

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie



Izolační vlastnosti výrobků vytištěných 3D tiskovou technologií FDM

Insulation properties of FFF 3D printed products

Bakalářská práce

Tomáš Cápál

Praha 2019

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Tichý

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Cápal** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **459429**
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:

Izolační vlastnosti výrobků vytištěných 3D tiskovou technologií FDM

Název bakalářské práce anglicky:

Insulation properties of FFF 3D printed products

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s technologií 3D tisku metodou FDM
2. Různými metodami měření změřte izolační vlastnosti výtisku z jednoho materiálu a nejhodnější metodou vyhodnoťte výtisky z různých materiálů
3. Vyhodnoťte vlastnosti výtisků FDM technologií z hlediska izolačních vlastností
4. Porovnejte izolační vlastnosti vytištěného výrobku s výrobkem zhotoveným jinou technologií a posudte vhodnost použití FDM technologie v elektrotechnickém průmyslu

Seznam doporučené literatury:

- [1] CANESSA, Enrique, Carlo FONDA a Marco ZENNARO. LOW-COST 3D PRINTING FOR SCIENCE, EDUCATION & SUSTAINABLE DEVELOPMENT. 1. Science Dissemination Unit: ICTP, 2013. ISBN 92-95003-49-9
[2] Jason T. Cantrell, Sean Rohde, David Damiani, Rishi Gurnani, Luke DiSandro, Josh Anton, Andie Young, Alex Jerez, Douglas Steinbach, Calvin Kroese, Peter G. Ifju. (2017) 'Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts', Rapid Prototyping Journal, Vol. 23 Issue: 4, pp.811-824, <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2016-0042> [3] VEVERKA, Antonín. Technika vysokých napětí. 2. Nakladatelství technické literatury SNTL/SVTL, 1978.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Tichý, katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **07.01.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Tomáš Tichý
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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 6. 1. 2020

.....

PODĚKOVÁNÍ

Autor této práce by chtěl v první řadě poděkovat svému vedoucímu Ing. Tomáši Tichému za odborné vedení, velkorysost a ochotu při objasnění ohledně vzniklé problematiky a se zpracováním bakalářské práce. Poděkování též patří Ing. Ondřeji Šeflovi za podporu s provedením experimentu a odborným výkladem ohledně měřicího systému a izolačních vlastností výrobků.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá výzkumem izolačních vlastností výtisků vytištěnými na 3D tiskárně za použití FDM metody. V úvodní části je vysvětlen princip FDM metody a popis použitých komerčně dostupných materiálů. U těchto vytisknutých materiálů na 3D tiskárně se zkoumala jejich elektrická pevnost využitím různých druhů metod k tomu určené. Měření bylo provedeno na rázové zkoušce a krátkodobé zkoušce s konstantním nárůstem napětí. V závěru měření se dále pozoroval vliv nerovnosti povrchu výtisků na dielektrickou pevnost. Hlavním cílem je vybrat nejvhodnější metodu měření elektrické pevnosti pro výtisky tištěné na 3D tiskárně Prusa i3 MK3 a určit materiál s nejvyššími izolačními vlastnostmi.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, FDM metoda, tepelný průraz, elektrický průraz, elektrická pevnost, rázové zkoušky, AC/DC zkouška, Weibullovo rozdělení, defekt povrchu, ABS, ASA, PP, PET, CPE

ABSTRACT

This work deals with research of insulation properties of prints printed on 3D printer using FDM method. In the introductory part there is the principle of FDM method and description of used commercially available materials explained. These printed materials on a 3D printer were examined for their electrical strength using various types of methods designated for this purpose. The measurement was performed on the impact test and the short-term test with rapid voltage rise. At the end of the measurement, the effect of surface irregularities on dielectric strength was also observed. The main goal is to select the most suitable method of measuring electrical strength for prints printed on the 3D printer Prusa i3 MK3 and to determine the material with the highest insulation properties.

KEY WORDS

3D printing, FDM method, thermal breakdown, electrical breakdown, electrical strength, impact tests, AC / DC test, Weibull distribution, surface defect, ABS, ASA, PP, PET, CPE

OBSAH

Úvod.....	1
1 Technologie 3D tisku a vývoj.....	2
1.1 Technologie SLA	2
1.2 Technologie SLS	3
1.3 Technologie LOM	3
1.4 Technologie FDM	4
1.4.1 3D tiskárna využívající metodu FDM	4
1.4.1.1 Trysky.....	5
1.4.1.2 Podložka	5
1.4.1.3 Offset.....	5
1.4.2 Princip technologie FDM	6
2 Materiály a jejich vlastnosti.....	9
2.1 ABS (Acrylonitrile butadiene styrene).....	10
2.2 ASA (Acrylonitrile styrene acrylate).....	11
2.3 PET (Polyethylene terephthalate).....	11
2.4 PP (Polypropylene).....	11
2.5 CPE (Co-polyester)	12
2.6 Odolnost vytištěných strun vůči elektrickému poli	12
2.7 Využití v elektrotechnice.....	12
3 Elektrická pevnost pevných izolantů.....	13
3.1 Tepelný průraz.....	14
3.2 Čistě elektrický průraz.....	15
3.3 Elektrochemický průraz – stárnutí izolantů.....	16
4 Metody měření elektrické pevnosti	17
4.1 Plné atmosférické impulzní napětí	17
4.1.1 Useknutý atmosférický impuls	19
4.2 Krátkodobá zkouška s konstantním nárůstem napětí	20
5 Naměřené hodnoty použitím jednotlivých metod	22
5.1 Zkouška atmosférickým impulzním napětím	22
5.1.1 Schéma měření atmosférickým impulzem	23
5.1.2 Kalibrace	23
5.1.3 Měření elektrické pevnosti vzorku atmosférickým impulzem	24
5.1.4 Vyhodnocení elektrické pevnosti vzorku při namáhání atmosférickým impulsem.....	25
5.2 Krátkodobá zkouška s lineárním nárůstem střídavého napětí	26
5.2.1 Schéma měření krátkodobou zkouškou se střídavým napětím.....	26
5.2.2 Kalibrace	26

5.2.3	Naměřené hodnoty krátkodobé zkoušky se střídavým napětím	27
5.2.4	Vyhodnocení krátkodobé zkoušky se střídavým napětím	31
5.3	Krátkodobá zkouška s lineárním nárustem stejnosměrného napětí.....	33
5.3.1	Schéma měření krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro kladnou a zápornou polaritu	34
5.3.2	Kalibrace	34
5.3.3	Naměřené hodnoty krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro kladnou polaritu	37
5.3.3.1	Vyhodnocení krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro kladnou polaritu	39
5.3.4	Naměřené hodnoty krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro zápornou polaritu	40
5.3.4.1	Vyhodnocení krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro zápornou polaritu . ..	41
6	Měření vlivu defektu povrchu na elektrickou pevnost	42
6.1	Profilometr.....	42
6.1.1	Přístroj Form Talysurf Intra Touch	43
6.1.1.1	Princip povrchového profilometru	43
6.1.1.2	Průměr drsnosti Ra	45
6.2	Zkoumání drsnosti povrchu.....	45
6.3	Vyhodnocení vlivu drsnosti na elektrickou pevnost zkouškou se stejnosměrným napětím..	50
7	Výsledky a diskuze.....	52
7.1	Vyhodnocení metod	52
7.2	Vyhodnocení vzorků	53
7.2.1	Porovnání vybraného vzorku s jinou technologií	54
	Závěr.....	55
	Literatura	56
	Seznam obrázků	62

ÚVOD

V této práci je nejprve představen koncept FDM technologie a jeho nejvíce využívané další alternativy. Následná část je věnována 3D tiskárně Prusa využívající metodu FDM a samotnému principu této technologie, kde je podrobně popsán princip výroby tištěného vzorku. Použité vzorky jsou vybrány podle současně používaných materiálů a dostupných kompozitů. Ty jsou v následující části práce vystaveny vysokému napětí v řádech kilovoltů a je zkoumána jejich elektrická pevnost. Ta je důležitá na určení maximálního elektrického pole, kterému materiál dokáže odolat, aby nedošlo k selhání jeho izolačních vlastností. V praxi by se jednalo o průraz izolace, a tedy k možnému toku elektronů, které by mohlo mít za následky zkrat a zničení elektroniky.

U vysokonapěťových přístrojů je vhodné hledat pevný izolátor, protože hraje důležitou roli pro mechanickou podporu a elektrickou izolaci mezi vodiči s různým elektrickým potenciálem. Na izolační schopnost jsou proto kladeny vysoké nároky, aby nedocházelo k překročení napětí o určité velikosti, které by vedlo k průrazu nebo přeskočení. Pro standartní výzkumu izolačních vlastností se využívají válcové nebo hrotové elektrody pro lepší rozložení elektrického pole po měřeném vzorku a nevodivé prostředí, které zabrání k přeskočení výboje mezi vodivými částmi aparatury.

Cílem práce je změření izolačních vlastností výtisků, vyrobených technologií FDM za provedení různých metod měření izolačních vlastností a jejich vzájemné porovnání. Mezi metody jsou vybrány zkouška atmosférickým impulsním napětím a krátkodobá zkouška s konstantním nárůstem napětí pro AC i DC. Z vyjmenovaných testovaných metod se pak vybere nejvhodnější, pro tuto technologii výroby, podle které se bude měření realizovat. V závěru práce se dále zkoumá vliv drsnosti a defektů povrchu na dielektrickou pevnost. U vybraných vzorků jsou vizuálně zkoumány různé nepřesnosti povrchu a následně vybrány k testu, kdy na profilometru se změřila odchylka drážek a na zkoušce s rychlým nárůstem stejnosměrného napětí byl zjišťován dopad těchto nepřesností na elektrickou pevnost.

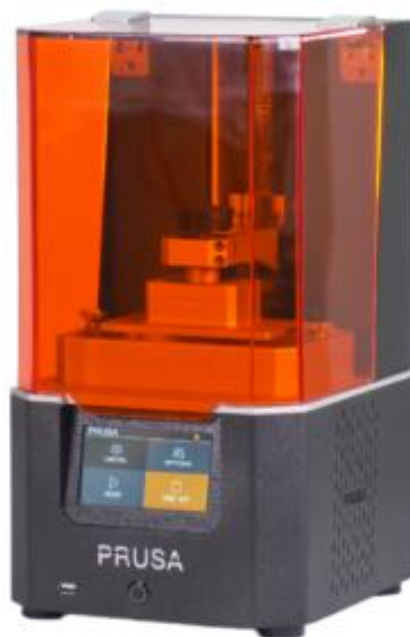
Ve výsledcích z každé jednotlivé metody měření, jsou zhodnoceny zjištěné vědomosti o dielektrické pevnosti měřeného materiálu. Na základě těchto poznatků, se vyhodnotila nejvhodnější metoda použití pro technologii FDM. Dále se vzájemně porovnaly izolační vlastnosti vytištěných materiálů a stanovil se nejodolnější izolant. K tomu je vyhodnoceno měření defektu povrchu na profilometru. Také je diskutována 3D technika výroby pomocí fúzního modelování depozice (FDM).

1 TECHNOLOGIE 3D TISKU A VÝVOJ

Počítačová technologie 3D tisku spočívá na vytváření trojrozměrných pevných objektů. 3D tiskárna kombinuje aditivní proces či vrstvení materiálů v tenkých, vodorovných průřezech za použití počítačového programu, pro tisk pevných objektů. Uplatnění 3D tisku lze pozorovat v široké škále průmyslových odvětví. Za posledních třicet let se celkový pohled na vývoj 3D tisku změnil a vylepšil. Technologie jako je SLA, SLS nebo FDM vytváří historii 3D tisku a přináší snadnou, šetrnou a rychlou výrobu umožňující vytvořit prakticky cokoli [1]. Díky tomu je cena 3D tisku stále dostupnější a její procesy se stávají efektivnější. Jiné a níže popsané technologie se nacházejí na současném trhu. Cenová relace 3D tiskárny Prusa používající metodu FDM, se pohybuje od 7590 Kč,- do 26 990 Kč, -. Cena silně závisí na výkonu a velikosti [2], [3].

1.1 TECHNOLOGIE SLA

První zmínky o rychlém prototypování začínají rokem 1981 v Japonsku, kdy Hideo Kodama zveřejnil svůj popis systému vytváření pryskyřice laserovým paprskem a tím dal podklady ke vzniku stereolitografie (SLA). Tuto metodu objevil až o pár let později vynálezce Charles Hull. Za použití paprsku ultrafialového světla vytvářel fotocitlivou pryskyřici po vrstvách a dával vznik novým objektům [4]. Tento proces začal používat k vytvoření různých 3D objektů pokročilý počítačový software CAD [1]. Princip spočívá v přeměně kapalného fotopolymeru umístěného v nádobě, což je speciální typ plastu reagující na světlo. Zároveň se v této nádobě nachází i tisková deska, jejíž povrch je vždy pokryt hladinou o výšku vrstvy, která činí zpravidla 0,05–0,2 mm. Nejprve dochází ultrafialovým laserem k zahřátí fotopolymeru. To vede k jeho změně na polotekutou formu, a při kontaktu ztuhne. Následně se posune tisková deska a paprsek vykreslí další tvar. Cyklus tisku pokračuje tímto způsobem, dokud nevytvoří 3D objekt. Po dokončení se 3D objekt odpojí od platformy a ponoří se do chemické lázně, aby došlo k odstranění přebytečné pryskyřice. Běžně se také vytisknutý předmět vytváří v ultrafialové peci, kvůli jeho lepší stabilitě a odolnosti. Tato technologie nachází uplatnění v leteckém nebo automobilovém průmyslu [5], [6].



Obrázek 1- 3D tiskárna SL1 (převzato z [69])

1.2 TECHNOLOGIE SLS

Během dlouhého vývoje prototypových technologií se ke stereolitografii začaly přidávat nové principy. V roce 1988 byla vynalezena další technologie 3D tisku, jehož patent podal Carl Deckard, vysokoškolák z University v Texasu. Jedná se o Selective Laser Sintering (SLS), které k výrobě předmětů používá výrobu aditiv a práškový polymer [1], [4]. Tato metoda používá materiál ve formě prášku, rozmístěného po podložce. Následně laser roztaví prášek do požadované vrstvy modelu a tisková deska se posune o úroveň specifické výšky, kdy dochází k dalšímu nanesení vrstvy prášku a laser vytvrdí požadovaný tvar [7]. Podobně jako u ostatních technologií bylo potřeba, pro vytvoření objektu SLS metodou, nejprve vytvořit soubor v programu CAD, který se za pomoci speciálního softwaru převedl do požadovaného formátu. Jelikož SLS umožňuje použití široké škály materiálů jako je nylon, keramika, sklo, stříbro, hliník, ocel, tak se tato metoda řadí mezi oblíbené, neboť lze dosáhnout snadného přizpůsobení 3D objektů [8].



Obrázek 2- 3D tiskárna ProX SLS 6100 (převzato z [70])

1.3 TECHNOLOGIE LOM

Mezi lehce odlišnou technologií lze řadit Laminated Object Manufacturing (LOM). Používá polotovary, kterým je nejčastěji papír potažený z jedné strany polyetylenem [5]. Tento systém vyvíjí společnost Helisys v Kalifornii. Během procesu se vrstvy plastu či papíru spojují nebo laminují dohromady, za pomoci tepla a tlaku. Přes počítač se ořízne objekt na požadovaný tvar, za použití řízené čepele nebo laseru. Jakmile se dokončí potíštěná vrstva, dochází k posunutí platformy o 1/16 palce a je zahájen tisk další vrstvy. Tiskárna poté táhne nový list materiálu přes substrát, kde je přilepena zahřátým válečkem. Tento cyklus se opakuje, dokud není 3D objekt dokončen. Technologie LOM se neřadí mezi tiskárny s vysokou popularitou, ale je to jedna z nejdostupnějších a nejrychlejších 3D tiskových technologií, která dokáže vytvořit poměrně velké 3D objekty. Navíc tisk má nízké provozní náklady, protože nepoužívá nijak drahé materiály. Uplatnění této tiskárny lze nalézt převážně u architektů a umělců [6], [8].



Obrázek 3 - 3D tiskárna Mcor ARKe (převzato z [71])

1.4 TECHNOLOGIE FDM

Technologie 3D tisku využívající metodu Fused Deposition Modeling (FDM) patří do technologie aditivní výroby, která byla v roce 1988 vyvinuta S.Scottem Crumpem spoluzakladatel společnosti Stratasys [9]. Aditivní výroba, která je také známější jako 3D tisk, přináší možnosti navrhovat a vyrábět 3D složité geometrické struktury. V posledních desetiletích dochází u technologií aditivní výroby k náhlému rozmachu. Je to reakce na zvyšující se požadavky, požadující rychlé a šetrné tisknutí a také na konečnou výrobu složitějších konstrukcí výrobků, které by měly být funkční a trvanlivé [6].

Tiskárny využívající metodu FDM produkují přesné, funkční a odolné součásti. Nicméně v porovnání s technologií SLA, kde povrch je hladší s tloušťkou vrstvy pohybující se mezi 10 až 50 μm , má FDM technologie horší přesnost, protože jeho tloušťka vrstvy je v rozmezí od 127 do 500 μm . Dále se FDM řadí jako nejčastěji používaná forma 3D tisku a zároveň je brána, jako nejlevnější možná metoda nacházející se na trhu [1], [10]. Z toho důvodu si tato metoda najde své uplatnění v mnoha oborech průmyslů. Lze ji najít ve zdravotnickém průmyslu, strojírenství nebo leteckém a kosmickém průmyslu. V odvětví elektrického průmyslu a elektrotechnice je stále vyšší úsilí o 3D tištěnou elektroniku a desky s plošnými spoji [11], [12]. FDM technika má též potenciál vyrobit izolátor FGM (Functionally Graded Material), což je kompozitní materiál, který je navržen tak, aby vykazoval konkrétní prostorovou změnu svých vlastností. Toho se obvykle dosáhne vytvořením sloučeniny dvou složek, jejichž objemový zlomek se mění v určitém směru. Například houževnatost kovu může být spojena se žáruvzdornou keramikou [13]. Technologie FDM mohou umožňovat výrobu součástí s termoplasty, které produkují mechanické, tepelné a chemické vlastnosti [8].

1.4.1 3D tiskárna využívající metodu FDM

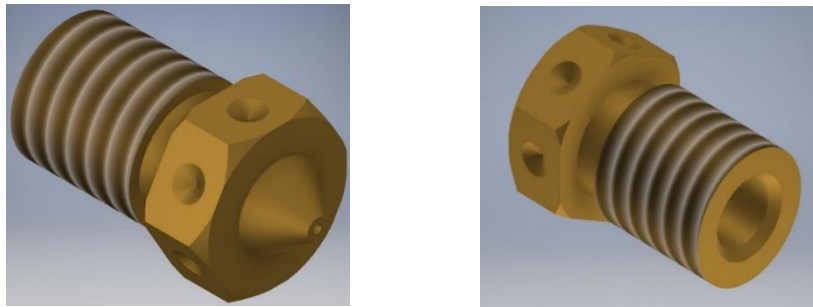
Všechny použité vzorky byly vytištěny tiskárnou RepRap i3 MK3 firmou Prusa Research s.r.o. Česká republika představuje jeden z nejrozšířenějších typů tiskáren FDM. Tento typ 3D tiskárny byl pro výrobu vzorků z různého druhu materiálů použit z důvodů její snadné cenové dostupnosti, co se týče oproti tiskárně (Obrázek 1) používající SLA technologii, která může být o pěti násobek dražší. Tato technologie je volně dostupná nejenom pro průmysl, ale i pro jednotlivce. Dále 3D tiskárna MK3 Prusa koresponduje s dobrou přilnavostí k podložce, rychlým výtiskem a vysokým sortimentem různých materiálů. Dalším faktorem je pozorování vlivu elektrické pevnosti na samotný vytištěný výrobek, neboť 3D tiskárny využívající FDM vytvářejí vrstvy, které se ukládají do linií roztaveného plastu. U tohoto procesu je rozlišení tiskárny nejdůležitější činitel a zároveň u technologie FDM se jedná o nejslabší část v porovnání s jinými technologiemi 3D tisku. Při chybném nastavení offsetu, trysky nebo podložky viz dále, může nastat řada problémů s výtiskem, jako je chybná vzájemná přilnavost jednotlivých linií k sobě, deformace, nesouosost vrstev, posunutí vrstev nebo vznik širokých mezer mezi linkami. To pravděpodobně může mít vliv na celkové izolační vlastnosti vzorku [14]. Vyšší hodnota šířky jedné vrstvy výtisku, vede k lepší mechanické odolnosti vůči vnějším silám, což by pak pravděpodobně mělo přispívat i k lepším izolačním vlastnostem. Při optimálním nastavení procesu tiskárny, lze daný materiál využít v oblasti elektrotechniky pro výrobu plastových součástek elektrických prvků a k výrobě izolantů [15].



Obrázek 4- 3D tiskárna Prusa i3 MK3 (převzato z [72])

1.4.1.1 Trysky

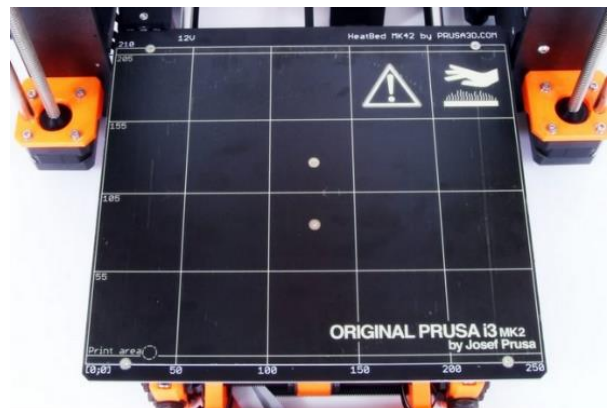
Hlava trysky zahřívá materiál a zapíná nebo vypíná tok filamentu. Obvykle se používají krokové motory nebo servomotory k pohybu vytlačovací hlavy a úpravě průtoku. Tryska je řízená za pomoci počítačového programu. Krokové motory se používají k pohybu vytlačovací hlavy a úpravě průtoku. Tryska vykonává přímočarý pohyb po ose X a Z. Průměr trysek se pohybuje v rozhraní od 0,2 mm do 0,8 mm. Při špatně prohřáté trysce může filament přilnout k výstupu na trysce, což by vedlo k zablokování proudění. V tomto případě je třeba vypnout celý systém a vyčistit trysku od přebývajících materiálu. V jiném případě by nedostatečně prohřátá tryska vedla ke špatné přilnavosti materiálu k povrchu [16].



Obrázek 5 - Náčrtek trysky z přední (vlevo) a zadní strany (vpravo)

1.4.1.2 Podložka

Deska 3D tiskárny, na které dochází k výrobě součástí. Je tvořena z magnetického materiálu, aby nedocházelo k jejímu vychýlení při tisknutí. Za pomoci krokových motorů dovolují pohyb podložce v Y-ové ose. Vyhřívaná podložka poskytuje vyšší kvalitu hotových sestav. Kdyby podložka nebyla dostatečně prohřátá, mohlo by dojít ke špatné přilnavosti filamentu na plochu. V důsledku tohoto chybného uchycení tenké struny k podložce, by se výsledný objekt zdeformoval nebo by došlo k oddělení jednotlivých vrstev konečného objektu [16].



Obrázek 6- Podložka Prusa i3 MK3 (převzato z [73])

1.4.1.3 Offset

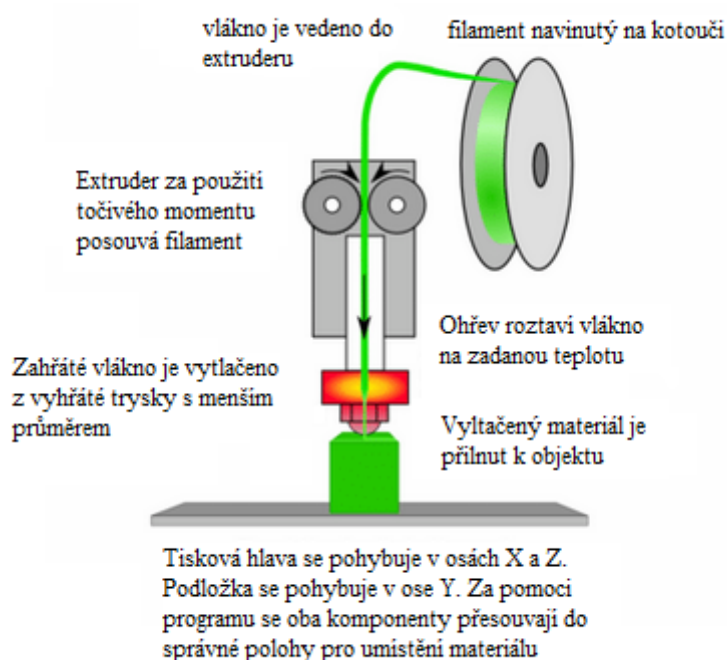
Jedná se o nástroj, který slouží ke kalibraci vzdáleností z-ové osy mezi špičkou trysky a povrchem tisku. Nesprávná hodnota často vede k různým problémům, jako je nedostatečná adheze tištěného vlákna. Při převýšení optimální hodnoty nestihne roztavené vlákno v trysce interagovat s podložkou a dochází k jeho odlepení nebo ke vzniku různých defektů. Naopak, snížení hodnoty pod optimální mez vede ke vzniku drážek mezi jednotlivými linkami, které zapříčiní špatné vzájemné spojení a výsledný výtisk se začne trhat [17].



Obrázek 7- Screen Offsetu (převzato z [74])

1.4.2 Princip technologie FDM

V tomto procesu se využívá termoplastický materiál, který je obvykle dodáván ve formě filamentu¹ o průměru 1,75 mm navinutého na kotouči. Průběh jednotlivých komponentů je sledován a řízen procesorem, ve kterém je uložen program. Jejich mobilita je způsobena prostřednictvím přesných krokových motorů. Princip této technologie spočívá v protlačení filamentu tryskou. Ten obsahuje ohřívače, které udržují plast při teplotě těsně nad jeho bodem tání, a tedy dochází k jeho snadnému protékání tryskou [18], [19]. K posunu filamentu do trysky a o jeho následné vstříkávání na desku, či tištěný výrobek se stará extruder, který používá kovové součásti pro přenos momentu síly z krokového motoru na posouvání filament [20]. Jakmile se při dané teplotě filament roztaví v trysce, je následně po tenkých vrstvách nanášen na prohřívanou podložku, ve vodorovném průřezu tisknutého výrobku pod kontrolou počítače. Po nanesení úplné vrstvy, dochází k příčnému posuvu trysky a k následnému výtisku nové vrstvy. Celý tento proces se opakuje, dokud není úplně zhotoven tisknutý objekt. Po dokončení je objekt očištěn od přebývajících materiálů a vizuálně zkontrolován [21].



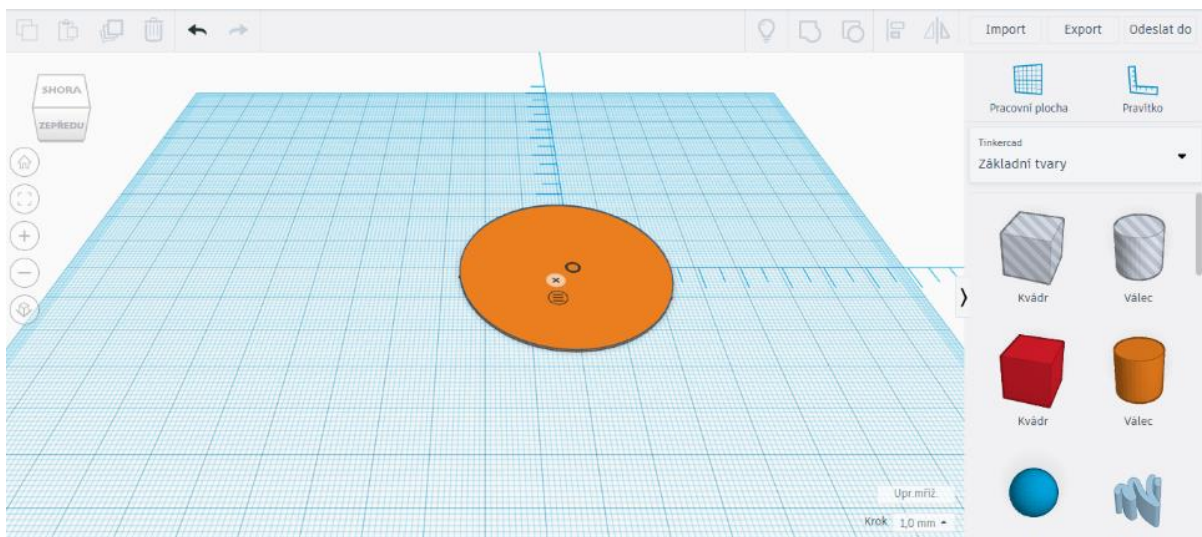
Obrázek 8- Princip FDM technologie (převzato z [75])

Před zahájením samotného procesu 3D tisku metodou FDM se objekty vymodelují ve třech rozměrech pomocí CAD (Computer Aided Design) programu. Existují průmyslové softwary, které stojí tisíce ročně za licenci, ale také bezplatně otevřené softwary, jako je třeba Blender. Otevřený software znamená, že je možná dostupnost kódu a legální licence softwaru [22].

Návrh pro experimentální měření byly vytvořeny v bezplatném softwaru Tinkercad, který je dostupný na internetovém prohlížeči a mohou být snadno upraveny tak, aby umožnily opakované použití a přizpůsobení. Zde se objekt vymodeluje do potřebného tvaru a přiřadí se mu šířka a tloušťka. Jakmile dojde k vytvoření 3D objektu, uloží se v požadovaném formátu STL pro potřebnou další manipulaci. Vzniklý objekt je následně potřeba připravit pro 3D tisknutí. K tomuto převodu slouží speciální program Slicer. Ten rozdělí model na počet požadovaných horizontálních vrstev. Dále vypočítá dobu tisknutí, vyznačí cestu pohybu tiskové hlavy a vypočte použité množství materiálu [22].

¹ tenké vlákno z určitého druhu materiálu navinutého na kotouči

Po nahrání formátu STL do programu Slicer je objekt přetransformován a následně se zde nastavují různé parametry a instrukce pro 3D tiskárnu. Napřed se vybere druh tiskárny a typ trysky, kde průměr může být mezi 50–200 μm . Poté se zvolí určitý druh materiálu, který má být tisknut a na základě toho se nastaví vhodná teplota trysky a podložky, která se v případě trysky obvykle pohybuje v rozmezí kolem 210–270 $^{\circ}\text{C}$. U podložky je interval mezi 50–110 $^{\circ}\text{C}$. Při chybně nastavených parametrech dochází k ucpání trysky nebo ke špatné adhezi na povrchu podložky. Následně se vybere hustota výplně, která určí, jaké získá objekt mechanické vlastnosti. V dalším kroku se nastaví parametry tisku, ve kterém se určí rychlost tisknutí, způsob výplně nebo počet perimetrů. Doba tisknutí má na výtisk velký vliv, neboť při požadovaném rychlém tisknutí může nastat kvůli nedostatečně prohřátému filamentu špatná přilnavost k objektu. Počet perimetrů udává, kolik vláken bude tvořit vytištěný vnější plášť objektu, ve kterém je výplň. Nedostačující počet může mít za následky, že tryska bude nanášet vlákna do prázdna, což povede k znehodnocení výtisku. Dalším parametrem je použití podpěr, které vytvoří podklad pro položení problémové vrstvy. Například, jako způsob opory horní vrstvy, kdy tiskárna přidá pod materiál speciální podpěrný materiál, který se po procesu tisku rozpustí, nebo v případě kdy vrstva začíná ve vzduchu [18], [23].

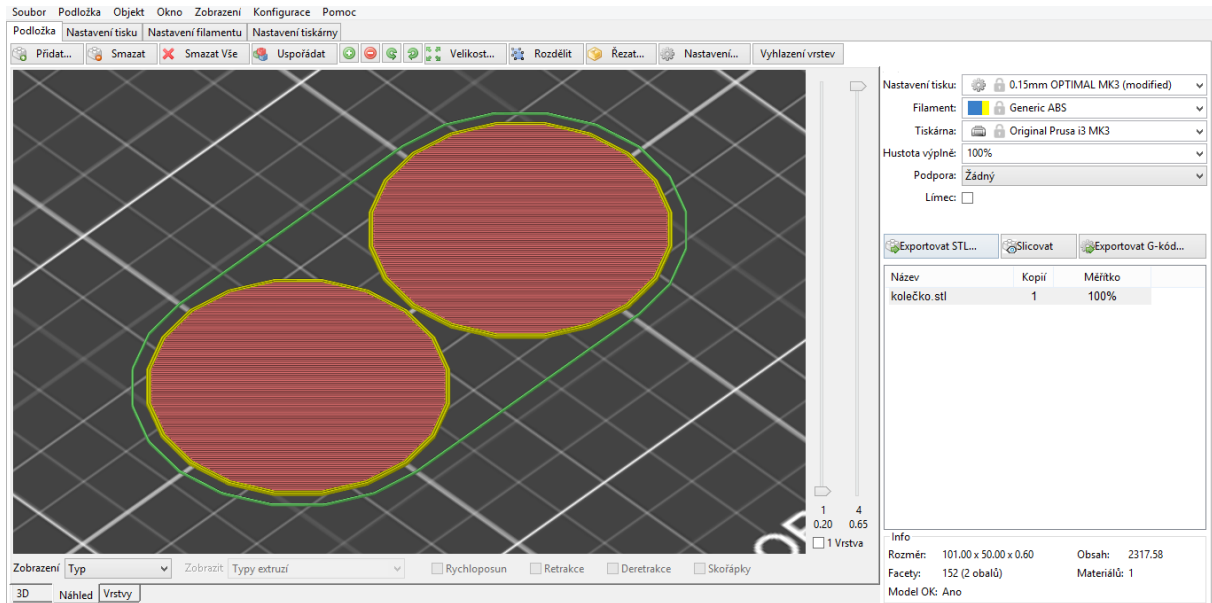


Obrázek 9- 3D objekt vytvořený v softwaru Tinkercad

Po dokončení objektu je vygenerován G-code. Jedná se o kód, který posílá příkazy 3D tiskárně, jak má tisknout objekt. Jednotlivé příkazy vykonávají různé funkce. Některé říkají tiskárně, aby přesunula tiskovou hlavu níže. Jiné instrukce určují tiskárně, na jaké pozici se má momentálně nacházet. Zároveň existuje více variant G-code, které jsou použity u různých typů tiskáren, což je hlavní důvod, proč se sdílí modely ve formátu STL. Poté je G-code poslán do tiskárny prostřednictvím paměťové karty [24].

Poté co si 3D tiskárna načte G-code dochází k plné automatizaci. Předehřeje si desku a trysku na zvolené teploty a po dosažení těchto hodnot, se spustí kalibrace před samotným tisknutím. Tisková hlava, za pomoci senzorů určující vzdálenost, si nalezne jednotlivé rohy vyhřáté podložky a její střed, odkud začne provádět výtisk [16].

V případě experimentu byly digitální modely vzorků nastaveny podle Tabulka 1. Tisková tryska měla průměr 0,4 mm. Rozlišení tisku (výška jedné vrstvy) byla nastavena na 150 μm , neboť podle experimentů měly hodnoty PET a ABS nejvyšší elektrickou pevnost při tomto rozlišení. U všech vzorků bylo nastaveno úplné plnění s mřížkovým vzorem a počet perimetrů byl nastaven na 2 [25].



Obrázek 10- Nastavení a upravení objektu ve Slic3ru

Komponenty vytvořené technologií FDM nejsou homogenní, neboť jsou zde různé odlišnosti ve vlastnostech výsledných objektů. Tyto odlišnosti jsou způsobeny vzduchovými kapslemi, které vzniknou současně s tisknutým 3D objektem mezi liniemi (X a Y osách a vrstvami v Z ose) nebo kvůli vadné soudržnosti řádek a vrstev. Mezi další ovlivňující parametry patří rozlišení tisku, offsetu a teplotu trysky [26].

2 MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

V 3D tisku existuje celá řada materiálů pro tisknutí a jejich následné využití. V průběhu let se průmysl 3D tisku stále vyvíjí a vznikají další stroje pro tisk různých druhů materiálů, jako jsou plasty, kovy, kompozity a další. Každý materiál má své vlastní jedinečné vlastnosti a silné nebo slabé stránky. K tomu se řadí další důležité faktory, jako je struktura nebo náklady, které je třeba vzít v úvahu. Pro 3D tisk metodou FDM jsou důležité parametry teplota materiálů a ohebnost tiskové struny, která má vliv na lámavost strun [27].

3D vlákno je typ plastu nazývaného termoplast. Po zahřátí na správnou teplotu se termoplast stane pružným či kapalným a po ochlazení znovu ztuhne a zpevní svoji strukturu. Existuje mnoho druhů vláken s různými vlastnostmi, které vyžadují různé teploty pro tisk. Filament je k dispozici ve dvou standardních průměrech 1,75 a 2,85 mm. Tato struna je navinuta na cívku kvůli lepšímu průběhu tisku, kdy cívka díky rotaci může lépe podat materiál 3D tiskárně. Většina spotřebitelů, ale využívá materiály na bázi polymerů s příměsí nebo bez příměsí. Příčinou je jejich snadná přeměna do tiskových strun a dobré materiálové vlastnosti [27].



Obrázek 11- Cívky s tiskovou strunou (převzato z [27])

Pro experiment se vybralo pět běžně používaných termoplastických polymerních materiálů, uvedených v Tabulka 1. Tento materiál byl dodán ve formě vláken bez příměsí s průměrem 1,75 mm navinutého na rolích. Díky spolupráci elektrotechnické fakulty s firmou Prusa Polymers byly tyto kotouče dodány přímo od tohoto výrobce. Zkušební vzorky byly navrženy v programu Tincercad a upraveny v softwaru Slic3r. Experimentální objekty dostaly tvar kotouče o průměru 5 cm a tloušťce mezi 0,45 mm – 1 mm, kvůli snadnému přichycení a pro následnou manipulaci.



Obrázek 12 - Návrh tištěných vzorků

Tyto vybrané materiály se řadí mezi nevodivé a mohou najít uplatnění v elektronickém průmyslu jako izolanty. Materiály ASA a PP velmi dobře odolávají vlivu okolí a pravděpodobně by bylo možné je použít ve venkovním prostředí, například jako ochranné kryty. Naopak materiál ABS vykazuje velmi špatnou odolnost vůči vlivu okolí. Hlavní elektrickou vlastností materiálů, kterou se bude tato práce dále zabývat, je jejich dielektrická pevnost. Je důležitým parametrem, neboť určuje vitalitu materiálů ve výkonové elektronice, kde se nejčastěji vyskytuje vysoké napětí. Mezi další důležité dielektrické parametry materiálů patří také dielektrická konstanta a ztrátový činitel. Oba tyto faktory ovlivňují chování materiálu vystaveného elektrickému poli a ztrátám, způsobeným střídavým proudem. Další částí této práce se především zaměřují na elektrickou pevnost izolátorů nikoliv na dielektrickou konstantu a ztrátový činitel, neboť prováděné metody měření se zabývaly pouze vyhodnocením elektrické pevnosti. Viz následující zdroje zajímavější se o vyhodnocení ztrátového činitele a dielektrické pevnosti [28], [16].

Materiál	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rozlišení tisku [μm]
ABS	255	110	150
ASA	265	110	150
PET	245	90	150
PP	215	100	150
CPE	265	110	150

Tabulka 1 - Měřené materiály a parametry nastavené tiskárny

2.1 ABS (ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE)

Materiál ABS patří mezi velmi pevné, trvanlivé a odolné vůči teplotě, které může dosahovat přibližně do výše 98 °C. Pro správný výtisk objektů z plastu ABS by 3D tiskárna měla mít nahřátou trysku přibližně na teplotu kolem 255 °C a s vyhřívanou podložkou v rozmezí od 80–110 °C. Tím se zabrání různým deformacím nebo praskání tištěných materiálů [29].

Díky velké pevnosti a trvanlivosti může ABS nacházet uplatnění ve velmi širokém spektru aplikací v celé řadě průmyslových odvětví, včetně strojírenství a výrobců dílů. Mezi příklady patří třeba automobilové součásti nebo elektronické sestavy [30].

Mezi výhody ABS můžeme zařadit jeho nízkou cenu oproti jiným materiálům. Dále lze u vytištěných objektů z tohoto materiálu odstranit zubaté hrany nebo vyhladit jeho povrch Acetonem. Vytištěné nebo rozbité díly lze jednoduše lepit pomocí lepidla ABS. Materiál ABS se může také dlouhodobě vystavit slunečnímu záření [30].

Mezi nevýhody ABS patří především biologicky nerozložitelný plast na bázi ropy, který však lze recyklovat. Dalším problémem ABS je, že vytváří mírné karcinogenní výpary při tisku, kdy může být nutné instalovat tiskárnu v dobře větraném prostoru. ABS také přitahuje vlhkost z okolního vzduchu, což může ovlivnit výtisky [30].

2.2 ASA (ACRYLONITRILE STYRENE ACRYLATE)

Materiál ASA má ve srovnání s polymery ABS lépe vyhovující tepelnou roztažnost, vysokou houževnatost, tuhost, dobrou chemickou odolnost [31]. Cílem bylo vytvořit materiál podobný ABS, ale s lepší odolností proti vlivům okolí [32]. Teplota trysky 3D tiskárny by měla být v rozhraní 270–280 °C a s vyhřívanou podložkou v rozmezí od 100–110 °C [29].

Využití materiálu ASA lze najít v automobilovém průmyslu, venkovní aplikaci, stavební aplikaci nebo elektrické aplikaci [32]. ASA může být svařena rozpouštědlem při použití metylenchloridu nebo cyklohexanu. Roztoky ASA v těchto rozpouštědlech lze použít jako lepidla [33]. Při tavení materiálu ASA s jinými termoplasty, jako jsou polyolefiny, polystyreny nebo nylony, může vést ke vzniku výlisků s nízkou pevností. ASA taky vytváří toxický kouř při hoření [32].

2.3 PET (POLYETHYLENE TEREPHTHALATE)

Pro tisk se používá PET-G, ale do klasického materiálu PET se přidává Glikol, pro jeho lepší tiskové vlastnosti. Dále patří PET mezi houževnaté materiály s odolností vůči vodě. Tryska u 3D tiskárny by měla být nastavena v rozhraní 240–260 °C s nahřátou podložkou v rozmezí 80–110 °C [29], [34]. PET se využívá v potravinářském průmyslu [35] a také se vede výzkum o jeho možném využití v chirurgii [36]. Často se také používá jako dielektrikum ve vysoce výkonných fóliových kondenzátorech a jako polymerní elektroda [37]. Materiál PET lze použít i ve venkovním prostředí [29].

Mezi výhody PET lze zařadit jeho skvělé bariérové vlastnosti. Umožňuje nízkou propustnost vody, oxidu uhličitého a kyslíku [35]. S přidáním glykolu (PETG) je vysoce odolný vůči nárazům. Lze ho použít k výrobě protetických prostředků a mechanických částí [38]. Je recyklovatelný a transparentní pro mikrovlnné záření [34]. Ve srovnání s jinými polymery má nižší tepelnou odolnost [39]. Je náchylný k oxidaci a není biologicky rozložitelný [40].

2.4 PP (POLYPROPYLENE)

Polypropylen je flexibilní a odolný materiál umožňující tisk přesných modelů, u kterých se požaduje pružnost, pevnost a houževnatost [41]. Přidávaný polymer vyrobený z monomerního propylenu je robustní a odolný vůči chemickým rozpouštědlům, zásadám a kyselinám [42]. Při tisknutí objektu z polypropylenu by tryska měla být rozežhřáta na teplotu kolem 210–230 °C s vyhřátou podložkou v rozmezí od 95–100 °C [43]. Kvůli jeho velké tepelné roztažnosti je problém s jeho tisknutím, neboť se během tisku může zkroutit.

Polypropylen má širokou škálu aplikací v automobilovém a obalovém průmyslu [42]. Dále je široce používán při výrobě koberec a rohoží pro domácí použití [44]. Polypropylen se také používá jako alternativa k polyvinylchloridu (PVC), který se užívá v izolaci pro elektrické kabely v prostředí s nízkou ventilací, především tunelech. Je to proto, že vyzařuje méně kouře a žádné toxické halogeny, což může vést k produkci kyseliny za vysokých teplot [45]. Velmi tenké desky polypropylenu se používají jako dielektrikum v určitých, vysoko výkonných pulzních a nízkofrekvenčních kondenzátorech [41].

Polypropylen je poměrně levný materiál, má nízký koeficient tření a vysokou pevnost v ohybu. Při pokojové teplotě je odolný vůči tukům a téměř všem organickým rozpouštědlům, kromě silných

oxidantů [46], [42]. Polypropylen má relativně kluzký povrch s nízkou energií, což znamená, že nebude tvořit odpovídající spoje při použití běžných lepidel. Spojování polypropylenu se často provádí svařovacími postupy [42]. Jakmile dojde k ochlazení objektu z PP, má tendenci k deformaci. Je proto nezbytně nutné, správně nastavit 3D tiskárnu [43]. U polypropylenu je vysoký koeficient tepelné roztažnosti, což vede k jeho omezení při vysokých teplotách. Je vysoce hořlavý a citlivý na degradaci UV zářením a oxidaci [46].

2.5 CPE (CO-POLYESTER)

CPE materiál je houževnatý a vykazuje dobrou rozměrovou stabilitu [47]. Jedná se o velmi silný a univerzální materiál s velkou tepelnou a chemickou odolností. Nemá téměř žádné deformace a lze ho použít pro tisk velkých objektů [48]. CPE je zlepšený filament PET (PETG) [49]. Objekty vytvořené z CPE se tisknou při teplotě 255–278 °C s vyhřívanou podložkou v rozmezí od 70–80 °C [49]. Co-polyester díky své skvělé odolnosti najde uplatnění v technickém využití, zejména pro tisk funkčních prototypů a mechanických součástí [49]. Produktivní designéři používají CPE k výrobě tvrdých a rozměrově stabilních, funkčních prototypů [47]. Mezi výhody CPE lze zařadit jeho dobrou přilnavost mezi jednotlivými vrstvami a nízkou hladinu těkavých organických sloučenin. Nahrazuje ABS kvůli jeho nepříjemnému a zdraví škodlivému zápachu. Také má průhlednost u tenkostěnných modelů [47], [49]. Na druhou stranu není možné ho recyklovat, má nízkou teplotu tání a větší hmotnost [50].

2.6 ODOLNOST VYTIŠTĚNÝCH STRUN VŮČI ELEKTRICKÉMU POLI

Pro elektronický průmysl jsou dielektrické vlastnosti nepostradatelným parametrem. Fyzikální experimentální měření ukazují, že permitivita pro PLA a PET mírně klesá s rostoucí výškou jedné vrstvy [16]. Tento fakt je pravděpodobně způsoben vzduchovými mezerami mezi liniemi a vrstvami objektu. Obecně platí, že nižší hodnoty permitivity při velké odchylce u rozlišení tisku, mohou znamenat nízkou spolehlivost. V případě měření dielektrické pevnosti byl nejvhodnější materiál pro elektronická zařízení vzorek vyrobený z ABS. Jeho dielektrická pevnost se pohybovala v rozhraní mezi 38,3 – 41,3 kV/mm, pro rozlišení v intervalu 50–200 μm při frekvenci 50 Hz. Zároveň je to materiál, u kterého nebylo pozorováno velké vychýlení hodnot dielektrické pevnosti v závislosti na jeho rozlišení tisku [16].

2.7 VYUŽITÍ V ELEKTROTECHNICE

Fúzní depoziční modelování (FDM) pracuje s materiály o vysoké viskozitě, a tak mohou být efektivní na tisk různých materiálových systémů za sebou. Nicméně tyto techniky jsou omezeny v rozlišení, a proto lze řešit jenom omezený počet typů zařízení, jako je propojovací vedení nebo základní snímače. Díky FDM je možné kombinovat a vrstvit několik různých materiálů najednou. To by jinou technologií bylo obtížnější. Tisk by měl z ekonomického hlediska nižší cenu [16], [15].

3 ELEKTRICKÁ PEVNOST PEVNÝCH IZOLANTŮ

Atomy v izolačních materiálech mají velmi pevně vázané elektrony, které velmi dobře odolávají volnému toku elektronů. Izolátory však nemohou odolat neomezenému množství napětí. Pokud napětí přesáhne určité hranice, izolant dosáhne průrazu a dojde k toku elektronů. Jakmile je elektrický proud protlačen izolačním materiálem, dochází k jeho rozkladu molekulární struktury. Tloušťka izolačního materiálu hraje velmi důležitou roli při určování jeho průrazného napětí neboli též elektrické či dielektrické pevnosti. Další faktor ovlivňující velikost elektrické pevnosti je metoda provedené zkoušky viz další kapitola [51].

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (1)$$

E_p [kV/mm] je elektrická pevnost materiálu,

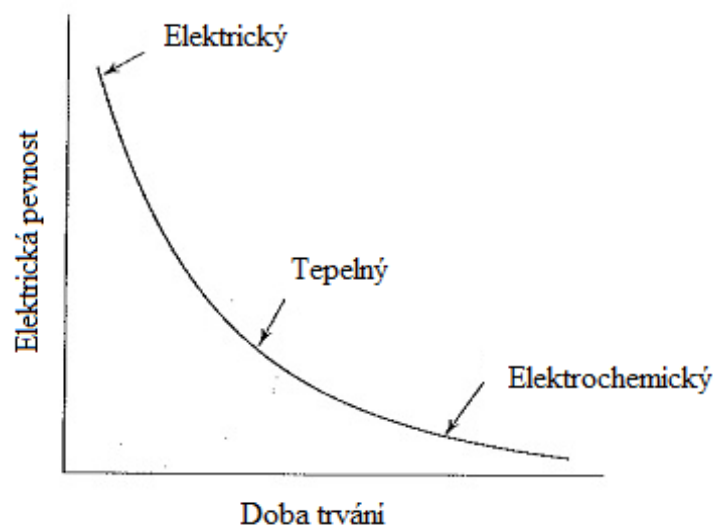
U_p [kV] průrazné napětí,

d [mm] tloušťka materiálu.

Elektrická pevnost je maximální elektrické pole, kterému materiál dokáže odolat, aniž by došlo k selhání jeho izolačních vlastností. V tomto fyzikálním experimentu se měří v kilovoltech na milimetr (kV/mm). Materiál má lepší prevenci proti průrazu a toku elektronů, čím vyšší je jeho dielektrická pevnost [51].

Nejlepším materiálem s nejvyšší dielektrickou silou je vakuum, neboť neobsahuje žádný materiál, který by se mohl rozpadnout a je proto řazen mezi dokonalé elektrický izolátor. Skutečnost však nedovoluje dosáhnout dokonalého vakua. Existují jen vakua podobná tomu ideálnímu. Tyto vakua se používají jako metoda izolace v zařízeních pro vakuové vypínače [52].

Na rozdíl od izolantů plyných a kapalných dojde při překročení elektrické pevnosti k nevratnému ději, který se nazývá průraz. Průrazem vytvořená vodivá cesta je nevratná. Při zjišťování vlastnosti látky na jednom vzorku, nelze provést více než jednu zkoušku. To s sebou nese vyšší finanční náročnost, neboť je potřeba více vzorků. V pevných látkách se obecně rozlišují tři způsoby průrazu pevných izolantů, které se liší v závislosti na době po aplikaci napětí, jak je znázorněno na Obrázek 13. Elektrický průraz probíhá řádově 10^{-8} sekund a tepelný průraz v řádech jednotek sekund. Elektrochemický průraz může trvat týdny až roky a dochází k němu vlivem elektrochemického stárnutí materiálů. To může vést ke snížení elektrické pevnosti [52].



Obrázek 13- Kolísání dielektrické pevnosti v čase po aplikaci napětí (převzato z [53])

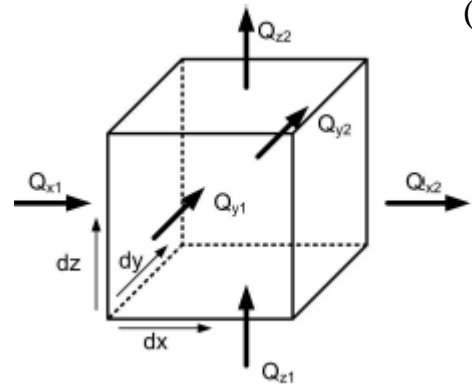
3.1 TEPELNÝ PRŮRAZ

Při vystavení izolačního materiálu elektrickému poli se začne materiál napětově namáhat a zahřívát kvůli vodivostnímu proudu a dielektrickým ztrátám v důsledku polarizace. Zvyšování vodivosti materiálu vede k jeho nárůstu tepla a poklesu odporu. Tok elektronů izolantem není rovnoměrně rozložen po povrchu, nýbrž se více koncentruje do tepelně namáhaných míst. Stav nestability je dosažen, jakmile generované teplo převyší teplotní odolnost materiálu, což následně povede k rozpadu jeho mřížkové struktury. Tepelný průraz tedy závisí na době trvání elektrického pole, kvůli produkci a akumulaci tepla v izolantu. U malých hodnot napětí dochází k ustálenému stavu mezi vyprodukovaným teplem a vyzářeným teplem z izolantu [53], [54].

Množství předaného tepla je popsáno empiricky získaným vztahem, který se nazývá Fourierův zákon vedení tepla. Tento zákon uvádí, že časová rychlost přenosu tepla materiálem je úměrná zápornému gradientu teploty a oblasti, v pravém úhlu k tomuto gradientu, kterým teplo protéká. Znaménko mínus říká, že teplo proudí proti směru rostoucí teploty [55], [56].

$$q = -\lambda \text{ grad } T \quad (2)$$

q	[J.m ⁻² .s ⁻¹], [W.m ⁻²]	je intenzita toku tepla,
T	[K]	teplota,
$\text{grad } T$	[K.m ⁻¹]	gradient teploty,
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	tepelná vodivost.



Obrázek 14- Vstup a výstup tepla
(převzato z [56])

Průtok tepla Q ve směru osy x v elementu $dx dy dz$ za dobu dt se získá rozdílem vstupního a výstupního tepla, jak lze pozorovat na Obrázek 14 [56].

$$Q_{x1} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dydzdt \quad (3)$$

$$Q_{x2} = -\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) dydzdt \quad (4)$$

$$Q_x = dQ_{x1} - dQ_{x2} = -\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dydzdt \quad (5)$$

Obdobně se získají vztahy pro vedení tepla ve směru y a z . Celkové sdílené teplo v elementu je rovno:

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dydzdt \quad (6)$$

Vyprodukované teplo je přenášeno do okolního média vedením přes pevné dielektrikum a zároveň je vyzařováno z vnějších povrchů. Rovnováhy je dosaženo, když se sečte teplo použité ke zvýšení teploty dielektrika s vyzařovaným teplem, což se rovná generovanému teplu. Pokud je zdrojem tepla procházející proud, vznikne rovnice (7) energetické bilance.

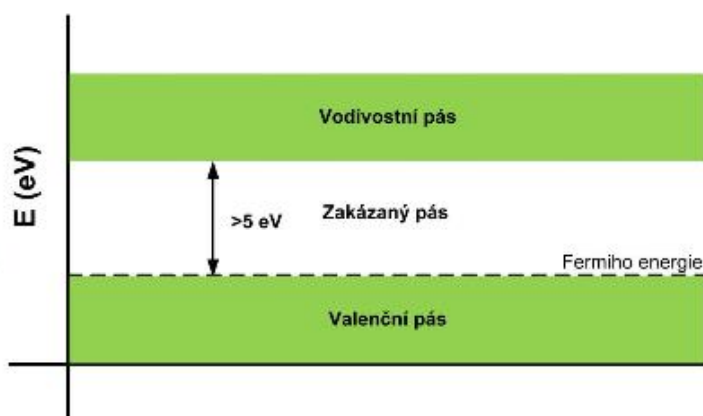
$$\sigma E^2 = c_v \frac{dT}{dt} + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad [\text{W/m}^3] \quad (7)$$

kde E je intenzita elektrického pole, σ elektrická vodivost a c_v měrné teplo vzorku při konstantním objemu [53], [56]. Řešením výše uvedené rovnice (7) se získá potřebný čas k dosažení kritické teploty, při které se dosáhne tepelné nestability a dielektrikum ztratí své izolační vlastnosti. Zároveň tato rovnice neuvažuje dielektrický ohřev [54].

3.2 ČISTĚ ELEKTRICKÝ PRŮRAZ

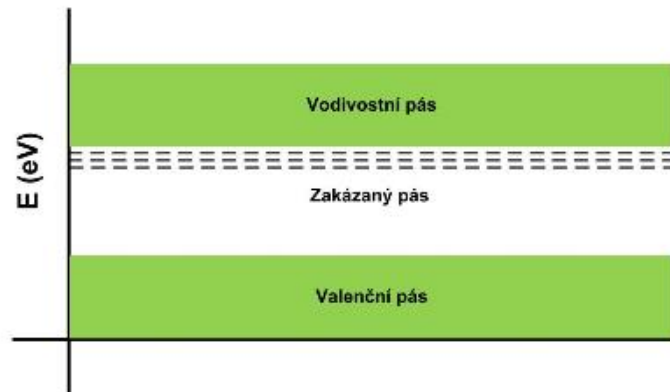
Pokud je dielektrický materiál čistý a homogenní, pak teplota a podmínky prostředí jsou vhodně kontrolovány a pokud je napětí aplikováno po velmi krátkou dobu řádově 10^{-8} sekund, tak dochází k vzrůstu dielektrické pevnosti vzorku na horní hranici, známou jako vnitřní dielektrická síla. Ta převážně závisí na konstrukčním návrhu materiálu a teplotě okolí, neboť struktura se může mírně měnit podle teplotních podmínek. Pro získání vnitřní dielektrické pevnosti materiálu je na střed vzorku přivedeno vysoké napětí oproti jeho okrajům, kde je napětí hodně nízké. Tohoto stavu se docílí vhodně zvolenou elektrodou [54].

Oproti předešlému tepelnému průrazu dochází k čistě elektrickému průrazu ve velmi krátkých časech řádově kolem 10^{-8} sekund. Požadovaná intenzita elektrického pole je řádově v MV / cm. Předpokládá se, že k vnitřní dielektrické síle byla dosažena, když elektrony v zcela zaplněném valenčním pásu získaly dostatečnou energii z elektrického pole, k překročení zakázaného energetického pásu do vodivostního pásu. Aktivační energie pro izolátory musí být vyšší než 5 eV a u polovodičů je aktivační energie v intervalu od 1–3 eV. U kovů není valenční pás úplně zaplněn, a tedy mohou elektrony snadno přecházet mezi jednotlivými energetickými stavy. V čistých a homogenních materiálech jsou při pokojové teplotě valenční a vodivostní pásy odděleny velkou energetickou mezerou a žádný elektron nemá dostatečnou energii k přechodu do vodivého pásu [54], [57].



Obrázek 15- Pásová struktura pevných látek (převzato z [56])

V praxi však není izolační materiál čistý. Má ve svých konstrukcích určité nečistoty a nedokonalosti. Atomy nečistot mohou působit jako pasti pro volné elektrony v hladinách energie, které leží těsně pod vodivým pásem. Při absolutní nule jsou všechny elektrony v základním stavu. Při pokojové teplotě mohou být některé zachycené elektrony tepelně excitovány do vodivého pásu, protože energetická mezera mezi valenčním pásem a vodivostním pásem je malá. Amorfnní látka tedy bude mít vždy ve vodivém pásmu nějaké volné elektrony. Při aplikaci elektrického pole získávají elektrony energii a díky kolizím mezi nimi dochází ke vzájemnému sdílení energie. V amorfnním dielektriku je energie získaná elektrony z elektrického pole mnohem vyšší. Proto teplota elektronů přesáhne teplotu mřížky, která povede ke zvýšení počtu zachycených elektronů, které dosáhnou vodivého pásu, což povede k průrazu materiálu [54].



Obrázek 16- Volné elektrony zachycené v pastích vlivem nečistot (převzato z [56])

3.3 ELEKTROCHEMICKÝ PRŮRAZ – STÁRNUTÍ IZOLANTŮ

V pevných dielektrikách se vytvářejí dutiny, což má za následek snížení dielektrické pevnosti v těchto pevných vzorcích. Když se plyn v dutině rozpadne, povrchy vzorku poskytují okamžitou anodu a katodu. Některé elektrony, které dopadají na anodu s dostatečnou energií, mohou přerušit chemické vazby izolačního povrchu. Podobně i pozitivní ionty mohou zvýšit povrchovou teplotu a způsobit lokální tepelnou nestabilitu. K chemické degradaci může taky dojít z aktivních výbojů, jako je ozón nebo oxid dusičitý, vzniklých ve vzduchu. Následkem těchto procesů je pomalá eroze materiálu a postupné zmenšení tloušťky vzorku. Je požadováno, aby se stárnutím nedocházelo k poklesu dielektrické pevnosti vzorku. Avšak kvůli vadám ve výrobních procesech nebo konstrukci se dielektrická pevnost časem snižuje. Velký vliv na selhání izolantů mají částečné výboje, které nastávají v plynech obsažených v dutinkách pevných izolantů. Ke vzniku těchto dutinek dochází nejčastěji při výrobě. Nicméně i při velmi pečlivé výrobě nelze zabránit ke vzniku těchto dutinek [54].

U 3D objektů vytištěných pomocí 3D tiskáren se vytvoří uvnitř fyzického 3D objektu současně jemné dutinky. Roztavený filament současně po nanesení na objekt uchytí v mikro spáře vzduch, který snižuje celkovou dielektrickou pevnost vyrobeného vzorku. Tyto rozdíly jsou způsobeny vzduchovými mezerami uvnitř 3D objektu mezi liniemi v osách X a Y, vytištěnými vrstvami v ose Z nebo vadnou soudržností linií a vrstev [16].

V experimentech se očekává, že vznik těchto kapslí bude ve výsledku ovlivňovat celkovou elektrickou pevnost tištěných objektů. Předpokládá se tedy, že by průraz vzorků mohl nastat dříve než u tištěných objektů, které nebyly vystaveny erozi. Nicméně, při ponechání zkušebních vzorků v minerálním oleji by se dutinky měly časem zaplnit a získat tak zpět svoji část elektrické pevnosti díky izolačním vlastnostem minerálního oleje.

4 METODY MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ PEVNOSTI

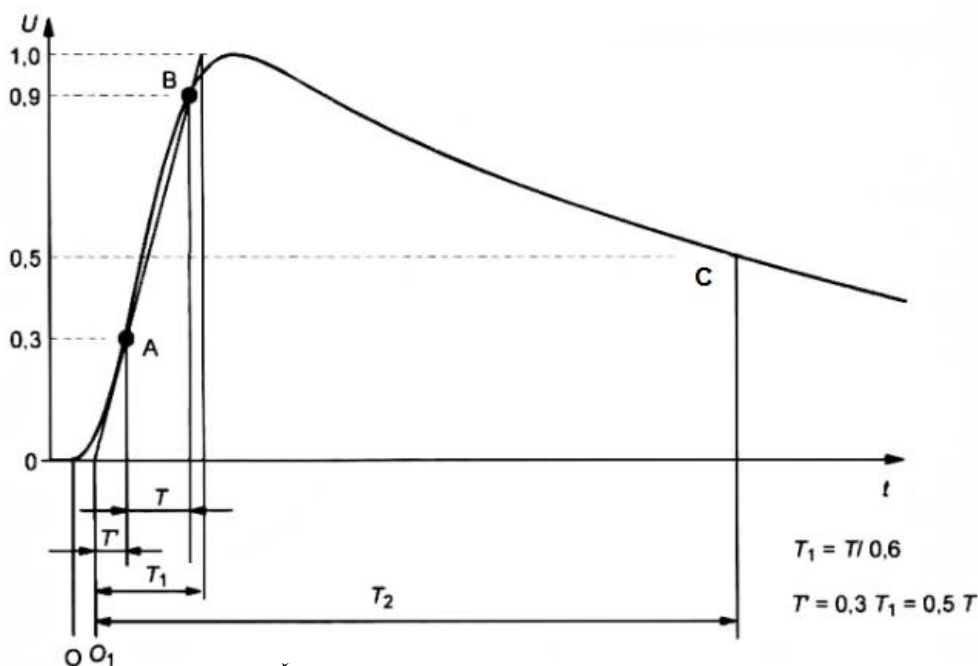
Měření doby do průrazu je zkouška destruktivní a v závislosti na přiloženém napětí se provádí mnoha způsoby. Záleží na druhu měřeného izolačního materiálu a na charakteru zkoušky. Vlastní test provádíme pro nízké hodnoty elektrické pevnosti na vzduchu. Jednou z možností je použití transformátorového nebo silikonového oleje, a to z důvodu zabránění přeskoku napětí. Vždy je ale nutné se přesvědčit, zda skutečně došlo k průrazu zkoušeného vzorku a nikoli k přeskoku po jeho povrchu [58].

Vlastní zkoušky se rozlišují dle charakteru přiloženého napětí. Při zkouškách se stejnosměrným a střídavým napětím musí docházet k plynulé regulaci. Od nejnižší nulové, až po maximální hodnotu. Omezovací odpor musí být zapojen v sérii se vzorkem a průraz zjišťujeme dle rychlého vzrůstu proudu nebo proudu přesahujícího stanovenou hodnotu. U krátkodobé zkoušky s rychlým nárůstem napětí je vzorek vystaven střídavému nebo stejnosměrnému napětí, které probíhá pomocí vysokonapěťového transformátoru. Ten je napájen proměnlivým sinusovým napětím z nízkonapěťového zdroje. U zkoušky se stejnosměrným napětím je jen navíc do obvodu zapojena dioda. Při vloženém vzorku do obvodu se lineárně navyšuje napětí až do průrazné hodnoty [58].

V případě zkoušek rázovým napětím, musí použitý generátor umožňovat volbu polarity. Velikost napětí a energie generátoru impulzů musí být taková, aby se dosáhlo správného tvaru impulzu, pro jakékoli vzorky, až k dosažení průrazného napětí. Dále viz kapitola 4.1 [58].

4.1 PLNÉ ATMOSFÉRICKÉ IMPULZNÍ NAPĚTÍ

Plné atmosférické impulzní napětí je takové napětí, při kterém není přerušena doba trvání průrazným výbojem viz Obrázek 17. Rázová vlna je tvořena aperiodickým přechodným napětím s rychlým vzestupem na maximální napětí a pomalejší pokles zpátky k nule. Doba vzestupu pro atmosférické impulzní napětí je stanovena do 20 μs a následně doba poklesu může trvat až několik sekund. Místo, kde napětí narůstá, se nazývá čelo vlny a naopak místo, kde napětí klesá, se nazývá tyl vlny. Dále se jedná o metodu využívající elektrického průrazu viz kapitola 3.2 [52].



Obrázek 17- Časové parametry plného impulzu napětí (převzato z [59])

Obrázek 17 popisuje časový průběh plného atmosférického impulsu. Časový průběh charakteristiky napětí začíná ve zdánlivém počátku O (virtual origin), narůstá přes body A ($0,3U_t$) a B ($0,9U_t$) do vrcholové hodnoty zkušební napětí a dále klesá do bodu C ($0,5U_t$). Od tohoto bodu pak postupně klesá až k nule. Nabíjecí a vybíjecí charakteristiky mají exponenciální průběh. V Případě záznamu rázové charakteristiky s lineární časovou osou je zdánlivý počátek O_1 dán průsečíkem přímky, proložené referenčními body A, B s časovou osou x [59], [52].

Doba čela vlny (T_1) pro plné vlny a kusé vlny (viz kapitola 4.1.1) napětí je 1,67 násobek doby vzrůstu napětí (T) mezi body 30 % a 90 % vrcholové hodnoty [52].

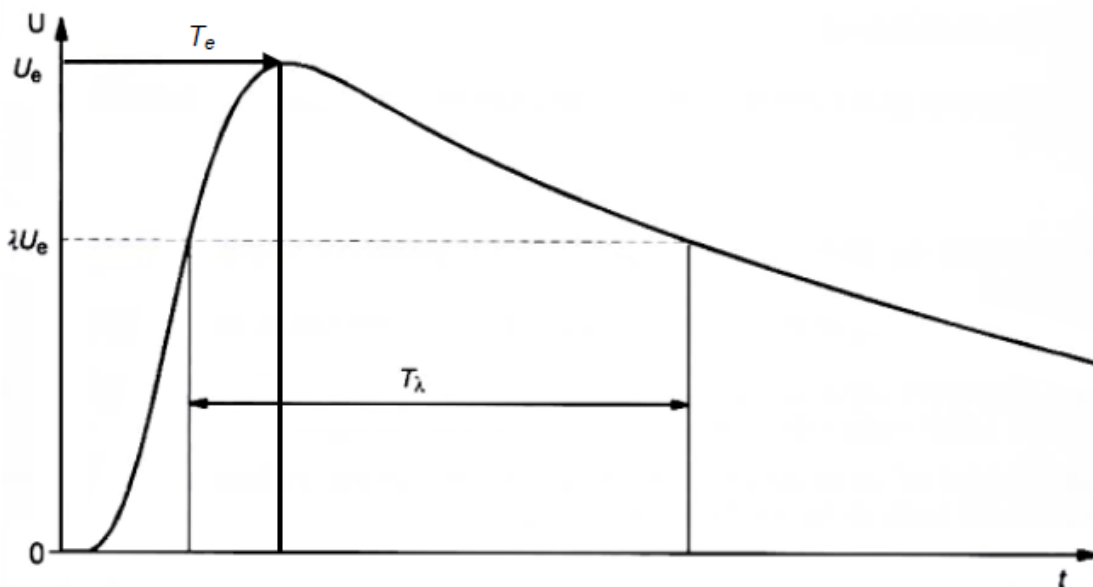
Doba do vrcholu je časový interval mezi počátkem vlny a jejím vrcholem. Doba trvání vrcholu napětí je časový interval, v němž je napětí vyšší, než 0,9 násobek vrcholové hodnoty [52].

Počátek vlny napětí je okamžik předbíhající bod A , v němž vlna dosáhne 30 % vrcholové hodnoty o $0,3T_1$. Při lineárním časovém rozkladu je dán průsečíkem spojnice bodů určujících dobu čela s časovou osou [52].

Doba půl týlu vlny (T_2) je časový interval mezi počátkem vlny a okamžikem v týlu, kdy napětí pokleslo na polovinu vrcholové hodnoty [52].

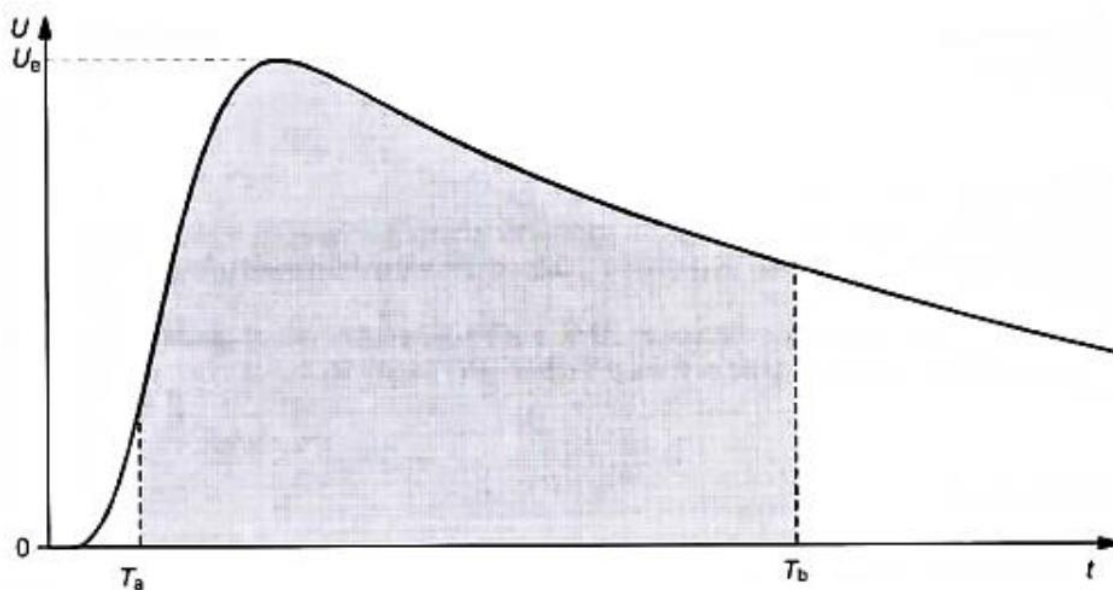
Zdánlivý počátek O_1 atmosférického impulsu určuje dobu předcházející odpovídajícímu bodu A křivky zkušební napětí o $0,3T_1$. Doba půl týlu T_2 je zdánlivý parametr, definovaný jako časový interval mezi zdánlivým počátkem O_1 a dobou, při kterém křivka zkušební napětí klesne na poloviční hodnotu zkušební napětí viz Obrázek 17 [52].

Průměrná strmost (*average rate to rise*) udává sklon nejlépe proložené přímky mezi krajními hladinami napětí od bodu A do B , užitím všech měřených bodů mezi těmito napětíovými hladinami. V případě šumu nebo oscilací v krajních hladinách napětí se do souboru měření dat uvažuje pouze první bod po posledním přechodu hladiny 30 % a poslední bod, před prvním překročením hladiny 90 % [52].



Obrázek 18- Další možné časové parametry plného impulzního napětí (převzato z [59])

Na Obrázek 18 je zakreslena doba vrcholu T_e (peak time), která je definována jako podíl krajní hodnoty U_e a průměrné strmosti. Časový interval napětí T_λ (voltage time interval) je časový údaj, v němž má zaznamenaná křivka vyšší hodnotu napětí, než: $\lambda \cdot U_e$, kde $0 < \lambda < 1$ [59].



Obrázek 19- Integrální napětové křivky (převzato z [59])

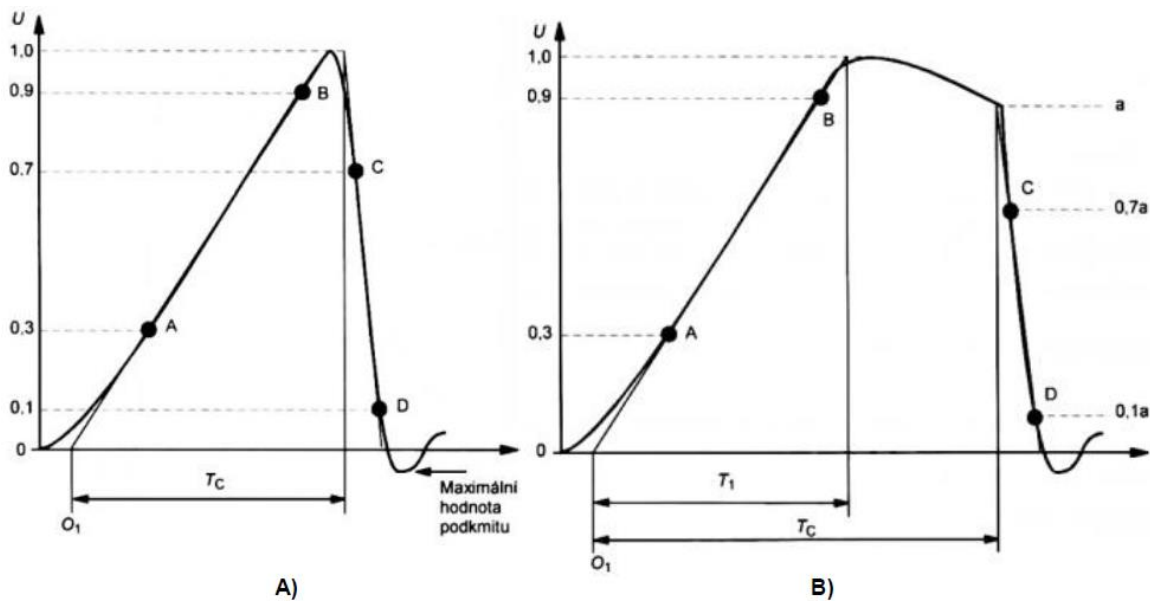
Doba do vrcholu T_e , časový interval napětí T_i a zvýrazněná plocha pod napětovou křivkou znázorňující integrál této křivky zobrazený na Obrázek 19, jsou parametry, které se používají pro alternativní charakterizování atmosférického impulsu ve speciálních zkušebních případech, kdy není možné dodržet běžné stanovené toleranční meze [59].

4.1.1 Useknutý atmosférický impuls

Za normalizovaný useknutý atmosférický impuls napětí se považuje impuls useknutý vnějším jiskřením v době po $2 \mu\text{s}$ až $5 \mu\text{s}$, tzn. v době trvání týlu. Platí zde pravidlo, že doba trvání zhroucení napětí by měla být mnohem rychlejší než doba čela. Podrobněji se tímto zabývá norma **ČSN EN 60060-2: Technika zkoušek vysokým napětím – Část 2: Měřicí systémy** [59].

Useknutí impulsu před jeho plynulým ukončením může být požadované nebo nechtěné. Požadovaného useknutí se docílí připojením vnějšího usekávajícího jiskřiště a jedná se o druh zkušebního napětí. Nechtěné useknutí je způsobeno průrazným výbojem, což způsobí, že zkoušený objekt v provedené zkoušce nevyhoví [59].

V některých případech je nutné použít zvláštní atmosférický impuls napětí. Impulsy mohou mít kratší dobu čela nebo krajní hodnoty odpovídající činiteli využití generátoru většímu než 1. Více informací viz **ČSN EN 60060-3: Technika zkoušek vysokým napětím – Část 3: Definice a požadavky na zkoušky na místě** [59].



Obrázek 20- Atmosférické impulsní napětí: A) useknuté v čele; B) useknuté v týle (převzato z [59])

Na Obrázek 20 jsou znázorněny časové průběhy useknutých atmosférických napětí. V průběhu procesu useknutí impulsu dojde k průraznému výboji, který způsobí rychlý pokles, napětí neboli zhroucení, na téměř nulovou hodnotu. Průběh zhroucení napětí definují body C a D, které v případě useknutí v čele odpovídají hodnotě 70 % a 10 % vrcholového napětí a v případě useknutí v týle odpovídají hodnotě 70 % a 10 % z napětí v okamžiku zhroucení.

4.2 KRÁTKODOBÁ ZKOUŠKA S KONSTANTNÍM NÁRŮSTEM NAPĚTÍ

Zkoušení střídavým napětím probíhá pomocí vysokonapěťového transformátoru, napájeného proměnlivým sinusovým napětím z nízkonapěťového zdroje. Při vloženém vzorku do obvodu, musí pro všechna napětí až do napětí průrazného platit poměr, že maximální a efektivní hodnoty budou $\sqrt{2} \pm 5\%$. Při této krátkodobé zkoušce mohou být použity různé varianty přikládání zkušebního napětí, tak jak je uvedeno níže [58].

- Krátkodobá zkouška s rychlým nárůstem napětí
- Zkouška se stupňovitým zvyšováním napětí s dvacetisekundovými stupni

Při krátkodobé zkoušce je nárůst napětí rovnoměrný od nuly až do průrazu. Míra nárůstu se volí tak, aby došlo k průrazu mezi 10. a 20. sekundou od přiložení napětí. Tomu musí odpovídat i rychlost nárůstu napětí, jež se volí z řady 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 $V \cdot s^{-1}$. Dále se jedná o metodu využívající tepelného průrazu, protože dochází ke konstantnímu nárůstu napětí v řádech sekund a při napěťovém namáhání se začne materiál zahřívat kvůli vodivostnímu proudu a dielektrickým ztrátám v důsledku polarizace. K elektrickému průrazu dochází v řádech 10^{-8} sekund a elektrochemický průraz může trvat týdny až roky. Dochází k němu vlivem elektrochemického stárnutí materiálů, což může vést ke snížení elektrické pevnosti [54], [58].

Při zkoušce se stupňovitým zvyšováním napětí se navazuje na zkoušku krátkodobou. Napětí na prvním stupni se volí dle Tabulka 2 tak, aby byla hodnota nejbližší ke 40 % průrazného napětí při krátkodobé zkoušce [58].

Vlastní zkoušky se rozlišují dle charakteru přiloženého napětí. Při zkouškách se stejnosměrným napětím musí být regulace plynulá. Od nejnižší nulové, až po maximální hodnotu. Omezovací odpor musí být zapojen v sérii se vzorkem a průraz zjišťujeme dle rychlého vzrůstu proudu nebo proudu přesahující stanovenou hodnotu [58].

Počáteční napětí [kV]	Přírůstek [kV]
$\leq 1,0$	10 % z počátečního napětí
nad 1,0 do 2,0	0,1
nad 2,0 do 5,0	0,2
nad 5,0 do 10,0	0,5
nad 10 do 20	1,0
nad 20 do 50	2,0
nad 50 do 100	5,0
nad 100 do 200	10,0
nad 200	20,0

Tabulka 2- Hodnoty přírůstku napětí při zkoušce se stupňovitým zvyšováním (převzato z [58])

5 NAMĚŘENÉ HODNOTY POUŽITÍM JEDNOTLIVÝCH METOD

V následujících částí je popsáno experimentální uspořádání a návrh tištěných vzorků. Vzorky byly vystaveny vysokonapětovému měření, které se skládalo z krátkodobých AC a DC průrazových zkoušek a atmosférických impulsních zkoušek. Tyto vzorky byly ponořeny v minerálním oleji, aby nedocházelo ke klouzavému výboji. V poslední řadě došlo ke zkoumání povrchu těchto vzorků na profilometru Form Talysurf Intra, kde se analyzoval povrch vybraných vzorků a zjišťovalo se, zda různé defekty a odchylky drážek mají vliv na výslednou elektrickou pevnost.

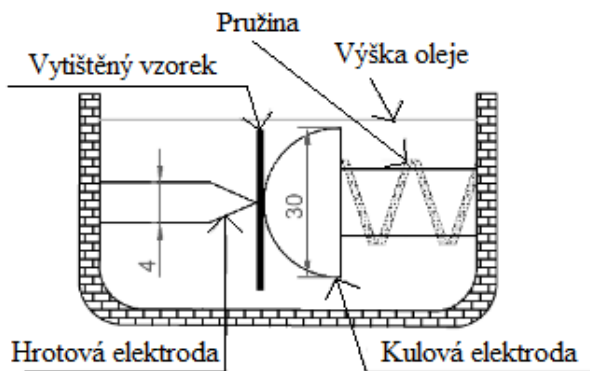
5.1 ZKOUŠKA ATMOSFÉRICKÝM IMPULZNÍM NAPĚTÍM

Pro následující experiment se použily vzorky ASA. Vzorky byly vytisknuty ve tvaru kruhu s průměrem 5 cm a šířkou 0,6 mm, jak je znázorněno na Obrázek 12. Pro všechny vzorky bylo použito stejné rozlišení tisku 150 μm jak je zaznamenáno v Tabulka 3.

Identifikace vzorku	Počet	Tloušťka [mm]	Rozlišení tisku [μm]	Teplota trysky [$^{\circ}\text{C}$] / Teplota podložky [$^{\circ}\text{C}$]
ASA_06	3	0,6	150	265/110

Tabulka 3- Měřené vzorky atmosférickým impulzním napětím

Vzorek byl vložen mezi hrotovou a kulovou elektrodu viz Obrázek 21. Oproti elektrodě kulové se zde vyskytuje vysoká intenzita elektrického pole. Materiál byl tedy napětím nejvíce namáhán právě na hrotu elektrody. Kvůli klouzavému výboji, který by nejspíše nastal mezi elektrodami, byly jednotlivé vzorky ponořeny do minerálního oleje. Nejprve byl zjištěn plný atmosférický impulz. Kvůli značně rozšířenému oscilogramu byl atmosférický impulz rozdělen na část zachycující dobu čela viz Obrázek 23 a dobu půl týlu viz Obrázek 24. Použité nastavené napětí je sestaveno z rovnice

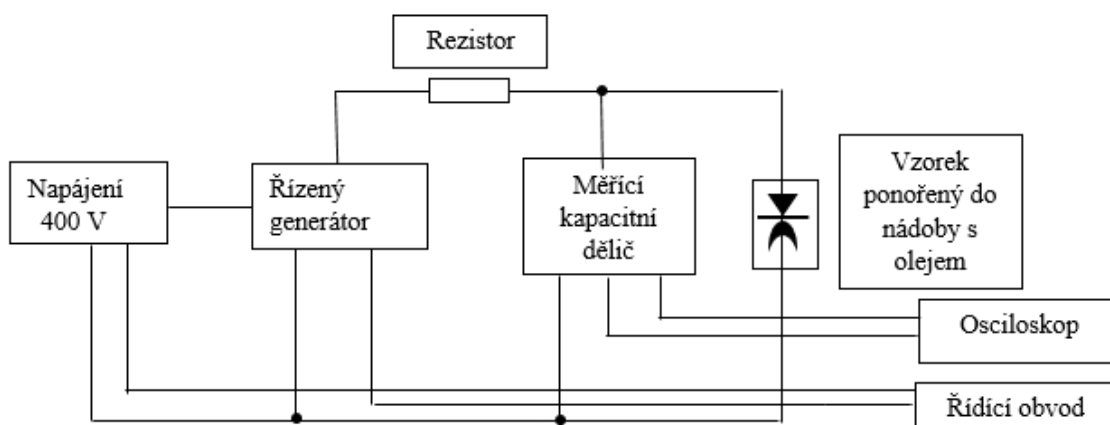


Obrázek 21- Umístění vzorku mezi elektrody pro atmosférickou impulzní zkoušku (převzato z [66])

$$U_{vys} = \frac{U_v}{100} \cdot 12678 \quad (8)$$

kde U_{vys} je výsledné napětí, U_v je vstupní napětí, jmenovatel reprezentuje nastavenou sondu na osciloskopu (10x) a na vstupu svodiče přepětí (10x) a konstanta v čitateli, která je tvořena vstupní impedancí osciloskopu, napěťovým děličem a 75 m dlouhým koaxiálním kabelem.

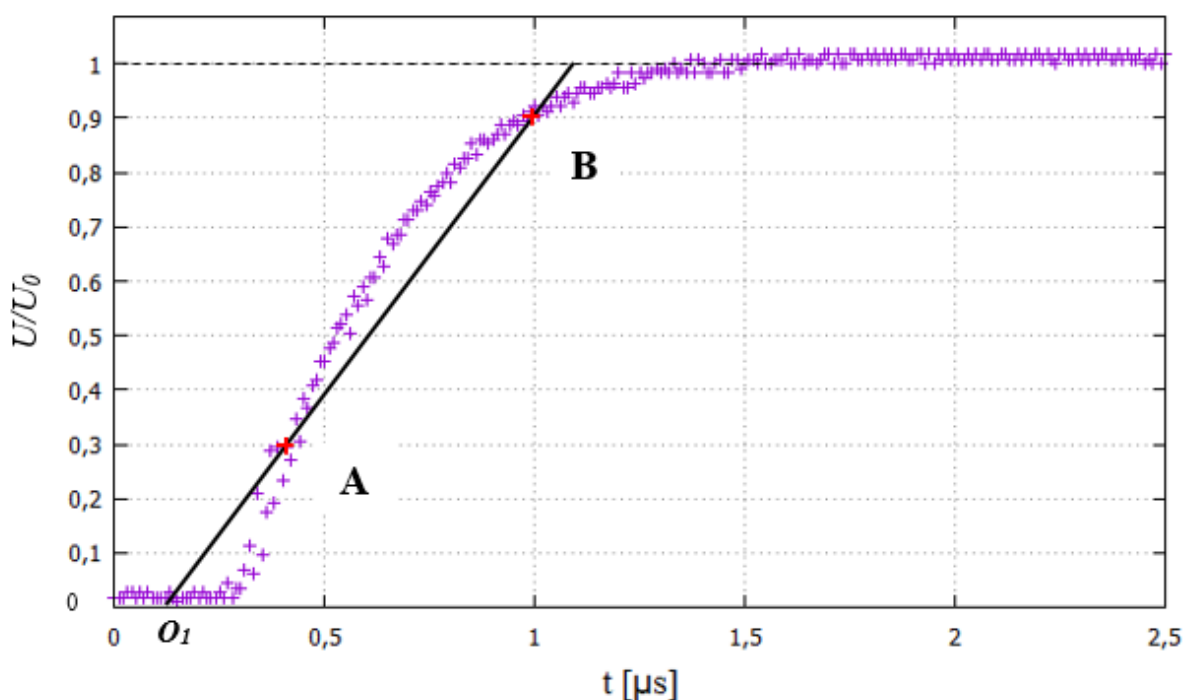
5.1.1 Schéma měření atmosférickým impulzem



Obrázek 22- Blokové schéma zapojení měřícího obvodu a systému

5.1.2 Kalibrace

Před samotným měřením bylo potřeba ověření měřícího obvodu a měřícího systému, zda zdroj splňuje příslušnou normu ČSN EN 60060-3 ohledně plného atmosférického impulzu. Podle normy musí mít impulzní napětí dobu čela T_1 v rozmezí od $0,8 \mu\text{s}$ do $20 \mu\text{s}$ a dobu půl týlu T_2 v rozmezí od $40 \mu\text{s}$ do $100 \mu\text{s}$. Mezi hrotovou a kulovou elektrodu měřícího systému se do kádinky s olejem umístil měřený vzorek. Poté se nastavila příslušná neprůrazná hodnota vstupního napětí, která měla demonstrovat průběh plného atmosférického impulzu. Díky tomuto postupu bylo možné určit impulzní časové konstanty. Kvůli značné četnosti dat na osciloskopu, bylo potřeba rozdělit získané průběhy impulzu na průběh čela a průběh půl týlu.

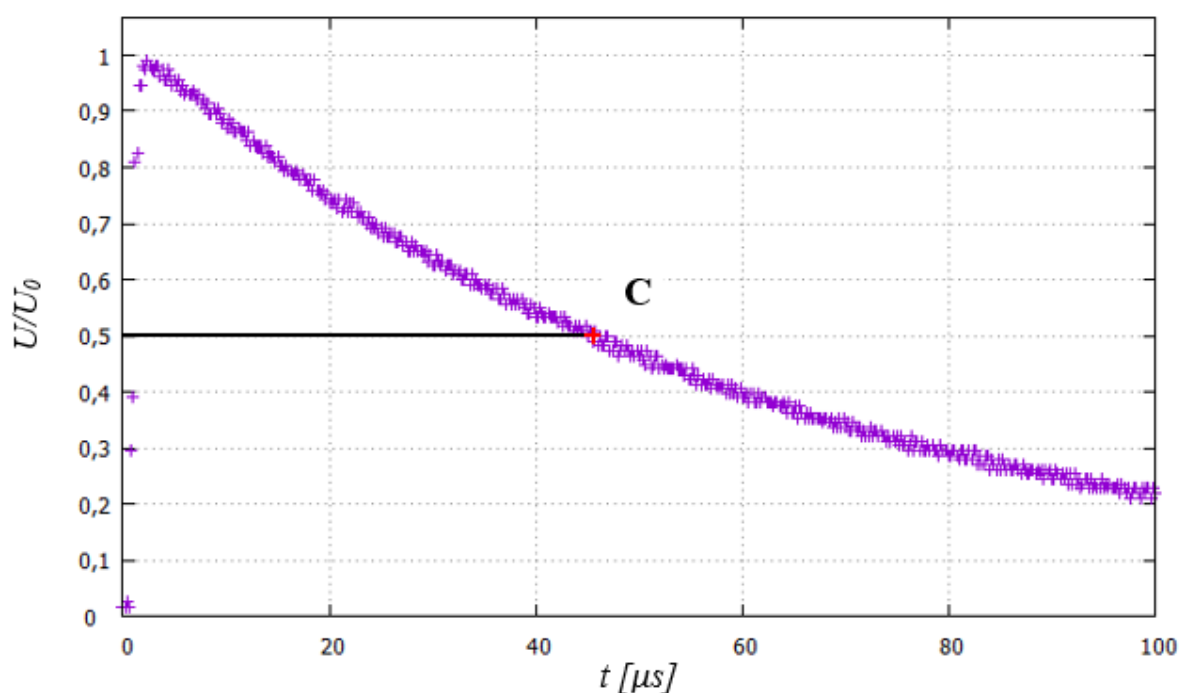


Obrázek 23- Charakteristika doba čela $T_1 = 1,024 \mu\text{s}$ a intervalu $T = 0,64 \mu\text{s}$ mezi okamžiky při kterých dosáhne impulz 30 % a 90 % vrcholové hodnoty.

Časový průběh charakteristiky napětí, zachycen na Obrázek 23, začíná ve zdánlivém počátku 0 , kde narůstá přes body A a B do vrcholové hodnoty zkušebního napětí. Poté se body proložila přímkou, kde průsečík přímky proložený referenčními body A , B s časovou osou x je zdánlivý počátek O_I . Po odečtu z této napěťové charakteristiky byl následně určen interval $T = 0,64 \mu s$ z kterého se získala doba čela vlny $T_1 = 1,068 \mu s$, což je 1,67 násobek doby vzrůstu napětí T podle kapitoly 4.1. Při přímém odečtu z grafu tato hodnota činí $T_1 = 1,024 \mu s$.

Po nárůstu do vrcholové hodnoty zkušebního napětí, dále průběh klesá do bodu C a níže k nule, kde tento průběh je znázorněn na Obrázek 24. Nabíjecí a vybíjecí charakteristiky mají exponenciální průběh. Doba půl týlu $T_2 = 44,55 \mu s$ se získala po odečtu mezi počátkem vlny a okamžikem v týlu, kdy napětí pokleslo na polovinu vrcholové hodnoty.

Jelikož změřená doba čela činí $T_1 = 1,068 \mu s$ (nebo po odečtu z grafu je $T_1 = 1,024 \mu s$) a doba půl týlu je $T_2 = 44,55 \mu s$, tak lze konstatovat, že zkouška atmosférickým impulzním napětím splňuje příslušnou normu.

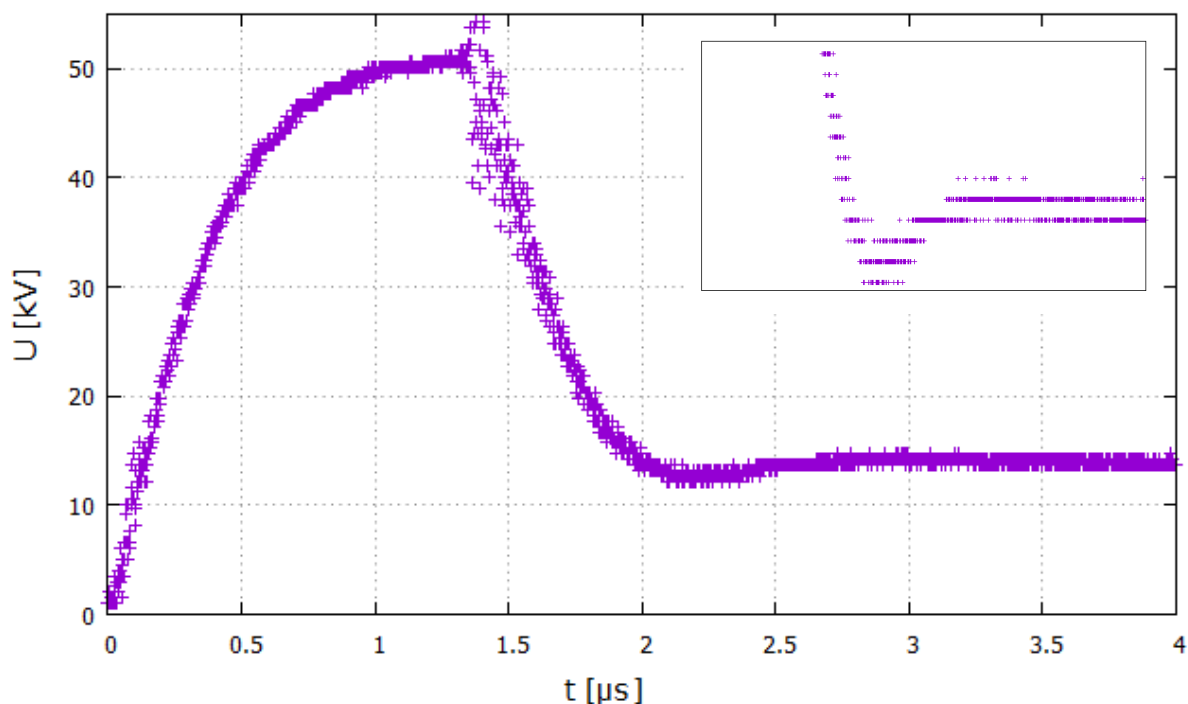


Obrázek 24- Charakteristika průběhu pultýlu $T_2 = 44,55 \mu s$

5.1.3 Měření elektrické pevnosti vzorku atmosférickým impulzem

Po dokončení všech příprav došlo k testování samotného vzorku. Měření elektrické pevnosti bylo provedeno pro materiál ASA umístěný mezi hrotovou a kulovou elektrodou, pro vyšší intenzitu elektrického pole v určitém bodě. Materiál byl napětím nejvíce namáhán na hrotu elektrody. Tloušťka použitých vzorků je $d = 0,6 \text{ mm}$. Při tisku byla použita teplota trysky $T_t = 265 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota podložky $T_p = 110 \text{ }^\circ\text{C}$. Měření bylo provedeno pro 3 vzorky ASA_06. Všechny vzorky se prorazily stejným atmosférickým impulzem při totožném vstupním napětí, které činilo $U_v = 52 \text{ kV}$. Elektrická pevnost materiálu tohoto elektrodového uspořádání se získala ze vztahu (1) kde d je tloušťka vzorku.

$$E = \frac{U_{peak}}{d} \text{ [kV/mm]} \quad (9)$$



Obrázek 25- Charakteristika napětí při průrazném napětí u třetího vzorku, kde výsledné průrazné napětí $U_v=51,09$ kV a elektrická pevnost vzorku $E_{max} = 71,33$ kV/mm. Na výšeči je zobrazena vzniklá rezonance

5.1.4 Vyhodnocení elektrické pevnosti vzorku při namáhání atmosférickým impulsem

Vzorek	d [mm]	U_v [kV]	U_{peak} [kV]	E_{max} [kV/mm]
1.	0,6	52	48,95	81,58
2.	0,6	52	49,04	81,73
3.	0,6	52	51,09	85,15

Tabulka 4- Naměřené hodnoty průrazného napětí U_{peak} a vypočtené maximální hodnoty elektrické pevnosti E_{max} pro Akrylonitril-styrén-akrylát (ASA)

Ze statistiky je výsledné průměrné průrazné napětí rovno $U_{peak} = (49 \pm 2)$ kV a průměrná elektrická pevnost $E_{max} = (82 \pm 2)$ kV/mm. Ze zaznamenaného průběhů, při průrazném napětí na Obrázek 25, si lze všimnout lehké rezonance (např. interval mezi 1-3 μs), což bylo nejspíše způsobeno parazitními kapacitami a indukčnostmi, které zde pravděpodobně vznikly. Následná klesající exponenciála, která z vysoké nedosahuje nuly, byla patrně způsobena olejem v nádobce, do které byl vzorek ponořen. Olej pravděpodobně vyplnil prostor vzniklý průrazným napětím, a tedy systém skrz olej v mezeře pomalu přenášel zbývající elektrický náboj.

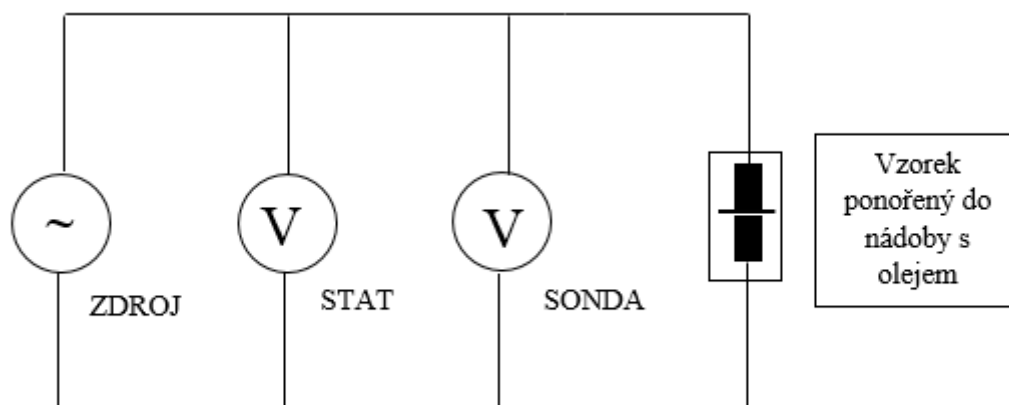
5.2 KRÁTKODOBÁ ZKOUŠKA S LINEÁRNÍM NÁRUSTEM STŘÍDAVÉHO NAPĚTÍ

Pro experiment byly použity běžné materiály zaznamenané v Tabulka 5. Vzorky byly umístěny mezi válcové elektrody a ponořeny do minerálního oleje, aby nedošlo ke klouzavému výboji. Nejprve byla provedena kalibrace měřicího systému, neboť měřené hodnoty se lépe odečítaly z multimetru, který ale byl nepřesnější oproti elektrostatickému voltmetru. Zapojení tohoto systému je znázorněno na následném Obrázek 26. Měření probíhalo lineárním navyšováním napětí 2 kV/s, dokud napětí na vzorku nedosáhlo průrazné hodnoty, která se za pomoci multimetru zapsala.

Identifikace vzorku	Počet	Tloušťka [mm]	Rozlišná tisku [μm]	Teplota trysky [$^{\circ}\text{C}$] / Teplota podložky [$^{\circ}\text{C}$]
ASA_04	20	0,45	150	265/110
PET	20	1	150	245/90
PP	20	0,6	150	215/100
CPE	20	0,7	150	245/90

Tabulka 5- Parametry použitých vzorků při zkoušce s lineárním nárůstem střídavého napětí

5.2.1 Schéma měření krátkodobou zkouškou se střídavým napětím



Obrázek 26- Schéma zapojení měřicího systému pro střídavé napětí

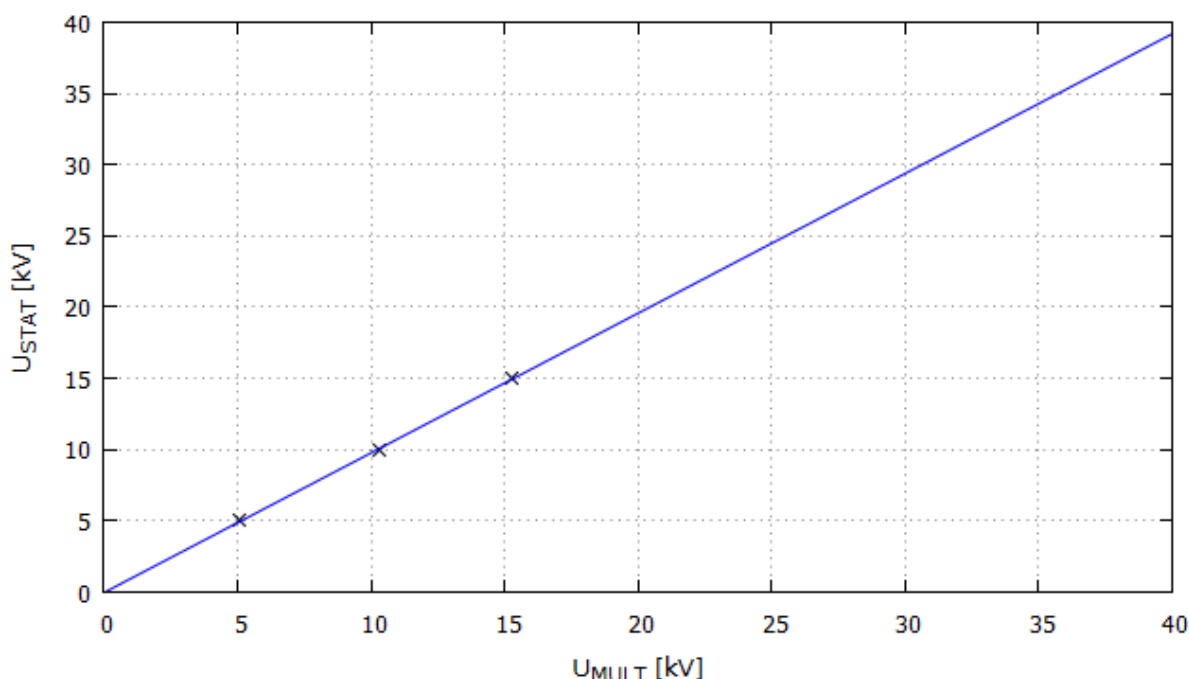
5.2.2 Kalibrace

Kvůli možné chybě měřicího přístroje multimetru, bylo potřeba provést jeho kalibraci. Na multimetru je lépe vidět počet „digitů“ (číslic), než u elektrostatického voltmetru. Samotný multimetr není standardně kalibrován a má chybu měření. Proto bylo potřeba multimetr zkalibrovat za pomoci elektrostatického voltmetru. Toto uskutečnění se realizovalo, nastavením neprůrazné hodnoty napětí elektrostatického voltmetru na jednom ze vzorku ASA_04. Zároveň došlo k odečtení hodnoty na multimetru, která se lišila od nastavené hodnoty, která byla měřena elektrostatickým voltmetrem, neboť hodnota z tohoto přístroje je přesnější. Tento princip byl realizován na několika dalších hodnotách, kde výsledná data stanovila lineární přepočítání a k samotnému odčítání průrazných hodnot napětí se použil multimetr.

U_{STAT} [kV]	U_{MULT} [kV]	$f(x)$
5	5,1	$f(x) = 0,9803 \cdot x - 0,0314$
10	10,3	
15	15,3	

Tabulka 6- kalibrace multimetru za pomoci elektrostatického voltmetru při zkoušce se střídavým napětím

Jak je patrné z Obrázek 27, chování získaných hodnot probíhalo podle lineární závislosti. K možnému dalšímu výpočtu se určil předpis pro tuto křivku, za pomoci programu Gnuplot, který na základě zjištěných hodnot vyhodnotil parametry A a B v lineárním vztahu $f(x) = A \cdot x + B$. Díky zjištěného předpisu v Tabulka 6 se následně dosazovaly hodnoty číslicového multimetru za parametr X a výsledek byla zkorigovaná hodnota.



Obrázek 27- Lineární charakteristika korigovaných hodnot multimetru při zkoušce se střídavým napětím

5.2.3 Naměřené hodnoty krátkodobé zkoušky se střídavým napětím

Výsledky elektrické pevnosti jsou vyobrazeny na následujících obrázcích, kde Obrázek 28 představuje Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti průrazu vzorku. Toto rozdělení je běžně používáno pro popis procesu elektrické degradace, ale v případě lineárního navyšování napětí v čase je možné změnit časovou osu. Toto rozdělení, popsáno výrazem pro dva parametry Weibullova rozdělení, je ukázáno ve vztahu (10). Konstantní nárůst napětí v čase měl za následek, že časová osa průrazu byla nahrazena napětím. Korektní poměr v Obrázek 28 zastupuje pravděpodobnost průrazu při určité hodnotě elektrické pevnosti.

$$F(t; \alpha; \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (10)$$

Parametr β ve Weibullovom rozdělení udává křivce tvar, kde tato křivka by byla rovna lineárnímu průběhu, pokud by se tento parametr přibližoval k nulové hodnotě. Naopak parametr blížící se nekonečnu, pak křivka opisuje tvar rostoucí hrany obdélníkového průběhu. V takovém případě by docházelo k průrazu od přesně určené hodnoty. Parametr tedy udává rozložení pravděpodobnosti průrazu ze získaných hodnot. Tento parametr je popsán rovnicí (11), kde použité veličiny jsou následně popsány níže.

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^r [w_i (X_i - \bar{X})^2]}{\sum_{i=1}^r [w_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]} \quad (11)$$

Parametr měřítka α ve Weibullově rozdělení reprezentuje napětí, pro kterou pravděpodobnost průrazu je 0,632. Toto číslo je výsledkem vztahu $1 - e^{-1}$ a udává, kdy je $t = \alpha$. Dále tento parametr α odpovídá střední hodnotě Weibullova rozdělení a v praxi odpovídá kritickému napětí. Je popsán rovnicí (12), kde použité veličiny jsou popsány níže.

$$\hat{\alpha} = e^{\bar{Y} - \frac{X}{\bar{\beta}}} \quad (12)$$

Pravděpodobnost jevu závisí na počtu prvků, kde počet prvků je seřazen od nejmenší po nejvyšší hodnotu a je každé hodnotě přiřazeno pořadí od $i=1$ do $i=n$. Pro jednoduchý odhad se používá následný vztah (13).

$$F(i, n) \approx \frac{i - 0,44}{n + 0,25} \cdot 100\% \quad (13)$$

Pro snazší vytvoření směrnice se převede vztah (12) na logaritmické souřadnice, aby bylo možné získat pro další postup přímku, díky které je snazší vyjádřit směrnici.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1} + \left(\frac{t}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}} \quad (14)$$

Po úpravě se docílí vztahu

$$Y_i = \ln(t_i), \quad (15)$$

kde $\ln\{t_i\}$ je přirozený logaritmus. Pro každou pravděpodobnost průrazu se $F(i, n)$ vyjádří jako procentní přiřazená hodnota určená vztahem

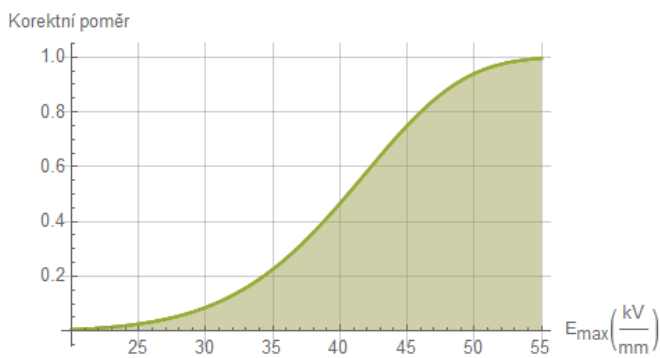
$$X_i = \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{F(i, n)}{100}\right)\right). \quad (16)$$

Pro velmi malý počet, typicky méně jak 15–20 průrazů, lze použít techniku nejmenších čtverců. Kvůli značně odlišným bodům, zakreslených ve Weibullově rozložení, je potřeba hodnotám přiřadit různé vážené průměry. Výpočet tohoto váženého průměru z X_i a Y_i je znázorněn ve vztahu (17) a (18), kde hodnoty w_i (*weightig factor*) jsou vážené faktory určené normou.

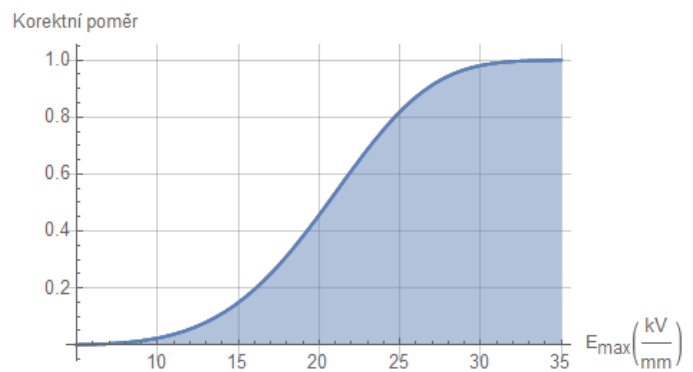
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^r [w_i X_i]}{\sum_{i=1}^r [w_i]} \quad (17)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^r [w_i Y_i]}{\sum_{i=1}^r [w_i]} \quad (18)$$

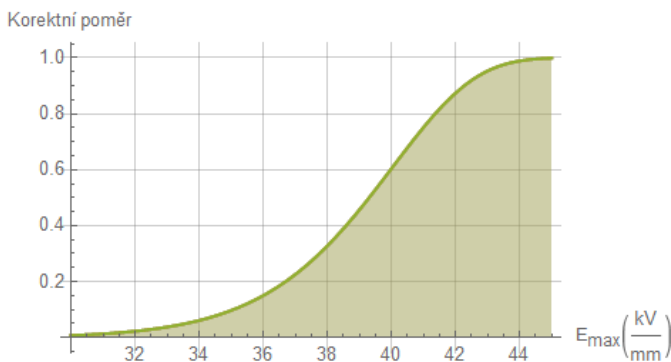
Z vypočteného váženého průměru se následně dosadilo zpět do rovnice (11) a (12), aby se zjistily dva nejdůležitější parametry, pro možné následné sestrojení Weibullova rozložení. V počítačovém softwaru Wolfram Mathematica se sestrojilo rozložení možné pravděpodobnosti průrazu, pro experimentální vzorky z materiálů ASA a PP. Vyobrazení této křivky je v závislosti elektrické pevnosti na korektním poměru, možné pozorovat na následujících obrázcích.



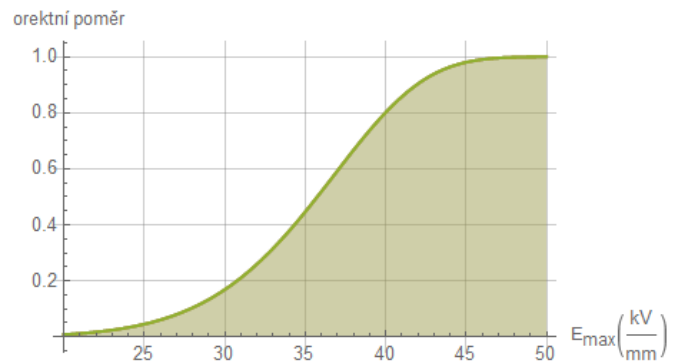
Obrázek 28- Weibullova rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky ASA_04



Obrázek 29- Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky PP



Obrázek 31- Weibullova rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky PET



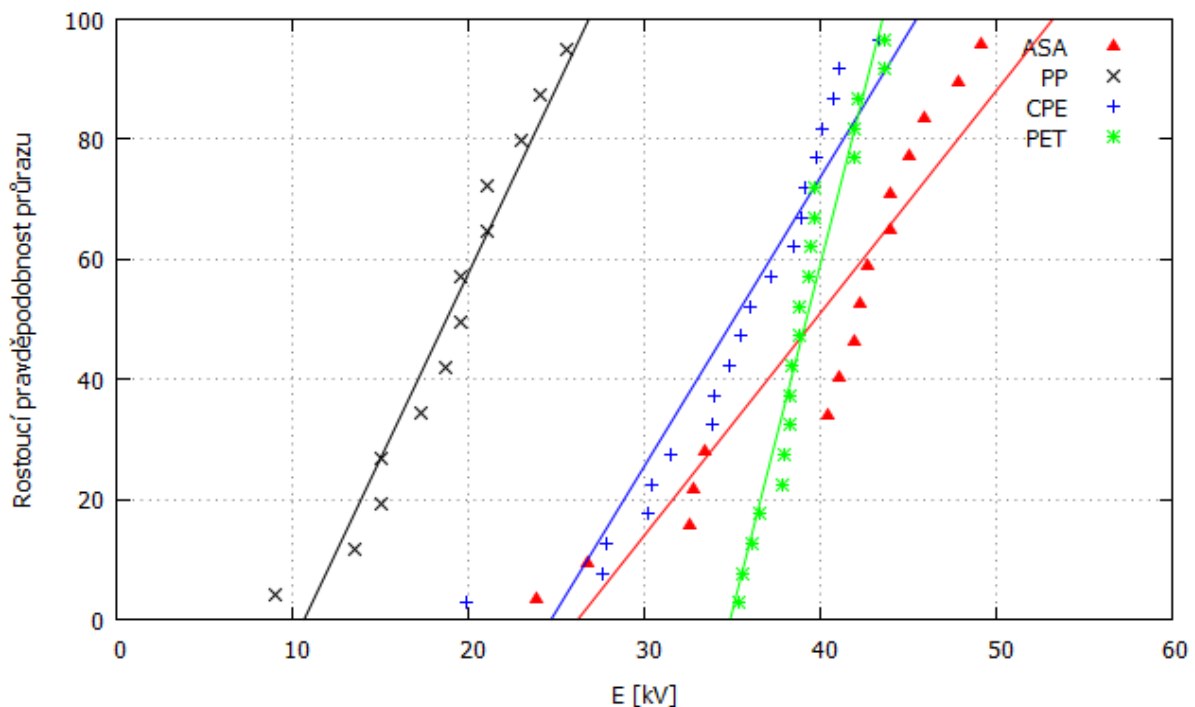
Obrázek 30- Weibullova rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky CPE

Ze vztahu (1) se získala elektrická pevnost jednotlivých vzorků a došlo ke korekci hodnot. Výsledné průměrné hodnoty průrazného napětí U_{peak} , elektrické pevnosti E_{max} a parametry Weibullova rozdělení jsou zaznamenány v Tabulka 7. ASA oproti Polypropylenu vykazuje vyšší elektrickou pevnost. Většina vzorků z PP se pohybovala kolem stejné odečtené hodnoty průrazného napětí, rozdílně od vzorků vyrobených z ASA. To znamená, že elektrická pevnost PP byla více stabilní. Při průměrné hodnotě byla pravděpodobnost průrazu velmi vysoká, což lze pozorovat i z chyby měření nebo sklonu pravděpodobnosti ve Weibullově rozdělení.

Vzorek	Počet	U_{peak} [kV]	Elektrická pevnost E_{MAX} [kV/mm]	Weibull – Parametr β [-]	Weibull – Parametr α [-]
ASA_04	16	17 ± 3	39 ± 7	6,72	42,86
PP	13	12 ± 3	20 ± 4	4,62	22,28
CPE	20	24 ± 3	35 ± 5	7,54	37,53
PET	20	25 ± 2	39 ± 3	16,49	40,19

Tabulka 7- Výsledky průrazného napětí U_{peak} , elektrické pevnosti E_{MAX} a parametry Weibullova rozdělení pravděpodobnosti pro vhodné materiály tisknuté na 3D tiskárně metodou krátkodobé zkoušky se střídavým napětím

Sklon křivky, který je možné vidět z Obrázek 28 a Obrázek 29, je u vzorku ASA_04 patrně vyšší než u vzorků z PP ve Weibullově rozdělení. Tento sklon je také lépe pozorovatelný na Obrázek 32, kde je hodnotami elektrické pevnosti proložena přímka. Sklon udává výkyv zjištěných hodnot na velikost pravděpodobnosti průrazu. Pokud by přímka byla kolmá na osu elektrické pevnosti, docházelo by vždy k průrazu od té hodnoty elektrické pevnosti, na kterou by byla vztyčena kolmice. Lze tedy konstatovat, že fluktuace elektrické pevnosti u vzorků ASA byla vyšší než u PP. To má za následek, že vzorek byl buď proražen vysoko nad hodnotu vyšší, než je jeho průměrná hodnota nebo velmi nízko oproti jeho průměru. Nejvyšší sklon ze všech měřených materiálů má PET. Porovnáním parametrů $\beta_{PET} = 16,49$ v Tabulka 7 a Obrázek 32 lze konstatovat, že PET při zkoušce se střídavým napětím, průrazné hodnoty oscilují velmi blízko jeho průměrné hodnotě. Navíc taky vykazuje skoro nejvyšší pevnost. Nicméně ASA má menší tloušťku, což vedlo ke snížení celkové elektrické pevnosti. Při vyšší tloušťce by vzorky vydržely vyšší namáhání elektrickým polem. Vzorky CPE se na AC zkoušce chovaly velmi obdobně jako ASA.



Obrázek 32- Srovnání dat Weibullova rozdělení pravděpodobnosti z Tabulka 7

5.2.4 Vyhodnocení krátkodobé zkoušky se střídavým napětím

V experimentu elektrické pevnosti byly použity vzorky kruhového tvaru, vyrobené 3D tiskem z běžně používaných materiálů viz Tabulka 1 a Tabulka 7. Nejprve se během první části měření zjistilo krátkodobou průraznou zkouškou, že nelze prorazit vzorky ASA_06 uvedený v Tabulka 3. Použitý zdroj (max 30 kV) nebyl dostatečně silný docílit průrazu, a tedy bylo potřeba vytisknout vzorky ASA_04. Vzorky ASA_06 se použily u druhé metody měření, a to u zkoušky atmosférickým impulzním napětím. Z výsledků tohoto měření lze konstatovat, že vycházející hodnoty vzorků se moc nerozcházel oproti druhé metodě a zjištěná elektrická pevnost nabývala pozoruhodných výsledků. Podle očekávání byla zjištěná naměřená data u zkoušky atmosférickým impulzním napětím vyšší než u krátkodobé zkoušky. U impulzní zkoušky dochází k elektrickému průrazu na rozdíl od krátkodobé zkoušky, kde nastává převážně tepelný průraz.

Z krátkodobé zkoušky materiál ASA_04 vykazuje podle Weibullova rozdělení pravděpodobnosti na Obrázek 28 a Obrázek 29, že přibližně kolem hodnoty 50 kV/mm by docházelo skoro k jistému průrazu, kdežto u Polypropylenu tato hodnota činí něco kolem 25 kV/mm. Pro PET a CPE zase 43 kV/mm. Z čehož lze usuzovat, že materiál ASA má lepší elektrickou odolnost oproti zbývajícím materiálům i při nízké tloušťce. Přesto oproti dalším vzorkům, docházelo u ASA k výraznějšímu rozběhu hodnot, což lze už usuzovat z parametru β u Weibullova rozdělení. Tento parametr udává tvar křivky, z kterého lze pozorovat, že při hraničních hodnotách průměrné hodnoty elektrické pevnosti má vyšší pravděpodobnost průrazu ten materiál, který má vyšší sklon ve Weibullově rozdělení. Tato skutečnost je také možno pozorovatelná na vyobrazených lineárních křivkách na Obrázek 32. Sklon přímky také vykazuje, že objekty vyrobené z ASA_04 na 3D tiskárně, měly více nerovnoměrné hodnoty průrazného napětí oproti vzorkům PET. Průměrné hodnoty, za použití krátkodobé zkoušky s lineárním nárůstem napětí, pro vzorky vyrobené z ASA_04 mají uspokojivé výsledky.

Vzorek	U_{peak} [kV]	Elektrická pevnost E_{MAX} [kV/mm]
ASA₁	18	41
ASA₂	12	26
ASA₃	10	23
PP₁	12	21
PP₂	5	9
PP₃	9	16
CPE₁	26	38
CPE₂	13	19
CPE₃	20	27
PET₁	24	37
PET₂	25	39

Tabulka 8- Vybrané hodnoty průrazného napětí a elektrické pevnosti pro vzorky uvedené v Tabulka 7

Porovnáním parametrů β v Tabulka 7 a Obrázek 32 lze usoudit, že vysoký sklon ze všech měřených materiálů má PET, kde $\beta_{\text{PET}} = 16,49$. Tištěné vzorky PET vykazují, díky tomuto pozorování, že elektrická pevnost byla stabilní, a tedy docházelo převážně k průrazům blízko jeho průměrné průrazné hodnoty. Nicméně ASA má menší tloušťku, což vedlo ke snížení jeho celkové elektrické pevnosti. Při vyšší tloušťce by vzorky vydržely vyšší namáhání elektrickým polem. Jinak podle Tabulka 7 měly materiály ASA, PET a CPE převážně podobnou průměrnou elektrickou pevnost.

Vzorky z CPE se na AC zkoušce chovaly velmi obdobně jako ASA. Jeho parametr $\beta_{CPE} = 7,54$ určující sklon křivky byl lehce vyšší než u vzorků z ASA, kde $\beta_{ASA} = 6,72$. Tedy fluktuace průrazných hodnot byla podobná, jak je možné si povšimnout v Tabulka 8. Výjimkou ve výsledcích s elektrickou pevností byly vzorky z PP, které vykazovaly velmi špatnou dielektrickou pevnost, jakož i poněkud mírný sklon jeho Weibullova grafu. Jeho parametr $\beta_{PP} = 6,72$.

Hodnota průrazného napětí pro materiál ASA činí $U_{peak} = (17 \pm 3) \text{ kV}$. Hodnota maximální pevnost je $E_{MAX} = (39 \pm 7) \text{ kV/mm}$ a parametr $\alpha = 42,86$. Vzorky vyrobené z PP nejsou oproti ASA_04 tolik odolné. Přesto lze předpokládat, že i tyto vzorky mohou najít uplatnění v elektrotechnice, energetice a dalších odvětvích. Zjištěná průměrná hodnota průrazného napětí u vzorků z PP je $U_{peak} = (12 \pm 3) \text{ kV}$ a pro maximální elektrickou pevnost hodnota činí $E_{MAX} = (18 \pm 4) \text{ kV/mm}$ a parametr $\alpha = 20,57$.

Při porovnání elektrické pevnosti zkoumaného výtisku ASA technologií FDM na krátkodobé zkoušce s elektrickou pevností udávající zdroj [60], lze konstatovat, že materiál vytištěný na 3D tiskárně technologií FDM, měl při menší tloušťce vyšší elektrickou pevnost. Z toho lze usoudit, že materiály vytištěné na 3D tiskárně technologií FDM, mají velký potenciál pro možné využití v elektrotechnickém průmyslu. Zdroj pro zjištění dielektrické pevnosti použil krátkodobou zkoušku se střídavým napětím. Hodnota elektrické pevnosti u materiálu ASA udávající zdroj je $E_{ZDROJ} = 35 \text{ kV/mm}$ při tloušťce 1 mm . Tištěný vzorek na 3D tiskárně FDM technologií měl elektrickou pevnost $E = 40 \text{ kV/mm}$ při tloušťce $0,45 \text{ mm}$.



Obrázek 33- Proražený vzorek PET na krátkodobé zkoušce s AC napětím

5.3 KRÁTKODOBÁ ZKOUŠKA S LINEÁRNÍM NÁRUSTEM STEJNOSMĚRNÉHO NAPĚTÍ

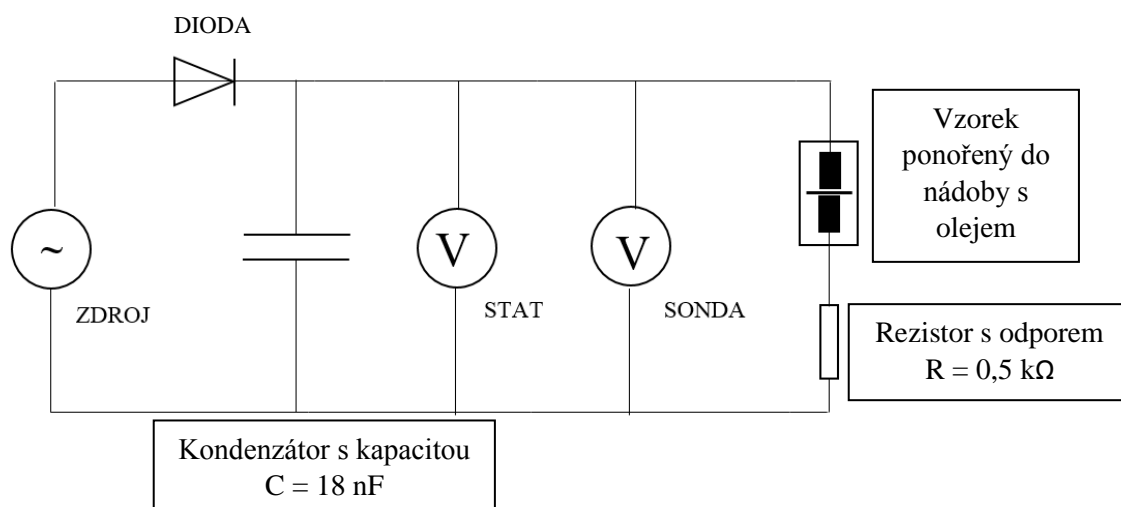
Následující experiment má stejný průběh, jako v metodě s lineárním nárůstem střídavého napětí v kapitole 5.2. Pro usměrnění střídavého napětí na stejnosměrné se vložila do obvodu dioda. Ta usměrní napětí, když se nachází v závěrném směru. To je v případě, kdy se na anodu diodu přivede záporný pól a na katodu kladný pól zdroje napětí. Proud sice v závěrném směru prochází diodou, ale je miniaturní. Vzhledem k proudu procházejícímu diodou v propustném směru je možné ho zanedbat. Po vložení diody do obvodu se na ní nachází jen kladné půlperiody napětí. V obvodu je díky této součástce stejnosměrné napětí. Zároveň se do obvodu přidal kondenzátor pro omezení pulsujícího výstupního napětí z diody. Tento kondenzátor je připojen paralelně k výstupu usměrňovače. V kladných půlperiodách se kondenzátor nabíjí. V záporných půlperiodách zdroje napětí se nashromážděná energie v kondenzátoru vybíjí zpět do obvodu, což vede k vyhlazení napětíové kladné půlvlny, jak je možné sledovat na Obrázek 37. Účinnost lepšího vyhlazení je závislá na velikosti kapacity kondenzátoru. Velikost vyhlazení je dána standardem a popsána viz kapitola 5.3.2.

Pro experiment se použily kruhové vzorky tištěné na 3D tiskárně Prusa s parametry popsány v Tabulka 9. Elektrody, mezi které se vkládal vzorek měly tvar válce pro lepší rozprostření elektrického pole po vzorku. Celý tento systém byl uzavřen v umělohmotné nádobě napuštěný minerálním olejem pro zamezení klouzavého výboje. Ten by jinak přeskočil mezi elektrodami díky nižší dielektrické pevnosti vzduchu. Před samotným měřením se provedla kalibrace měřícího systému kvůli nepřesnému odečtu hodnot z multimetru díky jeho možné chybě měření. K tomu se využil mnohem přesnější elektrostatický voltmetr, u kterého se naopak hůře odečítala naměřená hodnota. V době průrazu vzorku by bylo velmi obtížné určit možnou docílenou hodnotu průrazného napětí. Schéma zapojení měřícího systému je vykresleno v kapitole 5.3.1 na Obrázek 34. Regulace napětí probíhala pomalým lineárním navyšováním napětí při 2 kV/s, dokud vzorek nedosáhl hladiny průrazného napětí. Za pomoci multimetru se tato hodnota průrazného napětí zapsala a přes korekci se přepočítala na hodnotu napětí, kterou by ukázal elektrostatický voltmetr.

Identifikace vzorku	Počet	Tloušťka [mm]	Rozlišní tisku [μm]	Teplota trysky [$^{\circ}\text{C}$] / Teplota podložky [$^{\circ}\text{C}$]
ASA	30	0,75	150	265/110
PET	30	1	150	245/90
PP	30	1	150	215/100
CPE	30	1	150	265/110
ABS	30	1	150	255/110

Tabulka 9 – Parametry použitých vzorků při zkoušce s lineárním nárůstem stejnosměrného napětí

5.3.1 Schéma měření krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro kladnou a zápornou polaritu



Obrázek 34- Schéma zapojení měřícího systému pro zkoušku se stejnosměrným napětím pro kladnou polaritu

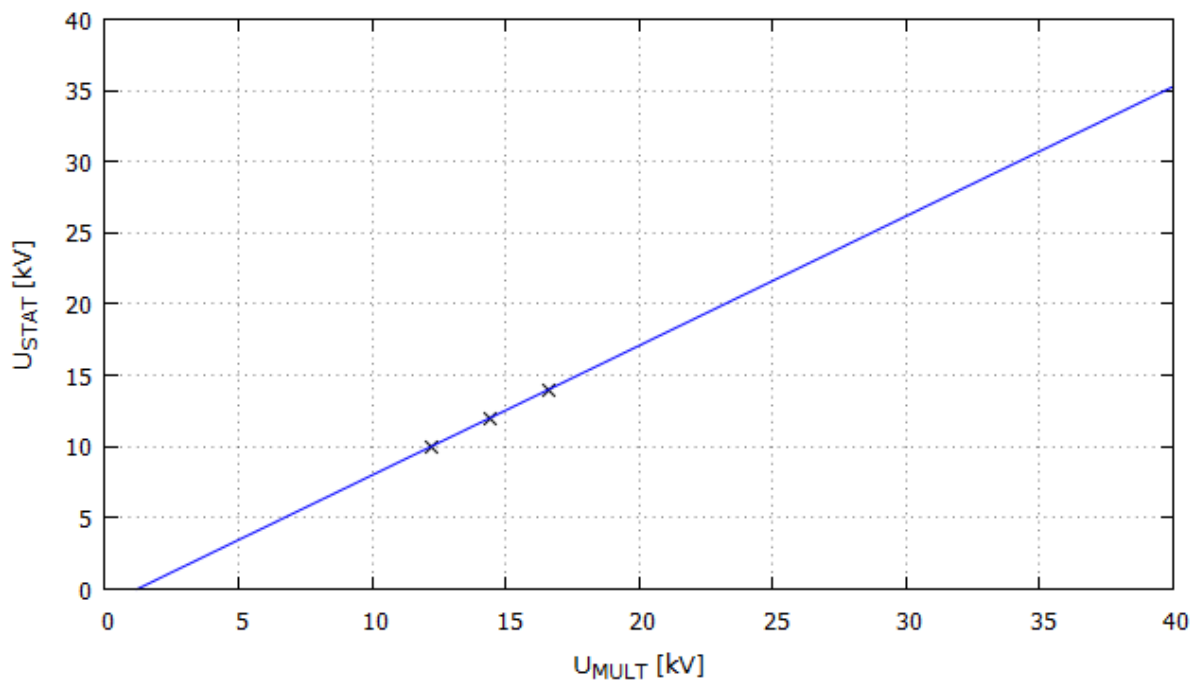
Pro zápornou polaritu, to je pro zápornou půlvlnu sinusového průběhu, se otočila anoda a katoda u diody. To se provedlo otočením diody tak, aby záporná půlvlna byla v propustném směru.

5.3.2 Kalibrace

Stejný princip kalibrace jako je popsán v kapitole 5.2.2 byl použit i pro měření se stejnosměrným napětím pro obě polaritu. Měřicí přístroj multimetru obsahoval možnou chybu měření. Proto se zkalibroval za pomoci elektrostatického voltmetru, který měl lepší přesnost měření, ale hůře se z něho odečítala průrazná hodnota napětí. Vybral se náhodný vzorek a na elektrostatickém voltmetru se nastavila nějaká počáteční hodnota napětí. Tato hodnota, lišící se od nastavené hodnoty se odečetla z multimetru. Výsledky kalibrace multimetru jsou umístěné v Tabulka 10. Ze zjištěných hodnot se usoudilo na základě sestaveného Obrázek 35, že se jedná o lineární průběh. Toto pozorování vede k závěru, že získané hodnoty se chovají podle lineární charakteristiky. Z programu Gnuplot se zjistily parametry A a B pro lineární vztah znázorněný v Tabulka 10. Veškeré hodnoty průrazného napětí jednotlivých vzorků, které byly získané multimetrem, se díky tomuto vztahu přepočítaly na skutečné hodnoty vstupního napětí uvedeného elektrostatickým voltmetrem.

U_{STAT} [kV]	U_{MULT} [kV]	$f(x)$
10	12,2	$f(x) = 0,9091 \cdot x - 1,0909$
12	14,4	
14	16,6	

Tabulka 10- kalibrace multimetru za pomoci elektrostatického voltmetru při zkoušce se stejnosměrným napětím

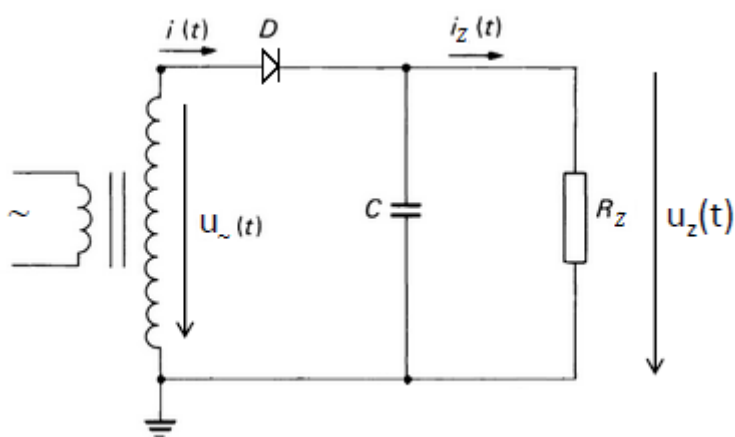


Obrázek 35- Lineární charakteristika korigovaných hodnot multimetru při zkoušce se stejnosměrným napětím

Dále bylo potřeba ověření velikost zvlněného napětí, které vznikne díky usměrnění střídavého napětí ze zdroje. Při vložení kondenzátoru paralelně k diodě, jak je znázorněno na Obrázek 36, bude průběh napětí pozvolna klesat, díky jeho následnému vybíjení energie zpět do obvodu. Tato hodnota energie kondenzátoru lze vypočítat přes vztah:

$$E = \frac{1}{2} C U^2 \quad (19)$$

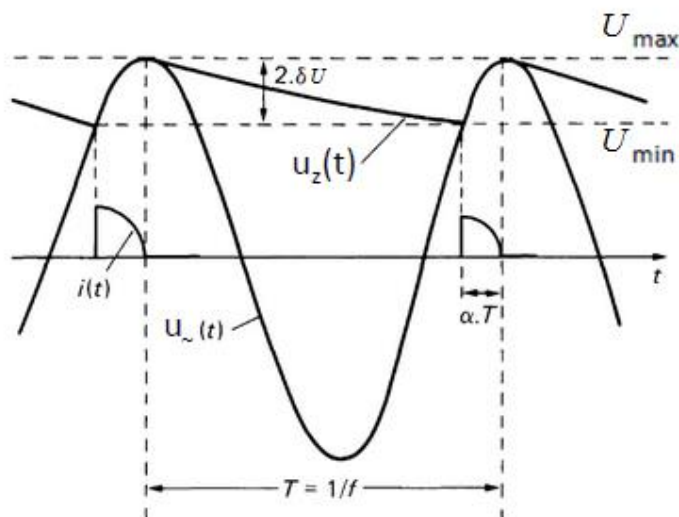
kdy při maximální hodnotě napětí kondenzátoru $U = 80 \text{ kV}$ a velikosti kapacity $C = 18 \text{ nF}$ se po dosazení docílí k hodnotě $E = 58 \text{ J}$.



Obrázek 36- Schéma zapojení zdroje stejnosměrného napětí (převzato z [61])

Zvlnění je zbytková periodická změna stejnosměrného napětí v napájecím zdroji. Toto zvlnění je způsobeno neúplným potlačením střídavého tvaru vlny po jeho usměrnění. Zvlnění s sebou nese řadu negativních účinků v DC, jako je zahřívání komponentů, vytváření šumu nebo nesprávného fungování použitých digitálních zařízení. Zvlnění může být redukováno elektronickým filtrem nebo regulátorem napětí [61].

Velikost tohoto zvlnění by neměla přesahovat rozdíl mezi maximálním a minimálním napětím, jak je znázorněno na Obrázek 37, také je možné získat toto zvlnění $2\delta U$ přes výpočet náboje [61].



Obrázek 37- Jednofázový polovodičový usměrňovač s kapacitou. Průběhy napětí a proudu se zátěží (převzato z [61])

Náboj přenesený do zátěže R_Z za periodu T se získá ze vztahu

$$Q = \int_T i_z(t) dt = \frac{1}{R_Z} \int_T u_z(t) dt = I_z T = \frac{I_z}{f} \quad (20)$$

kde I_z je střední hodnota proudu. Doba náběhu zvlnění je regulována parametrem α . Tento parametr se nazývá pracovní cyklus. Náboj je také dodáván ze zdroje během krátké doby vedení diody D během každého cyklu $t_c = \alpha T$. Proto náboj Q je také roven

$$Q = \int_{\alpha T} i(t) dt = \int_T i_z(t) dt \quad (21)$$

Proud zdroje $i(t)$ je střední hodnota po zvlnění. Tento proud má vyšší amplitudu než stejnosměrný proud. Zvlnění by mohlo být vypočteno na základě exponenciálního úbytku napětí během doby vybíjení $T(1-\alpha)$. Při předpokladu, že parametr $\alpha=0$ lze pak zvlnění δU vyjádřit ze vztahu

$$Q = 2\delta U C \rightarrow \delta U = \frac{Q}{2C} = \frac{I_z}{2Cf} \quad (22)$$

V tomto experimentu se postupně umístily dva vzorky mezi elektrody. Poté docházelo k zvyšování napětí, které se pozorovalo na osciloskopu. Po dostatečném přiblížení bylo toto zvlnění značně nepatrné. Z toho vyplynul závěr, že usměrňovaný průběh napětí se chová stejnosměrně a velikost zvlnění splňuje potřebné požadavky pro obvod [61].

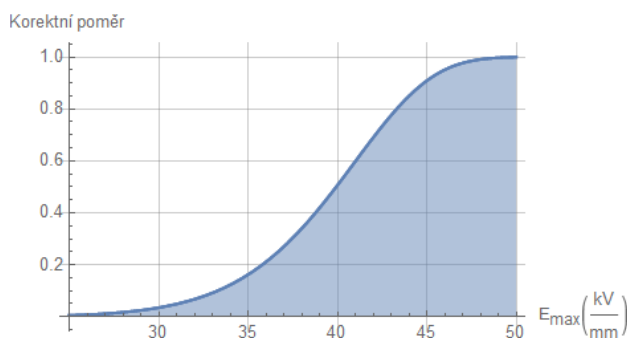
5.3.3 Naměřené hodnoty krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro kladnou polaritu

Před výpočtem elektrické pevnosti, získané ze vztahu (1), se nejprve provedla korekce hodnot průrazného napětí, které byly odečteny z multimetru pro jednotlivé proražené vzorky. Hodnoty se chovaly podle lineárního vztahu $f(x) = 0,9091 \cdot x - 1,0909$, kdy odečtená hodnota z multimetru odpovídala její pravé funkční hodnotě. Výsledné průměrné hodnoty průrazného napětí U_{peak} , elektrické pevnosti E_{max} a parametry Weibullova rozdělení jsou zaznamenány v Tabulka 11. Lze si povšimnout, že na rozdíl od původní Tabulka 9 se zde nenachází měřené vzorky z materiálu PP a ABS. Tato skutečnost je doprovázena silnými elektrickými vlastnostmi obou materiálů, a tedy na krátkodobé zkoušce s lineárním navyšováním stejnosměrného napětí se nepovedlo prorazit dostatečný počet vzorků k dalšímu zkoumání. U Polypropylenu vydržely všechny měřené vzorky. U ABS se povedlo prorazit jen jeden vzorek, a to díky možným defektům vzniknutých během tisknutí vzorku na 3D tiskárně, neboť tato hodnota průrazného napětí byla $U_{ABS01} = 10$ kV. Tato hodnota je značně nižší než u ostatních materiálů.

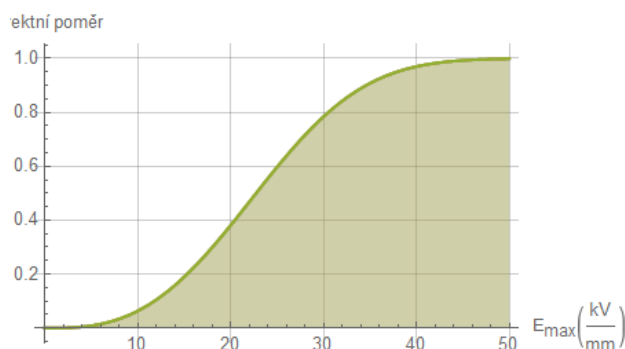
Vzorek	Počet	U_{peak} [kV]	Elektrický pevnost E_{MAX} [kV/mm]	Weibull – Parametr β [-]	Weibull – Parametr α [-]
ASA	12	33 ± 12	44 ± 16	2,73	50,59
PET	13	22 ± 8	22 ± 8	2,87	25,86
CPE	8	39 ± 5	39 ± 5	10,36	41,37

Tabulka 11- Zaznamenané výsledky průrazného napětí U_{peak} , elektrické pevnosti E_{MAX} a parametrů Weibullova rozdělení pravděpodobnosti zjištěné metodou krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro kladnou polaritu

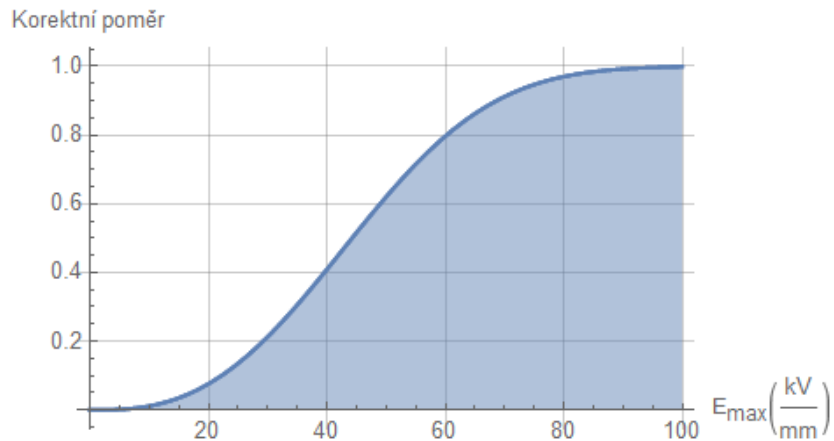
Podobně jako v metodě se střídavým napětím i zde se sestrojilo Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti průrazu jednotlivých materiálů, které popisuje proces elektrické degradace. Předpis pro Weibullovo rozdělení je popsán vztahem (10) a postupný výpočet dvou hlavních parametrů α a β představující sklon a střední hodnotu Weibullova rozdělení je důkladně rozepsán v kapitole 5.2.3. Výsledné průběhy pravděpodobnostního rozdělení pro elektrickou pevnost se nachází viz níže. K těmto průběhům se na základě naměřených hodnot sestrojila jejich lineární závislost elektrické pevnosti na pravděpodobnosti průrazu. Z tohoto vyobrazeného porovnání lze sledovat sklon křivky, a tedy jejich celkovou stability při namáhání elektrickým polem.



Obrázek 38- Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky CPE

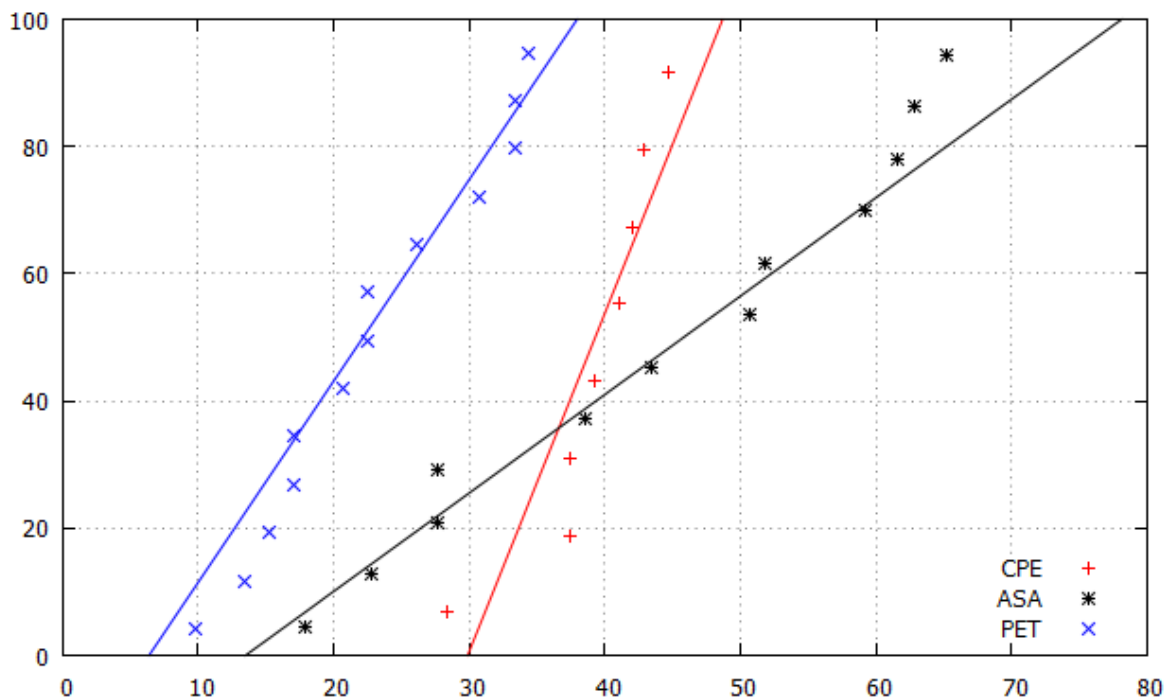


Obrázek 39- Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky PET



Obrázek 40- Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky ASA

Z Obrázek 41 je možné pozorovat sklony křivek. Lze usoudit, že vzorky z materiálu ASA vykazují nejnižší sklon, a tedy značně vysokou fluktuaci měřených hodnot. To může mít za následek, že při použití v praxi může dojít k průrazu izolace i za značně nižších hodnot průrazného napětí, než je jeho průměrná uvedena v Tabulka 11. Nejstabilnějšími vzorky se zdají být výtisky z materiálu CPE, které měly proti zbývajícím dvěma materiálům dobrou elektrickou pevnost. Také měly vysoký sklon ve Weibullově rozdělení pravděpodobnosti. Podobný byl i materiál PET, který měl nižší dielektrickou pevnost.



Obrázek 41- Srovnání sklonu Weibullova rozdělení zjištěných dat uvedených v Tabulka 11

5.3.3.1 Vyhodnocení krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro kladnou polaritu

Během testování se použily vzorky kruhového tvaru vyrobené 3D tiskem z používaných materiálů uvedených viz Tabulka 9. Kvůli vysoké elektrické pevnosti na krátkodobé zkoušce se stejnosměrným napětím se prorazily nakonec jen 3 druhy materiálu. U jednoho vzorku ABS se podařil průraz při $U_{ABS01} = 10$ kV. Měřený vzorek měl však pravděpodobně vnitřní defekty, v podobě vzniklých vzduchových mezer, které vedly k jeho snížení dielektrické pevnosti. Podle zdroje [16] se na střídavé zkoušce průměrná hodnota elektrické pevnosti materiálů ABS pohybovala kolem $E_{ABS} = 41,3$ kV/mm. Z toho lze usoudit, že vzorky na zkoušce se stejnosměrným napětím by měly pravděpodobně vydržet déle. Tato domněnka je také podpořena skutečností, že po následném vložení dalších vzorků ABS nebo PP do aparatury, vždy proběhl klouzavý výboj mezi elektrodami na určité mezi napětí, i když měření probíhalo v minerálním oleji.

Z naměřených hodnot v Tabulka 11 lze usoudit, že materiály ASA a CPE mají velkou dielektrickou pevnost. V případě ASA by tato pevnost byla pravděpodobně vyšší, kdyby jeho tloušťka byla též 1 mm jako u vzorků z CPE. Nicméně oproti ASA má materiál CPE vyšší sklon podle Weibulova rozdělení, kdy $\beta_{ASA} = 2,73$ a $\beta_{CPE} = 10,36$. Porovnání těchto sklonů je také patrné na Obrázek 41. Z tohoto pozorování lze říci, že vycházející hodnoty vzorků CPE méně kolísaly oproti vzorkům z ASA. Tedy kolem průměrné hodnoty dielektrické pevnosti byl očekáván průraz vzorku. Zároveň tento sklon u CPE vykazuje jeho dobré nastavení parametrů 3D tiskárny. Vzorky z PET měly lepší stabilitu než ASA podle Obrázek 41. I když se parametru $\beta_{PET} = 2,73$, tak měřítko $\alpha_{PET} = 25,86$. Dále PET vykazuje nižší známky dielektrické pevnosti v porovnání se vzorky z ASA.

Zároveň si lze povšimnout v Tabulka 11, že z původního počtu 20 vzorků se prorazila skoro jen polovina všech vytisknutých vzorků. Důvodem je podobná situace jako u výše zmíněných materiálů ABS a PP, kdy do určité velikosti elektrického pole se vytvořil klouzavý výboj. U materiálu CPE tento výboj nastal, když hodnoty napětí přerůstaly hodnotu kolem 50 kV. Zároveň elektrostatický voltmetr pozvolna začal ukazovat lehký nárůst proudu, což bylo znamení k následnému vzniku klouzavého výboje. Kvůli možnému poškození mřížkové struktury tepelným namáháním se nepokračovalo v nové zkoušce na použitím vzorku, který odolal namáhání elektrickým polem. Tyto vzorky se do celkového výsledku nezařadily, kvůli jejich nevypovídající celkové hodnotě průrazného napětí a značnému vychýlení od průměrné hodnoty. Lze však konstatovat, že materiál CPE vydrží díky této skutečnosti při dobrém vytisknutí značně vysoké hodnoty elektrické pevnosti. Podobně i ASA měla svoji horní hranici, kdy po jejím překročení docházelo k přeskočení elektrického výboje. Hraniční hodnota se pohybovala kolem 60 kV a stejně jako u CPE se výsledky nezahrnuly do výsledného výpočtu. Tato skutečnost podporuje, že ASA bude mít o něco vyšší celkovou elektrickou pevnost při dobrém nastavení 3D tiskárny. Zbylé vzorky se nepodařilo prorazit převážně kvůli klouzavým výbojům.

Vzorky PP na krátkodobé zkoušce, vykazovaly mnohem vyšší elektrickou pevnost na AC, že nebylo možné dosáhnout nějaké průrazné hodnoty napětí. Všechny vzorky PP vydržely nápor elektrickým polem. Pravděpodobně protože se jedná o nepolární materiál, a tedy nebylo možné vyhodnotit nějaké statistiky. Dále tato komplikace je pravděpodobně způsobena tokem elektronů. Během střídavého napětí tok elektronů kmitá po sinusovém průběhu a vzniká energie v podobě tepla, která se předává do struktury. Při dostatečně vysoké energii dojde k průrazu objektu. Oproti stejnosměrnému namáhání elektrickým napětím, kdy se tok elektronů vychýlí jen na jednu stranu, což patrně vytvoří třením méně energie. Tuto domněnku, ale nepodporuje druhý zkoumaný materiál ASA, který oproti střídavému napětí vykazuje horší elektrickou pevnost při zkoušce s DC po zahrnutí jeho tloušťky. Pokud by tloušťka vzorků ASA_04 byla silnější, měly by i pravděpodobně lepší elektrickou pevnost. Při AC mají vzorky ASA_04 o tloušťce 0,45 mm elektrickou pevnost $E_{MAX} = (39 \pm 7)$ kV/mm. U DC mají zkoumané vzorky o tloušťce 0,75 mm elektrickou pevnost $E_{MAX} = (44 \pm 16)$ kV/mm.

5.3.4 Naměřené hodnoty krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro zápornou polaritu

V této části měření se použily vzorky PET z Tabulka 9 kvůli jejich nejnižší elektrické pevnosti. Ostatní vzorky zvládaly nápor elektrického pole, a proto v tomto následujícím měření nebyly použity.

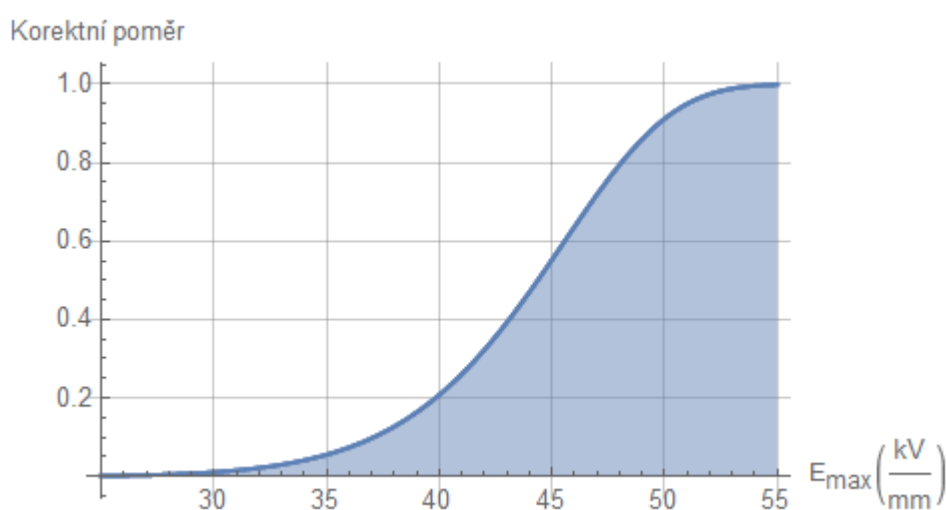
Zapojení měřícího systému je podle kapitoly 5.3.1 s rozdílem otočené diody, která propouští zápornou půlvlnu a kondenzátor vyhladí tento průběh do stejnosměrné podoby v záporném smyslu. U nehomogenního pole je rozdíl v elektrické pevnosti mezi kladnou a zápornou polaritou. Pro kladnou polaritu je kolem válcové elektrody silné elektrické pole, ze kterého se elektrony přesouvají k anodě a pomalé kladné ionty následně zmenšují elektrickou pevnost. V případě záporné polarity je proces opačný a v oblasti kolem anody se vytváří bariéra zeslabující elektrické pole [74].

Stejně jako u případu s kladnou polaritou se i v této části provedla korekce dat průrazného napětí. Pomocí vztahu (1) se vypočetla elektrická pevnost a podle postupu uvedeného v kapitole 5.2.3 se určily hlavní parametry Weibullova rozdělení. Z těchto výsledků se sestrojila Tabulka 12 a parametrů α a β se získal Obrázek 42. Pro lepší pozorování sklonu křivky se dále z naměřených dat vzorků PET sestrojilo lineární proložení naměřených dat v závislosti elektrické pevnosti na pravděpodobnosti průrazu.

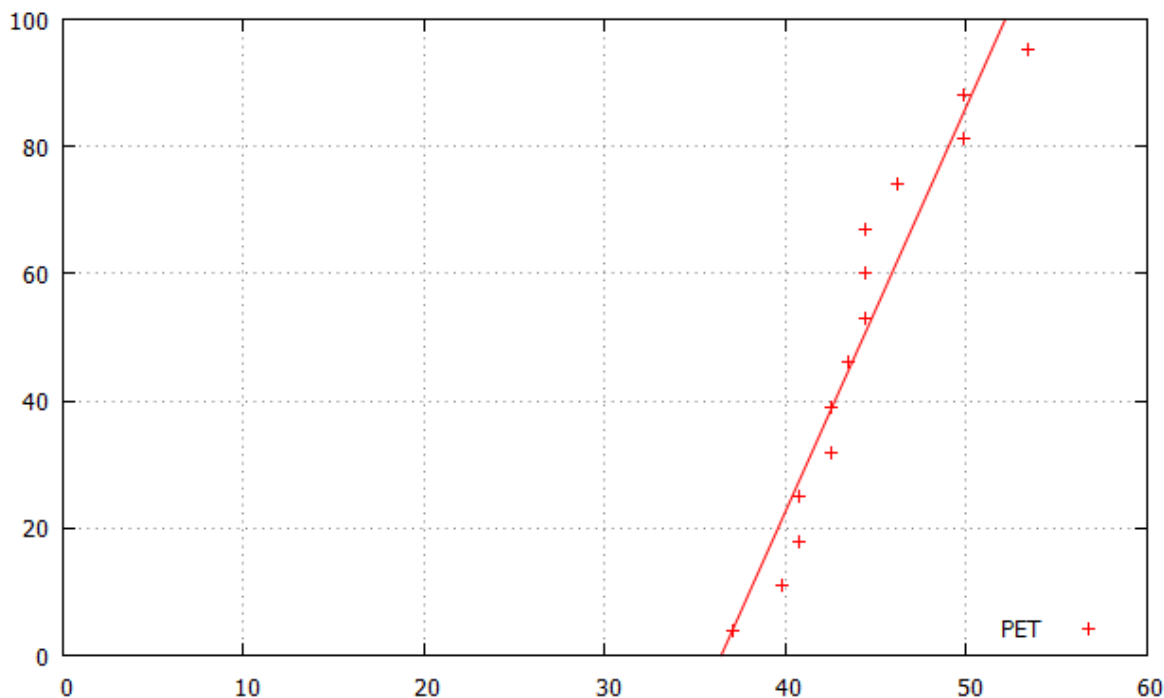
Vzorek	Počet	U_{peak} [kV]	Elektrický pevnost E_{MAX} [kV/mm]	Weibull – Parametr β [-]	Weibull – Parametr α [-]
PET	14	44 ± 4	44 ± 4	10,49	45,95

Tabulka 12- Zaznamenané výsledky zjištěné metodou krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro zápornou polaritu

Oproti kladné polaritě jsou hodnoty průměrné maximální elektrické pevnosti skoro dvojnásobné a podle sklonu křivky lze usoudit lepší fluktuaci měřených hodnot. K průrazu u vzorků docházelo kolem průměrné hodnoty průrazného napětí. Toto kolísání hodnot je patrné z Obrázek 43.



Obrázek 42- Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky PET pro zápornou polaritu



Obrázek 43- Weibullova rozdělení zjištěných dat vzorků PET uvedených v Tabulka 12

5.3.4.1 Vyhodnocení krátkodobé zkoušky se stejnosměrným napětím pro zápornou polaritu

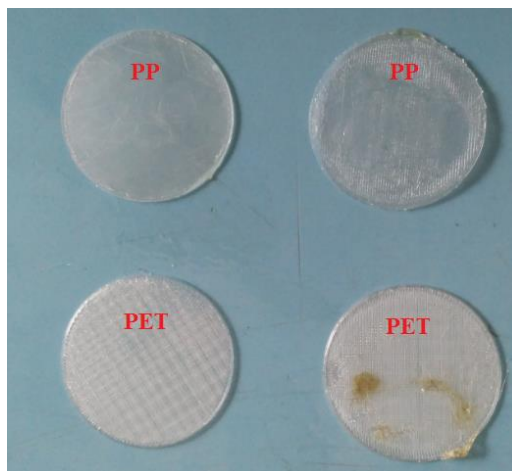
Při tomto měření se testovaly PET vzorky uvedené viz Tabulka 9. Ostatní materiály však vykazovaly vyšší elektrickou pevnost než na AC, a tedy je kvůli klouzavým výbojům a limitám měřicí aparatury nebylo možné změřit. Vzorky z PET měly na DC zkoušce se zápornou polaritou elektrickou pevnost $E_{MAX} = (44 \pm 4) \text{ kV/mm}$, což je při porovnání na DC zkoušce s kladnou polaritou skoro dvojnásobná hodnota, kde tato hodnota činí $E_{MAX} = (22 \pm 8) \text{ kV/mm}$. Podobně i sklon křivky, který lze pozorovat z chyby měření nebo weibullova rozdělení pravděpodobnosti je v případě DC se zápornou polaritou značně vyšší. Data byla více stabilní a u vzorků docházelo k průrazu kolem průměrné hodnoty. Veškeré použité druhy materiálů by našly možné uplatnění v praxi, kde by se využívala opačná polarita napětí.

Průměrné hodnoty průrazného napětí za použití krátkodobé zkoušky s DC opačné polaritě pro vzorky PET činí $U_{peak} = (44 \pm 4) \text{ kV}$. Velikost napětí a elektrické pevnosti je stejná, neboť tloušťka materiálu byla 1 mm , kdy po dosazení do jmenovatele ve vztahu (1) je výsledná hodnota stejná. Parametr $\alpha = 45,95$ a parametr $\beta = 10,49$. S porovnáním se vzorky PET na DC zkoušce s kladnou polaritou je $\alpha = 25,86$ a $\beta = 2,87$.

Během měření současně nastával podobný problém jako u ostatních materiálů měřených na DC, kdy některé vzorky PET byly schopné vydržet vysoké nápor elektrického pole, kdy kolem hodnoty 60 kV nastal klouzavý výboj. Kvůli možným vzniklým tepelným škodám na povrchu materiálu se vzorek pro další měření už nepoužil. Tyto vzorky se do celkových statistik nezařadily, kvůli jejich nevypovídající celkové hodnotě průrazného napětí.

6 MĚŘENÍ VLIVU DEFEKTU POVRCHU NA ELEKTRICKOU PEVNOST

Následující část zkoumá vliv defektu povrchu vzorku, vytištěného 3D tiskárnou metodou FDM na jeho celkovou maximální elektrickou pevnost. Zároveň smyslem tohoto pozorování bylo vyhodnotit vlastnosti jednotlivých, pozorovaných výtisků ohledně izolačních vlastností. Vzorky byly zprvu vizuálně a hmatově pozorovány podle pevnosti či dobré adhezi, která se na vzorcích projevovala průhledností či odlepováním vláken filamentu. Hlavní defekty pozorované následujícím měřením byly hloubky rýh mezi jednotlivými vytištěnými liniemi, povrchové nepřesnosti způsobené špatnou přilnavostí k povrchu a zaoblení vzorku vlivem možných nepřesností teplot podložky. Tyto deformace je možné pozorovat na Obrázek 44.



Obrázek 44- Vizuálně vybrané vzorky bez defektu (vlevo) a s defektem (vlevo) pro PP a PET

Samotná hloubka rýh by pravděpodobně měla mít nejvyšší preferenci, ohledně možné změny dielektrické pevnosti vzorku. Podle vztahu (1) hraje tloušťka materiálu důležitou roli v jeho celkové elektrické pevnosti, tedy působení elektrického pole na elektrony ve spárách, způsobených tímto defektem, kde elektrony díky získané energii více kmitají. To vede k vzrůstu tepla, viz více popsáno v kapitole 3.1. Celková potřebná energie k průrazu vzorků by měla být nižší, než kdyby byl vzorek ideálně hladký a bez rýh. Tyto rýhy vznikají pravděpodobně kvůli špatně nastavenému offsetu a měření povrchu by mělo podpořit tyto domněnky.

Hloubka rýh na povrchu vzorků byla zjišťována povrchovým profilometrem, který za pomoci citlivého hrotu vychyloval magnet kolem cívky, který vysílal elektrický signál do převodníku. Ten dále posílal signál do softwaru určeného pro zkoumání povrchu. Zde se následně upravil výstup profilometru a změřilo se nejvyšší vychýlení drážky. Zkoumané vzorky se pak propálily na krátkodobé zkoušce s lineárním navyšováním stejnosměrného napětí při kladné polaritě.

6.1 PROFILOMETR

Měřicí přístroj používaný na měření profilu povrchu se nazývá profilometr. Ten určuje velikost drsnosti povrchu. Existují různé druhy profilometru jako jsou kontaktní profilometry, bezkontaktní profilometry a časově rozlišené profilometry [62].

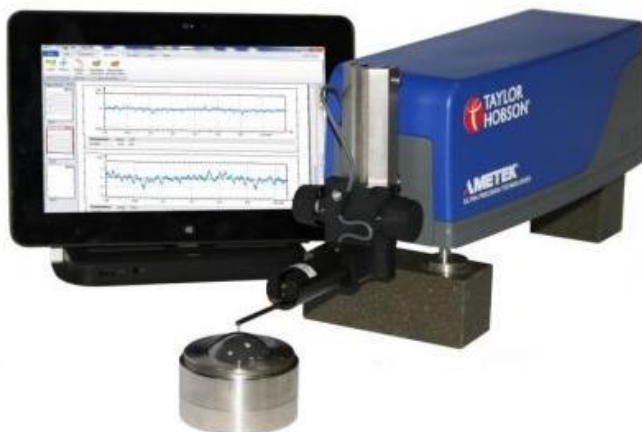
Kontaktní profilometr používá diamantový hrot, který se na povrchu pohybuje velmi lehkým tlakem tak, aby přenášel informace o topologii povrchu. Pohyb hrotu ovládá extrémně citlivý převodník, který převádí pohyb v elektrickém signálu. Generuje tedy analogový signál, který je převeden na digitální signál. Ten je uložen, analyzován a zobrazen v programu [62].

Poloměr diamantového hrotu se pohybuje od 20 nanometrů do 50 μm a horizontální rozlišení je řízeno vzorkovací rychlostí skenování a datovým signálem. Výhody kontaktních profilometrů zahrnují nezávislost povrchu a rozlišení. Také je to přímá technika bez požadovaného modelování. Kontaktování povrchu je často výhodou ve špinavých prostředích, kde nekontaktní metody mohou namísto samotného povrchu měřit povrch plný nečistot. Jelikož je hrot v kontaktu s povrchem, není tato metoda citlivá na odrazivost povrchu nebo barvu [62].

6.1.1 Příklad Form Talysurf Intra Touch

Vzorky v následujícím experimentálním zkoumání byly měřeny na povrchovém profilometru s názvem Form Talysurf Intra. To je přenosný hrotový nástroj pro měření a analýzu struktury povrchu. Přístroj se skládá převážně z 50 mm Traverse Unit, což je příčná jednotka, která obsahuje motor, převodovku a související obvody, které se dotýkají hrotu přes měřený povrch. Komunikace s řídicím modulem procesoru probíhá přes propojovací kabel nebo infračervené propojení. Zařízení umožňuje měření až do délky 50 mm. Přístroj používá pouze přímočarý pohyb po povrchu objektu, aniž by vybočoval do stran. Výsledkem je pak nerovnost povrchu v linii, ve kterém docházelo k posunu hrotu [63].

Přístroj má rozsah měřidel 1 mm s rozlišením měření 16 nanometrů. Přístroj může být použit pro různá měření nebo může být předem naprogramován, pro provádění opakovaných sekvencí měření. Na konci pojezdové jednotky je hřídel s nastavitelnou výškou hrotu. Může být zvednuta a spouštěna otáčením vertikálního nastavovacího knoflíku na boku nebo za pomoci speciálního softwaru [63].



Obrázek 45- Profilometr Form Talysurf Intra Touch s programem Talyprofile pro měření tvaru povrchu (Převzato z [76])

Proces zkoumání povrchu touto metodou by měl zahrnovat veškeré požadované vlastnosti, pro zjišťování vlivu na dielektrickou pevnost.

Povrchový profilometr měří drsnost povrchu, jeho zvlnění či výšku drážek od povrchu. Při nanášení roztaveného filamentu na povrch vrstvy u výtisků na 3D tiskárně, vznikají přesně tyto již zmíněné defekty. Proto je použití profilometru Talysurf pro následné bádání vlivu defektu na elektrickou pevnost, vhodnou a dostačující technologií [63], [64].

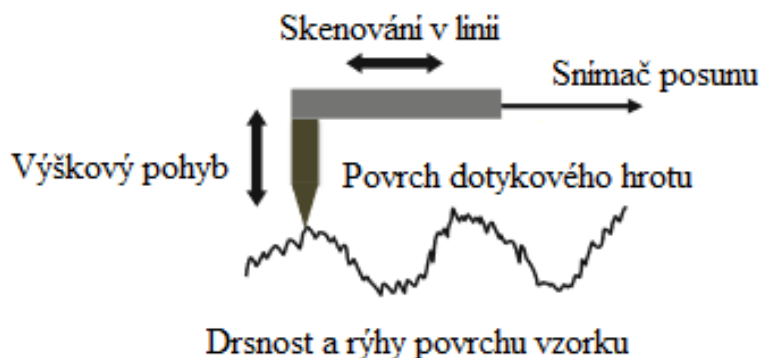
6.1.1.1 Princip povrchového profilometru

Princip fungování profilometru je podobné jako u gramofonové desky, kdy dochází k oscilaci jehly na povrchu objektu. Hrot je tvořen z malého diamantového krystalu, připevněného na samotném konci lehké, kovové tyče. Jak krystal vibruje v drážce, jsou jeho mikroskopické odrazy přenášeny po tyči, kde na jeho konci je cívka s magnetem. Jakmile jehla začne fluktuovat, dochází k vychylování magnetu kolem cívky, která začne generovat elektrický signál. Ten je přes převodník přetransformován na digitální signál a poslán do programu Talyprofile, kde dochází k vykreslování výchylek povrchu na zkoumaném vzorku [64].



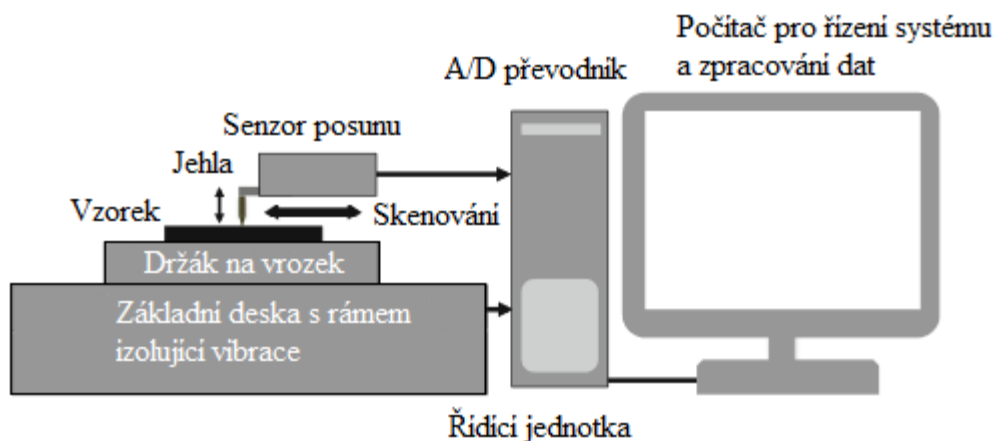
Obrázek 46- Diamantový hrot na kovové tyči pro profilometr Talysurf (Převzato z [63])

Povrchový profilometr měří profil drsnosti povrchu, textury povrchu, povrchové zvlnění, výšku rozdílů drážek od povrchu a další. Skenování doteku na hrubém povrchu objektu dochází jenom v jednom směru. Senzor posunu detekuje výchytky výšky doteku při skenování povrchu, jak je znázorněno na Obrázek 47. Systém povrchového profilometru také nabízí širokou škálu skenované oblasti od mikrometru po centimetry nebo změnu měřené výšky od mikrometrů po nanometry v závislosti na průměru hrotu [64].



Obrázek 47- Schéma principu povrchového profilometru (Převzato z [64])

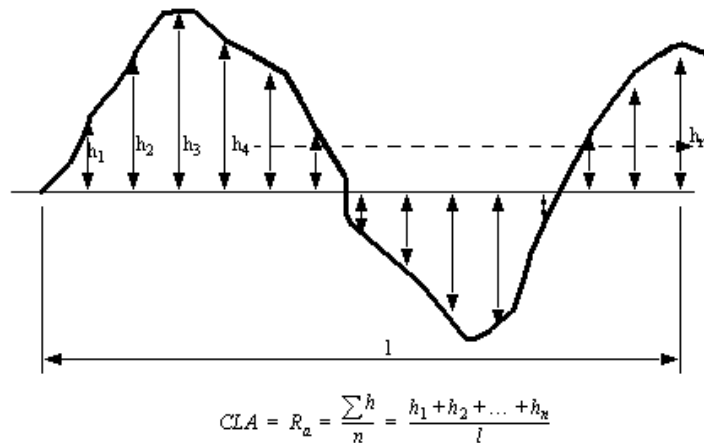
Povrchový profilometr se skládá z hrotu, snímače posuvu připojeného k jehle, držáku vzorku, podstavy s izolací proti vibracím, systémového ovladače s PC pro rychlost a délku skenování linky nebo z dalších zařízení znázorněných na Obrázek 48. Hlavní jednotkou povrchového profilometru je snímač posuvu. Ten se skládá z hrotu s lineárním, proměnným, diferenciálním transformátorem, pro detekci posuvu hrotu s průměrem od jednotek mikrometrů do několika desítek mikrometrů a s ovladačem pro úpravu zatížení jehly. Počítačový software určený pro celkové řízení systému a zpracování dat, může ukazovat parametry povrchového profilu, jako je aritmetická průměrná odchylka profilu drsnosti (R_a) [64].



Obrázek 48- Schéma zapojení povrchového profilometru (Převzato z [64])

6.1.1.2 Průměr drsnosti Ra

Průměr drsnosti (roughness average) je aritmetický průměr, absolutních hodnot souřadnic profilu drsnosti. Poskytuje popis výškových změn na povrchu. Jsou-li tyto odchylky velké, je povrch drsný. Pokud jsou odchylky malé, je povrch hladký. Tento parametr se nejčastěji používá pro monitorování výrobního procesu. Je vhodný pro povrchy náhodného typu a je statisticky velmi stabilní [65].

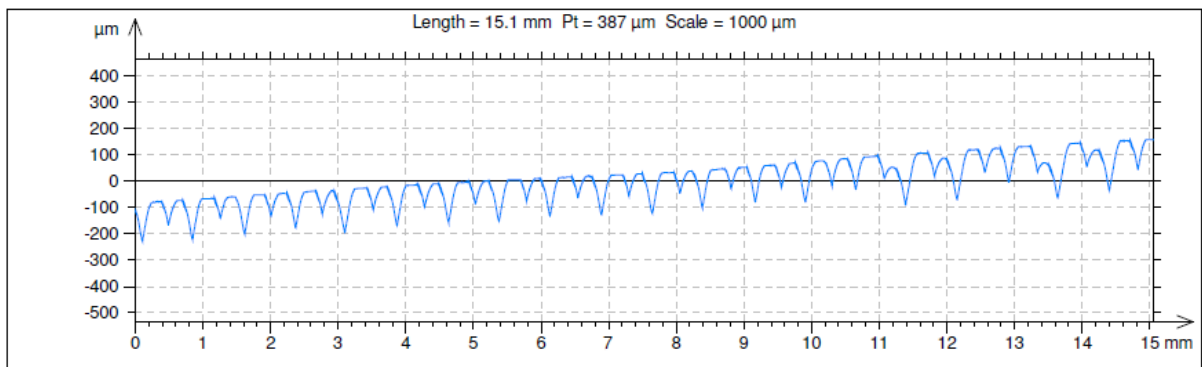


Obrázek 49- Výpočet drsnosti pomocí vzorků v rovnoměrně rozmístěných polohách (převzato z [65])

6.2 ZKOUMÁNÍ DRSNOSTI POVRCHU

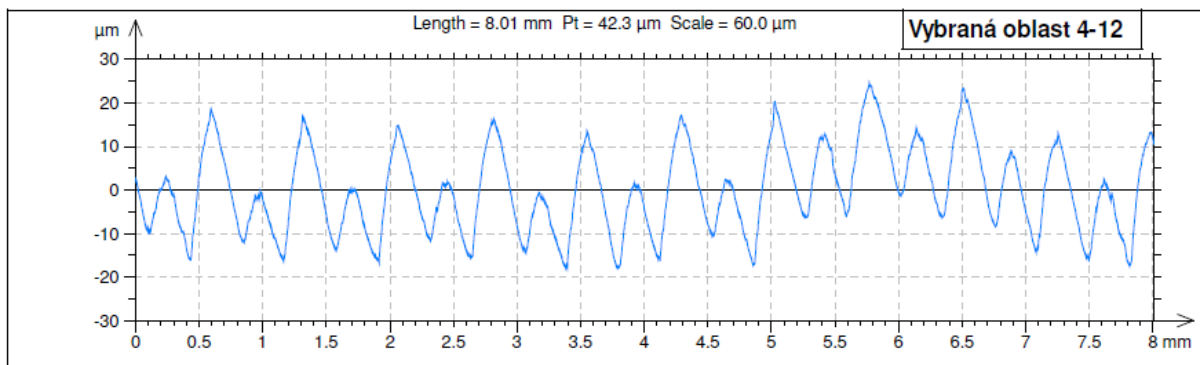
Cílem tohoto zkoumání bylo zjistit, zda samotný povrch vzorků vyrobených z různého druhu materiálů na 3D tiskárně, má vliv na jejich elektrickou pevnost. Zároveň účel tohoto bádání bylo vyhodnotit vlastnosti výtisků ohledně izolačních vlastností. Nejprve byly vybrány namátkově dva dobré a dva špatné vzorky podle prvotního pohledu a dotyku po jejich povrch. U vzorku označeného poznámkou „Špatný vzorek“ byly na povrchu shledány závady v podobě hrbolků a rýh, které pravděpodobně nastaly nepřesným nastavením tiskárny. Dále u tohoto vzorku bylo možné pozorovat nepřilnavost jednotlivých vláken filamentu k sobě a jeho případné zaoblení, které mohlo nastat díky tepelnému namáhání při tisknutí na 3D tiskárně. Vzorek s označením „Dobrý vzorek“ byl rovný, neměl na povrchu žádné nepatrné defekty a jednotlivá vlákna filamentu se od sebe neodlepovala.

Měření bylo provedeno na profilometru Form Talysurf Intra, což je přenosný hrotový měřicí přístroj, který měří a analyzuje strukturu povrchu. Hrot profilometru se umístil nad vzorek do části, která byla vybírána zhruba ze středu vzorku vždy 4 mm na obě strany, neboť se do tohoto prostoru umísťovaly elektrody a očekával se zde průraz. Poté se nastavila výška hrotu, která analyzovala tlak, jakým působí na povrch vzorku a digitálně ho vyhodnocovala do programu, podle kterého se zjišťovalo, zda hrot od povrchu vzorku oddálit nebo přiblížit. Následně došlo ke spuštění zařízení, které vedlo k posouvání hrotu napříč po povrchu do vzdálenosti 15 mm. Celý proces se opakoval pro další vzorky. Výstupem z programu Talysurf byl průběh povrchu vykreslen na Obrázek 50.

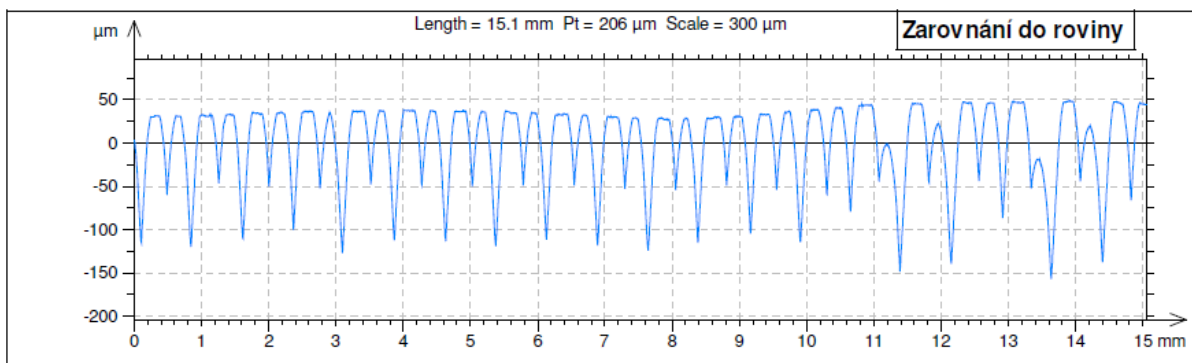


Obrázek 50- Surová data z Talysurfu pro vzorek ABS0601

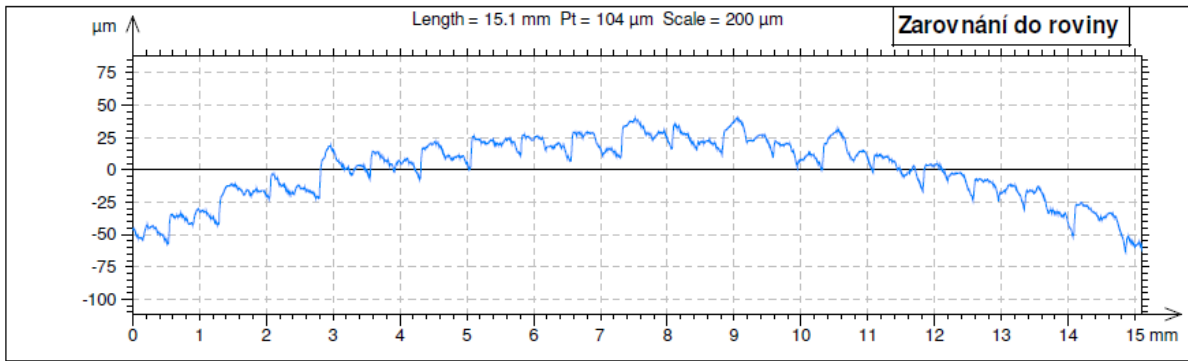
Samotný průběh se nejprve zarovnal do roviny kvůli nežádoucímu zkreslení průběhů, kde následná zajímavější část z něho byla zkoumána viz další Obrázek 51 a Obrázek 53. Nicméně u různých vzorků často docházelo k jeho zaoblení. Za pomoci programu bylo potřeba toto zahnutí povrchu odstranit. Zda má toto zahnutí vliv na výsledné hodnoty se zjišťovalo z automatického průměrování, kde při vysokém rozchodu došlo k odstranění zaobleného povrchu. Tato metoda nebyla použita v případech, kdy na průběhu vznikly abnormální zvláštnost, jak lze pozorovat na Obrázek 57 a Obrázek 58.



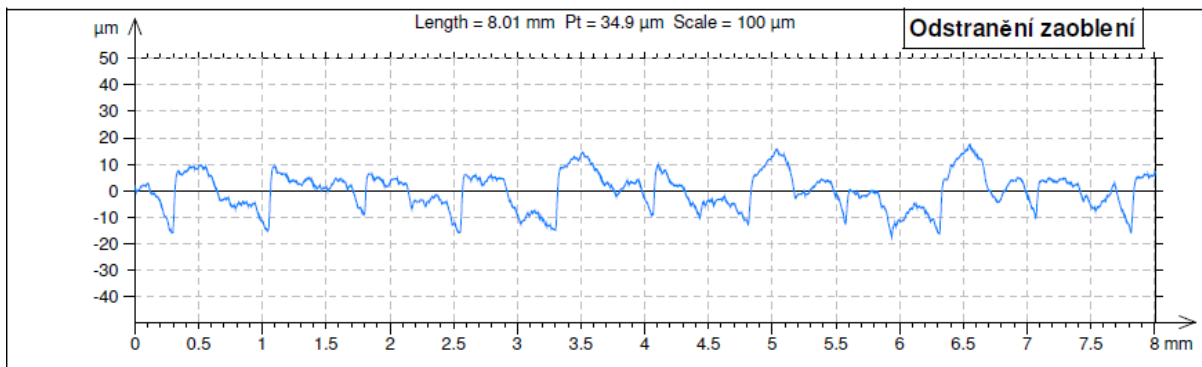
Obrázek 46- Vybraná oblast v intervalu 4-12 mm z původního rozsahu mezi 0-15 mm pro vzorek ASA0404



Obrázek 51- Zarovnání surových dat na střed pro vzorek ABS0601

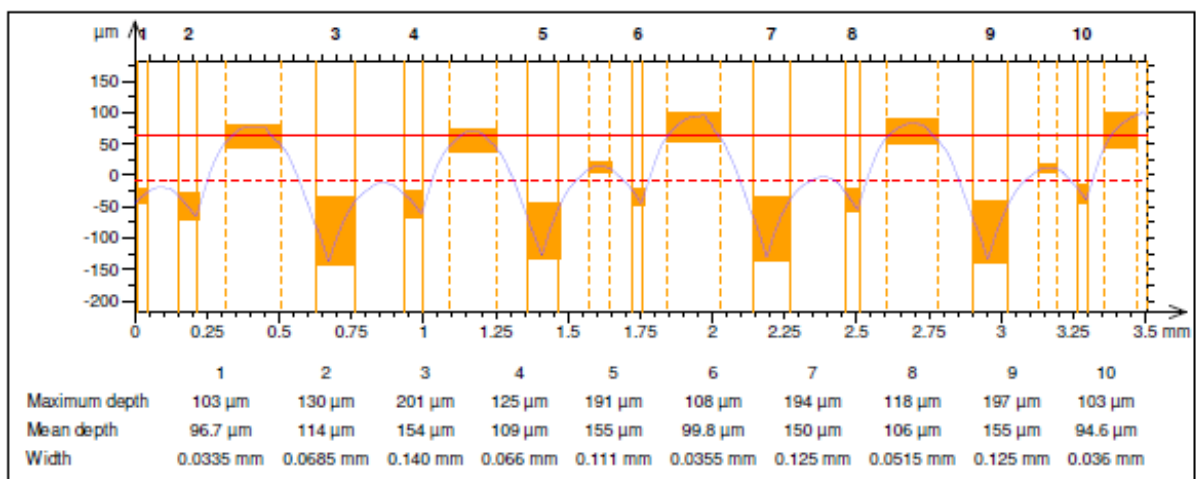


Obrázek 53- Zaoblený povrch vzorku PP0603 po jeho zarovnání na střed

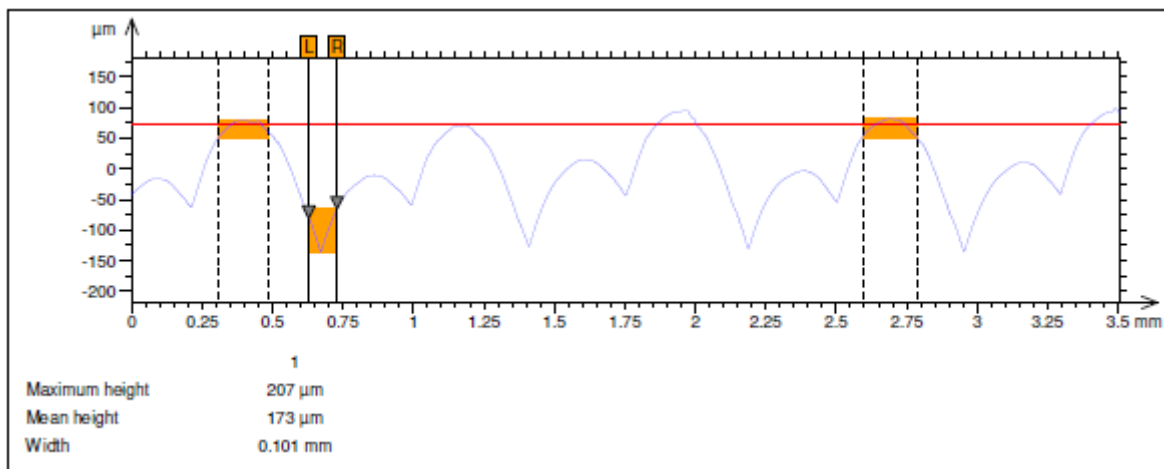


Obrázek 52- Odstranění zaobleného průběhu vzorku PP0603

Každý průběh byl analyzován jak manuální, tak automatickou metodou. Oproti automatické metodě, která vyhodnocovala nejvyšší místa v průběhu a poté určila jejich celkový průměr v podobě přímky a dále analyzovala jednotlivá nejnižší místa v tomto průběhu, se tento rozbor a hledání nejpříznivější vrcholové přímky hledal manuálně viz Obrázek 55.



Obrázek 54- Vyhodnocení drsnosti povrchu automatickou metodou v určité části pro vzorek Co01



Obrázek 55- Vyhodnocení drsnosti povrchu manuální metodou v té stejné části pro vzorek Co01

Po odečtení maximálních odchylek hloubek drážek od nejvyššího vrcholu, se přes kalkulačku, kterou program nabízí dopočetl aritmetický průměr drsnosti, který udává popis výškových změn na povrchu. Následně se dané označené jednotlivé vzorky prorazily na lineárně se navyšujícím stejnosměrném napětí a došlo k jejich porovnání. Kromě vzorků PP a ABS u kterých zdroj nebyl dostatečně silný na jejich překročení elektrické pevnosti.

ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	58.9	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rv	109	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rz	168	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rc	117	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rt	179	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	34.8	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rq	42.2	µm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rsk	-0.594		Gaussian filter, 0.8 mm
Rku	2.53		Gaussian filter, 0.8 mm
Material Ratio parameters - Roughness profile			
Rmr	0.126	%	c = 1 µm under the highest peak, Gaussian filter, 0.8 mm
Rdc	81.4	µm	p = 20%, q = 80%, Gaussian filter, 0.8 mm
Other 2D Parameters			
Roughness profile parameters			
RLo	23.7	%	Gaussian filter, 0.8 mm

Obrázek 56- Výpočet aritmetického průměru drsnosti Ra pro vzorek Co01

	Nejvyšší odchylna (automatické zprůměrování) [μm]	Nejvyšší odchylna (manuální zprůměrování) [μm]	Nejmenší odchylna (automatické zprůměrování) [μm]	R_A [μm]	El. pevnost [kV/mm]	Poznámka
PET0601*	96,1	82,2	13,6	6,96	18	Špatný vzorek
PET0602*	31,9	48,2	12,8	6,31	20	Špatný vzorek
PET0603	19,9	21,5	5,96	3,15	39	Dobry vzorek
PET0604*	34,1	33,7	15,5	2,5	14	Dobry vzorek
ASA0401	161	161	80,7	27,8	44	Špatny vzorek
ASA0402	29	32	9,96	4,94	56	Špatny vzorek
ASA0403	38,1	40	15,2	6,66	>60 ²	Dobry vzorek
ASA0404	34,8	42,3	16,4	6,5	57	Dobry vzorek
Co01	227	233	91	34,8	>50	Špatny vzorek
Co02	20,1	23,4	8,62	3,25	>50	Špatny vzorek
Co04	11,3	11,7	5,73	1,38	>50	Dobry vzorek
Co06	184	208	155	32,6	>50	Dobry vzorek
ABS0601	154	159	132	29,3	Nezmereno ³	Špatny vzorek
ABS0602	22,2	23,4	13,5	5,63	Nezmereno	Špatny vzorek
ABS0603	26,3	32,2	11,6	4,3	Nezmereno	Dobry vzorek
ABS0604	32	37,3	16,2	7,63	Nezmereno	Dobry vzorek
PP0601	62,7	67,8	23,1	11	Nezmereno	Špatny vzorek
PP0602	79,3	90,8	29,9	14,4	Nezmereno	Špatny vzorek
PP0603	26,1	29,7	11,5	3,7	Nezmereno	Dobry vzorek
PP0604	59,1	63	24,4	8,25	Nezmereno	Dobry vzorek

Tabulka 13 - Vyhodnocená data měření drsnosti povrchu

² U vzorků označeny symbolem > došlo ke klouzavému výboji i při opakovaném namáhání

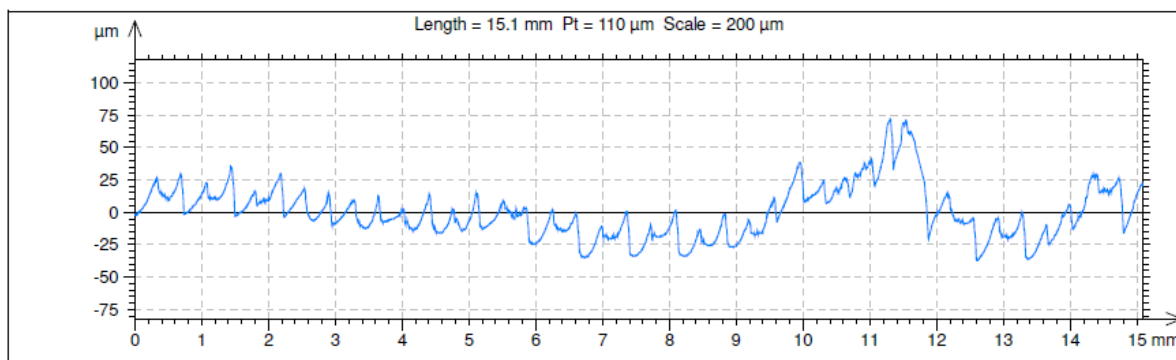
³ Vzorky s tímto označením nebyly propáleny na zkoušce se stejnosměrným napětím kvůli jejich známé vysoké dielektrické odolnosti z dřívějších experimentů

6.3 VYHODNOCENÍ VLIVU DRSNOSTI NA ELEKTRICKOU PEVNOST ZKOUŠKOU SE STEJNOSMĚRNÝM NAPĚTÍM

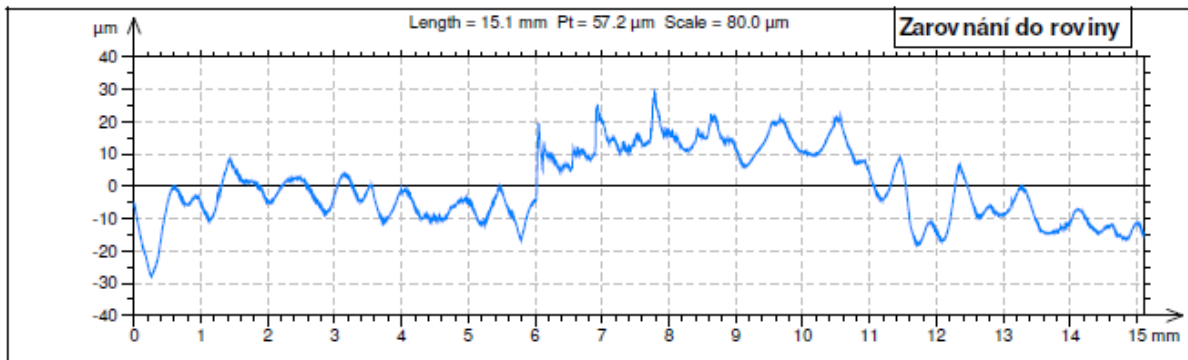
U vyhodnocování výsledků pomocí automatického zprůměrování docházelo ke značně pochybnému proložení vrcholové přímky či hledání nejvyšší odchylky, a proto jsou tyto hodnoty spíše orientační. Díky těmto hodnotám docházelo k ulehčení hledání nejvyšší výchylky u manuální metody, kde tato metoda byla oproti již zmíněné problematice u automatického zprůměrování více přesnější.

Vzorky označené znakem * měly značný defekt povrchu, který je možné vidět na surových datech viz Obrázek 57 a Obrázek 58. Tento defekt mohl být způsoben během analýzy povrchu přístrojem. V místnosti nebyly úplně vhodné podmínky pro měření, neboť hrot profilometru byl tak citlivý, že nesmělo dojít k posunu žádného předmětu, který by jakkoliv vyvolal sebemenší vibrace, protože by to mělo vliv na výsledný průběh, který profilometr zaznamenal a ochrana proti vibracím v takovéto míře nefungovala. Tato domněnka je i podpořená faktem, že při náhlé situaci způsobující vibrace (jako např.: pohnutí židlí, dupání, ...), nastalo vychýlení citlivého, měřicího zařízení. To mělo za následek, že průběh náhle vyskočil o 30násobek původního tvaru. Pravděpodobněji ale tento defekt nastal špatným nastavením offsetu na 3D tiskárně, která způsobila rýhy na samotném povrchu.

Výška defektu u vzorku PET0601 byla 82,2 μm a vzorku PET0604 byla naměřena hodnota 33,7 μm . To je zhruba 3–1,5násobek původního tvaru. Tato skutečnost pravděpodobně nastala kvůli příliš velkému množství materiálu v trysce. To mělo za následek, že se najednou materiál ve velkém množství natiskl na vzorek. Vzorek s tímto značným defektem vydržel oproti ostatním vzorkům z tohoto materiálu mnohem méně, což lze vidět z elektrické pevnosti v Tabulka 13. Skutečnost, že nejspíše drsnost povrchu závisí na celkové elektrické pevnosti napomáhá vzorek PET0603, který má oproti ostatním právě menší odchylku a velkou elektrickou pevnost.



Obrázek 57- Pozorovaná nerovnost povrchu vzorku PET0601 v rozmezí od 9 do 12,5 mm



Obrázek 58- Pozorovaný defekt v rozmezí od 5 do 12 mm na povrchu vzorku PET0604

Naneštěstí tuto hypotézu vylučují vzorky ASA a Co-polyester, které i při neočekávaném vysokém kolísání odchylek neměly v závěru žádný vliv na výslednou elektrickou pevnost. Odchylka vzorku ASA $h_{ASA0401} = 161\mu\text{m}$ a elektrická pevnost $E_{ASA0401} = 44\text{ kV/mm}$. CPE mělo odchylku $h_{C001} = 227\mu\text{m}$ a elektrickou pevnost E_{C001} vyšší než 50 kV/mm . Tyto vysoké výchylky mohly být způsobeny špatným nastavením offsetu.

Dále často docházelo ke komplikacím, kde určit maximální výchylku, protože většina křivek měla pozoruhodný průběh, u kterého bylo též problematické určit horní průměrnou přímkou od které se odečítala výsledná odchylka.

Zbylé vzorky se během měření nepodařily prorazit lineárním navyšováním DC napětí s kladnou polaritou, kvůli vysoké stabilitě jejich elektrické pevnosti. Proto jsou v Tabulka 13 zaznamenány jen některé hodnoty. Výsledný povrch vzorků mohl být tedy nesprávně vizuálně určen.

Vzhledem k tomuto malému zaznamenanému množství dat, není možné cílevědomě prokázat, zda drsnost povrchu má na samotnou elektrickou pevnost vliv. Ačkoliv se očekávalo, že vzorek s vysokou odchylkou drsnosti povrchu bude mít výrazně slabší elektrickou pevnost, tak v závěru tyto vzorky dosáhly úctyhodných výsledků, oproti vzorkům s nižší odchylkou drsnosti povrchu. Proto se zprvu může zdát, že drsnost povrchu na elektrickou pevnost nemá vliv. Pro lepší odhad by bylo třeba vybrat namátkově několik vzorků a nechat je podrobit analýze na profilometru. Následně by z výsledných průběhů došlo k případnému označování vzorků. Po celkové studii jednotlivých vzorků by se až potom nechaly prorazit na krátkodobé zkoušce.



Obrázek 59- Průřez vzorku PET0603 na DC zkoušce s kladnou polaritou

7 VÝSLEDKY A DISKUZE

Jedním z cílů bakalářské práce bylo provést několik metod měření izolačních vlastností a na základě pro využití v praxi, zjistit nejvhodnější metodu měření izolačních vlastností. Následně se z celkového experimentu, určil nejlepší vytištěný vzorek FDM technologii ohledně jeho izolačních vlastností a porovnal se jeho zjištěné elektrické vlastnosti s jinými zdroji. Dále se také provedla diskuze ohledně měřených materiálů a jejich porovnání s vybraným materiálem.

7.1 VYHODNOCENÍ METOD MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ PEVNOSTI

Během měření vysokého napětí bylo potřeba zabránit výskytu povrchových výbojů, které by jinak negativně ovlivnily měření. Proto byly pro všechny metody, vzorky ponořeny do přírodního izolačního oleje. Ten má podobnou permitivitu jako měřené vzorky, takže nedocházelo k přeskokům klouzavého výboje mezi elektrodami. Díky poměrně vysoké dielektrické pevnosti použitého oleje byla pravděpodobnost výskytu povrchových výbojů minimalizována [66].

Při atmosférickém impulzu byl tvar použitých napěťových impulsů v souladu s normou IEC 60060-3. Zároveň během měření vykazovaly měřené vzorky vysokou dielektrickou pevnost. V praktickém použití se však atmosférický impulz v elektrotechnice spíše nenachází.

V dnešních podmínkách se více využívá AC zkouška, neboť většina technických zařízení funguje na bázi střídavého napětí. Krátkodobá zkouška s AC napětím lze využít v oblasti výroby a distribuce energie, kde se testuje dielektrická pevnost izolačních materiálů při střídavém napětí se síťovou frekvencí 50 Hz [66]. Proto by tato metoda měla být použita i na dalších budoucích vzorcích. Pokud AC zkouška zjistí dobrou dielektrickou odolnost u jiných vzorků, nebude třeba zjišťovat chování na krátkodobé zkoušce se stejnosměrným napětím. Elektrická pevnost u DC se zvýší díky horší maximální průrazné energii. Tento proces je dále popsán v kapitole 3.1 nebo kapitole 5.3.31.

Měření elektrické pevnosti krátkodobou zkouškou s DC napětím bylo provedeno se stejnými elektrodami, jako v testu se střídavým napětím. Vzorky byly v DC zkoušce namáhány jak kladným, tak záporným napětím. Při záporné polaritě byla elektrická pevnost měřených vzorků vyšší než u kladné polarity. Je to z toho důvodu, že u kladné polarity je kolem válcové elektrody silné elektrické pole. Během záporné polarity je však proces opačný. V oblasti kolem anody se vytváří bariéra zeslabující elektrické pole. Zkoušku s DC napětím je možné využít v elektrotechnickém průmyslu, kde je kladen důraz na elektrickou pevnost materiálu.

7.2 VYHODNOCENÍ VZORKŮ

Ze zkoumaných materiálů lze vybrat ten nejlepší pro každý typ napětí. U první metody zkouška impulsním napětím je z výsledků vidět, že materiál s nejvyšší dielektrickou pevností byla ASA, kdy $E_{ASA_06} = 81 \text{ kV/mm}$. Podle článku [66], ale měl materiál PP také relativně vysokou elektrickou pevnost. Proto by bylo možné uvažovat použití PP v izolačních systémech pracujících pod impulsním napětím. Nicméně pro jeho možné použití by bylo potřeba použít profesionální průmyslové tiskárny.

U zkoušky se střídavým napětím se použily čtyři materiály. Původně se použil ještě vzorek ASA_06, ale kvůli jeho vysoké elektrické pevnosti nebyl použitý zdroj dostatečně silný, aby docílil průrazu. Podle Weibullova rozdělení a zjištěných hodnot měly měřené vzorky ASA_04, CPE a PET vcelku podobně výsledky elektrické pevnosti. Jen vzorek PP vykazoval při této zkoušce velmi špatnou dielektrickou pevnost a vcelku mírný sklon v jeho Weibullově rozdělení. ASA_04 a CPE vykazovaly podobné tvary křivek uvedené parametrem β . Tento parametr udává sklon křivky, z kterého lze pozorovat, že při hraničních hodnotách průměrné hodnoty elektrické pevnosti má vyšší pravděpodobnost průrazu ten materiál, který má vyšší sklon ve Weibullově rozdělení. V praxi bývají izolační systémy namáhány spíše slabými elektrickými poli, která odpovídají velmi nízkým pravděpodobnostem poruchy. Parametry Weibullových grafů tedy mohou v některých případech hrát důležitou roli v návrhu izolačního systému než parametry měřítka. Parametr β může také určovat kvalitu, spolehlivost a reprodukovatelnost výroby materiálu [66]. Z tohoto pohledu se jeví PET s $\beta = 16,49$ jako optimální volba ze sady zkoumaných materiálů. Nicméně vzorky z ASA_04 měly oproti ostatním materiálům nejnižší tloušťku. Pokud by jeho tloušťka byla vyšší tak i jeho elektrická pevnost by byla vyšší podle vztahu (1) a vzorku ASA_06, který nešel v této zkoušce prorazit.

U vzorků z ABS a PP nebylo možné provést vyhodnocení na DC zkoušce. Kvůli jejich vysoké elektrické pevnosti, vždy došlo ke klouzavému výboji. Měření by bylo možné provést, pokud by byla menší tloušťka vzorku. Přes potíže s měřením se PP zároveň jeví jako nejvýkonnější materiál, kvůli jeho nepolárnímu chování. U nepolární molekuly se totiž shoduje těžiště pozitivních jader a rotujících elektronů. Vzhledem k symetrii nemají nepolární molekuly permanentní dipólový moment. Když jsou nepolární molekuly vystaveny vnějšímu elektrickému poli, pozitivní a negativní náboj v molekulách je přemístěn v opačném směru. Toto posunutí pokračuje, dokud není vnější síla na nábojích vyvážena obnovovací silou způsobenou vnitřním molekulárním polem. To má za následek zvýšení elektrické pevnosti u vzorku PP. V případě polárních molekul se těžiště pozitivních jader a rotujících elektronů neshoduje. Polární molekuly mají trvalý dipólový moment. V nepřítomnosti vnějšího elektrického pole jsou elektrické dipóly náhodně rozprostřeny. V přítomnosti vnějšího elektrického pole se elektrické dipóly vyrovnají ve směru vnějšího elektrického pole [67].

U zkoušky DC s kladnou polaritou měl materiál ASA a CPE nejvyšší dielektrickou pevnost. ASA by však měla nejspíše ještě vyšší elektrickou pevnost, kdyby jeho tloušťka byla stejná jako u CPE, a to 1 mm . CPE má oproti materiálu ASA a PET vyšší sklon, a tedy nižší fluktuaci hodnot. Podle Weibulova rozdělení je parametr $\beta_{CPE} = 10,36$ a parametr $\beta_{ASA} = 2,73$. Vzorky z PET vykazovaly horší dielektrickou pevnost v porovnání se vzorky z ASA, ale za to lepší sklon. Při správném nastavení tiskárny však může materiál CPE vydržet značně vysoké hodnoty elektrické pevnosti. Velká část vzorků se kvůli klouzavým výbojům nepodařila prorazit stejně tak u vzorků ASA.

Během DC zkoušky při záporné polaritě se měřily pouze vzorky z PET. Zbylé materiály vykazovaly vysokou elektrickou pevnost, což vedlo ke klouzavým výbojům při namáhání elektrickým polem. Vzorky z PET měly na DC dvojnásobné hodnoty elektrické pevnosti a sklon křivky je v případě DC se zápornou polaritou značně nižší. Důvod vyšší elektrické pevnosti je pravděpodobně díky vytváření bariéry kolem anody, která zeslabuje elektrické pole [56].

Vzorky PP, který ač vykazovaly nejnižší elektrickou pevnost na zkoušce se střídavým napětím, tak u zkoušky na DC projevily vysokou elektrickou pevnost. Podle článku [66] materiál PP vykazoval také slušnou odolnost proti impulsnímu napětí oproti PET a ABS. Kvůli neúplným údajům na zkoušce s DC napětím je obtížné učinit jakékoli pevné závěry. ASA a PET měly velmi malé sklony svých Weibullových grafů na DC zkoušce.

Lze říci, že optimálním materiálem pro DC napětí a impuls je PP, zatímco pro AC napětí je to materiál PET. U systémů, ve kterých dochází ke všem třem typům napětí, se ale jeví ASA jako nejlepší kompromis.

7.2.1 Porovnání vybraného vzorku s jinou technologií

Při použití metody atmosférickým impulzním napětím se využila rázová zkouška, kdy vzorek ASA při tloušťce $0,6\text{ mm}$ měl maximální elektrickou pevnost kolem 81 kV/mm . Metoda využívající krátkodobou zkoušku s lineární regulací stejnosměrného napětí, byl vzorek ASA s tloušťkou $0,75\text{ mm}$ schopen vydržet 60 kV/mm . U Vybrané metody krátkodobé zkoušky s konstantní regulací střídavého napětí měl vzorek ASA s tloušťkou $0,45\text{ mm}$ dielektrickou pevnost kolem 40 kV/mm . Při vyšší tloušťce vzorku bude jeho elektrická pevnost pravděpodobně ještě vyšší.

Podle údajů ze zdroje [60] došlo u materiálu ASA o tloušťce 1 mm k průrazu při elektrické pevnosti $E = 35\text{ kV/mm}$. Tento zdroj použil metodu IEC 60243-1 k zjištění dielektrické pevnosti materiálu ASA. Tato metoda využívá krátkodobou zkoušku se střídavým napětím, při frekvenci v rozhraní mezi $48\text{--}62\text{ Hz}$. Z uvedeného zdroje při porovnání vyplývá, že materiál vytištěný na 3D tiskárně technologií FDM, měl při menší tloušťce vyšší elektrickou pevnost. Z toho lze usoudit, že materiály vytištěné na 3D tiskárně technologií FDM, mají velký potenciál pro možné využití v elektrotechnickém průmyslu.

Dále podle článku [66] byla nejvyšší pevnost pozorována ve vzorcích vytištěných za pomoci stereolitografie. Podle jiného článku [68] měly vzorky tištěné technikou polyjetového tisku nejvyšší dielektrickou pevnost ze všech ostatních vzorků tištěných jinými tiskovými postupy.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo představit 3D tisk FDM metodou a provést řadu metod měření izolačních vlastností. Z toho určit tu nejvhodnější metodu měření izolačních vlastností a následně zřad zkoumaných materiálů, vyhodnotit ten nejlepší materiál tištěný FDM technologií, ohledně jeho izolačních vlastností.

Úvodní část této práce je nejprve věnována konceptu FDM technologie. Následná část popisuje princip 3D tiskárny Prusa využívající metodu FDM a principu této technologie. Podle popsané teorie lze stanovit, že technologie FDM se v dnešní době řadí jako nejčastěji používaná forma 3D tisku. Zároveň je brána, jako nejlevněji používaná technologie. Díky její snadné dostupnosti ji lze využít nejenom v mnoha oborech průmyslu, ale i pro jednotlivce. Vývoj a celková využitelnost výroby je tedy mnohem širší. Nevýhodou FDM technologie je nalezení optimálního nastavení parametrů 3D tiskárny, které při chybném nastavení vedlo k řadě problémů s výtiskem, jako je třeba špatná adheze jednotlivých linií k sobě, deformace vzorku nebo vznik širokých mezer mezi linkami

Ze zkoumaných metod se dále zjišťovala ta nejpříznivější metoda. Podle dnešních podmínek se více využívá krátkodobá zkouška se střídavým napětím, neboť většina technických zařízení funguje na bázi střídavého napětí. Proto by tato metoda měla být použita i na dalších budoucích vzorcích. Měření elektrické pevnosti krátkodobou zkouškou s AC napětím bylo provedeno na válcových elektrodách. Během měření vysokého napětí bylo potřeba zabránit výskytu povrchových výbojů, které by jinak negativně ovlivnily měření, a proto byly vzorky ponořeny do přírodního izolačního oleje.

Během každé metody měl vzorek ASA vždy vysoké hodnoty elektrické pevnosti. Nicméně oproti ostatním vzorkům měla ASA malé sklony ve Weibullově rozdělení, což má za následek fluktuaci hodnot. Také vzorky PP měly vysokou elektrickou pevnost na DC zkoušce a materiál PP vykazoval slušnou odolnost proti impulsnímu napětí oproti PET a ABS. U AC zkoušky však materiál PP vykazoval nejnižší elektrickou pevnost ze všech měřených vzorků. Kvůli častému vzniku klouzavých výbojů, byly na zkoušce s DC napětím zjištěné neúplné údaje. Materiály ASA a PET měly velmi malé sklony svých Weibullových grafů na DC zkoušce. Stručně lze říci, že optimálním materiálem pro DC napětí a impuls je PP, zatímco pro AC napětí je to materiál PET. U systémů, kde ale dochází ke všem třem typům napětí, se ale jeví ASA jako nejlepší materiál.

Dále se pozoroval vliv defektu povrchu vzorku na jeho celkovou maximální elektrickou pevnost. Usuzovalo se, že hloubky rýh bude mít vliv na dielektrickou pevnost vzorků. Toto zkoumání bylo provedeno na povrchovém profilometru, který vyhodnotil povrch a na krátkodobé zkoušce zkoumaný vzorek prorazil. Nicméně kvůli malému množství zaznamenaného počtu dat lze těžko prokázat vliv drsnosti povrchu na elektrickou pevnost. Vzorky s vysokou odchylkou drsnosti povrchu totiž dosahovaly vysokých hodnot elektrické pevnosti oproti vzorkům, které měli odchylku drsnosti mnohem nižší. Například vzorek PET0601 měl odchylku $h_{PET0601} = 96,1\mu m$ a elektrickou pevnost $E_{PET0601} = 18 kV/mm$ a vzorek PET0604 měl $h_{PET0604} = 34,1\mu m$ a elektrickou pevnost $E_{PET0604} = 14 kV/mm$. Pro lepší odhad by bylo třeba větší množství dat a volené vzorky nejprve podrobit analýze na profilometru. Poté vzorky nechat prorazit na krátkodobé zkoušce.

Na základě zjištěných informací je pro výrobu a další použití v elektrotechnickém průmyslu nejlepší materiál ASA. Při 3D tisku o tloušťce vyšší než 1 mm s plnou výplní, lze za použití FDM technologie výtisky ASA použít pro výrobu krabiček nebo konstrukčních dílů aplikovaných v síti NN.

LITERATURA

- [1] HAHN, Brooke. History of 3D Printing. In: *Me3D* [online]. North Wollongong: Me3D Pty. Ltd., 2018 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://me3d.com.au/2018/history-of-3d-printing/>
- [2] FLINT, Josph. 3D Printers for Sale. In: *3D Insider* [online]. 3D Insider, 2019 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printers-for-sale/>
- [3] *Prusa 3D* [online]. Praha: Prusa Research a.s., 2020 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/>
- [4] GREGURIĆ, Leo. History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented?. In: *All3DP* [online]. All3DP [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [5] 3D tisk-metody. *14220.cz* [online]. 14220.cz [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>
- [6] The 9 Different Types of 3D Printers. *3D Insider* [online]. 3D Insider, 2019 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printer-types/>
- [7] 3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE. *ABC3D* [online]. ABC3D, 2020 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>
- [8] The History of 3D Printing. *Allthat3d* [online]. 2019 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.allthat3d.com/3d-printing-history/>
- [9] CHUA, Chee, Kah LEONG a Chu LIM. *Rapid prototyping: principles and applications*. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, 2003. ISBN 9789812381170.
- [10] CUIFFO, Michael, Jeffrey SNYDER, Alicia ELLIOTT, Nicholas ROMERO, Sandhiya KANNAN a Gary HALADA. Impact of the Fused Deposition (FDM) Printing Process on Polylactic Acid (PLA) Chemistry and Structure. *Applied Sciences*. vol. 7. 2017, 7(6). DOI: 10.3390/app7060579. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2076-3417/7/6/579>
- [11] ESPALIN, D., D. MUSE, E. MACDONALD a R. WICKER. *3D Printing multifunctionality: structures with electronics*. Int. J. Adv. Manuf. Technol, 2014.
- [12] MACDONALD, Eric, Rudy SALAS, David ESPALIN, Mireya PEREZ, Efrain AGUILERA, Dan MUSE a Ryan WICKER. 3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics. *IEEE Access*. vol. 2. 2014, 2, 234-242. DOI: 10.1109/ACCESS.2014.2311810. ISSN 2169-3536. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6766751/>
- [13] LIU, Zhe, Wen-Dong LI, Yi-Bo WANG, Guo-Qiang SU, Guan-Jun ZHANG, Yi CAO a Di-Chen LI. Topology optimization and 3D-printing fabrication feasibility of high voltage FGM insulator. *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. IEEE, 2016, , 1-4. DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800864. ISBN 978-1-5090-0496-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7800864/>

- [14] GRIESER, Franz. FDM vs SLA: The Differences – Simply Explained. In: *All3DP* [online]. All3DP [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://all3dp.com/fdm-vs-sla/>
- [15] SÁNDOR, Ádám. *VLIV NASTAVENÍ PARAMETRŮ 3D TISKÁRNÝ NA VLASTNOSTI TIŠTĚNÝCH OBJEKTŮ*. Praha, 2019.. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Veselý Petr.
- [16] CANESSA, Enrique, Carlo FONDA a Marco ZENNARO. *LOW-COST 3D PRINTING FOR SCIENCE, EDUCATION & SUSTAINABLE DEVELOPMENT*. ICTP, 2013. ISBN 92-95003-48-9.
- [17] CHVALINA, Tomáš. First layer calibration and Live adjust Z. In: *PRUSA RESEARCH* by JOSEF PRUSA [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/article/ZhBlGFD9Ah-live-adjust-z>
- [18] NOVAKOVA-MARCINCINOVA, Ludmila. Application of fused deposition modeling technology in 3D printing rapid prototyping area. *Manufacturing and Industrial Engineering*. 11. 2012, **11**(4), 35-37. ISSN 1338-6549.
- [19] QIN, PEI-LIN a XIAO-DONG LI. Hardware Control Circuit Design of FDM 3D Printer. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*. 2. 2018, **2**(). DOI: 10.12783/dtetr/ecame2017/18378. ISSN 2475-885X. Dostupné z: <http://www.dpi-proceedings.com/index.php/dtetr/article/view/18378>
- [20] WINSTON, Amy. Jak jsem stavěla 3D tiskárnu: extruder filamentu. In: *Root.cz* [online]. Praha: Root.cz, 2020 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/jak-jsem-stavela-3d-tiskarnu-extruder-filamentu/>
- [21] *O 3d tisku* [online]. b.r. [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/o-3d-tisku/>
- [22] 3D Slicer Settings for Beginners: 8 Things You Need to Know. *All3DP* [online]. All3DP [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <https://all3dp.com/3d-slicer-settings-beginners-8-things-need-know/>
- [23] 3D Slicer Settings for Beginners – 8 Things You Need to Know. *Pinshape* [online]. [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://pinshape.com/blog/3d-slicer-settings-5-things-you-need-to-know-about-3d-printing-software/>
- [24] GOLDSCHMIDT, Benjamin. G-Code Converter – What Can Be Converted to and from G-Code. *All3DP* [online]. All3DP [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/g-code-converter-what-can-be-converted-to-from-g-code/>
- [25] VESELÝ, P, T TICHÝ, O ŠEFL a E HORYNOVÁ. Evaluation of dielectric properties of 3D printed objects based on printing resolution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. vol. 461. 2018, **461**. DOI: 10.1088/1757-899X/461/1/012091. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/461/i=1/a=012091?key=crossref.3567e3184138a6ed05dd3450428f9634>
- [26] MOHAMED, Omar, Syed MASOOD a Jahar BHOWMIK. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*. vol. 3. 2015, **3**(1), 42-53. DOI: 10.1007/s40436-014-0097-7. ISSN 2095-3127. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40436-014-0097-7>

- [27] 16 Different Types of 3D Printing Materials. *3dinsider* [online]. 3D Insider, 2019 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printing-materials/>
- [28] VESELÝ, Petr, Eva HORYNOVÁ, Tomáš TICHÝ a Ondřej ŠEFL. *Study of electrical properties of 3D printed objects*. 2018. 2018, **2018**, 1-4.
- [29] *Materialy* [online]. b.r. [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [30] *Filamentprimer* [online]. b.r. [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <http://3dprintingforbeginners.com/filamentprimer/>
- [31] J. YU, Arthur a Ruth E. GALLAGHER. *Acrylate-styrene-acrylonitrile composition and method of making the same*. 1974, , 1-7.
- [32] *Acrylonitrile-styrene-acrylate-asa* [online]. b.r. [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://plastics.ulprospector.com/generics/8/acrylonitrile-styrene-acrylate-asa>
- [33] *Handbook of plastics joining: a practical guide*. Norwich, N.Y.: The Library, 1997. ISBN 978-188-4207-174.
- [34] *Polyethylene-terephthalate-pet-plastic* [online]. SpecialChem, 2019 [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic>
- [35] *Polyethylene-terephthalate pet benefits* [online]. Indian Bottle Company, 2016 [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://indianabottle.com/polyethylene-terephthalate-pet-benefits/>
- [36] GILDING, D.K. a A.M. REED. Biodegradable polymers for use in surgery—poly(ethylene oxide) poly(ethylene terephthalate) (PEO/PET) copolymers: 1. *Polymer*. vol. 20. 1979, **20**(12), 1454-1458. DOI: 10.1016/0032-3861(79)90008-9. ISSN 00323861. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0032386179900089>
- [37] SIVAKUMAR, J. a S. NIRMALA. *Electrical Conductivity Studies on Polyethylene Terephthalate Thin Films*. India, 2015, (4), 1-5.
- [38] *FDM 3D Printing: Comparing ASA, PETG, and PC Filaments* [online]. London, 2019 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2019/02/12/fdm-3d-printing-asa-petg-pc-filaments-compared/>
- [39] *All about PET G* [online]. ektadubey, 2017 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://davehakkens.nl/community/forums/topic/all-about-pet-g/>
- [40] Everything you Need to Know About The World's Most Useful Plastic (PET and Polyester). *Creativemechanisms* [online]. 2016 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-about-polyethylene-terephthalate-pet-polyester>
- [41] SADIGHI, Mojtaba a Sattar SALAMI. An investigation on low-velocity impact response of elastomeric and crushable foams. *Open Engineering*. vol. 2. 2012, **2**(4). DOI: 10.2478/s13531-012-0026-0. ISSN 2391-5439. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/eng.2012.2.issue-4/s13531-012-0026-0/s13531-012-0026-0.xml>
- [42] *Polypropylene (PP)* [online]. Alhamsa, 2016 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.alhamsa.com/pp.php>

- [43] *3d printing polypropylene* [online]. MakeShaper, b.r. [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://makeshaper.com/3d-printing-polypropylene/>
- [44] *Polypropylene* [online]. WordDisk, 2018 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: Rug fibers. Fibersource.com. Retrieved on 2012-05-31.
- [45] *Polypropylene* [online]. USA: acpo, 2012 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.acpo.com/polypropylene/>
- [46] *ALL YOU NEED TO KNOW ABOUT POLYPROPYLENE. Part 2* [online]. creativemechanisms, 2016 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/all-you-need-to-know-about-polypropylene.-part-2>
- [47] *Ultimaker CPE* [online]. Ultimaker, c2011-2019 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/products/materials/cpe>
- [48] *3D Printer Filament Comparison Guide* [online]. USA: FilamentOne, 2019 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.filamentone.com/pages/3d-printer-filament-comparison-guide>
- [49] *CPE* [online]. Materialpro3d, 2019 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/cpe/>
- [50] *CPE* [online]. Mall.cz, c2000-2019 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.mall.cz/slovník-pojmu/detail?term=Copolyester>
- [51] Dielectric Strength. *ScienceDirect* [online]. 2020 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/dielectric-strength>
- [52] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí: vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty*. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978. Řada elektrotechnické literatury.
- [53] *Breakdown in Solid Dielectrics* [online]. 2018 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/AhmarAli2/chapter-04-breakdown-in-solid-dielectrics>. Skripta.
- [54] WADHWA, C. *High Voltage Engineering*. 3. New Age Science, 2010. ISBN 1906574723.
- [55] Fourier's Law of Thermal Conduction. *Nuclear Power* [online]. Nuclear Power, 2020 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/thermal-conduction/fouriers-law-of-thermal-conduction/>
- [56] *Technika vysokých napětí* [online]. b.r. [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/TVNPodklady/TVN_Elektricka_Pevnost.pdf. Skripta. ČVUT.
- [57] BELAS, Eduard. *Transportní vlastnosti polovodičů 2*. 2015.. Skripta. Univerzita Karlova.
- [58] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [59] *ČSN EN 60060-1: Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, b.r.

- [60] Acrylonitrile styrene acrylic ester (ASA). *LPM* [online]. Jičín: LPM s.r.o., 2019 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://lpm.cz/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2131&lng=2>
- [61] KUFFEL, E., W. ZAENGL a J. KUFFEL. *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 07-506-3634-3.
- [62] *Profilometer Uses* [online]. Precision Tool Works, 2013 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://mitutoyoprofilometerdetectortiprepairs.com/profilometeruses.html>
- [63] *Form Talysurf Intra Operator's Handbook*. England, 2002.
- [64] TOSA, Masahiro. Surface Profilometer. *Compendium of Surface and Interface Analysis*. Singapore: Springer Singapore, 2018, , 679-682. DOI: 10.1007/978-981-10-6156-1_110. ISBN 978-981-10-6155-4. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-6156-1_110
- [65] Surfaces. *Engineeronadisk* [online]. 2010 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <http://engineeronadisk.com/V3/engineeronadisk-67.html>
- [66] TICHY, Tomas, Ondrej SEFL, Petr VESELY a Tomas CAPAL. Application Possibilities of Fused Filament Fabrication Technology for High-Voltage and Medium-Voltage Insulation Systems. *2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. IEEE, 2019, , 1-6. DOI: 10.1109/ISSE.2019.8810300. ISBN 978-1-7281-1874-1. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8810300/>
- [67] Dielectrics. *Redefining Knowledge* [online]. 2019 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://hemantmore.org.in/science/physics/dielectric/3102/>
- [68] MONZEL, W., Brad HOFF, Sabrina MAESTAS, David FRENCH a Steven HAYDEN. Dielectric breakdown of additively manufactured polymeric materials. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. vol. 22. 2015, 22(6), 3543-3549. DOI: 10.1109/TDEI.2015.005199. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7367553/>
- [69] Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa SL1. *Elektroráj* [online]. Elektroráj, 2020 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <http://www.elektoraj.cz/2018/09/28/stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-sl1/>
- [70] NIRU, K. The different SLS 3D printers on the market. *3Dnatives* [online]. Paris: 3Dnatives, 2019 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/different-sls-3d-printers-220320184/>
- [71] STULTZ, Matt. Mcor ARKe Brings Full Color 3D Printing to the Desktop. In: *Makezine* [online]. Sebastopol: Make Community LLC, 2019 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://makezine.com/2016/01/06/mcor-arke-brings-full-color-3d-printing-desktop/>
- [72] ORIGINAL PRUSA I3 MK3 PRUSA RESEARCH. *ANIWAA* [online]. Aniwaa Pte. Ltd, 2020 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/prusa-research-original-prusa-i3-mk3/>
- [73] PRŮŠA, Josef. Original Prusa i3 MK2 release!. *PrusaPrinters Blog* [online]. [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://blog.prusaprinters.org/original-prusa-i3-mk2-release/>
- [74] Finding, Recording, and Restoring Your Z-Axis Offset. *LULZBOT* [online]. LULZBOT, © 2011-2019 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.lulzbot.com/learn/tutorials/Z-axis-offset>

- [75] CIOBOTA, Nastase-Dan a Gheorghe GHEORGHE. 3D Complex Structures Through Fused Deposition Modeling as a Rapid Prototyping Technology Designed for Replacing Anatomic Parts of Human Body. *Scientific Bulletin of Valahia University - Materials and Mechanics*. vol. 16. 2018, **16**(15), 30-33. DOI: 10.1515/bsmm-2018-0016. ISSN 2537-3161. Dostupné z: <http://content.sciendo.com/view/journals/bsmm/16/15/article-p30.xml>
- [76] Form Talysurf Intra Touch (roughness, waviness, form & contour). *Spectrum Metrology* [online]. Leicester: Spectrum Metrology Ltd., © 2003-20 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <https://www.spectrum-metrology.co.uk/surface-roughness/form-talysurf-intra-touch.php>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1- 3D tiskárna SL1 (převzato z [69])	2
Obrázek 2- 3D tiskárna ProX SLS 6100 (převzato z [70]).....	3
Obrázek 3 - 3D tiskárna Mcor ARKe (převzato z [71])	3
Obrázek 4- 3D tiskárna Prusa i3 MK3 (převzato z [72])	4
Obrázek 5 - Náčrtek trysky z přední (vlevo) a zadní strany (vpravo)	5
Obrázek 6- Podložka Prusa i3 MK3 (převzato z [73])	5
Obrázek 7- Screen Offsetu (převzato z [74])	5
Obrázek 8- Princip FDM technologie (převzato z [75]).....	6
Obrázek 9- 3D objekt vytvořený v softwaru Tinkercad.....	7
Obrázek 10- Nastavení a upravení objektu ve Slic3ru	8
Obrázek 11- Cívky s tiskovou strunou (převzato z [27])	9
Obrázek 12 - Návrh tištěných vzorků.....	9
Obrázek 13- Kolísání dielektrické pevnosti v čase po aplikaci napětí (převzato z [53])	13
Obrázek 14- Vstup a výstup tepla (převzato z [56]).....	14
Obrázek 15- Pásová struktura pevných látek (převzato z [56]).....	15
Obrázek 16- Volné elektrony zachycené v pastích vlivem nečistot (převzato z [56])	16
Obrázek 17- Časové parametry plného impulsu napětí (převzato z [59]).....	17
Obrázek 18- Další možné časové parametry plného impulzního napětí (převzato z [59]).....	18
Obrázek 19- Integrální napěťové křivky (převzato z [59])	19
Obrázek 20- Atmosférické impulsní napětí: A) useknuté v čele; B) useknuté v týle (převzato z [59])	20
Obrázek 21- Umístění vzorku mezi elektrody pro atmosférickou impulzní zkoušku (převzato z [65])	22
Obrázek 22- Blokové schéma zapojení měřicího obvodu a systému	23
Obrázek 23- Charakteristika doba čela $T_1 = 1,024 \mu s$ a intervalu $T = 0,64 \mu s$ mezi okamžiky při kterých dosáhne impuls 30 % a 90 % vrcholové hodnoty.	23
Obrázek 24- Charakteristika průběhu pulzů $T_2 = 44,55 \mu s$	24
Obrázek 25- Charakteristika napětí při průrazném napětí u třetího vzorku, kde výsledné průrazné napětí $U_v = 51,09 \text{ kV}$ a elektrická pevnost vzorku $E_{max} = 71,33 \text{ kV/mm}$. Na výseči je zobrazena vzniklá resonance.....	25
Obrázek 26- Schéma zapojení měřicího systému pro střídavé napětí	26
Obrázek 27- Lineární charakteristika korigovaných hodnot multimetru při zkoušce se střídavým napětím	27
Obrázek 28- Weibullova rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky ASA_04.....	29
Obrázek 29- Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky PP	29
Obrázek 30- Weibullova rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky CPE	29
Obrázek 31- Weibullova rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky PET.....	29
Obrázek 32- Srovnání dat Weibullova rozdělení pravděpodobnosti z Tabulka 7	30
Obrázek 33- Proražený vzorek PET na krátkodobé zkoušce s AC napětím.....	32
Obrázek 34- Schéma zapojení měřicího systému pro zkoušku se stejnosměrným napětím pro kladnou polaritu	34
Obrázek 35- Lineární charakteristika korigovaných hodnot multimetru při zkoušce se stejnosměrným napětím	35
Obrázek 36- Schéma zapojení zdroje stejnosměrného napětí (převzato z [60])	35
Obrázek 37- Jednofázový polovodičový usměrňovač s kapacitou. Průběhy napětí a proudu se zátěží (převzato z [60])	36
Obrázek 38- Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky CPE	37
Obrázek 39- Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky PET	37
Obrázek 40- Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky ASA.....	38
Obrázek 41- Srovnání sklonu Weibullova rozdělení zjištěných dat uvedených v Tabulka 11	38

Obrázek 42- Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti pro vzorky PET pro zápornou polaritu.....	40
Obrázek 43- Weibullova rozdělení zjištěných dat vzorků PET uvedených v Tabulka 12	41
Obrázek 44- Vizuálně vybrané vzorky bez defektu (vlevo) a s defektem (vlevo) pro PP a PET.....	42
Obrázek 45- Profilometr Form Talysurf Intra Touch s programem Talyprofile pro měření tvaru povrchu (Převzato z [76]).....	43
Obrázek 46- Diamantový hrot na kovové tyči pro profilometr Talysurf (Převzato z [62]).....	43
Obrázek 47- Schéma principu povrchového profilometru (Převzato z [63])	44
Obrázek 48- Schéma zapojení povrchového profilometru (Převzato z [63])	44
Obrázek 49- Výpočet drsnosti pomocí vzorků v rovnoměrně rozmístěných polohách (převzato z [64])	45
Obrázek 50- Surová data z Talysurfu pro vzorek ABS0601	46
Obrázek 51- Zarovnání surových dat na střed pro vzorek ABS0601	46
Obrázek 52- Odstranění zaobleného průběhu vzorku PP0603	47
Obrázek 53- Zaoblený povrch vzorku PP0603 po jeho zarovnání na střed	47
Obrázek 54- Vyhodnocení drsnosti povrchu automatickou metodou v určité části pro vzorek Co01 ..	47
Obrázek 55- Vyhodnocení drsnosti povrchu manuální metodou v té stejné části pro vzorek Co01	48
Obrázek 56- Výpočet aritmetického průměru drsnosti R_a pro vzorek Co01	48
Obrázek 57- Pozorovaná nerovnost povrchu vzorku PET0601 v rozmezí od 9 do 12,5 mm	50
Obrázek 58- Pozorovaný defekt v rozmezí od 5 do 12 mm na povrchu vzorku PET0604	51
Obrázek 59- Průřez vzorku PET0603 na DC zkoušce s kladnou polaritou.....	51