

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE**

**Návrh a praktická realizace vysokonapěťové
kondenzátorové průchodky s využitím 3D tisku**

Diplomová práce

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

Jan Půlpán

Praha 2023

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**
Specializace: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a praktická realizace vysokonapěťové kondenzátorové průchodky s využitím 3D tisku

Název diplomové práce anglicky:

Design and Practical Realization of High-Voltage Bushing Condenser with Use of 3D Printing

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s funkcí a reálnou konstrukcí vysokonapěťových průchodek, seznamte se s možnostmi jejich výroby. Dále proveďte rešerši v oblasti vodivých/polovodivých polymerů pro 3D tisk.
2. Vybrané materiály (izolační, vodivé/polovodivé) podrobte zkouškám a charakterizujte jejich elektrické vlastnosti. Charakterizujte také sendvičové struktury z těchto materiálů, vyrobené pomocí multimateriálového 3D tisku.
3. Na základě znalostí o elektrických vlastnostech vybraných materiálů navrhnete reálnou podobu kondenzátorové průchodky. Průchodku vyrobte/nechte vyrobit.
4. Ověřte funkci vyrobené kondenzátorové průchodky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] B. Redwood, F. Schöffler, a B. Garret, The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications, 1st edition. Amsterdam: 3D Hubs, 2017.
[2] A. Küchler, High voltage engineering: fundamentals, technology, applications. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
[3] Z. Liu et al., „Topology optimization and 3D-printing fabrication feasibility of high voltage FGM insulator“, in 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), zář. 2016, s. 1–4. doi: 10.1109/ICHVE.2016.7800864.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **26.01.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **10.01.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové 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 Hradci Králové, dne 10.1. 2023

.....

Jan Půlpán

Poděkování

Můj největší vděk patří mému vedoucímu této práce, Ing. Petru Veselému, Ph.D., za veškerou pomoc při praktickém zpracování, poskytnuté laboratoře a náčiní, a především za jeho trpělivost a podporu. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Radku Procházkovi, Ph.D., za veškerou pomoc při vysokonapěťových testech vyrobených průchodek a konzultace.

Abstrakt

Tato diplomová práce se skládá ze tří hlavních částí, a to z rešerše pojednávající o vysokonapěťových průchodkách a vodivých polymerech pro 3D tisk, teoretické části, ve které se nachází matematický model a simulace, které slouží jako podklad pro praktickou část, a konečně ze samotné praktické části obsahující popis použitých materiálů a přístrojů a výsledky připravených vzorků průchodek. Účelem rešeršní části je seznámit čtenáře se základy problematiky vysokonapěťových průchodek a vodivých polymerů pro 3D tisk, jelikož cílem praktické části je vyrobit vysokonapěťovou průchodku právě s použitím 3D tisku s vodivým filamentem. Vytvořené průchodky byly podrobeny vysokonapěťové zkoušce a výsledky zhodnoceny.

Klíčová slova

3D tisk, FDM, FFF, průchodka, simulace průchodky, vodivý polymer, elektrické vlastnosti

Abstract

This diploma thesis consists of three major parts, namely research on high-voltage bushings and conductive polymers for 3D printing, a theoretical part with a mathematical model and a computer simulation for the purpose of making a base for the practical part and finally the practical part containing the description of used materials and devices and the results of prepared specimens of bushings. The purpose of the research part is to acquaint the reader with the basics of high-voltage bushings and conductive polymers for 3D printing, because the goal of the practical part is to manufacture a high-voltage bushing with the use of 3D printing with a conductive filament. Manufactured bushings were tested with high-voltage and the results of these tests have been discussed.

Keywords

3D printing, FDM, FFF, bushing, bushing simulation, conductive polymer, electrical properties

Obsah

1	Úvod	3
2	Vysokonapěťové průchodky	4
2.1	Typy průchodek	4
2.1.1	Podle konstrukce průchodek	4
2.1.2	Podle typu izolace na každém konci	6
2.1.3	Podle typu izolace v průchodce	7
2.2	Výroba vysokonapěťových kondenzátorových průchodek	8
2.3	Testování a údržba průchodek	9
2.3.1	Typové zkoušky	9
2.3.2	Rutiní zkoušky	10
2.3.3	Přijímací zkoušky	10
2.3.4	Zkoušky po uvedení do provozu	10
2.3.5	Údržba průchodek	12
3	Vodivé polymery pro 3D tisk	13
3.1	Vodivé fotopolymery	13
3.2	Vodivé filamenty	14
4	Matematický model a simulace	18
4.1	Matematický popis	18
4.2	Simulace	20
5	Praktická část	23
5.1	Použité materiály	23
5.1.1	Materiál pro nevodivé vrstvy	23
5.1.2	Materiál pro vodivé vrstvy	26
5.2	Přístroje a programy použité pro přípravu vzorků	27
5.2.1	Vzorky pro měření vlastností materiálů	27
5.2.2	Vzorky průchodek	28
5.3	Testování průchodek	30
5.4	Úpravy designu ze simulace pro reálné průchodky	30
5.5	První sada vzorků	32
5.6	Druhá sada vzorků	33
5.7	Třetí sada vzorků	34
5.8	Čtvrtá sada vzorků	35
5.9	Pátá sada vzorků	36

5.10	Šestá sada vzorků	38
5.11	Další pokusy o vytištění průchodek	40
5.12	Celkové zhodnocení vyrobených průchodek.....	40
6	Závěr	42
7	Seznam použité literatury	44

1 Úvod

Ať už ve vysokonapěťových transformátorech či rozvaděčích, v současnosti jsou průchodky nedílnou součástí elektrotechniky. Existují různé druhy průchodek, z nichž každý má své výhody i nevýhody. Obecně platí, že pro vyšší napětí se pro své výhody používají kondenzátorové průchodky, které jsou však náročné a nákladné na výrobu.

Cílem této práce je navrhnout a realizovat kondenzátorovou průchodku pomocí 3D tisku, což by v praxi mohlo pomoci znatelně zredukovat náklady na výrobu těchto průchodek a umožnilo by výrobu průchodek na speciální přání zákazníků bez potřeby investice do drahých výrobních zařízení.

První část této práce shrnuje teoretické i praktické poznatky o různých typech průchodek, včetně postupů při jejich výrobě a informací o jejich testování. Druhá část se zaměřuje na vodivé polymery pro 3D tisk, a to v kapalně i pevné formě. Nachází se v ní úspěšné experimenty z tohoto odvětví a podrobnosti o různých možných překážkách a omezeních 3D tisku vodivých polymerů. V další části je popsán matematický model použitý pro výpočty rozměrů reálných kondenzátorových průchodek a počítačové simulace modelu průchodky použitého při praktické části této práce. Praktická část poté shrne použité přístroje a materiály a představí 6 generací připravených kondenzátorových průchodek s výsledky jejich vysokonapěťových zkoušek.

2 Vysokonapěťové průchodky

Průchodky jsou zařízení, která umožňují průchod jednoho či více vodičů z jednoho prostředí do jiného a zároveň vodič v místě přechodu izolují od hranice těchto prostředí (zed', nádoba, skříň atd.) [1]. Jejich účelem je přenos elektrické energie z uzavřeného prostoru či do něj přes bariéru danou typem elektrického zařízení, pro který je průchodka navržena. Nejčastěji takovými zařízeními bývají transformátory, jističe, shunt reaktory a výkonové kondenzátory [2]. Průchodky musí mít takovou elektrickou pevnost a homogenizovat rozložení elektrického pole napříč průchodkou do takové míry, aby vydržely testovací i provozní zátěž [3].

2.1 Typy průchodek

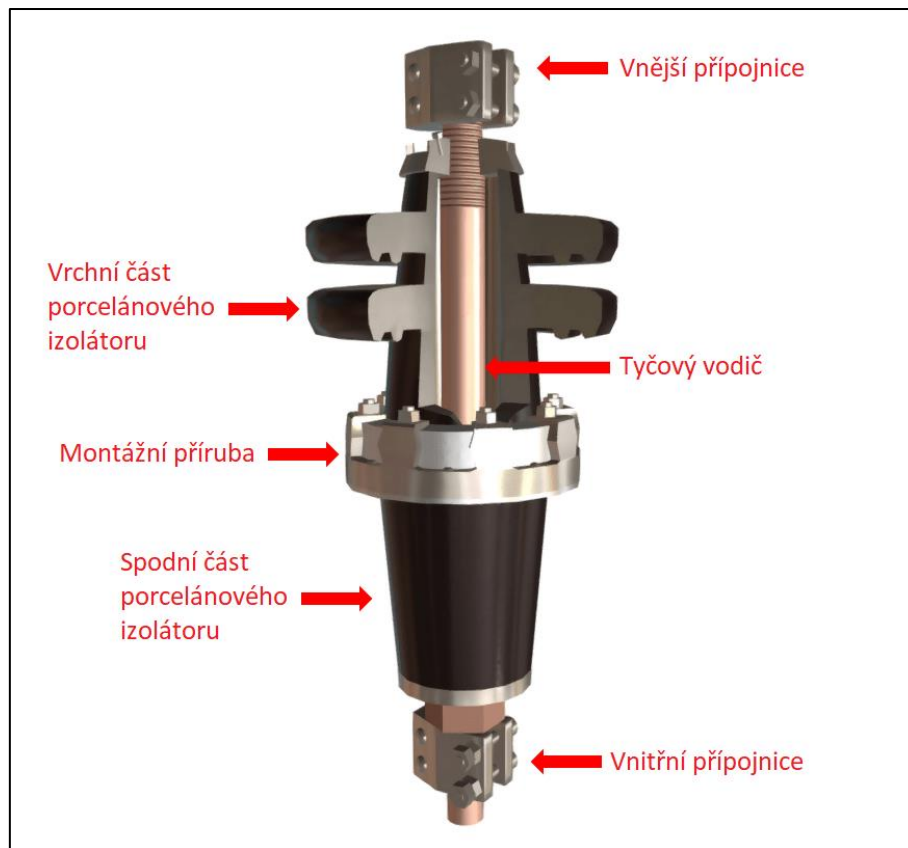
Existuje mnoho způsobů, jak roztřídit jednotlivé typy průchodek. Většinou se však třídí podle jejich praktického využití, typicky do třech hlavních skupin [2].

2.1.1 Podle konstrukce průchodek

Podle jejich konstrukce se průchodky dají rozdělit na klasické průchodky a kondenzátorové průchodky [2], [3].

2.1.1.1 Klasické průchodky

Klasické průchodky jsou většinou porcelánové či epoxidové a používají se především v zařízeních s napětím do 25 kV. Taková zařízení jsou například malé distribučních transformátory nebo přepínače obvodů [2]. Většinou mívají vestavěný centrální vodič z mědi nebo hliníku, který od porcelánové či epoxidové izolační vrstvy může být oddělen vzduchovou vrstvou plněnou minerálním izolačním olejem. Typickým prvkem těchto průchodek jsou kruhové „stříšky“ po jejich vnějším obvodu. Slouží jednak k prodloužení cesty klouzavých výbojů a zároveň pro udržení některých částí průchodky suchých při dešti. Díky tomu nedochází ke snížení odporu na cestě svodového proudu, což zabraňuje zkratu s uzemněnou nádobou, kterou průchodka prochází [3], [4]. Klasickou průchodku s popisem stavby můžete vidět na obrázku 5.

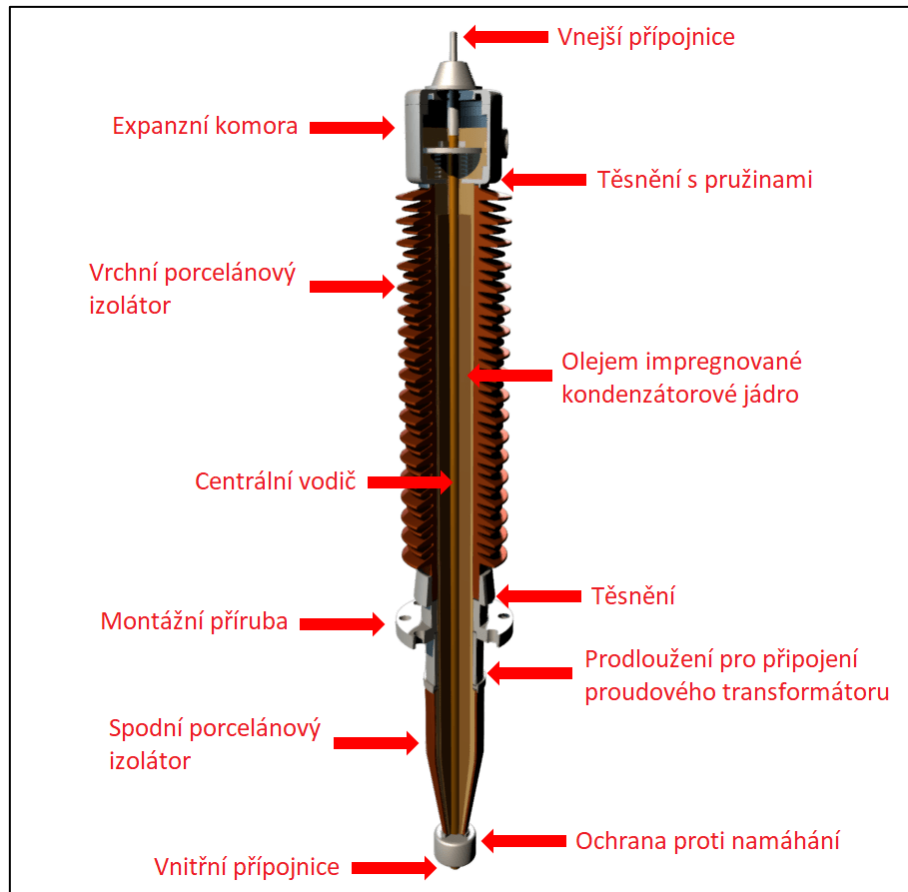


Obrázek 1: Stavba klasické průchodky [4]

2.1.1.2 Kondenzátorové průchodky

Kondenzátorové průchodky se používají u systému s vyšším napětím. Mají mnohem komplexnější konstrukci než klasické průchodky. Pro vypořádání se s velkým namáháním elektrického pole, které je generováno vysokým napětím, mají kondenzátorové průchodky tělo uspořádané z vnitřního izolovaného jádra tvořeného vrstvami, které představují kondenzátory. Toto jádro je ohraničeno zevnitř centrálním vodičem a zvenku vnějším izolátorem. Kondenzátorové jádro se skládá z koaxiálních vrstev impregnovaného papíru a vodivých folií s různými délkami. Tyto folie jsou od sebe vzdáleny stejně daleko, což napomáhá s distribucí a stabilizací elektrického pole napříč izolací průchodky. Pro impregnaci vrstev z papíru se používá minerální olej nebo epoxidová pryskyřice pro zvýšení elektrické pevnosti průchodky. Jako materiál pro vnější izolátor se používá porcelán u průchodek s olejem impregnovaným papírem nebo silikon u průchodek s epoxidem impregnovaným papírem. Průchodky s olejem impregnovaným papírem navíc obsahují i expanzní komoru na vypořádání se s roztahováním

(stahováním) oleje kvůli změně teplot [3]–[5]. Stavba kondenzátorové průchodky s olejovou izolací se nachází na obrázku 6.



Obrázek 2: Stavba kondenzátorové průchodky s olejovou impregnací [4]

2.1.2 Podle typu izolace na každém konci

Podle typu izolace na každém konci můžeme průchodky dělit na tyto typy [2].

1. Olej-vzduch
2. Vzduch-vzduch
3. Vzduch-SF6
4. Olej-SF6
5. Olej-olej

2.1.3 Podle typu izolace v průchodce

Obecně mohou uvedené materiály být použity jak v klasických průchodkách, tak v kondenzátorových průchodkách. Často se používají i v kombinaci [2].

2.1.3.1 Vzduch

Průchodky se vzduchovou izolací se většinou používají u zařízení se vzduchovou izolací. Mají pevnou konstrukci a vzduch v nich mívá atmosférický tlak [2].

2.1.3.2 Olej

Olejem izolované nebo plněné průchodky mají minerální olej mezi vodičem a izolací v pevné konstrukci. Olej může být buď v průchodce a zařízení odděleně nebo mohou mít spojený prostor pro olej. V kondenzátorových průchodkách bývá minerální olej umístěn v prostoru mezi vnější izolací a vnitřním materiálem z důvodu impregnace papírových listů uvnitř průchodky a lepšího odvodu tepla [2].

2.1.3.3 Olejem impregnovaný papír

Průchodky s papírem impregnovaným olejem využívají výhod spojení minerálního oleje a papíru k vytvoření kompozitního materiálu s velmi dobrými vlastnostmi. Pro svou jednoduhost a výhodnost se tato kombinace používá již asi 50 let [2].

2.1.3.4 Resinem pokrytý/impregnovaný papír

Průchodky s papírem impregnovaným resinem mají velmi dobré elektrické vlastnosti srovnatelné s průchodkami s papírem impregnovaným olejem [2].

2.1.3.5 Odlitá izolace

Průchodky s odlitou izolací jsou tvořeny odlitím materiálu, který může obsahovat anorganické plnivo. Tyto průchodky mohou být jak klasické, tak kondenzátorové [2].

2.1.3.6 Plyn

Plymem izolované průchodky používají stlačený plyn, například SF₆, na odizolování centrálního vodiče od příruby. Většinou se tyto průchodky používají v jističích s SF₆ a typicky nejsou kondenzátorové [2].

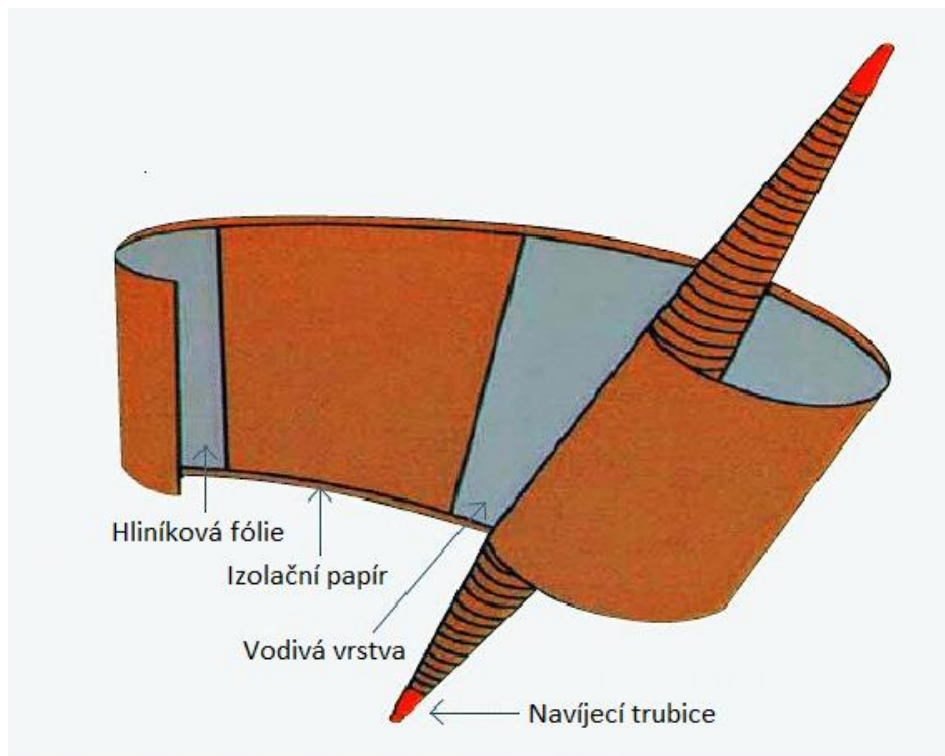
2.2 Výroba vysokonapěťových kondenzátorových průchodek

Při výrobě kondenzátorového jádra se nejprve rozvine kovová folie, zkontroluje se od možných defektů jako děr a je nařezána na požadované rozměry. Pracovník, který má toto na starost musí zajistit čistotu folie a rovnost nařezaných hran [6].

Centrálnímu vodiči průchodky, omotanému listy papíru a kovovými foliemi, se říká jádro průchodky. Výroba jádra probíhá navinováním. Při navinování je důležité udržovat požadovanou stálou teplotu a tlak na navinované vrstvy. Navinuté jádro je následně impregnováno ponořením do vysušeného a odplynovaného minerálního oleje. Alternativně se jádro může impregnovat epoxidovou pryskyřicí, kde jediným rozdílem je typ použitého papíru a kovových folií. Typicky se také jádra impregnovaná resinem před impregnací uzavřou do resinové formy, ve které se vysuší a následně v ní impregnují tekutou epoxidovou pryskyřicí [3], [6]. Na obrázku 3 se nachází ilustrace navíjeného jádra kondenzátorové průchodky.

Dalším krokem při výrobě průchodek je samotná montáž průchodky. Hotová jádra jsou uzavřena do porcelánových nádob a jsou natlakována. To slouží k udržení hermetičnosti a zároveň ke zvýšení mechanické odolnosti. Hermetičnost je velice důležitá, kvůli dlouhodobému udržení oleje v průchodce. Je proto po sestavení průchodky testována ponořením průchodky do vody, kdy pracovníci kontrolují, zda z průchodky nedochází k úniku vzduchu či samotného oleje [6].

Posledním krokem je naplnění vnitřku průchodky vysušeným a odplynovaným minerálním olejem ventilem na vrchu průchodky, což probíhá ve vakuu. Každá hotová průchodka následně musí být testována z hlediska jejích elektrických vlastností a musí být podrobena vizuální kontrole. Správně vyrobená a otestovaná průchodka by měla mít životnost minimálně 30 let [6].



Obrázek 3: Jádro kondenzátorové průchodky při navíjení [7]

2.3 Testování a údržba průchodek

Hotové průchodky musí být před uvedením do provozu podrobeny elektrickým zkouškám. Tyto zkoušky, které se dělí na 3 typy, jsou uvedeny v podkapitolách 2.3.1 - 2.3.3. Dále je třeba průchodky testovat po nějaké době po uvedení do provozu, což je popsáno v podkapitole 2.3.4 [1], [8].

2.3.1 Typové zkoušky

Typovým zkouškám je podrobena několik vybraných průchodek z vyrobené várky pro dokázání toho, že výrobčův design splňuje všechny požadavky zákazníka. U těchto zkoušek typicky bývá zastupitel zákazníka. V následujícím seznamu jsou uvedeny typové zkoušky [1].

1. Zkouška výdržným napětím za vlhka
2. Zkouška atmosférickým impulzním napětím za sucha
3. Zkouška spínacím impulzním napětím za vlhka či za sucha
4. Zkouška tepelné stability

5. Oteplovací zkouška
6. Zkouška krátkodobého oteplení proudem
7. Zkouška výdržným dynamickým proudem
8. Zkouška závěsu na konzolu
9. Zkouška těsnosti

Před a po teplotních a elektrických zkouškách je typicky provedeno měření ztrátového činitele, kapacity a částečných výbojů pro otestování, zda při zkouškách nedošlo k poškození průchodky [1].

2.3.2 Rutinní zkoušky

Rutinním zkouškám je podrobena každá vyrobená průchodka. Tyto zkoušky jsou povinností výrobce [1], [9].

1. Měření ztrátového činitele a kapacity při teplotě okolí
2. Zkouška výdržným napětím za sucha
3. Zkouška atmosférickým impulzním napětím za sucha (pro napětí $U_m > 72,5 \text{ kV}$)
4. Měření četnosti částečných výbojů
5. Testování hermetičnosti
6. Zkouška tlakem u průchodek naplněných či izolovaných kapalinou

2.3.3 Přijímací zkoušky

Přijímacím zkouškám je podrobena několik náhodně zvolených průchodek. Většinou u těchto zkoušek bývá zastupitel zákazníka. Přijímací zkoušky jsou stejné jako rutinní zkoušky [1].

2.3.4 Zkoušky po uvedení do provozu

Starší průchodky nebo průchodky s podezřením na zhoršený stav mohou být testovány na místě jejich instalace nebo v laboratoři vysokého napětí. Největší výhodou testování

v místě instalace je omezení času, kdy je chráněné zařízení mimo provoz, či jeho úplná eliminace při použití online monitorovacích systémů. Naopak jeho největší nevýhodou je omezený počet možných zkoušek, ve většině případů pouze nízkonapěťových [8].

Na místě instalace se dále provádějí pravidelné vizuální inspekce průchodek. Je nutné kontrolovat, zda instalované průchodky nejsou popraskané či zanešené, protože to zvyšuje četnost a intenzitu klouzavých výbojů. Dále je vhodné kontrolovat, zda z průchodky nedochází k úniku oleje a jestli je oleje v průchodce dostatek. Prohlídky termografickou kamerou by se také měly dělat pravidelně, protože se jimi snadno odhalí, jestli na nějakém místě nedochází k přehřívání, což většinou způsobují uvolněné kontakty vodičů. V neposlední řadě je vhodné pozorovat korónu, která sice na špičce průchodky bývá přirozená, ale když je průchodka znečištěná, tak se koróna po průchodce rozrůstá [10].

Testování v laboratoři dovoluje zkoušky při napětích vyšších než jmenovitých, takže vznikající problémy mohou být odhaleny mnohem snáz než na místě instalace. Laboratoř také obsahuje sofistikovanější výbavu pro zkoušky a nedochází v ní k elektrickému rušení od jiných zařízení, což by mohl být problém v místě instalace. Největšími nevýhodami testování v laboratoři je čas, během kterého je zařízení chráněné testovanou průchodkou odstaveno, a náklady na manipulaci s průchodkou a dopravu do laboratoře. Z těchto důvodů je za běžných okolností většina průchodek testována v místě instalace [8].



Obrázek 4: Vysokonapěťová laboratoř pro testování průchodek [11]

2.3.5 Údržba průchodek

Pokud nejsou průchodky pravidelně čištěny a správně udržovány, může dojít ke zkratu, když se koróna přiblíží k nádobě transformátoru. To může mít za následek zničení průchodky a neplánovanou odstávku chráněného zařízení. Pokud je na průchodce objevena prasklina, je nutné ji zadělat pro předejití průrazu. U větších prasklin je možné zadělání epoxidovou pryskyřicí, u menších se postupy opravy liší. Pokud je na průchodce prasklina skrz vnější izolaci k jádru, měla by se průchodka okamžitě vyměnit za jinou. Někteří výrobci nabízí opravu prasklých průchodek, které nelze opravit na místě instalace. V oblastech s vysokou vlhkostí vzduchu a oblastech, kde často prší, je vhodné porcelánovou izolaci průchodek namazat kvalitním silikonovým voskem, což přiměje vodu k utváření kapiček namísto nepřerušované vrstvy [10].

Běžné čištění průchodek zahrnuje pokrytí porcelánu silikonovým voskem a očištění textilním hadrem. Pokud je znečištění příliš velké, může být zapotřebí použití rozpouštědel, drátěnek a kartáčů. K odstranění soli a jiných usazenin rozpustných ve vodě je možné použít vysokotlakou pumpu na vodu. Tryskání suchým proudem vápencového prášku pomůže odstranit oxidy kovů, chemikálie a téměř jakoukoliv pevnou usazeninu. Pro odstranění měkkých usazenin, jako vytvořeného mazu, se může použít abrazivní tryskání kukuřičným granulátem [10].

3 Vodivé polymery pro 3D tisk

S rozšiřováním 3D tisku se začaly zvyšovat požadavky na vytisknutelné objekty. Ty lze ovlivnit nejen zvoleným typem 3D tiskárny a jejích komponent, ale také zvoleným materiálem. Vzhledem k jednoduchosti a relativně nízkým nákladům na provoz 3D tiskáren tak netrvalo dlouho, aby vznikly tiskárny tisknouce z kovů, jako jsou například technologie DMLS a SLM. Jelikož jsou tiskárny pracující na těchto technologiích drahé, používají se především v průmyslu.

Protože ale zájem veřejnosti o možnost tisku z vodivého materiálu roste, mnoho výrobců dnes nabízí alternativy v různých podobách v závislosti na používané technologii 3D tisku. Většina domácích 3D tiskáren tiskne z nějaké formy plastu, ať už v podobě fotopolymérů u technologií SLA či DLP, či strunného filamentu u nejrozšířenější technologie FDM. Aby plasty, které jsou obecně dielektrika, mohly vést elektrický proud, musí se plnit nějakým vodivým prvkem. To nejčastěji bývá uhlík, který snižuje rezistivitu [12].

Při výrobě jader kondenzátorových průchodek je zapotřebí dvou materiálů, a to vodivého materiálu sloužícího jako desky kondenzátoru a výplně z dielektrika. Tyto materiály v jádru průchodky tvoří sendvičovou strukturu a chovají se jako sériově zapojené kondenzátory. Pro potenciální výrobu kondenzátorových průchodek pomocí 3D tisku je tedy kromě tradičních nevodivých materiálů zapotřebí také vodivý materiál, který by sloužil jako vodivé vrstvy jádra. Tato kapitola obsahuje některé příklady vyvinutých vodivých polymerů pro nejběžnější technologii 3D tisku.

3.1 Vodivé fotopolymery

Fotopolymery jsou tekuté pryskyřice, které se osvitom UV zářením vytvrdí a zůstanou v pevném stavu. Řadí se do skupiny reaktoplastů a jejich typickými zástupci využívanými pro 3D tisk jsou epoxidové pryskyřice [13], [14].

Typické technologie 3D tisku využívající fotopolymery jako tiskový materiál jsou stereolitografie (SLA), digital light processing (DLP) a continuous liquid interface production (CLIP) [15], [16]. Dále sem patří technologie PolyJet a MultiJet, které se používají především v průmyslu [17].

Vodivé fotopolymery zatím nejsou standardně komerčně rozšířené, ale jejich vývojem se zabývá mnoho vědeckých týmů a univerzit z celého světa. Firma 3Dresyns má v nabídce fotopolymery plněné stříbrem, mědí či uhlíkem. Tyto fotopolymery jsou však velmi drahé (až 605€ za 50 g materiálu), tudíž jsou mířeny spíše na specializované využití než na využití pro veřejnost [18].

Vědecký tým z korejské Yeungnam University vytvořil v roce 2018 materiál na bázi polyakrylátu plněného grafenovými listy a dalšími vodivými polymery, který byl tištěn pomocí technologie DLP a vykazoval konduktivitu až $4 \cdot 10^{-11} S \cdot m^{-1}$, přičemž čistý polyakrylát měl konduktivitu $1 \cdot 10^{-18} S \cdot m^{-1}$ [19].

Jiný tým z čínské Xi'an Jiaotong University a amerického Georgia Institute of Technology zkoumal v roce 2017 možnosti tisku technologií DLP z resinu na bázi akrylu plněného uhlíkovými nanotrubicemi. S pomocí multimateriálového tisku se jim podařilo připravit různé ukázky využití vodivého fotopolymeru, včetně kondenzátorů a rezistorů. Při hmotnostním podílu plniva 0,3 % naměřili vodivost $0,027 S \cdot m^{-1}$ [20].



Obrázek 5: Kondenzátor vytištěný technologií DLP [20]

Další pokusy o přípravu vodivého resinu prováděla skupina italských vědců v roce 2018. Podařilo se jim připravit resin s plnivem z polymeru PEDOT:PSS pro tisk technologií SLA. Po testech pro zjištění optimální koncentrace plniva došli k výslednému materiálu, u kterého naměřili konduktivitu $0,05 S \cdot cm^{-1}$ a Youngův modul pružnosti $21 MPa$ [21].

3.2 Vodivé filamenty

Filamentem neboli 3D tiskovou strunou rozumíme pevný materiál ve formě struny namotané na špulce. Filamenty jsou primárně vyráběny z termoplastů jako PLA (polymlečná

kyselina), ABS (akrylonitrilbutadienstyren), PET-G (polyetylentereftalát-glykol) či PC (polykarbonát), avšak existují speciální filamenty, které plast používají jako základ a jsou plněny různými příměsemi pro úpravu jejich vzhledu či vlastností. Takto upravené můžeme komerčně najít například fluorescentní filamenty, bio filamenty se snadnou biologickou rozložitelností a odbouratelností, vodivé filamenty, magnetické filamenty nebo filamenty připomínající písek či dřevo [16], [22], [23]. Všechny filamenty se však vyrábějí zpravidla ve dvou tloušťkách, a to 1,75 mm nebo 2,85 mm [24].

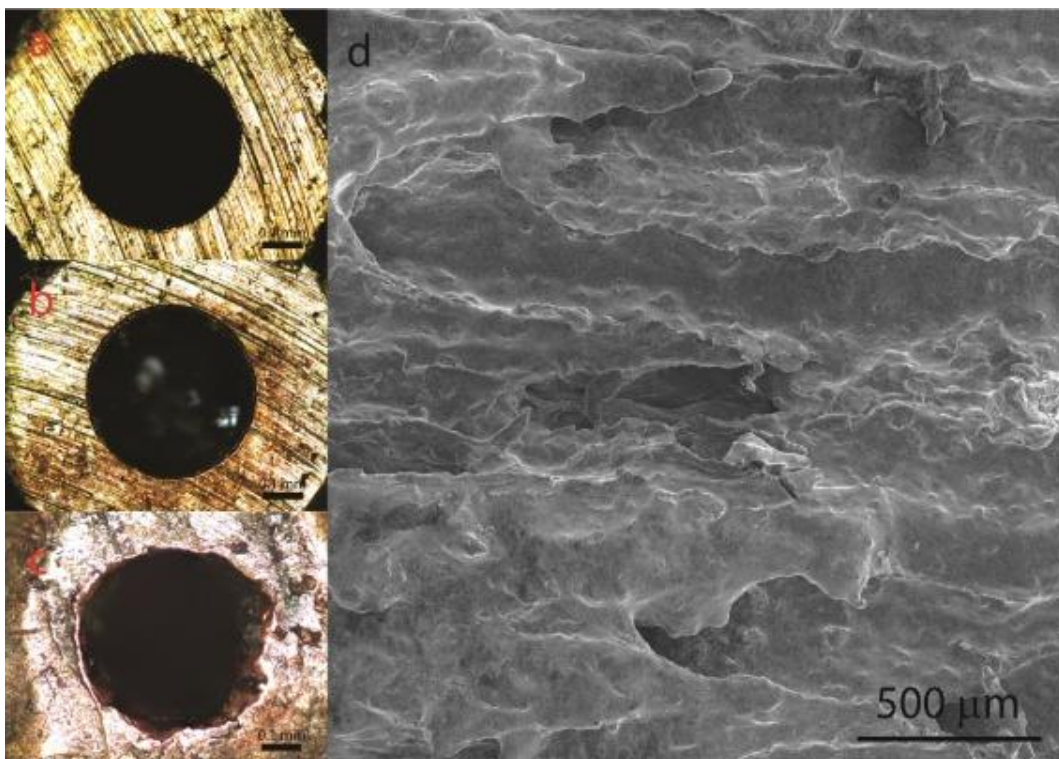
Technologie 3D tisku využívající filamenty je FFF (Fused Filament Fabrication) neboli FDM (Fused Deposition Modeling). Tato technologie je komerčně nejrozšířenější a nejdostupnější, což pravděpodobně vychází z její konstrukční jednoduchosti, snadné obsluhy a nízké ceny v porovnání s ostatními technologiemi [16], [25].

U vodivých polymerů je elektrická vodivost dána perkolačním prahem, který je nutno překročit. K tomu je třeba minimální objem vhodného plniva, aby se z izolační polymerní matrice stal vodivý kompozit [26]. Perkolační práh závisí na faktorech jako tvar a rozložení velikosti částic plniva, přitažlivých interakcích a metodách zpracování [27]–[30].

Při tisku vodivých kompozitních materiálů je nutno zvážit několik faktorů. Hlavním faktorem je ucpávání trysky, který je způsobován seskupováním plniv a má za následky zhoršenou tisknutelnost a drsnost povrchu vytištěných objektů [31]. Z tohoto důvodu musí být dbána zvýšená pozornost již při tvorbě takového materiálu, tedy vhodně zvolit velikost a velikostní rozložení částic plniva. Dále je nutné upravit nastavení samotného tisku jako například teplota extruderu či rychlost tisku. Při výrobě samotného filamentu je třeba zajistit, aby se filament nelámал, což může být problematické, jelikož filamenty s vodivým plnivem bývají velmi křehké [32].

Části vytištěné z vodivých kompozitních materiálů mohou mít proměnlivou elektrickou vodivost v závislosti na směru tisku. Po směru tisku může být elektrická vodivost až několikanásobně vyšší než kolmo k tisku, což může být v závislosti na použití tištěného objektu problém. Pro zajištění konzistentní vodivosti napříč všemi směry tedy může být vhodné plnit polymery vodivými částicemi s mnohem vyšší koncentrací než je potřeba na překročení perkolačního prahu [32].

Nevýhodou tisku vodivých kompozitních materiálů metodou FDM je rychlé opotřebování trysky extruderu. To je dáno vysokým Youngovým modulem karbonových nanotrubic a grafenu, které se používají jako plnivo [33]. Na obrázku 6 (c) je vidět, že tisk vodivých kompozitních materiálů neopotřebovává trysku pouze zevnitř, ale i zvenčí na povrchu. To může být problém, jelikož se opotřebovaná část při tisku dotýká tištěného materiálu a zdrsňuje ho, což obecně může vést ke zhoršení jak estetiky, tak i funkčních vlastností tištěného objektu. Z tohoto důvodu je doporučováno k tisku vodivých materiálů používat trysky z tvrdších materiálů, například ze silikon-karbidu [32].



Obrázek 6: Opotřebení trysky při tisku vodivých kompozitních materiálů [32]:
a – nepoužitá tryska
b – tryska po tisku ~10 cm PBT/grafen
c – tryska po tisku ~1,5 m PBT/karbonové nanotrubic
d – kompozit PBT/grafen vytištěný opotřebovanou tryskou

Dalším materiálem vhodným jako plnivo pro polymery je stříbro. Skupina čínských vědců experimentovala s filamentem ze stříbrem plněného PVB (polyvinylbutyral). Celkem připravili 4 filameny, které se lišili hmotnostním poměrem stříbra od 40 wt% do 55 wt%. U těchto filamentů následně měřili jejich objemové rezistivity. Nejnižší objemovou rezistivitu

měl pochopitelně filament s nejvyšším hmotnostním poměrem stříbra, a to $7 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot cm$.
Připravený materiál následně využili pro 3D tisk obvodů na papírový substrát [34].

4 Matematický model a simulace

V této kapitole jsou uvedeny matematické vzorce a výpočty použité pro sestavení simulačního modelu kondenzátorové průchodky s ohledem na vlastnosti použitých materiálů a mechanická omezení použité 3D tiskárny. Dále se zde nachází popis a výsledky samotných simulací vedoucích k návrhu finálního prototypu průchodky.

4.1 Matematický popis

K výpočtu rozměrů jednotlivých nevodivých vrstev kondenzátorové průchodky byl využit vztah (1) vycházející z předpokladu rovnosti kapacit jednotlivých nevodivých vrstev pro dosažení stejných napětí na jednotlivých nevodivých vrstvách. Pokud by všechny nevodivé vrstvy měly stejnou tloušťku a bylo jich nekonečně mnoho, pak by intenzita elektrického pole byla konstantní po celé šířce průchodky [35]. V praxi toto znamená, že čím více nevodivých vrstev zvládneme do průchodky zakomponovat, tím blíže k homogenosti intenzity elektrického pole se dostaneme.

Mé počáteční podmínky pro výpočty byly: poloměr vodiče $r_0 = 3 \text{ mm}$, tloušťka vodičových vrstev $t_v = 0,3 \text{ mm}$ (minimální tloušťka, jakou je použita 3D tiskárna schopna tisknout při použití nejužší kompatibilní trysky) a tloušťka nevodivých vrstev $t_n = n \cdot t_v$, kde n je přirozené číslo. Poslední podmínkou bylo nepřesáhnout tloušťku celé průchodky (součet všech vodičových a nevodivých vrstev) 1 cm z důvodu omezení při realizaci vysokonapěťových zkoušek.

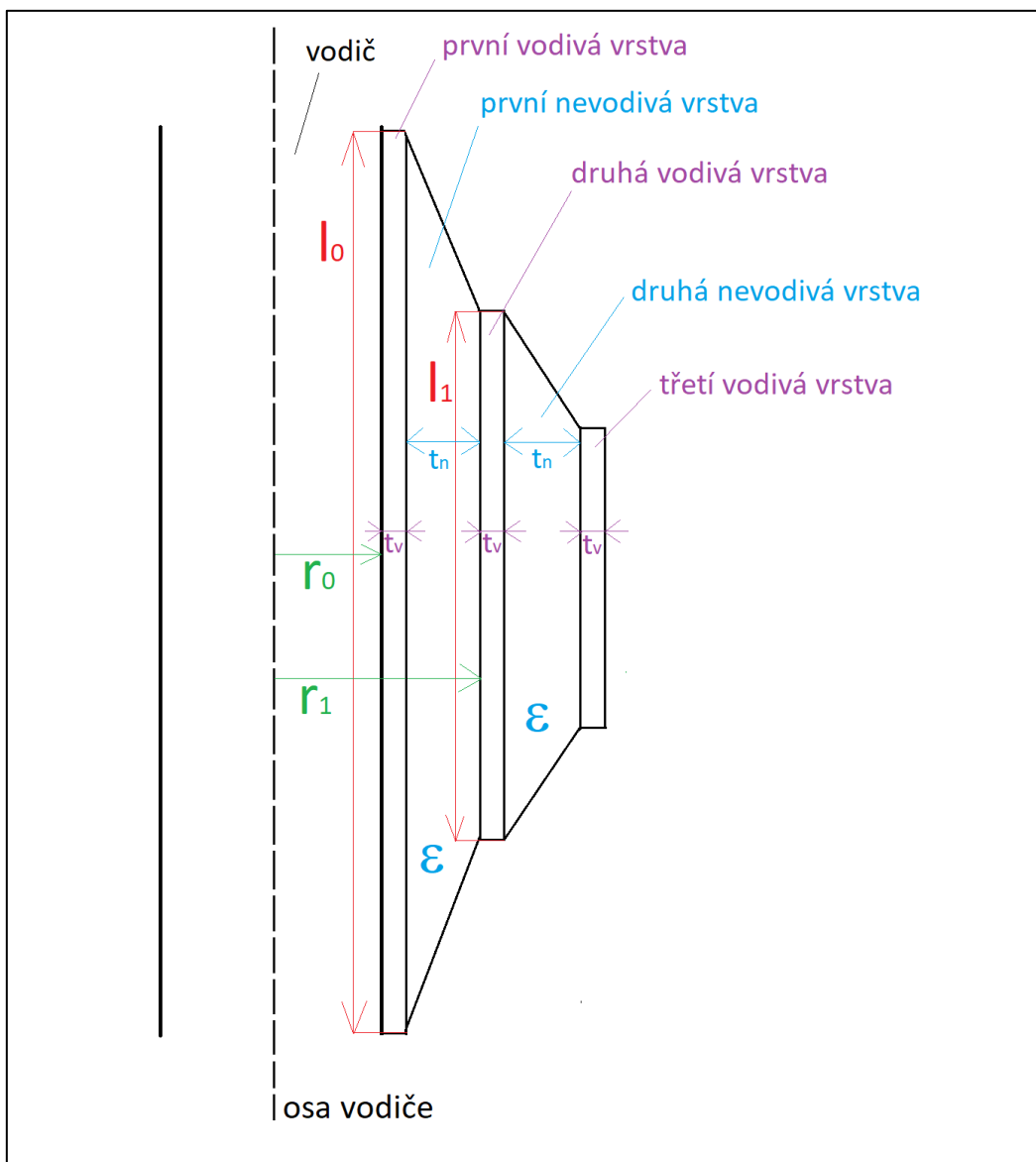
$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{2\pi\epsilon l_0}{\ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)} \\ C_2 &= \frac{2\pi\epsilon l_1}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \\ &\dots \\ C_n &= \frac{2\pi\epsilon l_{n-1}}{\ln\left(\frac{r_{n-1}}{r_n}\right)} \end{aligned} \tag{1}$$

V tomto vztahu značí C kapacity jednotlivých nevodivých vrstev, ϵ permitivitu materiálu nevodivých vrstev (PLA), l nejvyšší délku jednotlivých nevodivých vrstev a r vzdálenost začátků jednotlivých nevodivých vrstev od osy soustavy (střed vodiče).

Pokud uplatníme předpoklad, že se kapacity C_1, C_2, \dots, C_n rovnají, poté lze vztah (1) upravit do podoby vztahu (2), který je pro výpočty rozměrů nevodivých vrstev příznivější [35].

$$\frac{l_0}{\ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)} = \frac{l_1}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} = \dots = \frac{l_n}{\ln\left(\frac{r_n}{r_{n+1}}\right)} \quad (2)$$

Pro názornost jednotlivých veličin použitých ve vztahu (1) a (2) jsem vytvořil obrázek 7, který však neodpovídá reálnému tvaru průchodky a slouží pouze ke snazšímu pochopení jednotlivých rozměrů použitých pro výpočty.

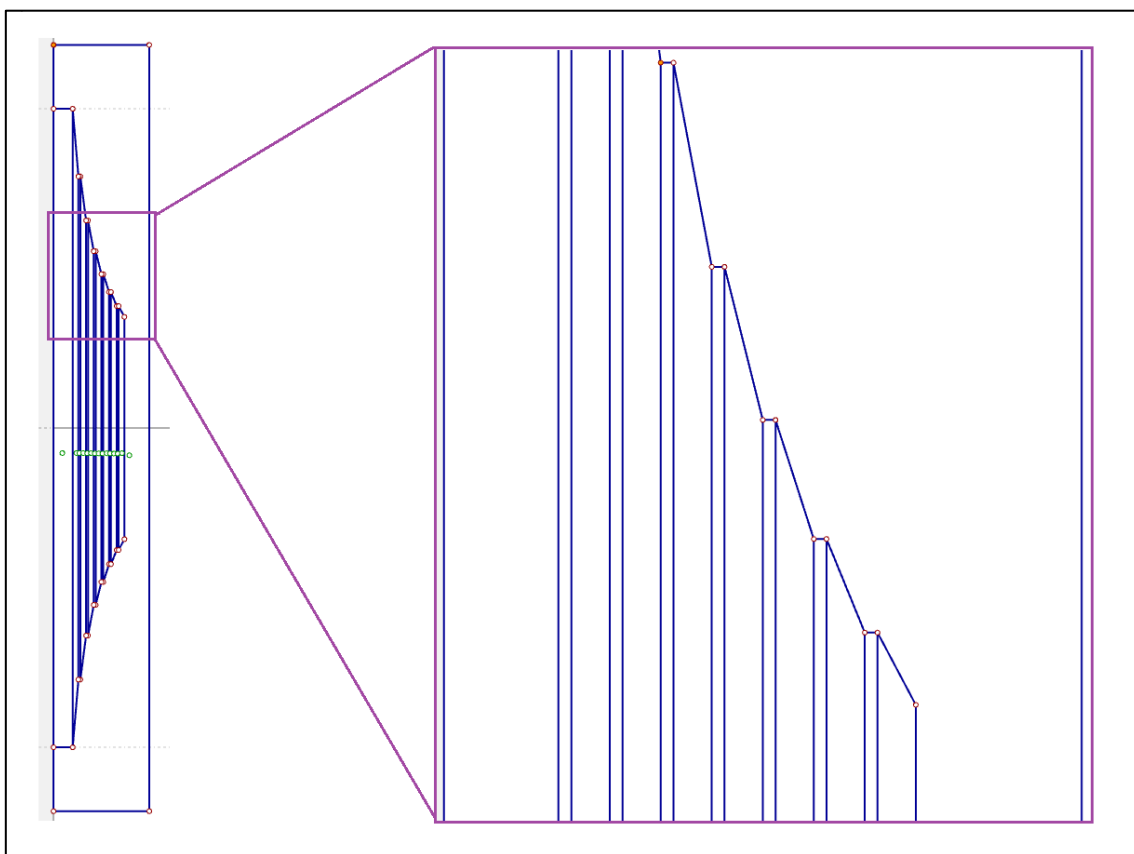


Obrázek 7: Náčrt průřezu průchodky

4.2 Simulace

Pro simulace modelů průchodek byl použit freeware Agros2D (verze 2.0.2.1173), který dokáže simulovat elektrostatická pole osově symetrických soustav. Jednotlivé simulované modely se liší rozměry a počty nevodivých vrstev, které vždy vycházely z tloušťky nevodivých vrstev s ohledem na reálné možnosti použité 3D tiskárny.

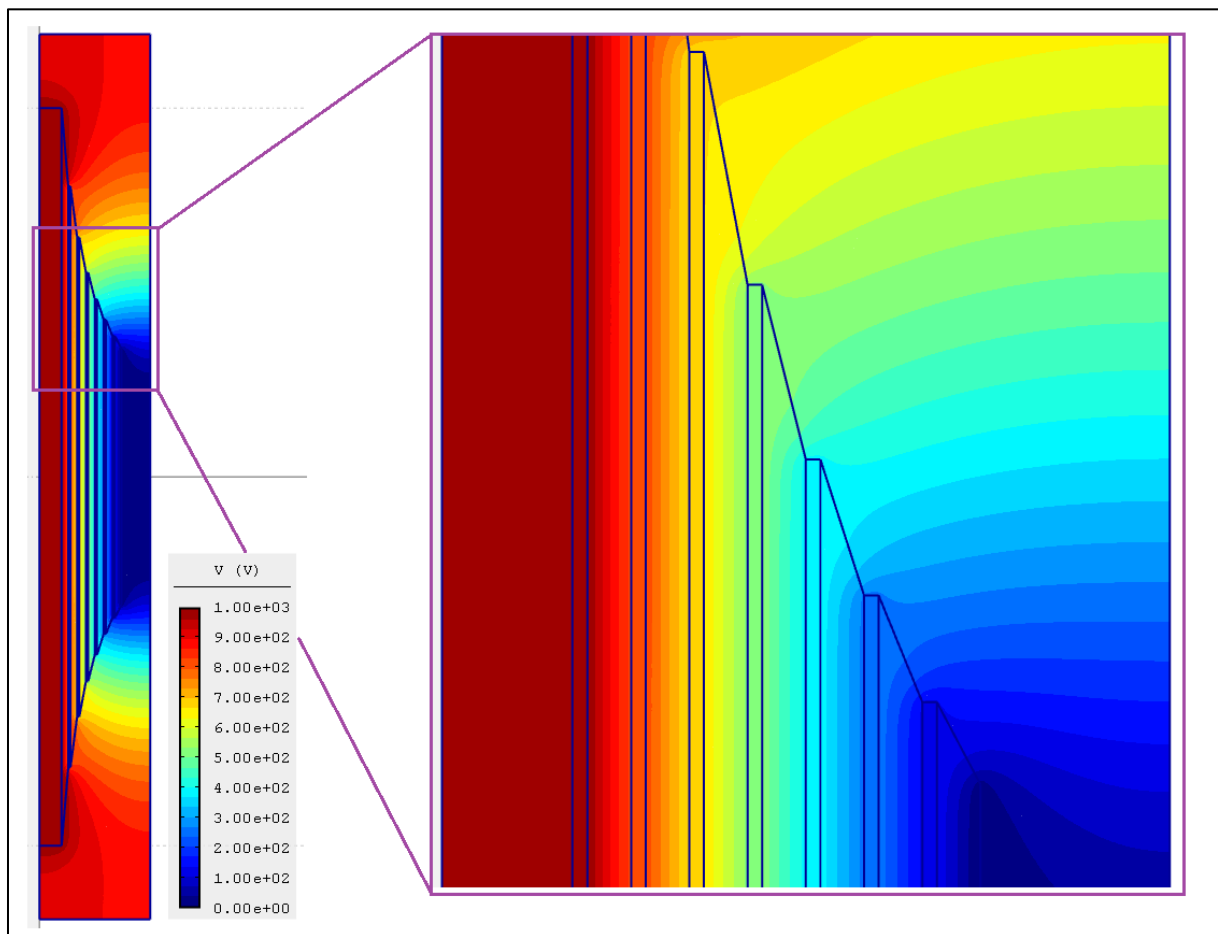
Cílem bylo model optimalizovat tak, aby intenzita elektrického pole po šířce průchodky byla co nejhomogennější a měla co nejnižší maximální hodnotu (na první nevodivé vrstvě) za dodržení podmínek popsanych ve druhém odstavci kapitoly 4.1. Podle těchto podmínek jsem sestavil několik variant modelů, ze kterých měl nejlepší výsledky model s tloušťkou nevodivých vrstev $t_n = 0,9 \text{ mm}$ (trojnásobek tloušťky vodivých vrstev), kterých se do modelu vešlo 7 pro splnění podmínky nepřekročení tloušťky všech vrstev 1 cm vzhledem k omezením testovacího aparátu. Tímto modelem, který je na obrázku 8, se tedy budeme dále zabývat.



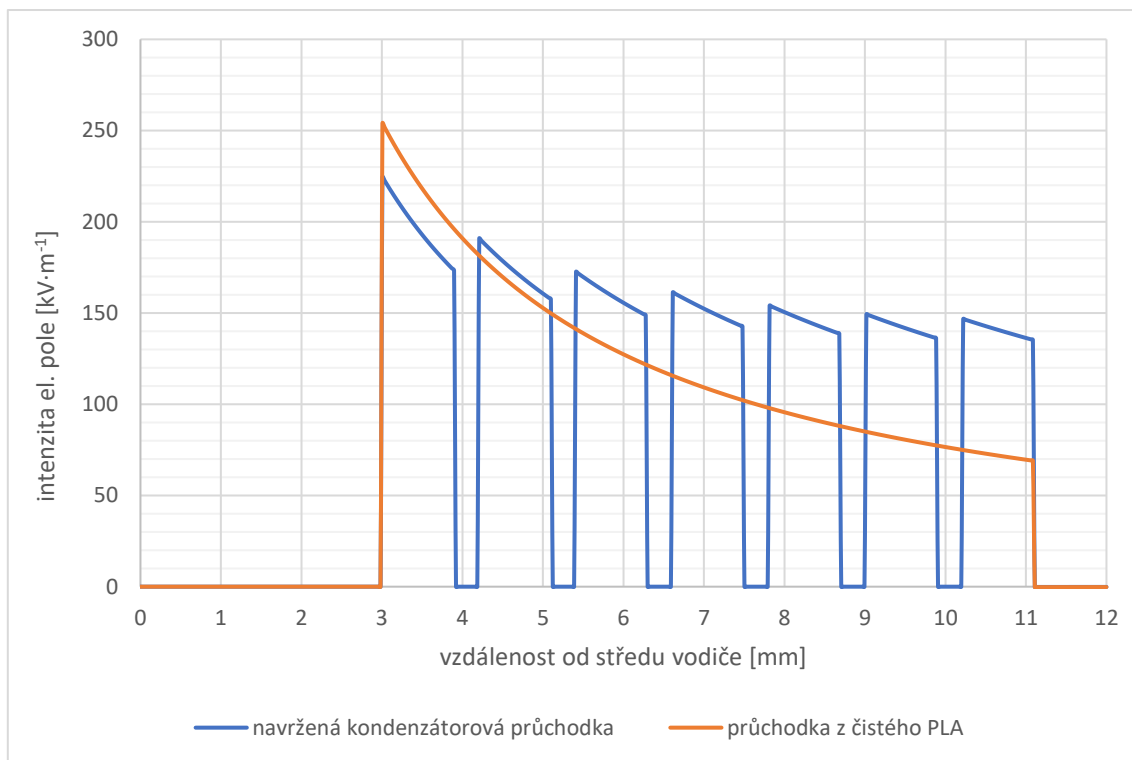
Obrázek 8: Model průchodky v Agros2D s detailem na vrstvy

V detailu na tomto obrázku jsou zřetelně vidět jednotlivé vrstvy průchodky. Nejtlustší vrstva vlevo představuje vodič, zkosené tlustší vrstvy jsou nevodivé a tenké obdélníkové vrstvy jsou vodivé.

Na takto připraveném modelu je provedena simulace elektrostatického pole za předpokladu, že na vodiči je skalární elektrostatický potenciál 1000 V a na konci poslední vrstvy průchodky 0 V . Výsledek simulace je vidět na obrázku 9.



Nejdůležitějším výstupem ze simulace je graf rozložení intenzity elektrického pole napříč průřezem průchodky. Tento graf se nachází na další straně a jeho součástí je i rozložení elektrického pole za předpokladu, že je celá průchodka z čistého PLA pro znázornění vlivu vodivých vrstev na výsledné pole.



Graf 1: Simulace rozložení intenzity elektrického pole v průchodce

Jak ukazuje graf 1, maximální intenzita elektrického pole v kondenzátorové průchodce by teoreticky mohla být o 10 % nižší než v průchodce z čistého PLA. Zároveň by elektrické pole mělo být znatelně homogennější. Tyto dva faktory napovídají tomu, že i praktický experiment by se mohl vydařit.

5 Praktická část

Tato část obsahuje podrobnosti o praktickém provedení této práce. Jsou zde uvedeny informace o použitých 3D tiskárnách, vysokonapěťových testech a jednotlivých typech připravených vzorků průchodek, které budou zhodnoceny z hlediska jejich použitelnosti v praxi a možnostech pro jejich zlepšení.

5.1 Použité materiály

Tato kapitola obsahuje přehled a základní charakteristiky materiálů použitých k praktické realizaci kondenzátorové průchodky. Dále zde budou uvedeny naměřené elektrické vlastnosti těchto materiálů.

5.1.1 Materiál pro nevodivé vrstvy

Základním materiálem zvoleným pro nevodivé vrstvy kondenzátorové průchodky je PLA. PLA neboli polymléčná kyselina (polylactic acid) je plast vyráběný z kukuřičného či bramborového škrobu (případně i z cukrové třtiny), který je biologicky zcela rozložitelný a rozpustný v hydroxidu sodném. Je to jeden z nejuniverzálnějších a nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk metodou FDM [36].

PLA bylo zvoleno především z toho důvodu, že jako materiál pro vodivé vrstvy bylo použito PLA plněné uhlíkem. Při 3D tisku z více filamentů je obecně výhodné používat stejný druh materiálu, neboť se k sobě jednotlivé tištěné vrstvy snáz přilnou a během tisku není dále nutné složitěji upravovat parametry extruze (zejména teplotu) a další nastavení tiskárny.

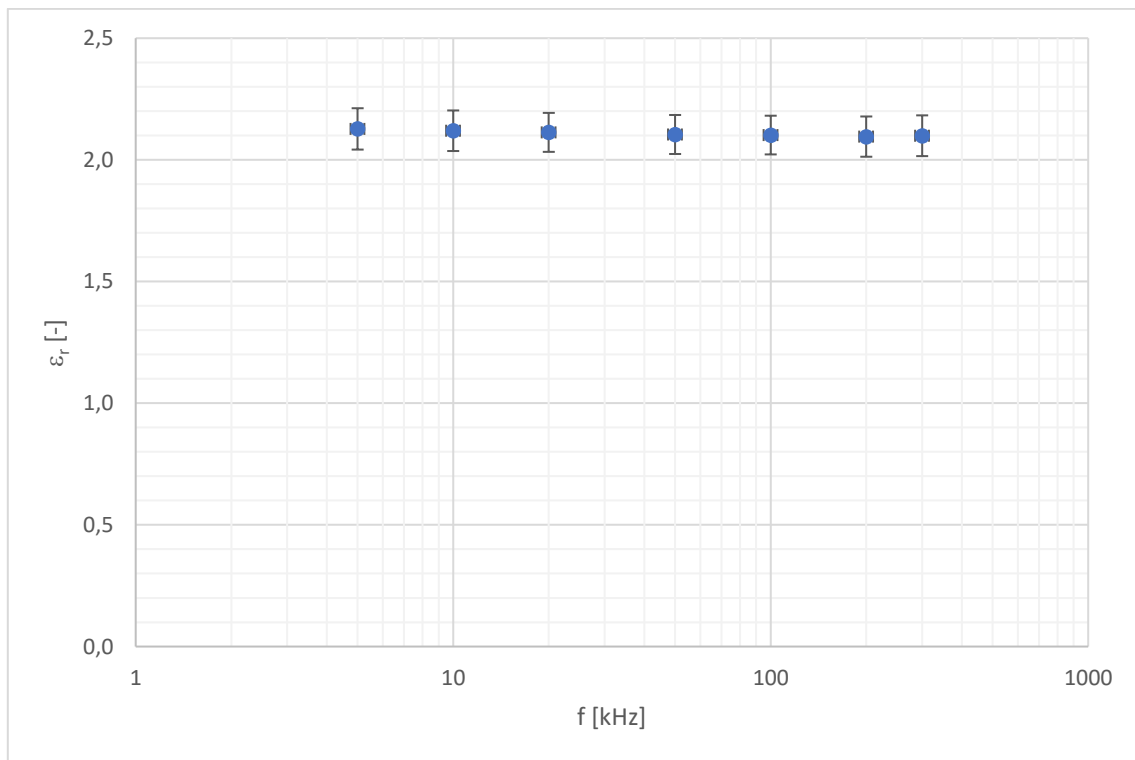
Nejdůležitější vlastnost potřebná ke správnému nastavení simulace je relativní permittivita PLA (ϵ_r). Její frekvenční závislost se nachází na grafu 2 na další straně. Velikost ϵ_r se s rostoucí frekvencí téměř nemění, což je typická vlastnost nepolárních dielektrik. V celé sledované frekvenční oblasti má ϵ_r hodnotu přibližně 2,1.

Pro měření ϵ_r byly použity vzorky ve tvaru disku o průměru 5 cm a tloušťce 0,75 mm. Měření bylo provedeno na přístroji MCP TH2818 při napětí 1 V, kde vzorky byly k přístroji připojovány přes speciální dvouelektrový přípravek. Odečítaná kapacita byla následně

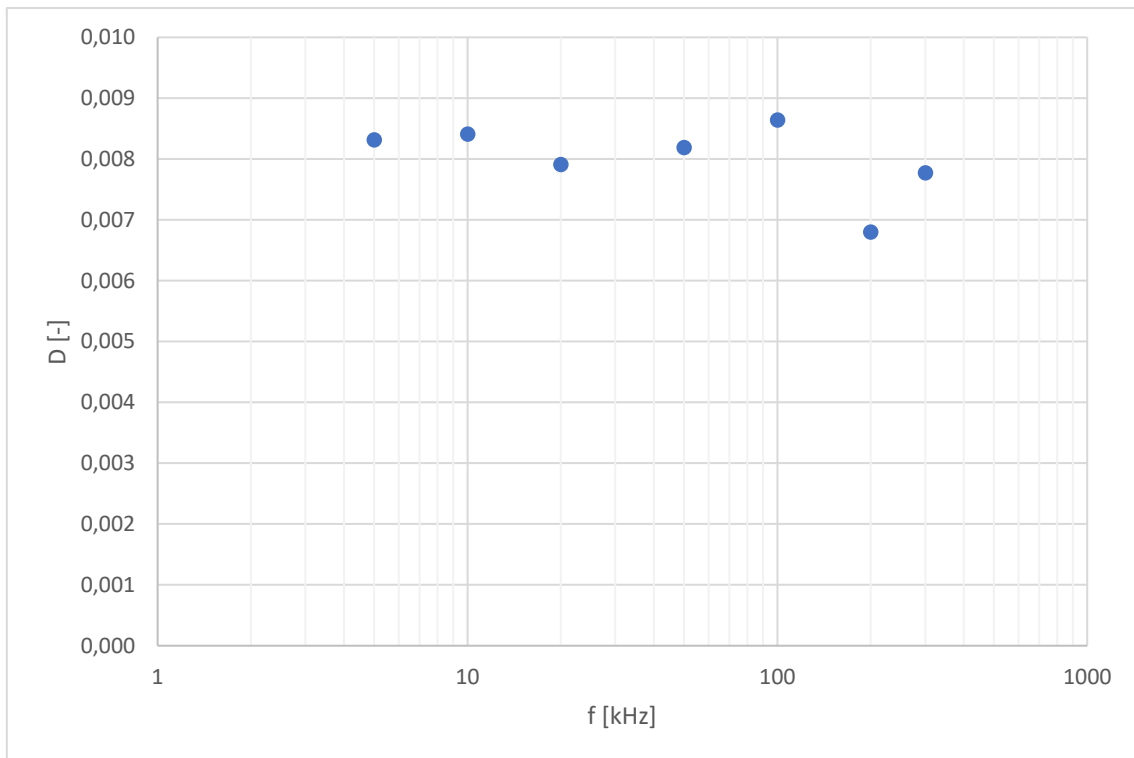
přepočtena na relativní permitivitu pomocí vzorce (3), ve kterém C_x představuje naměřenou kapacitu, h tloušťku vzorku, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ permitivitu vakua a r poloměr vzorku [37].

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

Další měřenou vlastností byl ztrátový činitel D . Měření ztrátového činitele probíhalo zároveň s měřením relativní permitivity (kapacity). Jeho frekvenční závislost se nachází na grafu 3 a jeho průměrná hodnota se pohybuje kolem $8 \cdot 10^{-3}$.

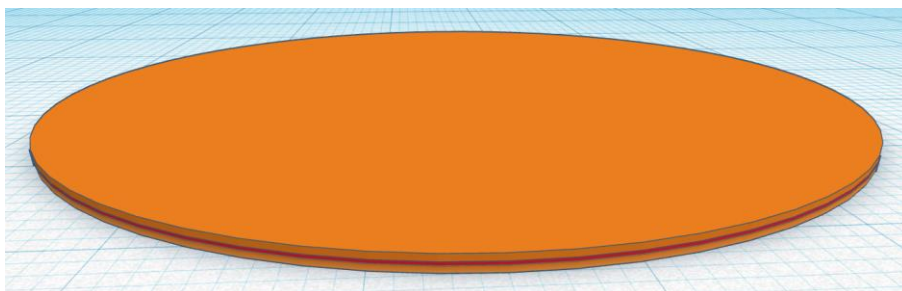


Graf 2: Relativní permitivita PLA

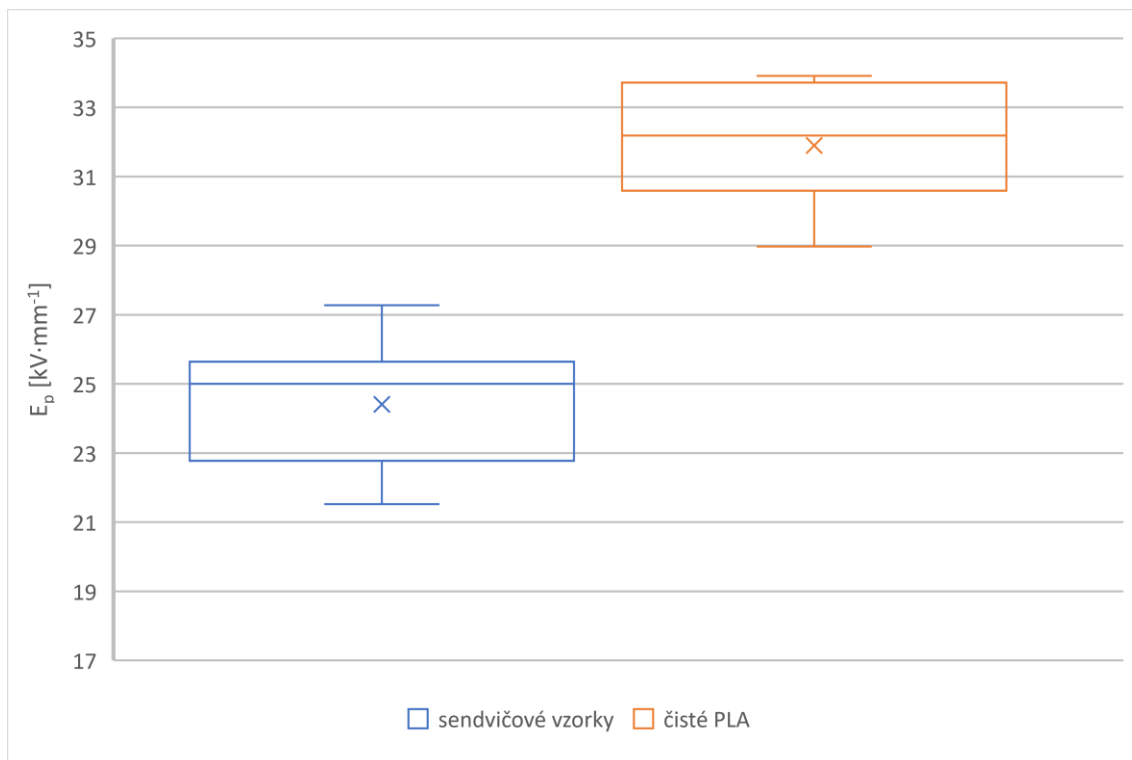


Graf 3: Ztrátový činitel PLA

Poslední měřenou vlastností PLA byla elektrická pevnost E_p . Ta byla měřena pro porovnání se sendvičovými vzorky z PLA a vodivého PLA, kterému se věnuje následující kapitola. Vzorky pro toto měření měly tvar disku o průměru 5 cm a tloušťce 0,75 mm a bylo jich 11 od obou typů. Sendvičové vzorky se skládaly ze 2 vrstev nevodivého PLA tlustých 0,3 mm a jedné vrstvy vodivého PLA tlusté 0,15 mm mezi nimi. Naměřené hodnoty E_p jsou k vidění v grafu 4. Průměrná hodnota E_p čistého PLA je $31,9 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ a sendvičových vzorků $24,4 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$, což je o 23 % méně než u čistého PLA.



Obrázek 10: Sendvičový vzorek v prostředí Tinkercad

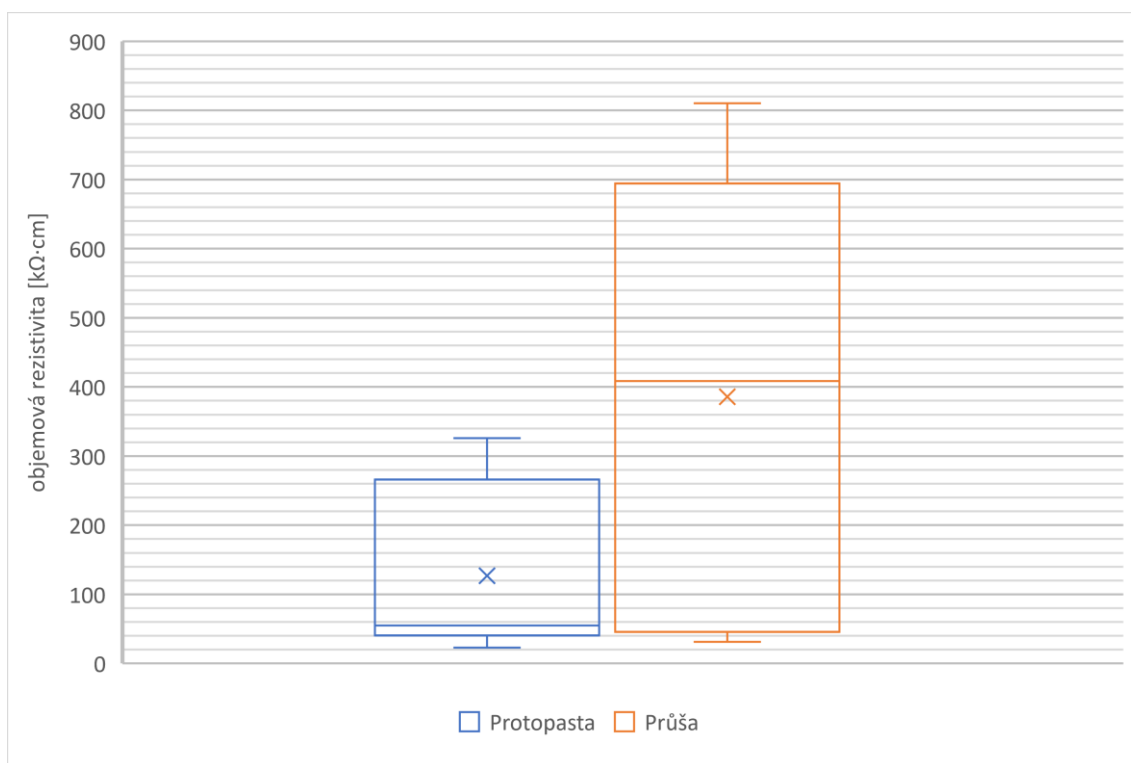


Graf 4: Elektrická pevnost PLA a sendvičových vzorků

5.1.2 Materiál pro vodivé vrstvy

Jako vodivý materiál použitý pro realizaci kondenzátorové průchodky bylo zvoleno PLA plněné uhlíkem od firmy Protopasta. Tento materiál černé barvy charakteristické pro uhlík má dle výrobce objemovou rezistivitu $115 \Omega \cdot cm$, respektive konduktivitu $0,87 S \cdot m^{-1}$ [38]. Jelikož je u vodivých materiálů objemová rezistivita, respektive konduktivita jedna z nejdůležitějších vlastností, ověřili jsme hodnotu od výrobce vlastním měřením. Výsledek tohoto měření se nachází na grafu 5.

Druhým měřeným materiálem je vodivé PLA od firmy Průša Research, který není k dostání na trhu a obdrželi jsme ho jako prototyp. I přes řádově srovnatelnou objemovou rezistivitou s vodivým PLA Protopasta se tento filament při tisku často lámal, a proto nakonec nebyl použit pro výrobu samotných průchodek.



Graf 5: Objemová rezistivita vodivého PLA

Z grafu vyplývá, že námi naměřená průměrná objemová rezistivita PLA Protopasta je o 3 řády vyšší než rezistivita uvedená výrobcem. Ačkoliv je rozsah naměřených hodnot široký, všechny naměřené hodnoty se pohybují v jednotkách $k\Omega \cdot cm$ s průměrnou hodnotou $136 k\Omega \cdot cm$, respektive $0,74 mS \cdot m^{-1}$. I přes to, že konduktivitám kovů se tato hodnota ani zdaleka neblíží, pro účely této práce by měla být dostačující.

5.2 Přístroje a programy použité pro přípravu vzorků

5.2.1 Vzorky pro měření vlastností materiálů

Pro přípravu vzorků pro měření relativní permitivity a elektrické pevnosti (kapitola 5.1.1) byla použita 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S s multimateriálovým nástavcem MMU2S. Tato tiskárna s jedním extruderem byla dostatečně vhodná k tisku sendvičových vzorků z obou typů materiálů, protože se vzorky daly tisknout najednou a měly výšku pouze $0,75 mm$. K přípravě samotných průchodek by nebyla vhodná z důvodů uvedených v kapitole 5.2.2.



Obrázek 11: 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ s MMU2S [39]

5.2.2 Vzorky průchodek

Všechny vzorky mimo první a druhou sadu byly vyrobeny na 3D tiskárně Felix Tec 4.1 s duálním extruderem. Právě tato vlastnost je ideální pro tisk ze dvou materiálů, z nichž jeden je plněn uhlíkem, jelikož se při tisku z uhlíkem plněného materiálu extruder snadno zanášá, a tudíž přítomnost druhého extruderu eliminuje potřebu čištění po každé změně materiálu během tisku. Pro čištění trysky při tisku z více materiálů používají FDM tiskárny s jedním extruderem techniku zvanou čisticí věž. To znamená, že tiskárna kromě chtěných předmětů tiskne ještě tuto věž za účelem vyčištění trysky po každé změně materiálu. Při tisku průchodek by na čisticí věž bylo potřeba mnohem více materiálu než na samotné průchodky, jelikož každá vrstva obsahuje oba druhy materiálů. Na tiskárně se dvěma extrudery je tedy tisk průchodek výhodnější, protože odpadá potřeba tisku čisticí věže a díky tomu se ušetří spousta materiálů.

U kondenzátorových průchodek by bylo ideální, aby vnitřní vodivé vrstvy měly co nejmenší tloušťku tak, aby se jich do vnitřku průchodky vešlo co nejvíce. Při testování tisku na trysce s průměrem $0,25\text{ mm}$, což je nejmenší běžný průměr trysek desktopových FDM

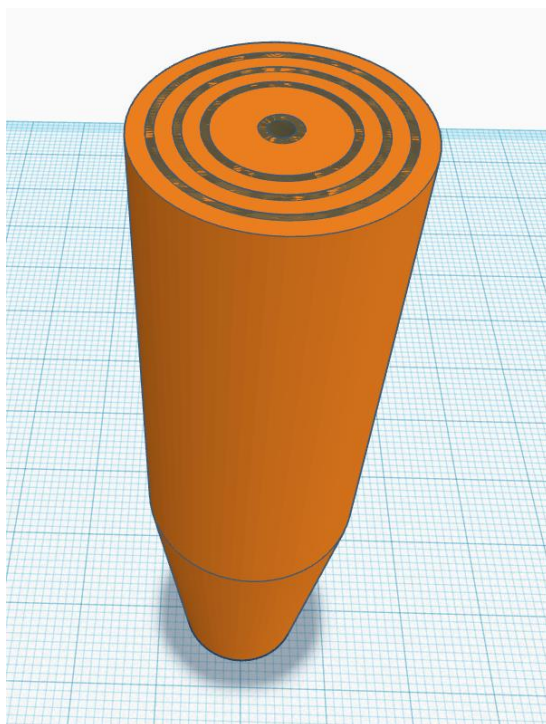
tiskáren, se však ukázalo, že pro tisk uhlíkem plněného materiálu není tato tryska vhodná z důvodu zacpávání uhlíkovými částicemi. Z tohoto důvodu byla nakonec zvolena tryska o průměru 0,4 mm.

3D modely průchodek byly připraveny pomocí webového 3D modelovacího programu Tinkercad firmy Autodesk [40]. Jako slicery na přípravu g-code souborů pro tisk byly použity freeware slicery Repetier-Host a Slic3r [41], [42].



Obrázek 12: 3D tiskárna Felix Tec4.1 [43]

První sada vzorků průchodek byla vytištěna na zakázku firmou 3D Manufaktura s.r.o., kde byla na přípravu vzorků použita 3D tiskárna Raise3D Pro2 s duálním extruderem [44]. Na obrázku 13 se nachází průřez modelem průchodky z této sady v prostředí Tinkercad.



Obrázek 13: Průřez modelem průchodky z první sady v prostředí Tinkercad

5.3 Testování průchodek

Vyrobené prototypy průchodek byly testovány zkouškou vysokým napětím, kdy na jednotlivé průchodky bylo přiváděno a postupně plynule zvyšováno střídavé napětí z generátoru do momentu jejich průrazu. Při tomto měření byly průchodky nasazeny na poměděnou železnou tyčku o průměru $2,5\text{ mm}$, které jejich modely byly přizpůsobeny tak, aby průchodky na tyčce držely. Dále byly průchodky při měření zvenku uprostřed omotány proužkem hliníkové folie, která byla uzemněna.

Pro tuto zkoušku byl pro každý prototyp průchodky vyroben její ekvivalent z čistého PLA (bez polovodivých vrstev). Cílem této zkoušky bylo, aby prototypy reálných průchodek měly vyšší průrazné napětí než jejich ekvivalenty, tedy dokázat pozitivní vliv kondenzátorové struktury na vlastnosti průchodek.

5.4 Úpravy designu ze simulace pro reálné průchodky

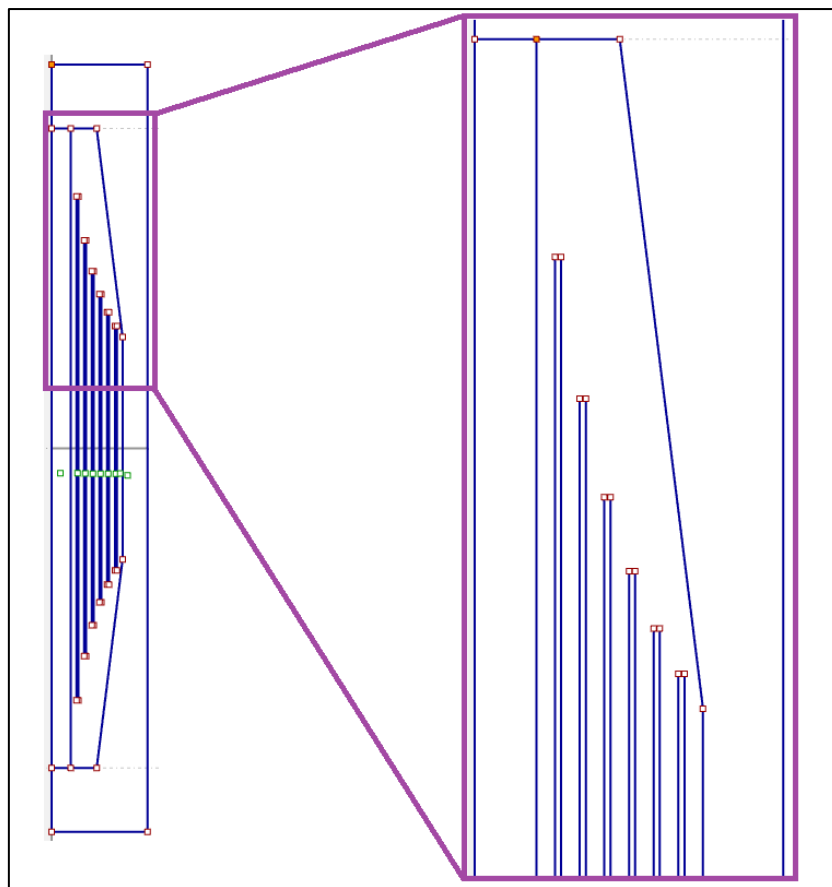
Vzhledem k reálné použitelnosti průchodek v praxi musely být provedeny úpravy v jejich designu. Tyto úpravy byly následně simulovány stejným způsobem jako v kapitole 4.2, aby

byla ověřena jejich teoretická funkčnost, která prošla s pouze nepatrným zhoršením sledovaných vlastností v porovnání s původními simulacemi.

První úprava spočívá v pokrytí celé průchodky nevodivou vrstvou tak, aby při jejím použití nedošlo k nechtěnému zkratování polovodivých vrstev vyvedených na povrch, například vodou. Pro představu můžete ukázkou úpravy vidět na obrázku 14.

Dále bylo nutné změnit tloušťku drátu, na který se průchodky nasazovaly během testů. Dostupný drát měl průměr $2,5\text{ mm}$, ale vzhledem k nepřesnostem použité tiskárny bylo třeba nastavit průměr vnitřní díry průchodky ve 3D modelu na $3,5\text{ mm}$, aby se průchodka na drát vešla, ale nepadala z něj.

V neposlední řadě bylo třeba snížit počet polovodivých vrstev v průchodkách, aby byla snížena celková tloušťka průchodek, a aby se zabránilo nechtěným vedlejším účinkům při tisku více polovodivých vrstev. Tento problém bude popsán v následujících podkapitolách.



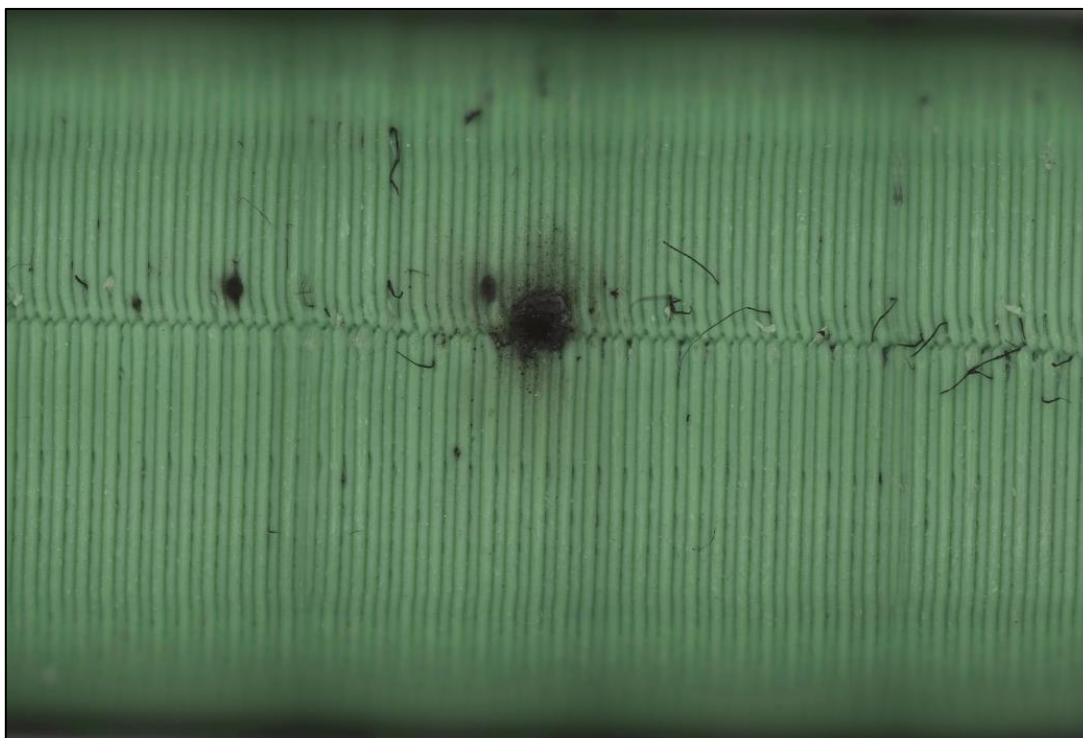
Obrázek 14: Model úpravy pro prototypy průchodek v Agros2D

5.5 První sada vzorků

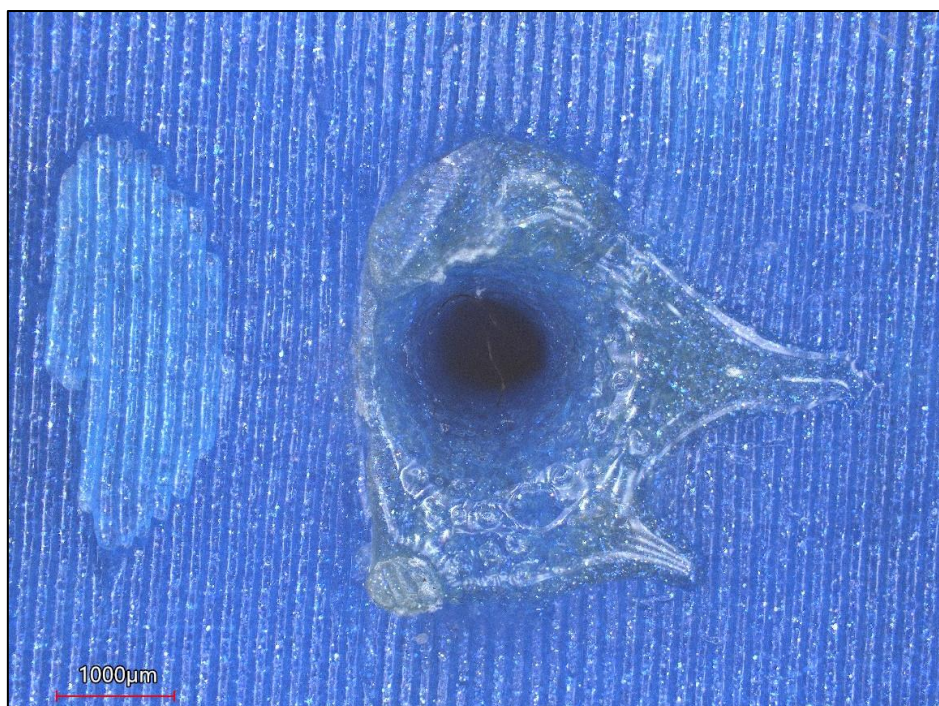
První sada průchodek byla vyrobena na zakázku firmou 3D Manufaktura s.r.o. [44]. Tato sada obsahovala průchodky nejpodobnější původním návrhům vycházejících ze simulací. Průchodky v ní měly 5 polovodivých vnitřních vrstev tloušťky 0,45 mm a nevodivé vrstvy tloušťky 0,9 mm.

Charakteristickým znakem této sady byl šev vedoucí po celé délce průchodky. Při testech se ukázalo, že právě tento šev je největší slabinou těchto průchodek, neboť u všech testovaných průchodek došlo k jejich průrazu právě v místě švu při napětí kolem 7 kV. Pro porovnání vydržela jejich nevodivá obdoba cca 30 kV. Dalším problémem u těchto průchodek byla jejich nadměrná tloušťka spojená s počtem polovodivých vrstev.

Na obrázku 15 je vidět detailní snímek proražené průchodky z první sady. Dobře viditelný je kromě samotného místa průrazu také zmíněný šev a vlákna stringů polovodivého filamentu kolem švu. Obrázek 16 zachycuje místo průrazu na testovací průchodce z čistého PLA, která byla již byla vyrobena bez švu.



Obrázek 15: Detail na místo průrazu průchodky z první sady



Obrázek 16: Detail na místo průrazu průchodky první sady z čistého PLA

5.6 Druhá sada vzorků

Po neúspěchu první sady, který zavinil především nevhodně umístěný šev, bylo jisté, že je tento problém nutno řešit. Vzhledem k tomu, že z první sady vyrobené na zakázku zbývalo stále mnoho nepoužitelných průchodek, vychází druhá sada právě z té první.

Zbylé průchodky z první sady byly umístěny do pícky roztopené na $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je teplota těsně pod teplotou skelného přechodu PLA [45]. Při vyšší teplotě by mohlo dojít k nežádoucí deformaci tvaru průchodek. Takto byly průchodky v pícce umístěné po dobu 1 h. Tímto experimentem se zkoumalo, jestli umístění průchodek z první sady ve zvýšené teplotě nepomůže zacelit jejich vnitřní vrstvy a eliminovat tak nechtěný vliv švu.

Bohužel se při následném testování průchodek vysokým napětím ukázalo, že zvýšená teplota neměla na zacelení vrstev požadovaný vliv. Průchodky z druhé sady taktéž vydržely nanejvýš 7 kV, což se ani zdaleka neblíží 30 kV, u kterých došlo k průrazu průchodek z čistého PLA.

5.7 Třetí sada vzorků

Třetí sada byla již celá připravena mnou na 3D tiskárně Felix Tec4.1. Po nepříznivých výsledcích první a druhé sady byly průchodky ze třetí sady tenčí, tedy měly pouze 2 polovodivé vrstvy uvnitř průchodky, a především už neobsahovaly problematický šev. Šev byl eliminován nastavením pozice švu na náhodnou pro každou vrstvu při slicování modelu a pro nižší počet vnitřních polovodivých vrstev byly znovu provedeny odpovídající výpočty, podle kterých byl následně upraven 3D model průchodek. Pro představu je na obrázku 18 vidět porovnání tloušťky průchodek první sady s průchodkami třetí sady.

Během tisku se ukázalo, že při vytlačování polovodivého filamentu dochází k výraznému stringování (extruder na polovodivý filament za sebou „tahá“ vlákna filamentu po dotištění aktuální vrstvy), což by mohlo zapříčinit nepříznivé zkratování více polovodivých vrstev. Tomuto efektu také nejspíše pomohl fakt, že byly průchodky třetí sady tištěny po dvou. Posuv extruderu mezi dvěma tištěnými průchodkami tak občas ještě podpořil vznik stringů.

Testy bohužel potvrdily, že stringování je problém, když u průchodek došlo k propálení již při 1 kV. Na proražených průchodkách bylo na první pohled zřejmé, že k průrazu došlo právě v místě, kde k povrchu průchodky vedl string polovodivého PLA. To je dobře vidět na obrázku 17, kde místa průrazu jsou ve spodní části a černé „tečky“ po těle průchodky jsou stringy polovodivého materiálu.



Obrázek 17: Detail na proraženou průchodku třetí sady



Obrázek 18: Porovnání tloušťky průchodek první a druhé sady (nahore) a průchodek třetí sady (dole)

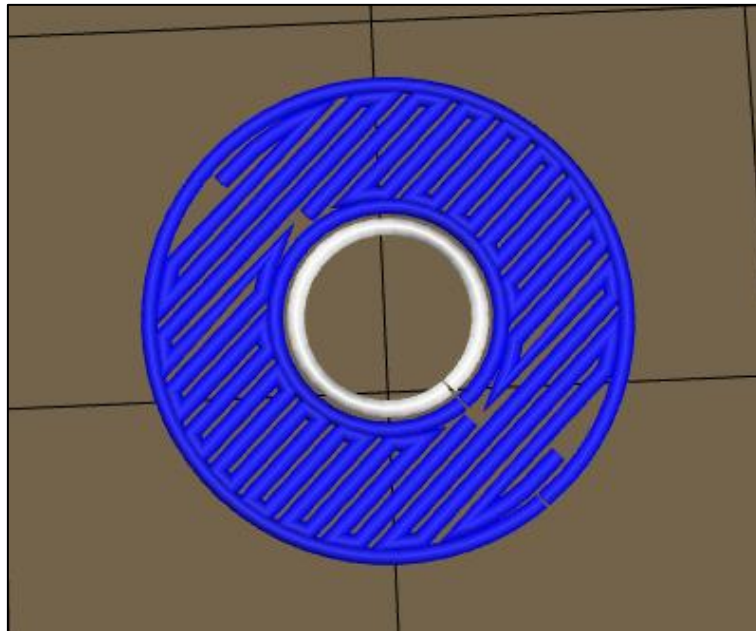
5.8 Čtvrtá sada vzorků

Ke stringování obecně dochází, pokud je teplota extruderu příliš vysoká a vytlačovaný filament je proto tekutější a více se táhne. Teplota extruderu při tisku byla tedy u čtvrté sady snížena z původních 200 °C na 190 °C, což sice stoprocentně neeliminovalo tento efekt, ale snížilo ho na minimum. Vzhledem k tomu, že většina PLA filamentů se doporučuje tisknout při teplotě nad 200 °C, tak nebyl prostor nastavovat teplotu ještě níže. Další prevence proti stringování byla tisk průchodek po jedné místo původních dvou, což výrazně snížilo frekvenci vzniku stringů.

Snížení teploty tisku s sebou však přineslo další problém, a to občasné přerušované tisknutí polovodivého filamentu. Jinak řečeno, v kružnicích z polovodivého filamentu občas část chyběla. Jelikož by tento problém mohl vést ke vzniku vzduchových komůrek ve vnitřní struktuře průchodky, bylo třeba mu zabránit. To se nakonec podařilo snížením rychlosti tisku na 90 % a zvýšením násobiče extruze na 105 %.

Při testování však docházelo u průchodek k průrazu již mezi 1 a 2 kV. Co bylo zajímavé je místo průrazu, které již nebylo umístěno kolem středu průchodky, ale na zploštělé části na začátku, kde ani není vnitřní vodivá vrstva. Jak se ukázalo, toto bylo zapříčiněno nevhodně zvoleným vzorem výplně, což následně potvrdil i test nevodivých průchodek, které také vydržely pouze do 2 až 3 kV. Vzor výplně byl u těchto průchodek nastaven na „rectilinear“, což pro představu můžete vidět na obrázku 19. Každá mezírka viditelná na obrázku může vytvořit jakýsi „mikrošev“, přes který může dojít ke snadnému průrazu průchodky. K průrazu docházelo

na zploštělé části nejspíše proto, že neobsahuje žádnou vnitřní polovodivou vrstvu, a tudíž tyto „mikrošvy“ vedly prakticky od středu až k povrchu.

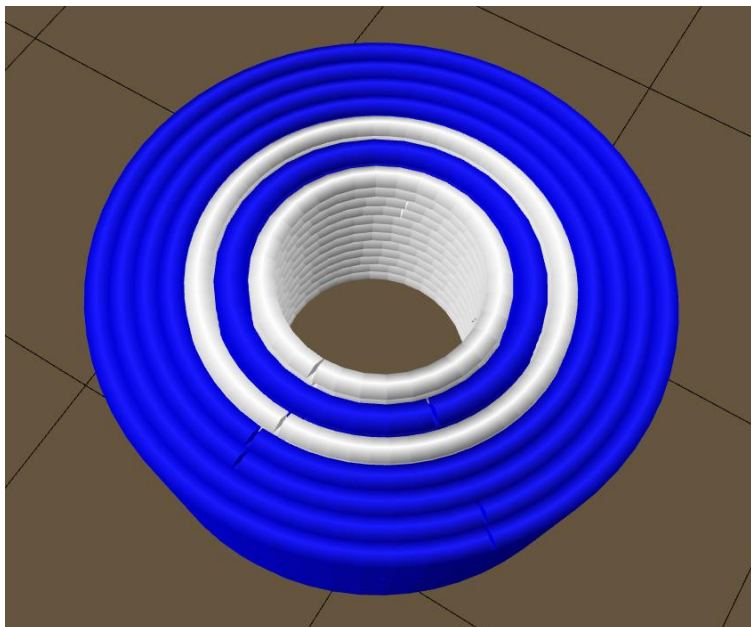


Obrázek 19: Ukázka tvaru výplně „rectilinear“ ve sliceru Repetier-Host

5.9 Pátá sada vzorků

Pátá sada vzorků přímo vycházela ze čtvrté a lišila se pouze změnou tvaru výplně. Namísto výběru ze slicerem nabízených tvarů výplně byl zvýšen minimální počet perimetrů tak, aby výplně byly pouze do sebe zapadající kružnice. To by při běžném tisku bylo nežádoucí, neboť to trvá o něco déle, spotřebovává o něco více filamentu a zároveň snižuje stabilitu tištěného objektu. Pro tisk průchodek je to však ideální, protože se tím zabrání vzniku „mikrošvů“ (viz. předchozí kapitola). Pro představu je na obrázku 20 vidět průřez částí průchodky s jednou vnitřní polovodivou vrstvou.

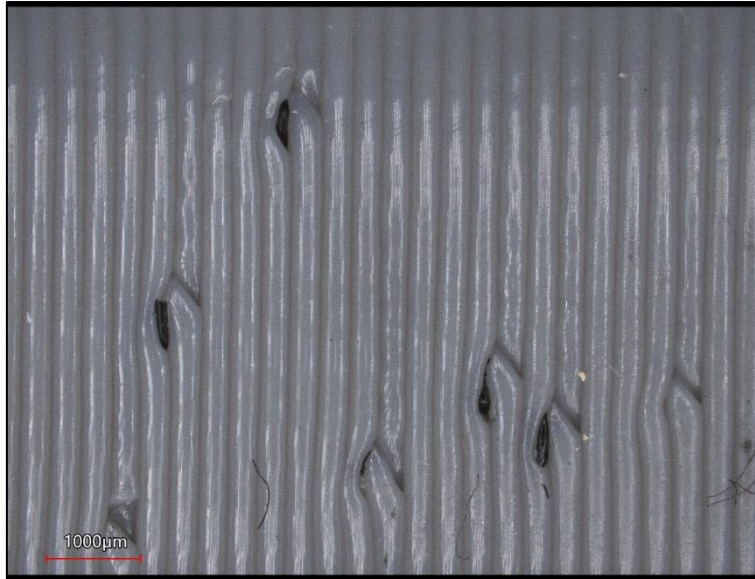
Při testech se opět projevil problém se stringováním, který byl ve čtvrté sadě značně omezen. Průchodky z páté sady vydržely nejvýše 5 kV, což je oproti předchozím sadám pokrok, avšak nové průchodky z nevodivého PLA vydržely kolem 20 kV. Místo průrazu s vyteklým polovodivým filamentem na průchodce z páté sady je vidět na obrázku 21 a obrázek 22 zachycuje detail na stringy polovodivého materiálu na průchodce páté sady.



Obrázek 20: Ukázka průřezu části průchodky ve sliceru Repetier-Host



Obrázek 21: Detail na místo průrazu průchodky šesté sady

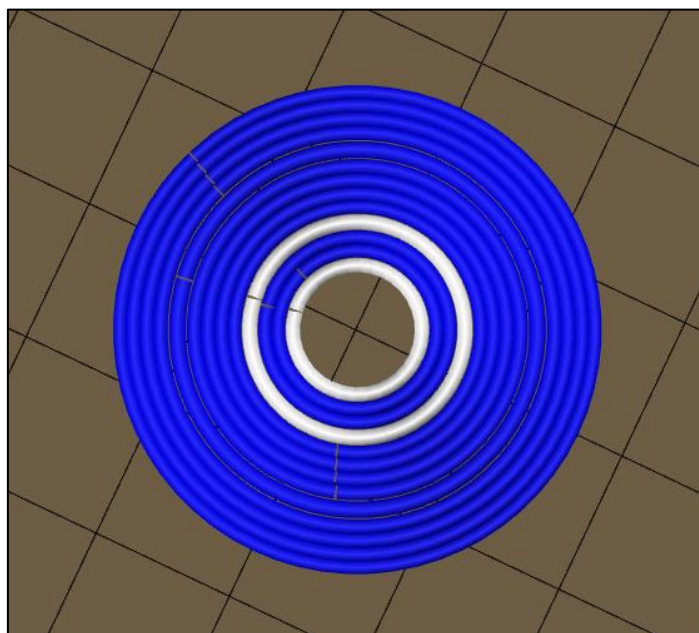


Obrázek 22: Detail na stringy u průchodky páte řady

5.10 Šestá sada vzorků

Další možností, jak zabránit stringování, je ochladit zrovna nepoužívaný extruder pod teplotu tisku. Toto nastavení se nachází přímo ve sliceru Slic3r, ale defaultně je vypnuto, jelikož jeho povolení zdatelně prodlužuje čas tisku a při běžném tisku stringování tolik nevadí, protože stringy nejsou téměř vidět a jdou snadno očistit. Vzorky z šesté sady byly připraveny právě s touto funkcí, kdy zrovna nepoužívaný extruder byl ochlazen o 10 °C. Dále byly přidány 2 mm nevodivé vrstvy na okraj průchodky tak, aby se případně vytvořené stringy nedostaly až k povrchu průchodky a zůstaly pod izolační vrstvou. Tyto dvě úpravy čas tisku jedné průchodky téměř zdvojnásobily na cca 2 h. Jako poslední úprava byla snížení počtu vnitřních polovodivých vrstev pouze na jednu pro další snížení vlivu stringování. Na obrázku 23 jsou vidět úpravy designu ve sliceru a obrázek 24 pro představu zachycuje porovnání tloušťky průchodek z šesté sady a průchodek z předchozích sad.

I přes všechny pokusy o eliminaci se stringování bohužel projevilo. Na první pohled nebylo tolik zřejmé, ale i tak se na povrchu průchodek šesté sady ojediněle daly zpozorovat černé tečky značící stringy černého polovodivého filamentu. To se projevilo i při testech, kdy tyto průchodky vydržely opět nejvýše kolem 3 kV, tedy méně než průchodky předchozí sady. Paradoxně za to nejspíše může zmíněná funkce ochlazování nepoužívaného extruderu, jelikož to byla největší změna v této sadě.



Obrázek 23: Ukázka úprav průchodek šesté sady ve sliceru Repetier-Host



Obrázek 24: Porovnání tloušťky průchodky šesté sady (vlevo) a páté sady (vpravo)

5.11 Další pokusy o vytištění průchodek

Poslední testovanou změnou v designu průchodek bylo další zvětšení nevodivé vrstvy na okraji průchodky o 1 mm a zároveň snížení teploty tisku polovodivého filamentu o dalších 5 °C na 185 °C s cílem zabránění vlivu stringování nebo nejlépe jeho úplnému potlačení. Dále bylo ještě vypnuto nastavení snižování teploty právě nepoužívaného extruderu po nepříznivých výsledcích testů šesté sady.

S tímto nastavením se bohužel nepodařilo vytisknout žádnou průchodku, jelikož byla pro tento materiál tato teplota opravdu hraniční a během tisku se vždy v nějakém bodě stalo, že se nová vrstva „nepřilepila“ na vrstvu předchozí a tisk se tím pokazil. Na povrchích částí, které se vytiskly, než došlo k pokažení tisku, se však objevovaly stopy polovodivého filamentu, a tudíž se dá předpokládat, že vysokonapěťové testy by opět dopadly negativně.

5.12 Celkové zhodnocení vyrobených průchodek

Celkem bylo připraveno 6 generací prototypů kondenzátorových průchodek, které se lišily použitou tiskárnou a kombinacemi nastavení pro tisk. O podrobnostech těchto generací jste se mohli dočíst v předchozích kapitolách a pro stručný přehled je můžete vidět také shrnuté v tabulce 1.

Tabulka 1: Přehled vývoje průchodek a výsledků jejich testů

číslo sady	vyrobeno	problém	řešení (do následující sady)	další úpravy (do následující sady)	průrazné napětí [kV]	průrazné napětí průchodky z čistého PLA [kV]
1	na zakázku	jednotná pozice švu	ponechání ve zvýšené teplotě pro zacelení švu	-	7	30
2	na zakázku (+ úprava)	jednotná pozice švu (problém přetval)	nastavení pozice švu jako náhodné	snížení počtu vnitřních polovodivých vrstev na 2	7	30
3	mnou	stringování	snížení teploty extruze, snížení počtu tištěných průchodek naráz (ze 2 na 1)	snížení rychlosti tisku na 90 %, zvýšení násobiče extruze na 105 %	1	-
4	mnou	nehodný vzor výplně ("mikrošvy")	zvýšení minimálního počtu perimetrů při tisku	-	1 až 2	2 až 3
5	mnou	stringování	ochlazování právě nepoužívaného extruderu, zvětšení nevodivé vrstvy u okraje, snížení vnitřních polovodivých vrstev na 1	-	5	20
6	mnou	stringování	vypnutí funkce ochlazování právě nepoužívaného extruderu, další zvětšení nevodivé vrstvy u okraje, snížení teploty tisku	-	3	20
(7)	mnou	příliš nízká teplota tisku -> průchodky se nedaří vytisknout	-	-	-	-

Cílem vysokonapěťových testů bylo, aby připravené kondenzátorové průchodky překonaly průrazné napětí průchodek z čistého PLA. To se však nepodařilo ani u jednoho modelu a hlavním důvodem tohoto neúspěchu bylo bezpochyby stringování polovodivého filamentu během tisku. Ačkoliv se tento jev podařilo v porovnání s prvními pokusy téměř eliminovat, pro účely použití v praxi to nestačilo.

6 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout, vyrobit a otestovat vysokonapěťovou kondenzátorovou průchodku pomocí 3D tisku a zhodnotit její funkčnost z hlediska praktického využití. Výpočty a simulace založené na naměřených vlastnostech materiálů použitých pro výrobu průchodek ukazovaly, že by se praktický experiment mohl podařit. Jako 3D tiskárna pro provedení praktické části byla dostupná FDM tiskárna Felix Tec4.1, jejíž hlavní předností je podpora tisku ze dvou materiálů díky přítomnosti dvou extruderů.

Při praktické části této práce jsem narazil na mnoho problémů souvisejících jak s odladěním co nejhodnějšího nastavení tisku, tak i s materiály samotnými. Většinu problémů se při vývoji během šesti generací prototypů podařilo optimalizovat, ale ten největší – stringování, ne. Především je to pravděpodobně dáno provedením použité tiskárny a vlastní strukturou použitého polovodivého filamentu. Jelikož se jedná o komerčně dostupnou desktopovou „hobby“ tiskárnu, nedají se očekávat stoprocentní výsledky při tisku alternativních materiálů jako PLA plněného uhlíkem, s jehož tiskem je spojena řada problémů, včetně zmíněného stringování. Dalším problémem, vycházejícím ze struktury PLA plněného uhlíkem, je omezená možnost tisku tohoto materiálu na trysce s průměrem menším než $0,4\text{ mm}$. Pro kondenzátorové průchodky je vhodné, aby vnitřní vodivé vrstvy měly co nejmenší tloušťku. Čím menší tloušťku mají, tím více se jich do průchodky vejde, a tím lepší vlastnosti by průchodka měla mít.

I přes vzniklé problémy si myslím, že metoda FDM má z komerčně dostupných možností pro tisk kondenzátorových průchodek největší potenciál. Vyplývá to právě z možnosti snadného tisku více materiálů naráz, pokud použitá tiskárna obsahuje více extruderů. Jednou z největších nevýhod tisku uhlíkem plněného filamentu je nadměrné zanášení trysky extruderu černými částicemi, což však nemá na tisk a množství spotřebovaných materiálů vliv, pokud je pro tisk tohoto materiálu přiřazen vlastní extruder. Pokud by na tisk kondenzátorových průchodek byla použita kvalitnější víceextruderová FDM tiskárna s pokročilým opatřením proti stringování, například individuální retrakcí extruderů, pak by se výroba v praxi použitelných kondenzátorových průchodek na nich mohla vydařit.

Na FDM tiskárnách s jedním extruderem tisk kondenzátorových průchodek nedoporučuji, protože na pročišťování trysky při změnách filamentu spotřebují během tisku až $15\times$ více materiálu, než je třeba na tisk jedné průchodky. Vzhledem k problémům se stringováním je

vhodné tisknout průchodky po jedné, což se kvůli enormní spotřebě materiálu při tisku jedním extruderem nevyplatí. Dalším problémem, který je s tímto blízce spojen, je mnohem vyšší časová náročnost tisku. Zatímco na dvouextruderové tiskárně by tisk průchodky z páté sady trval cca 1: 15 *h*, na jednoextruderové tiskárně při započítání času pro výměny filamentu, které probíhají v každé vrstvě, a tisk čisticí věže, by tisk stejné průchodky trval 19 *h*.

Další technologie 3D tisku, které by mohly být vhodné pro tisk kondenzátorových průchodek, jsou technologie Material Jetting (MJ) a Drop on Demand (DOD). Tyto technologie však nejsou komerčně rozšířené a řadí se mezi dražší technologie 3D tisku. Uvádím je zde, protože podporují tisk z více materiálů naráz, což je u tisku kondenzátorových průchodek nutností, ale u technologií 3D tisku to nebývá běžná vlastnost.

Motivací pro tuto práci bylo snížení výrobních nákladů kondenzátorových průchodek a jejich případné snadné prototypování za použití 3D tisku. I přes to, že z hlediska praktického využití se nepodařilo vyrobit žádnou vysokonapěťovou kondenzátorovou průchodku, bylo v rámci praktické části překonáno mnoho nepříznivých jevů. Tyto jevy byly charakterizovány a byly uvedeny možnosti pro jejich optimalizaci či úplnou eliminaci. Výstup a poznatky v této práci mohou tedy pomoci k dalšímu vývoji v oblasti 3D tisku vysokonapěťových kondenzátorových průchodek.

7 Seznam použité literatury

- [1] K. K. Murty, „Fundamentals of condenser bushings", *Transformers magazine*, roč. 2017, 2017, Viděno: 8. leden 2023. [Online]. Dostupné z: <https://hrcak.srce.hr/file/298135>
- [2] „Electrical Bushings - Types, Purpose and Construction with Diagrams", 17. září 2015. <https://studyelectrical.com/2015/09/electrical-bushings-types-and-purpose-classification-construction.html> (viděno 8. leden 2023).
- [3] A. Küchler, *High Voltage Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. doi: 10.1007/978-3-642-11993-4.
- [4] „Electrical Bushings Explained - saVRee". Viděno: 8. leden 2023. [Online]. Dostupné z: <https://savree.com/en/encyclopedia/electrical-bushings>
- [5] „Bushing of Transformer (for H.V side and L.V side) | Electricalunits.com". <http://www.electricalunits.com/bushing-of-transformer/> (viděno 8. leden 2023).
- [6] *Transformer Bushing Manufacturing Process and Testing*, (7. leden 2021). Viděno: 8. leden 2023. [Online Video]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=QTI_2eFFRgs
- [7] S. Bhutada, S. Joshi, P. Karandikar, a R. Holmukhe, „Insulation Assessment of Oil Impregnated Paper Condenser Bushings using Dielectric Frequency Response Technique", *Indian Journal of Science and Technology*, roč. 10, s. 1–6, čer. 2017, doi: 10.17485/ijst/2017/v10i21/114368.
- [8] „Test Requirements for HV Bushings -", 23. prosinec 2021. <https://www.inmr.com/test-requirements-for-hv-bushings-3/> (viděno 8. leden 2023).
- [9] „Testing of Bushings", *BrainKart*. https://www.brainkart.com/article/Testing-of-Bushings_12924/ (viděno 8. leden 2023).
- [10] „High-Voltage Bushing Maintenance and Testing Explained - Tech Library / Articles", *TestGuy Electrical Testing Network*, 1. září 2016. <https://wiki.testguy.net/t/high-voltage-bushing-maintenance-and-testing-explained/90> (viděno 8. leden 2023).
- [11] „Vysokonapěťové průchodky - EGU HV LABORATORY a.s. Czech Republic". <https://www.eguhv.com/cs/laborator/prehled-aktivit/122-vysokonapetove-pruchodky> (viděno 8. leden 2023).
- [12] P. Keane, „Electrically Conductive Polymer Composites for 3D Printing", *3D Printing*, čer. 2020, [Online]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/3d-printing-use-cases/conductive-materials-for-3d-printing/>
- [13] L. Běhálek, *Polymery*, Code creator, s.R.o. [Online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/14.html>
- [14] „[substratum]". <https://www.substratum.org> (viděno 8. leden 2023).
- [15] A. Bagheri a J. Jin, „Photopolymerization in 3D Printing", *ACS Appl. Polym. Mater.*, roč. 1, č. 4, s. 593–611, dub. 2019, doi: 10.1021/acsapm.8b00165.
- [16] Redwoo, *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications, 1st edition*.
- [17] L. GREGURIĆ, „PolyJet – 3D Printing Technologies Simply Explained", *All3DP*, 29. červen 2019. <https://all3dp.com/2/polyjet-3d-printing-technologies-simply-explained/> (viděno 8. leden 2023).
- [18] „Conductive 3Dresyns for electronics", *3Dresyns*. <https://www.3dresyns.com/pages/conductive-3dresyns-for-electronics> (viděno 8. leden 2023).
- [19] H. Han a S. Cho, „Fabrication of Conducting Polyacrylate Resin Solution with Polyaniline Nanofiber and Graphene for Conductive 3D Printing Application", *Polymers*, roč. 10, č. 9, s. 1003, zář. 2018, doi: 10.3390/polym10091003.

- [20] Q. Mu *et al.*, „Digital light processing 3D printing of conductive complex structures", *Additive Manufacturing*, roč. 18, s. 74–83, pro. 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.08.011.
- [21] G. Scordo *et al.*, „A novel highly electrically conductive composite resin for stereolithography", *Materials Today Communications*, roč. 19, s. 12–17, čer. 2019, doi: 10.1016/j.mtcomm.2018.12.017.
- [22] M. J, „The Top Eight Alternative 3D Printer Filaments", *3Dnatives*, 14. srpen 2020. <https://www.3dnatives.com/en/alternative-3d-printing-filament230820184/> (viděno 8. leden 2023).
- [23] Materialpro3d.cz, „Seznam materiálů pro 3D tisk", *materialpro3d.cz*. <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/> (viděno 8. leden 2023).
- [24] K. Balcarová, „Co je to filament?", *Náplně a tonery do tiskáren*, 2018. <https://www.miroluk.cz/clanky-jake-je-zakladni-rozdeleni-materialu-filamentu-pro-3d-tiskarny-a-jake-jsou-v-nich-rozdily.html> (viděno 8. leden 2023).
- [25] „What is FDM (fused deposition modeling) 3D printing?", *Hubs*. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/> (viděno 8. leden 2023).
- [26] I. Alig, T. Skipa, M. Engel, D. Lellinger, S. Pegel, a P. Pötschke, „Electrical conductivity recovery in carbon nanotube–polymer composites after transient shear", *phys. stat. sol. (b)*, roč. 244, č. 11, s. 4223–4226, lis. 2007, doi: 10.1002/pssb.200776138.
- [27] R. H. J. Otten a P. van der Schoot, „Continuum Percolation of Polydisperse Nanofillers", *Phys. Rev. Lett.*, roč. 103, č. 22, s. 225704, lis. 2009, doi: 10.1103/PhysRevLett.103.225704.
- [28] K. Gnanasekaran, G. de With, a H. Friedrich, „On Packing, Connectivity, and Conductivity in Mesoscale Networks of Polydisperse Multiwalled Carbon Nanotubes", *J. Phys. Chem. C*, roč. 118, č. 51, s. 29796–29803, pro. 2014, doi: 10.1021/jp5081669.
- [29] B. Vigolo, C. Coulon, M. Maugey, C. Zakri, a P. Poulin, „An Experimental Approach to the Percolation of Sticky Nanotubes", *Science*, roč. 309, č. 5736, s. 920–923, srp. 2005, doi: 10.1126/science.1112835.
- [30] K. Gnanasekaran, G. de With, a H. Friedrich, „Quantitative Analysis of Connectivity and Conductivity in Mesoscale Multiwalled Carbon Nanotube Networks in Polymer Composites", *J. Phys. Chem. C*, roč. 120, č. 48, s. 27618–27627, pro. 2016, doi: 10.1021/acs.jpcc.6b07458.
- [31] X. Wei *et al.*, „3D Printable Graphene Composite", *Sci Rep*, roč. 5, č. 1, Art. č. 1, čvc. 2015, doi: 10.1038/srep11181.
- [32] K. Gnanasekaran *et al.*, „3D printing of CNT- and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling", *Applied Materials Today*, roč. 9, s. 21–28, pro. 2017, doi: 10.1016/j.apmt.2017.04.003.
- [33] P. R. Bandaru, „Electrical Properties and Applications of Carbon Nanotube Structures", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, roč. 7, č. 4–5, s. 1239–1267, dub. 2007, doi: 10.1166/jnn.2007.307.
- [34] Z. Lei *et al.*, „Fabrication of highly electrical conductive composite filaments for 3D-printing circuits", *J Mater Sci*, roč. 53, č. 20, s. 14495–14505, říj. 2018, doi: 10.1007/s10853-018-2645-1.
- [35] E. Kuffel, W. S. Zaengl, a J. Kuffel, *High voltage engineering: fundamentals*, 2nd ed. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.

- [36] Materialpro3d.cz, „PLA filamenty FDM tisk materialpro3d.cz“, *materialpro3d.cz*, 1. říjen 2016. <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/> (viděno 8. leden 2023).
- [37] „CODATA Value: vacuum electric permittivity“. https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?ep0|search_for=permittivity (viděno 8. leden 2023).
- [38] „Conductive PLA by Protopasta - FAQ“, *ProtoPlant, makers of Proto-pasta*. <https://www.proto-pasta.com/pages/conductive-pla> (viděno 8. leden 2023).
- [39] „Original Prusa i3 MMU2S upgrade kit (for MK2.5S & MK3S+) - Oranžová | 3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši“, *Prusa3D by Josef Prusa*. <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-i3-mmu2s-upgrade-kit-for-mk2-5s-mk3s-oranzova/> (viděno 8. leden 2023).
- [40] „Tinkercad | Create 3D digital designs with online CAD“, *Tinkercad*. <https://www.tinkercad.com/> (viděno 8. leden 2023).
- [41] „<https://www.repetier.com/>“, *Repetier Software*. <https://www.repetier.com/> (viděno 8. leden 2023).
- [42] „Slic3r - Open source 3D printing toolbox“. <https://slic3r.org/> (viděno 8. leden 2023).
- [43] „3D tiskárna Felix Tec4 Dual“, *3D tiskárny FELIX*. <https://www.felixprinters.cz/produkt/3d-tiskarna-felix-tec4-1-dual-extruder-kompletne-sestavena-a-zkalibrovana/> (viděno 8. leden 2023).
- [44] „Centrum 3D tisku, 3D tiskárny Raise3D, Anisoprint - 3D Manufaktura“, *3D Manufaktura s.r.o.* <https://www.3dmanufaktura.cz/> (viděno 8. leden 2023).
- [45] Materialpro3d.cz, „Rozdíl mezi ABS, PLA a PETG“, *materialpro3d.cz*, 20. červenec 2017. <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/> (viděno 8. leden 2023).