaci nebo výrobu tvarovaných prototypů, výrobu vizuálních modelů, figurek atd. SLA je také jednou z rozměrově nejpřesnějších technologií

3D tisku, což ji dělá ideální pro tisk velmi detailních objektů, u kterých jsou kladeny vysoké nároky na jejich rozměrovou přesnost. Taková odvětví vyžadující velkou přesnost jsou např. šperkařství nebo dentální průmysl [1], [34], [40].

Jednou z hlavních nevýhod technologie SLA jsou vlastnosti samotných fotopolymerů používaných pro tisk. Fotopolymery jsou většinou křehké a nemají pevnost či odolnost vstříkovaných součástí, takže je jejich využití pro výrobu funkčních součástí patřičně omezené. Objekty vytištěné technologií SLA mají také omezenou životnost. S postupem času se u nich zhoršují mechanické vlastnosti a degradují v přítomnosti slunečního světla. Proto jsou na ně nanášeny speciální povrchové nátěry. Tyto nevýhody související s vlastnostmi fotopolymerů jsou hlavním důvodem, proč se technologie SLA neuskadila pro funkční aplikace [1], [34], [40].

3.8 Průmyslový a desktopový SLA tisk

Stejně jako u FFF tiskáren, hlavní rozdíl mezi průmyslovými a desktopovými tiskárnami je tiskové prostředí. Průmyslové tiskárny pracují v regulovaném prostředí pro lepší kontrolu nad chováním fotopolymeru během tisku, mají menší průměr paprsku laseru nebo vyšší rozlišení projektoru (takže jsou schopny produkovat přesnější objekty) a je pro ně dostupné větší množství materiálů. Jednou z výhod technologie SLA je škálovatelnost tiskáren. Zatímco většina desktopových SLA tiskáren je velikostně shodná, průmyslové SLA tiskárny se velikostí mohou velmi lišit. Technologie SLA má velmi málo limitací, když je tiskárna zvětšena (až na pomalý čas tisku). Díky tomu jsou průmyslové SLA tiskárny jedny z největších 3D tiskáren vůbec. Většina velkých průmyslových SLA tiskáren pracuje metodou top-down, jelikož u metody bottom-up by byla zapotřebí velká síla pro odloupávání vrstev ode dna nádoby s polymerem. Tyto tiskárny také mají velké nádoby s fotopolymerem. Průmyslové SLA tiskárny nabízejí velké množství různých materiálů pro specifické aplikace, které bývají často proprietární pro konkrétní tiskárnu. Většinou mají tyto materiály drobné rozdíly v jejich vlastnostech, což umožňuje téměř vždy zvolit přesný materiál vhodný pro určitou aplikaci. Úroveň přesnosti a povrchové úpravy desktopových SLA tiskáren je dostatečná pro většinu aplikací, avšak s přesností průmyslových tiskáren je nelze srovnávat. Pro velké objekty (prototypy ve skutečné velikosti) nebo objekty, u kterých je zapotřebí velmi vysoká přesnost (zdravotnictví, dentální průmysl nebo šperkařství), je průmyslový SLA tisk nejvhodnější [1].

3.9 Využití SLA 3D tisku

Objekty vytištěné technologií SLA jsou nejvhodnější pro vizuální aplikace a výrobu prototypů, kde je vyžadováno hladkého povrchu a vysoké přesnosti. V elektrotechnice nachází technologie SLA uplatnění například při tisku konstrukčních krabiček pro elektrotechnické výrobky viz. kapitola 2.6.2. Následující podkapitoly popisují různá další odvětví, ve kterých je SLA tisk běžně využíván [1].

3.9.1 Prototypy

Vzhledem k hladkému povrchu objektů vytištěných technologií SLA, je tato technologie používána pro výrobu prototypů. To umožňuje designérům rychle vytisknout požadovaný model na zhodnocení, aniž by museli investovat do drahých výrobních procesů [1].

3.9.2 Šperkařství

Přesnost a detailnost SLA výtisků společně s jejich hladkým povrchem dělají technologii SLA ideální technologií pro šperkařství [1].



Obrázek 16: Přívěsek vytištěný na SLA tiskárně [41]

3.9.3 Dentální průmysl

Dentální průmysl si osvojil technologii SLA pro množství aplikací. SLA tiskárny jsou používány pro výrobu dentálních modelů, přístrojů, korunek a můstků. Schopnost

vytvořit objekty s velkou přesností a detailností společně s množstvím dostupných materiálů (zejména dentálních a odlévatelných pryskyřic) udělala z SLA technologie převratnou technologii v dentálním průmyslu [1].



Obrázek 17: Zubní protéza vytištěná na SLA tiskárně [42]

3.9.4 Naslouchátka

Naslouchátka jsou jedním z největších úspěchů vzešlých z průběžného vývoje technologie SLA. Přes deset milionů lidí již používá naslouchátka vyrobená technologií SLA. Schopnost vytvořit hladký organický povrch, který je pro naslouchátka nutný, za cenu nižší než u tradičních technologií, vyústila v 97 procentní podíl technologie SLA na celkové výrobě naslouchátek [1].



Obrázek 18: Konstrukce naslouchátka vytištěná na SLA tiskárně [43]

3.9.5 Zábava

V neposlední řadě nachází technologie SLA uplatnění v zábavním odvětví. V poslední době se na trhu objevuje víc a víc dostupných desktopových SLA tiskáren, které jsou často využívány pro tisk sběratelských předmětů a figurek, čemuž napomáhá snadná barvitelnost vytištěných předmětů. Výhodou oproti stále ještě dostupnějším FFF tiskárnám je vyšší přesnost SLA tiskáren a hladký povrch bez viditelných vrstev.



Obrázek 19: Figurka vytištěná na SLA 3D tiskárně [44]

4 Základní elektrické vlastnosti dielektrik

Cílem této práce je mimo jiné změřit a porovnat vybrané elektrické vlastnosti fotopolymérů vybraných pro tento experiment. V kapitole 4 bude nejprve pojednáno o termínech „dielektrikum“ a „izolant“. Dále budou popsány sledované elektrické vlastnosti včetně základních vzorců pro výpočty některých z nich.

4.1 Dielektrika a izolanty

Dielektrika jsou látky, které mají schopnost polarizovat se v elektrickém poli. Využívají se ke hromadění elektrické energie v kondenzátorech. Příklady dielektrik jsou slída, vzduch, keramika nebo kondenzátorový papír. Izolanty jsou dielektrika s vysokou rezistivitou, tudíž je hlavní vlastností izolantu schopnost klást velký odpor průtoku elektrického proudu. Používají se k izolování elektricky vodivých těles. Ideálním izolantem je vakuum, přibližují se mu technické izolanty za teploty v okolí absolutní nuly. Každý technický izolant je za normálních podmínek do jisté míry vodivý [45].

4.2 Relativní permitivita

Relativní permitivita je hlavní parametr dielektrika. Označujeme ji ε_r , a nemá jednotku. Je to měřítko elektrické polarizace dielektrika a udává, kolikrát je schopnost polarizace daného materiálu vyšší než schopnost polarizace vakua. Z této definice vyplývá vztah

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

kde ε_r [–] je relativní permitivita materiálu, ε [$F \cdot m^{-1}$] je absolutní permitivita materiálu a $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$ je permitivita vakua [45].

U běžných dielektrik bývá relativní permitivita v rozmezí 2÷300. Materiály s velmi vysokými relativními permitivitami (10^3 ÷ 10^6) se nazývají feroelektrika a dochází u nich tedy k elektrické polarizaci velmi snadno [45].

4.3 Objemová rezistivita

Rezistivita neboli měrný elektrický odpor je hlavní parametr izolantů. Označujeme ji ρ_v a její jednotkou je Ωm . Vyjadřuje objemový odpor materiálu. Převrácená hodnota rezistivity se nazývá konduktivita (měrná vodivost). Rezistivita izolantů bývá v rozmezí 10^9 ÷ $10^{17} \Omega m$ [45].

4.4 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ [–] popisuje ztráty daného dielektrika. Ideální kondenzátor má fázový posun mezi napětím a proudem 90° a jeho ztráty jsou nulové, ztrátový úhel $\delta = 0$. Ve skutečnosti je fázový úhel menší než 90° , a proto je ztrátový úhel a ztrátový činitel nenulový. Obvykle bývá v rozmezí $10^{-1} \div 10^{-5}$ [45].

4.5 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je schopnost materiálu odolávat napěťovému průrazu. Vyjadřuje ji intenzita elektrického pole, po jejímž překročení dojde k průrazu dielektrika. Označujeme ji E_p a její základní jednotkou je $V \cdot m^{-1}$. Vypočítá se ze vztahu

$$E_p = \frac{U_p}{h}, \quad (2)$$

kde U_p [V] je průrazné napětí a h [m] je tloušťka materiálu. U běžných dielektrik dosahuje hodnot $30 \div 1500 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ [45].

5 Praktická část

Existuje mnoho fotopolymerů pro SLA 3D tisk, jejichž elektrické vlastnosti doposud nikdo nezkoumal. Cílem této práce je, mimo jiné, prozkoumat dva druhy fotopolymerů právě z hlediska jejich elektrických vlastností, které byly popsány v kapitole 4. Tyto materiály budou následně z tohoto hlediska porovnány.

Pro měření elektrických vlastností bylo vytištěno 90 disků (dále jen „vzorky“). V této části bude popsán postup při návrhu a výrobě vzorků, zkoumané materiály a postup při měření elektrických vlastností vzorků včetně přístrojů a metod použitých pro tato měření.

5.1 Zkoumané materiály

Jako zkoumané materiály byly ve spolupráci s firmou Prusa Research s.r.o. vybrány dva druhy epoxidových pryskyřic, což jsou typicky používané fotopolymery pro 3D tisk technologií SLA. V následujících podkapitolách o nich budou shrnuty základní informace.

5.1.1 Blue resin

První zkoumaný materiál má identifikační název „UV-SENSITIVNÍ PRYSKYŘICE PRO 3D TISK, všechny barvy“. Je vyráběn firmou Prusa Research a.s. Může být nebezpečný pro styk s kůží, proto je potřeba při manipulaci s ním nosit ochranné pomůcky jako plášť a rukavice. Během vytvrzování se z něj mohou vypařovat zdraví škodlivé látky. Měl by být uchováván v neprůhledném uzavřeném obalu na chladném místě, aby nedocházelo k jeho nechtěnému vytvrzování. Jako přísady obsahuje metakrylované oligomery, metakrylovaný monomer a fotoiniciátory. Konkrétní fotopolymer použitý pro tuto práci je světle modré barvy, a proto na něj bude v této práci dále odkazováno jen jako na „blue resin“ [46].

5.1.2 Orange resin

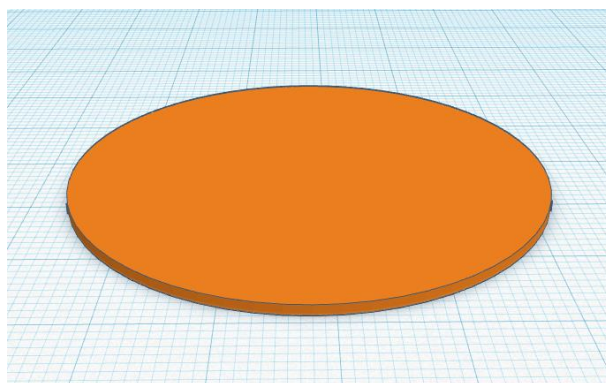
Druhý zkoumaný materiál se jmenuje „UV LCD Prusa Orange“. Vyrobita ho firma Photocentric. Podrobnější informace jako u blue resinu k tomuto materiálu nemám dostupné. Pro jeho oranžovou barvu bude dále pro tento materiál používáno označení „orange resin“ [47].

5.2 Příprava vzorků

Měřené vzorky byly nejprve mnou navrženy, následně přeloženy slicerem do kódu čitelného tiskárnou, poté vytištěny a nakonec umyty, vysušeny a dovytvrzeny. Pro měření rezistivity byly na 30 vzorků vakuově napařeny měřící, napěťové a stínící hliníkové elektrody.

5.2.1 Návrh vzorků

Pro návrh vzorků bylo použito internetový freeware nástroj TinkerCad od firmy Autodesk volně dostupný na www.tinkercad.com. Modely byly uloženy ve formátu .STL pro kompatibilitu se slicovacím programem. Průměr všech navržených vzorků byl 5 cm a tloušťka 0,5 mm pro 40 vzorků; 1 mm pro 30 vzorků a 1,5 mm pro 20 vzorků.



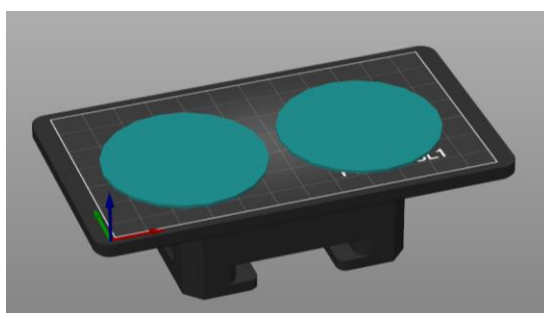
Obrázek 20: Model vzorku o tloušťce 1 mm v prostředí TinkerCad

5.2.2 Příprava modelů na 3D tisk

Modelům ve formátu .STL byly pomocí programu PrusaSlicer od firmy Prusa Research s.r.o. nastaveny parametry pro tisk a byl vygenerován soubor .SL1 připraven k nahrání do tiskárny. Vzhledem k dostatečným rozměrům tiskové plochy byl zvolen tisk dvou vzorků najednou. Důležité parametry tisku byly nastaveny podle tabulky 1.

Tabulka 1: Nastavení 3D tisku

Podpěry	Žádné
Podložka	Žádná
Výška vrstvy	0,05 mm
Doba osvitů <u>každé</u> vrstvy	40 s



Obrázek 21: Náhled vzorků na tiskové ploše ve slicovacím programu PrusaSlicer

5.2.3 Tisk a následná úprava vzorků

Vzorky byly tištěny na SLA 3D tiskárně Original Prusa SL1 od firmy Prusa Research s.r.o. a následně byly 4 minuty myty v isopropylalkoholu, opláchnuty vodou, 5 minut sušeny a dalších 5 minut dovytvrzovány UV světlem v Original Prusa CW1 mycí a vytvrzovací stanici. Hotové vzorky byly uchovávány v plastových sáčcích s těsněním, aby se předešlo jejich ušpinění a jinému poškození.



Obrázek 22: 3D tiskárna Original Prusa SL1 a Original Prusa CW1 [48]

5.3 Zhodnocení hotových vzorků

U všech vytištěných vzorků byla naměřena podstatně větší tloušťka, než bylo požadováno. Průměrně to u všech vzorků byla odchylka 0,16 mm, což je např. u vzorků, které měly být tlusté 0,5 mm, o 32 % více, než bylo požadováno. Tyto skutečné hodnoty tloušťky měřených vzorků byly použity při výpočtech sledovaných veličin pro získání přesnějších hodnot, tudíž tyto odchylky nemají na výsledky těchto veličin význam, ale je to zajímavá skutečnost. Možnou příčinou této nepřesnosti mohla být poškozená prohnutá folie na dně vaničky s fotopolymerem (toto je pouze neověřená domněnka). Dále některé vzorky trpěly z warpingu (prohnutí), zejména vzorky z materiálu orange resin. Hotové vzorky s napařenými elektrodami pro měření rezistivity jsou k vidění na obrázku 24.

5.4 Měření elektrických vlastností vzorků

U všech vzorků z materiálu blue resin tloušťky 0,5 mm a 1 mm byla měřena jejich relativní permitivita, ztrátový činitel, objemová rezistivita a elektrická pevnost. U vzorků tloušťky 1,5 mm byla měřena pouze elektrická pevnost pro zjištění závislosti elektrické pevnosti na tloušťce vzorku. U vzorků z materiálu orange resin všech tří tlouštěk byla měřena relativní permitivita, ztrátový činitel a elektrická pevnost. Objemová rezistivita byla u tohoto materiálu z časových důvodů měřena pouze u vzorků tloušťky 0,5 mm.

5.4.1 Měření permitivity a ztrátového činitele

Za pomoci zdroje proměnné frekvence s měřičem Component Analyzer TH2818 a měřícího přípravku se dvěma elektrodami o zhruba stejném průměru jako měřené vzorky (5 cm) byla u vzorků měřena kapacita a ztrátový činitel v rozmezí frekvencí 0,2÷300 kHz. Schéma měřícího přípravku je na obrázku 23.

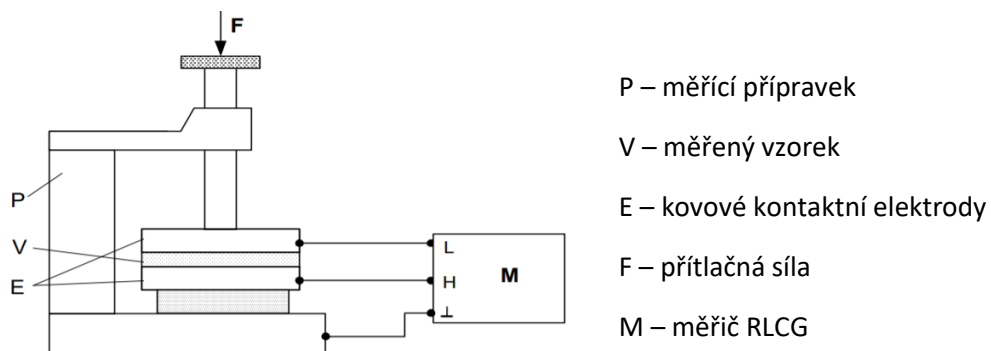
Každý vzorek byl vložen mezi elektrody, frekvence byla nastavena na 0,2 kHz, po odečtení hodnoty kapacity a ztrátového činitele byla frekvence zvýšena a takto byl postup opakován až do konečné hodnoty frekvence 300 kHz.

Při měření s frekvencí nižší než 200 Hz nebyly hodnoty kapacity a ztrátového činitele dostatečně ustálené pro relevantní odečet, tudíž byly požadované veličiny měřené až od frekvence 200 Hz.

Následně byla z průměrů naměřených hodnot kapacity pro jednotlivé frekvence a známé tloušťce a poloměru vzorků vypočtena hodnota permitivity pro každou hodnotu frekvence podle vzorce

$$\varepsilon_r = \frac{C_x \cdot h}{\varepsilon_0 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (3)$$

kde ε_r [-] je relativní permitivita, C_x [F] je naměřená kapacita, h [m] je tloušťka vzorku, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ je permitivita vakua a $r = 2,5 \text{ cm}$ je poloměr měřící elektrody.



Obrázek 23: Schéma elektrodového měřícího přípravku a měřiče pro měření kapacity a ztrátového činitele [49]

5.4.2 Měření objemové rezistivity

Před měřením objemové rezistivity byly nejprve na vzorky vakuově napařeny měřící, napěťové a stínící hliníkové elektrody, jak je možné vidět na obrázku 24. Následné měření bylo provedeno v souladu s normou ASTM D 257 07. Pro měření byl použit tříelektrodový měřící přípravek Resistivity Adapter Keithley, Model 6105 ve spojení s programovatelným elektrometrem Keithley Model 617. Elektrometr byl řízen prostřednictvím sběrnice IEEE 488.2 (GP-IB) osobním počítačem v laboratoři. Pro záznam hodnot byl využit program KOMPOZITY [50].



Obrázek 24: Vzorky s napařenými elektrodami pro měření rezistivity

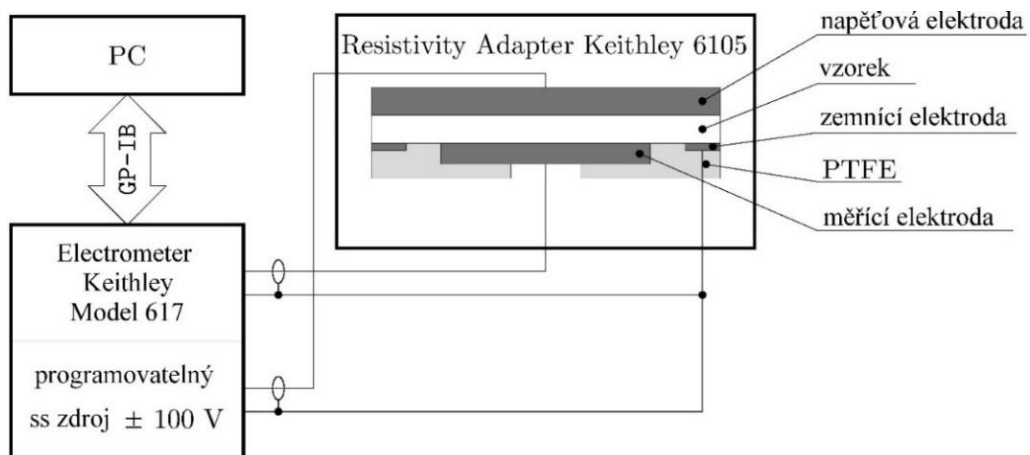
U měřených vzorků byla nejprve změřena tloušťka pomocí mikrometru o přesnosti 0,01 mm namátkově na třech místech a pro výpočet byla použita nejmenší z těchto tří hodnot.

Následně byl vzorek pomocí pinzety vložen mezi elektrody měřícího přípravku. Přípravek byl uzavřen a zatížen pomocným závažím a na vzorek bylo přivedeno napětí 100 V. Ve chvíli přiložení napětí bylo započato měření objemového odporu vzorku pomocí volt-ampérové metody.

Odpor byl odečítán každých 30 s po dobu 30 min u každého vzorku. Po 30 min byla již hodnota objemového odporu u každého vzorku dostatečně ustálena a konečná hodnota objemového odporu po 30 minutách byla použita pro výpočet objemové rezistivity ze vzorce

$$\rho_v = \frac{\left(\frac{\pi \cdot D_{ef}^2}{4}\right)}{h} \cdot R, \quad (4)$$

kde ρ_v [Ωm] je objemová rezistivita, $D_{ef} = 3,75$ cm je efektivní průměr měřící elektrody, h [m] je tloušťka vzorku a R [Ω] je objemový odpor vzorku. Na obrázku 25 je zobrazeno blokové schéma měřícího obvodu pro měření rezistivity [50].



Obrázek 25: Blokové schéma měřícího obvodu pro měření objemové rezistivity [50]

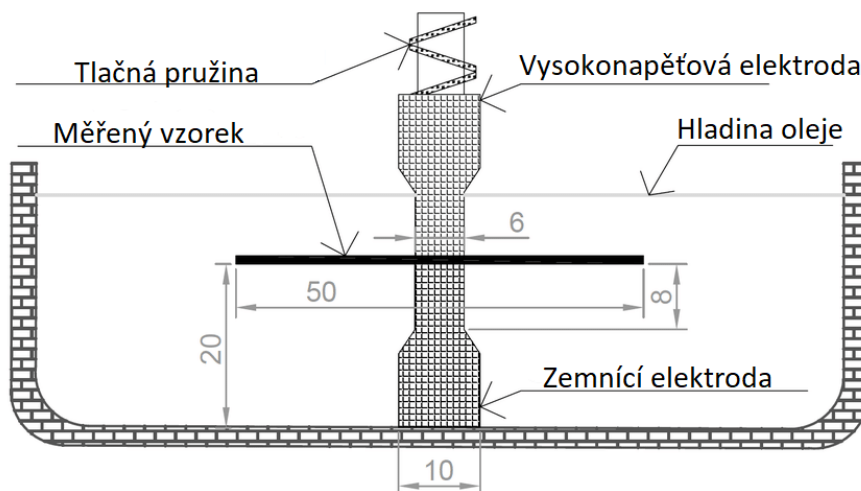
5.4.3 Měření elektrické pevnosti

Před měřením byl vzorek vždy přeměřen digitálním posuvným měřítkem o přesnosti 0,01 mm pro získání přesnější hodnoty tloušťky vzorku použité pro výpočet elektrické pevnosti.

Následně byl vzorek vložen mezi měřící elektrody, které byly ponořené v řepkovém izolačním oleji. Důvodem měření v oleji je snaha o zamezení klouzavých

výbojů. Tento olej, použitý jako izolační médium, má značně vyšší elektrickou pevnost než vzduch. Další výhodou oleje je jeho permitivita, která je velmi podobná permitivitě epoxidu, tudíž je vzniklé elektrické pole možno považovat za téměř homogenní. Poté bylo na vzorek přiváděno střídavé napětí ze zdroje max. 100 kV, které bylo plynule zvyšováno pomocí nastavovacího potenciometru až do nastání tepelného průrazu měřeného vzorku. V okamžik průrazu se zdroj automaticky vypl, ale ručička analogového voltmetru pro regulaci napětí zůstala na hodnotě průrazného napětí, které bylo u každého vzorku odečteno.

Z naměřených hodnot byla spočtena elektrická pevnost jednotlivých vzorků podle vzorce (2). Na obrázku 26 je zobrazeno schéma měřícího přípravku pro měření průrazného napětí, uvedené číselné rozměry jsou v mm.



Obrázek 26: Schéma měřícího přípravku pro měření průrazného napětí [51]

6 Vyhodnocení výsledků měření

Tato kapitola obsahuje očekávané výsledky zkoumaných vlastností, dosažené výsledky a jejich popis, porovnání těchto hodnot a shrnutí možných příčin vzniku odchylek a nepřesností při měření jednotlivých veličin. Dále budou v této kapitole uvedeny rozdíly výsledků obou zkoumaných materiálů.

6.1 Očekávané výsledky

Podle tabulkových hodnot typických elektrických vlastností epoxidových pryskyřic lze očekávat naměřené hodnoty v určitých rozmezech. Následuje tabulka těchto očekávaných hodnot.

Tabulka 2: Očekávané hodnoty elektrických vlastností vzorků [52] [53] [54]

Objemová rezistivita	$\rho_v > 10^{12} \Omega m$
Elektrická pevnost	$E_p = (20 \div 40) kV \cdot mm^{-1}$
Relativní permitivita	$\epsilon_r = (2,5 \div 8) [-]$
Ztrátový čísel (pro $f = 1$ kHz)	$tg \delta \leq 0,03 [-]$

6.2 Dosažené výsledky

Při praktickém měření existuje řada faktorů, jejichž vliv může způsobit odchýlení naměřených hodnot od hodnot očekávaných. Následující část obsahuje výsledky dosažené při měření včetně diskusí nad nimi.

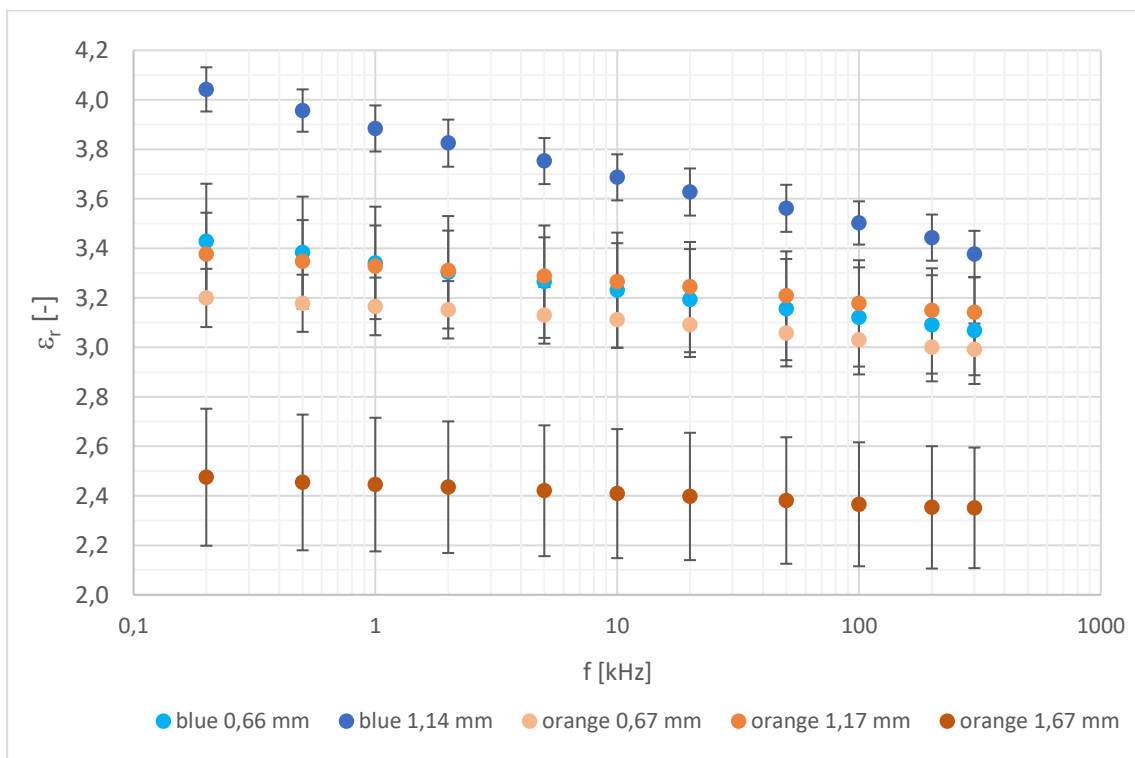
6.2.1 Relativní permitivita

Pro výpočet relativní permitivity ze vzorce (3) byla použita průměrná hodnota tloušťky vzorků. U materiálu blue resin byla relativní permitivita měřena pouze u vzorků tloušťky $\sim 0,5$ mm a ~ 1 mm. U materiálu orange resin byla po zjištění jisté závislosti relativní permitivity na tloušťce vzorku změřena i relativní permitivita vzorků tloušťky $\sim 1,5$ mm.

Závislost průměrné relativní permitivity vzorků na frekvenci byla vynesena do tabulek a grafů s chybovými úsečkami. V grafech bylo pro osu frekvence použito logaritmické měřítko vzhledem k velkému rozsahu frekvencí použitých při měření. V následujících podkapitolách bude zhodnocení naměřených hodnot. Dále v podkapitole 6.2.1.3 bude uvedeno porovnání frekvenčních závislostí relativní permitivity obou zkoumaných materiálů s PVC, jehož hodnoty byly mnou naměřeny na školním laboratorním cvičení. Kompletní tabulky naměřených a vypočtených hodnot včetně variačních koeficientů relativních permitivit při různých frekvencích jsou k vidění v příloze 1 pro blue resin a v příloze 2 pro orange resin.

Tabulka 3: Průměrné hodnoty relativní permitivity všech vzorků v závislosti na frekvenci

materiál	tloušťka	f [kHz]	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	300
blue resin	0,66 mm	ϵ_r [-]	3,43	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23	3,19	3,16	3,12	3,09	3,07
	1,14 mm	ϵ_r [-]	4,04	3,96	3,88	3,82	3,75	3,69	3,63	3,56	3,50	3,44	3,38
orange resin	0,67 mm	ϵ_r [-]	3,20	3,18	3,17	3,15	3,13	3,11	3,09	3,06	3,03	3,00	2,99
	1,17 mm	ϵ_r [-]	3,38	3,35	3,33	3,31	3,29	3,27	3,24	3,21	3,18	3,15	3,14
	1,67 mm	ϵ_r [-]	2,48	2,45	2,45	2,43	2,42	2,41	2,40	2,38	2,37	2,35	2,35



Obrázek 27: Graf závislosti relativní permitivity všech vzorků na frekvenci

6.2.1.1 Blue resin

Z naměřených hodnot je patrné, že relativní permitivita blue resinu s rostoucí frekvencí přibližně lineárně klesá. Z grafu je vidět, že relativní permitivita závisí mimo jiné i na tloušťce měřených vzorků. Při nejnižší frekvenci použité při měření (200 Hz) je relativní permitivita tlustších vzorků o 15 % vyšší než u vzorků tenčích. Procentuální rozdíl relativních permitivit s rostoucí frekvencí přibližně lineárně klesá, u nejvyšší frekvence použité při měření (300 kHz) je tento rozdíl již jen 9 %. Dále je z grafu vidět, že tenčí vzorky mají podstatně vyšší variační koeficient (cca 2,5 ×) než tlustší vzorky.

Dále z průběhu grafu můžeme konstatovat, že blue resin je polární dielektrikum, jelikož se zřetelně projevila závislost jeho relativní permitivity na frekvenci, což je typická vlastnost právě polárních dielektrik.

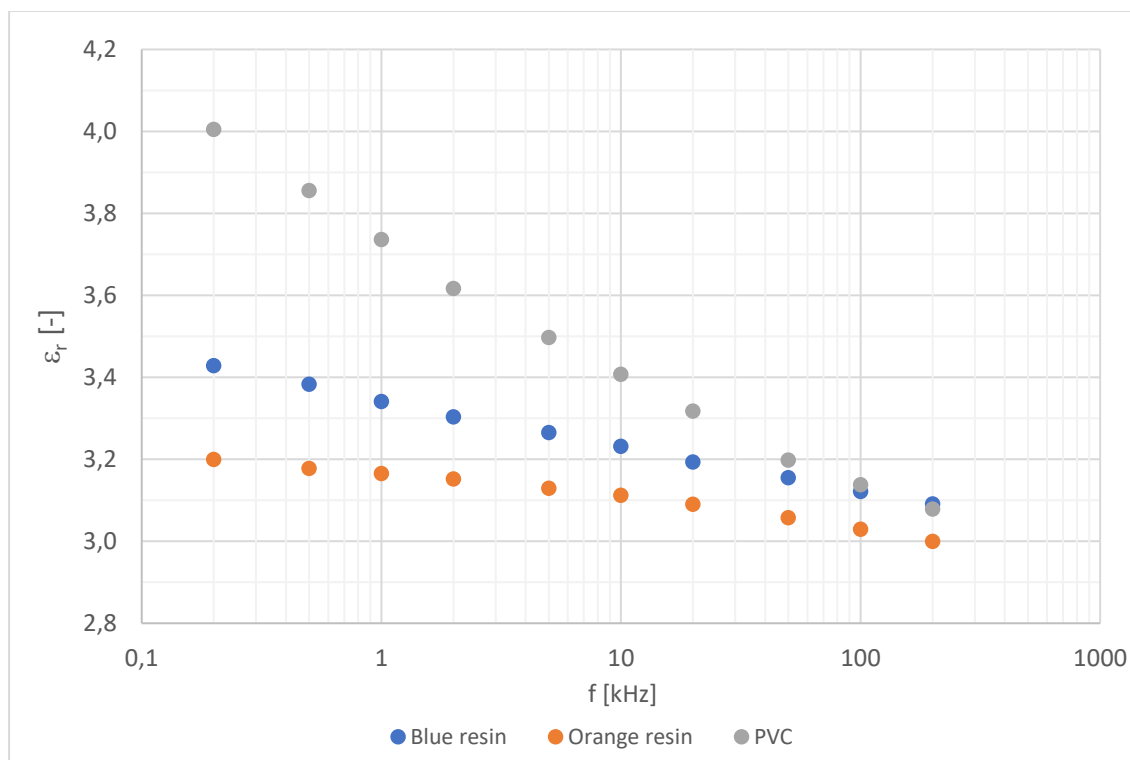
6.2.1.2 Orange resin

Z průběhů v grafu je vidět, že relativní permitivita orange resinu je přibližně lineárně klesající s rostoucí frekvencí a klesá se zhruba stejnou směrnici bez ohledu na tloušťku vzorků. Z této závislosti je patrné, že i orange resin je polární dielektrikum. Relativní permitivita vzorků $\sim 0,5$ a ~ 1 mm při 300 kHz je jen o $\sim 0,2$ nižší než permitivita při 200 Hz. U vzorků tlustých $\sim 1,5$ mm je to téměř jen 0,1. Opět můžeme pozorovat jistou závislost relativní permitivity na tloušťce vzorků.

Co je zajímavé je, že největší relativní permitivitu mají vzorky střední tloušťky, zatímco nejnižší relativní permitivitu mají nejtlustší vzorky. Nejtlustší vzorky mají mimo jiné i nejvyšší variační koeficient relativní permitivity, což je zřetelné z chybových úseček v grafu.

6.2.1.3 Porovnání s PVC

V porovnání s PVC (polyvinylchlorid), což je jedno z nejrozšířenějších polárních dielektrik, klesá relativní permitivita v závislosti na frekvenci u vzorků z obou materiálů pomaleji. Při vyšších frekvencích nad 50 kHz je relativní permitivita PVC téměř shodná s relativní permitivitou blue resinu. Orange resin má i při těchto frekvencích relativní permitivitu nižší o $\sim 0,1$. Tyto závislosti jsou vyneseny do grafu na obrázku 28. Pro porovnání byly použity hodnoty vzorků tloušťky $\sim 0,5$ mm obou zkoumaných materiálů.



Obrázek 28: Graf porovnání závislosti relativních permitivit zkoumaných materiálů a PVC na frekvenci

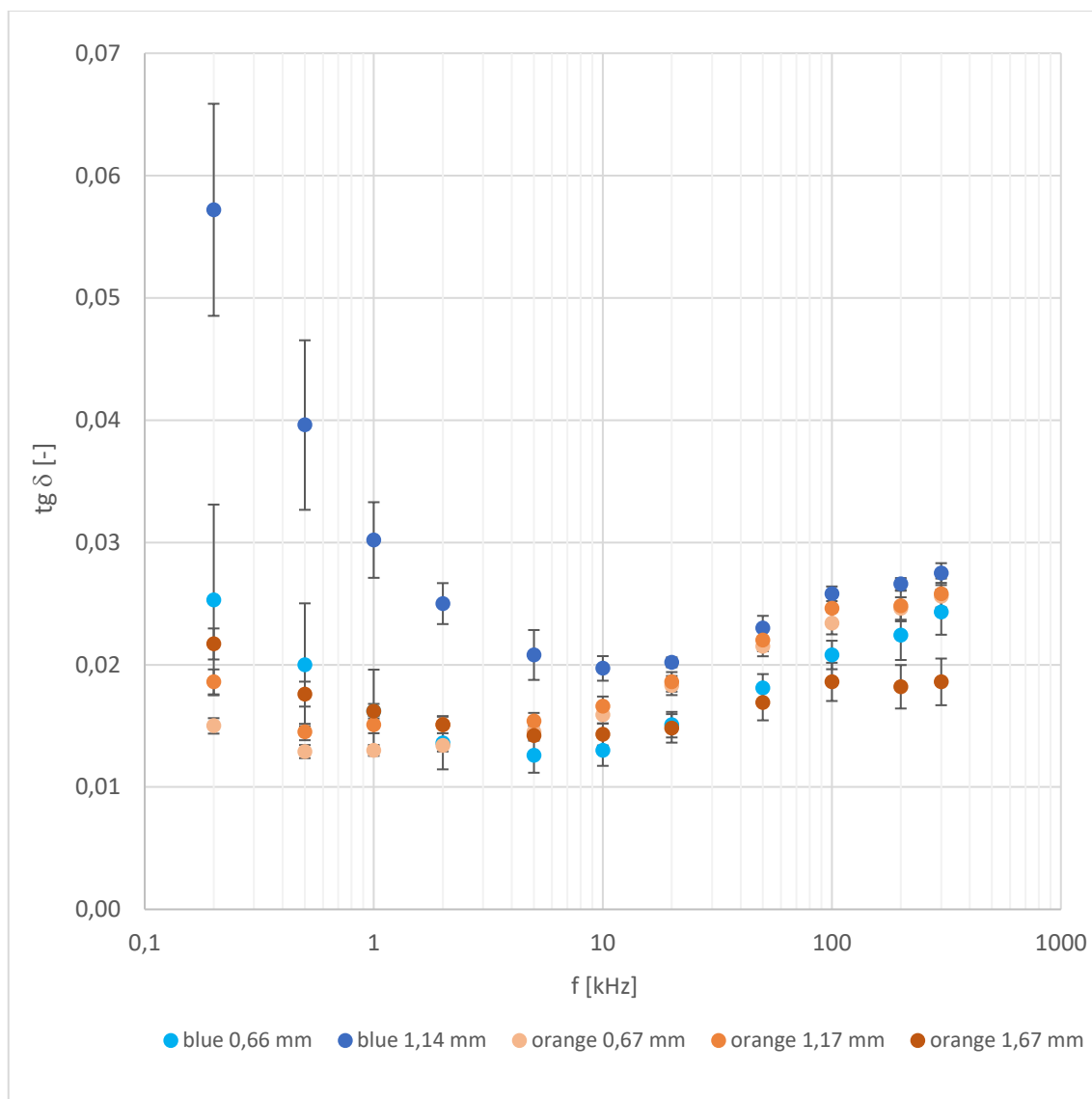
6.2.2 Ztrátový činitel

U materiálu blue resin byl ztrátový činitel měřen pouze u vzorků tloušťky ~0,5 mm a ~1 mm. U materiálu orange resin byl po zjištění jisté závislosti ztrátového činitele na tloušťce vzorku změřen i ztrátový činitel vzorků tloušťky ~1,5 mm.

Závislost průměrného ztrátového činitele vzorků na frekvenci byla vynesena do tabulek a grafů s chybovými úsečkami. V grafech bylo pro osu frekvence použito logaritmické měřítko vzhledem k velkému rozsahu frekvencí použitých pro měření. V následujících podkapitolách bude zhodnocení naměřených hodnot. Kompletní tabulky naměřených hodnot včetně vypočtených variačních koeficientů ztrátového činitele při různých frekvencích jsou k vidění v příloze 1 pro blue resin a v příloze 2 pro orange resin.

Tabulka 4: Průměrné hodnoty ztrátového činitele všech vzorků v závislosti na frekvenci

materiál	tloušťka	f [kHz]	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	300
blue resin	0,66 mm	tg δ [-]	0,025	0,020	0,016	0,014	0,013	0,013	0,015	0,018	0,021	0,022	0,024
	1,14 mm	tg δ [-]	0,057	0,040	0,030	0,025	0,021	0,020	0,020	0,023	0,026	0,027	0,028
orange resin	0,67 mm	tg δ [-]	0,015	0,013	0,013	0,013	0,015	0,016	0,018	0,022	0,023	0,025	0,026
	1,17 mm	tg δ [-]	0,019	0,015	0,015	0,015	0,015	0,017	0,019	0,022	0,025	0,025	0,026
	1,67 mm	tg δ [-]	0,022	0,018	0,016	0,015	0,014	0,014	0,015	0,017	0,019	0,018	0,019



Obrázek 29: Graf závislosti ztrátového činitele všech vzorků na frekvenci

6.2.2.1 Blue resin

Průběhy v grafu jasně ukazují, že ztrátový činitel vzorků obou tloušťek s rostoucí frekvencí nejprve klesá až do lokálního minima, což je 5 kHz u tenčích vzorků a 10 kHz u tlustších vzorků, a poté ztrátový činitel přibližně lineárně roste.

Z hodnot lze stejně jako u relativní permitivity vidět, že velikost ztrátového činitele závisí na tloušťce vzorku. S rostoucí tloušťkou vzorku roste ztrátový činitel. Opět je z grafu patrné, že čím vyšší frekvenci použijeme, tím je rozdíl ztrátového činitele obou typů vzorků menší. Při 200 Hz je ztrátový činitel tlustších vzorků průměrně o 56 % větší, při 300 kHz již jen o 12 %. Tato závislost je opět přibližně lineární.

6.2.2.2 Orange resin

Všechny tři průběhy nejprve klesají do lokálního minima a poté rostou. U dvou tenčích sad vzorků je toto minimum již při frekvenci 500 Hz. Po dosažení tohoto minima roste ztrátový činitel nejprve mírně asi do frekvence 5 kHz a poté se růst výrazně zvýší. Při frekvencích nad 100 kHz opět vidíme výrazné zpomalení až zastavení růstu ztrátového činitele, což je nejlépe vidět z průběhů vzorků tloušťek ~1 mm a ~1,5 mm.

Dále je patrné, že při nižších frekvencích asi do 2 kHz platí, že s tloušťkou vzorků roste ztrátový činitel. Ztrátový činitel vzorků ~1 mm je po celou dobu mírně větší než ztrátový činitel vzorků ~0,5 mm, ale s rostoucí frekvencí se tento rozdíl znatelně snižuje. Zatímco u tenčích vzorků bylo minimum jejich ztrátového činitele při frekvenci 500 Hz, ztrátový činitel vzorků ~1,5 mm klesá s frekvencí až do 5÷10 kHz, kde se nachází jeho minimum. Při frekvencích nad 10 kHz opět roste až do hranice 100 kHz, po níž se růst zastaví a ztrátový činitel dále zůstává zhruba konstantní a je o cca 27 % nižší než u tenčích vzorků.

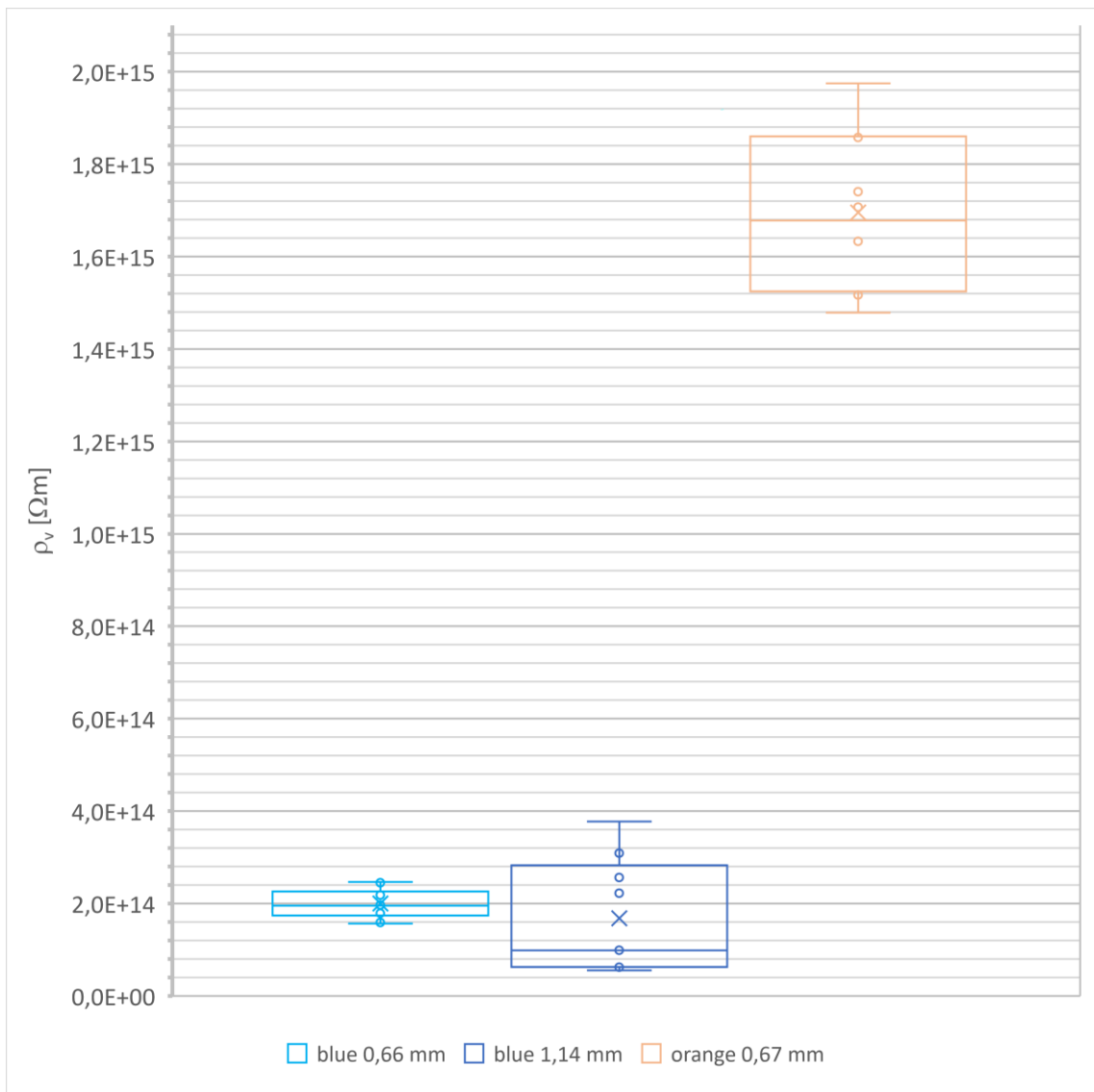
6.2.3 Objemová rezistivita

Objemová rezistivita byla měřena u vzorků tloušťky ~0,5 mm a ~1 mm z materiálu blue resin, u materiálu orange resin z časových důvodů pouze u vzorků ~0,5 mm. Všechny tyto vzorky na sobě měly napařeny hliníkové elektrody, jak je možno vidět na obrázku 24. U materiálu blue resin byly stínící elektrody napařeny pouze na 2 vzorky z každé sady, tyto vzorky v tabulce reprezentují označení 1 a 2. Důvodem byl nedostatek napařovacích masek. Všechny vzorky z materiálu orange resin měly napařeny všechny elektrody včetně stínící.

Na následující straně je k vidění tabulka s tloušťkami jednotlivých vzorků, naměřenými hodnotami ustálených objemových odporů vzorků a výslednými hodnotami objemové rezistivity, která byla dopočítána ze vzorce (4). Tyto hodnoty byly dále zpracovány do boxplot grafu. V následujících podkapitolách bude zhodnocení naměřených hodnot.

Tabulka 5: Objemová rezistivita vzorků

Blue resin								Orange resin			
č. vzorku	h [mm]	R [TΩ]	ρ_v [Ωm]	č. vzorku	h [mm]	R [TΩ]	ρ_v [Ωm]	č. vzorku	h [mm]	R [PΩ]	ρ_v [Ωm]
1	0,65	144,3	2,45E+14	1	1,19	68,6	6,37E+13	1	0,66	1,18	1,97E+15
2	0,65	115,9	1,97E+14	2	1,12	56,4	5,56E+13	2	0,66	1,04	1,74E+15
3	0,65	108,0	1,84E+14	3	1,15	65,8	6,32E+13	3	0,69	1,02	1,63E+15
4	0,68	96,5	1,57E+14	4	1,15	103,1	9,90E+13	4	0,65	0,87	1,48E+15
5	0,68	134,5	2,18E+14	5	1,15	322,0	3,09E+14	5	0,65	0,97	1,65E+15
6	0,64	127,2	2,20E+14	6	1,14	389,8	3,78E+14	6	0,68	1,15	1,87E+15
7	0,64	143,1	2,47E+14	7	1,14	264,6	2,56E+14	7	0,66	1,02	1,71E+15
8	0,66	107,2	1,79E+14	8	1,14	229,8	2,23E+14	8	0,68	0,94	1,53E+15
9	0,67	117,3	1,93E+14	9	1,11	62,9	6,26E+13	9	0,67	0,92	1,52E+15
10	0,67	96,3	1,59E+14	10	1,15	92,8	8,91E+13	10	0,66	1,11	1,86E+15
průměr	0,66	119,0	2,00E+14	průměr	1,14	165,6	1,60E+14	průměr	0,67	1,02	1,69E+15



Obrázek 30: Boxplot graf objemové rezistivity vzorků

6.2.3.1 Blue resin

Hodnoty objemové rezistivity tenčích vzorků vyšly poměrně konzistentně s variačním koeficientem 15 %. U tlustších vzorků vyšly objemové rezistivity velice rozdílně, což je dobře viditelné i z boxplot grafu. U čtyř vzorků vyšly podle předpokladu přibližně stejně jako u tenčích vzorků, avšak u zbylých šesti vzorků vyšly hodnoty objemové rezistivity přibližně 4× nižší, než by podle předpokladu měly. Variační koeficient pro objemové rezistivity tlustších vzorků vychází 71 %. O této zvláštnosti bude dále pojednáno v kapitole 6.4.2. Nicméně i přes toto chování vyšla průměrná objemová rezistivita tlustších vzorků „pouze“ o 20 % nižší než průměrná objemová rezistivita tenčích vzorků a řádově se s ní shodovala.

6.2.3.2 Orange resin

Objemová rezistivita vzorků orange resin vyšla vcelku konzistentně s průměrnou hodnotou 1,69 PΩm. Variační koeficient ze všech deseti měření vyšel pouze 9 %.

6.2.4 Elektrická pevnost

U obou zkoumaných materiálů byla elektrická pevnost změřena pro sady vzorků tloušťek 0,5 mm, 1 mm a 1,5 mm, celkem tedy bylo změřeno 60 vzorků.

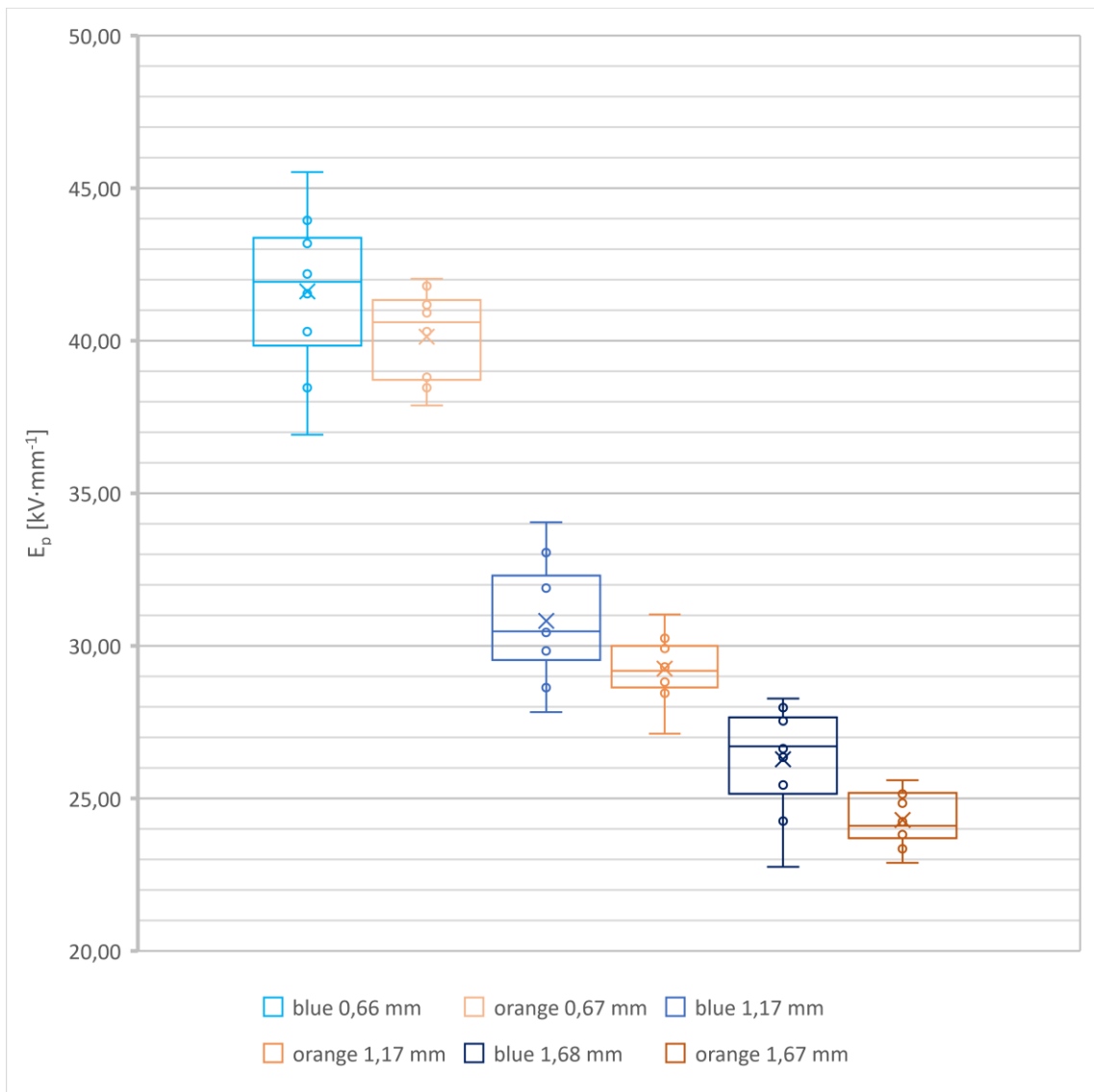
Následují tabulky naměřených hodnot tloušťek vzorků, průrazného napětí a vypočtené hodnoty elektrické pevnosti vzorků. Hodnoty elektrické pevnosti jsou dále zpracovány do boxplot grafu.

Tabulka 6: Elektrická pevnost vzorků blue resin

Blue resin											
č. vzorku	h [mm]	U _p [kV]	E _p [kV·mm ⁻¹]	č. vzorku	h [mm]	U _p [kV]	E _p [kV·mm ⁻¹]	č. vzorku	h [mm]	U _p [kV]	E _p [kV·mm ⁻¹]
1	0,66	29,0	43,94	1	1,16	37,0	31,90	1	1,67	38,0	22,75
2	0,65	24,0	36,92	2	1,15	32,0	27,83	2	1,68	45,0	26,79
3	0,66	27,5	41,67	3	1,18	36,0	30,51	3	1,69	43,0	25,44
4	0,67	27,0	40,30	4	1,16	39,5	34,05	4	1,67	44,0	26,35
5	0,65	25,0	38,46	5	1,17	37,5	32,05	5	1,67	46,0	27,54
6	0,64	27,0	42,19	6	1,18	39,0	33,05	6	1,68	45,0	26,79
7	0,66	28,0	42,42	7	1,17	33,5	28,63	7	1,68	47,0	27,98
8	0,65	27,0	41,54	8	1,17	35,0	29,91	8	1,69	45,0	26,63
9	0,67	30,5	45,52	9	1,19	35,5	29,83	9	1,68	47,5	28,27
10	0,66	28,5	43,18	10	1,15	35,0	30,43	10	1,69	41,0	24,26
průměr	0,66	27,35	41,61	průměr	1,17	36,0	30,82	průměr	1,68	44,15	26,28

Tabulka 7: Elektrická pevnost vzorků orange resin

Orange resin											
č. vzorku	h [mm]	U [kV]	E_p [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]	č. vzorku	h [mm]	U [kV]	E_p [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]	č. vzorku	h [mm]	U [kV]	E_p [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]
1	0,67	27	40,30	1	1,15	33	28,70	1	1,65	40	24,24
2	0,66	25	37,88	2	1,16	34	29,31	2	1,68	40	23,81
3	0,68	28	41,18	3	1,19	36	30,25	3	1,65	41	24,85
4	0,65	25	38,46	4	1,17	34	29,06	4	1,67	39	23,35
5	0,67	26	38,81	5	1,16	33	28,45	5	1,66	42	25,30
6	0,67	28	41,79	6	1,18	32	27,12	6	1,68	40	23,81
7	0,69	29	42,03	7	1,18	34	28,81	7	1,66	38	22,89
8	0,68	28	41,18	8	1,17	35	29,91	8	1,67	42	25,15
9	0,67	26	38,81	9	1,16	36	31,03	9	1,68	43	25,60
10	0,66	27	40,91	10	1,17	35	29,91	10	1,67	40	23,95
průměr	0,67	26,9	40,13	průměr	1,17	34,2	29,26	průměr	1,67	40,5	24,30



Obrázek 31: Boxplot graf elektrické pevnosti všech vzorků

6.2.4.1 Blue resin

Vypočtené hodnoty elektrické pevnosti všech vzorků vyšly poměrně konzistentně, u všech tloušťek je variační koeficient 6 %. Průměrná hodnota elektrické pevnosti vzorků tloušťky ~1,17 mm je o 26 % menší než u vzorků tloušťky ~0,66 mm a rozdíl mezi vzorky tloušťky ~1,17 mm a ~1,68 mm je již jen 15 %. Lze tedy předpokládat, že tlustší vzorky z téhož materiálu by měly elektrickou pevnost opět nižší o menší procentuální rozdíl a elektrická pevnost by neměla klesnout pod hodnotu $20 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$.

6.2.4.2 Orange resin

Všechny hodnoty elektrické pevnosti vyšly s velmi malým variačním koeficientem 3,5 %. Průměrná hodnota elektrické pevnosti vzorků tloušťky ~1,17 mm je o 27 % menší než u vzorků tloušťky ~0,67 mm a rozdíl mezi vzorky tloušťky ~1,17 mm a ~1,67 mm je již jen 17 %. Lze tedy předpokládat, že tlustší vzorky z téhož materiálu by měly elektrickou pevnost opět nižší o menší procentuální rozdíl a elektrická pevnost by se měla vždy pohybovat minimálně kolem hodnoty $20 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$.

6.3 Porovnání dosažených a očekávaných výsledků

Všechny sledované vlastnosti zkoumaných vzorků vyšly v předpokládaných mezích, které jsou uvedené v tabulce 2. V následujících podkapitolách jsou popsány odchylky hodnot jednotlivých zkoumaných veličin.

6.3.1 Souhrn naměřených výsledků

Tabulka 8 obsahuje přehled naměřených výsledků vzorků tloušťky ~0,5 mm z obou materiálů včetně jejich odchylek.

Tabulka 8: Přehled naměřených výsledků obou materiálů

materiál	ϵ_r [-] (1 kHz)	$\text{tg } \delta$ [-] (1 kHz)	ρ_v [Ωm]	E_p [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]
Blue resin	$3,34 \pm 0,23$	$0,016 \pm 0,003$	$2,00\text{E}+14 \pm 3,05\text{E}+13$	$41,61 \pm 2,40$
Orange resin	$3,17 \pm 0,12$	$0,013 \pm 0,000$	$1,69\text{E}+15 \pm 1,58\text{E}+14$	$40,13 \pm 1,43$

6.3.2 Relativní permitivita

Hodnoty relativní permitivity obou sad vzorků blue resin vyšly pro všechny hodnoty frekvence v očekávaném rozmezí (2,5 ÷ 8). Nejvyšší relativní permitivita byla naměřena u tlustších vzorků při nejmenší frekvenci použité při měření (200 Hz). Tato hodnota je 4,04; což je cca 50 % maximální očekávané hodnoty (8). Naopak minimální hodnota relativní permitivity byla zjištěna u tenčích vzorků při maximální použité frekvenci při měření (300 kHz). Nejmenší naměřená hodnota je 3,07; je tedy o cca 19 % vyšší než minimální očekávaná hodnota (2,5).

U vzorků orange resin vyšla relativní permitivita v očekávaném rozmezí pouze u vzorků tloušťek ~0,67 mm a ~1,17 mm. Maximální hodnota 3,38 byla zjištěna u vzorků ~1,17 mm, a to při 200 Hz. Relativní permitivita vzorků tloušťky ~1,67 mm vyšla v celém rozsahu frekvencí pod očekávanou hranicí 2,5. Při 200 Hz to bylo 2,48 a tato hodnota klesla až na 2,35 při 300 kHz.

6.3.3 Ztrátový činitel

U ztrátového činitele byla předpokládaná hodnota menší nebo rovno 0,03 při frekvenci 1 kHz. Tento předpoklad byl splněn u obou sad vzorků blue resin, avšak u tlustších vzorků vyšla průměrná hodnota ztrátového činitele při frekvenci 1 kHz cca 0,03; což je krajní hodnota očekávaného rozmezí. Jak lze vidět z kompletní tabulky naměřených hodnot v příloze 1, krajní hodnota ztrátového činitele 0,03 při frekvenci 1 kHz byla překročena celkem u pěti vzorků, nikdy však o více než 13 %.

Vzorky orange resin se do předpokladu vešly s rezervou. Nejvíce se předpokládané hodnotě ztrátového činitele 0,03 při 1 kHz blížily hodnoty vzorků tloušťky ~1,67 mm s průměrnou hodnotou 0,016. Tento materiál byl také mnohem konzistentnější než blue resin, variační koeficient všech vzorků při 1 kHz se pohyboval kolem 4 %, zatímco u blue resinu to bylo 10÷20 %.

6.3.4 Objemová rezistivita

Všechny naměřené hodnoty objemové rezistivity vzorků blue resin jsou větší než předpokládaná minimální hodnota $1 \cdot 10^{12} \Omega\text{m}$. I nejnižší naměřená hodnota objemové rezistivity ($5,56 \cdot 10^{13} \Omega\text{m}$) je o řád větší než předpokládané minimum. Průměrné hodnoty jsou potom u obou typů o 2 řády větší než předpoklad.

U vzorků orange resin byla objemová rezistivita dokonce ještě o řád vyšší než u blue resinu, což je o tři řády vyšší než předpokládané minimum. Nejvyšší naměřená hodnota je $1,97 \cdot 10^{15} \Omega\text{m}$, nejnižší pak $1,48 \cdot 10^{15} \Omega\text{m}$. Variační koeficient je i v tomto

měření menší u orange resinu, konkrétně 9 %, zatímco u blue resinu je 15 % u tenčích vzorků a 71 % u tlustších vzorků (vysvětleno v kapitole 6.4.2).

6.3.5 Elektrická pevnost

Většina vzorků blue resin měla elektrickou pevnost v předpokládaném rozmezí $20 \div 40 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. U vzorků tloušťky $\sim 0,66 \text{ mm}$ byla elektrická pevnost osmi z nich vyšší než očekávané maximum $40 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ a průměrně u vzorků této tloušťky vyšla $41,61 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. Nejnižší naměřená hodnota $22,75 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ byla zjištěná u jednoho ze vzorků tloušťky $\sim 1,68 \text{ mm}$. Tato hodnota je stále v očekávaném rozmezí, konkrétně je o 12 % větší než předpokládané minimum $20 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. Průměrná hodnota vzorků tloušťky $\sim 1,68 \text{ mm}$ vyšla $26,28 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, což je o 24 % větší než předpokládané minimum a ani u tlustších vzorků z tohoto materiálu by průměrná hodnota elektrické pevnosti neměla klesnout pod toto minimum.

U vzorků orange resin vycházela elektrická pevnost podobně jako u blue resinu. Vzorky tlusté $\sim 0,67 \text{ mm}$ měly průměrnou elektrickou pevnost $40,13 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, což je lehce nad očekávaným maximem. Vzorky tlusté $\sim 1,17 \text{ mm}$ pak měly průměrnou elektrickou pevnost $29,26 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ a nejtlustší vzorky $24,3 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. U žádného vzorku nebyla zaznamenána nižší elektrická pevnost, než bylo očekávané minimum. Dá se předpokládat, že ještě tlustší vzorky by se měly svou elektrickou pevností pohybovat kolem tohoto minima $20 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$.

6.4 Možné příčiny vzniku chyb při měření

Ne všechny naměřené hodnoty mohou být zcela přesné, na vzniku chyb se v praxi podílí mnoho faktorů, což může způsobit někdy i značné odchylky od předpokládaných hodnot. V naměřených hodnotách pro tuto práci se sice žádné extrémní odchylky od předpokladů nevyskytují, ale to neznamená, že naměřené hodnoty jsou zcela přesné a od skutečných hodnot sledovaných veličin vzorků použitých pro měření se mohou více či méně lišit. Následující podkapitoly popisují možné příčiny vzniku chyb a nepřesností při měření jednotlivých veličin.

6.4.1 Relativní permitivita a ztrátový činitel

Při měření ztrátového činitele a relativní permitivity, respektive kapacity použité pro výpočet relativní permitivity ze vzorce (3), byla pravděpodobně hlavním důvodem vzniku nepřesností odlišná přítlačná síla vyvíjená na tlačnou pružinu měřícího elektrodového přípravku, jehož schéma je na obrázku 23. Jelikož u nižších frekvencí

použitých při měření (typicky frekvence do 1 kHz) bylo nutné vyvinout větší přítlačnou sílu, aby se odečítané hodnoty ustálily, jsou nepřesnosti vzniklé při měření relativní permitivity převážně v tomto rozmezí frekvencí. Takto měřeny byly pouze vzorky blue resin. Pro měření vzorků orange resin byla přítlačná síla vyvíjena pružinou se šroubem a ukazatelem právě přítlačné síly, z čehož vyplývá značně nižší variační koeficient naměřených hodnot vzorků orange resin, především pak v oblasti nižších frekvencí.

Nekonzistentní ustálenost hodnot na displeji měřiče je další možnou příčinou vzniku nepřesností. Při odečítání měřených hodnot byly tyto hodnoty zaokrouhleny podle konzistentnosti displeje zobrazujícího okamžité hodnoty sledovaných veličin, aby byla výsledná hodnota co nejrelevantnější, avšak ne u všech hodnot se toto mohlo dostatečně povést.

6.4.2 Objemová rezistivita

Hlavní příčinou vzniku nepřesností při měření objemové rezistivity vzorků byla pravděpodobně nedostatečná doba přiložení napětí. Následkem toho nebyla hodnota objemového odporu vzorků použitá pro výpočet objemové rezistivity ze vzorce (4) dokonale ustálena, avšak pro toto měření podle normy ASTM D 257 07 byla konečná hodnota objemového odporu po 30 minutách přiloženého napětí dostatečně ustálená.

Další možnou příčinou vzniku nepřesností mohla být nepřítomnost stínících elektrod na většině vzorcích blue resin. Při porovnání naměřených hodnot vzorků se stínícími elektrodami a bez stínících elektrod jsou však výsledné rozdíly zanedbatelné a pro toto měření nejsou tedy takto vzniklé nepřesnosti zavádějící.

U vzorků blue resin tloušťky $\sim 1,14$ mm můžeme pozorovat značné odchylky naměřených hodnot objemové rezistivity u šesti vzorků. Tyto hodnoty jsou přibližně čtyřikrát nižší, než by teoreticky měly být. Tato anomálie byla s největší pravděpodobností způsobena při tisku vzorků, kdy bylo vytištěno všech 10 tenčích vzorků, poté 4 tlustší vzorky, načež byl do tiskárny potřeba doplnit používaný fotopolymer a tudíž zbývajících 6 tlustších vzorků bylo vytištěno z čerstvě doplněného fotopolymeru. Z tohoto chování plyne závěr, že čím déle je fotopolymer v tiskárně v nevytvrzené formě, tím vyšší mají vzorky z něj vytištěné objemovou rezistivitu. Tyto odchylky nejsou tedy nutně způsobeny nepřesnostmi při měření, ale spíše rozdílností vzorků jako takových.

6.4.3 Elektrická pevnost

Nepřesnosti při měření elektrické pevnosti mohly vzniknout zejména z důvodu nepřesného odečítání hodnot z ručkového kilovoltmetru, který byl použit k měření

průrazného napětí. Tento voltmetr byl použit při rozsahu 50 kV, kde jeden dílek měl hodnotu 0,5 kV, tudíž jsou naměřené hodnoty zaokrouhleny na 0,5 kV.

Jiné nepřesnosti mohly vzniknout nepřesným srovnáním elektrod, které jsou vidět na obrázku 26. Tyto elektrody bylo před začátkem měření potřeba srovnat tak, aby byly co nejpřesněji naproti sobě, aby byl zajištěno co nejkonzistentnější elektrické pole mezi elektrodami.

V neposlední řadě mohly nepřesnosti při zjišťování průrazného napětí vzniknout nedostatečně plynulým zvyšováním napětí při měření, které se nastavovalo ručně pomocí potenciometru.

7 Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se s metodami 3D tisku se zaměřením na technologii SLA, prakticky se seznámit s SLA 3D tiskárnou a možnostmi tisku a u vybraných fotopolymerů pro 3D tisk zkoumat a porovnat elektrické vlastnosti vzorků z nich vytištěných. Tyto zkoumané vlastnosti jsou relativní permitivita, ztrátový činitel, objemová rezistivita a elektrická pevnost.

Při přípravě vzorků byla zjištěna skutečnost, že vytištěné vzorky jsou průměrně o 0,16 mm tlustší než 3D modely nahrané do tiskárny k tisku. Tato nepřesnost se vyskytovala u všech devadesáti vytištěných vzorků. Pro přesnější výsledky zkoumaných vlastností byly tedy použity skutečné hodnoty tloušťky vzorků. Samotné zkoumané veličiny vyšly v rozmezí předpokládaných hodnot, které jsou k vidění v tabulce 2.

Relativní permitivita vzorků blue resin se pohybovala v rozmezí $4,04 \div 3,07$. Vzorky orange resin měly relativní permitivitu v rozmezí $3,38 \div 2,35$. U obou materiálů relativní permitivita s rostoucí frekvencí přibližně lineárně klesala. Tato závislost dokazuje, že oba materiály jsou polární dielektrika. Byla zjištěna i závislost relativní permitivity na tloušťce vzorků – tlustší vzorky mají vyšší relativní permitivitu a tento rozdíl s rostoucí frekvencí klesá. Vzorky orange resin tloušťky $\sim 1,5$ mm však měly relativní permitivitu výrazně nižší, než tenčí vzorky ze stejného materiálu.

Ztrátový činitel byl u obou materiálů nižší než očekávané maximum 0,03 při frekvenci 1 kHz. Materiál blue resin má nejnižší ztrátový činitel při frekvenci 10 kHz, a to 0,013 u tenčích vzorků. U materiálu orange resin byl nejnižší ztrátový činitel naměřen taktéž 0,013 u nejtenčích vzorků, avšak při nižší frekvenci 500 Hz. Naopak nejtlustší vzorky orange resin měly nejnižší hodnotu ztrátového činitele, stále velmi nízkých 0,014; naměřenou při frekvenci 10 kHz. To je frekvence, u níž bylo zjištěno minimum i u blue resinu.

Objemová rezistivita vyšla u obou materiálů velmi vysoká. U blue resinu vyšla pro tenčí vzorky $2 \cdot 10^{14} \Omega\text{m}$ a u orange resinu dokonce $1,7 \cdot 10^{15} \Omega\text{m}$. Takto vysoké hodnoty rezistivity značí výborné izolační vlastnosti obou materiálů.

Elektrickou pevnost mají oba materiály velmi podobnou. Nejvyšší elektrickou pevnost měly nejtenčí vzorky obou materiálů. U blue resinu to bylo $41,6 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, zatímco u orange resinu $40,1 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. U obou materiálů byla také zjištěna zřejmá závislost elektrické pevnosti na tloušťce vzorků, přičemž při rostoucí tloušťce vzorků klesá elektrická pevnost. Tato závislost je podobná klesající exponenciále a elektrická pevnost obou materiálů by se vždy měla pohybovat minimálně kolem hranice $20 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$.

Z hlediska naměřených elektrických vlastností obou materiálů můžeme říci, že jsou tyto materiály velmi podobné. Orange resin má nižší relativní permitivitu a téměř desetkrát vyšší objemovou rezistivitu než blue resin. Blue resin má nepatrně vyšší elektrickou pevnost. Oba materiály jsou velmi dobré izolanty a v elektrotechnice by se daly použít například pro výrobu konstrukčních krabiček pro elektrotechnické výrobky. Pro další zlepšení izolačních vlastností těchto materiálů by do jejich nevytvrzených forem mohly být přidány další materiály jako některé termoplastické komponenty, jíl nebo uhlíková vlákna. Dalšímu zlepšení požadovaných vlastností by mohlo být docíleno aplikací impregnačních či jiných laků na hotové objekty. Zajímavé by také bylo zkoumat chování vlastností těchto materiálů při nastavení jiných parametrů tisku, například doby vytvrzování jedné vrstvy či dobu následného dovytvřování UV světlem [55].

8 Seznam použité literatury

- [1] B. Redwood, F. Schöffler, a B. Garret, *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D HUBS, 2017.
- [2] „Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM) – Konstrukter.cz". <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>.
- [3] O. Stříteský, *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research s.r.o., 2019.
- [4] gronkwena, „3D Printer Basics", *Gronkbot 3D Printing*, dub. 18, 2013. <https://gronkwena.wordpress.com/2013/04/18/3d-printer-basics/>.
- [5] oXy O. s.r.o, „3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?", *Svethardware.cz*. <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>.
- [6] „Co je PETG? -definice PETG | Zkratka Finder". <https://www.abbreviationfinder.org/cs/acronyms/petg.html>.
- [7] Materialpro3d.cz, „ASA 3D tiskový materiál", *materialpro3d.cz*, srp. 03, 2016. <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>.
- [8] „Post processing for FDM printed parts", *3D Hubs*. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/>.
- [9] „Original Prusa i3 MK3S". https://cdn.shop.prusa3d.com/1310-thickbox_default/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s.jpg.
- [10] Materialpro3d.cz, „SLS, SLA, SLM, MLS technologie", *materialpro3d.cz*, srp. 03, 2016. <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/slm-technologie/>.
- [11] „Selective Laser Sintering (SLS) | 3D Printing | Protolabs". <https://www.protolabs.com/services/3d-printing/selective-laser-sintering/>.
- [12] A. Fasnacht, „Better for Business: FDM 3D Printing over SLS 3D Printing", *CADimensions*, říj. 10, 2017. <https://www.cadimensions.com/blog/fdm-3d-printing-vs-sls-3d-printing/>.
- [13] „Minimising Material Wastage in SLS Processes", *AMFG*, bře. 17, 2017. <https://amfg.ai/2017/03/17/material-wastage-sls/>.
- [14] „Post processing for SLS printed parts", *3D Hubs*. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-sls-printed-parts/>.
- [15] „Sintratec Kit", *Sintratec AG*. <https://sintratec.com/product/sintratec-kit/>.
- [16] „A Comprehensive Guide to Material Jetting 3D Printing", *AMFG*, čer. 29, 2018. <https://amfg.ai/2018/06/29/material-jetting-3d-printing-guide/>.
- [17] „Introduction to material jetting 3D printing", *3D Hubs*. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>.
- [18] M. Sireesha, J. Lee, A. S. Kiran, J. babu VELURU, B. Kee, a S. Ramakrishna, „A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry", *RSC Advances*, roč. 8, s. 22460–22468, 2018, doi: 10.1039/C8RA03194K.
- [19] „Binder Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University". <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>.
- [20] „Binder Jetting 3D Printer", *Tyler Bernardin*. <http://tylerberardin.com/portfolio-items/3d-printer/>.
- [21] „Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained", *All3DP*. <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>.
- [22] „Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Technology", *Additive News*, led. 16, 2018. <https://additivenews.com/direct-metal-laser-sintering-dmls-technology/>.
- [23] „LASERTEC 65 3D hybrid - ADDITIVE MANUFACTURING Machines by DMG MORI". <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/aditivni-vyroba/praskova-tryska/lasertec-65-3d-hybrid>.

- [24] „5 Ways 3D Printing Can Transform the Electronics Industry", *AMFG*, čvc. 03, 2018. <https://amfg.ai/2018/07/03/5-ways-3d-printing-can-transform-electronics/>.
- [25] R. Merritt, „EDN - 3D-printed PCBs and more", *EDN*, lis. 24, 2015. <https://www.edn.com/3d-printed-pcb-and-more/>.
- [26] „3D printed Enclosures : How to design them with Sculpteo", *3D Printing Blog: Tutorials, News, Trends and Resources | Sculpteo*. <https://www.sculpteo.com/blog/2017/06/14/3d-printed-enclosures-learn-the-basic-design-guidelines/>.
- [27] „3D Printed Adafruit Raspberry Pi Zero Case", *Raspberry Pi Spy*, pro. 03, 2015. <https://www.raspberrypi-spy.co.uk/2015/12/3d-printed-adafruit-raspberryy-pi-zero-case/>.
- [28] N. Dimension, „Printing Inductors with Additive Manufacturing: It's Now Possible". <https://www.nano-di.com/blog/dragonfly-pro-enables-additive-manufacturing-of-printed-inductors>.
- [29] N. Dimension, „Did you Say Capacitors? Think about Additively Manufacturing Them". <https://www.nano-di.com/blog/dragonfly-3d-printed-pcb-with-6-capacitors-and-soldered-components>.
- [30] „Stereolithography 3D Printing: From the 1980s to Now", *Formlabs*. <https://formlabs.com/blog/history-of-stereolithography-3d-printing/>.
- [31] „History of stereolithography • Prototech Asia", *Prototech Asia*. <https://prototechasia.com/en/stereolithography/history-of-stereolithography>.
- [32] „Technology with History | Stereolithography – SLA", *3d stereolithography*. <https://www.3d-stereolithography.com/history/>.
- [33] „Our Story", *3D Systems*. <https://www.3dsystems.com/our-story>.
- [34] „Introduction to SLA 3D Printing", *3D Hubs*. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>.
- [35] „SLA 3D Printing (Stereolithography) – Simply Explained", *All3DP*, srp. 01, 2019. <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>.
- [36] „SLA - Stereolithography (and DLP, CDLP, CLIP)", *Additive Blog*. <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/sla-stereolithography-dlp-cdclip-clip/>.
- [37] „Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing in 2020", *Formlabs*. <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>.
- [38] S. Frey, „Laser SLA vs DLP vs Masked SLA 3D Printing Technology", *The Ortho Cosmos*, bř. 23, 2017. <https://theorthocosmos.com/laser-sla-vs-dlp-vs-masked-sla-3d-printing-technology-compared/>.
- [39] S. Frey, „Bottom-Up vs Top-Down vs CLIP 3D Printing", *The Ortho Cosmos*, bř. 22, 2017. <https://theorthocosmos.com/bottom-vs-top-vs-clip-3d-printing/>.
- [40] „Advantages and Disadvantages of Stereolithography – SLA", *3d stereolithography*. <https://www.3d-stereolithography.com/advantages-and-disadvantages/>.
- [41] „3D Printed Jewelry | Order 3D Printed Jewelry | Designs from 3DCompare.com", *3DCompare.com*. <https://3dcompare.com/3d-printed-jewelry/>.
- [42] S. Davies, „Zortrax launches biocompatible 3D printing resins for dental and prosthetic applications", *TCT Magazine*, čer. 2019, [Online]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/api/content/f8182478-9739-11e9-b9b1-12f1225286c6/>.
- [43] „Hearing Aids – 3D Med". <http://3dmed.co/medical-field/hearing-aids/>.
- [44] „MyMiniFactory celebrates release of The Last Jedi with 3D printed Star Wars models", *3D Printing Industry*, pro. 15, 2017. <https://3dprintingindustry.com/news/myminifactory-celebrates-release-last-jedi-3d-printed-star-wars-models-126216/>.
- [45] A. Mudruňková, *Elektrotechnické materiály I.*, 2016. vyd. .
- [46] „Datasheet blue resin". Prusa Research a.s., [Online]. Dostupné z: https://shop.prusa3d.com/fotky/SafetySheet_Resin_Tough_CZE.pdf.
- [47] „Technical Data UV LCD Prusa Orange". Photocentric.

- [48] „Original Prusa SL1“, *Prusa Research s.r.o. – 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši*.
<https://www.prusa3d.cz/original-prusa-sl1/>.
- [49] V. Koblížek, „Dielektrické vlastnosti tuhých látek - návod k laboratornímu cvičení z MVE“.
 [Online]. Dostupné z:
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/205818/mod_resource/content/1/uloha_4_dielkricke-vlastnosti-tuhych-latek.pdf.
- [50] J. Sedláček, „Měření elektrických vlastností polymerních kompozitů - návod k laboratornímu cvičení z MVE“ .
- [51] T. Tichý, O. Šefl, P. Veselý, a T. Cápal, „Application Possibilities of Fused Filament Fabrication Technology for High-Voltage and Medium-Voltage Insulation Systems“, in *2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, kvě. 2019, s. 1–6, doi: 10.1109/ISSE.2019.8810300.
- [52] L. Běhálek, *Polymery*, Code creator, s.R.o. .
- [53] „Tabulka relativních permitivit vybraných materiálů“.
http://www.dinel.cz/_file/AMIfv95QsvMopq8GA848o69r_yFAVYgklqLiAoLME0ORLQPdCAIkRAeJvDDR90OQh8kq6T4bVT6dASBZ27h_IluHiZ3j-GhH8T6DphAz1Ui4CwS-441Bupe_IVYYHw_XkUqAHRt6U93WEiawC8m6jG7tzF1ptcn0sQ/relativni-permitivity-cz_n1.pdf.
- [54] „Dielectric Properties of Epoxies“, 2014.
http://www.epotek.com/site/files/Techtips/pdfs/Tech_Tip_25_-_Dielectric_Properties_of_Epoxies.pdf.
- [55] F.-L. Jin, X. Li, a S.-J. Park, „Synthesis and application of epoxy resins: A review“, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, roč. 29, s. 1–11, zář. 2015, doi: 10.1016/j.jiec.2015.03.026.

9 Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení technologií 3D tisku dle materiálu použitého pro tisk [1].....	13
Obrázek 2: Schéma FFF 3D tiskárny [4]	14
Obrázek 3: FFF 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S [9]	15
Obrázek 4: Schéma SLS 3D tiskárny [12]	16
Obrázek 5: SLS 3D tiskárna Kit firmy Sintratec [15].....	18
Obrázek 6: Schéma DOD 3D tiskárny [18].....	20
Obrázek 7: Schéma Binder Jetting 3D tiskárny [20]	22
Obrázek 8: DMLS 3D tiskárna LASERTEC 65 firmy DMG Mori [23]	23
Obrázek 9: Deska plošného spoje vytištěná tiskárnou Nano Dimension DragonFly 2020 [25] ..	24
Obrázek 10: Krabička pro Raspberry Pi Zero vyráběna firmou Adafruit na FFF 3D tiskárnách [27]	24
Obrázek 11: Induktor vytištěný na tiskárně Nano Dimension DragonFly Pro [28]	25
Obrázek 12: První komerční SLA tiskárna - SLA-1 firmy 3D Systems [33]	27
Obrázek 13: Schéma bottom-up SLA 3D tiskárny [36]	28
Obrázek 14: Hlavní kategorie SLA procesu [38]	30
Obrázek 15: Srovnání metod top-down, bottom-up a CLIP [39].....	33
Obrázek 16: Přívěsek vytištěný na SLA tiskárně [41].....	35
Obrázek 17: Zubní protéza vytištěná na SLA tiskárně [42].....	36
Obrázek 18: Konstrukce naslouchátka vytištěná na SLA tiskárně [43].....	36
Obrázek 19: Figurka vytištěná na SLA 3D tiskárně [44].....	37
Obrázek 20: Model vzorku o tloušťce 1 mm v prostředí TinkerCad.....	41
Obrázek 21: Náhled vzorků na tiskové ploše ve slicovacím programu PrusaSlicer.....	42
Obrázek 22: 3D tiskárna Original Prusa SL1 a Original Prusa CW1 [48]	42
Obrázek 23: Schéma elektrodového měřicího přípravku a měřiče pro měření kapacity a ztrátového činitele [49]	44
Obrázek 24: Vzorky s napařenými elektrodami pro měření rezistivity	44
Obrázek 25: Blokové schéma měřicího obvodu pro měření objemové rezistivity [50]	45
Obrázek 26: Schéma měřicího přípravku pro měření průrazného napětí [51]	46
Obrázek 27: Graf závislosti relativní permitivity všech vzorků na frekvenci	48
Obrázek 28: Graf porovnání závislostí relativních permitivit zkoumaných materiálů a PVC na frekvenci	50
Obrázek 29: Graf závislosti ztrátového činitele všech vzorků na frekvenci	51
Obrázek 30: Boxplot graf objemové rezistivity vzorků.....	53
Obrázek 31: Boxplot graf elektrické pevnosti všech vzorků.....	55

10 Seznam příloh

Příloha 1: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření relativní permitivity a ztrátového činitele vzorků z materiálu blue resin	68
Příloha 2: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření relativní permitivity a ztrátového činitele vzorků z materiálu orange resin	70

Příloha 1: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření relativní permitivity a ztrátového činitele vzorků z materiálu blue resin

Vzorky tloušťky ~0,66 mm												
č. vzorku	f [kHz]	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	300
1	C _x [pF]	97	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86
	tg δ [-]	0,019	0,015	0,012	0,011	0,010	0,012	0,014	0,018	0,021	0,024	0,025
	ε _r [-]	3,68	3,60	3,56	3,53	3,49	3,45	3,41	3,38	3,34	3,30	3,26
2	C _x [pF]	95	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84
	tg δ [-]	0,018	0,015	0,013	0,011	0,011	0,012	0,014	0,017	0,020	0,022	0,025
	ε _r [-]	3,60	3,53	3,49	3,45	3,41	3,38	3,34	3,30	3,26	3,22	3,19
3	C _x [pF]	87	86	85	84	83	82	81	80	80	80	80
	tg δ [-]	0,014	0,013	0,011	0,011	0,011	0,013	0,015	0,016	0,020	0,020	0,024
	ε _r [-]	3,30	3,26	3,22	3,19	3,15	3,11	3,07	3,03	3,03	3,03	3,03
4	C _x [pF]	98	97	96	95	94	94	93	92	91	90	89
	tg δ [-]	0,020	0,016	0,015	0,013	0,013	0,014	0,015	0,019	0,022	0,024	0,026
	ε _r [-]	3,72	3,68	3,64	3,60	3,56	3,56	3,53	3,49	3,45	3,41	3,38
5	C _x [pF]	88	87	86	85	84	83	82	81	80	80	79
	tg δ [-]	0,023	0,021	0,018	0,015	0,014	0,014	0,016	0,019	0,022	0,024	0,026
	ε _r [-]	3,34	3,30	3,26	3,22	3,19	3,15	3,11	3,07	3,03	3,03	3,00
6	C _x [pF]	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	79
	tg δ [-]	0,024	0,020	0,016	0,014	0,014	0,014	0,016	0,020	0,022	0,025	0,026
	ε _r [-]	3,34	3,30	3,26	3,22	3,19	3,15	3,11	3,07	3,03	3,00	3,00
7	C _x [pF]	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	68
	tg δ [-]	0,035	0,026	0,020	0,017	0,014	0,014	0,014	0,017	0,019	0,020	0,021
	ε _r [-]	2,92	2,88	2,84	2,81	2,77	2,73	2,69	2,65	2,62	2,58	2,58
8	C _x [pF]	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87
	tg δ [-]	0,035	0,028	0,022	0,017	0,012	0,010	0,017	0,018	0,019	0,019	0,022
	ε _r [-]	3,68	3,64	3,60	3,56	3,53	3,49	3,45	3,41	3,38	3,34	3,30
9	C _x [pF]	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78
	tg δ [-]	0,027	0,020	0,016	0,014	0,014	0,014	0,016	0,018	0,022	0,024	0,026
	ε _r [-]	3,34	3,30	3,26	3,22	3,19	3,15	3,11	3,07	3,03	3,00	2,96
10	C _x [pF]	89	88	86	85	84	83	82	81	80	79	79
	tg δ [-]	0,038	0,026	0,019	0,013	0,013	0,013	0,014	0,019	0,021	0,022	0,022
	ε _r [-]	3,38	3,34	3,26	3,22	3,19	3,15	3,11	3,07	3,03	3,00	3,00
průměr	C _x [pF]	90,4	89,2	88,1	87,1	86,1	85,2	84,2	83,2	82,3	81,5	80,9
	tg δ [-]	0,025	0,020	0,016	0,014	0,013	0,013	0,015	0,018	0,021	0,022	0,024
	ε _r [-]	3,43	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23	3,19	3,16	3,12	3,09	3,07
směr. odch. [-]	ε _r	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22
	tg δ	0,008	0,005	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
V [%]	ε _r	6,8	6,7	6,8	6,9	7,0	7,2	7,3	7,4	7,4	7,4	7,0
	tg δ	30,8	25,1	21,0	15,8	11,3	9,7	6,9	6,3	5,6	9,0	7,6

Vzorky tloušťky ~1,14 mm												
č. vzorku	f [kHz]	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	300
1	C _x [pF]	62	60	59	59	58	57	56	55	54	54	53
	tg δ [-]	0,054	0,030	0,025	0,022	0,020	0,020	0,020	0,023	0,025	0,026	0,026
	ε _r [-]	4,08	3,95	3,88	3,88	3,82	3,75	3,69	3,62	3,56	3,56	3,49
2	C _x [pF]	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52
	tg δ [-]	0,066	0,045	0,035	0,025	0,020	0,019	0,020	0,023	0,026	0,026	0,027
	ε _r [-]	4,08	4,02	3,95	3,88	3,82	3,75	3,69	3,62	3,56	3,49	3,42
3	C _x [pF]	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53
	tg δ [-]	0,057	0,046	0,032	0,025	0,021	0,02	0,02	0,023	0,026	0,027	0,028
	ε _r [-]	4,15	4,08	4,02	3,95	3,88	3,82	3,75	3,69	3,62	3,56	3,49
4	C _x [pF]	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51
	tg δ [-]	0,05	0,039	0,029	0,025	0,021	0,019	0,02	0,023	0,026	0,027	0,028
	ε _r [-]	4,02	3,95	3,88	3,82	3,75	3,69	3,62	3,56	3,49	3,42	3,36
5	C _x [pF]	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49
	tg δ [-]	0,045	0,032	0,027	0,024	0,020	0,019	0,020	0,023	0,026	0,027	0,027
	ε _r [-]	3,88	3,82	3,75	3,69	3,62	3,56	3,49	3,42	3,36	3,29	3,23
6	C _x [pF]	61	59	57	56	55	54	53	52	52	51	50
	tg δ [-]	0,07	0,047	0,031	0,026	0,022	0,021	0,021	0,024	0,026	0,027	0,028
	ε _r [-]	4,02	3,88	3,75	3,69	3,62	3,56	3,49	3,42	3,42	3,36	3,29
7	C _x [pF]	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50
	tg δ [-]	0,056	0,034	0,031	0,029	0,024	0,022	0,021	0,025	0,027	0,027	0,029
	ε _r [-]	3,95	3,88	3,82	3,75	3,69	3,62	3,56	3,49	3,42	3,36	3,29
8	C _x [pF]	63	61	60	59	57	56	56	55	54	53	52
	tg δ [-]	0,050	0,033	0,028	0,025	0,016	0,019	0,020	0,021	0,026	0,027	0,028
	ε _r [-]	4,15	4,02	3,95	3,88	3,75	3,69	3,69	3,62	3,56	3,49	3,42
9	C _x [pF]	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50
	tg δ [-]	0,052	0,039	0,029	0,024	0,023	0,019	0,020	0,023	0,025	0,026	0,027
	ε _r [-]	3,95	3,88	3,82	3,75	3,69	3,62	3,56	3,49	3,42	3,36	3,29
10	C _x [pF]	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53
	tg δ [-]	0,072	0,051	0,035	0,025	0,021	0,019	0,02	0,022	0,025	0,026	0,027
	ε _r [-]	4,15	4,08	4,02	3,95	3,88	3,82	3,75	3,69	3,62	3,56	3,49
průměr	C _x [pF]	61,4	60,1	59	58,1	57	56	55,1	54,1	53,2	52,3	51,3
	tg δ [-]	0,057	0,040	0,030	0,025	0,021	0,020	0,020	0,023	0,026	0,027	0,028
	ε _r [-]	4,04	3,96	3,88	3,82	3,75	3,69	3,63	3,56	3,50	3,44	3,38
směr. odch. [-]	ε _r	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09
	tg δ	0,009	0,007	0,003	0,002	0,002	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001
V [%]	ε _r	2,2	2,2	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,7	2,5	2,7	2,8
	tg δ	15,2	17,5	10,2	6,7	9,8	5,1	2,0	4,3	2,3	1,8	2,9

Příloha 2: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření relativní permitivity a ztrátového činitele vzorků z materiálu orange resin

Vzorky tloušťky ~0,67 mm												
č. vzorku	f [kHz]	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	300
1	C_x [pF]	86	85,5	85	84,8	84,2	83,7	83	82,1	81,3	80,5	80,2
	$tg \delta$ [-]	0,015	0,013	0,013	0,013	0,015	0,017	0,019	0,022	0,024	0,026	0,027
	ϵ_r [-]	3,32	3,30	3,28	3,27	3,25	3,23	3,20	3,17	3,13	3,10	3,09
2	C_x [pF]	78,5	78	77,8	77,5	77	76,6	76,1	75,3	74,6	73,9	73,8
	$tg \delta$ [-]	0,014	0,012	0,012	0,013	0,014	0,015	0,017	0,020	0,022	0,023	0,024
	ϵ_r [-]	3,03	3,01	3,00	2,99	2,97	2,95	2,93	2,90	2,88	2,85	2,85
3	C_x [pF]	84,5	84	83,8	83,4	82,7	82,3	81,7	80,8	80	79,2	79
	$tg \delta$ [-]	0,015	0,013	0,013	0,014	0,015	0,016	0,019	0,022	0,024	0,025	0,026
	ϵ_r [-]	3,26	3,24	3,23	3,22	3,19	3,17	3,15	3,12	3,08	3,05	3,05
4	C_x [pF]	79,5	79	78,6	78,3	77,7	77,3	76,8	76	75,3	74,6	74,4
	$tg \delta$ [-]	0,015	0,013	0,013	0,013	0,014	0,015	0,018	0,021	0,023	0,024	0,025
	ϵ_r [-]	3,07	3,05	3,03	3,02	3,00	2,98	2,96	2,93	2,90	2,88	2,87
5	C_x [pF]	86,9	86,1	85,9	85,5	84,8	84,3	83,6	82,7	81,9	81,1	80,8
	$tg \delta$ [-]	0,016	0,014	0,014	0,014	0,015	0,017	0,019	0,023	0,025	0,026	0,027
	ϵ_r [-]	3,35	3,32	3,31	3,30	3,27	3,25	3,22	3,19	3,16	3,13	3,12
6	C_x [pF]	80,3	80	79,5	79,2	78,7	78,2	77,8	77	76,3	75,6	75,4
	$tg \delta$ [-]	0,014	0,012	0,013	0,013	0,014	0,015	0,017	0,021	0,022	0,024	0,025
	ϵ_r [-]	3,10	3,08	3,07	3,05	3,03	3,02	3,00	2,97	2,94	2,91	2,91
7	C_x [pF]	85,7	85	84,6	84,2	83,6	83,1	82,5	81,7	80,9	80,1	79,9
	$tg \delta$ [-]	0,016	0,013	0,013	0,014	0,015	0,016	0,019	0,022	0,024	0,025	0,026
	ϵ_r [-]	3,30	3,28	3,26	3,25	3,22	3,20	3,18	3,15	3,12	3,09	3,08
8	C_x [pF]	81,8	81	80,8	80,4	79,8	79,4	78,9	78	77,4	76,6	76,4
	$tg \delta$ [-]	0,015	0,013	0,013	0,013	0,014	0,016	0,018	0,021	0,023	0,024	0,025
	ϵ_r [-]	3,15	3,12	3,12	3,10	3,08	3,06	3,04	3,01	2,98	2,95	2,95
9	C_x [pF]	86,3	85,8	85,6	85,2	84,7	84,2	83,6	82,8	82	81,2	81
	$tg \delta$ [-]	0,015	0,013	0,013	0,014	0,015	0,016	0,019	0,022	0,024	0,025	0,026
	ϵ_r [-]	3,33	3,31	3,30	3,29	3,27	3,25	3,22	3,19	3,16	3,13	3,12
10	C_x [pF]	80,3	79,8	79,3	78,9	78,4	77,9	77,5	76,6	76	75,2	75
	$tg \delta$ [-]	0,015	0,013	0,013	0,013	0,014	0,016	0,018	0,021	0,023	0,024	0,025
	ϵ_r [-]	3,10	3,08	3,06	3,04	3,02	3,00	2,99	2,95	2,93	2,90	2,89
průměr	C_x [pF]	82,98	82,42	82,09	81,74	81,16	80,7	80,15	79,3	78,57	77,8	77,59
	$tg \delta$ [-]	0,015	0,013	0,013	0,013	0,015	0,016	0,018	0,022	0,023	0,025	0,026
	ϵ_r [-]	3,20	3,18	3,17	3,15	3,13	3,11	3,09	3,06	3,03	3,00	2,99
směr. odch. [-]	ϵ_r	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10
	$tg \delta$	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
V [%]	ϵ_r	3,7	3,6	3,7	3,7	3,7	3,6	3,6	3,6	3,5	3,5	3,5
	$tg \delta$	4,2	4,2	3,4	3,7	3,4	4,4	4,3	3,7	3,9	3,7	3,6

Vzorky tloušťky ~1,17 mm												
č. vzorku	f [kHz]	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	300
1	C _x [pF]	48	47,5	47,3	47,1	46,8	46,5	46,2	45,7	45,3	44,9	44,8
	tg δ [-]	0,017	0,014	0,014	0,014	0,015	0,016	0,018	0,021	0,023	0,024	0,025
	ε _r [-]	3,23	3,20	3,18	3,17	3,15	3,13	3,11	3,07	3,05	3,02	3,01
2	C _x [pF]	48,8	48,3	48,1	47,9	47,6	47,3	47	46,5	46,1	45,7	45,6
	tg δ [-]	0,018	0,014	0,015	0,015	0,015	0,016	0,018	0,022	0,024	0,024	0,025
	ε _r [-]	3,28	3,25	3,24	3,22	3,20	3,18	3,16	3,13	3,10	3,07	3,07
3	C _x [pF]	45	44,6	44,3	44,2	44	43,7	43,5	43,1	42,7	42,4	42,3
	tg δ [-]	0,018	0,014	0,014	0,014	0,014	0,015	0,017	0,020	0,022	0,022	0,023
	ε _r [-]	3,03	3,00	2,98	2,97	2,96	2,94	2,93	2,90	2,87	2,85	2,85
4	C _x [pF]	50,8	50,3	50,1	49,8	49,5	49,2	48,8	48,3	47,8	47,4	47,2
	tg δ [-]	0,019	0,014	0,015	0,015	0,015	0,017	0,019	0,022	0,025	0,025	0,026
	ε _r [-]	3,42	3,38	3,37	3,35	3,33	3,31	3,28	3,25	3,22	3,19	3,18
5	C _x [pF]	52,7	52,3	52	51,6	51,2	50,9	50,6	50	49,5	49	48,9
	tg δ [-]	0,018	0,014	0,015	0,015	0,016	0,017	0,019	0,022	0,025	0,026	0,027
	ε _r [-]	3,55	3,52	3,50	3,47	3,44	3,42	3,40	3,36	3,33	3,30	3,29
6	C _x [pF]	49,1	48,7	48,4	48,2	47,8	47,6	47,3	46,8	46,3	45,9	45,8
	tg δ [-]	0,018	0,014	0,015	0,015	0,015	0,016	0,018	0,022	0,024	0,024	0,025
	ε _r [-]	3,30	3,28	3,26	3,24	3,22	3,20	3,18	3,15	3,11	3,09	3,08
7	C _x [pF]	52	51,6	51,3	51	50,6	50,2	49,9	49,3	48,8	48,4	48,2
	tg δ [-]	0,020	0,015	0,015	0,015	0,016	0,017	0,019	0,023	0,026	0,026	0,027
	ε _r [-]	3,50	3,47	3,45	3,43	3,40	3,38	3,36	3,32	3,28	3,26	3,24
8	C _x [pF]	53,7	53,2	52,8	52,6	52,2	51,8	51,4	50,8	50,3	49,8	49,7
	tg δ [-]	0,018	0,015	0,016	0,016	0,016	0,018	0,020	0,023	0,026	0,026	0,027
	ε _r [-]	3,613	3,579	3,552	3,539	3,512	3,485	3,458	3,417	3,384	3,350	3,343
9	C _x [pF]	49,7	49,3	49	48,7	48,3	48	47,6	47,1	46,6	46,2	46,1
	tg δ [-]	0,020	0,015	0,016	0,016	0,016	0,017	0,019	0,022	0,025	0,025	0,026
	ε _r [-]	3,34	3,32	3,30	3,28	3,25	3,23	3,20	3,17	3,13	3,11	3,10
10	C _x [pF]	52,2	51,8	51,4	51,1	50,7	50,3	50	49,4	48,9	48,4	48,3
	tg δ [-]	0,020	0,016	0,016	0,016	0,016	0,017	0,019	0,023	0,026	0,026	0,027
	ε _r [-]	3,51	3,48	3,46	3,44	3,41	3,38	3,36	3,32	3,29	3,26	3,25
průměr	C _x [pF]	50,2	49,76	49,47	49,22	48,87	48,55	48,23	47,7	47,23	46,81	46,69
	tg δ [-]	0,019	0,015	0,015	0,015	0,015	0,017	0,019	0,022	0,025	0,025	0,026
	ε _r [-]	3,38	3,35	3,33	3,31	3,29	3,27	3,24	3,21	3,18	3,15	3,14
směr. odch. [-]	ε _r	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14
	tg δ	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
V [%]	ε _r	4,9	5,0	4,9	4,8	4,8	4,7	4,7	4,6	4,6	4,5	4,5
	tg δ	5,5	4,6	4,6	4,6	4,3	4,8	4,3	4,1	5,2	5,0	4,8

Vzorky tloušťky ~1,67 mm												
č. vzorku	f [kHz]	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	300
1	C_x [pF]	22,1	21,8	21,8	21,7	21,6	21,5	21,4	21,3	21,2	21,1	21,1
	$tg \delta$ [-]	0,022	0,017	0,016	0,015	0,014	0,013	0,014	0,015	0,017	0,016	0,016
	ϵ_r [-]	2,12	2,09	2,09	2,08	2,07	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,02
2	C_x [pF]	24	23,8	23,7	23,7	23,6	23,5	23,4	23,2	23,1	23	23
	$tg \delta$ [-]	0,021	0,016	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	0,016	0,018	0,017	0,017
	ϵ_r [-]	2,30	2,28	2,27	2,27	2,26	2,25	2,24	2,23	2,22	2,21	2,21
3	C_x [pF]	24,3	24,1	24,1	24	23,9	23,8	23,7	23,6	23,4	23,3	23,3
	$tg \delta$ [-]	0,021	0,016	0,015	0,015	0,014	0,014	0,014	0,016	0,018	0,017	0,018
	ϵ_r [-]	2,33	2,31	2,31	2,30	2,29	2,28	2,27	2,26	2,24	2,24	2,24
4	C_x [pF]	23,3	23,1	23,1	23	22,9	22,8	22,7	22,5	22,4	22,3	22,3
	$tg \delta$ [-]	0,025	0,018	0,017	0,015	0,014	0,014	0,014	0,016	0,017	0,017	0,017
	ϵ_r [-]	2,24	2,22	2,22	2,21	2,20	2,19	2,18	2,16	2,15	2,14	2,14
5	C_x [pF]	31,7	31,3	31,2	31	30,8	30,6	30,4	30,2	29,9	29,7	29,6
	$tg \delta$ [-]	0,020	0,018	0,017	0,015	0,015	0,016	0,017	0,020	0,022	0,022	0,022
	ϵ_r [-]	3,04	3,00	2,99	2,97	2,95	2,94	2,92	2,90	2,87	2,85	2,84
6	C_x [pF]	30,5	30,3	30,1	29,9	29,8	29,6	29,4	29,2	29	28,8	28,7
	$tg \delta$ [-]	0,021	0,017	0,016	0,016	0,015	0,016	0,017	0,019	0,021	0,021	0,022
	ϵ_r [-]	2,93	2,91	2,89	2,87	2,86	2,84	2,82	2,80	2,78	2,76	2,75
7	C_x [pF]	25,3	25	24,9	24,8	24,6	24,5	24,4	24,2	24,1	24	24
	$tg \delta$ [-]	0,022	0,019	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	0,016	0,018	0,018	0,018
	ϵ_r [-]	2,43	2,40	2,39	2,38	2,36	2,35	2,34	2,32	2,31	2,30	2,30
8	C_x [pF]	26,1	25,9	25,7	25,6	25,4	25,3	25,2	25	24,8	24,7	24,7
	$tg \delta$ [-]	0,022	0,018	0,017	0,015	0,014	0,014	0,015	0,017	0,019	0,018	0,019
	ϵ_r [-]	2,50	2,48	2,47	2,46	2,44	2,43	2,42	2,40	2,38	2,37	2,37
9	C_x [pF]	25,7	25,6	25,5	25,4	25,2	25,1	25	24,9	24,7	24,6	24,6
	$tg \delta$ [-]	0,021	0,019	0,016	0,015	0,014	0,014	0,015	0,017	0,018	0,018	0,019
	ϵ_r [-]	2,47	2,46	2,45	2,44	2,42	2,41	2,40	2,39	2,37	2,36	2,36
10	C_x [pF]	25	24,9	24,8	24,7	24,5	24,4	24,3	24,1	24	23,8	23,8
	$tg \delta$ [-]	0,022	0,018	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	0,017	0,018	0,018	0,018
	ϵ_r [-]	2,40	2,39	2,38	2,37	2,35	2,34	2,33	2,31	2,30	2,28	2,28
průměr	C_x [pF]	25,8	25,58	25,49	25,38	25,23	25,11	24,99	24,82	24,66	24,53	24,51
	$tg \delta$ [-]	0,022	0,018	0,016	0,015	0,014	0,014	0,015	0,017	0,019	0,018	0,019
	ϵ_r [-]	2,48	2,45	2,45	2,43	2,42	2,41	2,40	2,38	2,37	2,35	2,35
směr. odch. [-]	ϵ_r	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24
	$tg \delta$	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002
V [%]	ϵ_r	11,2	11,2	11,0	10,9	10,9	10,8	10,7	10,7	10,6	10,5	10,4
	$tg \delta$	5,8	5,8	3,7	2,0	2,8	6,3	7,9	8,6	8,4	9,8	10,3