

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MĚŘENÍ PRŮRAZU PEVNÝCH A KAPALNÝCH DIELEKTRIK

BREAKDOWN VOLTAGE MEASUREMENT OF SOLID AND LIQUID DIELECTRIC MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Ryšavý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Krbal, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Tomáš Ryšavý

ID: 211124

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Měření průrazu pevných a kapalných dielektrik

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše literatury a platných norem; rozsahy měřených veličin, požadované rozměry a parametry testovaných vzorků a požadavky na zkušební zdroje.
2. Faktory ovlivňující elektrickou pevnost.
3. Teorie elektrická pevnosti pevných a kapalných dielektrik.
4. Návrhy elektrodových systémů pro měření průrazu pevných a kapalných dielektrik.
5. Realizace měřicích přípravků a jejich praktické ověření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Normy ČSN, články IEEE, články OA, sborníky konferenčních příspěvků, jiné závěrečné práce.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 1.6.2021

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se zaměřuje na teoretický popis vzniku elektrického průrazu v pevných a kapalných dielektrických materiálech a následně na samotné měření. Kromě popsání normovaného postupu při měření elektrického průrazu, či průrazného napětí dielektrických materiálů, práce také popisuje nejdůležitější parametry a okolnosti, které a jak ovlivňují elektrickou pevnost materiálů. Součástí práce jsou také návrhy elektrodových systémů a zkušebních komor pro měření pevných a kapalných dielektrik.

Klíčová slova

Elektroizolační materiál, elektrická pevnost, průrazné napětí, pevné dielektrikum, kapalně dielektrikum.

Abstract

This thesis aims to theoretically describe the formation of electric breakdown in solid and liquid dielectric materials and subsequently focuses on the measuring itself. In addition to describing the standardized procedure of electrical breakdown or breakdown voltage of dielectric materials, this paper also focuses on the most important parameters and conditions that affect the electric strength of materials. This thesis also includes designs of electrode systems and test chambers for measuring solid and liquid dielectrics.

Keywords

Electrical insulating materials, electric strength, breakdown voltage, solid dielectric, liquid dielectric.

Bibliografická citace

RYŠAVÝ, Tomáš. *Měření průrazu pevných a kapalných dielektrik*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133364>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Ing. Michal Krbal, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Tomáš Ryšavý*

VUT ID studenta: *211124*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2020/21*

Téma závěrečné práce: *Měření průrazu pevných a kapalných dielektrik*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 1. června 2021

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Krbalovi, Ph.D. za odbornou pomoc a za četné cenné rady při vedení mé bakalářské práce.

V Brně dne: 1. června 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. ZÁKLADY DIELEKTRIK A IZOLANTŮ	12
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY	12
1.1.1 Izolant	12
1.1.2 Dielektrikum.....	12
1.1.3 Permittivita	13
1.2 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY	14
1.2.1 Vodivostní ztráty	14
1.2.2 Polarizační ztráty.....	14
1.2.3 Ionizační ztráty.....	15
2. ELEKTRICKÁ PEVNOST	16
2.1 ELEKTRICKÁ PEVNOST PEVNÝCH IZOLANTŮ	16
2.1.1 Čistě elektrický průraz	16
2.1.2 Tepelný průraz	17
2.1.3 Elektrochemický průraz	18
2.2 ELEKTRICKÁ PEVNOST KAPALNÝCH IZOLANTŮ	20
2.2.1 Minerální oleje.....	22
2.2.2 Přírodní oleje.....	22
2.2.3 Syntetické oleje.....	23
2.2.4 Silikonové kapaliny.....	23
2.2.5 Esterické kapaliny.....	23
2.2.6 Nano-kapaliny.....	23
2.3 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTRICKOU PEVNOST	24
2.3.1 Povrch vzorku a elektrod	24
2.3.2 Kvalita vzorku	25
2.3.3 Elektrody.....	25
2.3.4 Teplota a frekvence	26
2.3.5 Charakter a doba působení zkušební napětí	26
2.3.6 Přítlačná síla elektrod na vzorek	26
3. NORMOVANÉ PARAMETRY	27
3.1 MĚŘENÍ PRŮRAZU PEVNÝCH IZOLANTŮ PŘI PRŮMYSLOVÝCH KMITOČTECH	27
3.1.1 Elektrody.....	27
3.1.2 Zkušební vzorky.....	29
3.1.3 Okolní prostředí.....	29
3.1.4 Požadavky na zkušební přístroje.....	30
3.1.5 Druhy zkoušek.....	30
3.1.6 Protokol o zkoušce	32
3.2 MĚŘENÍ PRŮRAZU PEVNÝCH IZOLANTŮ STEJNOSMĚRNÝM NAPĚTÍM.....	32
3.2.1 Požadavky na zkušební přístroje.....	33
3.2.2 Popis zkoušky stejnosměrným napětím	33

3.2.3	<i>Protokol o zkoušce</i>	33
3.3	MĚŘENÍ PRŮRAZU PEVNÝCH IZOLANTŮ IMPULZNÍ ZKOUŠKOU.....	33
3.3.1	<i>Požadavky na zkušební přístroje</i>	34
3.3.2	<i>Popis zkoušky napěťovými impulzy</i>	35
3.3.3	<i>Protokol o zkoušce</i>	35
3.4	MĚŘENÍ PRŮRAZU IZOLAČNÍCH KAPALIN	36
3.4.1	<i>Zkušební nádoby</i>	36
3.4.2	<i>Elektrody</i>	36
3.4.3	<i>Popis zkoušky izolačních kapalin</i>	37
3.4.4	<i>Protokol o zkoušce</i>	38
4.	VLASTNÍ MĚŘENÍ	39
4.1	MĚŘENÍ PEVNÝCH DIELEKTRIK.....	39
4.1.1	<i>Kraft karton</i>	39
4.1.2	<i>Fólie</i>	40
4.1.3	<i>Kancelářský papír</i>	40
4.1.4	<i>Závěr z měření pevných dielektrik</i>	41
4.2	MĚŘENÍ KAPALNÝCH DIELEKTRIK	42
4.2.1	<i>Silikonová kapalina</i>	42
4.2.2	<i>Transformátorový minerální olej</i>	43
4.2.3	<i>Závěr z měření kapalných dielektrik</i>	43
5.	ZÁVĚR	45
	LITERATURA	46
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	49
	SEZNAM PŘÍLOH	50

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Polarizace a) Nepochárního dielektrika; b) Polárního dielektrika [2]	13
Obrázek 2.1 Rozložení prostorového náboje v dielektriku s nehomogenity [7]	19
Obrázek 3.1 Průběh impulzního napětí 1,2/50 μ s [14]	34
Obrázek 4.1 Závislost průrazného napětí na počtu vrstev papíru	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1	Teorie popisující vznik elektrického přeskoku v kapalných izolantech [6]	22
Tabulka 2.2	Průrazné napětí pro minerální olej a pro nano-kapalinu s 0,01 % aditivu [11]	24
Tabulka 2.3	Průrazné napětí pro minerální olej a pro nano-kapalinu s 0,03 % aditivu [11]	24
Tabulka 3.1	Přehled tvarů elektrod a jejich bližší specifikace [12]	28
Tabulka 3.2	Přírůstky napětí pro stupňovité zvyšování napětí [12]	31
Tabulka 4.1	Tabulka naměřených hodnot průrazných napětí v [kV]	40

ÚVOD

Dielektrické materiály jsou využívány v celém vědním oboru elektrotechniky. Jsou to takové materiály, které mají schopnost se polarizovat ve směru vnějšího elektrického pole. Zároveň některé tyto materiály mají schopnost elektricky izolovat místa s různým elektrickým potenciálem. Takovou podskupinu s těmito vlastnostmi nazýváme izolačními materiály. Právě tyto pojmy „dielektrika“ a „izolanty“ se často mylně zaměňují. Dielektrické materiály se v elektrotechnice vyskytují jak v pevném skupenství, tak i v kapalném a plynném.

Tato práce se zabývá právě izolačními schopnostmi dielektrik, přesněji jejich elektrickou pevností. Hodnoty elektrické pevnosti izolačního materiálu jsou ovlivněny celou řadou vnitřních parametrů (tloušťka, homogenita materiálu, dokonalost opracování vzorku a elektrod) i vnějších parametrů (teplota okolí, vlhkost, tlak, tvar elektrod, doba působení napětí). Cílem práce je seznámit čtenáře s problematikou vzniku elektrických průrazů v pevných a kapalných dielektrických materiálech, a dát mu představu o tom, jak se takový parametr měří a proč je důležité znát všechny okolnosti, které při daném měření platily.

Toho je docíleno pomocí teoretického vysvětlení elektrického průrazu, bližšího vysvětlení okolností, které ovlivňují elektrickou pevnost, seznámení čtenáře s příslušnými českými státními normami, které spravují měření elektrické pevnosti a pomocí vlastních poznatků z měření.

1. ZÁKLADY DIELEKTRIK A IZOLANTŮ

1.1 Základní pojmy a veličiny

1.1.1 Izolant

Ideální izolant je druh materiálu, který neobsahuje volné nosiče náboje. Tyto látky se skládají z atomů, molekul a iontů, které jsou pevně vázány na mřížku izolantu. Po přiložení elektrického napětí se tedy nemůže pohybovat žádný elektrický náboj, a tedy neprochází žádný elektrický proud. Pro tyto vlastnosti se izolanty využívají k izolaci elektrických obvodů s různým napěťovým potenciálem a živých i neživých částí elektrických zařízení.

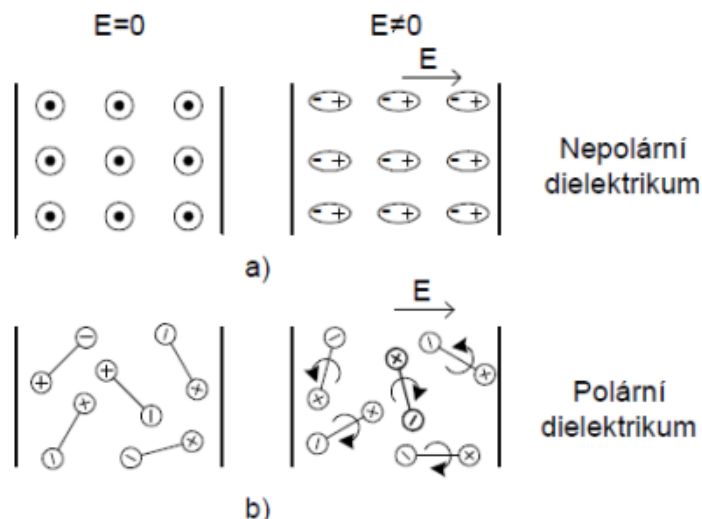
Ideálního izolantu nejsme schopni docílit. Taková látka by nesměla obsahovat žádné nosiče elektrického náboje, což může být pouze absolutní vakuum, nebo izolant o teplotě blízké absolutní nule, tedy 0 K (-273,15 °C). Nedokonalý izolant vždy obsahuje kladné nebo záporné ionty a elektrony, které nejsou k mřížce vázány a mohou se po přiložení elektrického pole pohybovat, tedy vést elektrický proud [1].

1.1.2 Dielektrikum

Dielektrikum je druh izolačního materiálu, který po vložení do elektrického pole má schopnost vytvořit si vlastní vnitřní elektrické pole. Tento jev nastává pomocí tzv. polarizace. Dielektrikum může být děleno na dvě skupiny, na polární a nepolární dielektrika. Grafický rozdíl mezi polárním a nepolárním dielektrikem vysvětluje Obrázek 1.1.

V polárním dielektriku již existují molekuly, jejichž rozpoložení nábojů vytváří elektrický dipól. Tyto dipóly jsou nahodile orientované. Po vložení do elektrického pole se vlivem působení odpudivých sil tyto dipóly začnou natáčet v protisměru působení vnějšího pole a vytvoří se tak vlastní elektrické pole uvnitř materiálu. Taková polarizace se nazývá orientační.

Nepolární dielektrika žádné základní dipólové momenty nemají. Polarizační děj se tak odehrává v samotných atomech látky. V případě přiložení vnějšího elektrického pole se elektronový obal atomu nepatrně vychýlí ze své původní klidové polohy. Vznikne tak nový tzv. indukovaný dipólový moment. Takovou polarizaci nazýváme atomovou [1] [2].



Obrázek 1.1 Polarizace a) Nepolárního dielektrika; b) Polárního dielektrika [2]

1.1.3 Permittivita

Permittivita je jedna ze základních veličin každého dielektrika. Je to fyzikální veličina popisující vliv elektrického pole na izolant v daném poli. Udává míru polarizace v dielektriku. Je definována poměrem elektrické indukce v izolantu k intenzitě elektrického pole, tedy:

$$\varepsilon = \frac{\vec{D}}{\vec{E}}, \quad (1.1)$$

kde ε je permittivita v $[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$, \vec{D} je elektrická indukce v $[\text{C}\cdot\text{m}^{-2}]$ a \vec{E} je intenzita elektrického pole v $[\text{V}\cdot\text{m}^{-1}]$.

S permittivitou souvisí i relativní permittivita (dříve známá jako dielektrická konstanta). Relativní permittivita je definována jako poměr permittivity ε a permittivity vakua ε_0 , tedy udává, kolikrát se navýší kapacita daného kondenzátoru, jehož prostor je mezi a kolem elektrod vyplněn daným dielektrikem, oproti kondenzátoru, jehož dielektrikum tvoří vakuum. Můžeme tedy psát, že:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{C}{C_0}, \quad (1.2)$$

kde ε_r je námi hledaná relativní permittivita daného materiálu v [-], ε je permittivita materiálu v $[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$ a ε_0 je permittivita vakua v $[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$. Permittivita vakua je jedna ze základních fyzikálních konstant:

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} . \quad (1.3)$$

Ve vztahu (1.2) můžeme v praxi kondenzátor C_0 nahradit kondenzátorem, jehož dielektrikum je tvořeno vzduchem.

Relativní permitivita vzduchu při normálním atmosférickém tlaku je:

$$\varepsilon_r = 1,00053 \cdot \varepsilon_0 . \quad (1.4)$$

Touto náhradou tedy dosáhneme dostatečné přesnosti měření [1] [3].

1.2 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty jsou dalšími z hlavních parametrů dielektrika. Vyjadřují míru kvality použitého materiálu. Jak je známo, připojíme-li na kondenzátor s dielektrikem střídavý zdroj napětí, tento pasivní prvek způsobí fázové posunutí proudu vůči napětí o úhel φ . V ideálním případě je tato hodnota úhlu 90° . Právě dielektrické ztráty způsobují odchylku úhlu od ideálních 90° . V praxi platí:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta , \quad (1.4)$$

kde zmíněný δ je ztrátový úhel s jednotkou ve $[\circ]$, který vyjadřuje nedokonalost dielektrika. Tyto ztráty jsou tvořeny součtem tří dílčích ztrát, tedy vodivostní, polarizační a ionizační ztráty. Ty se projevují při napájení střídavým i stejnosměrným napětím. Ztrátová energie, kterou vyjadřuje ztrátový úhel, se projevuje ohřevem dielektrika. Je potřeba toto vzniklé teplo odvádět, jinak dojde k degradaci dielektrika či tepelnému průrazu, viz kapitola 2.1.2 [2] [4].

1.2.1 Vodivostní ztráty

Tento druh ztrát je způsoben nedokonalou elektrickou izolací průmyslových dielektrik. Jsou závislé na vnitřní a povrchové (pouze u pevných dielektrik) vodivosti dielektrika. Jelikož nedocílíme dokonalého vakua, nebo se nepřiblížíme teplotám blízkých absolutní nule, či vždy budeme mít v izolantu cizí částice nečistot, bude použitým dielektrikem procházet elektrický proud. Takto vzniklé teplo se také nazývá Jouleovo teplo a vzniká srážkami volných nosičů nábojů s kmitajícími částicemi, které tvoří strukturu látky [2] [4].

1.2.2 Polarizační ztráty

Jak už název napovídá, tyto ztráty jsou závislé na polarizačních pochodech dielektrika. Je to spotřebovaná energie, potřebná na natočení elektrických dipólů ve směru elektrického pole. Protože se elektrické dipóly vždy snaží natáčet do směru správné polarizace měnícího se elektrického pole (dle zákona odpuzivých sil), tento druh ztrát se projevuje pouze ve střídavém elektrickém poli a roste se zvyšujícím se kmitočtem a teplotou. Tyto ztráty mají významný podíl na celkových dielektrických ztrátách a závisí na druhu polarizace, přičemž se obzvlášť projevují u polarizace dipólové a iontové relaxační [2] [4].

1.2.3 Ionizační ztráty

Nejčastěji se vyskytují u plynných dielektrik. Najdeme je ale i u kapalných a pevných dielektrik, které v sobě mají příměsi nehomogenního materiálu či obsahují plynové bubliny. Při překročení určité intenzity elektrického pole se začnou vyskytovat výboje uvnitř materiálu, které jej zahřívají. Uplatňují se až při vyšších hodnotách napětí. Při značné výbojové aktivitě velmi napomáhají tzv. tepelnému průrazu [2] [4].

2. ELEKTRICKÁ PEVNOST

Tato veličina je základní vlastnost všech elektroizolačních materiálů. Elektrická pevnost E_p udává schopnost materiálu od sebe elektricky izolovat vodivé části s různým potenciálem. Je to taková velikost maximálního elektrického pole, při které ještě nedojde k porušení materiálu a elektrickému propojení kontaktů. Při překročení elektrické pevnosti materiálu dojde k nárůstu volných nosičů náboje a k následnému průrazu materiálu. Skrz materiál se tak vytvoří vodivá cesta, která umožňuje elektrickému proudu propojit kontakty elektrod. Elektrický proud, procházející touto cestou, může nabývat značných hodnot. Jelikož se průrazem vytvoří vodivá cesta, je velikost proudu omezena impedancí vodivé cesty, impedancí zdroje, přiloženými elektrodami či přívody k elektrodám. Elektrickou pevnost můžeme vypočítat podle:

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (2.1)$$

kde U_p je velikosti průrazného napětí ve [V] a d je tloušťka daného materiálu v [m].

Minimální hodnota napětí, potřebná pro průraz daného materiálu, se nazývá průrazné napětí U_p . V praxi se setkáváme s elektrickou pevností takových hodnot, že se nevyužívá její základní jednotka, ale jiné poměrové hodnoty, jako třeba [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$] nebo [$\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$].

V závislosti na skupenství použitého izolačního materiálu, můžeme rozlišovat dva druhy elektrického výboje: elektrický průraz a elektrický přeskok. U obou případů dochází ke zvyšování množství volných nosičů náboje, tedy ke zvyšování vodivosti. S vyšší vodivostí klesá elektrický odpor materiálu a roste elektrický proud. Na rozdíl od tuhých izolantů, v plynných a kapalných látkách jsou tyto jevy dočasné [5] [6].

2.1 Elektrická pevnost pevných izolantů

U pevného izolantu označujeme elektrický výboj jako elektrický průraz. Tento jev je u pevných izolantů nevratný, izolační vlastnosti materiálu se nezregenerují, a vždy tak dochází k nevratným změnám v omezeném objemu a ke zničení dielektrika. Porušení izolačních vlastností materiálu můžeme dle příčiny vzniku rozdělit na tři typy: čistě elektrický, tepelný a elektrochemický průraz. Každý z nich je vysvětlen v následujících podkapitolách.

2.1.1 Čistě elektrický průraz

Čistě elektrický průraz zkoumáme v homogenním elektrickém poli za pomoci impulsního napětí. Při takovémto napětí minimalizujeme tepelné namáhání. Jedná se o velmi rychlý jev, jehož výsledkem je velmi úzký tunel bez opálení okolí.

Z poznatků o vzniku a orientaci průrazného kanálu v krystalové mřížce, velké rychlosti průrazu a závislosti elektrické pevnosti na tloušťce i velmi tenkých vzorků

převládá názor, že čistě elektrický průraz u pevných izolantů je způsoben vyskytujícími se volnými elektrony.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1.1, ideální izolant či dielektrikum neobsahuje volné nosiče náboje. To je však pouze ideální případ. V reálném případě struktura izolantů obsahuje tzv. poruchové hladiny, které umožňují elektronům přechod ze základní hladiny do vodivostního pásu. Při teplotách velmi vzdálených od absolutní nuly dochází vlivem tepelné ionizace k průniku elektronů do vodivostního pásma. Tento vliv je ovšem minimální a téměř se na elektrické vodivosti izolantu neprojevuje. Kromě tepelné ionizace, může k tvorbě volných elektronů přispět i vnější činitelé, jako je záření, nebo silné elektrické pole. Právě účinky silného elektrického pole snižují potenciální bariéry a ulehčuje tak emisi elektronů z katody do izolantu, nebo také přechod elektronů z valenčního do vodivostního pásu v krystalové mřížce. Tento přechod nazýváme vnitřní emisí, nebo emise polem. Počet takto uvolněných elektronů roste v závislosti na zvyšující se intenzitě elektrického pole.

Vznik čistě elektrického průrazu na základě volných elektronů můžeme rozdělit do dvou skupin:

- teorie předpokládající malou hustotu volných elektronů,
- teorie předpokládající velkou hustotu elektronů.

V případě teorie předpokládající malou hustotu volných elektronů uvažujeme menší počet vzájemných srážek elektronů než srážek elektronů se strukturou látky. Při překročení hodnoty elektrické pevnosti materiálu prudce vzroste počet volných elektronů. Volné elektrony způsobují nárůst elektrického proudu protékajícího izolantem. Narůstající proud vytváří rostoucí množství energie v podobě tepla, které při určitém množství poruší strukturu látky roztavením nebo dojde k chemické destrukci.

Druhá teorie předpokládá vysokou hustotu volných elektronů. Přiložené elektrické pole urychluje pohyb volných elektronů, které se při své četnosti srážejí mezi sebou a tím si předávají část své energie. Při takové četnosti srážek nemůže žádný elektron získat rychlost a energii výrazně vyšší, než ostatní volné elektrony. Tímto se energie rozdělí rovnoměrně mezi všechny volné elektrony a vznikne tak tepelná rovnováha. Takový stav nazýváme elektronovou teplotou kolektivu volných elektronů. Pokud nastane nerovnoměrný stav a počet srážek volných elektronů bude značně převyšovat nad výměnou energie se strukturou izolantu, dojde ke zvyšování elektronové teploty. Po překročení určité mezní elektronové teploty dojde k jejímu nekontrolovatelnému růstu, který způsobí průraz izolantu [5] [6].

2.1.2 Tepelný průraz

Příčinou tepelného průrazu je nadměrná teplota izolantu. Zdrojem takového tepla jsou Jouleovy ztráty. Při nízkých hodnotách napětí nastane dynamická rovnováha mezi množstvím vyprodukovaného tepla a tepla odvedeného do okolí. Avšak při vyšších

hodnotách napětí se vznikající teplo v izolantu nestačí odvádět do okolí, poruší se dynamická rovnováha a teplota materiálu se začne nerovnoměrně zvyšovat po celém svém objemu. V místech se zvýšenou teplotou dochází k růstu elektrické vodivosti, tedy k růstu protékajícího proudu, který napomáhá k dalšímu vzniku tepla. Takový nárůst tepla může vést až k tepelnému průrazu. Ten má za následek vytvoření širšího tunelu skrz izolant, jehož okolí je zuhelněné či roztavené.

Rozlišujeme tři příčiny tepelného průrazu:

- Množství přivedeného tepla je tak značné, že materiál není schopen odvádět dostatečné množství tepla do okolí. Jedná se o nejčastější příčinu tepelného průrazu.
- Izolant má špatný odvod tepla, nebo příliš nízkou teplotu tavení. Dojde ke zničení izolantu dříve, než se stačí dynamická rovnováha ustálit.
- V důsledku nerovnoměrného ohřevu izolantu se dříve přibližně homogenní elektrické pole stane nehomogenním. V takových místech je izolant více elektricky namáhán a může tu až dojít k průrazu.

[5] [6]

2.1.3 Elektrochemický průraz

Jedná se o nejdelší případ průrazu, trvá i roky. Jde o procesy, ke kterým běžně v izolantu dochází a postupně snižují jeho elektrickou pevnost, až nakonec dojde k průrazu.

Z hlediska doby působení provozních činitelů na materiál, rozlišujeme:

- Změny vratné – jsou způsobeny vystavením krátkodobému a málo intenzivnímu působení provozních činitelů.
- Nevratné změny – při překročení jisté doby, či intenzitě působení daného činitele na materiál, dochází k nevratným změnám, které zkracují životnost materiálu, nebo zhoršují jeho izolační vlastnosti.

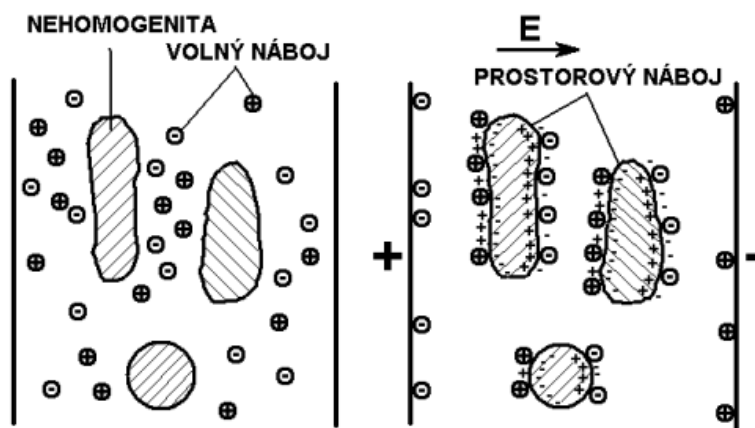
I při zajištění dostatečného odvodu tepla z materiálu, aby nedošlo k tepelnému průrazu, nebo při provozování menšího napětí, než je průrazné napětí izolátoru, dochází k elektrochemickému průrazu. Tento druh průrazu je způsoben nedokonalostí technologické výroby izolantů. Při výrobě vznikají v izolantu dutinky obsahující plyny, ve kterých dochází k částečným výbojům i při napětích nižších, než je průrazné napětí pevného materiálu.

Při zatížení se částečné výboje vyskytují na několika místech zkoušeného vzorku:

- Vnitřní částečné výboje, vznikající v plynových dutinkách pevného dielektrika, nebo plynových kapslích kapalného dielektrika.
- Povrchové částečné výboje, které se vyskytují v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynového dielektrika.

Zpravidla vnitřní dutinky v pevném izolantu jsou vyplněny plynem, který vzniká při technologickém zpracování dielektrika. Takový plyn má nižší relativní permitivitu. Jelikož je relativní permitivita takového plynu přibližně 1, je plyn v dutince namáhán ϵ_r krát více, než okolní pevný izolant. Zároveň i elektrická pevnost plynu je několikanásobně nižší, než okolního izolantu. K průrazu v dutince dojde při překročení průrazného napětí, které definuje Paschenův zákon.

V závislosti na rozměrech a tlaku plynu v dutině nedochází ve všech dutinách v materiálu k přeskočce současně, nýbrž při různých hodnotách napětí. Výboj v plynu způsobí jeho ionizaci a neutrální molekuly se rozloží na kladné a záporné ionty. Ty se rozloží na stěnách dutiny v protisměru působení vnějšího elektrického pole. S hromaděním těchto iontů na stěnách dutiny se uvnitř izolantu vytváří vnitřní elektrické pole, které má opačnou polaritu, než pole vnější a dochází tak k částečné kompenzaci, viz Obrázek 1.1. Mžikový výboj v dutince hoří tak dlouho, dokud se na stranách nenahromadí dostatečný počet kladných a záporných iontů, jejichž vytvořené elektrické pole nevykompenzuje vnější elektrické pole natolik, že napětí na dutince klesne pod hodnotu, při němž se výboj neudrží a uhasíná. Mžikový výboj u malých bublinek o velikosti mikrometrů až milimetrů hoří po dobu v řádu nanosekund. K zapalování výbojů v dutinách v pevných dielektrikách dochází především při velké změně napětí, tj. při průchodu nulou směrem do kladného i záporného vrcholu. Při nadále se zvyšujícím vnějším přiloženém napětí se v dutinkách dielektrika začne projevovat hoření koróny.



Obrázek 2.1 Rozložení prostorového náboje v dielektriku s nehomogenitou [7]

Jestliže se přiložené napětí nezvyšuje, nahromaděný náboj se odvádí ze stěn. Rychlost odvodu náboje je závislá na povrchovém odporu a na vnitřním odporu izolantu. V případě střídavého napájecího napětí se tyto děje opakují v obou polaritách.

Výboje v takovýchto dutinách mají na okolní izolant hned celou řadu negativních účinků, které mají za následky nevratné zhoršení elektrických vlastností materiálu.

Takovými degradačními procesy jsou:

- Bombardování pevného izolantu ionty a elektrony – dopadající ionty a elektrony na povrch izolantu způsobují jeho erozi a dochází tak k úbytku izolačního materiálu. Tento úbytek materiálu se přemění na nízkomolekulární plyn, který může působit reaktivně na okolní materiál.
- Chemické působení rozloženého plynu při výboji – při výboji se rozkládá plyn na aktivní dusík, atomární kyslík a ozón, které mají výrazné degradační a ionizační účinky.
- Účinky záření výboje – během hoření výboje vzniká ultrafialové záření, které má dostatečnou energii na vyvolání chemických reakcí a urychluje tak degradaci materiálu.
- Tepelné účinky – výboj zahřívá okolní materiál a při intenzivním působení může dojít k zuhelnění okolí a k celkovému tepelnému průrazu.
- Účinky lokálního zvýšení gradientu na konci výbojového kanálu – elektrické pole na konci výbojového kanálu je velmi nehomogenní a jeho intenzita tu dosahuje vysokých hodnot. V těchto místech nastává mikroskopický průraz a vnitřní dutinka se tímto rozšíří.

[5] [6]

2.2 Elektrická pevnost kapalných izolantů

U kapalných izolantů označujeme elektrický výboj jako elektrický přeskok. Elektrická pevnost kapalných izolantů je dosud ne zcela probádaná záležitost. Její hodnota závisí na mnoha různých faktorech, jako jsou množství a druhy příměsí, čistota, tvar a materiál elektrod, druh napětí, tlak kapaliny, teplota, apod. Vzniklý výboj v kapalinách je tak způsoben chaotickým pohybem částic v látce, nebo je způsoben okolnostmi, které lze těžko eliminovat. Z těchto důvodů není prozatím elektrický přeskok v kapalinách jasně vysvětlen. Žádné experimentální výsledky totiž neposkytují jednoznačné závěry, mohou být dokonce i protichůdné.

I přes nejednoznačnost výsledků experimentů, mají elektrické výboje v kapalných izolantech charakteristické rysy:

- elektrická pevnost kapalných izolantů je vyšší než u plyných izolantů,
- mechanismus přeskoků má různý charakter (včetně čistě elektrického a tepelného),
- výboj se zpravidla vyskytuje v místech s vyšší koncentrací příměsí nečistot.

Podle kvality kapalného dielektrika rozlišujeme kapaliny na velmi čisté a technicky čisté kapaliny. U velmi čistých kapalin se v rámci co nejlepších výsledků snažíme eliminovat vlivy, které by mohly negativně ovlivnit měření. Za účelem odstranění nežádoucích příměsí ze zkoušené kapaliny se provádí mnohonásobná destilace,

odplynění, filtrace, minimalizuje se vlhkost a to všechno v uzavřené soustavě, ve které se i nachází elektrody pro zkoušení elektrické pevnosti. Takto pečlivě upravené kapaliny mají velmi nízkou konduktivitu, v rozmezí $10^{-14} \div 10^{-15} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ a elektrickou pevnost v rozmezí $80 \div 100 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. U takto čistých kapalin se vliv teploty, tlaku, nežádoucích příměsí a době působení napětí neuplatňuje. Při vyloučení těchto negativních faktorů, které by za jiných okolností přispěly ke vzniku elektrického přeskoků, musíme hledat důvod vzniku těchto výbojů jinde. Tu ale experimentální výsledky vykazují nepřesné, ba i protichůdné výsledky. Proto existují pouze teorie popisující elektrický přeskok ve velmi čistých kapalinách.

Takových teorií existuje mnoho, obecně se však mohou rozdělit do dvou skupin:

- První teorie napovídá, že u přeskoků hraje zásadní roli emise elektronů a nárazová ionizace. Takovými teoriemi jsou např. studená emise (vytrhávání elektronů je způsobeno silným elektrickým polem) a Schottkyho emise (přiložené elektrické pole snižuje bariéry, kterými musí elektrony projít, aby se dostaly do vodivostního pásu).
- Podle druhé teorie o vzniku výboje, rozhoduje tvorba plynových bublinek. Tato teorie vysvětluje přeskok v čistých kapalinách. V takových kapalinách se ovšem příměsí plynu téměř nevyskytují a teorie zkoumá vznik plynových bublinek přímo v okamžiku zkoušky. Takové jevy jsou ale velmi složité na zkoumání, a proto zůstávají teoriemi.

Literatura [6] uvádí následující teorie o vzniku elektrického přeskoků v kapalných izolantech. Tyto teorie jsou uvedeny v Tabulce 2.1.

Druhou skupinou kapalných izolantů, co se jejich čistoty týče, jsou technicky čisté kapaliny. Takové kapaliny mají až 10krát menší elektrickou pevnost, než velmi čisté kapaliny. Jejich konduktivita se pohybuje v rozmezí $10^{-11} \div 10^{-13} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. U technicky čistých kapalin se vyskytuje velmi malé množství nežádoucích příměsí a obecně se projevuje nedokonalost kapalného izolantu. Takovou nedokonalostí může být třeba podíl vody v izolantu. Podobné nedokonalosti nám usnadňují hledání příčiny vzniku elektrického přeskoků v takových kapalinách. Vliv cizích příměsí v technicky čistých kapalinách je blíže popsán v kapitole 2.3.2.

Podle způsobu zpracování dielektrických kapalných izolantů je můžeme rozdělit na tři typy: minerální, přírodní a syntetické oleje. Typickými představiteli těchto kapalin jsou silikonové oleje, esterické kapaliny a v poslední době intenzivně zkoumané nano-kapaliny [5] [6].

Tabulka 2.1 Teorie popisující vznik elektrického přeskoku v kapalných izolantech [6]

Název teorie	Stručná vysvětlivka teorie
Plynová teorie	Přeskok se rozvíjí v silně deformovaných plynových bublinkách. Zdrojem plynu jsou elektrody i samotný kapalný izolant.
Plynově-tepelná teorie	Přeskok se formuje v plynové vrstvičce oddělující elektrodu od kapaliny. Na hranici mezi kapalinou a plynem se zvětšuje teplota, až dosáhne bodu varu (kritický stav).
Tepelná teorie	Přeskok se při napěťovém impulzu může rozvíjet v plynových bublinkách, které vznikají lokálním přehřátím a varem kapaliny.
Teorie kapkového můstku	Mezi elektrodami se vytvoří můstek z vodních kapek, které se rozkládají na ionty. Ty se zachytávají na povrchu můstku. Při určitém kritickém napětí se ionty začínají pohybovat, můstek se stává vodivým a mezi elektrodami dochází k přeskoku.
Teorie můstku polarizačních částic	Přeskok vzniká podél vodivého můstku tvořeného polarizovanými částicemi příměsí, které se přemisťují do míst s největším gradientem.
Teorie zesilující se emise elektronů z katody	Studená emise elektronů je zesilována elektrickým polem, které je vyvoláno ionty přítomnými v polovodivé vrstvě na povrchu katody. Původně homogenní elektrické pole se stává nehomogenním a v místech, kde dosáhne kritické hodnoty, se začíná rozvíjet jiskra – dochází k přeskoku.
Teorie emise a nárazové ionizace	Elektrony vnikající do kapaliny při studené emisi na katodě vyvolávají nárazovou ionizaci. Prostorový náboj zesiluje studenou emisi a přispívá tak k rozvoji přeskoku.
Teorie postavená na teorii průrazu krystalů	Přeskok je vyvolán mechanismem nárazové ionizace, kdy elektrony uvolněné díky tunelovému jevu získají působením elektrického pole dostatečnou energii, větší, než je energie ztracená při interakci s částicemi tvořícími izolant.

2.2.1 Minerální oleje

Minerální oleje jsou nejstarším a doposud nejrozšířenějším využívaným druhem izolačních kapalin využívaným v elektrotechnice. Jsou to látky získávané destilací ropy, které mají výborné izolační vlastnosti, nízkou viskozitu a jsou především levné. Jejich nevýhodou je rychlé stárnutí a ekologická závadnost. Minerální oleje pohlcují vodu nebo vlhkost ze vzduchu a tím si snižují jejich dielektrické vlastnosti. Tyto oleje jsou ekologicky nerozložitelné, proto se hledá jejich alternativa, která je ekologicky příznivější a z pohledu dielektrických parametrů srovnatelná [8] [9].

2.2.2 Přírodní oleje

Přírodní oleje, nebo také rostlinné oleje, elektroizolační kapaliny vyráběné z olejnatých semen rostlin. Jsou ekologickou a obnovitelnou alternativou minerálních olejů. Jejich dielektrické a fyzikální parametry se určují při výrobě a výběrem rostliny, ze které jsou získány.

Podle chemické reakce s kyslíkem, dělíme přírodní oleje na:

- vysýchavé – lněný olej, dřevný olej,
- nevysýchavé – řepkový, slunečnicový, olivový nebo ricinový olej.

[8]

2.2.3 Syntetické oleje

Syntetické oleje jsou další možnou náhradou minerálních olejů. Jsou to oleje uměle vytvořené. Podle způsobu výroby a složení se dělí na mnoho podskupin, ze kterých má každá svoje specifické vlastnosti. Mohou být ekologicky nezávadné, nehořlavé, mít výborné izolační vlastnosti nebo pracovat i při vysokých teplotách [8] [9].

2.2.4 Silikonové kapaliny

Silikonové kapaliny se řadí do skupiny syntetických olejů. Jsou to izolanty s výbornými dielektrickými vlastnostmi. Odpuzují vodu, jsou odolné vůči oxidaci, jsou ekologicky nezávadné a chemicky inertní. Jsou špatně hořlavé a mají vysoký bod tuhnutí. Pro své vlastnosti se využívají jako spojky vodičů, izolace součástek, izolátory nebo jako výplň v transformátorech.

V transformátorech výborně splňují elektroizolační požadavky, avšak výplně transformátorů musí i efektivně zajišťovat odvod vznikajícího tepla z provozu na plášť transformátoru. Silikonové oleje však mají poměrně vysokou viskozitu, která zhoršuje přenos tepla [8] [10].

2.2.5 Esterické kapaliny

Esterické kapaliny jsou typickým zástupcem přírodních olejů. Jedná se o přírodní látku vyskytující se například v tucích a olejích. Chemický proces vzniku esterů se nazývá esterifikace. Jejich největší výhodou je biologická nezávadnost a fakt, že se vyrábí z olejnatých semen rostlin, tedy z obnovitelných zdrojů. Jsou chemicky neinertní a nerozpustné ve vodě [8].

2.2.6 Nano-kapaliny

V posledních letech se začalo experimentovat s nano částicemi v izolačních kapalinách. Došlo ke zjištění, že přidá-li se do již známého minerálního oleje aditiva nano částic oxidu titaničitého TiO_2 , má to za následek zlepšení dielektrických a tepelných vlastností dané izolační kapaliny. Takové přidané částice mají velikost průměru do 100 nm. Navýšení elektrické pevnosti základního minerálního oleje závisí na množství a druhu přidaného aditiva. Výsledky experimentu publikované v článku IEEE [11] udávají navýšení elektrické pevnosti nově vzniklé nano-kapaliny o 20 % až 40 %, a to i při vyšších provozních teplotách [11].

Tabulka 2.2 a Tabulka 2.3 obsahují naměřené hodnoty zveřejněné v publikaci IEEE [11].

Tabulka 2.2 Průrazné napětí pro minerální olej a pro nano-kapalinu s 0,01 % aditivy [11]

Průrazné napětí [kV]		% navýšení			
Teplota [°C]	Minerální olej	Minerální olej sloučený s 0,01 % nanočásticemi			
		TiO ₂	BaTiO ₃	TiO ₂	BaTiO ₃
35	46,4	54,3	58,7	17	26
40	49,2	58,1	60,8	18	22
50	50,5	61,9	67,5	22	34
60	53,1	67,8	70,4	26	32
70	54,3	69,4	73,6	28	35
80	57,8	70,7	75,9	23	32
90	62,4	71,5	76,3	14	23

Tabulka 2.3 Průrazné napětí pro minerální olej a pro nano-kapalinu s 0,03 % aditivy [11]

Průrazné napětí [kV]		% navýšení			
Teplota [°C]	Minerální olej	Minerální olej sloučený s 0,03 % nanočásticemi			
		TiO ₂	BaTiO ₃	TiO ₂	BaTiO ₃
35	46,4	56,5	60,8	22	30
40	49,2	59,6	62,3	20	26
50	50,5	64,3	69,7	28	38
60	53,1	69,5	73,2	30	38
70	54,3	72,2	74,8	35	37
80	57,8	73,8	76,7	28	33
90	62,4	74,6	77,3	19	24

2.3 Parametry ovlivňující elektrickou pevnost

Na velikost elektrické pevnosti materiálů mají vliv již pro nás známé veličiny, jako je přiložené napětí a tloušťka materiálu. Existuje však celá řada dalších parametrů, které ovlivňují elektrickou pevnost dielektrik, ty však nejsou zahrnuty v rovnici (2.1). Je proto potřeba ke každým hodnotám elektrické pevnosti různých materiálů zmínit, jak a za jakých podmínek bylo dané měření prováděno.

2.3.1 Povrch vzorku a elektrod

Parametr povrchu vzorku se týká pouze pevných dielektrických materiálů. Jedním z nejvýznamnějších negativních vlivů má kvalita testovací plochy vzorku a kvalita plochy elektrod. Rozumí se tím hladkost a rovnost vzorku, na který dosedají zkušební elektrody. Nedokonalé hladký a rovný povrch vzorku nebo elektrod by měl za následek nedokonalý kontakt povrchů. V malém měřítku by vznikaly plazivé výboje a koróna, které výrazně

uspíší materiálovou degradaci. Kdyby měl zkoušený vzorek zešikmený povrch, elektrodový systém by nedosedal rovnoměrně v celé své ploše. Docházelo by k působení nehomogenního elektrického pole a k předčasným výbojům mezi elektrodou a vzorkem.

2.3.2 Kvalita vzorku

Kvalita vzorku se týká jak pevných, tak kapalných materiálů. Tento parametr ovlivňuje především způsob výroby daného materiálu, ale v případě kapalných dielektrik i jejich skladování. Skladování kapalných dielektrických vzorků je popsáno v kapitole 3.4.1.

Kvalitu vzorku pevných dielektrik ovlivňují již zmíněné plynové bublinky a nežádoucí příměsi, které vznikají při výrobě daného materiálu.

U technicky čistých kapalin hraje zásadní roli v dokonalosti kapalného izolantu podíl nežádoucích příměsí a nečistot. Z důvodu jejich eliminace je potřeba danou kapalinu několikrát destilovat, filtrovat a dokonale vyčistit veškeré plochy, se kterými přijde kapalina do styku. Takové makroskopické nečistoty se samovolně pohybují uvnitř látky. Jakmile jsou však vystaveny elektrickému poli, pevné částice jsou vlivem působení odpudivých sil vtahovány do míst největší elektrické intenzity. V takových místech se začnou hromadit a tvořit tak řetězce mezi elektrodami, které mají za následek elektrický přeskok.

Nežádoucí příměsi v kapalných vzorcích mohou být i plynové bublinky. Množství plynových bublinek je dáno mimo jiné i tlakem ve zkoušené kapalině. Mechanismus chování bublinek v momentě přiložení napětí na elektrody je obdobný, jako u pevných částic. Takové plynové bublinky jsou zpočátku rozptýleny v objemu kapaliny, ale postupně se usazují na povrchu elektrod. Tento usazený plyn mívá nižší elektrickou pevnost, než samotná izolační kapalina, tudíž se snižuje elektrická pevnost celého zkoušeného prvku. Dále elektrickým namáháním těchto plynových kapslí tu vznikají předběžně elektrické výboje, které postupně ohřívají okolní kapalinu, které má opět negativní účinky na testovaný celek [5] [6].

2.3.3 Elektrody

Elektrody určují tvar působícího elektrického pole a jeho homogenitu. Existuje mnoho tvarů elektrod. Nejpoužívanější elektrody pro kapalná dielektrika jsou hříbkového tvaru. U pevných dielektrik je výběr z tvarů rozmanitější. Při výběru záleží na tom, co přesně chceme zkoušet. Pevné vzorky mohou být desky, fólie, papíry, trubky, apod. Použití vhodného tvaru elektrod na většinu používaných pevných vzorků specifikuje norma ČSN EN 60243-1.

Dokonce i materiál elektrod hraje roli ve vlivu na elektrickou pevnost, to bylo ovšem jednoznačně dokázáno pouze u velmi čistých kapalin. V technicky čistých kapalinách je jeho vliv malý [6].

Více než materiál, nás zajímá samotná čistota a dokonalý povrch elektrod. Z důvodů snahy o co nejvíce homogenní pole se povrch elektrod leští a zbavuje se nečistot.

2.3.4 Teplota a frekvence

Zvyšující se teplota i frekvence mají za následek snižování hranice elektrické pevnosti dielektrických materiálů. Teplota působí na elektrickou pevnost vlivem, který je již zmíněn v kapitole 2.1.2. Teplota vzorku je ovlivňována kvalitou vzorku (dielektrické ztráty a Jouleovy ztráty), teplotou okolí, kvalitou odvodu vznikajícího tepla a délky doby působení elektrického pole.

Zvyšující se frekvence má za následek vyšší dielektrické ztráty. Od určité hodnoty se již dipólové molekuly nestačí natáčet do změny elektrického pole a vznikají tak ztráty, které se při dále zvyšující frekvenci ustálí [6].

2.3.5 Charakter a doba působení zkušebního napětí

Pevné a plynné částice v izolační kapalině interagují s druhem přiloženého napětí. Jedná-li se o impulzní zatěžování materiálu, přítomné nežádoucí částice nemají čas se přemístit do míst s největší elektrickou intenzitou a nemohou tak vytvářet vodivé můstky mezi elektrodami. Zároveň se impulzním napětím snižuje tepelné namáhání vzorků, které by také způsobilo snížení elektrické pevnosti. Experimentálně bylo zjištěno, že ta samá izolační kapalina má výrazně vyšší elektrickou pevnost při zatížení impulzním napětím, než při pomalém zvyšování přiloženého napětí.

Doba působení elektrického pole také umožňuje již popsany elektrochemický průraz, který se může projevit po měsících až letech zatěžování materiálu [6].

2.3.6 Přítlačná síla elektrod na vzorek

Při zkoušení elektrické pevnosti deskových a papírových dielektrik se nejčastěji využívají elektrody válcového tvaru. Elektrody jsou umístěny vertikálně, přičemž vzorek leží na spodní elektrodě a horní elektroda dosedá na zkoušený vzorek a působí na něj silou, která je dána tíhou elektrody. Působící tlak elektrody na vzorek je žádaný. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3.1, jakákoliv vzduchová mezera mezi vzorkem a elektrodou snižuje přesnost měření a dochází k poškozování vzorku či elektrod.

3. NORMOVANÉ PARAMETRY

Jak již víme, výsledky měření elektrické pevnosti pevných a kapalných dielektrik může zkreslit, či znehodnotit celá řada vlivů. Abychom zjistili přibližnou relativní elektrickou pevnost izolačních materiálů, musíme postupovat v měření podle daných pravidel. Tyto pravidla zahrnují např.: rozměry a parametry vzorků, požadavky na zkušební zdroje, tvar a úprava elektrod nebo postup samotného měření. Základní informace a parametry pro správné měření elektrického průrazu popisují České státní normy. Výsledky zkoušek pro měření elektrické pevnosti materiálu jsou však relativní, dají nám přibližný pohled na kvalitu materiálu.

Měření průrazu pevných dielektrik můžeme rozlišit podle charakteru zkoušeného napětí. Každý z používaných charakterů zkoušeného napětí používaného při měření elektrického průrazu je popsán v samostatné části ČSN EN 60243:

- Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech.
- Část 2: Dodatečné požadavky na zkoušky při použití stejnosměrného napětí.
- Část 3: Dodatečné požadavky na impulzní zkoušky.

Měření průrazného napětí v izolačních kapalinách popisuje norma ČSN EN 60156. Charakter zkušebního napětí bývá vždy s průmyslovým kmitočtem.

Informace v kapitole Normované parametry jsou převzaty z Českých státních norem: [12] [13] [14] [15] [16].

3.1 Měření průrazu pevných izolantů při průmyslových kmitočtech

Nejčastějším charakterem zkušebního napětí při měření elektrické pevnosti pevných dielektrik je napětí střídavé s frekvencí průmyslových kmitočtů. Uvedené zkoušky se provádí pro kmitočty v rozsahu 48 Hz ÷ 62 Hz. Jedná se o nejčastější charakter napětí, kterým je dielektrikum v provozu zatěžováno. Tento druh zkoušky se bere jako základní a od jeho postupů a pravidel se odvíjí dodatečné požadavky na zkoušky stejnosměrným napětím a na impulzní zkoušky.

3.1.1 Elektrody

Jak již bylo zmíněno, na použité elektrody jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu jejich zpracování. Mechanické vlastnosti použitého materiálu na elektrody musí umožňovat vytvořit co nejhladší povrch. Ne všechny materiály je možné dostatečně „zrcadlově“ vyčistit a udržovat v hladkém stavu. Dále je nutné, aby daný materiál byl odolný vůči vznikajícím výbojům. Z toho důvodu se využívají elektrody z nerezavějící oceli, které dobře odolávají termické degradaci a vytrhávání materiálu z elektrody při výboji. Nicméně ocel se špatně opracovává a některé chemické vlivy olejů mohou na ni mít

negativní vliv. Proto se často používají elektrody z mosazi. Elektrody se musí udržovat vždy čisté a hladké, zvláštní důraz na hladkost povrchu elektrod se musí dbát při měření tenkých materiálů. Příklady k elektrodám nesmí naklánět elektrody, nebo nějak zvlášť ovlivňovat tvar elektrického pole kolem vzorku. Pro měření pevných deskových dielektrik se využívá „gravitačního“ přitlaku, který je dán hmotností vrchní elektrody [12].

V Tabulka 3.1 je vypsáno několik základních druhů elektrod, které norma přesně popisuje.

Tabulka 3.1 Přehled tvarů elektrod a jejich bližší specifikace [12]

Tvar elektrod	Specifikace uspořádání
Nestejně elektrody	Elektrody mají tvar dvou kulových válců se zaoblenými okraji o poloměru $(3 \pm 0,2)$ mm. První elektroda má průměr (25 ± 1) mm a výšku 25 mm. Druhá elektroda má průměr (75 ± 1) mm a výšku 15 mm. Elektrody musí být uloženy ve vzdálenosti 2 mm až 3 mm, v závislosti na tloušťce zkoušeného materiálu. Z důvodu velkého průměru spodní elektrody se zkracuje dráha plazivých proudů mezi elektrodami. Nestejně elektrody se využívají tehdy, není-li možné zajistit sousost elektrod s přesností minimálně 1 mm.
Elektrody stejného průměru	Obě elektrody jsou válcového tvaru s průměrem (25 ± 1) mm. Okraje válců musí být zaobleny na poloměr $(3 \pm 0,2)$ mm. Výška horní elektrody je 25 mm a výška spodní elektrody je 15 mm.
Kulové a deskové elektrody	Horní elektroda musí být koule o průměru (20 ± 1) mm a spodní elektroda je desková o průměru (25 ± 1) mm se zaoblenými okraji o poloměru 2,5 mm. Odchylka středových os musí být v rozmezí 1 mm.
Tyčové elektrody	Každá elektroda má průměr $(6 \pm 0,1)$ mm, uloženy vertikálně nad sebou, příčměž vzorek je vložen mezi nimi. Obě elektrody musí být sousé s odchylkou do 0,1 mm. Čela elektrod jsou rovinná v pravém úhlu k jejich osám a se zaoblenou hranou o poloměru $(1 \pm 0,2)$ mm.
Kuželovité kolíkové elektrody	Ve vzorku je potřeba vyvrtat dvě rovnoběžné díry o rozteči (25 ± 1) mm pomocí kuželového výstružníku o úkosu 2 %. Průměry širších konců musí být v rozmezí $(4,5 \div 5,5)$ mm. Během vrtání se vzorek nesmí nijak poškodit. Díry jsou vyvrtány skrz vzorek. Kuželové elektrody mají úkos $(2 \pm 0,02)$ % a zatlačí se do otvorů tak, aby dosedly a vyčnívaly ze vzorku nejméně 2 mm. Tento typ elektrod je vhodný na zkoušení pevných materiálů o tloušťce alespoň 1,5 mm.
Rovnoběžné válcové elektrody	Využívají se při zkouškách materiálů s tloušťkou vyšší, než 15 mm. Daný vzorek musí mít rozměry 100 mm × 50 mm. Do vzorku se vyvrtají dvě díry o průměru maximálně 0,1 mm větší, než je průměr použitých elektrod. Elektrody mají průměr $(6 \pm 0,1)$ mm a jejich konec je ve tvaru polokoule. Otvor ve vzorku musí mít také kulové dno takové, aby nebyla mezera mezi elektrodou a povrchem větší než 0,05 mm. Okraje otvorů jsou od sebe vzdáleny (10 ± 1) mm a jsou vyvrtány do takové hloubky, aby mezi dnem otvoru a okraje vzorku byla vzdálenost $(2,25 \pm 0,25)$ mm.

3.1.2 Zkušební vzorky

Volba rozměrů zkoušeného pevného dielektrika je poměrně důležitá záležitost. Tloušťka zkoušeného materiálu má vliv na samotnou elektrickou pevnost zkoušeného vzorku, jak je uvedeno ve vztahu (2.1). Elektrická pevnost se však mění nelineárně se změnou tloušťky materiálu. To je způsobeno vyšší nehomogenitou materiálu a větším množstvím nežádoucích inkluzí. Proto je doporučeno zkoušet vzorek s takovou tloušťkou, kterou bude mít v provozu. Způsoby testování různých tlouštěk a druhů materiálů jsou popsány v normě ČSN EN 60243-1.

Avšak i šířka a délka vzorku jsou při zkoušce zásadní. Má-li zkoušený materiál příliš vysokou elektrickou pevnost a zároveň má daný vzorek příliš malé rozměry, dojde ke vzniku plazivých proudů mezi elektrodami a může dojít až k předčasnému přeskoku skrz okolní vzduch, přičemž zkoušený vzorek zůstane neproražen. Z toho důvodu norma ČSN EN IEC 62631-2-1 doporučuje rozměry zkoušených deskových vzorků 100 mm x 100 mm x 3 mm. Může se stát, že i normované rozměry vzorku jsou nedostatečné k zabránění předčasných průrazů. Taková situace se řeší pomocí změny okolního prostředí, viz kapitola 3.1.3 [15].

Každý vzorek je potřeba před zkouškou řádně připravit. Kromě volení správných rozměrů vzorků musíme věnovat zvýšenou pozornost jejich povrchům a styku s elektrodami. Je důležité dosáhnout co nejvíce rovnoběžného povrchu vzorku s elektrodou a aby jeho povrch byl rovný a hladký, jak jen to materiál dovolí. Dostatečně velký povrch vzorku je důležitý z důvodu možných přeskoků během provádění zkoušek kolmo na povrch materiálu.

Důležitá je i samotná aklimatizace vzorku. Pokud není u daného materiálu uvedeno jinak, musí být vzorky ponechány nejméně 24 h při (23 ± 2) °C a relativní vlhkosti (50 ± 5) % [12].

3.1.3 Okolní prostředí

Častokrát má zkoušený vzorek vyšší elektrickou pevnost než okolní vzduch. Z tohoto důvodu je potřeba daný vzorek umístit do takového prostředí, které má vyšší elektrickou pevnost. K takovým účelům norma [12] nakazuje použít transformátorový olej podle IEC 60296, silikonovou kapalinu podle IEC 60836 nebo esterovou kapalinu podle IEC 61099. Volbu okolního prostředí zkoušky volíme tak, aby okolní médium mělo co nejmenší nepříznivý vliv na vzorek během zkoušky.

Vzorky s dostatečně nízkou elektrickou pevností se mohou testovat ve vzduchu, obzvlášť při zkoušce při zvýšené teplotě. V takovém případě je nutné měření provádět v peci, která je schopna udržovat teplotu vzduchu v rozmezí ± 2 K od specifikované teploty [12].

3.1.4 Požadavky na zkušební přístroje

Zdroj zkušebního napětí je tvořen VN transformátorem napájeným sinusovým napětím z nízkonapěťového zdroje.

Zkušební zdroj musí mít tyto vlastnosti:

- Poměr maximální a efektivní hodnoty zkušebního napětí musí být $\sqrt{2} \pm 5\%$ pro všechna napětí až do průrazného napětí.
- Zdroj musí být schopný dodat potřebné napětí pro uskutečnění elektrického průrazu vzorku. Pro většinu materiálů se doporučuje hodnota výstupního proudu 40 mA.
- Regulace napětí musí být přesná, rovnoměrná a bez překmitů. Odchylka hodnoty napětí nesmí přesáhnout 1 % z předpokládané hodnoty průrazného napětí.
- Ochranu zdroje před poškozením tvoří odpojovací zařízení, které jej odpojí od elektrického přívodu po několika periodách napětí po průrazu.
- Pro snížení účinku rázové vlny proudu, která by jinak mohla poškodit zdroj napětí nebo elektrody, se vkládá do série do obvodu ochranný rezistor. Především, je-li zdroj tvrdý a došlo by při průrazu k poškození nebo opálení elektrod.

Hodnoty se zaznamenávají ve špičkových hodnotách. Využívá se tzv. vrcholových voltmetrů. Taková naměřená hodnota vrcholovým voltmetrem je potřeba vydělit $\sqrt{2}$. Celková chyba měření napětí nesmí překročit 1 % měřené hodnoty. Měřící voltmetr se připojuje do obvodu elektrod přes napěťový dělič, nebo přes převodní transformátor. Požaduje se, aby hodnota napětí, při které nastane elektrický průraz, zůstala zobrazena na voltmetru [12].

3.1.5 Druhy zkoušek

Existuje celá řada zkoušek pro zkoušení elektrického průrazu materiálů, které jsou podrobně popsány v normě [12]. V podstatě se liší pouze dobou zatěžování a rychlostí nárůstu zkušebního napětí.

U každého typu zkoušky se provádí 5 zkoušek. Výsledná hodnota elektrické pevnosti nebo průrazného napětí se určí pomocí mediánu. Jestliže se jakákoliv naměřená hodnota liší od mediánu o více než 15 %, je nutné provést dalších 5 zkoušek a výslednou hodnotou se stane medián těchto 10 zkoušek.

1) Krátkodobá zkouška

Během této zkoušky se zvyšuje rovnoměrně napětí od nuly až do průrazu. Rychlost nárůstu napětí se vybere z řady:

100 V/s; 200 V/s; 500 V/s; 1 000 V/s; 2 000 V/s; 5 000 V/s; atd.

Rychlost nárůstu napětí se volí tak, aby k průrazu došlo mezi 10 s až 20 s. Výsledná hodnota zkoušky se bere jako pravděpodobná hodnota průrazného napětí daného materiálu, od které se odvíjí startovací hodnoty zkušebního napětí u jiných druhů zkoušek.

2) Zkouška se stupňovitým zvyšováním napětí

Během této zkoušky se začíná s napětím, které se rovná 40 % pravděpodobného krátkodobého průrazného napětí. Pokud tato hodnota není známa, určí se podle výsledku z krátkodobé zkoušky. Tímto počátečním napětím se zatíží vzorek po dobu 20 s. Pokud vzorek vydrží tuto zátěž, pokračuje se ve zkoušce. Napětí se zvyšuje podle Tabulka 3.2. Každé navýšení napětí se provede stupňovitě s 20s stupni, dokud nedojde k průrazu.

Tabulka 3.2 Přírůstky napětí pro stupňovité zvyšování napětí [12]

Počáteční hodnota napětí [kV]	Přírůstek [kV]
0 ÷ 1	10 % počátečního napětí
1 ÷ 2	0,1
2 ÷ 5	0,2
5 ÷ 10	0,5
10 ÷ 20	1,0
20 ÷ 50	2,0
50 ÷ 100	5,0
100 ÷ 200	10,0
Nad 200	20,0

Jestliže k průrazu dojde dříve než po šesti stupních navýšení napětí od počátku zkoušky, zkouška se musí provést pro dalších 5 vzorků, tentokrát se ale začne s nižším počátečním napětím. Elektrická pevnost materiálu se určuje na základě nejvyšší hodnoty napětí, které vzorek odolal po 20 s bez průrazu.

Může se také provést zkouška se stupňovitým zvyšováním napětím s 60s stupni, která má stejný postup, jako zkouška se stupňovitým zvyšováním napětím s 20s stupni.

3) Zkouška s pomalým náběhem napětí

Napětí se zvyšuje od 40 % pravděpodobného krátkodobého průrazu rovnoměrně tak, aby průraz nastal mezi 120 s až 240 s. Rychlost zvyšování napětí se volí z řady:

2 V/s; 5 V/s; 10 V/s; 20 V/s; 50 V/s; 100 V/s; 200 V/s; 500 V/s; 1 000 V/s; atd.

Stejný postup platí i při zkoušce s velmi pomalým náběhem napětí (průraz musí mezi 300 s až 600 s zkoušky). Rychlost zvyšování napětí se volí z řady:

1 V/s; 2 V/s; 5 V/s; 10 V/s; 20 V/s; 50 V/s; 100 V/s; 200 V/s; atd.

Zkouška s pomalým náběhem napětí a s velmi pomalým náběhem napětí mají přibližně stejné výsledky, jako zkouška stupňovitá se stupni 20 nebo 60 s. Pokud je k dispozici moderní automatická zařízení, jsou tyto zkoušky vhodnější, než zkoušky stupňovité.

4) Kontrolní zkoušky

Může být také požadováno aplikovat předem určené kontrolní napětí z důvodu kontrolní nebo odolnostní zkoušky. Takové přiložené napětí zvyšujeme maximální rychlostí s ohledem na přesní dosažení požadované hodnoty bez překmitu.

[12]

3.1.6 Protokol o zkoušce

Dle normy [12], kompletní protokol musí obsahovat tyto základní údaje o zkoušce:

- 1) identifikaci zkoušeného materiálu, popis vzorků, postup jejich úpravy,
- 2) medián elektrické pevnosti v $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ a/nebo průrazného napětí v kV,
- 3) tloušťku každého zkušební vzorku,
- 4) okolní prostředí zkoušeného vzorku a jeho vlastnosti,
- 5) systém použitých elektrod,
- 6) způsob aplikace napětí a kmitočet,
- 7) jednotlivé naměřené hodnoty elektrických pevností a/nebo průrazných napětí,
- 8) aklimatizace vzorků před zkouškou,
- 9) indikaci druhu a místa průrazu.

Pokud je však dostačující pouze zkrácená verze protokolu, musí v ní být uvedeno alespoň prvních šest zmíněných údajů.

3.2 Měření průrazu pevných izolantů stejnosměrným napětím

V dnešní době se stále rozšiřují zařízení využívající vysoké stejnosměrné napětí. Z toho důvodu se u některých materiálů provádí i dodatečné zkoušky na stejnosměrné napětí.

Pro většinu materiálů platí, že stejnosměrné průrazné napětí je vyšší než napětí střídavé. Pro některé materiály, obzvláště pro nehomogenní, může být stejnosměrné průrazné napětí až třikrát větší, než napětí střídavé.

Měření průrazu pevných izolantů pomocí stejnosměrného napětí je dodatečnou zkouškou. Pokud tedy nebude uvedeno jinak, veškerá pravidla pro elektrody, zkušební vzorky a okolní prostředí budou stejná, jako v kapitole 3.1.

3.2.1 Požadavky na zkušební přístroje

Norma [13] ukládá, aby stejnosměrné napětí bylo zajištěno takovým zdrojem, který splňuje následující podmínky:

- Musí být zajištěna volba přívodu napětí kladné nebo záporné polarity, přičemž jedna z elektrod musí být uzemněna.
- Zvlnění napětí přivedeného na elektrody nesmí přesáhnout 2 % jmenovité hodnoty napětí na všech napěťových úrovních, které jsou vyšší než 50 % předpokládaného průrazného napětí.

3.2.2 Popis zkoušky stejnosměrným napětím

Pokud není stanoveno jinak, průběh samotné zkoušky a počet testů je shodný s krátkodobou zkouškou, zkouškou s pomalým nebo velmi pomalým náběhem napětí, nebo s kontrolní zkouškou, které jsou popsány v kapitole 3.1.5.

Mnoho materiálů je schopno si po delší dobu udržet nahromaděný náboj i po odstranění zkušebního napětí a odpojení napěťového zdroje. V takovém případě se může na odpojených elektrodách vyskytnout nenulové napětí. Z toho důvodu je nutné elektrody zkratovat a uzemnit po dobu rovnou minimálně dvojnásobku nabíjecího času.

Může být použito ochranného rezistoru zapojeného do série. Takový rezistor zajistí snížení proudu obvodem, který by mohl poškodit elektrody v momentě elektrického průrazu [13].

3.2.3 Protokol o zkoušce

Norma [13] požaduje, aby protokol o zkoušce obsahoval tyto zásadní informace:

- 1) identifikaci zkoušeného materiálu, popis vzorku a metodu jeho úpravy,
- 2) polaritu napětí,
- 3) medián a jednotlivé hodnoty elektrických pevností a/nebo průrazných napětí,
- 4) popis prostředí během zkoušky, popř. popis obklopujícího média,
- 5) použité elektrody,
- 6) volba zkoušky,
- 7) popis aklimatizace vzorku před zkouškou,
- 8) popis typu a místa průrazu na zkušebním vzorku.

3.3 Měření průrazu pevných izolantů impulzní zkouškou

Mnohá zařízení, ve kterých je použito pevných izolantů, musí být navrženo tak, aby odolávaly přechodným napětím. Těmto podmínkám jsou tak vystaveny i samotné izolanty. Norma ČSN EN 60243-3 popisuje průběh zkoušky, která simuluje odolnost pevných izolantů proti úderu blesku.

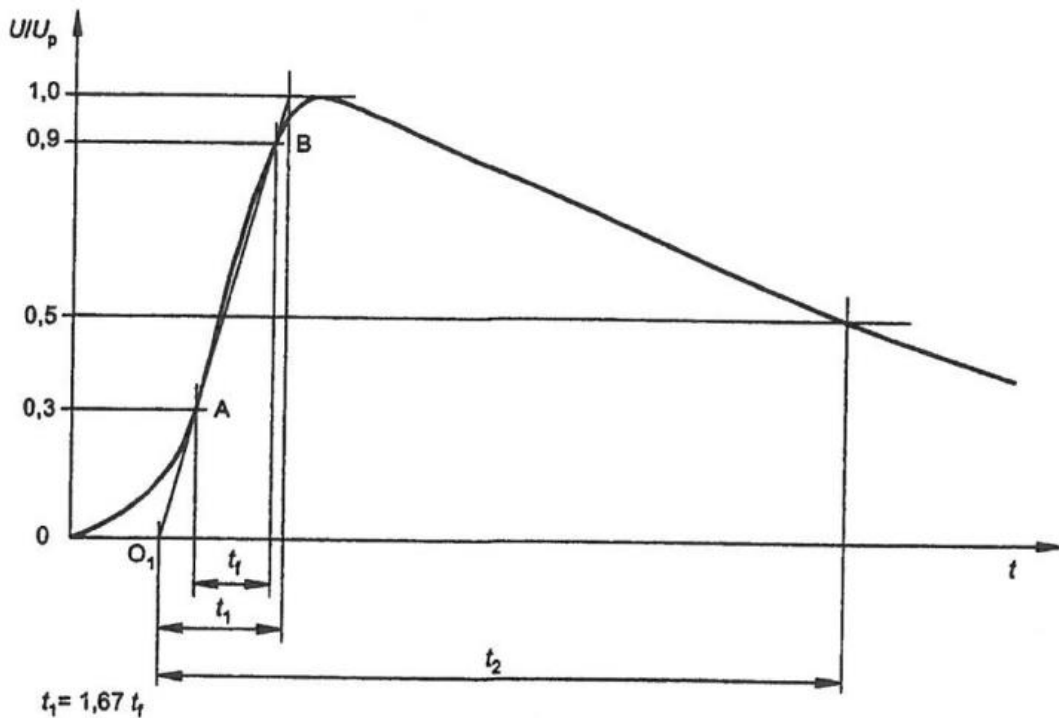
Normalizovaný tvar takového napěťového impulzu je 1,2/50 μ s. Takový impulz dosahuje své vrcholové hodnoty za 1,2 μ s a po 50 μ s od svého začátku poklesne jeho vrcholová hodnota na 50 %.

Jedná se o dodatečnou zkoušku. Pokud tedy nebude uvedeno jinak, veškerá pravidla pro elektrody, zkušební vzorky a okolní prostředí budou stejná, jako v kapitole 3.1.

Impulzní napětí je definováno následujícími parametry:

- Virtuální vrcholová hodnota U_1 - vrcholová hodnota napěťového impulsu odvozená z jeho průběhu. Obsahuje vysokofrekvenční oscilace nebo překmit omezené velikosti.
- Virtuální doba čela t_1 - doba rovna 1,67násobku intervalu t_f mezi okamžiky, v nichž napětí dosáhne 0,3 násobku a 0,9násobku vrcholové hodnoty.
- Virtuální doba půltýlu t_2 - časový interval mezi počátkem impulsu a okamžikem, kdy napětí týlu poklesne pod polovinu vrcholové hodnoty.

Virtuální parametry u impulzní zkoušky jsou přehledně vyznačeny na Obrázek 3.1.



Obrázek 3.1 Průběh impulzního napětí 1,2/50 μ s [14]

3.3.1 Požadavky na zkušební přístroje

Generátor napěťových impulsů musí podle [14] zajistit napětí s těmito vlastnostmi:

- Musí být zajištěna volba přívodu napětí kladné nebo záporné polarity, přičemž jedna z elektrod musí být uzemněna.
- Regulace generátoru musí umožnit nastavení tvaru napěťového impulsu s virtuální dobou čela $t_1 = 1,2 \mu\text{s} \pm 0,36 \mu\text{s}$ a virtuální dobu půltýlu

$t_2 = 50 \mu\text{s} \pm 10 \mu\text{s}$. Na generátor dáváme testované vzorky s velkým rozsahem kapacit. S vyšší kapacitou klesá účinnost generátoru, vrcholová hodnota klesá a impulsy se natahují. Proto takto velká tolerance čela a týlu je u generátoru výhodou, nemusí se tak kvůli každému vzorku jinak nastavovat.

- Generátor musí být schopen zajistit dostatečné napětí a výkon potřebný k dosažení elektrického průrazu zkoušeného vzorku.

3.3.2 Popis zkoušky napět'ovými impulzy

Zkoušku tvoří rostoucí sada impulzů. Každá sada impulzů obsahuje tři impulsy o stejné vrcholové hodnotě napětí. Vrcholová hodnota napětí počáteční sady by měla být 70 % očekávaného průrazného napětí. Každá další sada impulzů má vrcholovou hodnotu napětí vyšší o 5 % až 10 %, než vrcholová hodnota impulzů z první sady.

Musí se počkat na rozptýlení injektovaných prostorových nábojů. Pro většinu materiálů stačí časová konstanta nabíjení generátoru. Materiály s delší dobou uchování prostorového náboje by měly mít tento údaj zadaný od výrobce.

Vzorek prošel zkouškou, jakmile odolal alespoň dvěma skupinám impulzů, aniž by došlo k průrazu, a po nich nastane průraz až na následující hladině. Výsledná elektrická pevnost materiálu je poslední virtuální hodnotou vrcholové hodnotě nejvyššího nastaveného napětí, za kterého nedošlo k průrazu při třech impulzech. Průrazné napětí je jmenovité napětí další série impulzů, při které by došlo k průrazu.

Přechodné napětí může mít kladnou nebo zápornou polaritu. Při zkoušce se symetrickými elektrodami polarita napětí nemá na elektrickou pevnost vzorku vliv. Při zkoušce s asymetrickými elektrodami se doporučuje provést zkoušku pro obě polarity. Nižší naměřenou hodnotu uvažujeme jako výslednou elektrickou pevnost či průrazné napětí [14].

3.3.3 Protokol o zkoušce

Řádný protokol o zkoušce musí obsahovat všechny důležité údaje. Pomocí těchto údajů musí být jasné výsledky měření a musí být přesně popsány okolnosti, během kterých tato zkouška byla prováděna, jelikož výsledná hodnota elektrické pevnosti materiálu či průrazného napětí se vztahuje pouze na tyto podmínky. Jiné podmínky by způsobily rozdíly ve výsledcích měření.

Dle normy [14], protokol o zkoušce elektrické pevnosti impulzním napětím musí obsahovat informace o:

- 1) identifikaci zkoušeného materiálu, popis vzorku a metodu jeho úpravy,
- 2) polaritu napětí,
- 3) medián a jednotlivé hodnoty elektrických pevností a/nebo průrazných napětí,
- 4) popis prostředí během zkoušky, popř. popis obklopujícího média,
- 5) popis aklimatizace vzorku před zkouškou,
- 6) popis typu a místa průrazu na zkušebním vzorku.

3.4 Měření průrazu izolačních kapalin

Metodu zkoušení průrazného napětí izolačních kapalin při síťovém kmitočtu popisuje ČSN EN 60156. Tato zkouška je vhodná pro všechny typy izolačních kapalin. Zkušební napětí je sinusového průběhu o frekvenci $48 \text{ Hz} \div 62 \text{ Hz}$.

3.4.1 Zkušební nádoby

1) Zkušební komůrka

Komůrka musí být vyrobena z průhledného izolačního materiálu, který je chemicky netečný a nereaguje se zkoušenou izolační kapalinou ani s čistícími prostředky. Taková komůrka musí být objem v rozmezí 350 ml až 600 ml. Musí být opatřena víkem.

Je doporučeno využívat zkušební komůrku na jeden typ izolační kapaliny, aby se zamezilo případné kontaminaci. Když to okolnosti nedovolí, je třeba pečlivě komůrku vyčistit při každé změně zkoušené izolační kapaliny. V takovém případě se odstraní veškeré zbytky předešlé kapaliny vhodným rozpouštědlem, vypláchne se komůrka čistou izolační kapalinou, která má být následně zkoušena a znovu se naplní [16].

2) Vzorkovací nádoby

Vzorky se odebírají z místa s maximálním znečištěním, obvykle se jedná o dno nádrže. Nádobu na vzorek by měla být ze skla. Lze použít také nádobu z plastu, ta ale nesmí být použita více než jednou. Uzavření se provádí šroubovitými uzávěry s vložkami. Taková nádoba na vzorek by měla být naplněna do 97 % jejího objemu, zbylá 3 % tvoří vzduchový prostor.

Stejně jako u zkušební komůrky, tak i zde se musí omezit znečištění kapaliny. Při opětovném použití je třeba nádobu pečlivě opláchnout vhodným rozpouštědlem, následně opláchnout acetonem a nechat vyschnout. Takto očištěné nádoby musí být skladovány uzavřené [16].

3.4.2 Elektrody

V tomto případě norma nakazuje použít elektrody buď z mosazi, bronzu nebo z korozi-vzdorné oceli sférického tvaru (průměr 12,5 mm až 13,0 mm), nebo částečně sférického (hříbkového) tvaru. Umístění elektrod musí být horizontální, středově souměrné, přičemž osa elektrod musí být minimálně 40 mm pod úrovní hladiny zkoušené kapaliny. Žádná část elektrody nesmí být blíže než 12 mm od stěny komůrky. Vzdálenost mezi elektrodami je $(2,50 \pm 0,05) \text{ mm}$.

Dokonalý povrch a čistota elektrod při zkoušce kapalných izolantů je zcela zásadní. Proto je nutné pravidelně elektrody kontrolovat na výskyt koroze, nebo jakéhokoliv jiného poškození.

Jsou-li elektrody nové, nebo bylo zjištěno jejich mírné poškození povrchu, musí být očištěny následujícím postupem:

- 1) povrch se očistí těkavým rozpouštědlem a nechá se odtékat,
- 2) vyleští se jemným brusným práškem, brusným papírem nebo látkou,
- 3) elektrody se očistí lakovým benzínem s následným omytím acetonem,
- 4) elektrody se zavedou do komůrky, ta se naplní izolační kapalinou, která má být zkoušena a 24krát se provede elektrický průraz.

[16]

3.4.3 Popis zkoušky izolačních kapalin

Přivedené napětí na elektrody zajišťuje regulační transformátor nebo autotransformátor napájený ze střídavého zdroje napětí. Navyšování hodnot nízkého napětí musí být plynulé, rovnoměrné a bez překmitů. Z toho důvodu se doporučuje automatická regulace. Poměrné zvýšení napětí nesmí překročit 2 % očekávaného průrazného napětí.

Z důvodu omezení zkratového proudu může být do obvodu sériově zařazen rezistor. Zkratový proud musí být v rozmezí 10 mA ÷ 25 mA pro všechna napětí vyšší než 15 kV.

Obvod musí být okamžitě přerušen, když nastane jednoznačně přeskok. Automatické přerušování obvodu může být tvořeno přerušovačem řízeným proudem, který při průrazu vzorku bude procházet. V takovém případě musí přerušit napětí v 10 ms.

Průrazné napětí může být měřeno pomocí špičkového voltmetru. V takovém případě velikost průrazného napětí získáme dělením špičkové hodnoty hodnotou $\sqrt{2}$.

Před započítáním zkoušky je třeba zkontrolovat teplotu zkušební kapaliny. Teplota kapaliny a okolního vzduchu se nesmí lišit o více než 5 °C a teplota kapaliny musí být (20 ± 5) °C. Před naplněním zkušební komory se zkušební vzorek mírně promíchá, aby se zajistila co největší možná homogenita rozptýlených nečistot, přičemž se musí zamezit tvorbě vzduchových bublin. Před započítáním zkoušky se zkušební komora opláchne zkušebním vzorkem a následně se vyprázdní. Vzorek izolační kapaliny nalijeme do komůrky tak, abychom vyloučili tvorbu vzduchových bublin. Po naplnění komůrky vyčkáme 5 minut, než se vzorek a v něm případné nečistoty ustálí. Někdy se tento proces urychluje vyvakuováním. Případně se udržuje umělá atmosféra Ar nebo N₂, aby nedošlo k proniknutí vody nebo kyslíku ze vzduchu do vzorku během testování. Je to nutné dělat především v případě, je-li testování, diagnostika a měření elektrické pevnosti prováděno při vyšších teplotách, například při 70 °C nebo 90 °C. Při takových teplotách bez inertní atmosféry nelze zkoušku provádět.

Zkušební napětí se zvyšuje od nuly až do okamžiku průrazu rychlostí $(2,0 \pm 0,2)$ kV/s. Průrazné napětí je takové napětí, při kterém došlo k průrazu izolantu. Na jednom vzorku se provede 6 testů, přičemž mezi průrazem a následným začátkem dalšího testu se počká alespoň 2 minuty. V průběhu zkoušky je třeba kontrolovat, zda se nevytváří žádné vzduchové bublinky mezi elektrodami. Výsledná hodnota průrazného napětí daného vzorku se určí pomocí aritmetického průměru 6 zkoušek [16].

3.4.4 Protokol o zkoušce

Každý protokol o měření elektrického průrazu kapalných izolantů, podle normy [16], musí obsahovat:

- 1) identifikaci zkušební kapaliny, teplotu kapaliny,
- 2) jednotlivé hodnoty průrazných napětí,
- 3) použité elektrody,
- 4) frekvenci zkušebního napětí,
- 5) případné použití míchadla.

4. VLASTNÍ MĚŘENÍ

V rámci bakalářské práce bylo provedeno několik praktických měření na dielektrických materiálech, přičemž se měřila jejich elektrická pevnost. Výsledky měření jsou pouze orientační. Během měření nebyly dodržovány veškeré požadavky, které kladou příslušné normy.

V rámci plnění 4. a 5. bodu zadání bakalářské práce byla navržena zkušební komora pro měření kapalných dielektrik, viz Příloha C - s inovativními prvky. V přílohách Příloha A -a Příloha B - jsou vymodelované elektrodové systémy tak, jak je popisují příslušné normy. V rámci dohody se došlo k závěru, že samotná realizace měřících přípravků pro měření dielektrických materiálů bude realizována formou doporučení a diskuzí s vedoucím této bakalářské práce. Vlastní měření se tak provádělo na již existujících zkušebních komorách v laboratořích VUT.

4.1 Měření pevných dielektrik

Během měření pevných dielektrik byla použita soustava válcových elektrod se stejnými průměry. U všech měření byl zvolen typ krátkodobé zkoušky s rostoucím napětím 2 kV/s při průmyslových kmitočtech.

Mimo zkoušených vzorků, které jsou vyjmenovány v následujících podkapitolách, bylo změřeno i průrazné napětí pryže a PVC. Oba vzorky měly rozměry 100 mm x 100 mm. Tloušťka obou vzorků byla změřena na několika místech a následně byl vypočten jejich aritmetický průměr. Průměrná tloušťka PVC činila 2,22 mm a průměrná tloušťka pryže byla 2,1 mm. Jelikož byly oba vzorky měřeny bez speciálního okolního média, tedy médiem byl vzduch, u obou případů docházelo k předčasnému přeskoku skrz vzduch mezi elektrodami. Oba vzorky zůstaly neporaženy.

4.1.1 Kraft karton

Jako další vzorky byly použity nastříhané čtverce kraft kartonu 1 mm 600 g/m² o rozměrech 90 x 90 mm. Tloušťka každého vzorku byla měřena na několika místech, přičemž tloušťka vzorku byla vyhodnocena jako průměrná hodnota.

Zkoušeny byly tři vzorky. Průrazné napětí a tloušťka každého z nich je:

1. vzorek $U_{p1} = 8,1$ kV, $d_1 = 1$ mm;
2. vzorek $U_{p2} = 9,1$ kV, $d_2 = 1$ mm;
3. vzorek $U_{p3} = 8,5$ kV, $d_3 = 1$ mm.

Mediánem průrazného napětí je tedy hodnota $U_p = 8,5$ kV.

4.1.2 Fólie

Dalším zkoušeným pevným dielektrikem byla fólie určená pro kroužkové vazby s tloušťkou udávanou výrobcem 200 μm . Vzorky byly nastříhány na rozměry 100 x 100 mm. Ověření tloušťky vzorků bylo provedeno tak, že se provedlo měření na několika místech deseti vzorků naráz a opět byla vypočítána průměrná tloušťka a výsledná průměrná hodnota byla podělena počtem vzorků. Tímto způsobem byla určena průměrná tloušťka jedné fólie na 212 μm , přičemž tato hodnota je zkreslena nepřesností měření a výskytem vzduchových vrstev mezi navrstvenými fóliemi při měření.

Průrazná napětí tří různých vzorků jsou:

1. vzorek $U_{p1} = 12 \text{ kV}$,
2. vzorek $U_{p2} = 11,8 \text{ kV}$,
3. vzorek $U_{p3} = 11,8 \text{ kV}$.

Mediánem průrazného napětí je tedy hodnota $U_p = 11,8 \text{ kV}$.

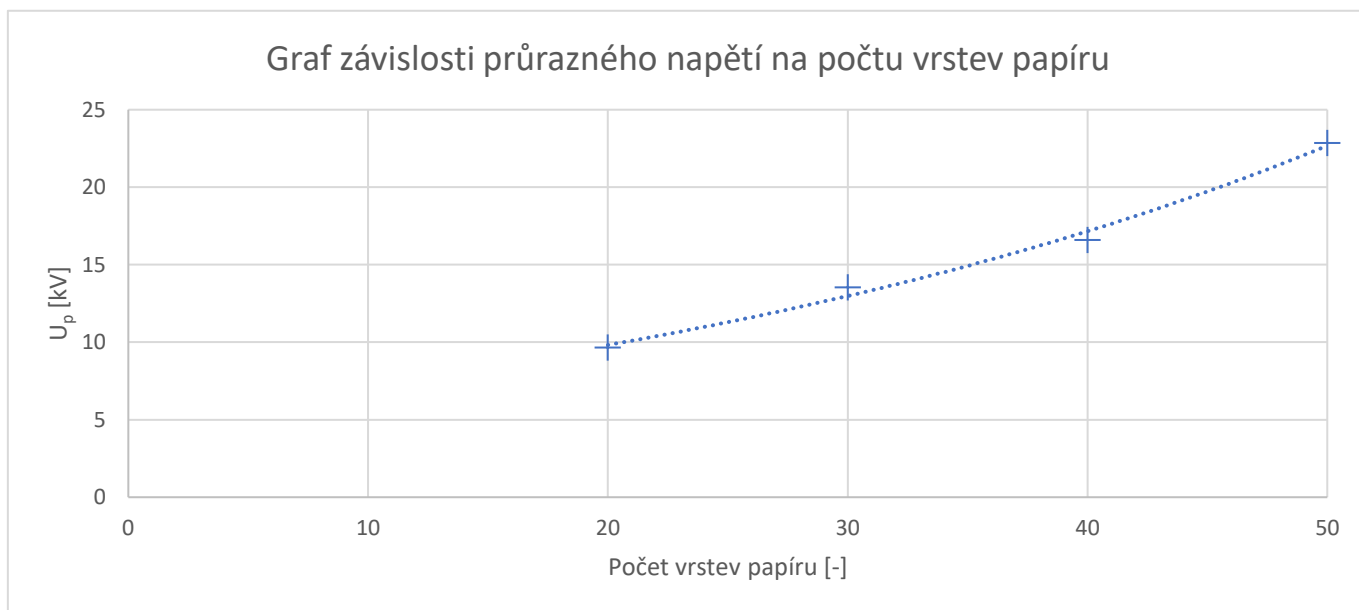
4.1.3 Kancelářský papír

Posledním zkoušeným pevným dielektrikem byl kancelářský papír 80 g/m^2 , s tloušťkou udávanou výrobcem 0,1 mm. Vzorky ve tvaru čtverce byly nastříhány na rozměry 100 x 100 mm. Ověření tloušťky bylo opět provedeno metodou, při které se změřila tloušťka několika vrstev na různých místech a průměrná hodnota byla vydělena počtem vrstev. Vypočtená tloušťka jednoho listu papíru činí 116 μm , přičemž je měření opět zatíženo chybami měření a nedokonalostí vrstvení.

Během tohoto měření byla snaha poukázat na nelineárnost elektrické pevnosti materiálu na tloušťce zkoušeného vzorku pomocí vrstvení jednotlivých listů papíru na sebe. Jednotlivé hodnoty průrazných napětí v [kV] různého počtu vrstev kancelářského papíru jsou uvedeny v Tabulka 4.1. Vynesené hodnoty mediánu jsou graficky zaznamenány v Obrázek 4.1.

Tabulka 4.1 Tabulka naměřených hodnot průrazných napětí v [kV]

-	20 Vrstev papíru	30 Vrstev papíru	40 Vrstev papíru	50 Vrstev papíru
1. Sada vzorků	9,50	13,20	16,00	23,00
2. Sada vzorků	8,30	14,50	17,20	22,90
3. Sada vzorků	9,80	13,90	16,60	22,20
4. Sada vzorků	9,90	12,70	16,60	22,80
Medián	9,65	13,55	16,60	22,85



Obrázek 4.1 Závislost průrazného napětí na počtu vrstev papíru

4.1.4 Závěr z měření pevných dielektrik

Měření pryže a PVC

Jelikož oba vzorky měly stejné rozměry a k přeskoku při zkoušení vzorku z PVC došlo při napětí 32,4 kV a u vzorku z pryže došlo k přeskoku při napětí 28,3 kV lze usoudit, že plazivé proudy u obou materiálů se vyskytují při různém napětí. Jelikož vznik plazivých proudů závisí na povrchové rezistivitě materiálu, a také na případném znečištění povrchu vzorku (které v našem případě je zanedbatelné), můžeme říci, že vzorek z PVC má vyšší povrchovou rezistivitu než vzorek z pryže, tudíž došlo k přeskoku mezi elektrodami při vyšším napětí.

Měření kraft kartonu

Jelikož zkoušené vzorky kartonu měly tloušťku přesně 1 mm, můžeme v tomto případě tvrdit, že za daných podmínek má měřený vzorek elektrickou pevnost $E_p = 8,5$ kV/mm. Vyšší přesnost by byla docílena při vyšším počtu zkoušek. Pro dané měření však nebyl dostatek materiálu pro provedení pěti zkoušek, jak ukládají normy.

Jak je vidět na fotografii v Příloha D -proražený tunel skrz materiál má zuhelnatělé okraje, což odkazuje na vznik tepelného průrazu skrz pevné dielektrikum. V okamžiku ukončení zkoušky šlo vidět, že průraz nastal nad elektrodami v místech jejich zaoblení, a ne mezi jejich rovnými plochami. Toto pozorování potvrzuje teoretický fakt, že materiály jsou více elektricky namáhány v místech s nehomogenním elektrickým polem.

Měření fólie

V tomto případě nemůžeme s dostatečnou přesností říci, jaká je hodnota elektrické pevnosti tohoto materiálu v základních jednotkách kV/mm, jelikož průrazné napětí je nelineárně závislé na tloušťce materiálu. Z toho důvodu je nutné provádět měření elektrické pevnosti na vzorcích s takovou tloušťkou, která bude prakticky v daném zařízení používána.

V rámci měření tohoto materiálu byla snaha o změření průrazného napětí dvou vrstev této fólie. Z důvodu absence speciálního okolního média však docházelo ke vzniku plazivých proudů, a tedy k přeskokům skrz vzduch. Dvě vrstvy fólie zůstaly neproraženy. Na fotografii v Příloha E -si však lze všimnout opálených cest po plazivých proudech, které se plazily přes okraje vzorku.

Měření kancelářského papíru

Během měření jedné až tří vrstev kancelářského papíru docházelo už při nízkých hodnotách napětí k zapálení papíru. Tento silně hořlavý materiál se zapálil od vznikajícího tepla mezi elektrodami. Díky absenci vzduchu mezi elektrodami však nechytl plamenem, nýbrž se jen vytvořila díra skrz materiál, která byla silně zuhelnatělá. Tyto výsledky měření se nedaly považovat za relevantní.

Pomocí následného vrstvení materiálu byla snaha poukázat na nelineárnost mezi elektrickou pevností a tloušťkou materiálu. Podle teoretických předpokladů by tato závislost měla mít tvar logaritmické funkce. Naměřené výsledky však tyto předpoklady nesplňují, dokonce vedou na exponenciální funkci. To je pravděpodobně způsobeno silnou nehomogenitou zkoušeného vzorku. Listy papíru nebyly nijak lisem stlačeny a dosedající elektroda působila na vzorek pouze vlastní tíhou. Mezi jednotlivými vrstvami se tak vyskytoval vzduch, který měření silně ovlivňoval.

V Příloha F - je zaznamenán průběh průrazného napětí při zkoušce na 50 listech papíru.

4.2 Měření kapalných dielektrik

Měření kapalných dielektrik bylo provedeno ve zkušební komůrce o objemu do 100 ml bez možnosti míchání. Pro zkoušku byl použit elektrodový systém s elektrodami částečně sférického tvaru. Měření bylo prováděno metodou krátkodobé zkoušky při průmyslových kmitočtech.

4.2.1 Silikonová kapalina

Prvním zkoušeným kapalným dielektrikem byla silikonová kapalina. Průběh této zkoušky neodpovídal normovaným postupům. Jednalo se o již použitou, starou kapalinu, která byla skladována za přístupu vzduchu. Zkouška byla prováděna při teplotě vzorku 19,15 °C a při absolutním tlaku v laboratoři 97,9 kPa.

Hodnota každého jednotlivého průrazného napětí byla:

1. průraz $U_{p1} = 20,7$ kV,
2. průraz $U_{p2} = 9,7$ kV,
3. průraz $U_{p3} = 13,1$ kV,
4. průraz $U_{p4} = 11,7$ kV.

4.2.2 Transformátorový minerální olej

Jako druhé zkoušené kapalně dielektrikum byl zkoušen vzorek transformátorového minerálního oleje. Zde se již jednalo o kvalitní a řádně uschovaný vzorek. Před nalitím nového zkoušeného materiálu se zkušební komůrka vytřela a poté se nalila nová kapalina. Zkouška byla prováděna při teplotě vzorku $18,95$ °C a při absolutním tlaku v laboratoři $97,9$ kPa.

Průrazná napětí transformátorového oleje:

1. průraz $U_{p1} = 31,9$ kV,
2. průraz $U_{p2} = 38$ kV,
3. průraz $U_{p3} = 47,5$ kV.

Hodnoty a vynesení graf ze zpětného přeměření vzorku transformátorového oleje jsou uvedeny v Příloha I - Tentokrát byla teplota vzorku $19,65$ °C a byl měřen při absolutním tlaku v laboratoři $97,8$ kPa.

4.2.3 Závěr z měření kapalných dielektrik

Měření silikonové kapaliny

Jelikož byla kapalina skladována za přístupu vzduchu, tedy byla v nádobě bez víka, byl vzorek vystaven vzdušné vlhkosti, která značně snížila jeho elektrickou pevnost.

Těsně před započítáním zkoušky se v prostorách mezi elektrodami stále vyskytovaly drobné bublinky vzduchu. Tomuto nežádoucímu faktu by se dalo zabránit vyvacováním, pokud by touto možností byla zkušební komůrka vybavena. Mimo nekvalitní skladování kapaliny, právě i bublinky vzduchu přispěly ke značnému snížení elektrické pevnosti tohoto vzorku. Vlivem prvního průrazu, který ve své bezprostřední blízkosti ohřál okolní kapalinu a vytvořil tak rázovou vlnu, která okolní bublinky vytlačila, byly bublinky přítomny pouze před prvním měřením. I přes tento fakt byla první hodnota elektrické pevnosti kapaliny nejvyšší. Následné snižování elektrické pevnosti bylo způsobeno výskytem zuhelnatělých částic silikonu v okolí elektrod, které vznikaly při průrazu. Z důvodu vysoké viskozity silikonové kapaliny se tyto částice udržovaly v blízkosti elektrod. Jelikož nebylo provedeno míchání, kvůli případnému rozptýlení zuhelnatělých částic, elektrická pevnost následujících měření byla závislá na časovém intervalu mezi měřeními. Fotografie v Příloha G -zaznamenávají stav kapaliny před a po průrazu.

Byť mediánem naměřených hodnot průrazných napětí silikonového vzorku je napětí $U_p = 12,4$ kV, je tato hodnota velmi zkreslena vyjmenovanými negativními okolnostmi při měření a nedá se považovat za spolehlivý výsledek.

Měření transformátorového minerálního oleje

Před započítím dalšího měření na jiné izolační kapalině nebyla zkušební komůrka opláchnuta novým zkušebním vzorkem. I přes snahu o vytření komůrky, se na stěnách a elektrodách mohly vyskytovat zbytky předchozího silikonového oleje, které výrazně zkreslily výsledky počátečního měření. I při měření tohoto vzorku se během nalévání do zkušební komůrky vytvořily vzduchové bublinky mezi elektrodami, které se tam udržovaly až do započítí měření. V průběhu dalších průrazů se elektrická pevnost látky zvyšovala, jelikož se v oleji, pomocí rázových vln, bublinky, nečistoty a zbytky předchozí kapaliny rozptýlily do okolí.

Mediánem naměřených hodnot průrazného napětí je hodnota $U_p = 38$ kV. Avšak z důvodu příliš velkého rozptylu hodnot a malého počtu měření se i tato hodnota nedá považovat za spolehlivý výsledek.

V Příloha H -jsou fotograficky zaznamenány stavy transformátorového oleje před měřeními a na konci měření. Na první pohled si lze všimnout, že průraz skrz zkoušený olej zapříčinil mnohem menší množství zuhelnatělých částic, než silikonová kapalina. Vlivem nižší viskozity oleje, než je viskozita silikonové kapaliny, se zároveň částice snadněji rozšířily do okolí a neovlivňovaly tak příliš další měření.

O sedm dní později byl ten samý vzorek transformátorového minerálního oleje opět přeměřen. Skladován byl s přístupem vzduchu. I když se jednalo o ten samý vzorek, tentokrát bylo naměřeno maximální průrazné napětí pouze 33,7 kV. Při porovnání s prvním měřením tohoto vzorku se jedná o značný pokles. Tento pokles průrazného napětí je způsoben právě vystavením vzorku okolní vlhkosti, viz kapitola 2.2.1. Měření opět probíhalo bez míchání vzorku a s 60 sekundovým intervalem mezi jednotlivými měřeními. V Příloha I -jsou zaznamenána a vynesena do grafu jednotlivá průrazná napětí. I přes proměnné hodnoty průrazného napětí si lze povšimnout klesající tendence s narůstajícím počtem zkoušek. Postupný pokles průrazného napětí je zapříčiněn zvyšujícím se množstvím zuhelnatělých částic oleje. Důvodem nečekaného zvýšení průrazného napětí v průběhu měření je pravděpodobnost, že vzniklá rázová vlna, způsobená rozpínáním ohřátého oleje vzniklým průrazem, dostatečně rozptýlí nežádoucí částice z míst mezi elektrodami.

Fotografie v Příloha J -zachycuje množství sazí po provedení 23 průrazů na jednom zkušebním vzorku.

5. ZÁVĚR

V rámci práce jsou uvedeny teoretické předpoklady pro vznik elektrického průrazu v pevných a kapalných dielektrických materiálech. V pevných izolačních materiálech rozlišujeme tři různé mechanismy vzniku elektrického průrazu: čistě elektrický průraz, tepelný průraz a elektrochemický průraz. Vzniklý elektrický průraz má pro pevný izolant destruktivní charakter a jeho izolační schopnosti se nezregenerují.

U velmi čistých kapalin nemůžeme jednoznačně říct, který z mnoha teoretických dějů vedl až k elektrickému přeskoku. Kdežto u technicky čistých kapalin, které nemají tak dokonalou čistotu, jako velmi čisté kapaliny, je hledání příčin vzniku elektrického průrazu snadnější. Takovou příčinou bývají vzduchové bublinky, různé nečistoty, nebo podíl vody v izolantu. U kapalného izolantu však nedochází k úplné degradaci při elektrickém průrazu, jeden vzorek tak může být opětovně použit.

Elektrickou pevnost dielektrických materiálů ovlivňuje celá řada různých parametrů, jako je třeba povrch vzorku, tvar elektrod, kvalita vzorku, charakter a doba působení elektrického pole, atd. Z tohoto důvodu musí být při každém měření zaznamenávány veškeré parametry, které při měření působily. Dokonce i při dodržování stejných postupů a stejných působících podmínek, nemusí mít dvě různá měření stejný výsledek. Při měření elektrické pevnosti kapalných dielektrik hraje svou roli i pravděpodobnost výskytu zuhelněných částic v místech mezi elektrodami a u pevných dielektrik nejsme vždy schopni zajistit stoprocentní homogenitu vzorku.

V rámci návrhu elektrodových systémů pro měření průrazu pevných a kapalných dielektrik byla narýsována a zakótována v přílohách Příloha A - a Příloha B - zkušební komora a elektrodový systém tak, jak jsou navrženy příslušnými českými státními normami pro měření elektrické pevnosti pevných a kapalných dielektrik. V rámci vlastního návrhu byla navržena zkušební komora pro měření kapalných dielektrik, která disponuje inovativními opatřeními, jako jsou zaoblené hrany, nebo vývod elektrod víkem nádoby a zároveň splňuje veškeré parametry požadované příslušnými normami.

V průběhu tvorby této bakalářské práce došlo k dohodě s vedoucím bakalářské práce, že bude přínosnější a efektivnější se zaměřit na inovaci již existujících laboratorních systémů v laboratořích VUT, než je vyrábět zbrusu nové. Tyto inovace byly provedeny formou doporučení a diskuzí během samotného laboratorního měření.

Veškeré závěry z průběhů vlastních praktických měření jsou uvedeny v kapitolách 4.1.4 a 4.2.3. V přílohách Příloha D - až Příloha J - jsou přiloženy fotografie zachycující průběhy některých měření.

LITERATURA

- [1] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *ELEKTROTECHNICKÉ MATERIÁLY: učební text* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/Elektrotechnicke%20materialy.pdf>. Studijní materiál. Technická univerzita Ostrava.
- [2] ULRYCH, Jiří. *Dielektrická spektroskopie v elektrotechnologické diagnostice* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/2726/1/Dielektricka%20spektroskopie%20v%20elektrotechnologicke%20diagnostice.pdf>. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Josef Pihera, Ph.D.
- [3] ČSN EN 62631-1. *Dielektrické a izolační vlastnosti pevných elektroizolačních materiálů: Část 1: Obecně*. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [4] JIRÁK, Josef. *Materiály a technická dokumentace: Část Materiály v elektrotechnice* [online]. Brno [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/predmety/detail/133203?apid=133203>. Studijní materiál. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [5] PALKO, Radek. *Teoretický rozbor elektrického průrazu* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/3917/1/Teoreticky%20rozbor%20elektrického%20prurazu%20Radek%20Palko.pdf>. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni, Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [6] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [7] PALAI-DANY, Tomáš. *Dielektrická spektroskopie karboxymethylcelulózy v časové oblasti* [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=19433. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [8] NAIDER, Jan. *ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI ALTERNATIVNÍCH KAPALIN PRO ELEKTROTECHNIKU* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z:

- https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=105722. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. MARTIN FRK, Ph.D.
- [9] BRANŠOVSKÝ, Martin. *Životnost a spolehlivost materiálů v elektrotechnice* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/5321/1/Zivotnost%20a%20spolehlivost%20materialu%20v%20elektrotechnice_Martin%20Bransovsky_2012.pdf. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni, Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [10] ŠTEGBAUER, Radek. *Silikony v elektrotechnice* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/10049/1/DP%20Silikony%20v%20elektrotechnice%20-%20Radek%20Stegbauer.pdf>. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni, Katedra elektroenergetiky a ekologie.
- [11] MUANGPRATOOM, P. a A. KUNAKORN. Effect of Different Temperatures on AC Breakdown Voltage of Mineral Oil based Nanofluids. *Institute of Electrical and Electronics Engineers* [online]. 2011, **15**, 536-539 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: doi:10.1109/ECTICon.2018.8620042
- [12] ČSN EN 60243-1. *Elektrická pevnost izolačních materiálů - Zkušební metody: Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech*. 3. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [13] ČSN EN 60243-2. *Elektrická pevnost izolačních materiálů - Zkušební metody: Část 2: Dodatečné požadavky na zkoušky stejnosměrným napětím*. 3. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [14] ČSN EN 60243-3. *Elektrická pevnost izolačních materiálů - Zkušební metody: Část 3: Dodatečné požadavky na impulzní zkoušky*. 3. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [15] ČSN EN IEC 62631-2-1. *Dielektrické a izolační vlastnosti pevných elektroizolačních materiálů: Část 2-1: Relativní permitivita a ztrátový činitel - Technické frekvence (0.1 Hz až 10 MHz), střídavé metody*. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

- [16] ČSN EN 60156. *Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda*. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

IEC	The International Electrotechnical Commission
ČSN	Česká státní norma
VUT	Vysoké učení technické

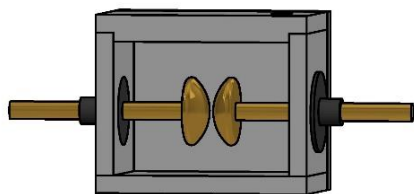
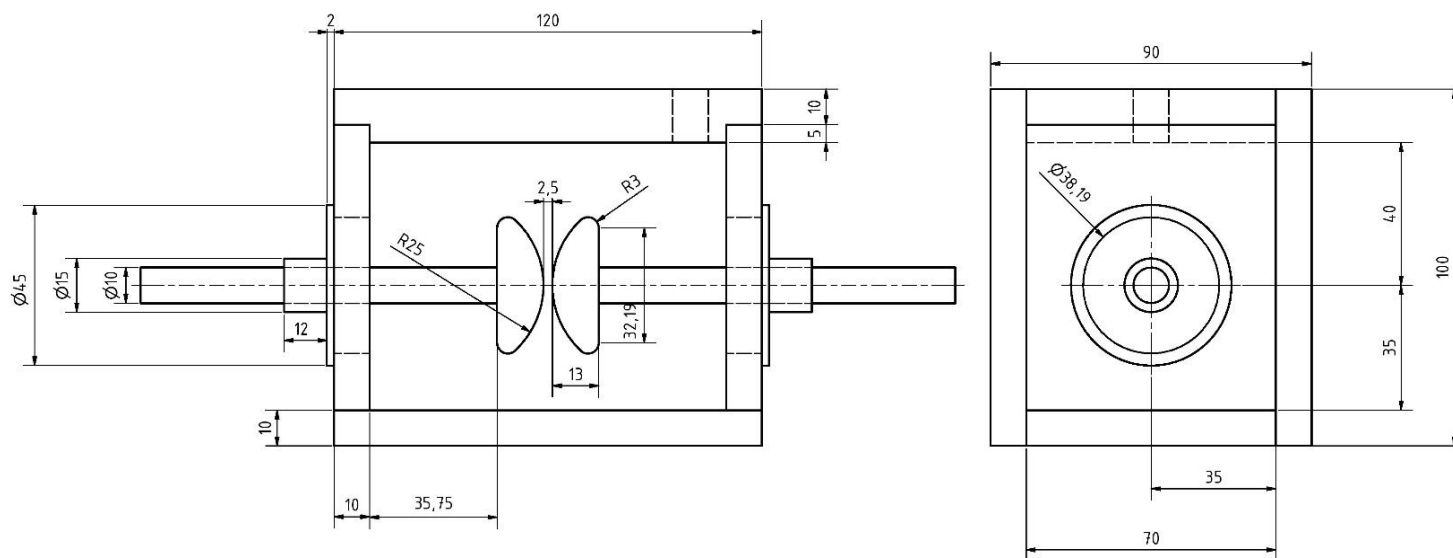
Symboly:

C	kapacita kondenzátoru	(F)
C_0	kapacita vakuového kondenzátoru	(F)
D	elektrická indukce	(C·m ⁻²)
d	tloušťka materiálu	(m)
E	elektrická intenzita	(V·m ⁻¹)
E_p	elektrická pevnost	(V·m ⁻¹)
t_1	virtuální doba čela	(s)
t_2	virtuální doba půltýlu	(s)
U_1	virtuální vrcholová hodnota	(V)
U_p	průrazné napětí	(V)
δ	ztrátový úhel	(°)
ε	permitivita	(F·m ⁻¹)
ε_0	permitivita vakua	(F·m ⁻¹)
ε_r	relativní permitivita	(-)

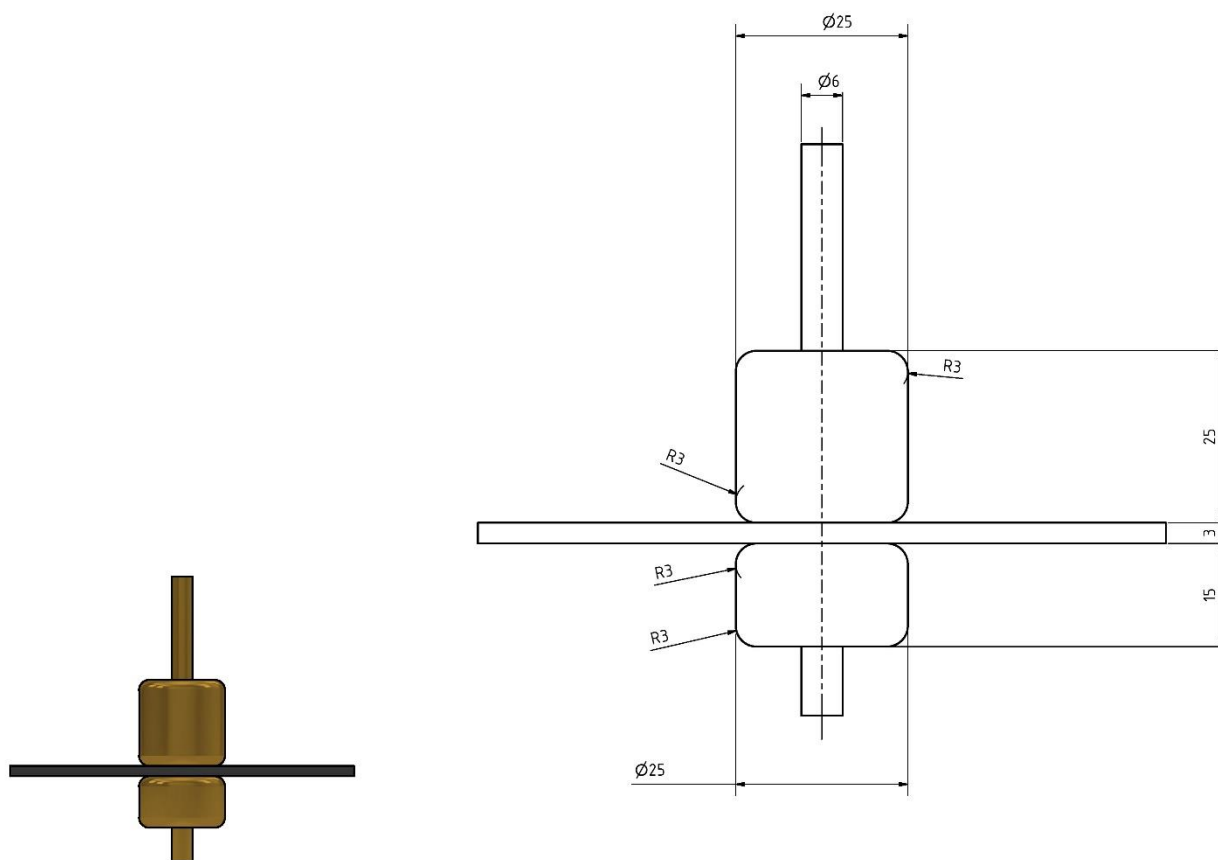
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - ZKUŠEBNÍ KOMORA PRO TESTOVÁNÍ KAPALNÝCH DIELEKTRIK	51
PŘÍLOHA B - SOUSTAVA STEJNÝCH ELEKTROD PRO TESTOVÁNÍ PEVNÝCH DIELEKTRIK.....	52
PŘÍLOHA C - NÁVRH ZKUŠEBNÍ KOMORY PRO TESTOVÁNÍ KAPALNÝCH DIELEKTRIK	53
PŘÍLOHA D - FOTOGRAFIE KARTONOVÉHO VZORKU PO ZKOUŠCE	54
PŘÍLOHA E - FOTOGRAFIE DVOUVRSTVÉ FÓLIE S CESTAMI PO PLAZIVÝCH PROUDECH	55
PŘÍLOHA F - ZÁZNAM PRŮBĚHU PRŮRAZNÉHO NAPĚTÍ PŘI MĚŘENÍ 50 VRSTEV PAPÍRU	56
PŘÍLOHA G - FOTOGRAFIE SILIKONOVÉ KAPALINY PŘED ZKOUŠKOU A PO ZKOUŠCE	57
PŘÍLOHA H - FOTOGRAFIE TRANSFORMÁTOROVÉHO OLEJE PŘED ZKOUŠKOU A PO ZKOUŠCE.....	58
PŘÍLOHA I - NAMĚŘENÁ DATA TRANSFORMÁTOROVÉHO OLEJE	59
PŘÍLOHA J - FOTOGRAFIE TRANSFORMÁTOROVÉHO OLEJE PO 23 PRŮRAZECH	60

Příloha A - Zkušební komora pro testování kapalných dielektrik



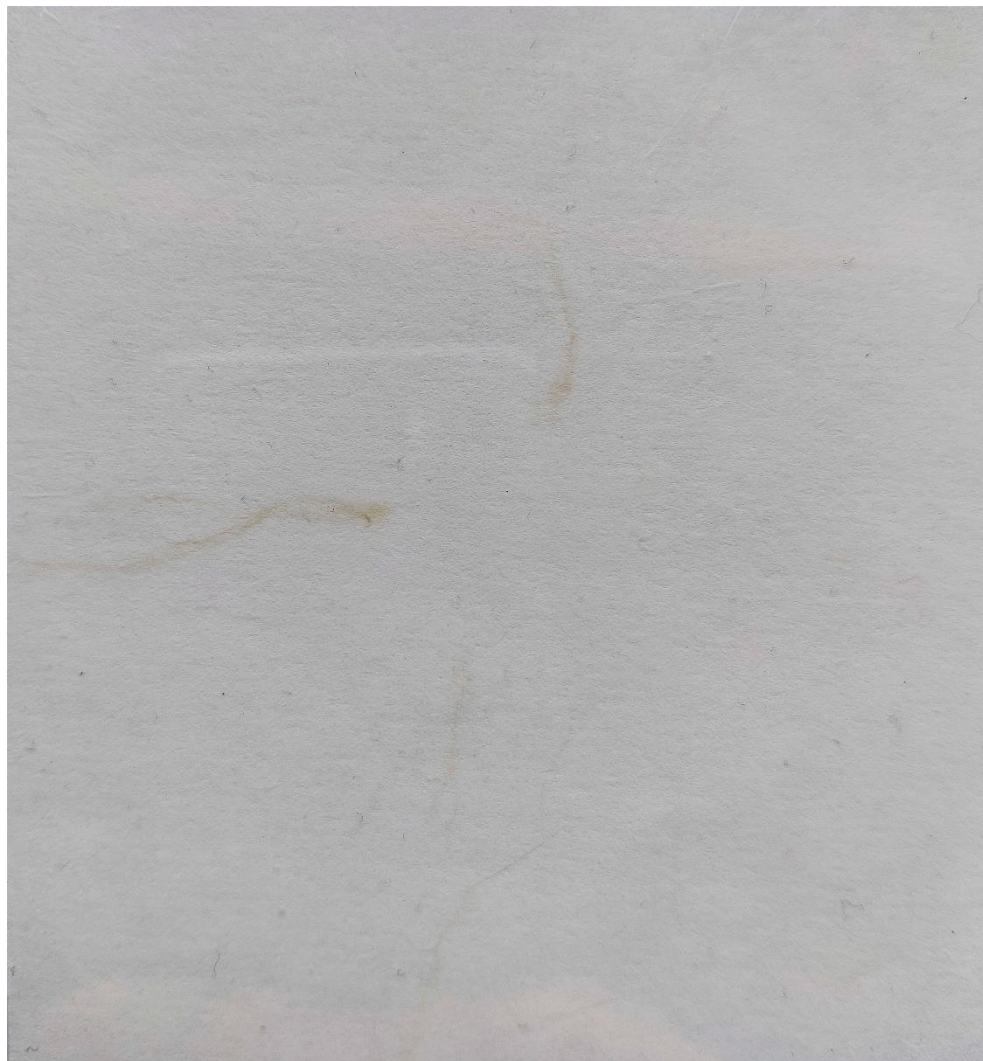
Příloha B - Soustava stejných elektrod pro testování pevných dielektrik



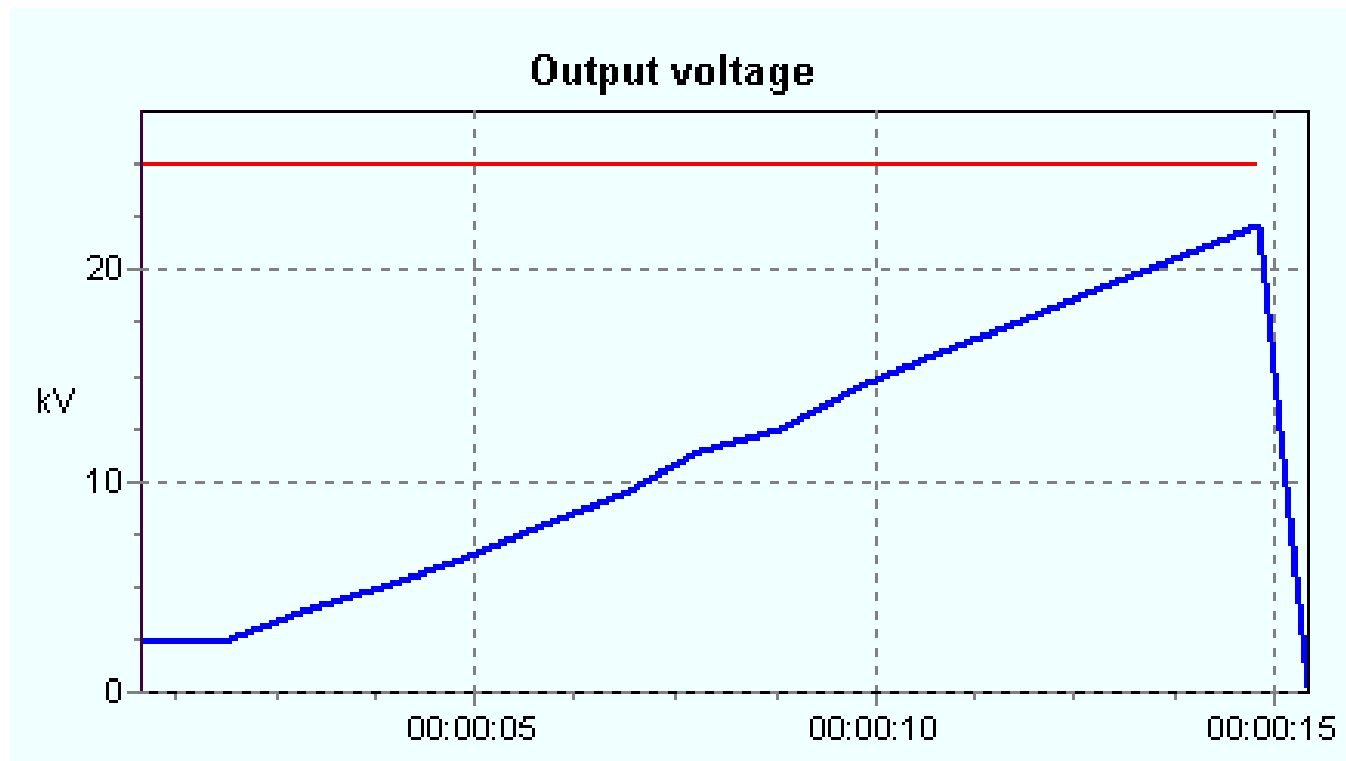
Příloha D - Fotografie kartonového vzorku po zkoušce



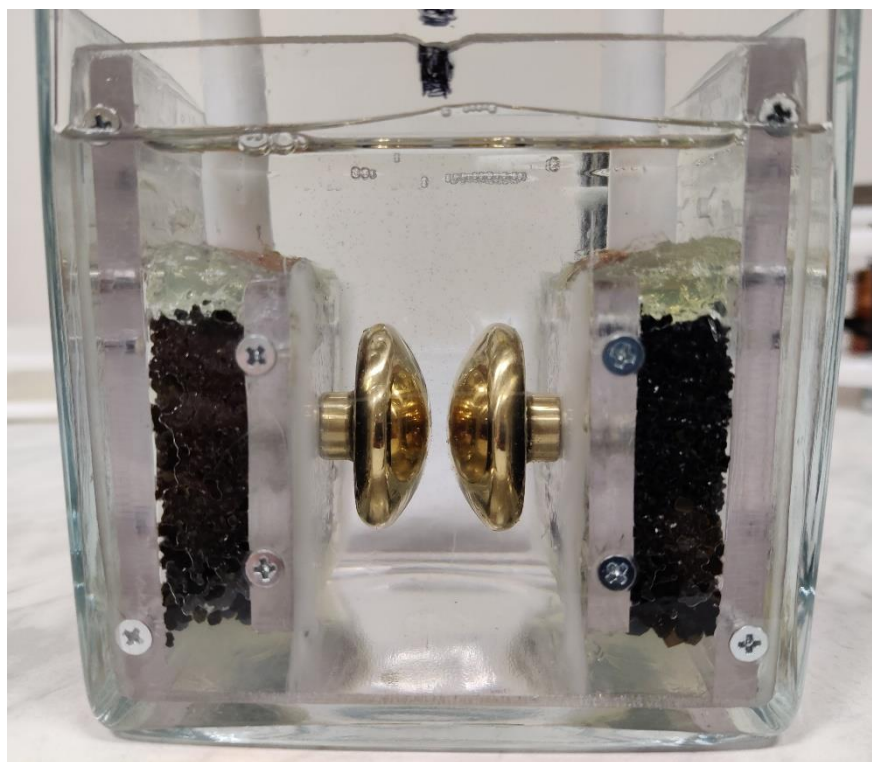
Příloha E - Fotografie dvouvrstvé fólie s cestami po plazivých proudech



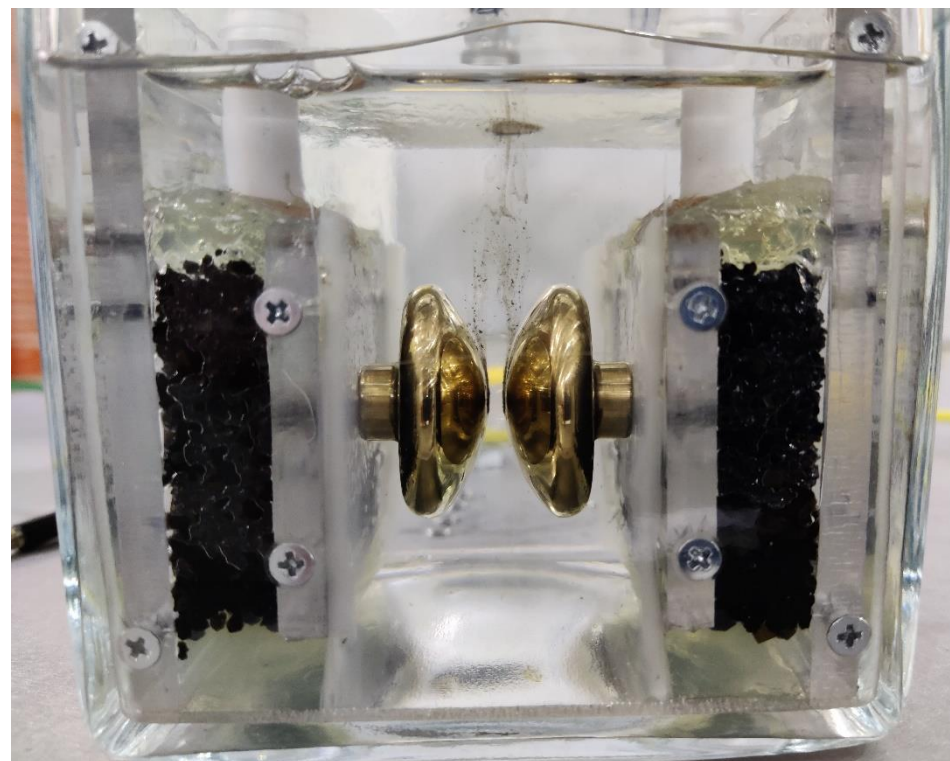
Příloha F - Záznam průběhu průrazného napětí při měření 50 vrstev papíru



Příloha G - Fotografie silikonové kapaliny před zkouškou a po zkoušce

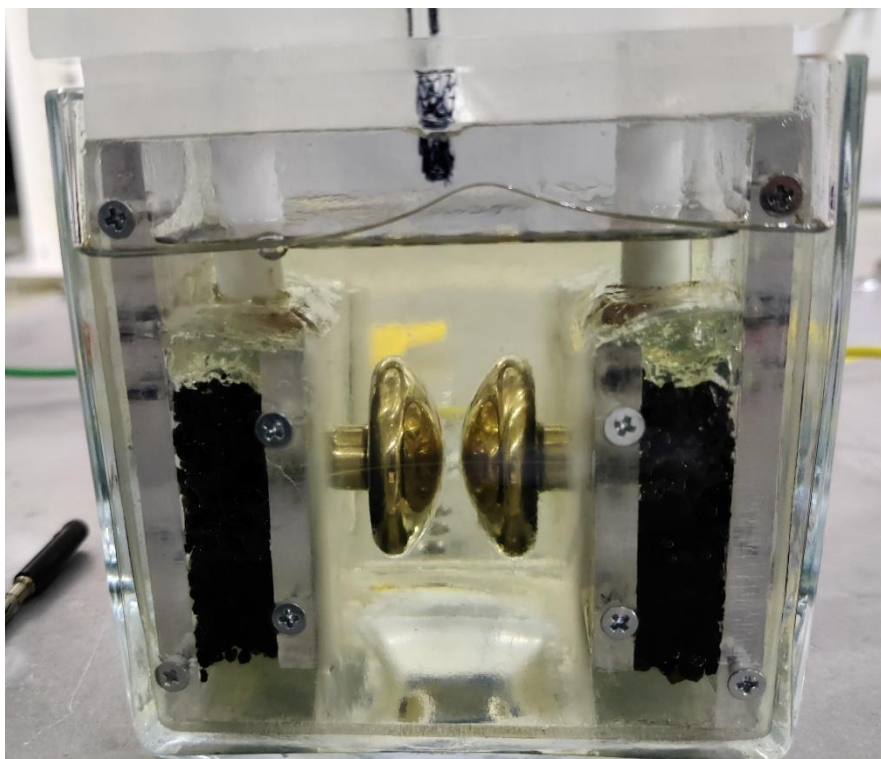


Silikonová kapalina před zkouškou

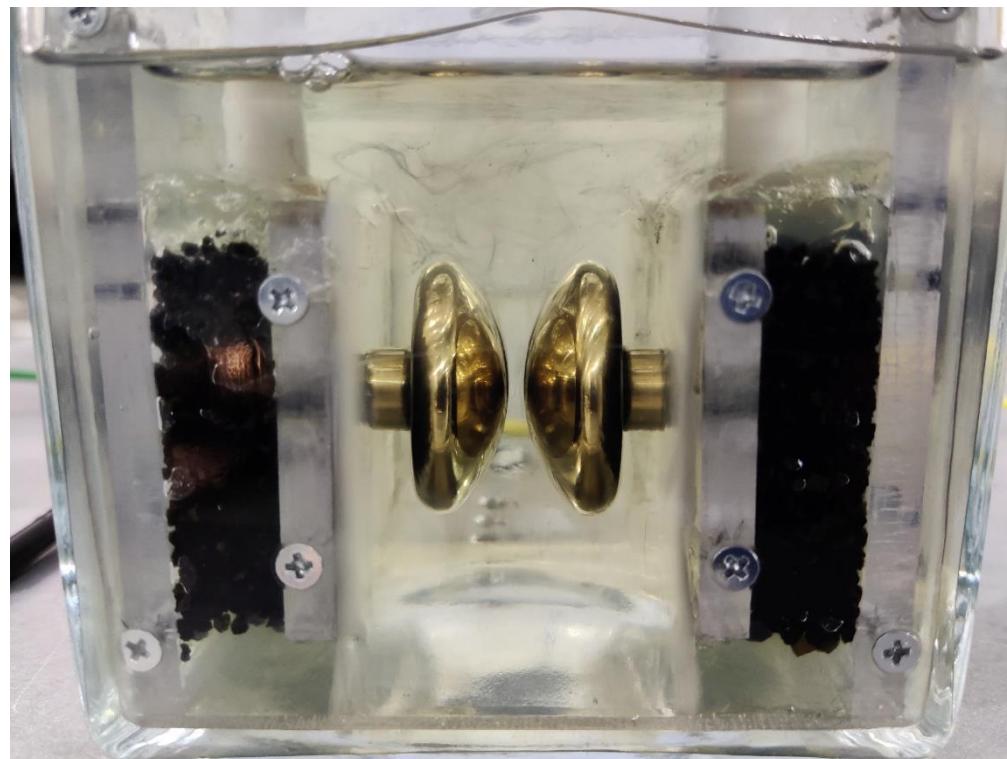


Silikonová kapalina po zkoušce

Příloha H - Fotografie transformátorového oleje před zkouškou a po zkoušce



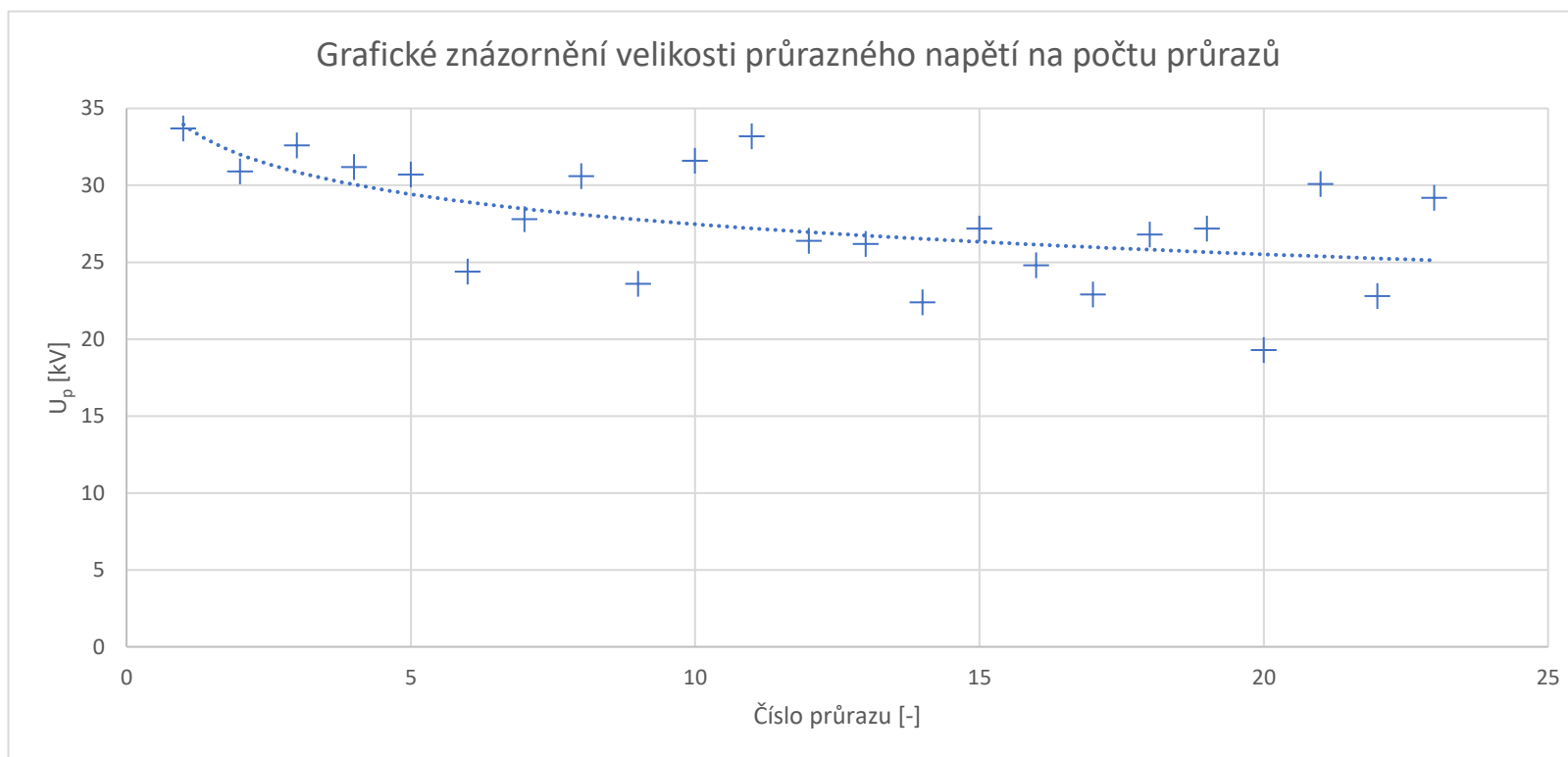
Transformátorový olej před zkouškou



Transformátorový olej po zkoušce

Příloha I - Naměřená data transformátorového oleje

Číslo průrazu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
U_p [kV]	33,7	30,9	32,6	31,2	60,7	24,4	27,8	30,6	23,6	31,6	33,2	26,4	26,2	22,4	27,2	24,8	22,9	26,8	27,2	19,3	30,1	22,8	29,2



Příloha J - Fotografie transformátorového oleje po 23 průrazech

