

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Diagnostické metody pevných dielektrických materiálů

Jan Frank

2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan FRANK**
Osobní číslo: **E17B0069P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Téma práce: **Diagnostické metody pevných dielektrických materiálů**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování

1. Uveďte diagnostikované parametry dielektrických materiálů.
2. Popište diagnostické a statistické metody pro hodnocení těchto materiálů.
3. Na dodaných vzorcích pevného dielektrika aplikujte některé zmíněné metody.
4. Proveďte vyhodnocení výsledků získaných pomocí zmíněných metod.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

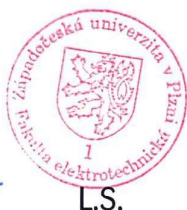
1. MENTLÍK, Václav: Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
2. Elektronické informační zdroje (databáze IEEE Xplore a další)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Michal**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na jednotlivé diagnostické metody, kterými lze prozkoumat vlastnosti pevných dielektrických materiálů. Cílem bakalářské práce je vysvětlit děje v dielektrických materiálech, popsat zkoumané elektrické vlastnosti a metody používané k jejich kvantifikaci. Dalším cílem byla aplikace několika metod pro stanovení primárně elektrických parametrů na předložených sadách izolačních materiálů (pryskyřic) a statistické vyhodnocení naměřených dat.

Klíčová slova

Dielektrické látky, elektrický průraz, dielektrické ztráty, polarizační index, rezistivita, statistické vyhodnocení, pryskyřice

Abstract

Presented bachelor thesis is focused on diagnostic methods by which properties of solid dielectric materials can be investigated. The goal of this thesis is to explain actions in dielectric materials, to describe investigated electrical properties and methods used for quantification. The second goal is application of several methods for determining primarily electrical parameters on submitted sets of insulation materials (resin) and statistically evaluate measured data.

Key word

Dielectric materials, electrical breakdown, dielectric loss, polarization index, resistivity, statistical evaluation, resin

Prohlášení

Předkládám bakalářskou práci tímto k obhajobě a posouzení, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické pod Západočeskou univerzitou v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2020

Jan Frank

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Michalovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 DIELEKTRICKÉ MATERIÁLY	12
1.1 DĚLENÍ DIELEKTRIK	12
1.2 PŮSOBENÍ ELEKTRICKÉHO POLE NA DIELEKTRIKUM	14
1.2.1 Makroskopické hledisko	14
1.2.2 Mikroskopické hledisko	15
1.2.3 Vnitřní lokální pole.....	16
1.3 POLARIZAČNÍ MECHANISMY	16
2 KLÍČOVÉ ELEKTRICKÉ PARAMETRY A JEJICH DIAGNOSTIKA	18
2.1 RELATIVNÍ PERMITIVITA.....	18
2.2 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY	18
2.2.1 Diagnostika ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ Scheringerovým můstkem.....	20
2.2.2 Diagnostika ztrátového činitele automatickým můstkem.....	21
2.2.3 Diagnostika ztrátového činitele rezonanční metodou (<i>Q-metr</i>).....	22
2.3 ELEKTRICKÁ PEVNOST.....	23
2.3.1 Tepelný průraz.....	24
2.3.2 Čistě elektrický průraz.....	24
2.3.3 Elektrochemický průraz.....	25
2.3.4 Diagnostika elektrické pevnosti stejnosměrným napětím	25
2.3.4.1 Zkouška výdržným stejnosměrným napětím	25
2.3.4.2 Zkouška průrazným stejnosměrným napětím	26
2.3.5 Diagnostika elektrické pevnosti střídavým napětím.....	26
2.3.5.1 Zkouška výdržným střídavým napětím	26
2.3.5.2 Zkouška průrazným střídavým napětím	26
2.4 ELEKTRICKÁ VODIVOST	27
2.4.1 Diagnostika elektrické vodivosti voltampérovou metodou	28
2.4.2 Diagnostika elektrické vodivosti Wheatstoneovým můstkem	29
2.5 ABSORPČNÍ A RESORPČNÍ CHARAKTERISTIKY	30
2.5.1 Diagnostika jednodinutového a desetiminutového polarizačního indexu.....	30
2.5.2 Diagnostika redukováných resorpčních proudů.....	31
2.5.3 Diagnostika plochy pod absorpční a nad resorpční křivkou	32
3 ANALÝZA ZMĚŘENÝCH DAT.....	34
3.1 POPIS VZORKŮ	34
3.2 POUŽITÉ DIAGNOSTICKÉ METODY	35
3.3 VÝSLEDKY VYHODNOCENÝCH DAT VZORKŮ	37
3.3.1 Vyhodnocení elektrické pevnosti.....	37
3.3.2 Vyhodnocení ztrátového činitele.....	38
3.3.3 Vyhodnocení vnitřních rezistivit a polarizačních indexů.....	39
3.4 SHRNUTÍ VÝSLEDKU MĚŘENÍ	42
4 ZÁVĚR.....	44
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	45
PŘÍLOHA A: NAMĚŘENÁ DATA VZORKŮ PRYSKYŘIC	47

Úvod

Izolační materiály jsou jedny z nejdůležitějších činitelů funkčnosti a spolehlivosti jednotlivých elektrických přístrojů, které používáme každý den a nacházejí se všude kolem nás. Moderní společnost vytváří stále lepší, odolnější a praktičtější materiály pro zajištění správného a stálého chodu elektrických přístrojů. Pro stanovení jisté úrovně kvality jednotlivých materiálů je potřeba diagnostiky a kvantifikace důležitých vlastností.

Předkládaná práce je zaměřena na popsání jednotlivých metod pro diagnostiku primárně elektrických parametrů pevných dielektrických materiálů. Práce pojednává o diagnostice jedné z nejdůležitějších elektrických vlastností, které jsou klíčové pro použití v praxi, jako je elektrický průraz, dielektrické ztráty, vnitřní rezistivita či polarizační index.

V úvodní části práce je obecný popis dielektrických látek, jejich dělení, chování dielektrika v elektrickém poli a mechanismy polarizace.

Následující část se zaměřuje na jednotlivé podstatné dielektrické vlastnosti a jejich diagnostiku. Ke klíčovým vlastnostem je v příslušné kapitole svázán popis alespoň jednoho měření se všemi náležitostmi. Jako je princip měření, schéma zapojení, postup měření, příslušné vzorce či související norma. Jsou zde i tabulky s typickými hodnotami daných veličin pro širší druhy materiálů.

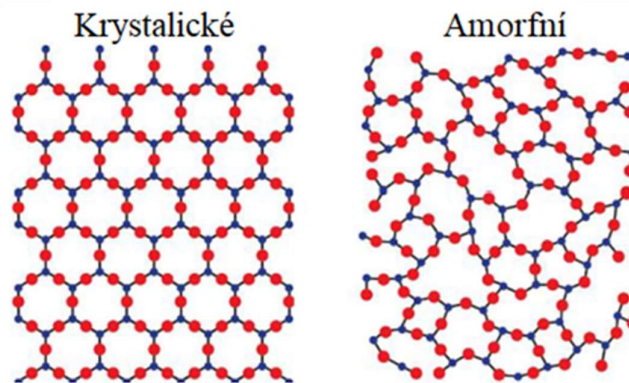
Následuje analýza praktického měření pro předložené tři sady dielektrických materiálů. Pro analýzu byla vybrána trojice pryskyřic a následně otestovány v laboratorních podmínkách na elektrickou pevnost, dielektrické ztráty, jedno a desetiminutové polarizační indexy a vnitřní rezistivity. Jednotlivá měření prošla statistickou analýzou a následně byly zjištěné veličiny porovnány. V závěru práce je zhodnocení dosažených cílů.

Seznam symbolů a zkratek

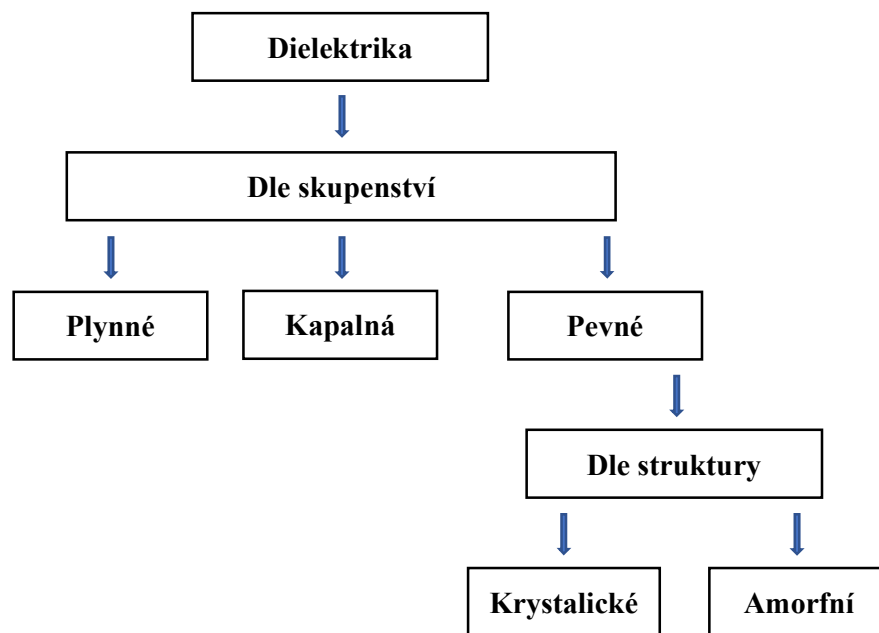
b	.....	driftová pohyblivost iontů	$[m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}]$
C	.....	kapacita	[F]
d	.....	tloušťka dielektrika	[m]
\vec{d}	.....	orientovaná vzdálenost posunutí náboje	$[C \cdot m]$
\vec{D}	.....	vektor elektrické indukce	$[C \cdot m^{-2}]$
E	.....	intenzita elektrického pole	$[V \cdot m^{-1}]$
\vec{E}	.....	vektor intenzity elektrického pole	$[V \cdot m^{-1}]$
\vec{E}_L	.....	vektor intenzity lokálního elektrického pole	$[V \cdot m^{-1}]$
E_p	.....	elektrická pevnost	$[V \cdot m^{-1}]$
h_s	.....	tloušťka vzorku	[m]
I	.....	elektrický proud	[A]
I_p	.....	povrchový proud	[A]
i_d	.....	proud protékající vzorkem	[A]
$i_A(t)$	.....	absorpční proud	[A]
$i_{A15}(t)$	.....	absorpční proud v patnácté vteřině	[A]
$i_{A60}(t)$	.....	absorpční proud v šedesáté vteřině	[A]
$i_R(t)$	.....	resorpční proud	[A]
$\Delta \vec{M}$	.....	vektor dipólového momentu objemového elementu	$[C \cdot m]$
n_i	.....	počet indukovaných dipólových momentů	$[m^{-3}]$
n	.....	koncentrace volných nosičů náboje	$[m^{-3}]$
\vec{P}	.....	vektor polarizace	$[C \cdot m^{-2}]$
P_{Zss}	.....	Jouleovy ztráty	[W]
P_{11}	.....	jednominutový polarizační index	[-]
P_{110}	.....	desetiminutový polarizační index	[-]
q	.....	velikost náboje	[C]
Q	.....	činitel jakosti	[-]
R_{iz}	.....	izolační elektrický odpor	$[\Omega]$
R_p	.....	povrchový elektrický odpor	$[\Omega]$
R_v	.....	izolační elektrický odpor vzorku	$[\Omega]$
R_{15}	.....	odpor v 15 vteřině	$[\Omega]$
R_{60}	.....	odpor v 60 vteřině	$[\Omega]$

S	plocha materiálů [m ²]
tg δ	ztrátový činitel [–]
t _s	čas od začátku měření [s]
U	napětí [V]
U _p	průrazové napětí [V]
ΔV	objemový element látky [m ³]
α	polarizovatelnost [F · m ²]
γ	měrná elektrická vodivost (konduktivita) [S · m ⁻¹]
γ _p	měrná povrchová elektrická vodivost (povrchová konduktivita) [S · m ⁻¹]
ε	permitivita [F · m ⁻¹]
ε ₀	permitivita vakua [F · m ⁻¹]
ε _r	permitivita relativní [–]
κ	koeficient polarizace [–]
ρ	měrný elektrický odpor (rezistivita) [Ω · m]
ρ _v	měrný elektrický odpor vzorku (rezistivita vzorku) [Ω · m]
ρ _p	měrný povrchový elektrický odpor (povrchová rezistivita) [Ω]
$\vec{\mu}$	částicový indukovaný dipólový moment [C · m]

U pevných látek ještě můžeme posléze dělit látky dle struktury. Struktura ovlivňuje veškeré podstatné nositelné vlastnosti dielektrika. Dělíme je na amorfnní a krystalické. Krystalické látky mají střed souměrnosti struktury a jsou tedy středosymetrické. Zákonitosti symetrie jsou dány pravidelnou vnitřní strukturou stavebních jednotek. Toto uspořádání se opakuje v celém krystalu a projevuje se jistými fyzikálními vlastnostmi. Naopak amorfnní látky nemají střed symetrie struktury a jsou tedy nestředosymetrické. Nemají tedy pravidelnou strukturu a periodické uspořádání těchto částic je omezeno na velmi krátkou vzdálenost. Tato skutečnost přímo souvisí například s vlastností speciálních dielektrik polarizovat se bez přítomnosti elektrického pole. Příkladem mohou být piezoelektrika či pyroelektrika. [1,4]



Obr. 1.2 Ukázka vnitřních struktur (převzato z [5])



Obr. 1.3 Dělení dielektrik (převzato z [1])

1.2 Působení elektrického pole na dielektrikum

V okamžiku vložení dielektrické látky do elektrického pole začne interakce pole a dielektrika, čímž vzniknou děje uvnitř dielektrika, které nazýváme polarizační. Tyto vzniklé děje jsou závislé na struktuře daného materiálu. Polarizační děje, které přímo souvisí s výskytem vnitřního elektrického pole v dielektriku, lze sledovat ze dvou hledisek, makroskopicky (vnější) a mikroskopicky (vnitřní). [1,2]

1.2.1 Makroskopické hledisko

Z tohoto hlediska nás zajímají vnější projevy polarizačních dějů sledovaného dielektrika jako celku a nezajímají nás děje ve vnitřní struktuře materiálu. Z tohoto hlediska se k dielektriku chováme jako k objektu jisté velikosti. Polarizaci vnímáme na povrchu dielektrika ve formě vázaného elektrického náboje a zavádíme vektor \vec{P} [$C \cdot m^{-2}$] charakterující polarizované dielektrikum. Tento vektor \vec{P} je definován rovnicí (1.2.1),

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V} \quad (1.2.1)$$

Dále také platí pro vektor \vec{P} polarizace vztah (1.2.2)

$$\vec{P} = \kappa \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E}, \quad (1.2.2)$$

kde svou roli hraje i matematický popis dielektrického prostředí κ jako susceptibilita dielektrika a permitivita vakua ϵ_0 , jehož hodnota je $8,85 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$

Zavádíme i vektor elektrické indukce \vec{D} popisující závislost vektoru intenzity elektrického pole a daného prostředí s relativní permitivitou ϵ_r .

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (1.2.3)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (1.2.4)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (1.2.5)$$

$$\epsilon_r = 1 + \kappa \quad (1.2.6)$$

Po úpravě vzorců (1.2.2-5) získáme závislost jedné z nejdůležitějších veličin makroskopického pohledu zkoumání dielektrika ve vnějším elektrickém poli, a to rovnici (1.2.6) pro relativní permitivitu ϵ_r . [1,2,6]

1.2.2 Mikroskopické hledisko

U tohoto hlediska se zaměříme na pohyb a vazby nosičů elektrického náboje, které mají pevnou vazbu se základními částicemi daného dielektrika. Naše zkoumání jde do samotné struktury látky, kde zkoumáme možnost pohybu náboje, rychlost náboje, orientaci dipólových momentů, anebo vznik nových (indukovaných) dipólových momentů. Zkoumáme také i stav stálých dipólových momentů, které vždy existují v dielektriku.

Stálé dipólové momenty v dielektriku mají permanentní orientaci díky chemickým vazbám, které jsou v celé struktuře materiálu. Po vložení stálých dipólových momentů do elektrického pole se tyto momenty směřují ve směru elektrického pole a mění velikost.

Indukované dipólové momenty vznikají nejčastěji vyvoláním z vnějšího elektrického pole posunem kladných a záporných nosičů elektrického náboje z jedné rovnovážné polohy do jiné. Po vyjmutí z vnějšího elektrického pole tento indukovaný dipólový moment zaniká a nosiče se vrací do svého původního uspořádání.

Celým hlediskem se nese veličina zvaná polarizovatelnost, označující se α , udávající deformabilitu, což je míra změny dielektrika při vložení do vnějšího elektrického pole během polarizování.

Pro výpočet vektoru polarizace \vec{P} známe vzorec (1.2.7) ovlivněn jak množstvím dipólových momentů n_i , tak vektorem částicových indukovaných dipólových momentů $\vec{\mu}$ (1.2.8), skládající se z polarizovatelnosti α a vektoru intenzity lokálního elektrického pole v místě dipólu \vec{E}_L .

$$\vec{P} = n_i \cdot \vec{\mu} \quad (1.2.7)$$

$$\vec{\mu} = \alpha \cdot \vec{E}_L = q \cdot \vec{d} \quad (1.2.8)$$

$$\epsilon_r = 1 + n_i \cdot \alpha \cdot \vec{E}_L \cdot \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \vec{E}} \quad (1.2.9)$$

Porovnáním vztahů (1.2.7) a (1.2.2), známého z makroskopického hlediska, získáme výslednou podobu relativní permitivity (1.2.9). Z této rovnice vyplývá, že pro její přesnost

musíme znát souvislosti střední hodnoty vnějšího elektrického pole \vec{E} a lokálního vnitřního elektrického pole \vec{E}_L . [1,2,7]

1.2.3 Vnitřní lokální pole

Toto pole naprosto respektuje skutečnost, že se daná částice neobjevuje sama v daném prostoru, ale je pouze jednou z mnoha částic, které se navzájem obklopují a ovlivňují. Pole se skládá ze dvou složek. A to středního vnějšího makroskopického pole (pole je dáno tvarem elektrod a velikostí připojeného napětí na elektrodách) a součtem všech vektorů elektrického pole částic, které se kolem té jedné částice nacházejí.

Pomocí Lorenzova způsobu odvození lokálního pole a dalších úpravách získaných vzorců se dostáváme ke konečnému vztahu (1.2.10), z něhož vyplývá, že se směry polí intenzit lokálního a vnějšího středního makroskopického pole shodují.

$$\vec{E}_L = \frac{\epsilon_r + 2}{3} \cdot \vec{E} \quad (1.2.10)$$

Tento vztah je tedy spojením makroskopického a mikroskopického hlediska na problematiku polarizace. [1,2,7]

1.3 Polarizační mechanismy

Polarizací rozumíme posouvání elektrického náboje v látce po umístění látky do elektrického pole doprovázený vznikem dipólového momentu. Pod vlivem elektrického pole jsou jednotlivé elektrony a ionty přitahovány k elektrodám opačné polarity, tomuto pohybu brání tepelný pohyb atomů a vazební síly ve struktuře látky.

Polarizace dělíme na několik druhů, které lze vidět na Obr. 1.4. Jedna ze skupin se nazývá pružné deformační, kam spadají elektronová, iontová a dipólová polarizace. Další skupina je relaxační, kam spadají iontová relaxační a dipólová relaxační. Dále se objevuje ještě migrační polarizace a spontánní polarizace.

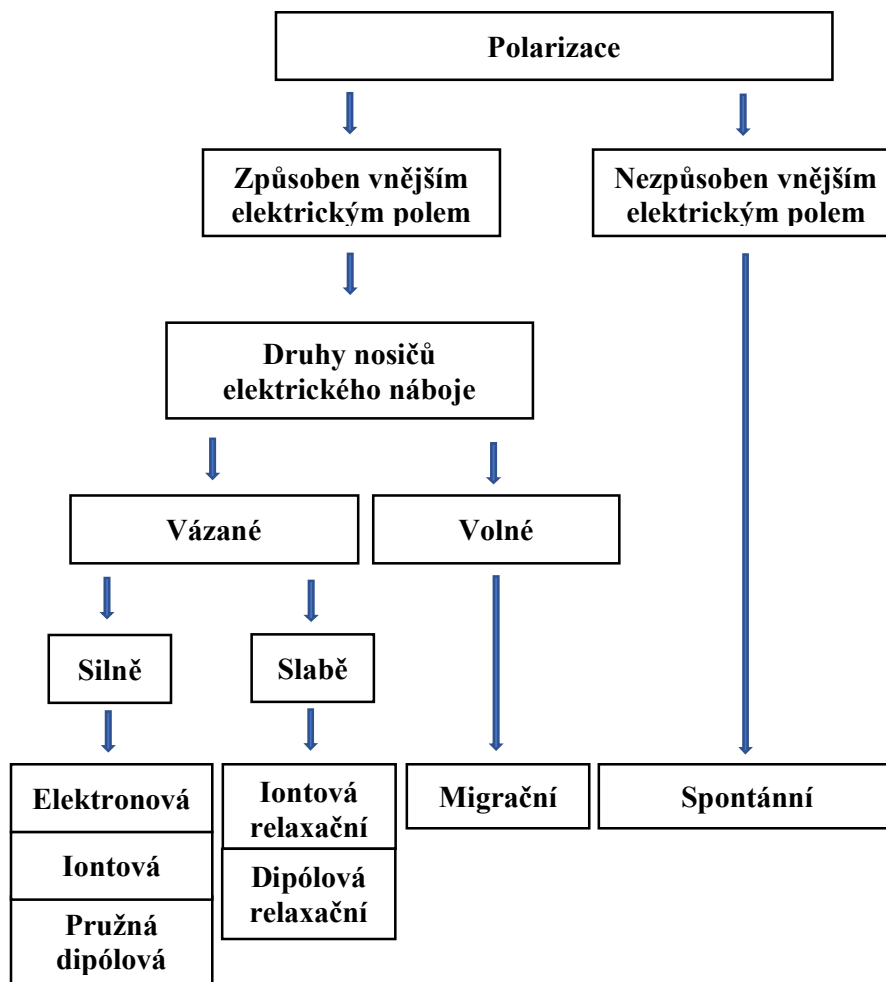
Pružné deformační polarizace jsou charakteristické posunem částic. Nově vzniklá poloha částic je dána rovnováhou elektrických a vazebních sil. Polarizace je velmi rychlá a nijak nezávisí na vlivech okolního prostředí.

Relaxační polarizace je způsobena vnějším elektrickým polem. Polarizace je silnější než u pružné deformační polarizace, ale také pomalejší. Je to dáno strukturou látky. Relaxační

polarizace má přímou závislost na okolních vlivech jako je například teplota, která se přímo podílí na pohybu částic.

Migrační polarizace je charakteristická migrací volných nábojů v oblasti s různou hustotou pohyblivosti nosičů náboje. Někdy je označována jako mezivrstevová polarizace, protože se objevuje v kompozitních a vrstvených materiálech, tedy v nehomogenních dielektrikách složených z více látek jiné konduktivity a permitivity.

Spontánní neboli samovolná polarizace se objevuje ve feroelektrikách, které, aniž by byly v nějakém elektrickém poli, mají nesymetricky rozložený elektrický náboj. Těmto místům se říká domény. Jako celek se materiál jeví jako nepolarizovaný i když se domény jeví polarizované. Po vložení do elektrického pole se tyto domény začnou pohybovat ve směru vnějšího elektrického pole. Feroelektrika mají vysokou polarizovatelnost s teplotní závislostí. Rostoucí teplota snižuje polarizaci až k teplotě označena jako tzv. Curieova teplota, kde polarizace úplně zanikne. Polarizace silně závisí na struktuře látky.[7]



Obr. 1.4 Dělení polarizací (převzato z [1])

2 Klíčové elektrické parametry a jejich diagnostika

2.1 Relativní permitivita

Jak je vidět v kapitole 1.2, je relativní permitivita z makroskopického hlediska při polarizaci jednou z nejdůležitějších veličin. Charakterizuje chování dielektrika v elektrostatickém poli. Jak je vidět ve vzorci (1.2.4) permitivita se skládá ze součinu permitivity vakua ϵ_0 a relativní permitivity ϵ_r . Permitivita vakua je konstanta a má hodnotu nejmenší možné permitivity, kterou můžeme mít. Hodnota permitivity vakua je $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$. Relativní permitivita je bezrozměrná veličina a nabývá pro různá dielektrika hodnot od 1 (vakua) až po 10^4 .

V praxi materiály s vyšší relativní permitivitou využíváme u kondenzátorů. Ve vzorci (2.1.1) můžeme vidět, jak relativní permitivita zvyšuje kapacitu kondenzátoru, i když jeho geometrická konfigurace zůstane stejná. [3]

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (2.1.1)$$

Tab. 2.1 Přehled látek a jejich relativních permitivit (převzato z [2])

Látka	Vzduch	Polystyren	Polyester	Papír	Porcelán	Sklo	Křemík
$\epsilon_r [-]$	1	2,5	3	3,7	6,5	7,6	12

2.2 Dielektrické ztráty

Jedná se o velmi důležitou vlastnost a v mnoha případech volba vhodného izolantu je důležitá pro fungování a životnost elektrického systému. Udává kolik energie se přemění z přiložené energie napětí v jinou formu energie, a to za určitý čas v určitém objemu materiálu. Často se jedná o tepelnou energii, což způsobuje zahřívání materiálu. Budeme-li mluvit o izolantech, toto ohřívání může způsobit tepelný průraz (více v kapitole (2.3)).

Na ztráty má vliv mnoho faktorů a pro jednotlivé materiály je vždy jiný, z důvodu rozdílných vlastností, struktury, chemického složení, množství nečistot a na vnějších fyzikálních podmínkách. Za ztráty můžou pohyby volných a vázaných nosičů elektrické energie.

Celkový pojem dielektrické ztráty zahrnuje vodivostní ztráty a ztráty relaxačními polarizacemi. Vodivostní ztráty vznikají pod vlivem vodivostního proudu procházející dielektrikem a proudem tekoucím po povrchu dielektrika. Tyto ztráty se v dielektrickém materiálu objeví vždy. Ztráty relaxačními polarizacemi vycházejí z vnějšího elektrického pole, které překonává a ovlivňuje vnitřní tepelný pohyb částic. Tento proces zpožďuje pohyb

vázaných nosičů elektrické energie. Rozdíl mezi energiemi uvnitř materiálu (tepelný pohyb) a vnějšího elektrického pole vyvolá relaxační ztráty ve formě zahřívání materiálu.

Dielektrické ztráty vznikají při přiloženém střídavém i stejnosměrném napětí.

U stejnosměrného napětí záleží především na vodivostním proudu a izolačním odporu materiálu (2.2.1). Vznikají zde Jouleovy ztráty P_{ZSS} .

$$P_{ZSS} = U \cdot I = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i} \quad (2.2.1)$$

Střídavé napětí na rozdíl od stejnosměrného napětí způsobuje daleko větší dielektrické ztráty. Uplatňují se především ztráty vodivostní, polarizační a někdy i ztráty iontové. Ve ztrátách zavádíme ztrátový úhel δ , který znázorňuje časové zpoždění mezi průběhem elektrické indukce a průběhem intenzity elektrického pole. Ze ztrátového úhlu dostáváme ztrátový činitel tangentou úhlu δ .

$$P_{Zstř} = U \cdot I \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (2.2.2)$$

U nepolárních pevných dielektrik se uplatňují pouze ztráty vodivostní. Polarizační ztráty se zde neobjevují, protože jediná polarizace, která zde má svůj vliv jen deformační polarizace neboli bezztrátová polarizace. Součty těchto ztrát je velice malé, a proto se často využívají ve vysokofrekvenčních obvodech.

U polárních pevných dielektrik se velkou měrou na dielektrických ztrátách projevuje ztrátová dipólová polarizace spolu s vodivostními ztrátami. Vodivostní ztráty jsou zde podmíněny přítomností polárních nečistot v materiálu. Mohou se zde objevit i ionizační ztráty ve vzduchových dutinkách materiálu. S těmito materiály se můžeme v praxi setkat nejčastěji. Celkové ztráty jsou vyšší než ztráty u nepolárních dielektrik.

Homogenita materiálu také hodně ovlivňuje velikost dielektrických ztrát. Zkrátka čím vyšší je nehomogenita daného materiálu, tím vyšší jsou ztráty. Nehomogenita je způsobena jak postupem výroby, tak i vlastnostmi daných materiálů, které způsobují rozdílné rozložení prostorového náboje v materiálu. Zásadní je ještě v jakém tvaru se nehomogenity objevují v materiálu a vedou k ionizačním ztrátám.

Tab. 2.2 Přehled látek a jejich ztrátového činitele (převzato z [2])

Látka	Vzduch	Keramika	PVC	Papír
tgδ [-]	10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²

Veškeré diagnostické parametry pro zjištění ztrátového činitele o technické frekvenci 0,1 Hz až 10 MHz je dáno normou ČSN EN IEC 62631-2-1 [9] pro zkoumání dielektrických a izolačních vlastností pevných elektroizolačních materiálů. [1,7,8]

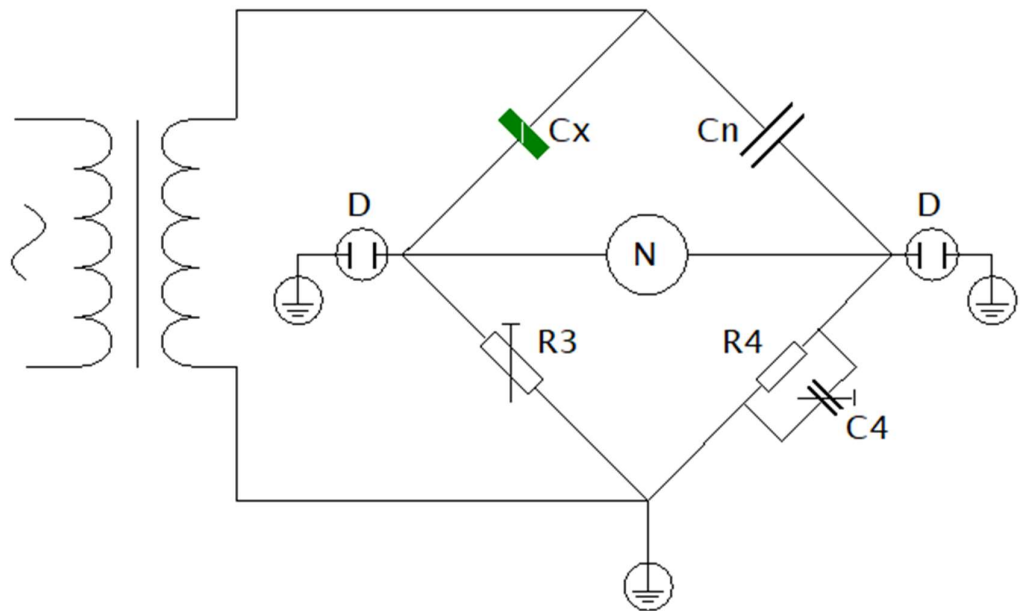
2.2.1 Diagnostika ztrátového činitele tg δ Scheringerovým můstkem

Nejpoužívanější v diagnostice ztrátového činitele je zapojení do Scheringerova můstku. Můstek se skládá ze dvou částí. První je vysokonapěťová část, kde se nachází vysokonapěťový kondenzátor C_N vytvářející kapacitní normál o přibližné velikosti 95,63 pF s plynným dielektrikem (stlačený oxid uhličitý). Tento kondenzátor má ztrátový činitel tg δ menší než 10⁻⁵ a dá se tedy zanedbat ve srovnání s měřeným vzorkem C_x. Druhou částí je nízkonapěťová část, která slouží k vyvážení můstku kapacitní (C₄) a odporovou dekádou (R₃). Kapacitní dekádou (C₄) se vyvažuje odporová složka měřeného vzorku a odporovou dekádou (R₃) se vyrovná náhradní sériový obvod. Vyrovnání indukuje nulový indikátor N. V uzlových bodech se z důvodu bezpečnosti obsluhy vyvažující můstek v nízkonapěťové části zapojují svodiče přepětí D. Důvodem je, že by se při případném proražení vzorku dostali vysoké proudy do oblasti, kde obsluha pracuje. Dále je celá nízkonapěťová část stíněna od vlivu okolních parazitních elektromagnetických polí, které způsobují chybovost měření. Zdrojem je dostatečně dimenzovaný sinusový zdroj.

Ve době vyvážení můstku nulový indikátor nevykazuje žádné hodnoty a můstek je vyvážený. Dále pro ně platí jednoduché vzorce (2.2.3) a (2.2.4). [1,8,9]

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3} \tag{2.2.3}$$

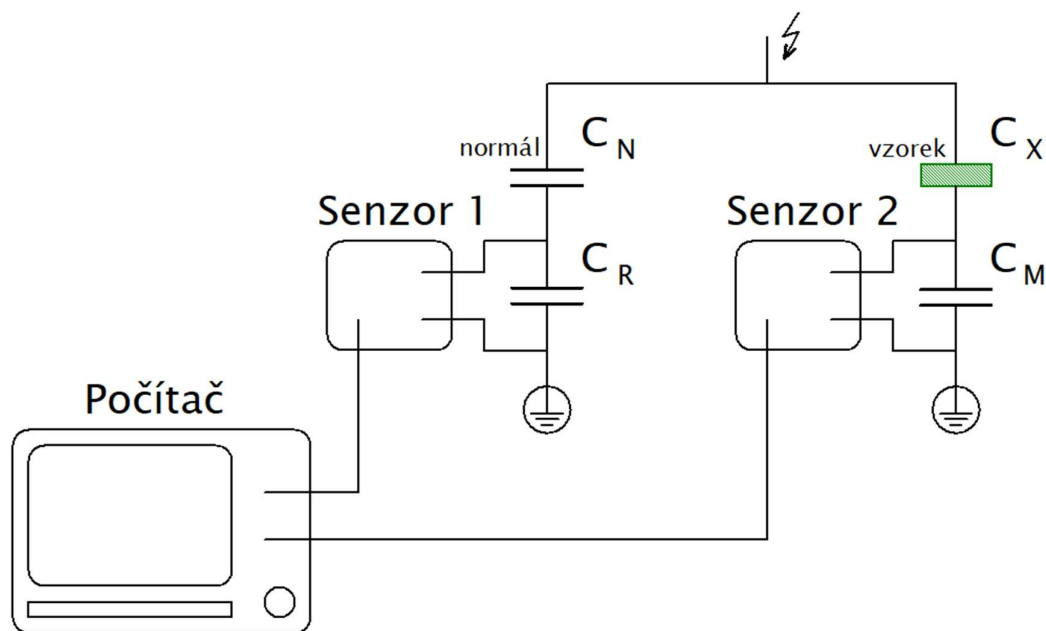
$$\text{tg } \delta = \omega \cdot R_4 \cdot C_4 \tag{2.2.4}$$



Obr. 2.1 Scheringův můstek (převzato z [8])

2.2.2 Diagnostika ztrátového činitele automatickým můstkem

Automatický můstek vychází ze Scheringova můstku k zobrazení $\text{tg } \delta$. Můstek nemusí být dokonale vyvážen. Využíváme rozdílů fázového úhlu mezi dílčími napětími na obou nízkonapěťových impedancích C_M a C_R . Pomocí senzorů (bateriově napájených) jsou hodnoty napětí digitalizovány a přes optické kabely přeneseny do počítače, kde se rychlou Fourierovou transformací přepočtou na hodnotu $\text{tg } \delta$. [8,9]



Obr. 2.2 Automatický můstek (převzato z [8])

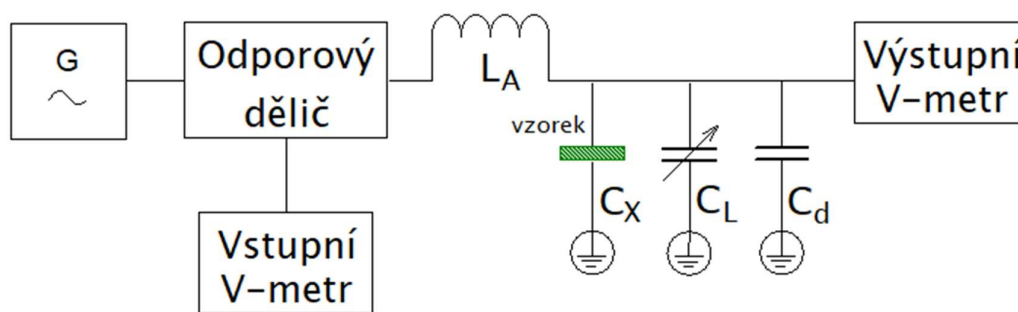
2.2.3 Diagnostika ztrátového činitele rezonanční metodou (Q-metr)

U této metody stanovujeme ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ na základě rozdílných kvalit rezonančních obvodů Q se zapojeným vzorkem a bez něho. Základem je měření činitele kvality, což je podíl nakmitaného napětí a vstupního napětí přivedeného z vysokofrekvenčního generátoru. Používaná frekvence se zde nachází od řádu desítek kHz do stovek MHz.

Měření probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku vložíme vzorek do mikrometrického měrného kondenzátoru, který je tvořen pevnou spodní ploškou a výkyvnou horní ploškou připevněným k mikrometrickému šroubu. Dále se mění kapacita na laděném kondenzátoru do rezonance. Tato kapacita se označí jako C_A . Dále zjistíme činitele jakosti Q_1 . Ve druhém kroku odebereme vzorek z měrného mikrometrického kondenzátoru, zjistíme činitele jakosti Q_2 a vzdálenost elektrod d_2 při rezonanci na mikrometrickém kondenzátoru. [8,9]

Ztrátového činitele posléze dopočítáme přes:

$$\text{tg } \delta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1 Q_2} \cdot \frac{C_A + 11,2}{17,36} (d_2 + 1) \quad (2.2.5)$$



Obr. 2.3 Q-metr (převzato z [1])

2.3 Elektrická pevnost

Tato velice praktická veličina využívána při všech návrzích elektrického systému zcela charakterizuje samotnou vlastnost izolantu. Velikost elektrické pevnosti udává schopnost elektricky oddělit místa s rozdílným elektrickým potenciálem. Schopnost oddělit od sebe elektricky dvě místa s rozdílným potenciálem má mnoho materiálů, musí však brát zřetel na to, jaké vnější vlivy a jaká rozdílná napětí mezi těmito místy působí na daný materiál.

Přiložíme-li materiál k lokální intenzitě elektrického pole, které překročí jistou kritickou mez, tak dojde k výboji. Tento výboj je umožněn z prudkého lavinového nárůstu koncentrace volných nosičů elektrického náboje s vysokou pohyblivostí vyvolán velkým napětím, což sníží izolační schopnost, a to nekontrolovatelným nárůstem konduktivity až se nevodivá cesta stane mezi místy s rozdílným potenciálem vodivou. V této cestě dosahuje proud značných hodnot a může tím mít pro systém fatální dopad.

Elektrická pevnost závisí na velkém množství podmínek, při kterých je měřena. Záleží tedy na druhu přiloženého napětí, stejnorodosti elektrického pole, teplotě, frekvenci, vlhkosti, chemickém složení a dalších aspektech měření.

Elektrická pevnost E_p je dána vztahem (2.3.1) jako poměr přiloženého napětí ku tloušťce materiálu.

$$E_p = \frac{U_p}{d} \tag{2.3.1}$$

U pevných izolantů se v tomto případě ztráta schopnosti izolovat nazývá průrazem a je na rozdíl od přeskoků v plynných a kapalných materiálech neregenerační (výjimkou jsou moderní samouzdravující polymery). V materiálu během průrazu dojde k propálení vodivé cesty do izolantu způsobené teplem, čistě elektricky nebo elektrochemicky. Jaký z těchto vlivů převládne, tak o takový průraz se bude jednat. [1,7,8]

Každý materiál má jinou elektrickou pevnost. Základní materiály a jejich přibližné pevnosti jsou znázorněny v následující tabulce:

Tab. 2.3 Přehled látek a jejich elektrických pevností (převzato z [2])

Látka	Vzduch	Kamenina	Sklo	Porcelán	PVC	Polystyren	Polyetylen
E_p [kV/mm]	1 ÷ 3	7 ÷ 27	10 ÷ 20	10 ÷ 30	26 ÷ 50	90 ÷ 120	90 ÷ 120

2.3.1 Tepelný průraz

Někdy je označován jako elektrotepelný průraz z důvodu vysoké závislosti průrazového napětí na teplotě. Svojí roli zde hraje i doba, po které průrazové napětí působí na izolant. Tento průraz vznikne po přehřátí izolantu způsobený dielektrickými ztrátami, nebo Jouleovými ztrátami, či kombinací těchto ztrát. Ohřívání materiálu se objevuje pouze místy, má pouze lokální účinek a neprobíhá rovnoměrně v celém objemu materiálu. V místech ohřevu se nadále zvyšují dielektrické ztráty a elektrická vodivost, což způsobují další zahřívání těchto míst. [1]

2.3.2 Čistě elektrický průraz

Jedná se o složitější proces než při tepelném průrazu. Zde nezáleží na teplotě nebo délce, při které přiložené napětí působí na izolant. V jeden okamžik je přiložené napětí tak velké, že okamžitě vyvolá destrukci v nejslabším místě elektricky namáhaného materiálu. Rychlost růstu vodivého kanálu se pohybuje mezi 10^5 až k 10^6 m/s a trvá řádově v nanosekundách.

U čistě elektrického průrazu není přesně jasné, jak probíhá. Z experimentálních měření vyplývá, že s nejvyšší pravděpodobností jsou rozhodující volné elektrony. Volné elektrony se v malém množství objevují i v izolantech. O těchto volných elektronech jsou dvě teorie. První předpokládá malou koncentraci volných elektronů. Druhá teorie, označována jako teorie kolektivního průrazu, je založena na opaku, a to na tom, že koncentrace volných elektronů je velká.

Při malé hustotě volných elektronů dojde při dosažení průrazového napětí k zvýšení elektrického proudu protékající izolantem. Elektrickému proudu odpovídá i nárůst množství volných elektronů a nově vzniklá energie v izolantu se přemění v teplo, které roztaví izolant či způsobí chemický rozpad ve struktuře materiálu.

Při velké hustotě volných elektronů dochází k velkému množství srážek mezi elektrony, které jsou urychlovány elektrickým polem a vždy při srážce mezi nimi dojde k výměně energie. Z důvodu velkého množství srážek se energie rovnoměrně rozdělí mezi všechny elektrony a dostávají se navzájem do tepelné rovnováhy. Toto postupné přesouvání energie se odehrává do doby, než se překročí mezní elektronová teplota a dojde k jejímu nekontrolovatelnému nárůstu až k roztavení izolantu a průrazu.

U čistě elektrického průrazu, na rozdíl od tepelného průrazu, není tak výrazně viditelné roztavení izolantu v blízkosti průchodu elektrického proudu. Je to dáno velice úzkým vodivým kanálem vzniklým v objemu izolantu. [1,7]

2.3.3 Elektrochemický průraz

Jinak zvaný jako stárnutí izolantu. Během doby užívání izolantu v praxi se v materiálu objevují poruchy, které snižují elektrickou pevnost až do doby, kdy dojde k odstranění izolačních schopností materiálu. Elektrochemický průraz je zapříčiněn výboji ve vzduchových dutinkách, které mohou být zaneseny do materiálu při výrobě. V méně kvalitním izolantu se nachází vyšší množství dutinek, a tedy i vyšší množství výbojů, které svým působením fyzikálně a chemicky daný izolační materiál znehodnocují.

Při výbojích nově uvolněné ionty a elektrony dopadají na izolant a způsobují jeho erozi, a tedy snížení tloušťky materiálu. V místě eroze se materiál pod vlivem bombardování částic chemicky mění na tekavé produkty jiného skupenství. Eroze může mít jen lokální účinky, kde se objevují prohlubně. [1,2]

2.3.4 Diagnostika elektrické pevnosti stejnosměrným napětím

Měření elektrické pevnosti probíhá dle normy ČSN EN 60243-2 ed. 2 [10] platné od roku 2014 pro měření elektrické pevnosti zkušebními stejnosměrným napětím. Zkoumaný vzorek se umístí mezi elektrody, kam se přivede stejnosměrné napětí s maximálním činitelem zvlnění 3 %. Vzorky před zkouškou jsou kondicionovány podle vlastní specifikace. Není-li stanovena vlastní specifikace ponecháváme vzorek ve standardních podmínkách 24 hodin. Standardními podmínkami rozumíme teplotu 23 ± 2 °C a 50 ± 5 % relativní vlhkosti. [1,8,10]

2.3.4.1 Zkouška výdržným stejnosměrným napětím

Z regulovaného zdroje přivedeme nejdříve dostatečně nízké napětí, aby nedošlo k přepětí ze spínacího přechodového jevu. Poté přibližně plynulou rychlostí 2 % ze zkušebního napětí za sekundu až k cílové hodnotě zkušebního napětí. Tato rychlost je stanovena pro možnost obsluhy sledovat přiváděné napětí a z důvodu co nejméně prodlužovat namáhání zkoušeného vzorku, především pro hodnoty blízké zkoušeného napětí. Po dosažení cílového napětí setrváme jednu minutu, pokud není jinak stanoveno, a přejdeme zdrojem na nulu. Dále také přes vhodný odpor vyzkratujeme kapacity obvodu i samotný zkoumaný vzorek. Zkouška je úspěšná, pokud během celého měření nedojde k průrazu ve vzorku. [1,8,10]

2.3.4.2 Zkouška průrazným stejnosměrným napětím

Přivedené napětí se plynule zvyšuje od nuly až po napětí, kdy dojde k průrazu vzorku. Při průrazu se prudce zvýší proud v obvodu. Prudce se zvýší vodivost a materiál se zničí. Zaznamenána je ta velikost napětí, při které se objevuje na měřidle v okamžiku proražení materiálu. [1,8,10]

2.3.5 Diagnostika elektrické pevnosti střídavým napětím

Měření elektrické pevnosti probíhá dle normy ČSN EN 60243-1 ed. 2 [11] platné od roku 2014 pro měření elektrické pevnosti zkušebními napětími o průmyslových kmitočtech. Průmyslový kmitočet má frekvenci, která se pohybuje v rozmezí mezi 48 až 62 Hz. Tvar musí být co nejvíce podobný sinusoidě s maximální výchylkou $\pm 5\%$. Vzorky jsou stejně kondicionovány jako u diagnostiky stejnosměrným napětím uvedených výše v kapitole 2.3.4. [1,8,11]

2.3.5.1 Zkouška výdržným střídavým napětím

Zkouška je totožná se zkouškou výdržným stejnosměrným proudem popsaným výše v kapitole 2.3.4.1. Jediný rozdíl je zde v procesu snížení napětí po ukončení zkoušky. Napětí se nesmí odpojit od zkoumaného vzorku z důvodu možného vzniku spínacího přechodového přepětí, které by mohlo poškodit vzorek a také zkreslit výsledky zkoušek. I zde jsou požadavky zkoušky splněny, nedojde-li k průrazu vzorku během zkoušky. [1,8,11]

2.3.5.2 Zkouška průrazným střídavým napětím

Zkouška je totožná se zkouškou průrazným stejnosměrným proudem popsaným výše v kapitole 2.3.4.2. Přivedené napětí se plynule zvyšuje od nuly až po napětí, kdy dojde k průrazu vzorku. Při průrazu se prudce zvýší proud v obvodu. Prudce se zvýší vodivost a materiál se zničí. Zaznamenána je ta velikost napětí, která se objevuje na měřidle v okamžiku proražení materiálu. [1,8,11]

2.4 Elektrická vodivost

Jedná se o jev, který popisuje pohyb nosičů elektrického náboje v látkovém prostředí materiálu. Forma vodivosti je podřízená skupenstvím látky a na typech nosičů elektrického náboje. Nosiči mohou být elementární částice, ionty či koloidní částice. I izolanty tedy mají jistou nenulovou vodivost.

V praxi používáme měrnou elektrickou vodivost (konduktivita) γ , což je převrácená hodnota měrného elektrického odporu (rezistivita) ρ (2.4.1). Pro modelový plochý vzorek za předpokladu homogenního pole se rezistivita vypočítá z odporu (2.4.2) a geometrického rozložení izolantu (2.4.3).

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (2.4.1)$$

$$R_{iz} = \frac{U}{I} \quad (2.4.2)$$

$$\rho = R_{iz} \cdot \frac{s}{d} \quad (2.4.3)$$

U pevných dielektrik se objevuje, mimo objemové elektrické vodivosti i povrchová elektrická vodivost. Tato vodivost je definována vztahem (2.4.4). Tento vztah za předpokladu prostorového uspořádání lze rozšířit (2.4.5) a vyvodit, že i povrchová vodivost je závislá na svém odporu, a to na měrném povrchovém elektrickém odporu (2.4.6)

$$\gamma_p = \frac{I_p}{E} \quad (2.4.4)$$

$$\gamma_p = \frac{I}{I_p} \cdot \frac{d}{U} \quad (2.4.5)$$

$$\rho_p = R_p \cdot \frac{l_e}{d} \quad (2.4.6)$$

Objemová elektrická vodivost je značně komplikovaná záležitost, vyskytují se zde vodivosti elektronové a iontové, vždy jedna vodivost převládá. Za normálních podmínek mají izolanty iontový charakter vodivosti, avšak při vysoké intenzitě okolního elektrického

pole v řádu desítek až stovek $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ převládá elektronová vodivost. Vzorec pro výpočet vodivosti (2.4.7) je pouze obecný, pro jednotlivé druhy látek je vzorec složitější a přesnější. Jednotlivé druhy látek rozdělujeme na organické amorfnní, iontové krystalické a na anorganické amorfnní. [1,2]

$$\gamma = n \cdot q \cdot b \tag{2.4.7}$$

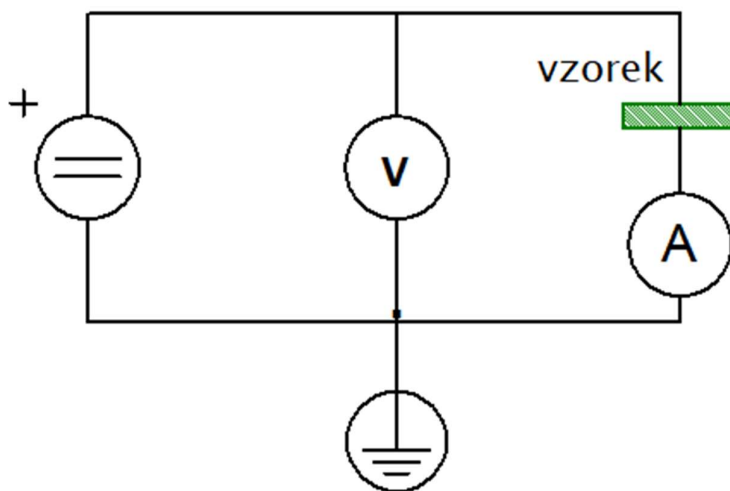
Tab. 2.4 Přehled látek a jejich rezistivit (převzato z [2])

Látka	Papír	Sklo	Porcelán	Polyetylen	PVC	Polystyren	Vzduch
$\rho [\Omega\cdot\text{m}]$	$10^{10} \div 10^{21}$	$10^{11} \div 10^{16}$	10^{18}	10^{20}	10^{20}	$10^{21} \div 10^{23}$	∞

2.4.1 Diagnostika elektrické vodivosti voltampérovou metodou

Tato metoda je přímá, je tedy založena na současném měření napětí přivedeným na vzorek a na proudu, který jím prochází. Diagnostika je v souladu s normou ČSN IEC 62631-3-1. [12] Pro uvedení vzorku do stabilního stavu se musí vzorek umístit po dobu 24 hodin do zkratovací knížky. Tato metoda je jednou z nejjednodušších. Nejpoužívanějšími napěťovými hladinami stejnosměrného zdroje jsou 100, 500 a 1000 V. Tyto hodnoty musí být při měření velice stabilní. Využíváme dále stejnosměrný voltmetr a ampérmetr, který musí být dostatečně citlivý. Pro velice kvalitní vzorky musí mít citlivost minimálně 10^{-16} .

Výsledný elektrický odpor vzorku je určen Ohmovým zákonem dle vzorce (2.4.2) a rezistivita materiálu vzorcem (2.4.3). Převrácená hodnota rezistivity (2.4.1) nám určí výslednou hodnotu hledané elektrické vodivosti. [1,8,12]



Obr. 2.4 Voltampérová metoda (převzato z [1])

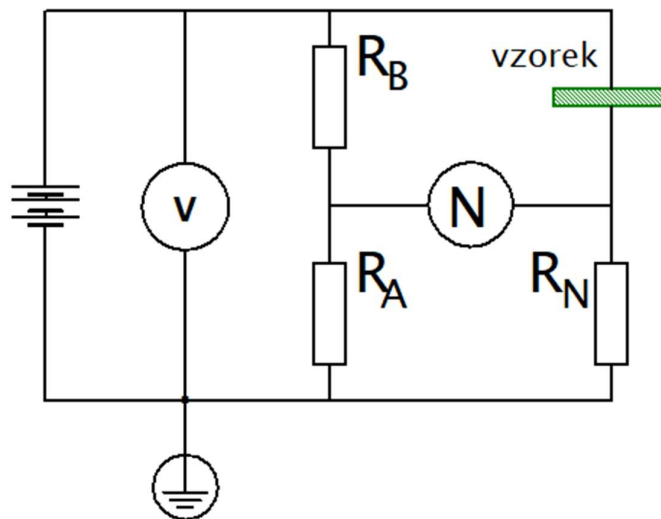
2.4.2 Diagnostika elektrické vodivosti Wheatstoneovým můstkem

Tato metoda je porovnávací. Určujeme zde poměr neznámého odporu vzorku a známého referenčního odporu v můstku. Vzorek je umístěn do jedné ze čtyř větví Wheatstoneova můstku. Ve zbylých třech větvích jsou známe odpory. Odpor R_N je po celou dobu měření neměnný, oproti tomu odpor R_B se mění v dekadických řadách pro hrubé vyrovnaní můstku a odpor R_A pro jemné doladění obvodu. Vyrovnanost obvodu detekujeme na nulovém indikátoru. Odpor vzorku je po vyrovnaní můstku roven vzorci:

$$R_X = \frac{R_N \cdot R_B}{R_A} \quad (2.4.8)$$

Rezistivita vzorku je opět určena vztahem (2.4.3). Převrácená hodnota rezistivity (2.4.1) nám určí výslednou hodnotu hledané elektrické vodivosti.

Metoda je vhodná pro zkoumání nekvalitních izolantů s odpory do $10^{14} \Omega$. Metoda není vhodná pro měření materiálů, které mají velkou časovou závislost. [1,8,12]



Obr. 2.5 Zapojení Wheatstoneova můstku (převzato z [1])

2.5 Absorpční a resorpční charakteristiky

Absorpční charakteristiky vycházejí z absorpčních proudů, které jsou časově proměnné a jsou dány součtem všech polarizačních proudů. Polarizační proudy jsou vyvolány rozvojem relaxačních polarizací.

Absorpční proud $i_A(t)$ je jedním z proudů, které můžeme detekovat například v nabíjení kondenzátoru. Proud v delším časovém úseku padá až na úplnou nulu a rychlost jeho poklesu je dána samotným dielektrikem, tak i stavem samotného materiálu. V některých informačních pramenech máme uvedeno, že tento proud probíhá materiálem i po několika hodinách, a dokonce dnech od zapojení do elektrického obvodu.

Takovým opakem k absorpčnímu proudu máme proud resorpční $i_R(t)$. Tento proud je také časově proměnný a asymptoticky se přibližuje k nulové hodnotě. Je nutné si ale uvědomit, že mezi absorpčním proudem $i_A(t)$ a resorpčním proudem $i_R(t)$ neplatí rovnost.

Časové závislosti absorpčních proudů se mnohdy využívají pro stanovení stavu izolací elektrických zařízení. Především strmost proudového průběhu sděluje momentální stav daného materiálu. Pro toto stanovení využíváme několik diagnostických metod. A to přímé využití absorpčních křivek, kde například integrálním počtem stanovujeme plochu pod danou křivkou. Další metodou je stanovení jednotlivých indexů. [1,8]

2.5.1 Diagnostika jednodinutového a desetiminutového polarizačního indexu

S elektrickou vodivostí úzce souvisí polarizační index. Polarizační index je dobrý výpovědišopný parametr, který lze získat z absorpčních charakteristik. Obecně platí, čím vyšší číslo polarizačního indexu má měřený materiál, tím lepším izolantem je. Jednotlivé stupně kvality izolantů jsou zobrazeny v tabulce 2.5. [1]

Tab. 2.5 Stav izolace podle velikosti p_i (převzato z [13])

p_i	$\geq 4,0$	2,0 až 4,0	1,0 až 2,0	$\leq 1,0$
Kritérium stavu izolace	výborný	dobrý	nebezpečný	špatný

Pokud výsledný polarizační index vyjde okolo jedné, obsahuje materiál velké množství volných nosičů elektrické energie. Takovýto výsledek se nejčastěji objevuje u znečištěných materiálů nebo u navlhých materiálů. V případě suchých a čistých materiálů se index u kvalitních izolantů pohybuje od 3 do 6. Index je naprosto nezávislý na fyzických propozicích vzorku.

Jednominutový polarizační index p_{i1} je bezrozměrná hodnota stanovena poměrem absorpčního proudu v patnácté vteřině měření ku absorpčnímu proudu v šedesáté vteřině, vzorec (2.5.1). Dle Ohmova zákona (2.4.2) a předpokladu stálého stejnosměrného napětí na vzorku, můžeme tento vzorec přepsat na podíl odporů materiálu v šedesáté vteřině ku patnácté vteřině měření (2.5.2). Doba začátku počítání vteřin je stanoven ve chvíli přivedení stejnosměrného napětí na vzorek.

$$p_{i1} = \frac{i_{A15}}{i_{A60}} \quad (2.5.1)$$

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (2.5.2)$$

Obdobně jako je jednominutový polarizační index p_{i1} je i desetiminutový polarizační index p_{i10} . Zde se počítá s hodnotou absorpčního proudu naměřeného v jedné minutě a desáté minutě (2.5.3). Desetiminutové měření se využívá pro měření na vinutích strojů. [1,8,13]

$$p_{i1} = \frac{i_{A60}}{i_{A600}} \quad (2.5.3)$$

2.5.2 Diagnostika redukováných resorpčních proudů

K metodě redukováných resorpčních proudů využíváme resorpční proudy. Celá metoda je založena na matematických úpravách průběhů resorpčních proudů, ze kterých vytváříme relativní tvar charakteristik. Každý bod relativní charakteristiky časového resorpčního proudu je vztažena poměrem k hodnotě proudu změřeného v patnácté vteřině měření.

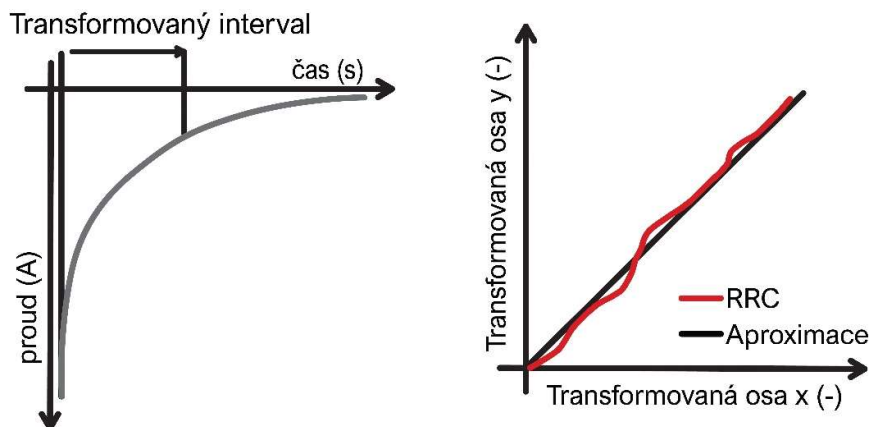
Body relativní charakteristiky se transformují podle vztahů (2.5.4) a (2.5.5):

$$x = \ln(t) - \ln(15) \quad (2.5.4)$$

$$y = |\ln(i_t) - \ln(i_{15})| \quad (2.5.5)$$

kde i_t je momentální proud v daném čase od začátku měření, i_{15} je proud v čase patnácti vteřin po začátku měření.

Z výsledné redukované resorpční charakteristiky vytvoříme linearizovaný model v intervalu od patnácté do přibližně tří sté vteřiny měření. Interval lze volit podle materiálu, ale tak, aby výsledné redukované resorpční křivky byly co nejlineárnější. Znatelné nelinearity by snižovaly přesnost měření. Dále určíme směrnici dané náhrady. Obecně platí, že čím vyšší bude směrnice náhrady, tím lepší izolant daný materiál je. A obráceně nižší hodnoty směrnice prokazují špatné izolační vlastnosti materiálu. [1,8,14]



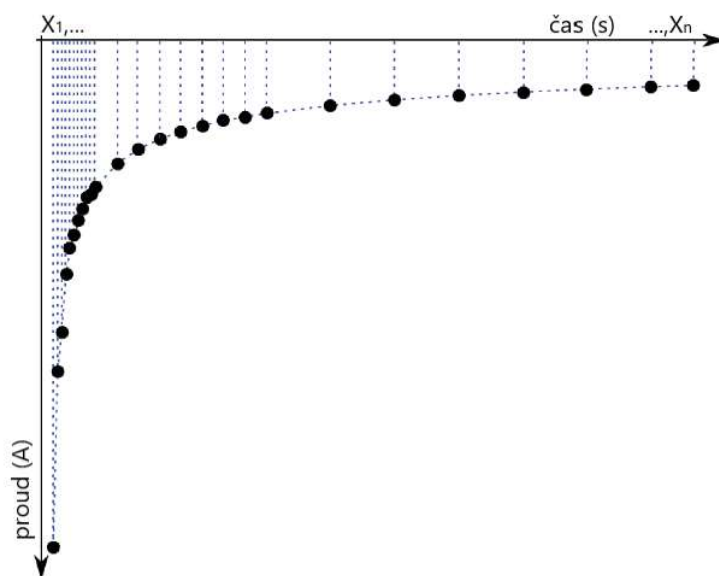
Obr. 2.6 Princip diagnostiky redukce resorpčních proudů (převzato z [14])

2.5.3 Diagnostika plochy pod absorpční a nad resorpční křivkou

Zjištěním plochy pod absorpční či nad resorpční křivkou dává informaci o schopnosti materiálu náboj akumulovat, v případě absorpční křivky, nebo postupně náboj uvolňovat v případě resorpční křivky.

Velikost plochy lze vypočítat analytickou metodou v případě známého matematického popisu průběhu křivky. V teoretických úvahách se často počítá s exponenciálním tvarem. V praxi často nedokážeme určit přesnou matematickou funkcí danou křivku a využíváme aplikaci numerické metody.

V numerické metodě výpočtu plochy využíváme diskrétních hodnot křivek, kterou si můžeme rozdělit na jednotlivé lichoběžníky, u kterých jsme schopni snadno stanovit obsahy, které následně sečteme do plochy. Výsledek vykazuje chybu, kterou jsme byli nuceni vyrobit vložení lichoběžníků do ohraničené plochy křivkou. Tato chyba je však při vhodném množství lichoběžníků nepatrná a výsledek se může akceptovat. [8,14]



Obr. 2.7 Zobrazení numerické metody stanovení plochy nad křivkou resorpčního proudu (převzato z [14])

3 Analýza změřených dat

Pro praktické měření bylo využito tří sad vzorků dielektrických materiálů, které byly vyrobeny na katedře materiálů a technologií (KET) Západočeské univerzity v Plzni a následně poskytnuty na analýzu elektrických vlastností. Jedná se pryskyřice UP 343, UP 142 a TSA 220 FM vyrobeny mezinárodní firmou Elantas specializující se na vývoj a výrobu izolačních materiálů pro elektrotechnický a elektronický průmysl. Bližší popis vzorků je zmíněn v kapitole 3.1 Popis vzorků.

U těchto vzorků se zkoumala elektrická pevnost, ztrátový činitel, vnitřní rezistivita, jednominutový a desetiminutový polarizační index. Veškerá měření probíhala v souladu s příslušnými normami. Měření elektrické pevnosti probíhalo dle normy ČSN EN 60243-2 ed. 2 [10], diagnostika vnitřní rezistivity a polarizačních indexů probíhala v souladu s normou ČSN IEC 62631-3-1 [12] a v souladu s normou ČSN EN IEC 62631-2-1 [11] probíhalo stanovení ztrátového činitele.

3.1 Popis vzorků

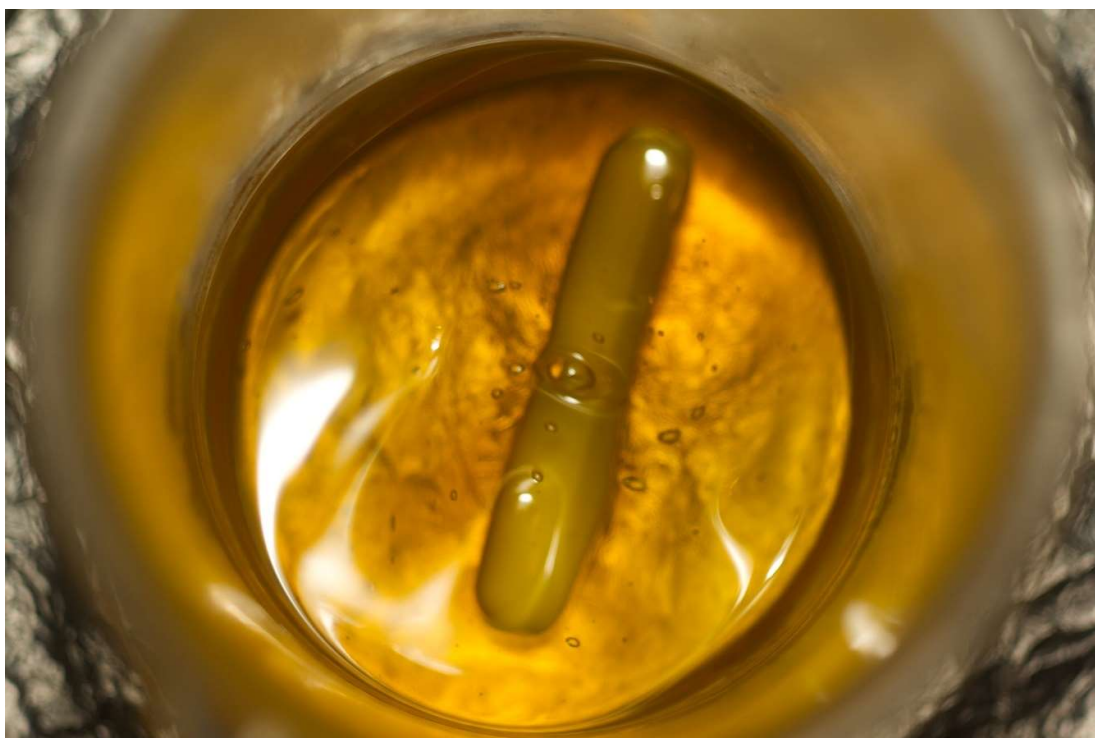
Veškerá diagnostická měření proběhla vždy na čtyřech vzorcích z každé sady pryskyřic, které měly rozměr 100x100x1mm. Četnost měření elektrické pevnosti, na rozdíl od ostatních měření, je 10 a to kvůli využití modifikovaných elektrod, které umožňují vyšší četnost měření na jednom vzorku. Na základě předchozích experimentů se výsledky neliší od normou daných elektrod.

Veškeré vytvrzování vzorků proběhlo dle specifikací v jednotlivých datasheetech. A to tak, že vzorky TSA 220 FM byly vytvrzovány 12 hodin při 165 °C, vzorky UP 142 jednu hodinu při 160 °C a UP 343 jednu hodinu při 150 °C. Před samotným aktem měření proběhlo kondicionování, čili přizpůsobení vzorků měřenému prostředí v délce delší než 24 hodin. Vzorky se tak byly schopny přizpůsobit vlhkosti, tlaku a dalším vnějším vlivům působící v laboratoři.

V tabulce 3.1 jsou vypsány jednotlivé důležité vlastnosti z datasheetů [15,16,17] příslušných materiálů

Tab. 3.1 Výpis vlastností z datasheetů [15,16,17]

	UP 343	UP 142	TSA 220 FM
Viskozita [mPa·s]	7500 ± 1500	1200 ± 300	5000 ± 1200
Gelace [min]	10 ± 2 /120°C	5 ± 3 /120°C	4,5 ± 1,75 /165°C
Vytvrzování	1 h /150°C	1 h /160°C	12 h /165°C
Relativní permitivita [-]	3,5	3,5	3,6
Ztrátový činitel tg δ [-]	0,006	0,006	0,003
Rezistivita [ohm·cm]	10 ¹⁵	10 ¹⁵	10 ¹⁵
Elektrická pevnost [kV/mm]	23	24	26
Hustota [g/cm ³]	1,186 ± 0,03	1,14 ± 0,03	1,18 ± 0,03



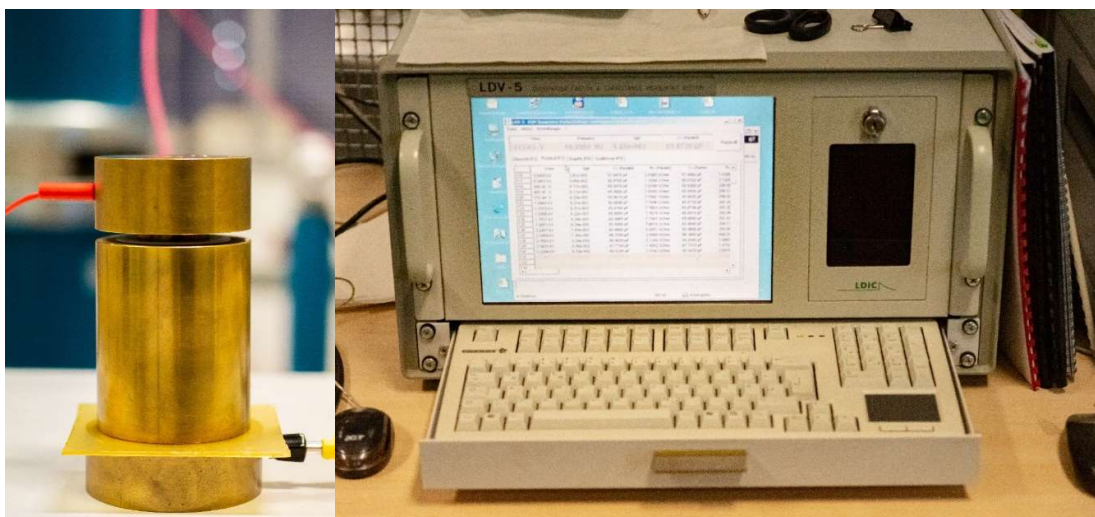
Obr. 3.1 Fotografie pryskyřice v baňce

3.2 Použité diagnostické metody

Elektrická pevnost se stanovovala metodou průrazným střídavým napětím popsána v kapitole 2.3.5.2 Zkouška průrazným střídavým napětím. Elektrická pevnost se stanovovala pomocí vysokonapěťového systému od firmy High Volt s frekvencí 50 Hz spolu s elektrodoým systémem ponořeným v olejové lázni.

Ztrátový činitel se stanovil pomocí principu Scheringerova můstku popsáný v kapitole 2.2.1 Diagnostika ztrátového činitele tg δ Scheringerovým můstkem. Tento můstek byl simulován elektrodoým systémem připojeným do analyzátoru LDIC LDV-5 a napájeným vysokonapěťovým zdrojem od firmy High Volt s frekvencí 50 Hz. Na obrázku 3.2 můžeme vidět jednotlivé části elektrodoého systému a daný analyzátor.

Rezistivita byla stanovena voltampérovou metodou popsanou v kapitole 2.4.1 Diagnostika elektrické vodivosti voltampérovou metodou. Tato metoda byla použita i pro stanovení jednodominutového a desetiminutového polarizačního indexu v kapitole 2.5.1. K měření byl použit tříelektrodový měřicí systém spojený do KEITHLEY 6517A a řízen počítačem. Použité napětí bylo 500 V a ustálený stav procházejícího proudu materiálem byl stanoven po 3600 -ty sekundách měření. Na obrázku 3.4 můžeme vidět průběh měření.



Obr. 3.2 Fotografie použité elektrody se samotným vzorkem a analyzátoru LDIC LDV-5



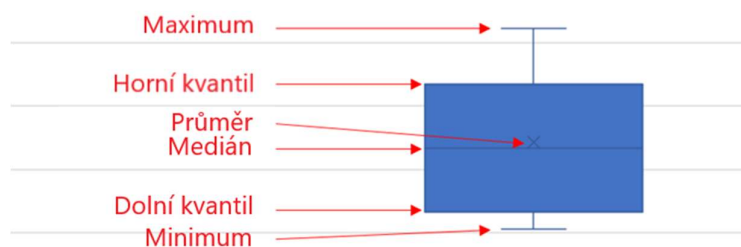
Obr. 3.3 Fotografie tříelektrodového měřicího systém spojený do KEITHLEY 6517A a řízen počítačem

3.3 Výsledky vyhodnocených dat vzorků

Principy jednotlivých zkoumaných vlastností jsou popsány ve druhé kapitole této práce. Veškeré výpočty a grafické ztvárnění závislostí bylo zpracováno v aplikaci MS Excel.

Měření vždy proběhla na více vzorcích daného materiálu a u všech měření proběhla statistická analýza zjištěných parametrů. Ve statistické analýze se stanovily minima (x_{min}), maxima (x_{max}), průměry (\bar{x}), mediány ($\tilde{x}_{0,5}$), směrodatnou odchylku (s_p) a variační koeficienty (V_x).

Pro grafické zobrazení se vybralo vyjádření pomocí krabicových grafů, které se jinak označují jako boxploty. Tyto grafy umožňují zobrazení statistického analýzy. Boxploty umožňují zobrazit kvantily, minimum, maximum, medián a průměrnou hodnotu. Na obrázku 3.4 je k jednotlivým částem boxplotu napsán slovní popis. [18,19,20]



Obr. 3.4 Obrazové popsání boxplotu (převzato z [21])

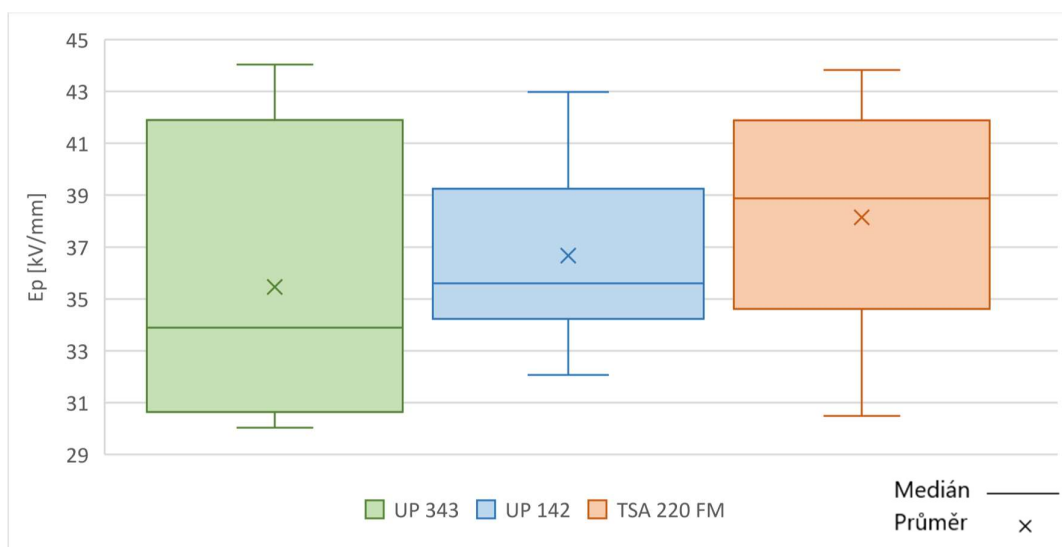
3.3.1 Vyhodnocení elektrické pevnosti

Ke stanovení elektrické pevnosti jsou důležité dva parametry. Prvním z nich je hodnota napětí, při kterém došlo k průrazu materiálu. Druhým parametrem je tloušťka materiálu h_s . Dále se postupuje podle vzorce (2.3.1), kde je průrazné napětí vyděleno tloušťkou materiálu.

Z tabulky 3.2 můžeme vyhodnotit, že nejvyššího mediánu elektrické pevnosti dosahuje pryskyřice TSA 220 FM. Nejvyšší a nejnižší elektrickou pevnost jsme naměřili na UP 343. Rozptyl výsledků na této pryskyřici ukazuje jistou nestálost elektrické pevnosti oproti pryskyřici UP 142, jejíž rozptyl je nejmenší. Na obrázku 3.5 je grafické znázornění četností elektrických pevností z tabulky 4.1 umístěné na koci této práce.

Tab. 3.2 Statistická analýza elektrických pevností materiálů

	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\tilde{x}_{0,5}$	s_p	V_x	[kV/mm] E_p
UP 343	30,034	44,038	35,458	33,890	5,176	14,598	
UP 142	32,072	42,971	36,664	35,602	3,395	9,259	
TSA 220 FM	30,487	43,824	38,148	38,879	4,194	10,994	



Obr. 3.5 Grafické zobrazení četností elektrických pevností pro každý materiál

3.3.2 Vyhodnocení ztrátového činitele

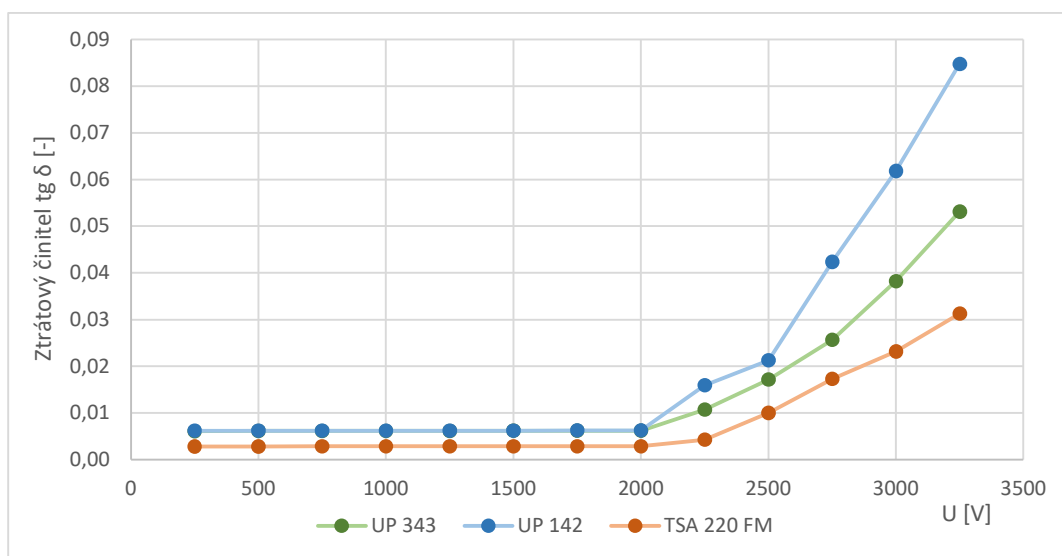
Principy a diagnostické metody jsou popsány v kapitole 2.2 Dielektrické ztráty. Velikost ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ je závislá na přiloženém druhu či velikosti napětí. Obecně platí, že čím vyšší bude napětí na vzorku, tím se i ztrátový činitel bude zvětšovat.

V tabulce 3.3 můžeme vidět statistické vyhodnocení z jednotlivých četností měření dielektrických ztrát z výběru tří napětí. Lépe lze porovnat pryskyřice mezi sebou z obrázku 3.6, který je vyhotoven z průměrných hodnot dielektrických ztrát z každého materiálu při určitém napětí. Nejvyššího mediánu ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ při všech přiložených napětích vykazovala pryskyřice UP 142, oproti tomu pryskyřice TSA 220 FM vykazovala nejnižšího ztrátového činitele $\text{tg } \delta$.

V tabulkách 4.2 a 4.3 na konci práce jsou zmíněné veškeré naměřené, vypočítané a statisticky vyhodnocené hodnoty týkající se ztrátového činitele $\text{tg } \delta$.

Tab. 3.3 Statistická analýza ztrátového činitele u vybraných tří napětí

	U [V]	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\tilde{x}_{0,5}$	s_p	V_x
UP 343	1000	0,00589	0,00654	0,00614	0,00606	2,69E-04	4,38364
	2000	0,00590	0,00657	0,00623	0,00622	2,49E-04	4,00170
	3000	0,03579	0,04174	0,03823	0,03769	2,29E-03	5,97892
UP 142	1000	0,00540	0,00782	0,00619	0,00577	9,57E-04	15,45689
	2000	0,00557	0,00786	0,00627	0,00583	9,28E-04	14,79424
	3000	0,03906	0,08818	0,06180	0,05999	1,87E-02	30,23124
TSA 220 FM	1000	0,00274	0,00289	0,00283	0,00284	5,52E-05	1,95188
	2000	0,00276	0,00288	0,00282	0,00283	4,44E-05	1,57304
	3000	0,02048	0,02654	0,02313	0,02276	2,24E-03	9,67714



Obr. 3.6 Grafické zobrazení závislosti ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ na napětí U

3.3.3 Vyhodnocení vnitřních rezistivit a polarizačních indexů

Pro vyhodnocení vnitřní rezistivity je zapotřebí zjistit elektrický odpor vzorku R_v , dále tloušťku vzorku h_s a efektivní plochu měřeného vzorku A .

Odpor vzorku R_v je určen Ohmovým zákonem (2.4.2) podílem přiloženého stejnosměrného napětí U a změřeného proudu protékajícím vzorkem. Proud se odečítá po skončení absorpce, a to po hodině měření při jistotě ustálení stavu na daném vzorku.

Efektivní plocha měřeného vzorku byla dána rozměry elektrod využitého přístroje a měla $22,88 \text{ cm}^2$. Přiložené stejnosměrné napětí mělo velikost 500 V . Tloušťka vzorku byla měřena pomocí mikrometru s četností 5 a dále byla použita průměrná hodnota pro další výpočet. Proud protékající vzorkem byl změřen přístrojem. Dále se postupovalo dle vzorce (2.4.3).

Jednominutový a desetiminutový polarizační index se určí pomocí proudů, naměřených po 15, 60 a 600 sekundami po začátku měření. Tyto hodnoty jsou zadány do vzorců (2.5.1), pro jednominutový polarizační index, a do (2.5.3), pro desetiminutový polarizační index.

V tabulkách 3.4-3.6 jsou vypsané statistické analýzy polarizačních indexů a vnitřních rezistivit pro všechny tři pryskyřice. Srovnání jednotlivých pryskyřic z hlediska vnitřní rezistivity je na obrázku 3.7, z něhož můžeme vyčíst, že nejvyšší rezistivitu má pryskyřice TSA 220 FM a nejnižší pryskyřice UP 142. Na obrázku 3.8 je graficky zobrazen boxplotem jednominutový polarizační index, kde mediány u všech tří pryskyřic vyšly obdobně. Na obrázku 3.9 je graficky zobrazen boxplotem desetiminutový index, kde se mediány už lišily více, oproti jednominutovým polarizačním výsledkům. Nejnižší medián desetiminutového

indexu vyšel u UP 142 a nejvyšší u UP 343. V tabulce 4.4 na konci práce jsou zmíněny veškeré naměřené a vypočítané hodnoty týkající se měření vnitřních rezistivit a polarizačních indexů.

Tab. 3.4 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů pro UP 343

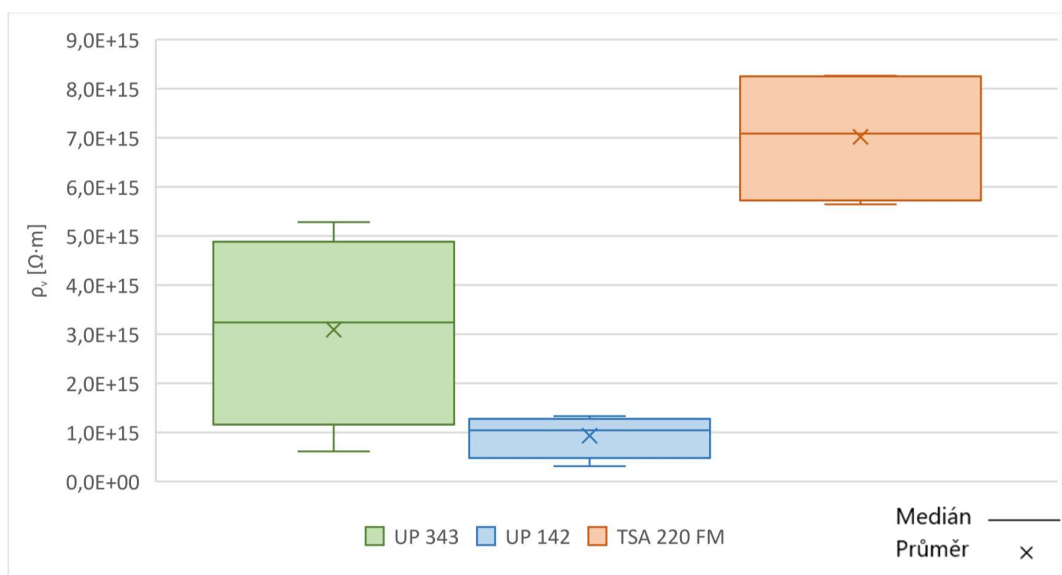
UP 343						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\tilde{x}_{0,5}$	s_p	V_x
$\rho_{i1} [-]$	2,71424	3,33122	3,03671	3,02972	0,23381	7,71713
$\rho_{i10} [-]$	2,98263	6,47437	5,12540	4,92695	1,26357	25,64617
$R_v [\Omega]$	5,53E+14	2,84E+15	1,59E+15	1,65E+15	8,39E+14	51,01155
$\rho_v [\Omega \cdot m]$	6,10E+14	5,28E+15	3,24E+15	3,09E+15	1,69E+15	54,52068

Tab. 3.5 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů pro UP 142

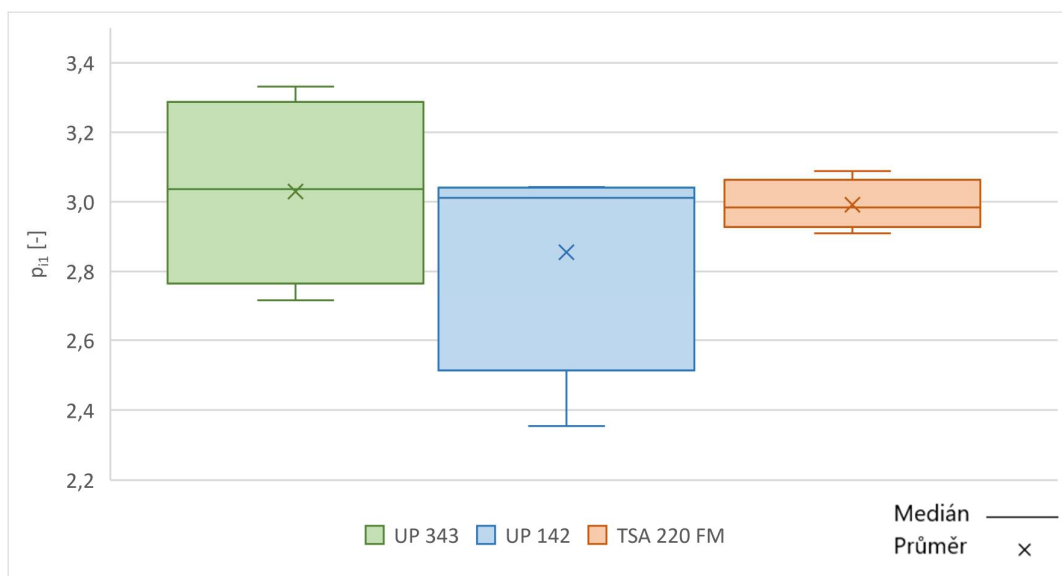
UP 142						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\tilde{x}_{0,5}$	s_p	V_x
$\rho_{i1} [-]$	2,35498	3,04304	3,01150	2,85525	0,28959	10,14219
$\rho_{i10} [-]$	2,32130	5,00582	4,59888	4,13122	1,07471	26,01439
$R_v [\Omega]$	1,93E+14	5,97E+14	5,33E+14	4,64E+14	1,62E+14	34,91568
$\rho_v [\Omega \cdot m]$	3,72E+14	1,30E+15	7,73E+14	8,06E+14	3,45E+14	42,78203

Tab. 3.6 Statistická analýza vnitřní rezistivity a polarizačních indexů pro TSA 220 FM

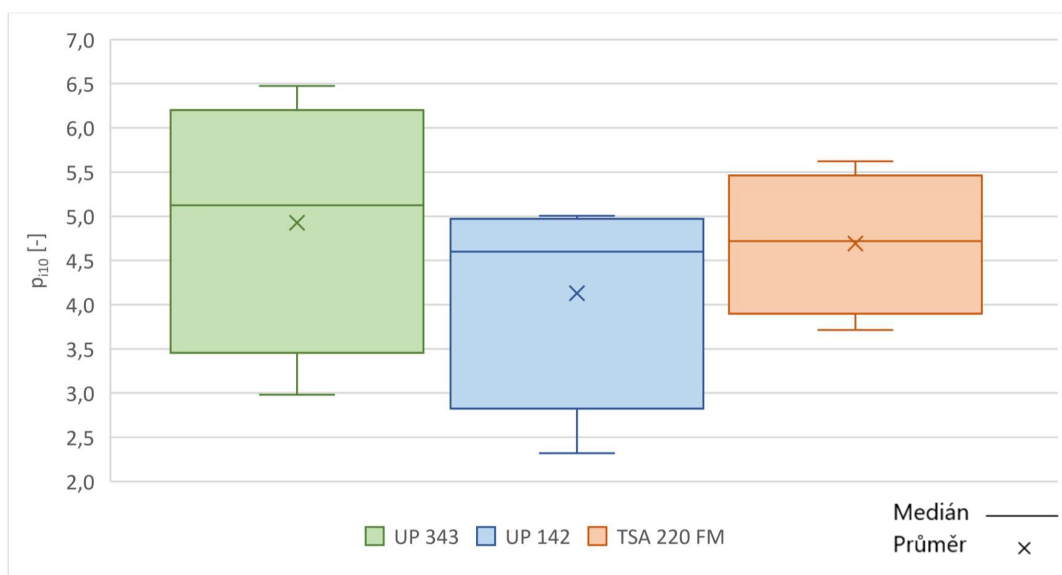
TSA 220 FM						
	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\tilde{x}_{0,5}$	s_p	V_x
$\rho_{i1} [-]$	2,90988	3,08858	2,98392	2,99158	0,06367	2,12839
$\rho_{i10} [-]$	3,71297	5,62306	4,71821	4,69311	0,70053	14,92673
$R_v [\Omega]$	2,79E+15	4,60E+15	4,05E+15	3,87E+15	7,66E+14	19,77574
$\rho_v [\Omega \cdot m]$	3,87E+15	1,00E+16	7,02E+15	6,99E+15	2,54E+15	36,33325



Obr. 3.7 Grafické zobrazení četností vnitřní rezistivity pro každý materiál



Obr. 3.8 Grafické zobrazení četností jednodominutového polarizačního indexu pro každý materiál



Obr. 3.9 Grafické zobrazení četností desetiminutového polarizačního indexu pro každý materiál

3.4 Shrnutí výsledku měření

Vzhledem k předloženým vzorkům se nedaly čekat velké rozdíly při měření. Je to dáno především faktem, že se jedná o pryskyřice využívané ve stejné aplikaci, a to především ve vinutích elektrických točivých strojů. I při pohledu do tabulky 3.1, kde jsou vypsány katalogové hodnoty materiálů, je jasné, že hodnoty si budou velice blízké a stanovit o jednom materiálu, že je v určité elektrické vlastnosti, kterou jsme měřili, nějak extrémně jiný, nemůžeme. Jsou zde však určité rozdíly, které stojí za zmínku.

Při srovnání viskozit je patrné, že chování jednotlivých materiálů při jejich zpracování do určitého tvaru bude jiné. Viskozita pryskyřice UP 343 je oproti pryskyřici UP 142 přibližně 6x vyšší. Viskozita je klíčová z hlediska impregnace pro stroje.

Dalším větším rozdílem je doba vytvrzování. U pryskyřice TSA 220 FM se vytvrzuje oproti ostatním zkoumaným materiálům při nejvyšší teplotě, a ještě o celých 11 hodin déle (tedy 12 hodin), oproti jedné hodině u UP 142 a UP 343.

U elektrické pevnosti po srovnání naměřených hodnot s katalogovými vyšlo najevo, že naše vzorky napříč materiály snesly o 10kV/mm více, než je kvalifikovanou firmou dáno. Tato odchylka by mohla být způsobena například jinými okolními podmínkami v laboratoři či nepatrnou odchylkou při přípravě vzorků. Dále je také dobré zmínit, že tabulkové hodnoty dány výrobcem jsou mnohdy horší, než jsou reálné hodnoty, aby byla zachována určitá bezpečná odchylka.

Ztrátový činitel vyšel ve srovnání s katalogovými hodnotami obdobně, budeme-li brát v úvahu hodnoty naměřené do 2000 voltů. Po překročení této hodnoty ztrátový činitel vystoupal do daleko vyšších hodnot.

Jednotlivé rezistivity se pohybovaly kolem $10^{15} \Omega \cdot m$ a splnily tím předpoklad vysoké rezistivity, kterou u dielektrických materiálů očekáváme a požadujeme.

Po porovnání naměřených hodnot jednodominutového a desetiminutového polarizačního indexu s tabulkou 2.5 ukazující stav izolace podle polarizačních indexů, jsou všechny materiály zhodnoceny jako dobré izolanty. Nejlepší izolační schopnost má UP 343, kde desetiminutový polarizační index vystoupal až k hodnotě 5, což je ukazatel výborné izolace.

4 Závěr

Předložená bakalářská práce se zaměřuje na samotné dielektrické látky a jejich základní vlastnosti. Práce je zaměřena na chování dielektrika pod vlivem působení vnějšího elektrického pole. Především byly popsány a diagnostikovány jednotlivé klíčové vlastnosti. Byly popsány se následně diagnostikovaly v praxi diagnostické metody, kterými lze získat podstatné informace o materiálu a kvantifikovat je. Kvantifikace je důležitá z hlediska objektivního porovnání materiálů.

V úvodu bakalářské práce se obecně charakterizovali dielektrické látky, popsaly se jejich základní dělení s přihlédnutím k pevným látkám a byl popsán proces polarizace.

Následující kapitola se zaměřila na důležité vlastnosti. Přešla popisem od základní vlastnosti relativní permitivity, přes dielektrické ztráty zastoupené ztrátovým činitelem $\tan \delta$, přes elektrickou pevnost se všemi poddruhy průrazů, jako je tepelný, elektrochemický či elektrický průraz až po vyhodnocení látek z absorpčních a resorpčních charakteristik. Dále byly popsány vodivosti, jak vnitřní, tak povrchové, respektive rezistivity. U všech těchto vlastností byly zmíněny příslušné diagnostické metody, jejich popisy, postupy, schémata či normy. Veškeré vlastnosti a diagnostiky byly podpořeny potřebnými vzorci pro kvantifikaci dané vlastnosti.

Předmětem třetí kapitoly byla samotná zkouška diagnostických metod a zpracování naměřených výsledků. Byly zde popsány jednotlivé zkoumané materiály s katalogovými hodnotami. Vypsání použité diagnostické metody s několika fotografiemi dokumentující samotné měření. Dále jsou zde výsledky vyhodnocených dat přepočítány na hledané elektrické parametry. Výsledky měření na předložených sadách materiálů byly podrobeny základní statistické analýze v přehledných tabulkách a graficky zobrazeny v příslušných grafech. Veškeré naměřené výsledky jsou k dispozici na konci této bakalářské práce v sekci příloh.

V dalším postupu práce bych navrhoval se například podívat na další parametry změřených materiálů. Možné spektrum výzkumů je zde velmi široké a stojí za prozkoumání. Osobně bych se zaměřil například na mechanickou odolnost těchto pryskyřic, či na závislost ztráty elektrických vlastností pod působením času a okolních podmínek, jako je například vlhkost, střídání teplot či dlouhodobého působení slunečního svitu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav, Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6
- [2] KUČEROVÁ, Eva, elektrotechnické materiály. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2002. 174 s. ISBN 80-7082-940-0
- [3] HOFMANN, Jaroslav, URBANOVÁ, Marie, Fyzika 1. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2005. 327 s. ISBN 80-7080-514-5
- [4] VÁVRA, Václav, LOSOS, Zdeněk, Multimediální studijní texty z mineralogie pro bakalářské studium hypertextově [online], Brno, 2006. [cit. 4.2.2020], dostup. na WWW: <http://mineralogie.sci.muni.cz/>
- [5] VIK, Robert, Přednášky pro předmět Elektrotechnické materiály pro školní rok 2019/20 ZČU FEL hypertextově [online], Plzeň, 2020. [cit. 15.3.2020], dostup. na WWW: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=159190>
- [6] HASSDENTEUFEL, Josef, KVĚT, Karel a kolektiv, Elektrotechnické materiály. 1. vyd. Praha: SNTL, 1967. 860 s. ISBN 80-7300-189-6
- [7] MENTLÍK, Václav, BEČKA, Miroslav, BOČEK, Václav, KOČOVÁ, Veronika, KRAUS, Zbyněk, KUČEROVÁ, Eva, RAIS, Jan Elektrotechnické materiály. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 1996. 133 s. ISBN 80-7082-227-9
- [8] MENTLÍK, Václav, PIHERA, Josef, POLANSKÝ, Radek, PROSR, Pavel, TRNKA, Pavel, Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [9] ČSNI, 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, 2018. 32 s., ČSN EN IEC 62631-2-1
- [10] ČSNI, Elektrická pevnost izolačních materiálů – Zkušební metody – Část 2: Dodatečné požadavky na zkoušky stejnosměrným napětím, 2014. 20 s., ČSN EN 60243-2
- [11] ČSNI, Elektrická pevnost izolačních materiálů – Zkušební metody – Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech, 2014. 28 s., ČSN EN 60243-1 ed. 2
- [12] ČSNI, Dielektrické a izolační vlastnosti pevných elektroizolačních materiálů - Část 3-1: Stanovení izolačních vlastností (stejnosměrné metody) - Objemový odpor a objemová rezistivita, obecné metody, 2016. 24 s., ČSN EN IEC 62631-3-1
- [13] SMETANA, Jaroslav, Bluen Panther s.r.o., Měření vybraných parametrů izolace [online], Praha, 2009. [cit. 21.3.2020] 2 s., Časopis Elektro, dostupný na WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39496.pdf>

- [14] HORNAK, Jaroslav, TRNKA, Pavel, MENTLÍK, Václav, MICHAL, Ondřej, TOTZAUER, Pavel, Different Approaches for Mathematical Evaluation of Resorption Currents in Nanodielectrics, Plzeň, 2018. 4 s., IEEE 978-1-5386-5086-8/18
- [15] ELANTAS, Electrical Insulation, ELAN-protect® UP 343 UV hypertextově [online], Hamburg, 2017. [cit. 15.2.2020] 4 s., dostup. na WWW: https://products.altana.com/beckinsulation/productReport/ELAN-protect%C2%AE_UP_343_UV.pdf?language=en&country=&download=productReport&productid=00000357&brandid=66958
- [16] ELANTAS, Electrical Insulation, ELAN-protect® UP 142 UV hypertextově [online], Hamburg, 2017. [cit. 15.2.2020] 4 s., dostup. na WWW: https://products.altana.com/beckinsulation/productReport/ELAN-protect%C2%AE_UP_142_UV.pdf?language=en&country=&download=productReport&productid=0000031c&brandid=66958
- [17] ELANTAS, Electrical Insulation, Epoxylite® TSA 220 FM, hypertextově [online], Hamburg, 2014. [cit. 15.2.2020] 4 s., dostup. na WWW: https://products.elantas.com/beckinsulation/productReport/Epoxylite%C2%AE_TSA220FM.pdf?language=en&country=&download=productReport&productid=000002cb&brandid=66958
- [18] ŠEDIVÁ, Blanka, PATRICE, Marek, ŤOUPAL, Tomáš, WÁGNEROVÁ, Eva, Pravděpodobnost a statistika pro FEL [online], Plzeň, 2011. [cit. 21.3.2020] 79 s., dostupný na WWW: https://home.zcu.cz/~friesl/Archiv/hlavni_text_PSE.pdf
- [19] FRIESL, Michal, Pravděpodobnost a statistika hypertextově [online], Plzeň, 2014. [cit. 21.3.2020] 38 s., dostup. na WWW: <https://home.zcu.cz/~friesl/hpsb/hPsbP.pdf>
- [20] DUDEK, Martin, Box-Plot neboli Krabicový graf, hypertextově [online], 2017. [cit. 1.6.2020], dostup. na WWW: <http://kvalita-jednoduse.cz/box-plot/>
- [21] Exceltown, Boxplot - krabicový graf, hypertextově [online], 2020. [cit. 1.6.2020], dostup. na WWW: <https://exceltown.com/navody/grafy-v-excelu/boxplot-krabicovy-graf/>

Příloha A: Naměřená data vzorků pryskyřic

Tab. 4.1 Hodnoty naměřené a vypočítané ke stanovení elektrické pevnosti materiálů

Vzorek	UP 343			UP 142			TSA 220 FM		
	h_s [mm]	U_p [kV]	E_p [kV/mm]	h_s [mm]	U_p [kV]	E_p [kV/mm]	h_s [mm]	U_p [kV]	E_p [kV/mm]
1	0,802	24,73	30,835	1,154	40,31	34,931	0,881	36,03	40,897
2	0,887	26,64	30,034	0,801	34,42	42,971	0,903	35,41	39,214
3	0,826	28,97	35,073	0,771	32,42	42,049	0,929	32,25	34,715
4	0,906	33,17	36,611	1,102	35,34	32,072	1,192	36,34	30,487
5	0,794	33,61	42,330	1,058	39,51	37,344	0,905	31,04	34,298
6	0,805	26,33	32,708	0,941	33,03	35,101	0,639	27,72	43,380
7	0,895	27,88	31,151	0,835	28,87	34,575	0,714	31,29	43,824
8	0,88	26,45	30,057	0,762	27,51	36,102	0,887	30,81	34,735
9	0,756	31,56	41,746	0,745	28,54	38,309	0,85	35,18	41,388
10	0,738	32,5	44,038	0,950	31,53	33,189	0,886	34,15	38,544

Tab. 4.2 Změřené hodnoty k dielektrických ztrát $\tan \delta$

	U [V]	1	2	3	4	\bar{x}
	UP 343	250	0,00657	0,00578	0,00588	0,00617	0,00610
500		0,00652	0,00584	0,00590	0,00618	0,00611
750		0,00655	0,00587	0,00590	0,00621	0,00613
1000		0,00654	0,00589	0,00590	0,00622	0,00614
1250		0,00655	0,00593	0,00590	0,00624	0,00616
1500		0,00655	0,00599	0,00590	0,00627	0,00618
1750		0,00656	0,00604	0,00590	0,00630	0,00620
2000		0,00657	0,00610	0,00590	0,00634	0,00623
2250		0,01601	0,00618	0,00967	0,01109	0,01074
2500		0,02472	0,00965	0,01864	0,01548	0,01712
2750		0,03314	0,01845	0,02513	0,02580	0,02563
3000		0,04174	0,03667	0,03579	0,03870	0,03823
3250		0,05136	0,05745	0,054222	0,04941	0,05311
UP 142		U [V]	1	2	3	4	$\bar{x}$
	250	0,00585	0,00784	0,005454	0,00565	0,00620
	500	0,00590	0,00781	0,005401	0,00565	0,00619
	750	0,00587	0,00782	0,005405	0,00564	0,00618
	1000	0,00589	0,00782	0,005404	0,00565	0,00619
	1250	0,00590	0,00783	0,005436	0,00567	0,00621
	1500	0,00591	0,00784	0,005456	0,00568	0,00622
	1750	0,00590	0,00785	0,005493	0,00570	0,00624
	2000	0,00591	0,00786	0,005568	0,00574	0,00627
	2250	0,00591	0,01266	0,028136	0,01702	0,01593
	2500	0,00730	0,02012	0,036037	0,02167	0,02128
	2750	0,02115	0,02850	0,072763	0,04696	0,04234
	3000	0,05059	0,03906	0,088178	0,06938	0,06180
	3250	0,07936	0,04989	0,113438	0,09640	0,08477
TSA 220 FM	U [V]	1	2	3	4	\bar{x}
	250	0,00288	0,00273	0,00280	0,00284	0,00281
	500	0,00288	0,00273	0,00280	0,00284	0,00281
	750	0,00287	0,00275	0,00281	0,00284	0,00282
	1000	0,00289	0,00274	0,00282	0,00285	0,00283
	1250	0,00288	0,00274	0,00281	0,00285	0,00282
	1500	0,00288	0,00275	0,00281	0,00285	0,00282
	1750	0,00289	0,00276	0,00282	0,00286	0,00283
	2000	0,00288	0,00276	0,00282	0,00285	0,00282
	2250	0,00290	0,00604	0,00447	0,00369	0,00428
	2500	0,00694	0,01392	0,01043	0,00869	0,01000
	2750	0,01393	0,02165	0,01779	0,01586	0,01731
	3000	0,02048	0,02654	0,02351	0,02200	0,02313
	3250	0,02979	0,03319	0,03149	0,03064	0,03128

Tab. 4.3 Statistické vyhodnocení naměřených dielektrických ztrát $\text{tg } \delta$

	U [V]	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\tilde{x}_{0,5}$	S_p	V_x
	UP 343	250	0,00578	0,00657	0,00610	0,00603	3,07E-04
500		0,00584	0,00652	0,00611	0,00604	2,72E-04	4,45721
750		0,00587	0,00655	0,00613	0,00605	2,75E-04	4,49197
1000		0,00589	0,00654	0,00614	0,00606	2,69E-04	4,38364
1250		0,00590	0,00655	0,00616	0,00608	2,63E-04	4,27878
1500		0,00590	0,00655	0,00618	0,00613	2,56E-04	4,13654
1750		0,00590	0,00656	0,00620	0,00617	2,52E-04	4,06856
2000		0,00590	0,00657	0,00623	0,00622	2,49E-04	4,00170
2250		0,00618	0,01601	0,01074	0,01038	3,53E-03	32,89129
2500		0,00965	0,02472	0,01712	0,01706	5,44E-03	31,78603
2750		0,01845	0,03314	0,02563	0,02547	5,20E-03	20,28502
3000		0,03579	0,04174	0,03823	0,03769	2,29E-03	5,97892
3250		0,04941	0,05745	0,05311	0,05279	3,03E-03	5,71399
UP 142		U [V]	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\tilde{x}_{0,5}$	S_p	$V_x$
	250	0,00545	0,00784	0,00620	0,00575	9,60E-04	15,48127
	500	0,00540	0,00781	0,00619	0,00578	9,53E-04	15,39506
	750	0,00540	0,00782	0,00618	0,00575	9,60E-04	15,51850
	1000	0,00540	0,00782	0,00619	0,00577	9,57E-04	15,45689
	1250	0,00544	0,00783	0,00621	0,00578	9,52E-04	15,32924
	1500	0,00546	0,00784	0,00622	0,00579	9,48E-04	15,23831
	1750	0,00549	0,00785	0,00624	0,00580	9,43E-04	15,12347
	2000	0,00557	0,00786	0,00627	0,00583	9,28E-04	14,79424
	2250	0,00591	0,02814	0,01593	0,01484	8,08E-03	50,72291
	2500	0,00730	0,03604	0,02128	0,02089	1,02E-02	47,83918
	2750	0,02115	0,07276	0,04234	0,03773	1,99E-02	47,04412
	3000	0,03906	0,08818	0,06180	0,05999	1,87E-02	30,23124
	3250	0,04989	0,11344	0,08477	0,08788	2,35E-02	27,68269
TSA 220 FM	U [V]	x_{min}	x_{max}	\bar{x}	$\tilde{x}_{0,5}$	S_p	V_x
	250	0,00273	0,00288	0,00281	0,00282	5,72E-05	2,03216
	500	0,00273	0,00288	0,00281	0,00282	5,64E-05	2,00602
	750	0,00275	0,00287	0,00282	0,00283	4,54E-05	1,61029
	1000	0,00274	0,00289	0,00283	0,00284	5,52E-05	1,95188
	1250	0,00274	0,00288	0,00282	0,00283	5,25E-05	1,86304
	1500	0,00275	0,00288	0,00282	0,00283	4,93E-05	1,74802
	1750	0,00276	0,00289	0,00283	0,00284	4,87E-05	1,71866
	2000	0,00276	0,00288	0,00282	0,00283	4,44E-05	1,57304
	2250	0,00290	0,00604	0,00428	0,00408	1,16E-03	27,13798
	2500	0,00694	0,01392	0,01000	0,00956	2,58E-03	25,81334
	2750	0,01393	0,02165	0,01731	0,01683	2,85E-03	16,48339
	3000	0,02048	0,02654	0,02313	0,02276	5,01E-06	9,67714
	3250	0,02979	0,03319	0,03128	0,03107	1,58E-06	4,01916

Tab. 4.4 Hodnoty naměřené a vypočítané ke stanovení vnitřních rezistivity a polarizačních indexů

UP 343	t [s]	1	2	3	4	\bar{x}	Proud i_d [A]
	15	1,81E-11	1,63E-11	1,52E-11	1,01E-11	1,49E-11	
	60	6,19E-12	5,17E-12	4,57E-12	3,71E-12	4,91E-12	
	600	1,27E-12	9,61E-13	7,06E-13	1,24E-12	1,05E-12	
	3600	3,90E-13	2,63E-13	1,76E-13	9,04E-13	4,33E-13	
	h_s [mm]	1,047	1,185	1,230	2,075	1,384	Vypočítané hodnoty
	p_{i1} [-]	2,918	3,155	3,331	2,714	3,038	
	p_{i10} [-]	4,868	5,383	6,474	2,983	4,697	
	R_v [Ω]	1,28E+15	1,90E+15	2,84E+15	5,53E+14	1,15E+15	
	ρ_v [$\Omega \cdot m$]	2,81E+15	3,68E+15	5,28E+15	6,10E+14	1,91E+15	
UP 142	t [s]	1	2	3	4	\bar{x}	Proud i_d [A]
	15	2,71E-11	2,51E-11	3,60E-11	2,59E-11	2,85E-11	
	60	8,91E-12	1,07E-11	1,19E-11	8,68E-12	1,00E-11	
	600	1,83E-12	4,59E-12	2,37E-12	2,00E-12	2,70E-12	
	3600	8,38E-13	2,59E-12	1,03E-12	8,63E-13	1,33E-12	
	h_s [mm]	1,026	1,421	1,137	1,195	1,195	Vypočítané hodnoty
	p_{i1} [-]	3,043	2,355	3,035	2,988	2,846	
	p_{i10} [-]	4,865	2,321	5,006	4,333	3,715	
	R_v [Ω]	5,97E+14	1,93E+14	4,87E+14	5,79E+14	3,76E+14	
	ρ_v [$\Omega \cdot m$]	1,30E+15	3,72E+14	9,07E+14	6,39E+14	6,21E+14	
TSA 220 FM	t [s]	1	2	3	4	\bar{x}	Proud i_d [A]
	15	4,14E-12	4,22E-12	4,68E-12	4,16E-12	4,30E-12	
	60	1,34E-12	1,41E-12	1,57E-12	1,43E-12	1,44E-12	
	600	2,69E-13	2,52E-13	4,23E-13	3,20E-13	3,16E-13	
	3600	1,09E-13	1,09E-13	1,79E-13	1,42E-13	1,35E-13	
	h_s [mm]	1,281	1,272	1,130	1,348	1,258	Vypočítané hodnoty
	p_{i1} [-]	3,089	2,987	2,981	2,910	2,990	
	p_{i10} [-]	4,979	5,623	3,713	4,457	4,551	
	R_v [Ω]	4,60E+15	4,59E+15	2,79E+15	3,51E+15	3,71E+15	
	ρ_v [$\Omega \cdot m$]	1,00E+16	8,86E+15	5,19E+15	3,87E+15	6,13E+15	