

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Životnost dielektrických materiálů  
provozovaných při stejnosměrném napětí**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Vít KRATOCHVÍL</b>
Osobní číslo:	<b>E18N0007P</b>
Studijní program:	<b>N2612 Elektrotechnika a informatika</b>
Studijní obor:	<b>Komerční elektrotechnika</b>
Téma práce:	<b>Životnost dielektrických materiálů provozovaných při stejnosměrném napětí</b>
Zadávatel katedra:	<b>Katedra technologií a měření</b>

### Zásady pro vypracování

1. Popište dielektrické materiály a systémy používané ve vysokonapěťové technice
2. Popište metody diagnostiky těchto materiálů
3. Uvedte metody určování životnosti těchto materiálů provozovaných při střídavém a stejnosměrném napětí
4. Navrhněte a proveďte experiment zrychleného elektrického stárnutí vybraného dielektrického materiálu při střídavém a stejnosměrném napětí
5. Proveďte vyhodnocení experimentu



Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

1. Hauschild, W. High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer 2014
2. Kúchler, A.: High Voltage Engineering, Springer 2017
3. Bouda, V.: Materiály pro elektrotechniku, ČVUT 2000
4. Mentlík, V. a kol. Diagnostika elektrických zařízení, BEN 2008
5. Elektronické informační zdroje, Databáze Scencedirect, Wiley Interscience, leexplora

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Josef Pihera, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**

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



  
**Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

V návaznosti na mimořádné opatření Ministerstva zdravotnictví České republiky vydané v souvislosti s onemocněním COVID-19, týkajícího se mimo jiné zákazu osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy, která zahrnuje veškerou výuku (prováděnou např. formou přednášek, seminářů nebo konzultací), tak konání zkoušek pro studenty bakalářského a navazujícího magisterského studia, vedoucí Diplomové / Bakalářské práce, především s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období mimořádného opatření a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání mimořádného opatření, upravuje body zadání práce takto:

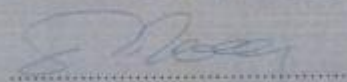
1. Popište dielektrické materiály a systémy používané ve vysokonapěťové technice se nemění
2. Popište metody diagnostiky těchto materiálů se nemění
3. Uveďte metody určování životnosti těchto materiálů provozovaných při střídavém a stejnosměrném napětí se nemění
4. Navrhněte a proveďte experiment zrychleného elektrického stárnutí vybraného dielektrického materiálu při střídavém a stejnosměrném napětí

se mění na

Navrhněte a proveďte experiment zrychleného elektrického stárnutí vybraného dielektrického materiálu při střídavém napětí

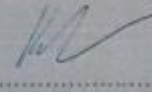
5. Proveďte vyhodnocení experimentu

V Plzni dne 23.4.2020

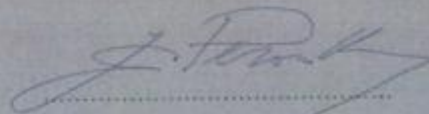


Vedoucí práce: Josef Pihera

Beru na vědomí a souhlasím v Plzni dne

21.4.2020 

Student: Vít Kratochvíl



prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické  
Západočeské univerzity v Plzni

## **Abstrakt**

Diplomová práce se věnuje problematice životnosti elektro izolačních materiálu. V první části jsou postupně představeny všechny důležité materiály používané ve vysokonapěťové technice, zejména jejich vlastnosti a použití. Další kapitolou jsou metody diagnostiky, které vyúsťují v metody určování životnosti pomocí statistických a matematických modelů. Hlavním bodem této práce je pak provedení experimentu zrychleného stárnutí, kde je cílem zjistit, jak se chová čistý LDPE oproti LDPE/HNT a jak se tyto materiály chovají při AC a DC stárnutí.

## **Klíčová slova**

Životnost, zrychlené stárnutí, LDPE, LDPE/HNT, izolační materiál

**Abstract**

The diploma thesis deals with the issue of lifetime of electrical insulating materials. The first parts present all important materials usable in high voltage technology, especially their properties and uses. In the next chapter there are diagnostic methods, which result in methods for determining the lifetime using statistical and mathematical models. The main point of this work is to perform an accelerated aging experiment, where the aim is to find out how pure LDPE behaves compared to LDPE / HNT and these materials behave during AC and DC aging.

**Key words**

Lifetime, accelerated aging, LDPE, LDPE/HNT, insulating material

## **Prohlášení**

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 19.6.2020

Vít Kratochvíl

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Josefovi Piherovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, trpělivost a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Petrovi Kadlecovi Ph.D. za cenné profesionální rady při provádění experimentu a v neposlední řadě své rodině za podporu při studiu.



# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>11</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>12</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>13</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>14</b>
<b>1 DIELEKTRIKUM</b> .....	<b>15</b>
1.1 RELATIVNÍ PERMITIVITA .....	15
1.2 ELEKTRICKÁ VODIVOST .....	17
1.3 ZTRÁTOVÝ ČINITEL .....	17
<b>2 PLYNNÉ IZOLANTY</b> .....	<b>19</b>
2.1 VZDUCH.....	19
2.2 FLUORID SÍROVÝ SF <sub>6</sub> .....	19
2.3 ALTERNATIVNÍ PLYNY.....	22
<b>3 KAPALNÉ IZOLANTY</b> .....	<b>23</b>
3.1 MINERÁLNÍ OLEJE .....	23
3.1.1 Získání minerálního oleje .....	25
3.1.2 Použití.....	25
3.2 SYNTETICKÉ KAPALINY .....	26
<b>4 PEVNÉ IZOLANTY</b> .....	<b>27</b>
4.1 ANORGANICKÉ PEVNÉ IZOLANTY .....	27
4.1.1 Keramika .....	27
4.1.2 Sklo .....	28
4.1.3 Slída.....	29
4.2 PLASTY .....	30
4.2.1 Polyethylen (PE).....	32
4.2.1 Polyvinylchlorid (PVC) .....	33
4.2.2 Polypropylen (PP).....	34
<b>5 DIAGNOSTICKÉ METODY</b> .....	<b>36</b>
5.1 NAPĚŤOVÉ ZKOUŠKY.....	37
5.1.1 Stejnosměrné a střídavé napětí.....	37
5.1.2 Atmosférické pulzní napětí.....	38
5.1.3 Zkouška elektrické pevnosti .....	39
<b>6 METODY URČOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI</b> .....	<b>40</b>
6.1 STATISTICKÉ MODELY STÁRNUTÍ .....	41
6.2 FYZIKÁLNÍ A MATEMATICKÉ MODELY STÁRNUTÍ .....	43
6.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTRICKÉ STÁRNUTÍ.....	48
<b>7 PLÁN EXPERIMENTU</b> .....	<b>50</b>
7.1 TESTOVANÉ VZORKY LDPE A LDPE/HNT .....	50
7.2 TESTOVANÉ PARAMETRY .....	51
7.3 POSTUP EXPERIMENTU .....	51
7.4 PŘEDPOKLÁDANÉ VÝSLEDKY .....	52

<b>8</b>	<b>VLASTNÍ EXPERIMENT .....</b>	<b>53</b>
8.1	ROZMĚRY A OZNAČENÍ VZORKŮ .....	53
8.2	ELEKTRICKÁ PEVNOST .....	54
8.3	DIELEKTRICKÁ SPEKTROSKOPIE .....	57
8.3.1	<i>Postup měření</i> .....	59
8.3.2	<i>Naměřená data</i> .....	60
8.4	MĚŘENÍ REZISTIVITY .....	64
8.4.1	<i>Postup měření</i> .....	65
8.5	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	67
8.5.1	<i>Stanovení životnosti při AC stárnutí</i> .....	69
8.5.2	<i>Stanovení životnosti pro DC stárnutí</i> .....	72
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>77</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>81</b>

## Seznam obrázků

OBR. 1.1: ORIENTAČNÍ HODNOTY ELEKTRICKÉ VODIVOSTI PRO VYBRANÉ MATERIÁLY [1].	17
OBR. 1.2: ZNÁZORNĚNÍ ÚHLU $\Delta$ V KOMPLEXNÍ ROVINĚ [1].	17
OBR. 2.1: MOLEKULA PLYNU SF <sub>6</sub> (PŘEVZATO Z: [2]).	19
OBR. 2.2: FÁZOVÝ DIAGRAM PLYNU SF <sub>6</sub> [1].	20
OBR. 2.3: POROVNÁNÍ DIELEKTRICKÉ SÍLY SMĚSI SF <sub>6</sub> A N <sub>2</sub> OPROTI ČISTÉMU PLYNU SF <sub>6</sub> [1].	20
OBR. 3.1: OLEJOVÝ TRANSFORMÁTOR [7].	24
OBR. 4.1: PROCES VÝROBY KERAMIKY [10].	27
OBR. 4.2: KERAMICKÝ IZOLÁTOR (PŘEVZATO Z [12]).	28
OBR. 4.3: SKLENĚNÝ IZOLÁTOR NA VENKOVNÍM VEDENÍ (PŘEVZATO Z [13]).	29
OBR. 4.4: VODNÍ STROMEČEK (PŘEVZATO Z [16]).	31
OBR. 4.5: ELEKTRICKÝ STROMEČEK (PŘEVZATO Z [18]).	32
OBR. 4.6: STRUKTURA PVC KABELU [30].	34
OBR. 5.1: ZNÁZORNĚNÍ ATMOSFÉRICKÉHO PULZU [40].	38
OBR. 6.1: ROZDĚLENÍ MODELŮ STÁRNUTÍ [43].	40
OBR. 6.2: TVARY WEIBULLOVA ROZDĚLENÍ V ZÁVISLOSTI NA A [45].	42
OBR. 6.3: TVARY WEIBULLOVA ROZDĚLENÍ V ZÁVISLOSTI NA B [45].	42
OBR. 6.4: ŽIVOTNOSTNÍ KŘIVKA DLE EXPONENCIÁLNÍ FUNKCE [45].	44
OBR. 6.5: ŽIVOTNOSTNÍ KŘIVKA DLE MOCNINNÉ FUNKCE [45].	44
OBR. 6.6: PRINCIP HLEDÁNÍ KONCOVÉHO BODU.	45
OBR. 6.7: NEPŘÍMÁ INTERAKCE.	46
OBR. 6.8: PŘÍMÁ INTERAKCE.	46
OBR. 6.9: CRINEŮV MODEL [43].	47
OBR. 6.10: POROVNÁNÍ AC A DC STÁRNUTÍ [47].	48
OBR. 6.11: POROVNÁNÍ 50 Hz A 10 kHz [48].	49
OBR. 7.1: PŘEDPOKLÁDANÝ PRŮBĚH ZÁVISLOSTI TESTOVANÉHO PARAMETRU NA DOBĚ PROVOZU.	52
OBR. 8.1: ZNÁZORNĚNÍ MĚŘENÝCH BODŮ NA VZORKU PŘI MĚŘENÍ DÍLČÍCH TLOUŠTĚK.	54
OBR. 8.2: ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ULOŽENÍ VZORKU V MĚŘICÍM PŘÍPRAVKU.	55
OBR. 8.3: ZMĚNA $\epsilon_p$ NA KONCI EXPERIMENTU OPROTI DODANÉMU STAVU.	57
OBR. 8.4: BDS NOVOCONTROL.	58
OBR. 8.5: USPOŘÁDÁNÍ MĚŘENÉHO KONDENZÁTORU.	59
OBR. 8.6: EPS' - LDPE.	60
OBR. 8.7: EPS' - LDPE/HNT.	60
OBR. 8.8: EPS'' - LDPE.	61
OBR. 8.9: EPS'' - LDPE/HNT.	61
OBR. 8.10: TG $\Delta$ - LDPE.	62
OBR. 8.11: TG $\Delta$ - LDPE/HNT.	62
OBR. 8.12: EPS'' PRO FREKVENCE BLÍZKÉ 50 Hz.	63
OBR. 8.13: EPS'' PRO FREKVENCE BLÍZKÉ 50 Hz.	63
OBR. 8.14: TG $\Delta$ PRO FREKVENCE BLÍZKÉ 50 Hz.	64
OBR. 8.15: SCHÉMA PRO MĚŘENÍ VNITŘNÍ A POVRCHOVÉ REZISTIVITY [52].	64
OBR. 8.16: $R_v$ V ZÁVISLOSTI NA ČASE STÁRNUTÍ.	67
OBR. 8.17: $R_v$ V ZÁVISLOSTI NA ČASE STÁRNUTÍ SE ZLINEARIZOVANÝM PRŮBĚHEM.	69
OBR. 8.18: $R_v$ V ZÁVISLOSTI NA ČASE STÁRNUTÍ SE ZLINEARIZOVANÝM PRŮBĚHEM.	70
OBR. 8.19: PRAVDĚPODOBNOST PORUCHY V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO RŮZNÉ HODNOTY AC NAPĚTÍ [41].	71
OBR. 8.20: PRAVDĚPODOBNOST PORUCHY V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ PŘI POKOJOVÉ TEPLOTĚ [41].	72
OBR. 8.21: PRAVDĚPODOBNOST PORUCHY V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ PŘI TEPLOTĚ 85 °C [41].	73
OBR. 8.22: PRAVDĚPODOBNOST PORUCHY V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ U NAVLHČENÉHO MATERIÁLU [41].	73
OBR. 8.23: PRAVDĚPODOBNOST PORUCHY V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO RŮZNÉ HODNOTY DC NAPĚTÍ [41].	74
OBR. 8.24: POROVNÁNÍ AC A DC STÁRNUTÍ [41].	75

## Seznam tabulek

TABULKA 2.1: VLASTNOSTI VYBRANÝCH ALTERNATIVNÍCH PLYNŮ [6].	22
TABULKA 3.1: VLASTNOSTI VYBRANÝCH DRUHŮ MINERÁLNÍCH OLEJŮ [3].	24
TABULKA 4.1: POROVNÁNÍ KLÍČOVÝCH PARAMETRŮ VYBRANÝCH MATERIÁLŮ [3].	30
TABULKA 4.2: ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI POLYETHYLENU [22, 26].	33
TABULKA 7.1: SHRnutí PLÁNU EXPERIMENTU PRO AC STÁRNUTÍ.	51
TABULKA 7.2: POČTY KUSŮ VZORKŮ.	52
TABULKA 8.1: ZNAČENÍ VZORKŮ.	53
TABULKA 8.2: PŘÍKLADY NAMĚŘENÝCH A VYPOČÍTANÝCH TLOUŠŤEK VZORKŮ.	54
TABULKA 8.3: EP PRO VZORKY LDPE U DODANÉHO STAVU.	55
TABULKA 8.4: EP PRO VZORKY LDPE/HNT U DODANÉHO STAVU.	56
TABULKA 8.5: EP PRO VZORKY LDPE PO 500H STÁRNUTÍ.	56
TABULKA 8.6: EP PRO VZORKY LDPE/HNT PO 500H STÁRNUTÍ.	56
TABULKA 8.7: UKÁZKA VÝPOČTU PRO KONKRÉTNÍ VZOREK.	66
TABULKA 8.8: DOBY DO DOSAŽENÍ KONCOVÉHO BODU PRO RŮZNÉ KONCOVÉ BODY $R_v$ .	70
TABULKA 8.9: PŘEPOČET STÁRNOUCÍHO NAPĚTÍ 1,5 kV NA ELEKTRICKOU INTENZITU $E$ .	71

## Seznam symbolů a zkratk

HVDC.....	<i>High voltage direct current</i> – stejnosměrné vedení vysokého napětí
HVAC.....	<i>High voltage alternating current</i> – střídané vedení vysokého napětí
LDPE.....	<i>Low density polyethylen</i> – nízkohustotní polyethylen
HNT.....	<i>Hal nanotubes</i> – Halovy nanotrubic
$\epsilon_r$ .....	relativní permitivita [-]
$\epsilon_0$ .....	absolutní permitivita [F/m]
C.....	kapacita kondenzátoru [F]
$C_0$ .....	kapacita kondenzátoru bez dielektrika [F]
E.....	intenzita elektrického pole [V/m]
$\alpha_e$ .....	elektronová polarizace
$\alpha_i$ .....	iontová polarizace
$\alpha_d$ .....	dipólová polarizace
R.....	poloměr atomu [m]
Q.....	elektrický náboj [C]
$\omega_0$ .....	frekvence vlastních kmitů [Hz]
m.....	hmotnost [kg]
$p_i$ .....	dipólový moment
T.....	teplota [K]
$\gamma$ .....	elektrická vodivost [S/m]
$\text{tg } \delta$ .....	ztrátový činitel [-]
$I_\delta$ .....	fázový proud [A]
$I_c$ .....	kapacitní proud [A]
U.....	elektrické napětí [V]
$P_\delta$ .....	činný výkon způsobený $I_\delta$ [W]
$Q_c$ .....	jalový výkon způsobený $I_c$ [VAr]
BDS.....	<i>Broadband dielectric spectroscopy</i> – širokopásmová dielektrická spektroskopie

## Úvod

Se stále se rozvíjejícím průmyslem roste i poptávka po elektrické energii. Moderní trendy a legislativa vyspělých států EU se snaží upřednostňovat energii získanou z obnovitelných zdrojů. Jedním z nejvíce preferovaných obnovitelných zdrojů jsou větrné elektrárny. Ty se však nachází daleko od místa spotřeby. Například v Severním moři startují rozsáhlé projekty na výstavbu větrných mlýnů přímo na mořské hladině. V těchto případech je nutné použít dlouhá kabelová vedení vedená pod mořským dnem. Pro přenos na tyto vzdálenosti, tisíce kilometrů dlouhé, je výhodnější použít mezi generátorem a spotřebičem HVDC koridor. Při použití HVAC na tak dlouhé vzdálenosti by vznikaly obrovské ztráty, zejména kvůli svodu. Proto je použit HVDC přenos, který má svodové ztráty podstatně menší. Dále potlačuje ztráty způsobené skinefektom a není potřeba kompenzátorů na potlačení jalové energie.

Je proto nutné získat poznatky o tom, jak se chovají materiály při aplikaci v HVDC, zda jsou jejich parametry různé od běžné střídavé distribuční sítě a zda je vhodné je v HVDC síti použít. Jedním z klíčových parametrů elektrické izolace je životnost. Životnost je nutné vypočítat tak, aby se předešlo případné poruše materiálu a tím i celého systému. Zároveň musí být životnost stanovena na dostatečně dlouhou dobu, aby se izolační systém nemusel neustále revidovat a měnit, a předejít tak ekonomickým ztrátám.

Úkolem této práce je popsat materiály používané ve vysokonapěťové technice a uvést metody jejich diagnostiky, zejména určování životnosti. Hlavním cílem je pak provést experiment zrychleného AC a DC elektrického stárnutí, na materiálu LDPE a LDPE/HNT a zjistit, zda příměs 3 % HNT ovlivňuje životnost čistého LDPE. Dále zanalyzovat výsledky při AC a DC stárnutí a určit, zda je vhodné LDPE, resp. LDPE/HNT použít v provozu při DC napětí.

# 1 Dielektrikum

Dielektrikum je látka, pro kterou je charakteristická vlastnost polarizovat se v elektrickém poli. Podmnožinou dielektrik jsou izolanty, což jsou látky, které neobsahují žádné volné nosiče náboje. Tato představa slouží pouze pro teoretické úvahy, neboť v praxi i nejlepší izolanty obsahují určité množství volných nosičů nábojů. Hlavním úkolem izolantu je izolovat dvě místa s různým elektrickým potenciálem, a zabránit tak protečení proudu mezi nimi. Taková zařízení plní v obvodech pasivní roli. Lze říci, že izolanty jsou dielektrika s velmi malou vodivostí neboli s velkou rezistivitou. U dielektrických materiálů se využívá jejich schopnost polarizovat se zejména při konstrukci kondenzátorů, paměťových prvků, měničů energie, atd. Takto aplikovaná dielektrika jsou na rozdíl od izolantů považována za aktivní prvky.

## 1.1 Relativní permitivita

Mezi nejdůležitější parametry dielektrik patří bezrozměrná veličina nazývaná relativní permitivita označovaná jako  $\epsilon_r$ . Definovat ji lze z následujícího vztahu:

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (1.1)$$

$C$  je kapacita kondenzátoru s určitým dielektrikem v poměru s  $C_0$ , což značí kapacitu kondenzátoru se stejnými rozměry bez dielektrika. [3]

Permitivita vyjadřuje měřítko polarizovatelnosti dielektrik. Dielektrický materiál obsahuje, stejně jako všechny ostatní látky, kladné a záporné náboje. Během působení vnějšího elektrického pole (statického i dynamického) dochází k posunu elektricky nabitých částic. Tyto částice se orientují ve směru působící Lorentzovy síly (kladné náboje) nebo proti směru působícího elektrického pole  $E$  (záporné náboje). Tomuto pohybu se snaží zabránit vazební síly a tepelný pohyb okolních molekul. Tato interakce mezi polem a prostředím se nazývá právě polarizace dielektrika. [1]

Rozlišuje se několik druhů polarizací. Prvním druhem je elektronová polarizace, která je způsobena posunutím elektronového obalu atomů vzhledem k jejich jádru.

$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 R^3 \quad (1.2)$$

Po zjednodušeném výpočtu polarizovatelnosti je zřejmé, že její elektronová polarizace je konstantní a je úměrná velikosti atomu. Příspěvek této polarizace k celkové polarizaci je vzhledem k ostatním druhům poměrně malý. [3]

Dalším druhem je pružná iontová polarizace, která je způsobena vychýlením iontů o velikosti náboje  $Q$  a hmotnosti  $m$  ze své rovnovážné polohy. Působením vnějšího elektrického pole  $E$  dojde k posunu iontů z jejich rovnovážné polohy v krystalické mřížce, čímž vznikne dipólový moment. Zároveň s dipólovým momentem vzniká jako protichod vratná direktivní síla. Nová rovnovážná poloha pak nastává při rovnosti těchto sil. Zjednodušený výpočet iontové polarizovatelnosti je uveden ve vztahu (1.3);

$$\alpha_i = \frac{Q^2}{\omega_0^2 \cdot m} \quad (1.3)$$

z čehož vyplývá, že iontová polarizovatelnost je úměrná velikosti náboje iontů a nepřímo úměrná jejich hmotnosti a frekvenci vlastních kmitů. [3]

Dipólová polarizace, jako další z typů polarizací, je naopak nepružná a je způsobena vazbovými silami mezi jednotlivými atomy. Posunutí náboje je delší než u pružné polarizace, ovšem není závislá na elektrickém poli, ale na struktuře samotné látky. Jelikož posun či orientace nábojů je způsobena změnou teploty, je tato polarizovatelnost silně závislá právě na teplotě. Zjednodušeným vztahem (1.4) lze zjistit, že dipólová polarizace je přímo úměrná kvadrátu dipólovému momentu  $p_i$  a nepřímo úměrná teplotě. [3]

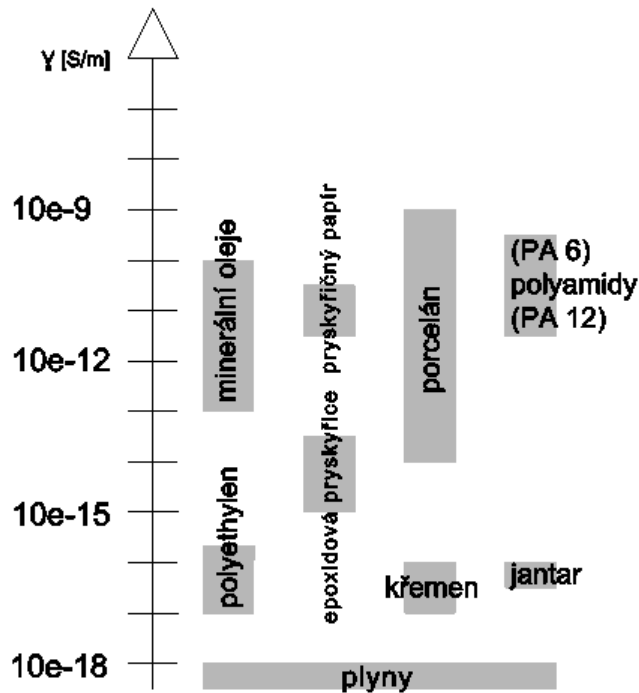
$$\alpha_d = \frac{p_i^2}{3kT} \quad (1.4)$$

Všechny tyto polarizace nenastanou okamžitě. Z tohoto důvodu je zavedena tzv. relaxační doba, což je doba, kdy dojde k ustálení polarizace po zapnutí či vypnutí vnějšího elektrického pole. Největší relaxační doba nastává u polarizace, kde jsou ionty posunuty o nejdelší vzdálenosti, tedy u dipólové polarizace, a to řádově od  $10^{-5}$  s. Ostatní polarizace se pohybují s relaxační dobou řádově  $10^{-15}$ – $10^{-12}$  s. [3]



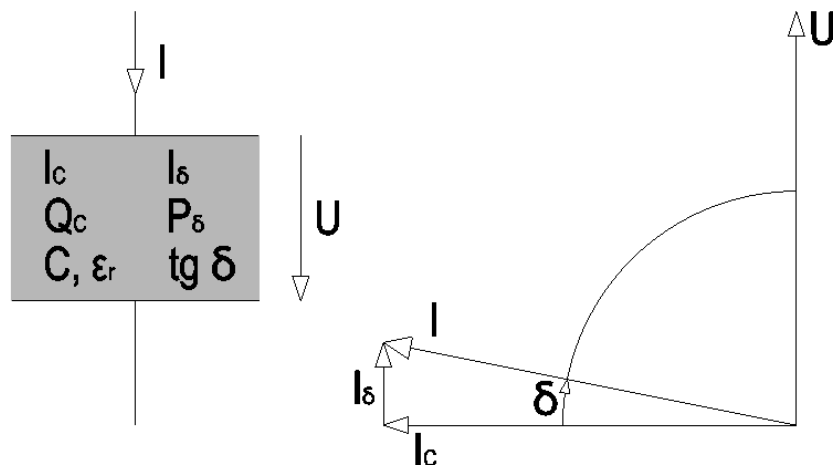
## 1.2 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost  $\gamma$  je veličina spojená s pohybem elektrického náboje, tedy charakterizuje schopnost vést elektrický proud. U izolačních materiálů jsou požadovány co nejmenší hodnoty elektrické vodivosti, které se pohybují od  $10^{-9}$  do  $10^{-18}$ , jak je ukázáno na Obr. 1.1.



Obr. 1.1: Orientační hodnoty elektrické vodivosti pro vybrané materiály [1].

## 1.3 Ztrátový činitel



Obr. 1.2: Znárodnění úhlu  $\delta$  v komplexní rovině [1].

V dielektriku provozovaném při střídavém napětí předbíhá proud před napětím o  $90^\circ$ . Kvůli polarizačním ztrátám a ztrátám vodivosti se ideální úhel  $90^\circ$  zmenší. Celkový proud

je složen ze složek  $I_\delta$  (fázový proud) a  $I_c$  (kapacitní proud). Proud  $I_\delta$  je ve fázi s napětím  $U$  a způsobuje rozptyl energie v dielektriku. Jinými slovy součin proudu  $I_\delta$  a  $U$  tvoří ztráty  $P_\delta$ .

$$P_\delta = U \cdot I_\delta \quad (1.5)$$

Kapacitní složka proudu  $I_c$  vytváří s napětím  $U$  jalový výkon  $Q_c$ .

$$Q_c = U \cdot I_c \quad (1.6)$$

Ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta$  lze tedy vypočítat dle následujících vztahů

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_\delta}{I_c} \quad (1.7)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_\delta}{Q_c} \quad (1.8)$$

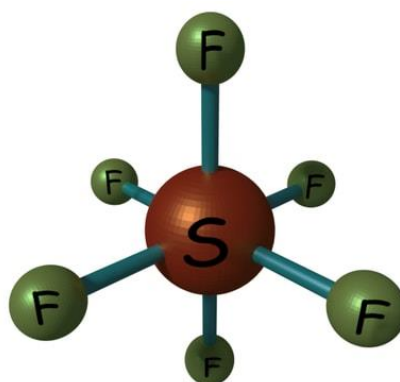
## 2 Plynné izolanty

Plynné látky se jako izolační média používají hlavně pro jejich schopnost ideálně vyplnit prostor. Ovšem u plynů obecně platí, že jejich dielektrické vlastnosti nejsou v porovnání s kapalnými izolanty tak dobré. Výjimku v tomto ohledu tvoří plyn SF<sub>6</sub>. Výhodou plynů je jejich schopnost se bezprostředně po přeskoku zotavit a plnit tak znovu izolační úlohu. Další výhodou je, že se při stárnutí nezhoršují jejich parametry. Mezi jejich parametry obecně patří relativní permitivita blízká jedné a téměř nulové dielektrické ztráty.

### 2.1 Vzduch

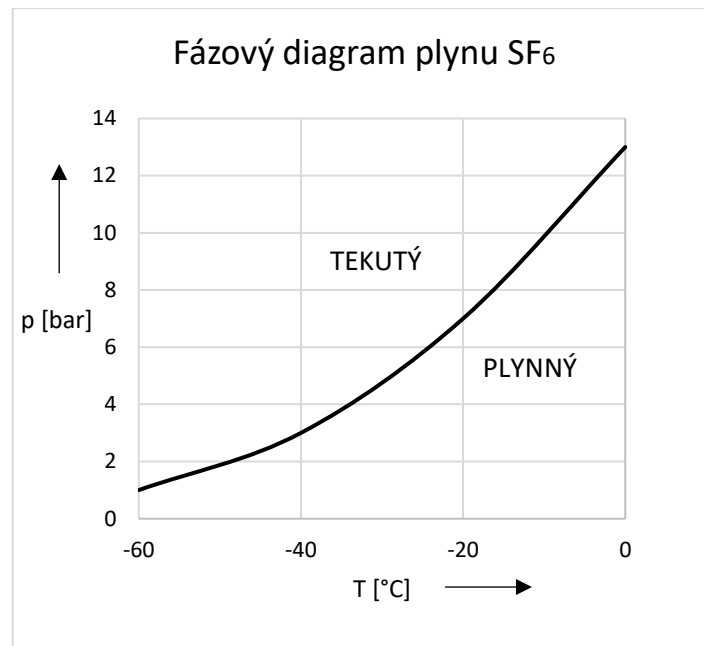
Vzduch je nejrozšířenější izolant na Zemi. Jako přírodní médium nepotřebuje žádné speciální úpravy pro jeho zpracování. Při jeho aplikaci je důležité brát zřetel na jeho dielektrické vlastnosti, které se se změnou teploty a tlaku mění. Vzduch také může negativně ovlivňovat okolní materiály a zařízení. Je rovněž náchylný na vlhkost, což může být problém zejména při venkovní aplikaci, kdy se během deště vzduch může snadno stát vodivým. V praxi se využívá hlavně stlačený vzduch.

### 2.2 Fluorid sírový SF<sub>6</sub>

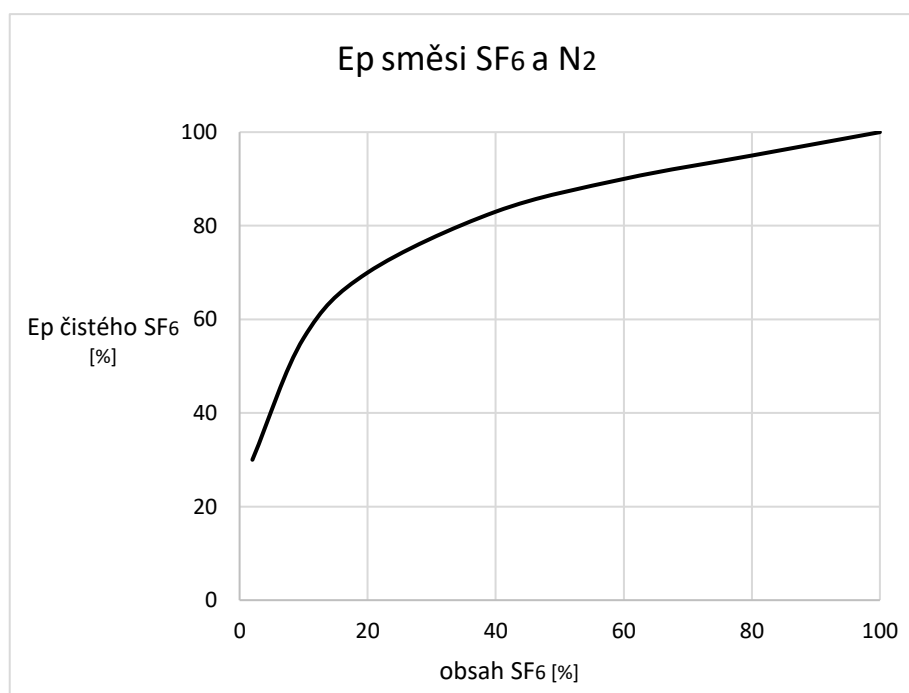


Obr. 2.1: Molekula plynu SF<sub>6</sub> (převzato z: [2]).

Plyn SF<sub>6</sub> je ve vysokonapěťové technice nejpoužívanější plynný izolant. Jeho elektrická pevnost je přibližně 3x vyšší než u vzduchu. Při natlakovaném plynu SF<sub>6</sub> to může být až desetinásobek. Na Obr. 2.2 je znázorněn fázový diagram plynu SF<sub>6</sub>, který ukazuje na změnu jeho skupenství v závislosti na teplotě a tlaku. [1]

Obr. 2.2: Fázový diagram plynu SF<sub>6</sub> [1].

Problém s přeměnou do tekutého stavu může nastávat při aplikacích v klimaticky chladných oblastech. Například při -30 °C plyn kondenzuje při tlaku 5 barů. Aby nedocházelo ke kondenzaci, přidává se k plynu SF<sub>6</sub> navíc dusík N<sub>2</sub>, díky němuž se sníží tlak a tím teplota pro kondenzaci. Elektrická pevnost však zůstává stále vysoká i s větším obsahem plynu N<sub>2</sub>. Na Obr. 2.3 je zobrazena účinnost plynu SF<sub>6</sub> s N<sub>2</sub> při různém obsahu plynu SF<sub>6</sub>. [1]

Obr. 2.3: Porovnání dielektrické síly směsi SF<sub>6</sub> a N<sub>2</sub> oproti čistému plynu SF<sub>6</sub> [1].

Z grafu je vidět, že i směs s obsahem 20 % SF<sub>6</sub> dosahuje 70% dielektrické síly jako samotný plyn SF<sub>6</sub>.

Další výhoda plynu SF<sub>6</sub> je jeho chemická stálost při běžných klimatických podmínkách a navíc není toxický. V případě přeskočení se zasažené molekuly SF<sub>6</sub> rozloží a následně ihned rekombinují do své původní formy, což znemožňuje vytváření nežádoucích uhlovodíků a následných usazenin. Ovšem v případě přeskočení či elektrického oblouku se mohou zbytky vlhkosti nebo kyslíku zformovat do toxických částic. Tyto částice lze rozeznat lidským okem jako bílý prášek, který navíc silně zapáchá. Kontakt či dokonce vdechnutí těchto částic může být pro člověka životu nebezpečné. [3]

V plynem izolovaných rozvodnách jsou nádrže s plynem SF<sub>6</sub> hermeticky zapečetěné, aby nedošlo ke kontaktu s okolním prostředím. Možný únik plynu SF<sub>6</sub> se udává jako maximálně 1 % z celkového objemu za rok. Celkový objem plynu SF<sub>6</sub> je tedy ještě rozdělen do menších nádrží, aby se tento únik zcela eliminoval. Pro účely údržby se plyn SF<sub>6</sub> přečerpá do rezervní nádrže a je zde po vysušení a filtraci připraven pro doplnění. [4]

Elektrická pevnost SF<sub>6</sub> je silně závislá na přítomnosti nežádoucích částic a nečistot. Pro eliminaci množství nežádoucích částic se používají částicové zachytávače, což jsou prostory s nízkou intenzitou elektrického pole, kde se částice usazují. Další variantou je použití izolačního povlaku na vnějších elektrodách, který brání nabíjení částic. [4]

Jedinou velkou nevýhodou tohoto plynu je tedy jeho negativní vliv na životní prostředí. Jeho dopad na ozonovou vrstvu je dle [5] 22 000krát silnější než u oxidu uhličitého. Přestože se plyn SF<sub>6</sub> používá v relativně malém množství, stále musí existovat technika pro jeho detekci a omezení úniku do atmosféry. Z těchto důvodů vzniká v oblasti vysokého napětí snaha plyn SF<sub>6</sub> postupně nahrazovat vakuovou technikou. V oblasti velmi vysokého napětí však plyn SF<sub>6</sub> stále nebyl adekvátně nahrazen.

## 2.3 Alternativní plyny

Všechny následující plyny se používají nebo se možná v budoucnu budou používat místo plynu SF<sub>6</sub> popsáným níže. Ovšem ne díky lepším elektrickým parametrům, ale čistě z ekologického hlediska. Mezi tyto plyny patří tzv. syntetický vzduch, technický dusík N<sub>2</sub> a oxid uhličitý CO<sub>2</sub>. Tyto plyny, pokud jsou natlakované, vykazují některé stejné vlastnosti jako plyn SF<sub>6</sub>. Například chemickou stabilitu, nehořlavost, nízkou teplotu varu a netoxičnost. Jejich nedostačující elektrické vlastnosti je nutné kompenzovat vysokým tlakem či delší izolační vzdáleností. [1]

Z výše zmíněných plynů má největší výhody syntetický vzduch. Je to látka velice blízká atmosférickému vzduchu, tudíž její únik do ovzduší nezpůsobuje žádné nebezpečí, na rozdíl od oxidu uhličitého. V porovnání s technickým dusíkem má větší dielektrickou sílu. [1]

Existují i plyny, které mají podobnou, ba dokonce i lepší dielektrickou sílu než plyn SF<sub>6</sub>. Takové plyny jsou na bázi chlorovaných a fluorovaných uhlovodíků. Jejich použití je však omezeno či zakázáno, jelikož většina těchto plynů je toxická. Ovšem existuje několik sloučenin, které se dají použít, jako například fluoronitrily a fluoroketony, jejichž elektrická pevnost je vyšší než u SF<sub>6</sub>. Tyto plyny se používají zejména jako chladicí média kvůli jejich nižšímu riziku k ohrožení životního prostředí. [1]

Tabulka 2.1: Vlastnosti vybraných alternativních plynů [6].

izolační plyn	SF <sub>6</sub>	Fluoro keton C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O	Trifluorjod -methan CF <sub>3</sub> I	Hydrofluoro -olefin HFO1234zeE	Hydrochloro- fluoroolefin HCFO1233zd	Fluoro nitril C <sub>4</sub> F <sub>7</sub> N
bod varu [°C]	-64	+26,5	-22,5	-19	+18,3	-4,7
GWP (CO <sub>2</sub> :1)	22 800	1	0,4	6	7	2100
E <sub>p</sub> při -15 °C	100 %	85 % SF <sub>6</sub>	120 % SF <sub>6</sub>	100 % SF <sub>6</sub>	90 % SF <sub>6</sub>	120 % SF <sub>6</sub>

\* GWP – global warming potential – potenciál způsobení globálního oteplování v porovnání s oxidem uhličitým

### 3 KapalnÉ izolanty

Hlavní úlohou kapalných izolantů je impregnace povrchů v kombinaci s pevnou látkou s co největší dielektrickou silou. Na rozdíl od plynů kapaliny disponují vyšší dielektrickou silou i při nižším tlaku než provozním. Mají také vyšší permitivitu než plyny. Kromě izolačního média se kapaliny používají též pro chladicí média. Rozdělují se na minerální oleje a syntetické kapaliny.

#### 3.1 Minerální oleje

Minerální oleje jsou v dnešní době nejvíce používaná kapalná dielektrika. Tyto oleje se vyrábí z ropy. Jelikož samotná ropa obsahuje mnoho nežádoucích sloučenin a dalších nečistot, je nutné tyto nežádoucí složky při výrobě oleje odstranit.

Klíčovým faktorem u minerálního oleje je jeho čistota. Nežádoucí látky, jako je například voda, zhoršují elektrické parametry. Přítomnost vody v oleji snižuje jeho resistivitu a elektrickou pevnost. Dalším důležitým parametrem je viskozita oleje. Především u chlazení transformátorů, kde je vyžadována nízká viskozita z důvodu snadného proudění izolačního média. Navíc se viskozita s klesající teplotou ještě zvyšuje. Může dojít ke zhoršení cirkulace v chladicím médiu, což vede ke špatnému odvodu tepla ze zařízení a jeho následnému přehřátí. [7]

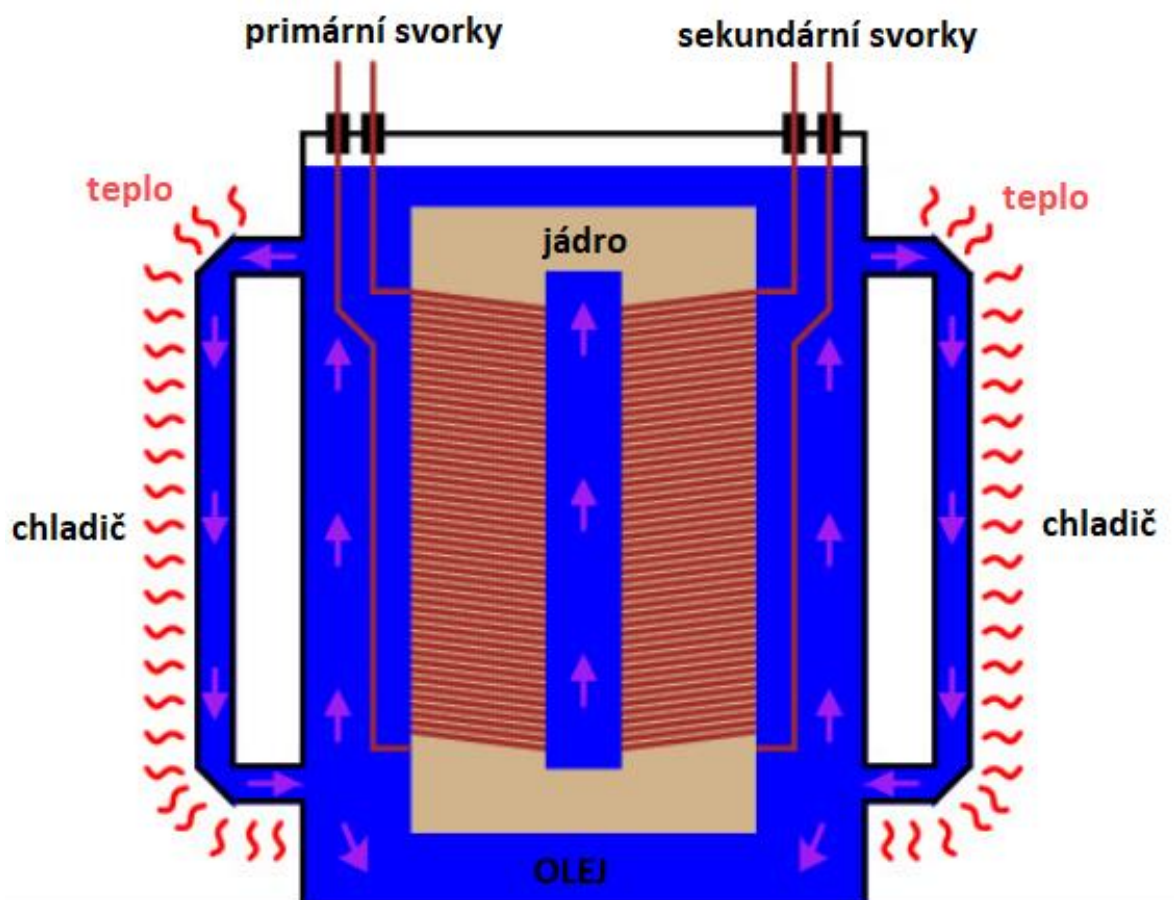
Dále se u olejů uvádí teplota vzplanutí. Teplota vzplanutí je stanovena jako nejnižší teplota, při které se za přesně definovaných podmínek utváří nad hladinou kapaliny taková směsice vzduchu a vypařeného oleje, že po přiblížení plamene dojde k jejich vzplanutí a následnému rychlému uhasnutí. Tento parametr je důležitý především z hlediska požární bezpečnosti. Opačným případem jsou nízké teploty, kdy se u kapalin zvyšuje viskozita a snižuje se jejich chladicí schopnost. Teplota, při které dochází k přechodu do pevného skupenství, se nazývá bod tuhnutí. Tato přeměna skupenství je závislá na chemickém složení a čistotě měřeného oleje. Bod tuhnutí hraje klíčovou roli při spouštění a provozu transformátorů při teplotách hluboko pod bodem mrazu. Jelikož chladicí médium necirkuluje, může snadno dojít k přehřátí transformátoru. [7]

Jelikož je olej v transformátoru zatěžován několika vnějšími vlivy a časem se jeho parametry zhoršují, je třeba ho testovat a zjistit, zda stále vyhovuje platným normám.

Periodicita zkoušek olejů je stanovována podle potřeby v rozsahu jednoho roku až pěti let, individuálně na základě jejich objektivně zjištěného stavu. [7]

Tabulka 3.1: Vlastnosti vybraných druhů minerálních olejů [3].

druh oleje	teplota tuhnutí [°C]	teplota vzplanutí [°C]	$\epsilon_r$ [-]	$\text{tg } \delta$ [-]	$E_p$ [kV/cm]
transformátorový BTA	$\leq -45$	$< 130$	2,1–2,4	$\leq 0,015$	$> 92-200$
transformátorový BTS	-40	135	2,1–2,4	0,015	$> 92-200$
kondenzátorový	$\leq -40$	$> 130$	2,1–2,25	$< 0,0012$	$> 200$
metylsiloxanový		$> 180$	2,3–2,8	0,001	$> 20$



Obr. 3.1: Olejový transformátor [7].



### 3.1.1 Získání minerálního oleje

Proces, při kterém z ropy odstraňujeme nežádoucí složky, se nazývá rafinace. Rafinaci je možné provádět pomocí kyseliny sírové nebo pomocí rozpouštědel (tzv. rozpouštědlová rafinace). Rafinace kyselinou sírovou se provádí tak, že se k ropné složce přidá kyselina. Kyselina je poté neutralizována louhem a promyta vodou. Nevýhoda této metody je, že zatěžuje životní prostředí, a proto se příliš nepoužívá. Častější metoda je tedy rozpouštědlová rafinace, kdy se do ropy přidá rozpouštědlo a nežádoucí složky se rozpustí. Rozpouštědlo se poté z ropy odfiltruje. Získáme tedy ropný roztok, který je ale třeba dále upravit. [8]

Následuje proces absorpčního čištění (absorpční rafinace). Proces spočívá v tom, že se do ropného roztoku přidá absorpční složka. Díky této složce se na povrchu roztoku začnou zhušťovat asfalty, pryskyřice, kyslíkaté a dusíkaté sloučeniny. Zpravidla se napřed produkt předrafinuje kyselinou sírovou a poté se dorafinuje odbarvením. Což znamená, že necháme ropný produkt volně protékat filtrem, který je vyplněn odbarvovacím prostředkem, nebo se zahřeje za přídavku odbarvovací hlínky a pak se odfiltruje. Odbarvovací hlínky se regenerují vypálením, při němž zadržené nečistoty shoří. [8]

Nakonec je nutné z ropy odstranit parafíny. V dnešní době se provádí odparafinování pomocí rozpouštědel. Proces spočívá v tom, že se parafinový olej za tepla rozpustí v takovém rozpouštědle, aby ze vzniklého roztoku ochlazením vykristaloval parafín a olej zůstal rozpuštěn. Získaný roztok se v chladicí nádrži ochladí a vyloučené krystalky parafínu se oddělí ve vakuovém filtru od roztoku oleje v rozpouštědle. [8]

### 3.1.2 Použití

Minerální olej se tedy používá jako chladicí médium v transformátorech. Mimo transformátorů se používá například pro kabelové oleje. Zde jsou kladeny dva různé požadavky. Olej pro izolace kabelů do 35 kV musí mít co nejvyšší viskozitu, aby nestékal do nejnižších míst kabelu. Není zde potřeba přenosu tepla, jde pouze o izolaci. Do druhé skupiny patří oleje pro kabely od 35 kV. Zde se používá olej s co nejnížší viskozitou, aby mohl kolem kabelu proudit. Vedení se hodně zahřívá, proto je nutná cirkulace. Elektrické vlastnosti musí být rovněž velmi dobré, jelikož takto vysoké napětí má daleko větší tendenci k elektrickému přeskoku. Na olej ovšem nepůsobí žádné vnější sloučeniny, jelikož je

natlakován v uzavřeném prostoru. Není tedy vystaven takovému opotřebení jako u transformátorů. [9]

Stejný olej jako u kabelů do 35 kV se používá pro kondenzátory, tedy olej s vysokou viskozitou, aby nedocházelo k jeho stékání.

Dále se používá v olejových stykačích, kde jsou k uhašení výboje, který vzniká při rozpojení kontaktu. Při rozpojení kontaktu dojde k obrovskému lokálnímu zvýšení teploty v okolí výboje, to způsobí velkou produkci plynů. Plyny rozvíří olej a ten ochladí místo výboje a kontakt. Jako produkt vznikají uhlíkové saze, které jsou vodivé. Proto je žádoucí, aby byla tvorba sazí co nejmenší a aby oleje vydržely vysokou teplotu v okolí výboje. Olej také nesmí tuhnout ani v nejnižších teplotách.

### 3.2 Syntetické kapaliny

Výhodou syntetických kapalin oproti minerálním olejům jsou jejich chemické vlastnosti. Navíc jsou nehořlavé a nestárnou. Syntetické kapaliny lze rozdělit do dvou skupin. Jednu skupinu tvoří tzv. chlorované difenyly, například pentachlorbifenyl. Tato kapalina se vyznačuje zejména nízkými dielektrickými ztrátami při nižších teplotách, než je pokojová teplota. Do druhé skupiny lze zařadit fluorované uhlovodíky. Důvod jejich sporadického využití, oproti olejům, je jejich vysoká cena. Navíc k jejich použití brání i ekologické aspekty, například použití chlorovaných difenylů je v současnosti zakázáno. Taktéž fluorované uhlovodíky uvolňují při výbojích plyny, které jsou ekologicky závadné. [3]

Jedinou možnou alternativou jsou tak tzv. polybuteny, které mají vysokou stabilitu i při teplotách nad 100 °C. Jejich užití je možné pro náplň nebo impregnace do kabelů, svítkových kondenzátorů atd. [3]

## 4 Pevné izolanty

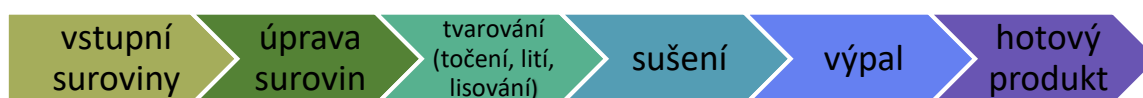
### 4.1 Anorganické pevné izolanty

Do této skupiny izolantů patří keramika, sklo a slída. Pro tuto skupinu materiálů je charakteristická vysoká teplotní odolnost, odolnost vůči chemickým a povětrnostním vlivům a vůči zatěžování částečnými výboji. Navíc oproti plastům mají poměrně vysokou tepelnou vodivost a některé z nich jsou mechanicky pevné.

#### 4.1.1 Keramika

Keramické výrobky provázejí člověka od doby počátečního rozvoje jeho tvůrčích schopností, proto patří k nejstarším oborům lidské činnosti.

Keramika je jedním z nejdůležitějších materiálů používaných v elektrotechnice. Je zastoupena velkým množstvím typů podle složení a vlastností od izolačních hmot až po speciální dielektrika. Obecně ji lze definovat jako anorganickou nekovovou látku s heterogenní polykrystalickou strukturou připravenou slinováním. Keramika se dle použití rozděluje na hrubou a jemnou, přičemž hrubá se používá zejména ve stavebnictví, jemná keramika pak jako keramika technická. Výroba keramiky dle [10] zahrnuje následující procesy.



Obr. 4.1: Proces výroby keramiky [10].

Energeticky a technologicky náročný proces je sušení. Spotřebuje se zde až 30 % z celkové energie potřebné ke zhotovení výrobku. Během sušení se působením tepla postupně snižuje obsah vody v materiálu bez změny chemického složení. Je nutné zajistit, aby během sušení nedošlo ke vzniku deformací či trhlin. Následuje proces výpalu, kde se vynaloží až 50 % (nejvíce ze všech) z celkové energie. Během výpalu získává keramika své konečné vlastnosti. Dochází ke ztrátě hmotnosti vypalovaného výrobku, a to v důsledku ztráty vody žíháním, vyhořívání organických látek a termického rozkladu některých sloučenin. Při výpalu dochází rovněž ke smrštění vypalovaného tělesa, délkové změny jsou však celkově menší než při sušení.

Mezi klíčové parametry keramiky patří její vysoká mechanická pevnost, která je ovšem ovlivněna fyzickými vadami způsobenými při výrobě. Skutečná pevnost je tak vždy nižší, než je uvedená hodnota, protože mechanické napětí se koncentruje právě v trhlinách materiálu a tím se pevnost snižuje. Další předností jsou tepelné vlastnosti, zejména tepelná odolnost. Některé druhy keramiky na bázi uhlíku mají bod tavení okolo 2000 °C. [11]

Ve vysokonapěťové technice se keramika používá na výrobu izolátorů. V této aplikaci je potřeba od sebe elektricky oddělit dvě místa s různým potenciálem, aniž by došlo k vodivému propojení. Čím vyšší napětí je mezi izolovanými částmi, tím musí být izolátor delší, aby nedošlo k přeskoku po jeho povrchu, zvláště například za hustého deště nebo sněžení. Z tohoto důvodu mají izolátory tvar stříšek, který prodlužuje povrchovou dráhu proudu a brání stékající vodě vytvářet souvislou vodivou vrstvu. Dále se keramika užívá při konstrukci přístrojových transformátorů, odpojovačů, odpínačů, zemničů a pojistek. [11]

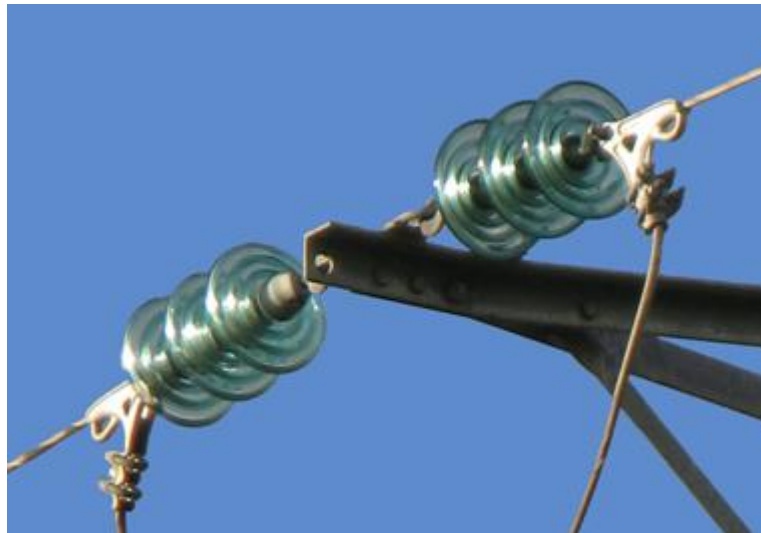


Obr. 4.2: Keramický izolátor (převzato z [12]).

#### 4.1.2 Sklo

Sklo může být, vzhledem k vysoké odolnosti vůči prudkým změnám tepla a žáruvzdornosti (až do 1150 °C), použito místo keramiky pro menší izolátory. Další předností je snadná detekce poškození či trhlin díky průhlednosti skla. Avšak disponuje nižší mechanickou pevností než keramika. Proto se sklo používá spíše ve formě vláken, která jsou pak aplikována v kompozitech společně s plasty. Vhodnou povrchovou úpravou (obvykle pryskyřicí) se zajistí spolehlivé spojení skleněného vlákna a polymeru. V závislosti na složení skla se liší i hodnota relativní permitivity. Nejnižší permitivitu má čistě křemenné sklo a to  $\epsilon_r = 3,7$ , naopak olovnatá skla dosahují až na hodnotu  $\epsilon_r = 16$ . Elektrická pevnost

nabývá hodnot v rozmezí 200-500 kV/mm. Jelikož má sklo poměrně malou povrchovou rezistivitu, v důsledku které dochází na povrchu materiálu k výbojům, je hodnota elektrické pevnosti vždy nižší. Rezistivita skla, která s teplotou klesá, může při pokojové teplotě dosahovat až na hodnoty  $10^{18} \Omega \cdot m$ . [1, 3]



Obr. 4.3: Skleněný izolátor na venkovním vedení (převzato z [13]).

#### 4.1.3 Slída

Slída je přírodní materiál, který je vhodný převážně k aplikaci ve vysokonapěťové technice (draselná slída). Díky její krystalické struktuře se dá rozdělit na velmi tenké plátky a vytvářet z ní rozsáhlejší systémy izolace s pojivy (epoxidová, křemíková pryskyřice a smalt).

Čistá slída ve formě muskovitu má velmi dobré elektrické parametry ( $\epsilon_r = 7$ ,  $\text{tg } \delta < 1 \%$ ,  $E_p = 50 \div 150 \text{ kV/mm}$ ).

Klíčová vlastnost slídy je odolnost vůči částečným výbojům, a také vysoká teplotní odolnost v rozmezí 130–500 °C, závisí na konkrétním pojivu. Izolace na bázi slídy jsou tedy vhodné pro izolace, které jsou tepelně namáhané, a také pro ty, v nichž může dojít k výskytu částečných výbojů. Avšak teplotní a elektrické vlastnosti slídových izolací jsou vždy ovlivněny pojivem. Možnou variantou zpracování slídy je tzv. mikanit, což je výrobek skládající se z vrstev slídy a pojiv, který se používá pro teplotně namáhané komutátory, izolační stroje, cívky atd. Dále se používají slídové folie, což je druh slídového papíru, který byl během procesu pečení zbaven částic vody. Lze jej použít, za pomoci pojiva, jako potah

pro papír, skleněné a polyesterové hedvábí. Takto vzniklé materiály se používají jako izolace točivých strojů a transformátorů. [1]

## 4.2 Plasty

Do této skupiny patří obrovské množství různých sloučenin, které se liší vlastnostmi, výrobou, zpracováním a použitím. Níže popsány budou tři hlavní zástupci plastů a to polyethylen (PE), polyvinylchlorid (PVC) a polypropylen (PP). Tyto materiály patří do skupiny termoplastů, což znamená, že se působením tepla stávají tvárné. Charakteristickými vlastnostmi jsou vysoká elektrická pevnost a nízký ztrátový činitel. Další jejich předností je nízká hmotnost, což souvisí s jejich menší mechanickou odolností. Pro zvýšení mechanické odolnosti je třeba tyto materiály aplikovat do kompozitů, kde lze díky různým příměsím tento nedostatek potlačit. Dále mají nízkou teplotní stabilitu, ale jsou oproti anorganickým materiálům lépe tvárné. Používají se zejména ve výkonových kondenzátorech a jako izolace vysokonapěťových kabelů. Srovnání klíčových parametrů níže uvedených materiálů je uvedené v následující tabulce.

Tabulka 4.1: Porovnání klíčových parametrů vybraných materiálů [3]

materiál	$T_{\max}$ [°C]	$\sigma$ [ $\Omega \cdot m$ ]	$E_p$ [kV/mm]	$\text{tg } \delta$ [-]	$\epsilon_r$ [-]
PE	80-100	$>10^{16}$	45-60	2,2-2,3	$2,0 \times 10^{-4}$
PVC	65	$10^{12}$	40-50	3,1	$1,5 \times 10^{-2}$
PP	120	$10^{10}$	80	2,3	$1,0 \times 10^{-3}$

\*pozn.:  $\epsilon_r$  a  $\text{tg } \delta$  jsou měřené při frekvenci 1 MHz a 50 Hz.

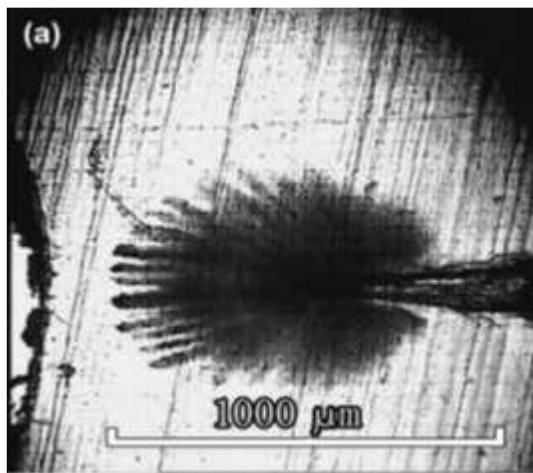
### Problematika vodního stromečku

Degradaci způsobenou vodními stromečky tvoří velký počet mikrovoidů (vysoce energetických mikroskopických lomových mechanismů pozorovaných ve většině kovových slitin a v některých plastech) naplněných elektrolytem s oxidovanými nebo chemicky modifikovanými vnitřními povrchy. Tyto mikrovoidy tvoří zpravidla rozptýlený obrys ve tvaru stromu, proto se nazývá vodní stromeček. Pro vznik tohoto jevu je třeba na izolační materiál působit elektrickým polem. Dle [14] se mohou stromečky tvořit už při napětí 1,9 kV/mm. Dalším klíčovým faktorem nezbytným pro tvorbu stromečku je přítomnost elektrolytu v materiálu. Vytvoření vodního stromečku je zpravidla nevratný proces. Je možné, že po odstranění elektrolyzy zmizí, ale jakmile se materiál znovu nasatí elektrolytem, stromeček se opět objeví. Vodní stromečky mohou být obtížně detekovatelné, protože

obsahují průhledný elektrolyt. K jejich odhalení je tedy třeba nejprve elektrolyty zbarvit tzv. methylenovou modří. [15]

Vodní stromečky se obvykle vyskytují ve dvou různých formách, a to tzv. „*bow-tie*“ a „*vented*“. Stromečky vznikají deformacemi nebo kontaminanty v materiálu, což jsou místa, kde se zvyšuje koncentrace elektrického napětí. „*Vented*“ jsou vytvářeny deformacemi na povrchu izolace, zatímco „*bow-tie*“ jsou vytvářeny kontaminanty uvnitř izolace. Kromě přítomnosti vnějšího napětí, existují další faktory, které mají vliv na tvorbu stromečků. Jsou to faktory způsobené samotným materiálem, jako jsou stupeň zesílení (XLPE) a tvar polymerní matrice. [15]

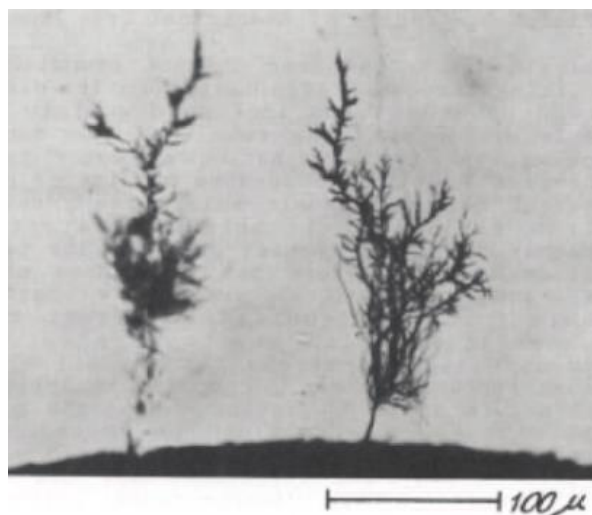
Jelikož je degradace vodními stromečky velmi pomalý proces, při laboratorních pokusech je třeba zvýšit přiložené elektrické napětí a jeho frekvenci. Napětí však musí být tak nízké, aby se zabránilo vzniku tzv. elektrického stromečku. Vodní stromečky pomalu degradují a oslabují polymerní materiál, což umožňuje dřívější výskyt elektrických stromečků. Vodní stromečky nevytváří přímo vodivé cesty, avšak vytvářejí oblasti s vyšší vodivostí než původní polymerní materiál. [15]



Obr. 4.4: Vodní stromeček (převzato z [16]).

## Problematika elektrického stromečku

Na rozdíl od vodního stromečku je elektrický stromeček považován již za hlavní formu elektrické degradace, která vede přímo k selhání. Tvorba vodních stromečků dle [17] nastává při přiloženém napětí od 100 kV/mm. Tvary této degradace lze charakterizovat jako větrové či keřovité. Stejně jako u vodních stromečků jsou způsobené kontaminanty a povrchovými nerovnostmi, což jsou místa, kde se ve vyšší míře koncentruje elektrické napětí.



Obr. 4.5: Elektrický stromeček (převzato z [18]).

### 4.2.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen (PE) je uhlovodíkový polymer, který je polymerizován z ethylenu při vysoké teplotě a vysokém tlaku. Molekulární struktura polyethylenu může být reprezentována jednoduše dle [19] jako  $(\text{CH}_2)_n$ , kde  $n$  je stupeň polymerace. Existuje několik typů polymerizace ethylenu. Výsledným produktem je pak polyethylen s různou strukturou (krystalinitou). Používá se zejména pro kabely distribučních sítí. Pro toto použití se polyethylen začal používat na počátku 50. let 20. století, od této doby se začala výroba a použití polyethylenových kabelů rychle rozvíjet. V roce 1969 byl poprvé nainstalován LDPE kabel pro 225 kV. Od roku 1985 byl používán pro vedení 400 kV a od 90. let minulého století začal vývoj pro aplikace pro napětí 500 kV [20, 21].

Polyethylen se dále rozděluje dle hustoty na vysokohustotní (HDPE), nízkohustotní (LDPE) a lineární nízkohustotní (LLDPE). Speciální a často využívané modifikace polyethylenu je zesíťovaný polyethylen (XLPE), který má vynikající mechanické vlastnosti a dobrou tepelnou odolnost. Porovnání jednotlivých variant je popsáno v Tabulce 4.2.



V porovnání s ostatními pevnými izolanty má dle [22] samotný polyetylen (PE) vynikající dielektrické vlastnosti, mezi které patří například nízká permitivita, nízké dielektrické ztráty a vysoká elektrická pevnost. Díky těmto vlastnostem (zejména elektrické pevnosti) postupně nahradil papírovou izolaci kabelů pro vysoké a velmi vysoké napětí. Další výhody polyethylenu oproti dříve používanému systému izolace olej/papír jsou nízké výrobní náklady, snadnější údržba.

Nevýhodou je, že vzhledem ke své nízké teplotě tání a velkému koeficientu tepelné roztažnosti, může být provozován pouze při teplotách do 70 °C. To vzhledem k možnému přetížení vedení a zkratovým proudům použití výrazně omezuje. Tento problém však řeší právě modifikace XLPE, který může odolat teplotám až do 90 °C [23]. Snížená náchylnost XLPE ke tvorbě vodních stromečků (viz 4.2) předurčuje tento materiál pro použití v podzemním vedení. XLPE kabel je bezúdržbový, což je velmi vhodné pro aplikaci pro podzemní přenos v hustě obydlených oblastech. Další možná aplikace je v podmořských kabelech, kde byl poprvé XLPE kabel pro napětí 145 kV nainstalován v roce 1973 společností ABB. Od té doby se aplikace kabelů rozšířila postupně až pro napětí 500 kV [24]. V posledním desetiletí se rozmohla vysokonapěťová síť HVDC využívající polymerní izolaci a s tím i rozmach polyethylenu [25].

Tabulka 4.2: Elektrické vlastnosti polyethylenu [22, 26].

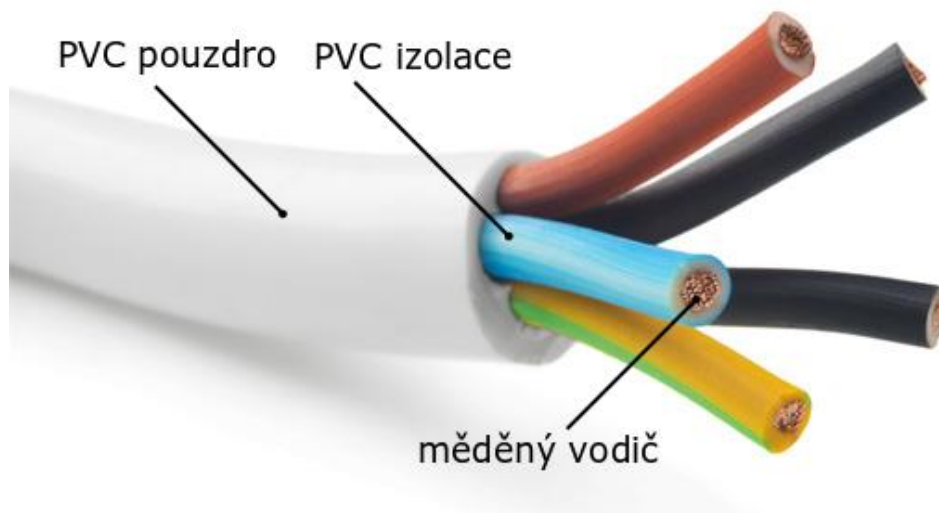
parametr	$\epsilon_r$ [-]	$\text{tg } \delta$ [-]	$E_p$ [kV/mm]	$R_v$ [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]
<b>LDPE</b>	2,25	$<5 \times 10^{-4}$	20-160	$10^{15}-10^{18}$
<b>HDPE</b>	2,3-2,35	$10^{-3}$	20-160	$10^{15}-10^{18}$
<b>XLPE</b>	2,4	$10^{-3}$	50	$\sim 10^{16}$

\*pozn.:  $\epsilon_r$  a  $\text{tg } \delta$  jsou měřené při frekvenci 1 MHz.

#### 4.2.1 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid je termoplastický materiál, který se široce používá jako izolační materiál pro kabelové svazky, a to především díky svým vynikajícím elektrickým a tepelným izolačním vlastnostem, trvanlivosti, flexibilitě, snadné manipulovatelnosti při instalaci a ohnivzdornosti [27]. První komerční výroba PVC začala v Německu ve 30. letech 20. století [28]. Izolace z PVC se tehdy používaly jako náhrada pryžové a papírové izolace. Jeho výhody oproti pryži a papíru jsou odolnost vůči vlhkosti, nízká hmotnost (nepotřebují kovová pouzdra na rozdíl od papíru). Díky své flexibilitě a trvanlivosti se používá

v aplikacích, kde dochází k častému cyklickému namáhání kabelů, přičemž pracovní teplota je v rozmezí 70-90 °C [29]. Od zavedení PE, resp. XLPE kabelů byl PVC z vysokonapěťové techniky postupně vytlačován. V nynější době je možné PVC kabely nalézt v aplikacích do jmenovitého napětí 1 kV (např. v telekomunikaci) [28]. Kabely z PVC v průběhu času netvrdnou a nepraskají, proto jsou stále uplatňovány mimo elektrotechnické obory, např. pro potrubní a vodovodní systémy, obklady domů, okenní křídla, okapy atd [29].



Obr. 4.6: Struktura PVC kabelu [30].

#### 4.2.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen (PP) byl objeven v polovině 20. století a od té doby nachází široké uplatnění v průmyslu kvůli jeho nízké hustotě, vysoké teplotní odolnosti a dobré zpracovatelnosti [31]. V elektrotechnice patří, díky kombinaci vysoké elektrické pevnosti a nízkému rozptylu mezi nejdůležitější izolační polymery [32]. Jedna z možných variant úprav PP je tzv. BOPP, což je zkratka pro biaxiálně orientovaný polypropylen. Hlavní vlastností této formy polypropyleny je jeho nedeformovatelnost v příčném směru. V podélném směru je při mechanickém protáhnutí velmi odolný vůči přetížení [33]. BOPP se používá od 80. let na výrobu výkonových kondenzátorů. Ve srovnání s předchozí technologií, jež využívala kraftový papír, vykazuje BOPP mnohem vyšší hodnoty pevnosti při lomu (více než 600 kV/mm) spolu se značně nízkými dielektrickými ztrátami (menší než 0,1 %) [34].

Polypropylen se také ukazuje jako možná náhrada dříve zmiňovaného XLPE v silových kabelech kvůli jeho relativně vysoké teplotě tání (167 °C) a dobré chemické odolnosti v porovnání s ostatními termoplasty [35].

S rychlým rozvojem energetického systému se zpřísňují i požadavky na vlastnosti PP. Při uplatnění v kondenzátorech je snahou zvýšit hustotu akumulace elektrické energie a pro aplikaci v silových kabelech zlepšit obrobiteľnosť při zachování původních izolačních vlastností. Pro splnění těchto požadavků se ukazuje jako nejvýhodnější aplikovat PP do nanokompozitů, díky nimž dosáhne nově vytvořený materiál dobré, dříve nedostatečné, mechanické vlastnosti, spolu s původními tepelnými a elektrickými vlastnostmi [36].

## 5 Diagnostické metody

K tomu, aby mohl být dielektrický materiál použit v elektrickém zařízení, je třeba znát dostatečně přesně jeho parametry. Tímto oborem se zabývá diagnostika, která z latinského slova *diagnosis* znamená určení stavu.

Při návrhu elektrických zařízení je tedy pomocí diagnostik různých materiálů vybrán ten, který nejlépe vyhovuje předem daným parametrům. Diagnostika se ovšem uplatňuje i při samotné výrobě zařízení neboli v oblasti technologických procesů. Zde je diagnostika uplatňována hned v několika fázích výroby. Kromě samotné vstupní kontroly materiálu je zde důležitá i mezioperační kontrola, jelikož během technologických procesů může dojít ke změnám parametrů materiálu. Mezioperační kontrola spočívá v zjišťování stavu vyráběného zařízení mezi jednotlivými kroky výroby. Tato kontrola může včas zamezit dalšímu zpracování vadných kusů, a tím tak ušetřit náklady. Dalším místem, kde ve výrobě hraje diagnostika svoji roli, je výstupní kontrola. Při výstupní kontrole je zkontrolován stav finálního výrobku, zda je v souladu s požadovanými parametry a normami. Jedná-li se o zařízení, které je třeba dohotovit až v místě provozu, je součástí výstupní kontroly i diagnostika po montáži zařízení.

Diagnostika hraje významnou roli i při samotném provozu zařízení. Zejména u dielektrických materiálů, kde se jejich vlastnosti v čase mění, je třeba znát jejich stav. Dielektrické materiály jsou součástí elektrických zařízení či soustav, které je možné si představit jako sériově pospojované soustavy, kdy výpadek jednoho způsobí výpadek celého zařízení. Z tohoto důvodu je třeba dielektrické materiály diagnostikovat i v provozu, aby se předešlo případné poruše zařízení či výpadku celé elektrizační sítě.

Moderní diagnostické systémy dokáží v měřeném zařízení kromě lokalizování oblasti poruchy také navrhnout postup pro obsluhu zařízení, jak tuto poruchu co nejrychleji odstranit. To vede k rychlé a přímé opravě zařízení bez zbytečných prodlev. Při soustavné diagnostice v čase dochází ke sběru cenných dat popisujících vlastní vývoj chování materiálů či celého zařízení. Na základě těchto dat lze zpracovat předpověď pro budoucí chování systému. Toto odvětví se nazývá elektrotechnická prognostika, což je nejvyšší forma diagnostiky.

Diagnostické systémy jsou však ekonomicky náročné, proto nelze všechna zařízení neustále monitorovat. Vždy je třeba najít interval, kdy systém podrobit diagnostickým zkouškám, což je silně závislé na spolehlivosti a životnosti systému.

## 5.1 Napěťové zkoušky

Při diagnostice dielektrických materiálů hrají napěťové zkoušky roli zejména při měření elektrické pevnosti, která je důležitým parametrem pro návrh a konstrukci izolačních systémů všech elektrických zařízení. Při těchto zkouškách je měřena hodnota napětí, během které dojde k elektrickému průrazu či přeskoku. Tento jev nastává při tak vysoké hodnotě napětí, kdy se výboj zcela přemostí přes izolaci a napětí mezi elektrodami se tak sníží k nule. Tento výboj způsobí zvýšení teploty, při které dojde k nevratné poškození izolace. K přeskoku dochází v kapalných a plynných materiálech a jedná se na rozdíl od průrazu o jev vratný. Dle druhu testovacího napětí lze zkoušky rozdělit na zkoušky stejnosměrným, střídavým a impulzním napětím, které jsou dány normou ČSN IEC 60-1. [37]

### 5.1.1 Stejnosměrné a střídavé napětí

Stejnosměrným napětím je rozuměno napětí, které by nemělo mít větší než 3% odchylku od své aritmetické střední hodnoty. [37]

Frekvence střídavého napětí se pohybuje od 45 do 60 Hz a maximální hodnota signálu je  $\sqrt{2}$  x větší než efektivní hodnota s odchylkou  $\pm 5\%$ . [37]

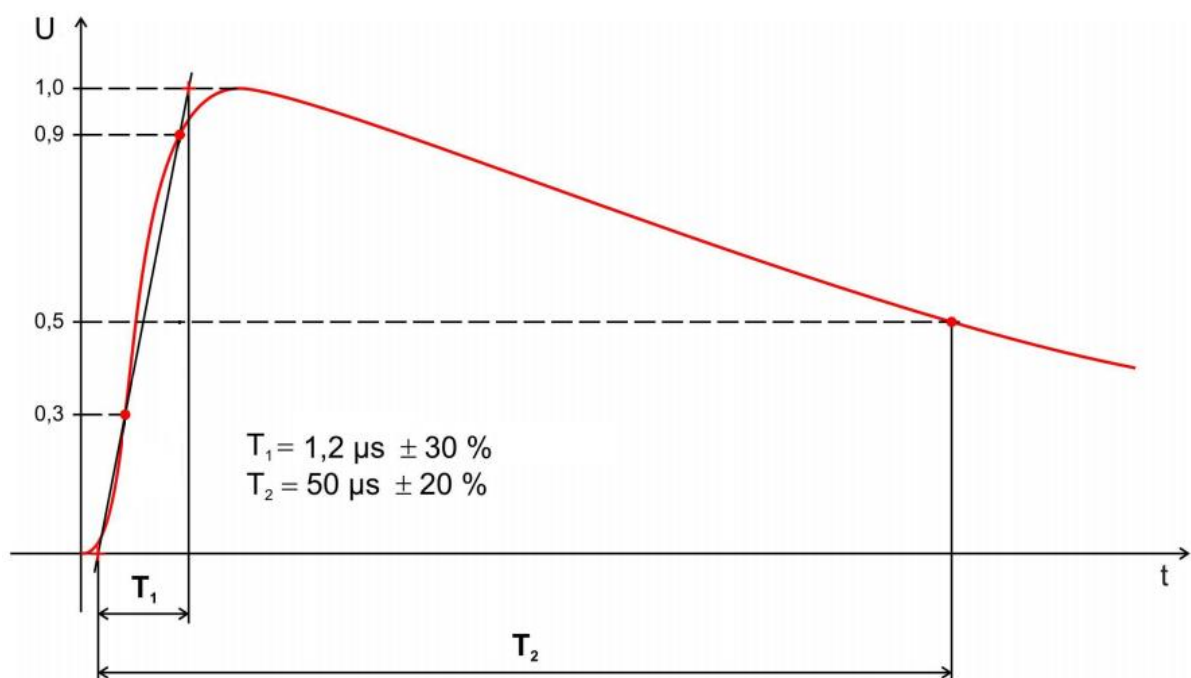
Existují tři typy zkoušek stejnosměrným a střídavým napětím. A to zkouška výdržným, přeskokovým a zaručeně přeskokovým napětím. Principy zkoušek pro stejnosměrná a střídavá napětí jsou shodná. [37]

Při zkoušce výdržným napětím se začíná na nízké hodnotě napětí z důvodu možného přepětí kvůli spínacímu přechodovému jevu. Napětí je pomalu zvyšováno až na úroveň zkušebního napětí. Při této hodnotě je napětí drženo po dobu 60 s, poté je napětí sníženo na nulu vybitím kapacity obvodu včetně zkoušeného zařízení přes vhodný odpor. Nedošlo-li k přeskoku, jsou požadavky zkoušky splněny. [37]

Zkouška přeskokovým napětím spočívá ve zvyšování přiloženého napětí až do hodnoty, kdy dojde k přeskoku. Tato hodnota je zaznamenána jako přeskokové napětí. Zkouška zaručeného přeskokového napětí se liší tím, že hodnota přeskokového napětí je přikládána na zařízení při určitém počtu opakování. [37]

### 5.1.2 Atmosférické pulzní napětí

Atmosférický pulz je dle [38] a [39] demonstrován pomocí normalizovaného napěťového pulzu  $T_1/T_2$   $\mu\text{s}$ . První časová konstanta  $T_1$  je získána pomocí přímky, která protíná impulsní napětí ve velikost 30 a 90 % jeho maximální velikosti. Doba  $T_1$  je poté dána jako průsečík přímky s časovou osou a průsečíkem přímky s maximální hodnotou atmosférického pulsu. Hodnota  $T_2$  je pak doba, kdy se hodnota napěťového pulzu sníží na polovinu. V praxi se nejčastěji používá napěťový pulz 1,2/50  $\mu\text{s}$ . Atmosférický napěťový pulz bývá v praxi způsoben například úderem bouřkového blesku do vedení. Přehledné znázornění atmosférického pulzu na Obr 5.1.



Obr. 5.1: Znázornění atmosférického pulzu [40].

U zkoušky atmosférickým pulzem je prováděna pouze zkouška výdržným napětím. V [37] jsou definovány postupy A, B, C, které se od sebe liší v závislosti na tom, jedná-li se o zkoušku obnovující či neobnovující se izolace. Neobnovující se izolace znamená, že při průrazném napětí izolace ztrácí trvale schopnost izolace. Naopak obnovující se izolace má schopnost se po průrazu zregenerovat.

Postup A je určen pro neobnovující se izolace a spočívá v přiložení 3 impulzů na hladině jmenovitého výdržného napětí. Nedojde-li k poruše, je zkouška splněna.

Při postupu B se přiloží 15 impulzů na hladině jmenovitého výdržného napětí. U obnovující se izolace může ke splnění zkoušky dojít maximálně ke dvěma přeskokům zatímco u neobnovující se izolace je zkouška splněna, nedošlo-li k její poruše.

Postup C se od postupu A liší tím, že při maximálně jednomu průrazu u obnovující se izolace následuje dalších 9 impulzů, při kterých pro splnění zkoušky nesmí dojít k průrazu.

### 5.1.3 Zkouška elektrické pevnosti

Elektrickou pevnost lze dle [37] testovat dvěma způsoby.

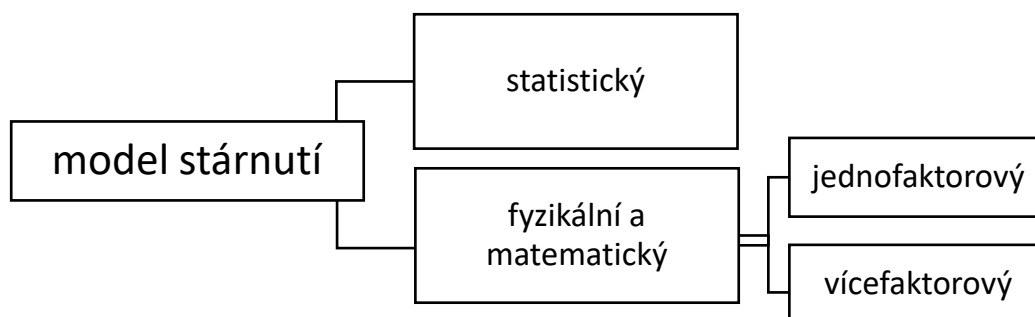
První způsob spočívá v plynulém navyšování napětí až do okamžiku průrazu, přičemž toto napětí je zvyšováno tak, aby došlo k průrazu mezi 10 až 20 sekund od okamžiku navyšování od 0 V. Z toho vyplývá, že je třeba materiál předem několikrát otestovat.

Druhým způsobem je zkouška stupňovitým navyšováním napětí, kterou lze opět provádět dvěma způsoby. U prvního způsobu se začíná na 40% hodnotě průrazného napětí, získané pomocí plynulé zkoušky. Dále se napětí zvyšuje dle předepsaných hodnot, kdy každá hodnota je přiložena po dobu 20 sekund. Další možný způsob začíná s napětím od 50% hodnoty průrazného napětí. Další hodnoty jsou vždy o 10 % navýšeny, přičemž toto napětí trvá po dobu 10 s. Výsledkem obou způsobů je nejvyšší napětí, při kterém se neporušila izolace, tedy předchozí hodnota, kdy došlo k průrazu. [37]

## 6 Metody určování životnosti

Určování životnosti elektrického systému je proces vyplývající ze statistické analýzy dat. Parametry izolace se v čase mění vzhledem k působení vnějšího elektrického pole, tepla, mechanického namáhání, povětrnostních podmínek a dalších vlivů. Analýza životnosti poskytuje statistické informace o elektrické izolaci, jako jsou životnostní charakteristiky či pravděpodobnosti poruch. Získání údajů o životnosti při běžných pracovních podmínkách je časově velice náročný a finančně nákladný proces. Z tohoto důvodu byly navrženy různé metody, jak určit životnost izolace v kratším časovém období. Tyto metody se snaží urychlit degradační procesy v materiálu použitím vyššího napětí, které přesahuje běžnou úroveň napětí, v níž je izolace provozována. Zrychlení se provádí zkoušením izolace pomocí jednoduchých nebo kombinovaných vysokých úrovní napětí, které mohou zahrnovat elektrické, tepelné, enviromentální namáhání. Takto zrychlený proces může trvat řádově od jednotek sekund až po stovky hodin [41]. Údaje získané ze zkoušek zrychleného stárnutí jsou pak použity jako základ pro odhad životnosti izolace, pokud je zařízení provozováno za běžných pracovních podmínek po dobu několika dalších let [42].

Pro stanovení životnosti se v praxi používají modely stárnutí. V elektrotechnickém odvětví se nejčastěji uplatňují modely pro tepelné, elektrické a mechanické stárnutí. Modely se dále dělí na způsob jejich odvození, dle Obr. 6.1.



Obr. 6.1: Rozdělení modelů stárnutí [43].



## 6.1 Statistické modely stárnutí

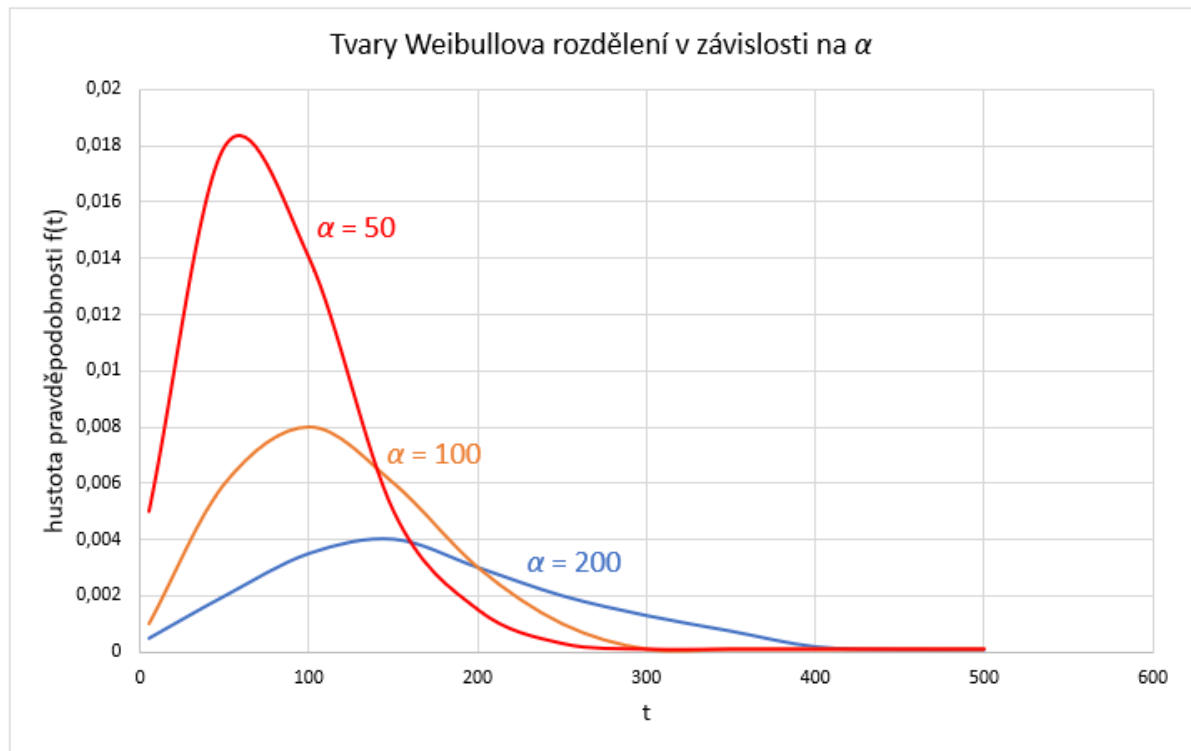
V těchto metodách je snahou předpovědět tzv. čas do poruchy, tedy doby, kdy se vyšetřovaný systém porouchá a nebude tak schopen dále vykonávat svoji činnost. Pro statistickou metodu k určení životnosti se kromě normálního a exponenciálního rozdělení využívá tzv. Weibullovo rozdělení.

### Weibullovo rozdělení

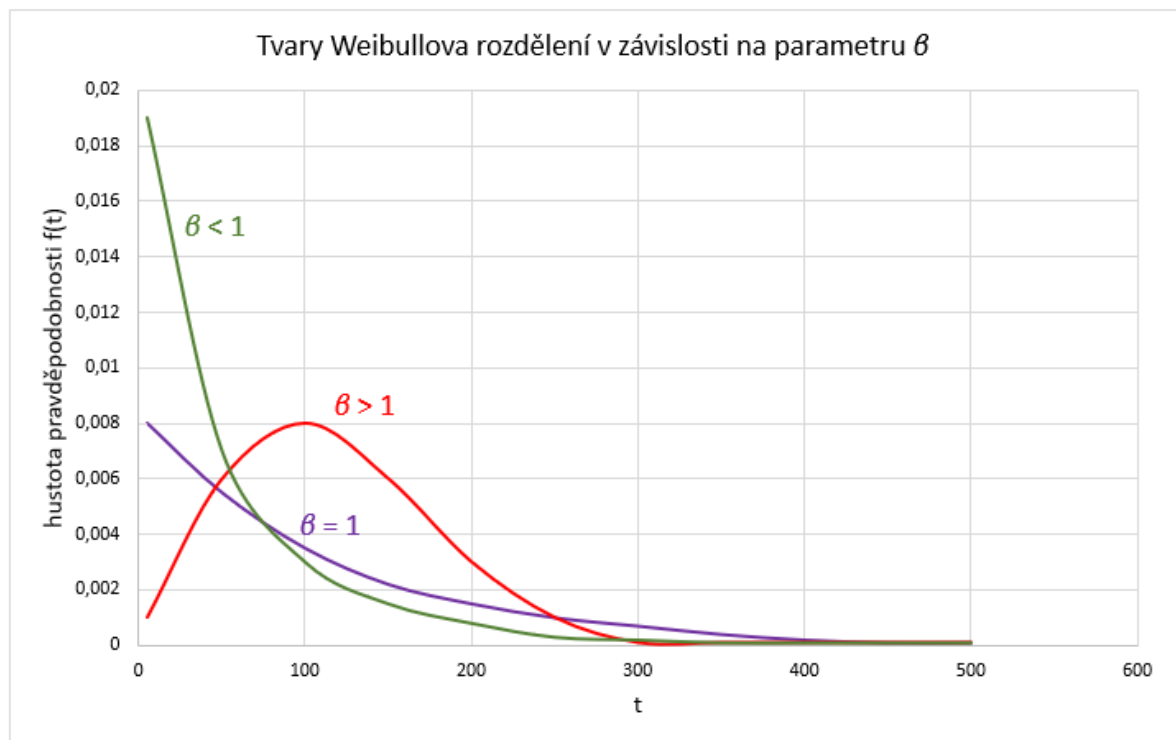
Toto rozdělení vychází z exponenciálního rozdělení, avšak nepočítá s poruchovostí jako konstantní funkcí času, ale jako s funkcí, kde se pravděpodobnost poruchy s časem nebo počtem vykonaných cyklů zvyšuje či snižuje v závislosti na zadaných parametrech [44]. Toto rozdělení je udáváno pomocí dvou parametrů  $\alpha$  a  $\beta$  dle následujícího vztahu [45].

$$f(t; \alpha; \beta) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp \left\{ -\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} \right\}, t \geq 0, \quad (6.1)$$

kde  $\beta$  [-] ovlivňuje tvar výsledné funkce hustoty pravděpodobnosti a pomocí  $\alpha$  [h] lze měnit strmost výsledné funkce [43]. Různé tvary křivek v závislosti na velikostech parametrů  $\alpha$  a  $\beta$  jsou znázorněny na grafech níže. Nutno zmínit, že oba parametry jsou voleny na základě empirických znalostí.



Obr. 6.2: Tvary Weibullova rozdělení v závislosti na  $\alpha$  [45].



Obr. 6.3: Tvary Weibullova rozdělení v závislosti na  $\beta$  [45].

U Weibullova rozdělení se dále určuje hladina významnosti, medián a další ukazatele. Vyhodnocení a určení životnosti se provádí grafickou metodou (stejně jako v kapitole 6.2), metodou nejmenších čtverců, nebo metodou maximální věrohodnosti. Všechny tyto metodiky jsou blíže popsány v [45].

## 6.2 Fyzikální a matematické modely stárnutí

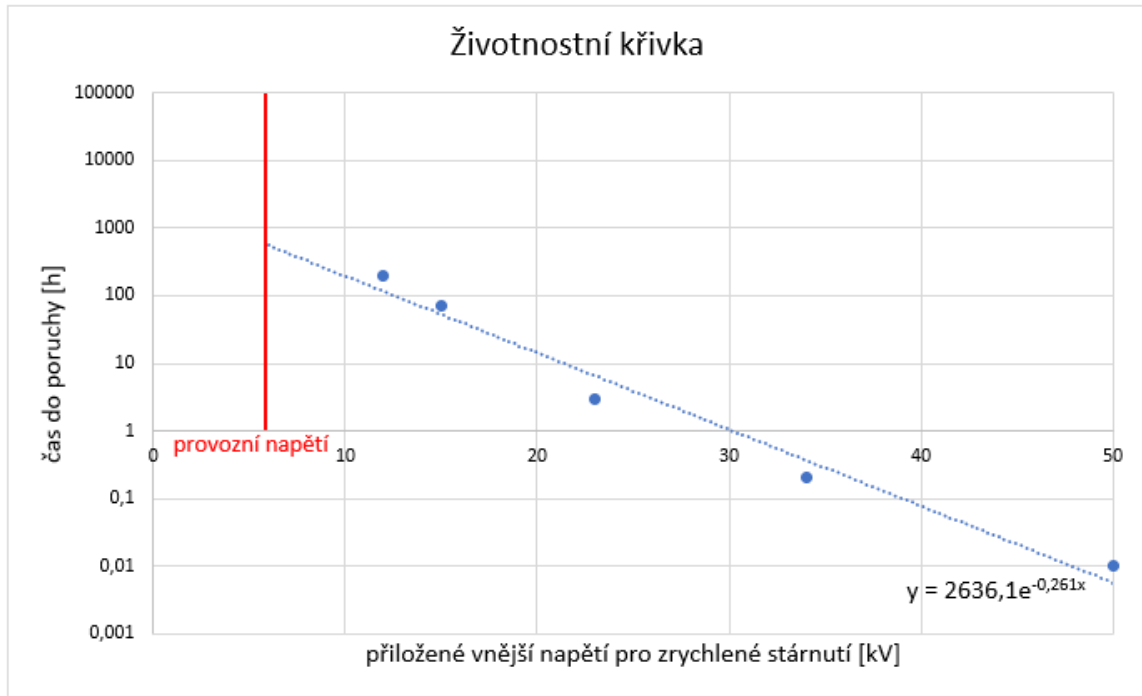
Elektrické namáhání je jedno z hlavních faktorů způsobujících zhoršení vlastnosti elektrické izolace. Existují dva empirické modely, které spojují elektrické namáhání s časem do poruchy. Jeden model je založen na využití mocninné funkce a druhý na exponenciální funkci. Parametry obou modelů jsou získány z naměřených dat pořízených při několika různých úrovních vnějšího napětí (dle [46] minimálně 3 různé úrovně). Jelikož je v těchto modelech zohledňováno pouze elektrické namáhání, nejedná se o přesný popis stárnutí celého izolačního systému [47]. Jedná se o tzv. jednofaktorový model stárnutí, kde se posuzuje pouze jeden stárnoucí faktor, zatímco ostatní faktory se zanedbávají. Proto jsou tyto modely spíše orientační a určené pro experimentální pokusy.

Matematické popisy pro exponenciální a mocninný model jsou dány následujícími rovnicemi [39].

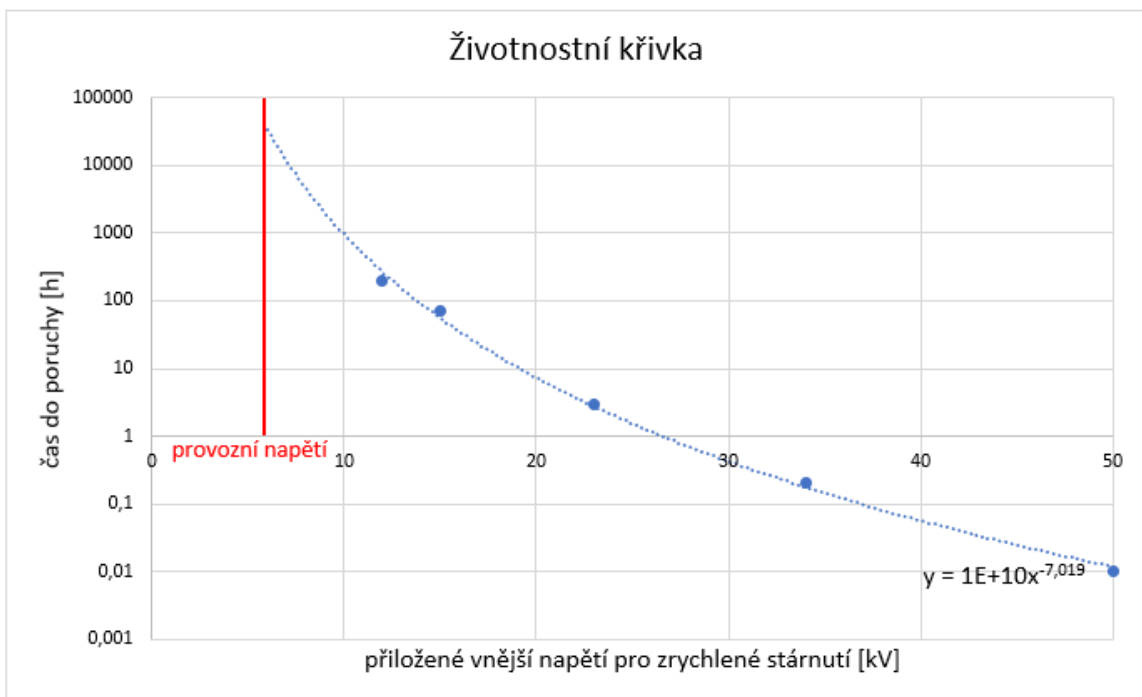
$$L(U) = c \exp(-b U), \text{ pro exponenciální model} \quad (6.2)$$

$$L(U) = k U^{-n}, \text{ pro mocninný model} \quad (6.3)$$

kde  $L$  je pravděpodobnost do poruchy,  $U$  je velikost vnějšího napětí,  $b$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $n$  jsou konstanty pro různé materiály získané empiricky. Rozdíly mezi jednotlivými modely jsou znázorněny na obrázcích níže.



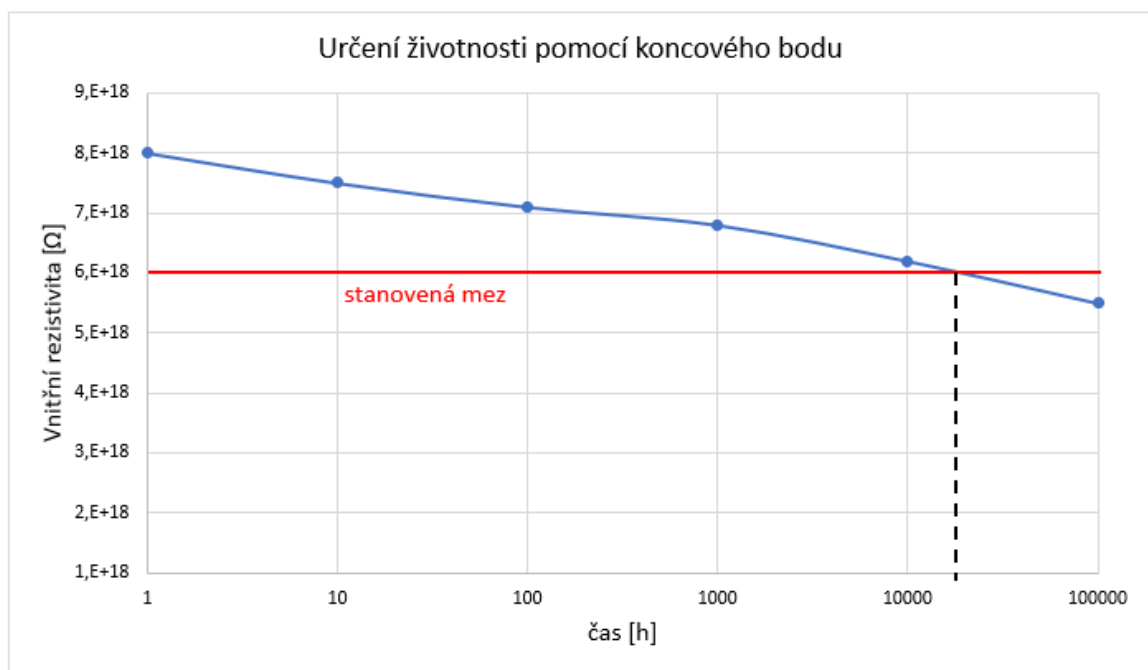
Obr. 6.4: Životnostní křivka dle exponenciální funkce [45].



Obr. 6.5: Životnostní křivka dle mocninné funkce [45].

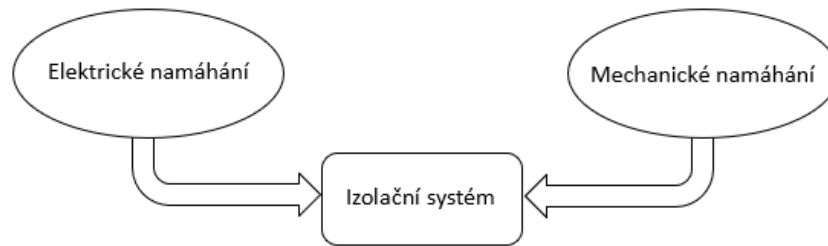
Na Obr. 6.4 a 6.5 jsou stejné hodnoty. Je zřejmé, že v tomto případě udává lepší popis životnosti mocninný model, jelikož se proložená křivka blíží více naměřeným datům. Naměřené body byly spojeny příslušnou spojnicí trendu, která je protažena až do velikosti provozního napětí, odkud lze přibližně určit životnost.

Zmíněné dřívější metody slouží ke zjištění stavu do poruchy. Existuje však další způsob, jak určit životnost, a to je hledání koncového bodu. Tato metoda spočívá ve stanovení určité hodnoty daného parametru, kterou materiál v průběhu stárnutí nesmí překročit nebo se dostat pod její úroveň. Měření lze provádět pouze při jedné úrovni zvýšeného napětí. Nevýhodou je ale zpětné přepočítávání na provozní hodnotu napětí. Princip hledání koncového bodu je znázorněn na Obr. 6.6. V tomto konkrétním případě je mez vnitřní rezistivity stanovena na  $6 \cdot 10^{18} \Omega$ . Naměřené body se proloží odpovídajícím polynomem a odečte se čas, kdy byla stanovená mez překročena.

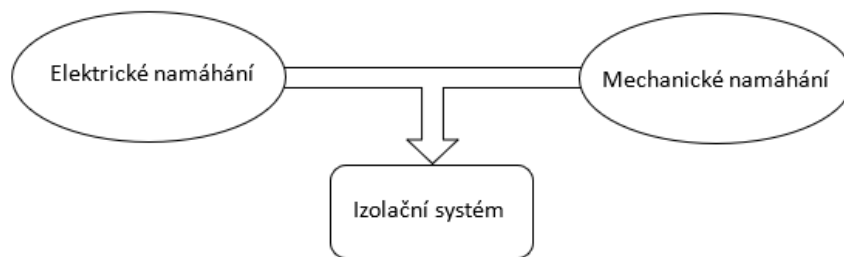


Obr. 6.6: Princip hledání koncového bodu.

V praxi však na izolační materiál působí více vnějších vlivů současně, které negativně ovlivňují vlastnosti izolace. Modely, které počítají s působením vícero vnějších vlivů, se nazývají vícefaktorové. Lze je rozdělit dle způsobu interakce vnějších vlivů na přímé a nepřímé.



Obr. 6.7: Nepřímá interakce.



Obr. 6.8: Přímá interakce.

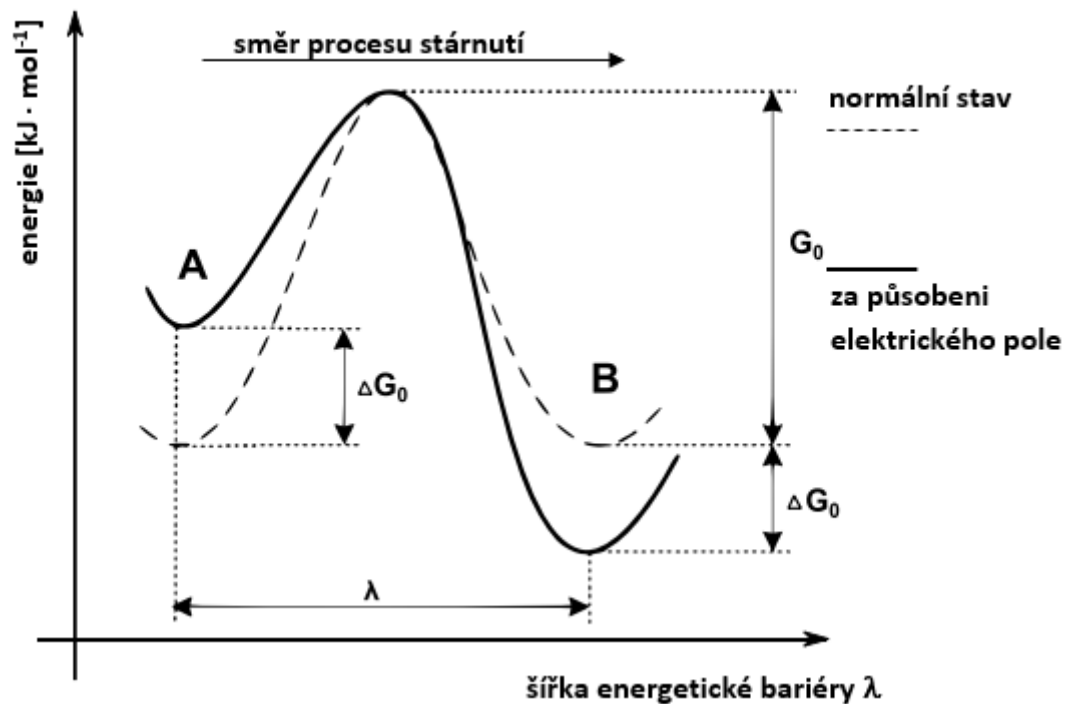
Nepřímá interakce nastává tehdy, kdy vícero vnějších vlivů působí na izolační systém, ale zároveň se mezi sebou neovlivňují. V takovém případě lze jednotlivá působení řešit jednotlivě. Příkladem může být vzájemné působení mechanického a elektrického namáhání na izolační systém. Mechanické namáhání způsobí trhliny v materiálu, díky čemuž dojde k vytváření stromečků, což má za následek zrychlené stárnutí. Přímou interakcí se označují jevy, kdy se jednotlivé vnější vlivy natolik ovlivňují, že je jejich výsledek odlišný od situace, kdy by působily každý samostatně. Příkladem může být oxidace při zvýšené teplotě, kdy samotné zvýšení teploty nijak radikálně materiál neovlivňuje, ale za přítomnosti kyslíku dochází k výraznému urychlení stárnutí systému. [37]

Mezi vícefaktorové modely následující metody, které jsou blíže popsány v [37] a [45].

- **Simonio model**
- **Ramuúv model**
- **Falloúv model**

Tyto zmíněné modely se nejvíce hodí pro kombinaci tepelného a elektrického namáhání. Opět se v jednotlivých modelech volí konstanty na základě získaných zkušeností. Jedná se tedy o modely empirického charakteru.

Nejsložitějším modelem je ovšem **Crineův model**, kde všechny jeho parametry mají fyzikální význam. Tato metoda je založena na zákonech termodynamiky a na Boltzmanově statistice. Model je založen na představě, že stárnutí je charakterizováno pomocí energetické bariéry oddělující provozuschopný stav (bod A) od stavu selhání (bod B). Aby se izolační systém dostal z bezporuchového stavu do stavu selhání, je třeba dostatečně velká energie, aby byla energetická bariéra překonána, viz Obr. 6.9.



Obr. 6.9: Crineův model [43].

Čas potřebný pro přechod z bodu A do bodu B je právě životnost izolačního systému. Dobu životnosti lze zapsat dle následujícího vzorce [43]:

$$\tau = \left( \frac{h}{k_B T} \right) e^{\frac{\Delta G_0}{k_B T}} \cosh \left( \frac{e_p \lambda E}{k_B T} \right) \quad (6.4)$$

kde:  $h$  = Planckova konstanta

$k_B$  = Boltzmanova konstanta

$\Delta G_0$  = volná aktivační energie [eV]

$\lambda$  = šířka energetické bariéry

$e_p$  = elektrický náboj ovlivňující proces stárnutí

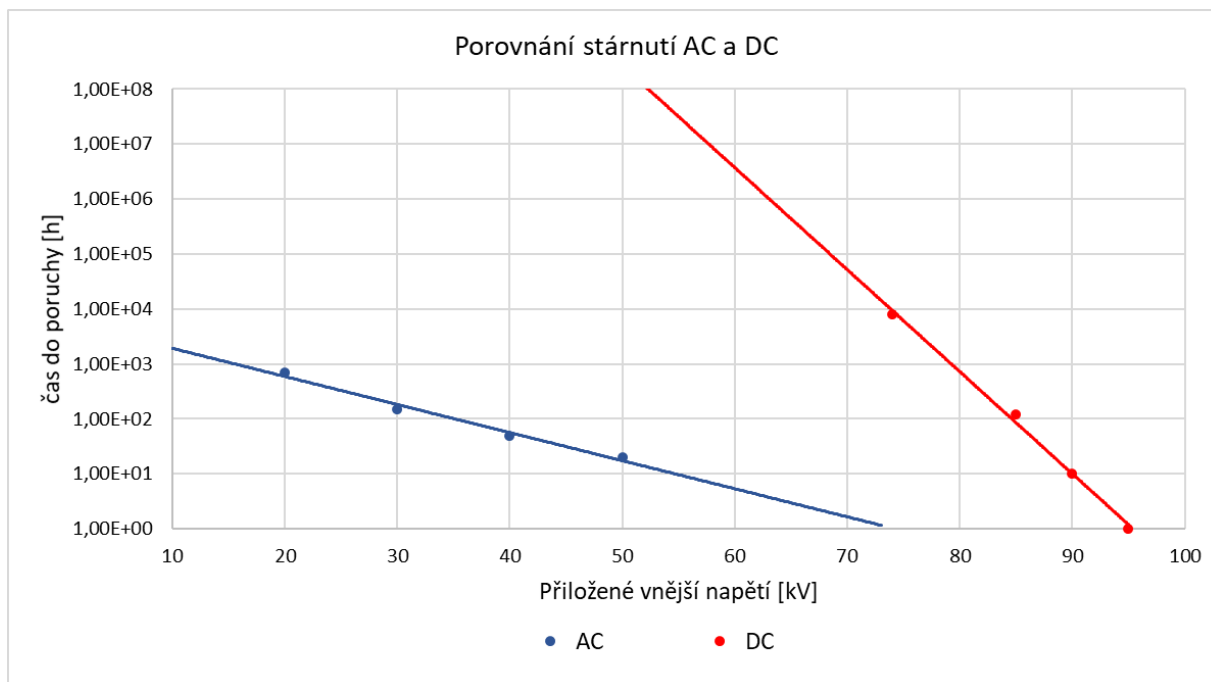
$E$  = intenzita elektrického pole [kV/mm]

$T$  = teplota [K]

Tento základní vztah je možné dále zjednodušovat za různých předpokladů, například pro vysoké hodnoty elektrické intenzity. Vztahy jsou blíže popsány v [37].

### 6.3 Faktory ovlivňující elektrické stárnutí

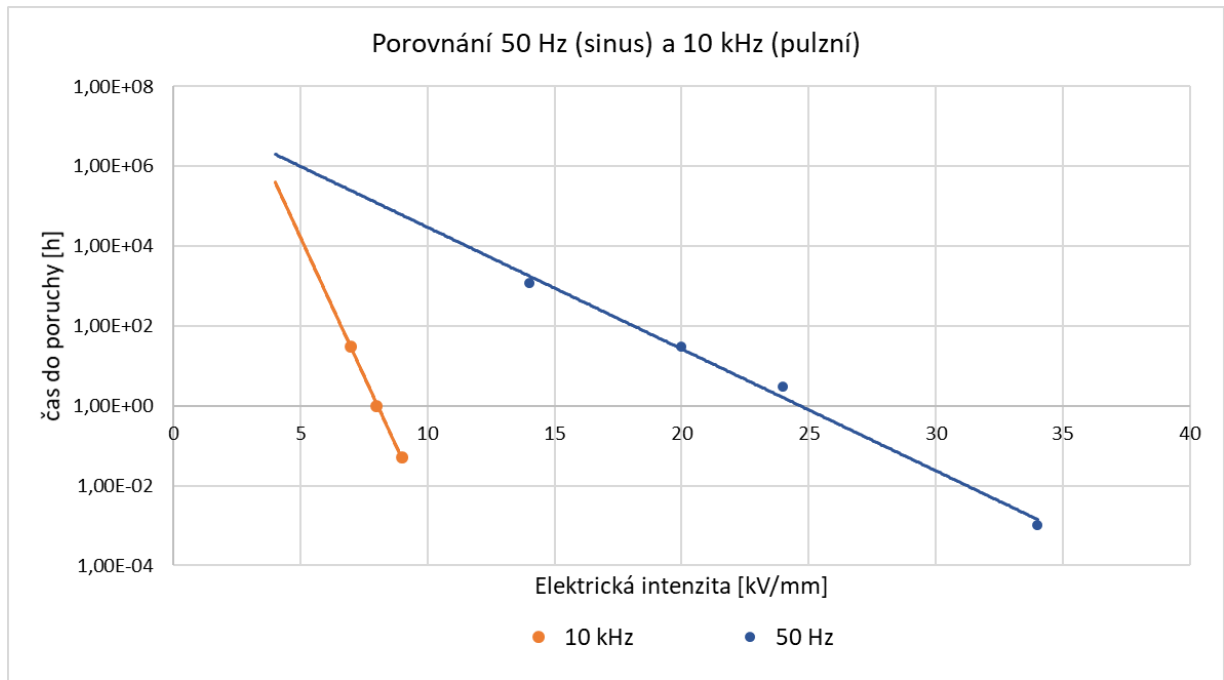
Kromě velikosti intenzity elektrického pole existují další elektrické faktory, které mají zásadní vliv na životnost izolace. Mezi tyto faktory patří frekvence a charakter působícího napětí.



Obr. 6.10: Porovnání AC a DC stárnutí [47].

Z Obr 6.10 je zřejmé, že životnost izolace při DC stárnutí je mnohem větší než při AC stárnutí z důvodů popsaných v kapitole 8.5.2.





Obr. 6.11: Porovnání 50 Hz a 10 kHz [48].

Dle [48] pulzní napětí zrychluje proces stárnutí a to hlavně kvůli přehřívání z důvodu zvýšení ztrát a zvýšenému výskytu částečných výbojů. Pro potlačení výskytu částečných výbojů při pulzním namáhání se používají materiály s označením CR (Corona Resistant).

## 7 Plán experimentu

V následující kapitole bude popsán popis plánu experimentu, včetně uvedení testovaných materiálů, použitých metod diagnostiky a nastínění předpokládaných charakteristik pro stanovení životnosti testovaných materiálů, jak při střídavém napájení, tak při napájení stejnosměrném.

AC stárnutí probíhalo od listopadu 2019 do února 2020. DC stárnutí bylo naplánováno od března 2020, tedy v období, kdy začala platit bezpečnostní opatření kvůli šíření nového typu koronaviru. Z tohoto důvodu nebylo možné DC stárnutí provést. Pro stanovení životnosti při DC namáhání bude použita alespoň externí zpráva z experimentu s DC stárnutím, ovšem na jiném materiálu. Tento materiál ale patří do stejné skupiny plastů, takže lze předpokládat určitou podobnost průběhu stárnutí.

### 7.1 Testované vzorky LDPE a LDPE/HNT

Testovány byly celkem dvě sady vzorků elektroizolačního materiálu. Jedna sada vzorků je vyrobena z nízkohustotního polyethylenu (*low density polyethylen – LDPE*). Druhá sada je vyrobena ze stejného materiálu, ovšem s příměsí HNT (*Hal nanotube*).

Polyethylen se získává polymerizací molekul ethylenu. Při polymerizaci mohou nastat dvě varianty zpracování, a to nízkohustotní a vysokohustotní. Zpracování nízkohustotního polyethylenu se provádí dle [49] vysokotlakou polymerizací pod tlakem až 3000 barů při teplotě 200 °C, zatímco u vysokohustotního se polymerizace realizuje pod tlakem jednotek barů při pokojové teplotě. Teplota tání u nízkohustotní varianty začíná na hodnotě 110 °C, avšak degradace materiálu začíná už od teploty -20 °C.

Nevýhoda izolačního materiálu na bázi PE je dle [50] jeho vysoká hořlavost, proto je snaha do samotného PE přidat další směs, která by hořlavost izolace zmírnila. Jednou z používaných směsí je tzv. HNT (*Hal nanotube*), která se získá z přírodně se vyskytujícího minerálu tzv. *halloysitu*. Tato směs však neslouží k navýšení provozní teploty izolace, ale spíše k jejímu pomalejšímu hoření při překročení bodu teploty vzplanutí. Pro aplikaci LDPE/HNT se obsah HNT pohybuje v řádu jednotek procent. V tomto měření byly použity vzorky s 3 % HNT.

## 7.2 Testované parametry

Měřenými veličinami byly: elektrická pevnost  $E_p$  ztrátový činitel v závislosti na frekvenci  $\tan \delta (f)$  a relativní permitivita  $\epsilon_r (f)$  pomocí metody BDS a vnitřní rezistivita  $R_v$ .

## 7.3 Postup experimentu

- Stanovení elektrické pevnosti  $E_p$ . Elektrická pevnost bude hodnota napětí stanovená jako poslední hodnota napětí, než dojde k elektrickému průrazu.
- Změření vstupních parametrů testovaných vzorků (viz 7.2).
- Vložení vzorků mezi napěťové elektrody, které budou napájeny napětím určeným z prvního kroku postupu, a tím začít proces zrychleného stárnutí při napětí 1,5 kV AC (uložení vzorků v Příloze A, B).
- Po určitém časovém úseku vyndat vzorky z procesu stárnutí a změřit testované parametry (viz 7.2).
- Opakovat předchozí bod pro více časových úseků.
- Z naměřených parametrů stanovit jejich závislost v čase.
- Určení meze zestárnutí dle hodnot z Tabulky 4.2.
- Zlinearizovat závislost změřených veličin v čase a porovnat předpokládaný průběh s určenou mezí zestárnutí.
- Dobu provozu zjištěnou z průsečíku mezi závislostí veličiny v čase a mezí zestárnutí považovat za konečnou životnost.

Tabulka 7.1: Shrnutí plánu experimentu pro AC stárnutí.

vzorek	diagnostická metoda	parametr	rozměr vzorků [mm]	počet vzorků	časové úseky odebrání vzorků [h]
LDPE	BDS	$T_g \delta, \epsilon_r$	40 x 40	5	dodaný stav, 8, 50, 250, 500
	průrazné napětí	$E_p$	90 x 90	10	
	odporová zkouška	$R_v$	90 x 90	5	
LDPE/HNT (3 % HNT)	BDS	$T_g \delta, \epsilon_r$	40 x 40	5	
	průrazné napětí	$E_p$	90 x 90	10	
	odporová zkouška	$R_v$	90 x 90	5	

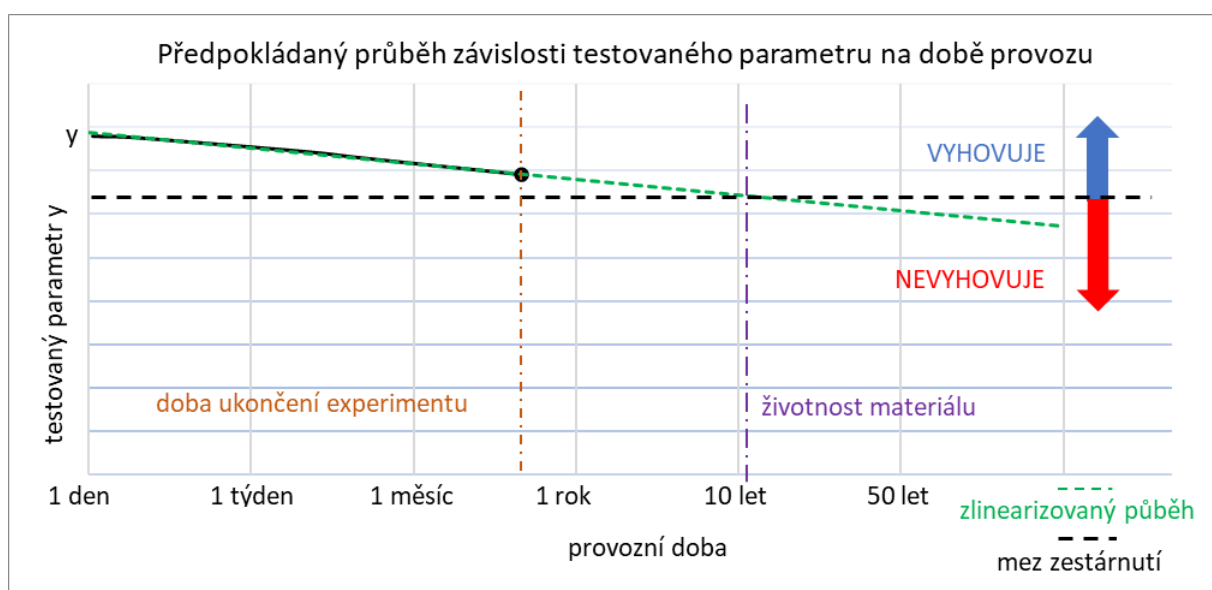
\* poznámka: stejný plán by platil i pro DC měření.

Tabulka 7.2: Počty kusů vzorků.

vzorek	rozměr [mm]	celkový počet kusů
LDPE	90 x 90	10
	40 x 40	10
LDPE/HNT (3 % HNT)	90 x 90	10
	40 x 40	10

## 7.4 Předpokládané výsledky

Pro přesné zjištění životnosti daného materiálu by bylo třeba materiál zatěžovat provozním napětím po dobu, než dojde k překročení meze zestárnutí. Toto měření by však probíhalo v řádu desítek let. Předpokládaný průběh závislosti měřeného parametru v čase by mohl probíhat dle Obr. 7.1, z něhož je vidět, že se hodnota měřeného parametru s časem snižuje. Snižuje se do té doby, než dojde k překročení meze zestárnutí. V tu chvíli materiál neplní požadované vlastnosti a lze ho považovat za nevyhovující (zestárlý).



Obr. 7.1: Předpokládaný průběh závislosti testovaného parametru na době provozu.

Tuto klesající závislost parametru v čase lze očekávat u vnitřní rezistivity  $R_v$ , která se pravděpodobně bude snižovat, například vlivem vlhkosti okolního prostředí. Naopak u ztrátového činitele  $tg \delta$  je očekáván rostoucí průběh.

V této práci je však průběh stárnutí třeba zrychlit. Toho se dosáhne zatěžováním vyšší hodnotou napětí, než by bylo reálné provozní napětí. Navíc z časového omezení bude zjištěna pouze část závislosti měřeného parametru v čase, proto bude nutné zbytek závislosti zlinearizovat a zjistit tak alespoň přibližnou životnost materiálu.

## 8 Vlastní experiment

V následujících kapitolách bude popsán postup navrženého experimentu, zvolené metody, naměřené hodnoty a z nich zpracované grafy či tabulky pro lepší znázornění.

### 8.1 Rozměry a označení vzorků

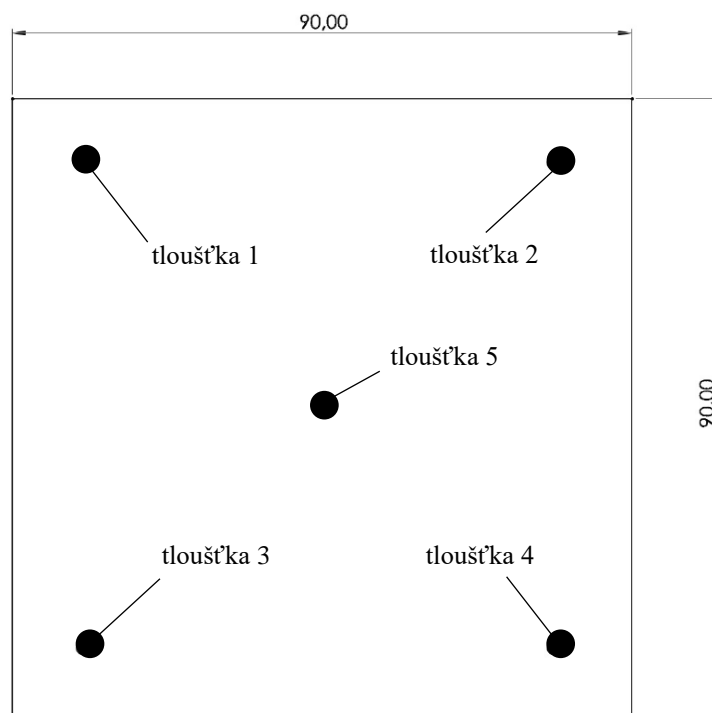
Jelikož dodaný materiál byl ve formě namotané fólie, bylo nutné fólii nastříhat na čtverce požadovaných rozměrů uvedených v Tabulce 7.2.

Pro další orientaci bylo nutné vzorky označit specifickým znakem, který byl zvolen ve tvaru YXX, kde Y je písmeno určující materiál (A – čistý LDPE, B – LDPE/HNT) a XX pořadové číslo vzorku (1–20 pro větší rozměr, 21–40 pro menší rozměr). Tabulka níže je uvedena pro lepší orientaci pro princip označení vzorků.

Tabulka 8.1: Značení vzorků.

materiál	označení písmenem	označení číslem	
LDPE	A	1-20 (90 x 90)	21-40 (40 x 40)
LDPE/HNT	B		

Dalším krokem bylo změření tloušťek vzorků, což je důležitý parametr pro stanovení všech zjišťovaných parametrů. Tloušťka vzorků byla měřena v 5 bodech (viz Obr. 8.1), ze kterých byla následně vypočítána průměrná hodnota, která je dále použita jako celková tloušťka vzorku. Všechny rozměry byly změřeny pomocí elektronického posuvného měřítka.



Obr. 8.1: Znárodnění měřených bodů na vzorku při měření dílčích tlouštěk.

Tabulka 8.2: Příklady naměřených a vypočítaných tlouštěk vzorků.

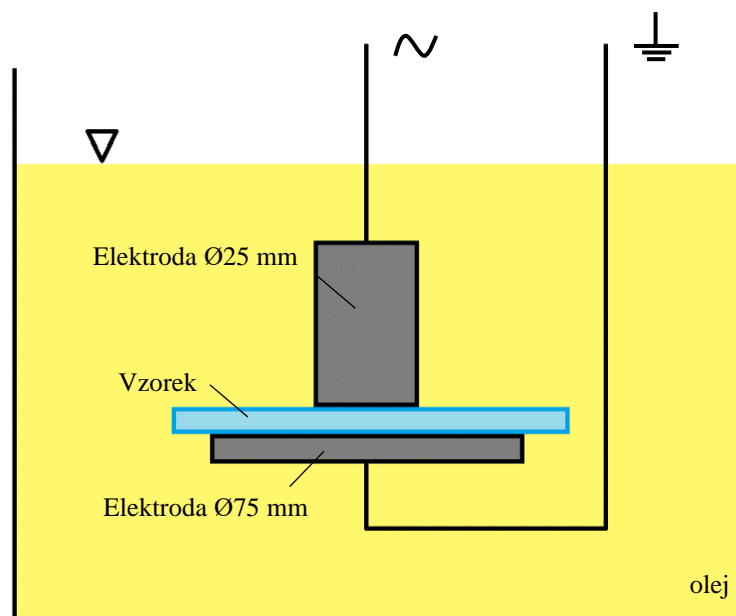
vzorek	tloušťka 1	tloušťka 2	tloušťka 3	tloušťka 4	tloušťka 5	průměrná hodnota
<b>A8</b>	0,332	0,32	0,307	0,337	0,359	<b>0,331</b>
<b>A23</b>	0,325	0,33	0,335	0,31	0,323	<b>0,3246</b>
<b>B9</b>	0,31	0,305	0,297	0,297	0,305	<b>0,3028</b>
<b>B31</b>	0,313	0,311	0,3	0,3	0,304	<b>0,3056</b>

## 8.2 Elektrická pevnost

První zkouška, která byla v rámci experimentu provedena, byla zkouška elektrické pevnosti. Jelikož se jedná o destruktivní zkoušku, kde dochází k elektrickému průrazu (viz Příloha C), bylo použito 10 vzorků od každého materiálu u dodaného stavu a 5 vzorků od každého pro zestárlé vzorky. Zkouška elektrické pevnosti byla provedena před začátkem experimentu v rámci zjištění dodaného stavu. Průběžné měření  $E_p$  nelze z důvodu omezené kapacity počtu vzorků měřit, proto je další zkouška elektrické pevnosti provedena až na konci experimentu na zestárlých vzorcích.

Vzorky byly vloženy mezi elektrody se zaoblenými hranami jako protikoronová ochrana o průměrech 25/75 mm s napěťovým růstem 2 kV/s dle normy ČSN EN 60243-1. Elektrody musely být umístěny v minerálním oleji pro potlačení plazivého výboje, který by

způsobil, že náboj přeskočí na druhou elektrodu vně materiálu (viz Příloha D). Jako zdroj zkušebního napětí byl použit zdroj *LM 30* s řídicí jednotkou *SM 4*, oba od firmy *HighVolt*.



Obr. 8.2: Zjednodušené schématické znázornění uložení vzorku v měřicím přípravku.

Tabulka 8.3:  $E_p$  pro vzorky LDPE u dodaného stavu.

vzorek	tloušťka [mm]	$E_p$ [kV]	$E_p$ [V/mm]
a1	0,3126	27,23	<b>87,108</b>
a2	0,3122	24,6	<b>78,796</b>
a3	0,3154	28,65	<b>90,837</b>
a4	0,3204	24,54	<b>76,592</b>
a5	0,3272	25,78	<b>78,790</b>
a6	0,3328	25,78	<b>77,464</b>
a7	0,3328	25,57	<b>76,833</b>
a8	0,331	26,56	<b>80,242</b>
a9	0,326	26,79	<b>82,178</b>
a10	0,3314	28,02	<b>84,550</b>
<b>průměrná hodnota <math>E_p</math> [kV/mm]</b>			<b>81,339</b>
směrodatná odchylka			4,545
variační koeficient			5,587

Tabulka 8.4:  $E_p$  pro vzorky LDPE/HNT u dodaného stavu.

vzorek	tloušťka [mm]	$E_p$ [kV]	$E_p$ [kV/mm]
<b>b1</b>	0,304	22,51	<b>74,046</b>
<b>b2</b>	0,3028	23,53	<b>77,708</b>
<b>b3</b>	0,299	23,69	<b>79,231</b>
<b>b4</b>	0,3038	23,77	<b>78,242</b>
<b>b5</b>	0,3036	26,3	<b>86,627</b>
<b>b6</b>	0,3074	23,58	<b>76,708</b>
<b>b7</b>	0,306	20,27	<b>66,242</b>
<b>b8</b>	0,3052	24,31	<b>79,653</b>
<b>b9</b>	0,3028	21,46	<b>70,872</b>
<b>b10</b>	0,3068	21,6	<b>70,404</b>
<b>průměrná hodnota <math>E_p</math> [kV/mm]</b>			<b>75,973</b>
směrodatná odchylka			5,494
variační koeficient			7,231

Tabulka 8.5:  $E_p$  pro vzorky LDPE po 500h stárnutí.

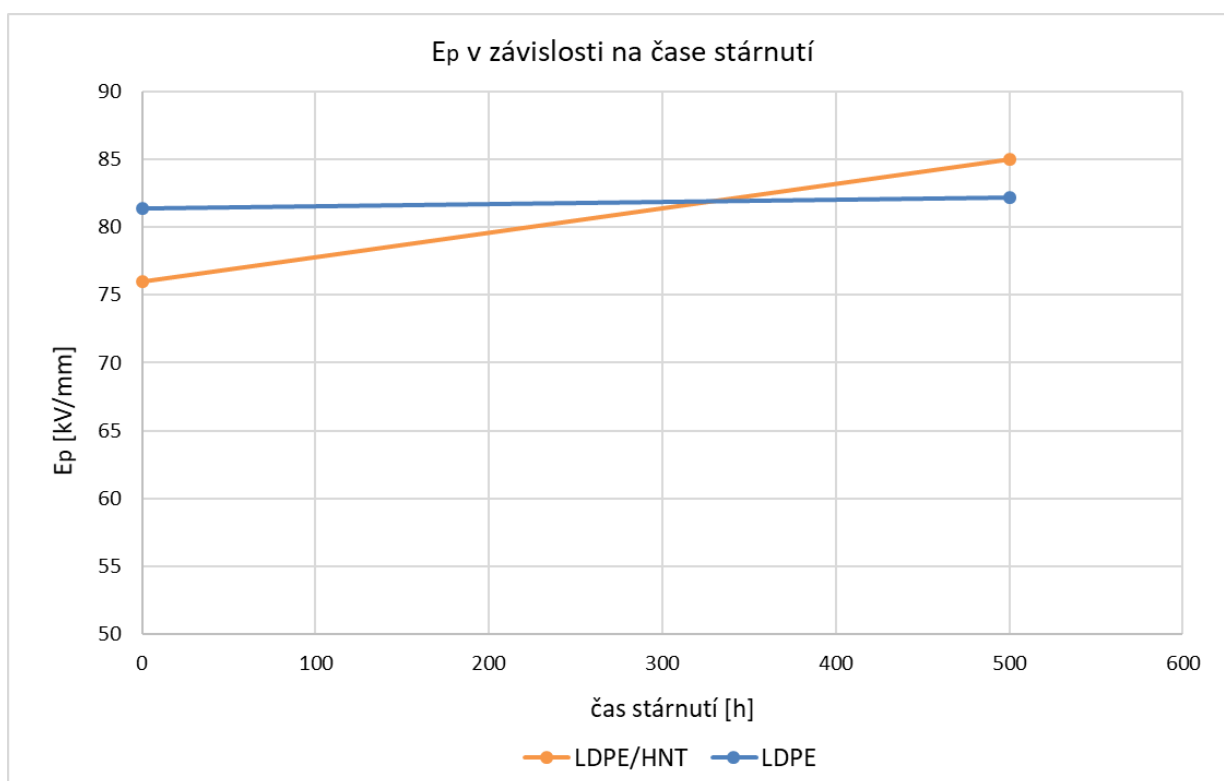
vzorek	tloušťka [mm]	$E_p$ [kV]	$E_p$ [kV/mm]
<b>a16</b>	0,3326	28,06	<b>84,366</b>
<b>a17</b>	0,3354	27,58	<b>82,230</b>
<b>a18</b>	0,324	28,18	<b>86,975</b>
<b>a19</b>	0,3302	25,07	<b>75,924</b>
<b>a20</b>	0,326	26,51	<b>81,319</b>
<b>průměrná hodnota <math>E_p</math> [kV/mm]</b>			<b>82,163</b>
směrodatná odchylka			3,678
variační koeficient			4,477

Tabulka 8.6:  $E_p$  pro vzorky LDPE/HNT po 500h stárnutí.

vzorek	tloušťka [mm]	$E_p$ [kV]	$E_p$ [kV/mm]
<b>b16</b>	0,3042	24,88	<b>81,788</b>
<b>b17</b>	0,3082	26,67	<b>86,535</b>
<b>b18</b>	0,3046	26,07	<b>85,588</b>
<b>b19</b>	0,3044	13,81	<b>45,368</b>
<b>b20</b>	0,3068	26,36	<b>85,919</b>
<b>průměrná hodnota <math>E_p</math> [kV/mm]</b>			<b>84,957</b>
směrodatná odchylka			1,861
variační koeficient			2,191

\*Vzorek b19 prokazuje známky poškození, ke kterému došlo k už před zkouškou  $E_p$ , proto tento vzorek do celkového vyhodnocení není započítán.





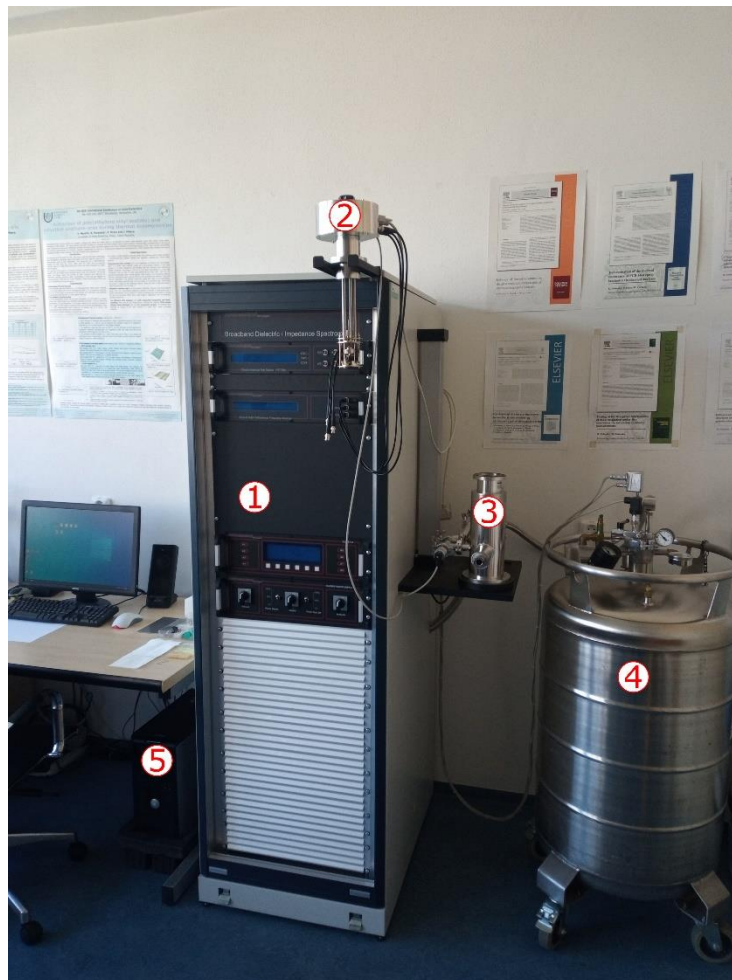
Obr. 8.3: Změna  $E_p$  na konci experimentu oproti dodanému stavu.

### 8.3 Dielektrická spektroskopie

Toto zařízení slouží k měření impedančního spektra  $Z(\omega)$  vzorku materiálu, který je vložen mezi elektrody měřicího přístroje. Materiál vzorku může být pevný nebo kapalný. Jedním ze základních požadavků je, aby měřicí elektrody měly co nejmenší vliv na měření a nezkrusovaly tak naměřená data. Proto je vhodné volit elektrody z takového materiálu, který má dobrou vodivost a zároveň nízký přechodový odpor. Při znalosti rozměru vzorku lze z impedančního spektra snadno určit permitivitu  $\varepsilon(\omega)$ . Moderní přístroje jsou schopné měřit impedanční spektrum v rozmezí od několika mHz až po GHz, což je rozsah 15 dekad. Kromě frekvence však materiálové vlastnosti závisí na dalších parametrech, z nichž nejdůležitější je teplota. [51]

Dielektrický spektrometr *Novocontrol* pro analýzu materiálu je schopen měřit elektrické vlastnosti ve frekvenčním rozsahu od 1  $\mu$ Hz do 3 GHz a teplotním rozmezí od  $-160^\circ\text{C}$  do  $400^\circ\text{C}$ . Analýza spočívá v měření kondenzátoru, který tvoří měřicí elektrody, mezi něž je vložen měřený materiál. Toto ústrojí je pak vloženo do nádoby, která je spojena s tekutým dusíkem pro snadné nastavení vnější teploty. Ze  $Z(\omega)$  je pak vyhodnocena permitivita  $\varepsilon(\omega)$ . Z Obr. 8.4 je vidět, že se přístroj skládá ze čtyř částí. Hlavní část tvoří samotný analyzátor (1), který v sobě zahrnuje systém pro měření impedančního spektra

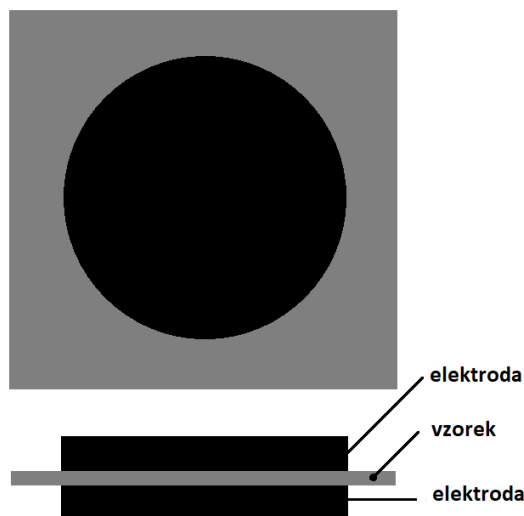
$Z(\omega)$  měřeného kondenzátoru (2). Měřený kondenzátor se poté vloží do nádoby (3), která je spojena s nádobou s tekutým dusíkem (4). Analyzátor je spojený s počítačem (5), který naměřená data zaznamenává. Výstupem jsou pak exportovaná data do textového souboru, s nímž je možné dále pracovat. [51]



Obr. 8.4: BDS Novocontrol.

Uspořádání konstrukce, kam se vkládá měřený kondenzátor, je na Obr. 8.5. (reálné foto viz Příloha E). Na horní straně zařízení je připojen převodník impedance. To umožňuje propojení impedančního měniče s měřeným kondenzátorem pomocí krátkých, vzduchem izolovaných kabelů. Tyto kabely je možné optimalizovat jak pro vysokofrekvenční, tak pro teplotní výkon. Vzhledem k tomu, že polarizace elektrod či účinky přechodového odporu jsou výrazně menší než polarizace ve vzorku, je nejvýhodnější použít standardní konfiguraci, uložení vzorku mezi dvěma rovnoběžnými elektrodami. Takové uspořádání umožňuje snadnou přípravu a uložení vzorku. Systém pro regulaci teploty je navržen tak, aby pokrýval

co největší rozsah teploty a zároveň se přesně stabilizoval v krátkých časech bez překmitů, a umožnil tak rychle změny teploty. [51]



Obr. 8.5: Uspořádání měřeného kondenzátoru.

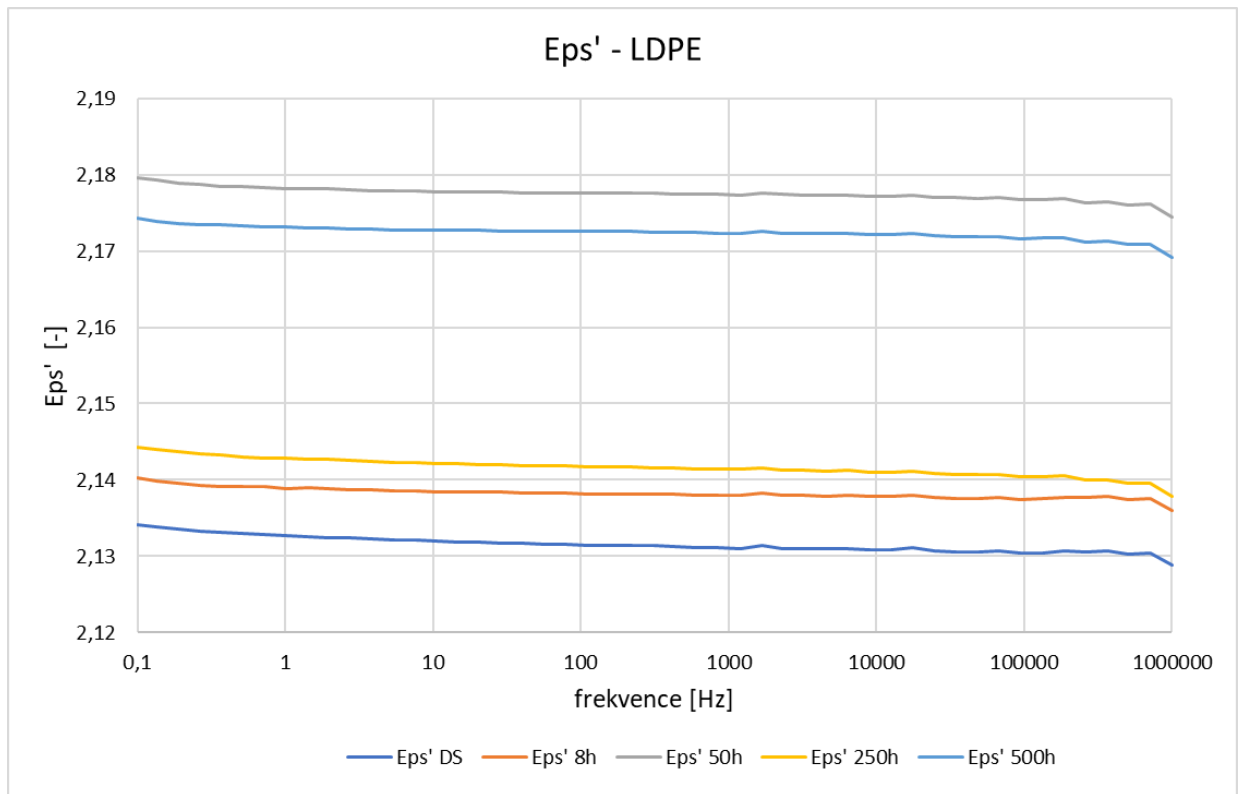
### 8.3.1 Postup měření

Pro měření dielektrické spektroskopie bylo použito pět vzorků LDPE o rozměru 40 x 40 mm a stejné množství vzorků LDPE/HNT. Vzorky byly postupně vkládány do BDS přístroje dle Obr. 8.5. Frekvenční rozsah přístroje byl zvolen od 0,1 Hz do 10 MHz. Při tomto rozsahu byla měřena jak reálná, tak imaginární složka relativní permitivity a ztrátový činitel. Ze softwaru *WinDETA*, pomocí kterého se BDS ovládá, exportuje přímo finální veličiny, tudíž není třeba dalších výpočtů. Hodnoty pro každý materiál byly zprůměrovány a vyneseny do grafů.

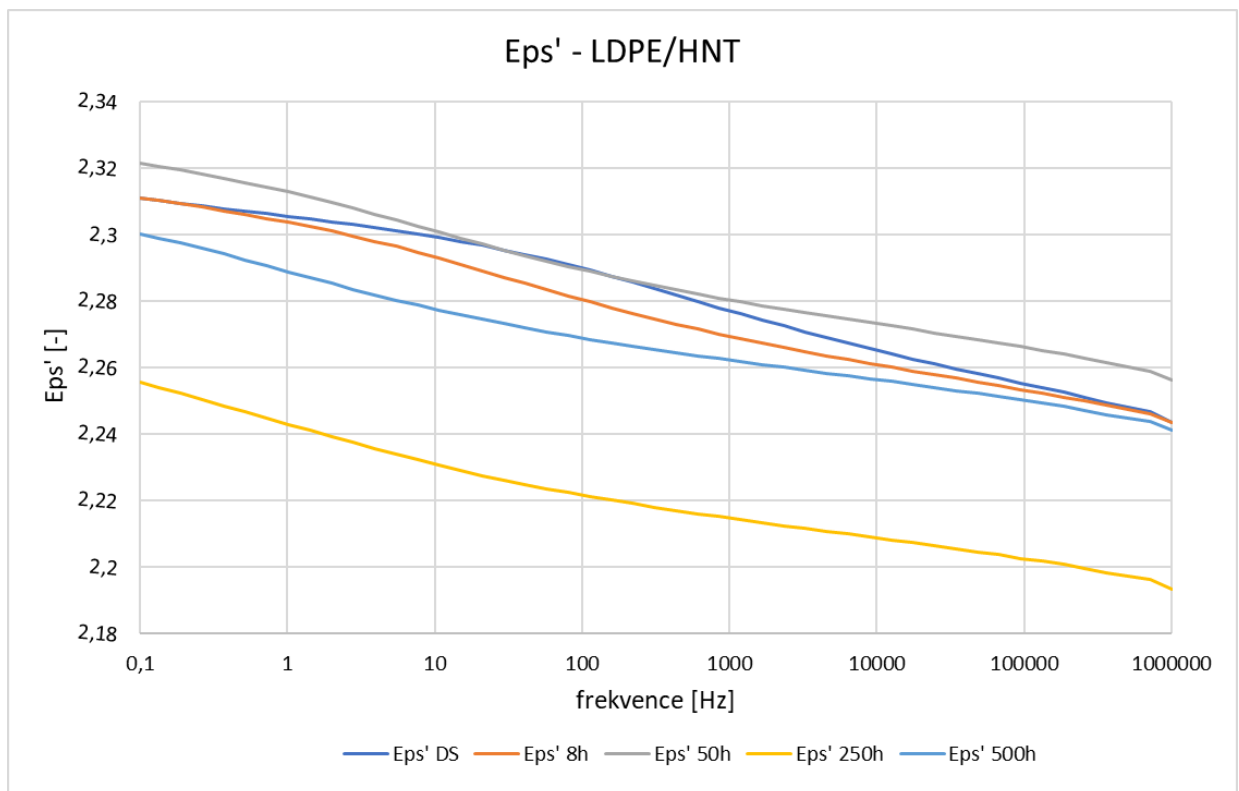
Na Obr 8.6 až 8.11 jsou zobrazeny měřené veličiny ve zvoleném frekvenčním rozsahu.

Jelikož se materiály LDPE a LDPE/HNT používají pro kabely vedení v distribuční síti, je vhodné i více prozkoumat frekvenční oblast okolo 50 Hz. Měření však neprobíhalo přímo na frekvenci 50 Hz, tudíž byly pro Obr. 8.12 až 8.14 zprůměrovány údaje z dvou nejbližších hodnot (41,3 Hz zdola a 57,8 Hz shora).

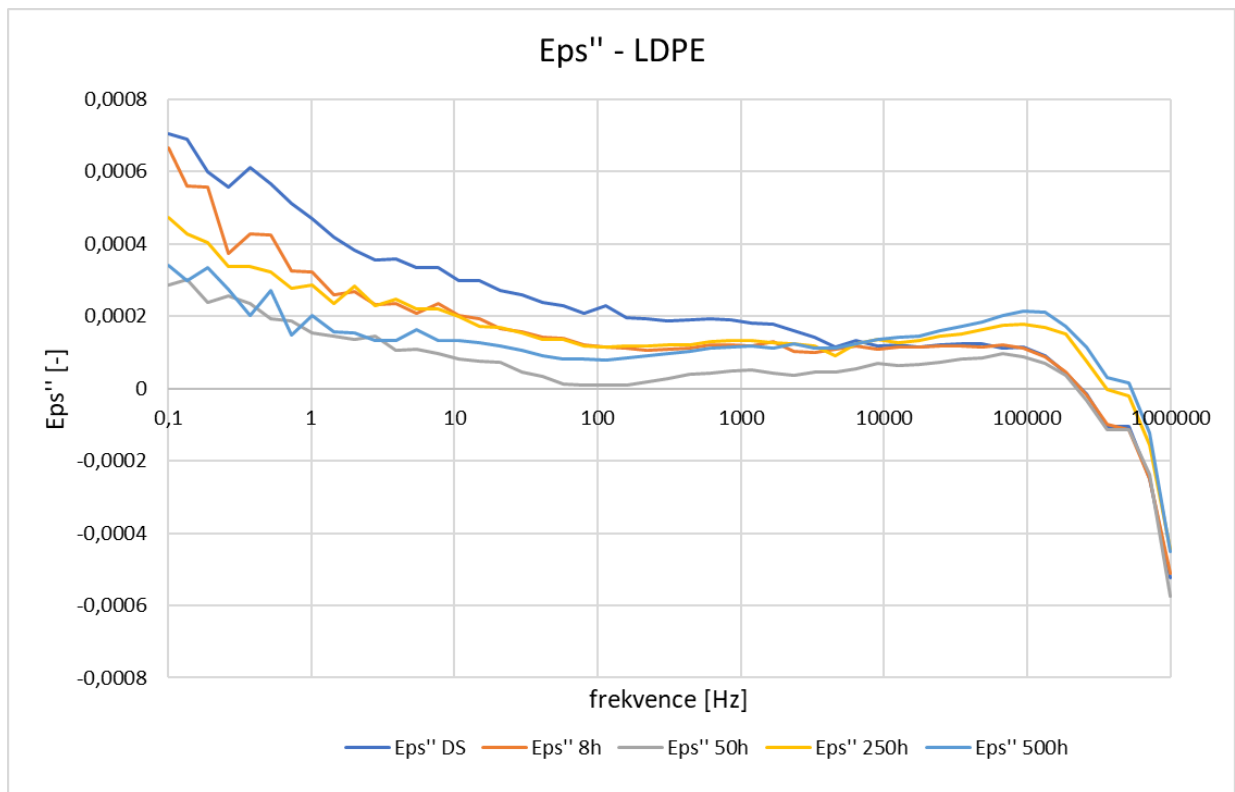
### 8.3.2 Naměřená data



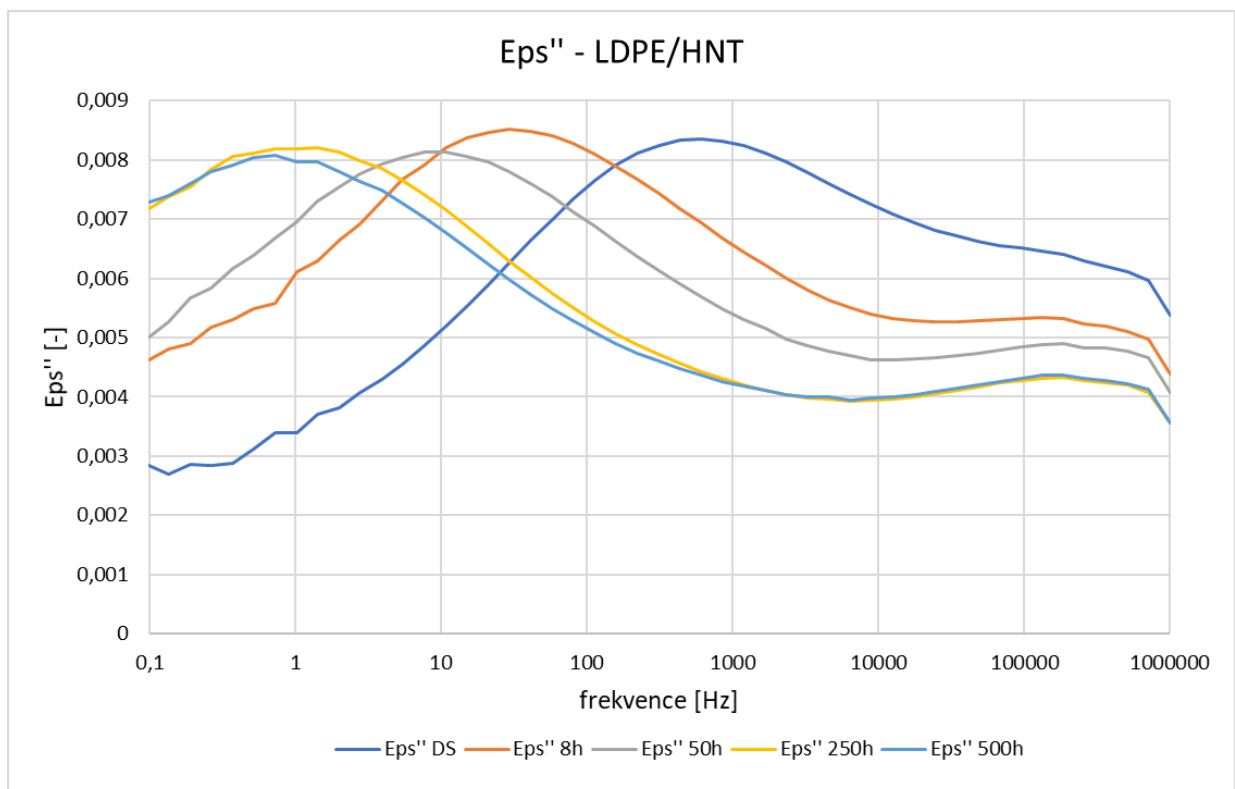
Obr. 8.6: Eps' - LDPE.



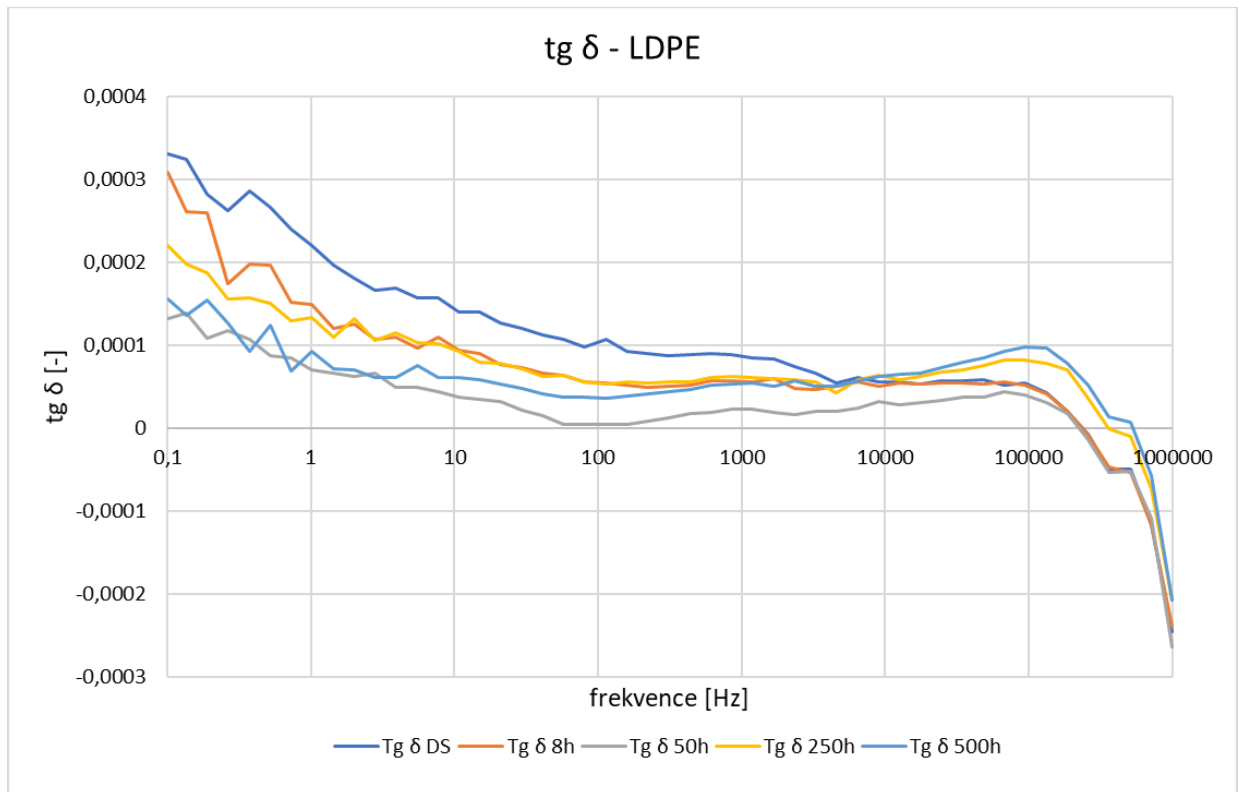
Obr. 8.7: Eps' - LDPE/HNT.



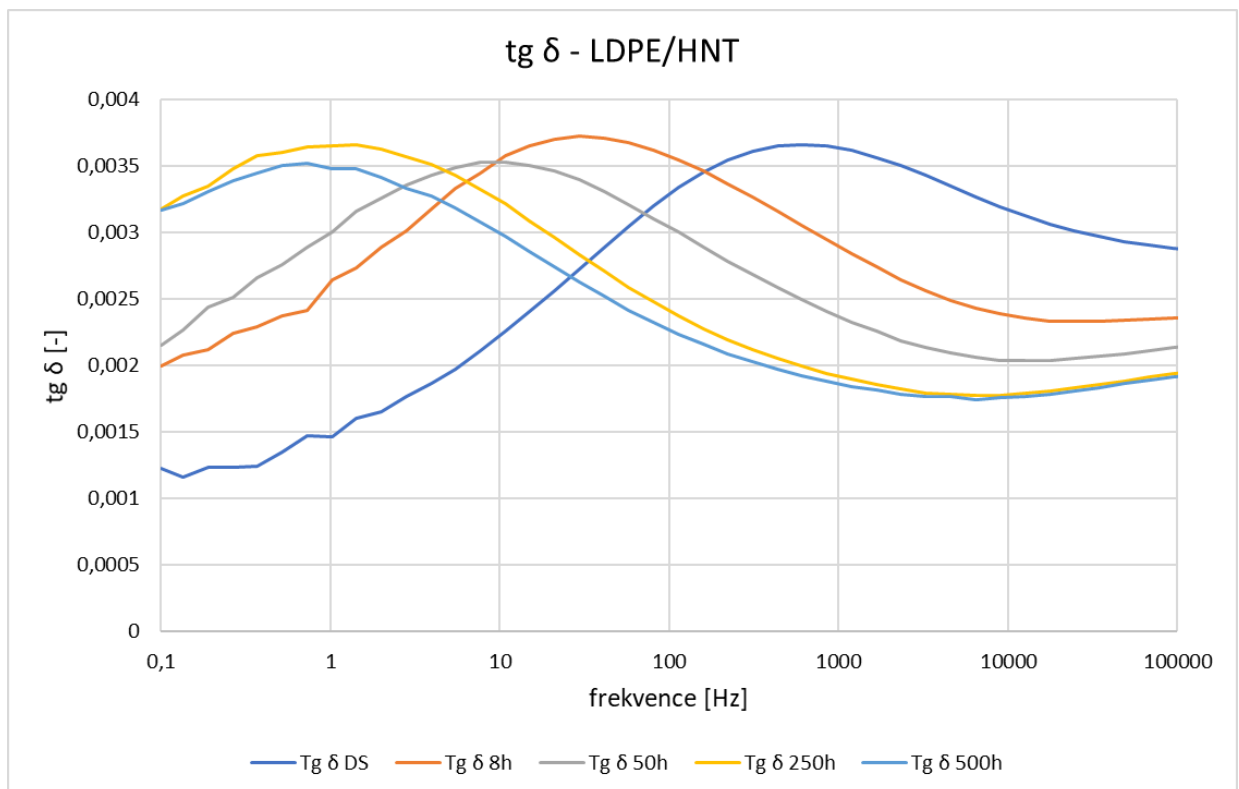
Obr. 8.8: Eps'' - LDPE.



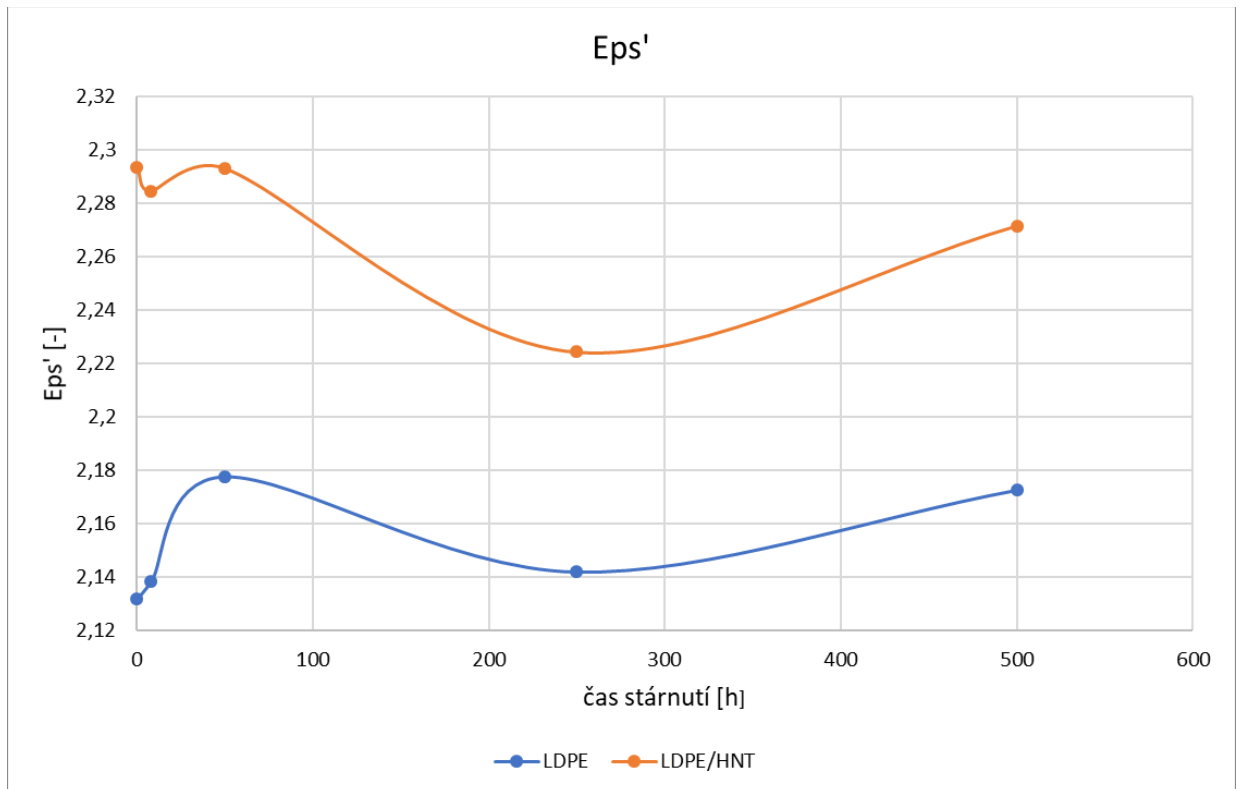
Obr. 8.9: Eps'' - LDPE/HNT.



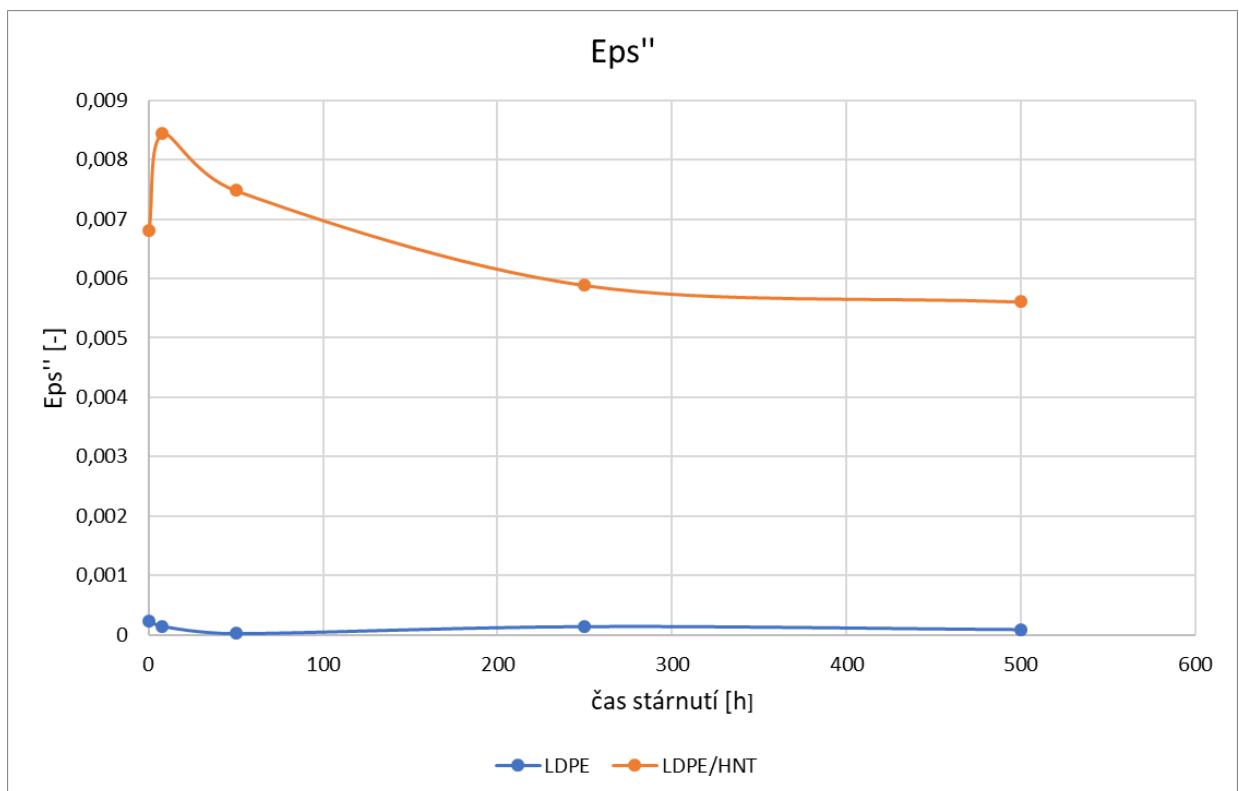
Obr. 8.10: Tg  $\delta$  – LDPE.



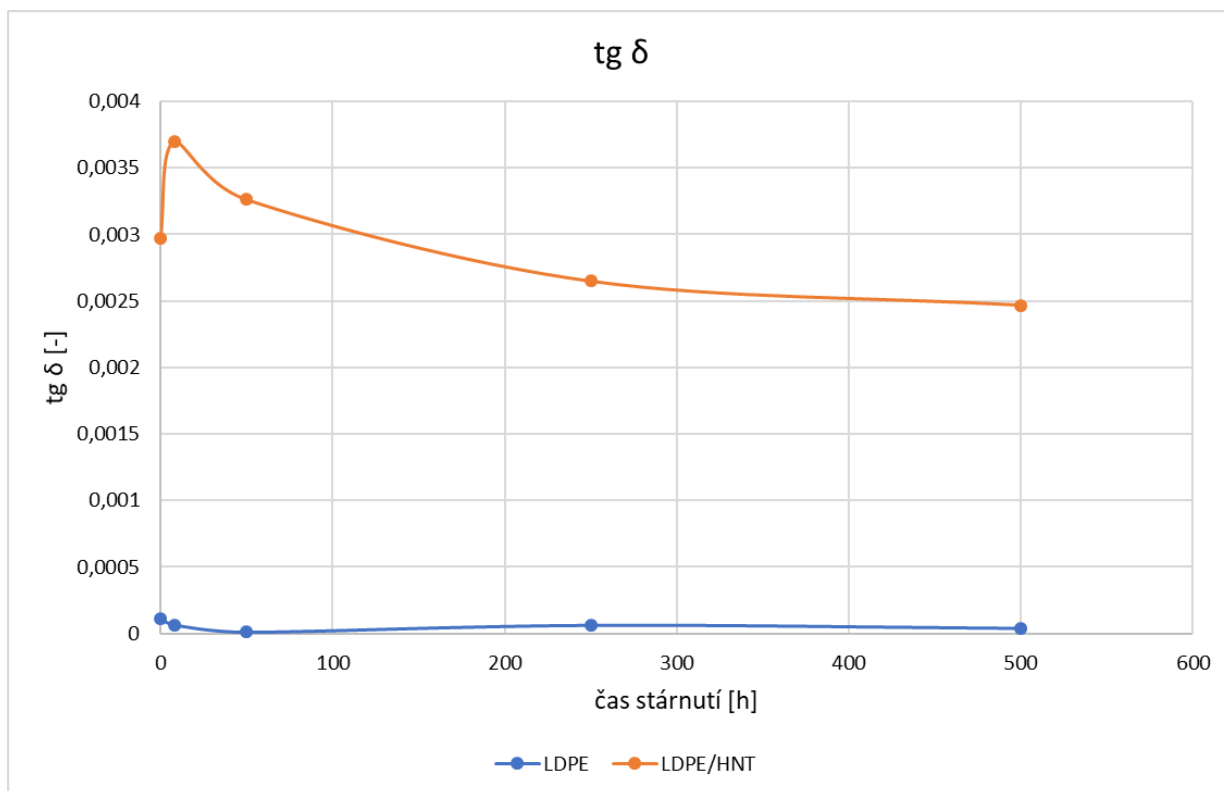
Obr. 8.11: Tg  $\delta$  - LDPE/HNT.



Obr. 8.12: Eps' pro frekvence blízke 50 Hz.

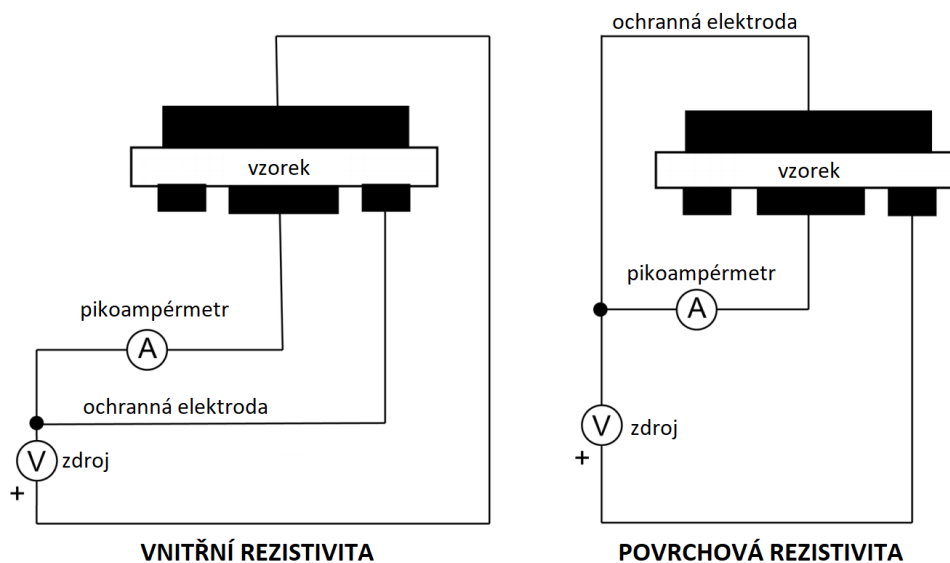


Obr. 8.13: Eps'' pro frekvence blízke 50 Hz.

Obr. 8.14:  $Tg \delta$  pro frekvence blízké 50 Hz.

## 8.4 Měření rezistivity

Měření probíhalo pomocí přístroje na měření rezistivity *Keithley 8009 Resistivity Test Fixture* (viz Příloha F, G) s rozsahem až  $10^{18} \Omega\text{-cm}$  pro vnitřní rezistivitu a až  $10^{17} \Omega$  pro povrchovou rezistivitu. [52]



Obr. 8.15: Schéma pro měření vnitřní a povrchové rezistivity [52].



Princip měření spočívá v aplikaci vnějšího napětí, který je u tohoto přístroje až 1 kV. Díky napětí se v obvodu vytvoří proud, který je přístrojem zaznamenáván. Pro potřeby tohoto experimentu se měří pouze vnitřní rezistivita s přiloženým napětím 1 kV. Rezistivitu lze následně vypočítat dle několika níže uvedených vztahů. [52]

$$R_V = \frac{22,9 \cdot U}{d \cdot I} \quad (8.1)$$

kde:  $R_V$  = vnitřní rezistivita [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]

22,9 = převodní konstanta přístroje

$U$  = měřicí napětí [V]

$d$  = tloušťka vzorku [cm]

$I$  = naměřený proud [A]

$$\sigma = \frac{53,4 \cdot U}{I} \quad (8.2)$$

kde:  $\sigma$  = povrchová rezistivita [ $\Omega$ ]

53,4 = převodní konstanta přístroje

$U$  = měřicí napětí [V]

$I$  = naměřený proud [A]

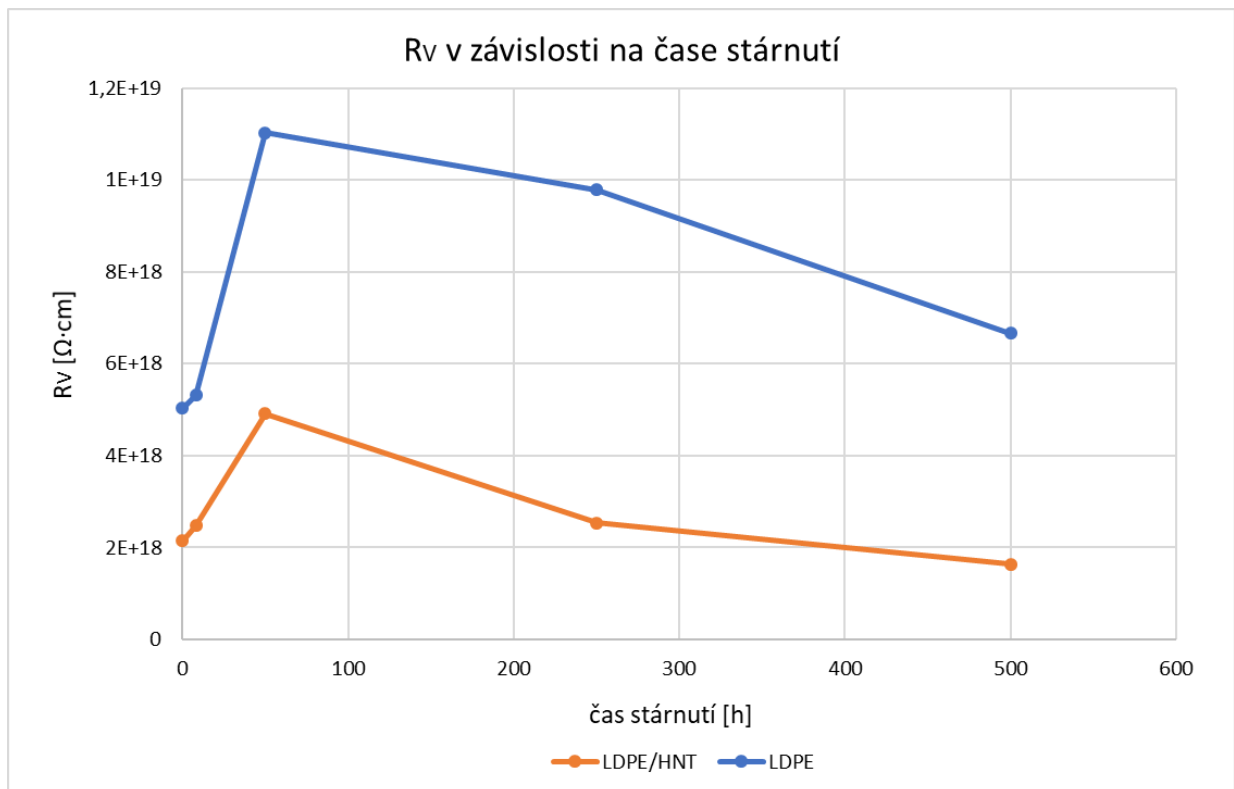
#### 8.4.1 Postup měření

Měřené vzorky o rozměru 90 x 90 mm byly před samotným měřením vloženy na 24 hodin do zkratovací knížky, aby byly vzorky zbaveny elektrického náboje, který mohl přetrvávat z vnějšího napětí ze stárnoucího procesu. Jelikož dle bodu 8.4. byl měřen protékající proud, je třeba výsledné hodnoty přepočítat na hodnoty vnitřní rezistivity dle rovnice 8.1. Pro výpočty bylo použito posledních 10 hodnot při absorpci (od 1778 až do 1798 sekund), z toho důvodu, že při těchto hodnotách už se hodnota proudu měnila pouze nepatrně. Těchto 10 hodnot bylo poté zprůměrováno pro každý vzorek.

Tabulka 8.7: Ukázka výpočtu pro konkrétní vzorek.

čas absorpce [s]	proud [I]	$R_v$ [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]
1778	7,59e-13	7,18e+17
1780	9,19e-13	7,49e+17
1782	9,44e-13	7,30e+17
1784	9,20e-13	7,48e+17
1786	9,02e-13	7,63e+17
1788	8,85e-13	7,78e+17
1790	8,50e-13	8,10e+17
1792	9,29e-13	7,41e+17
1794	9,47e-13	7,27e+17
1796	8,86e-13	7,70e+17
1798	9,07e-13	7,59e+17
tloušťka vzorku A16	0,3326 mm	
<b><math>R_v</math> (průměr)</b>	<b>7,58e+17 <math>\Omega \cdot \text{cm}</math></b>	

$$R_v = \frac{22,9 \cdot 1000}{7,59 \cdot 10^{-13} \cdot 0,1 \cdot 0,3326} = 7,18 \cdot 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$$

Obr. 8.16:  $R_v$  v závislosti na čase stárnutí.

## 8.5 Zhodnocení výsledků

Z grafů uvedených v předchozích kapitolách vyplývá následující:

- $E_p$

Při vyhodnocení  $E_p$  je vidět, že hodnoty  $E_p$  se oproti dodanému stavu zvýšily, což neodpovídá teoretickým předpokladům. Pravděpodobně došlo ke změnám ve struktuře materiálu, na jejichž rozbor by bylo potřeba provést strukturální analýzy.

Z hodnot naměřených v dodaném stavu plyne, že příměs HNT negativně ovlivňuje elektrickou pevnost, a to snížením její hodnoty o přibližně 9 % oproti čistému LDPE.

- $E_{ps}'$

Lze říci, že reálná složka relativní permitivity  $E_{ps}'$  se v průběhu stárnutí u obou materiálů nezměnila. Viditelné odchylky v časech 50 h, 500 h u LDPE a 250 h u LDPE/HNT lze zanedbat, jelikož časy před nebo po těchto zmíněných jsou opět v normálu. Neexistuje žádný trend, který by ukazoval, že by se měly hodnoty v dalších časech měnit. Zmíněné

odchylky lze tedy přičíst možné nepřesnosti při měření, například odlišným teplotám v laboratoři ve dnech měření.

U materiálu LDPE se reálná složka relativní permitivity  $E_{ps}'$  s frekvencí nemění a zůstává na hodnotách okolo 2,14. U LDPE/HNT lze pozorovat zvyšující se hodnoty se snižující se frekvencí a to postupně od 2,24 při 1 MHz do 2,32 při 0,1 Hz. Při zaměření se na frekvence blízké 50 Hz hodnoty vykazují během posledního intervalu stárnutí rostoucí trend.

- **$E_{ps}''$**

Pro samotný LDPE platí, že imaginární složka relativní permitivity se v průběhu stárnutí nemění. Hodnota však roste s klesající frekvencí, a to dokonce ze záporných hodnot při frekvencích blízkých 1 MHz až do hodnot 0,0007 při 0,1 Hz.

U LDPE s příměsí HNT však nastává zajímavé zjištění, kdy se v průběhu stárnutí lokální maximum  $E_{ps}''$  posouvá směrem k nižším frekvencím. Lokální maximum zůstává však stále na stejné hodnotě přibližně 0,0085. Během posledního stárnutího intervalu se lokální maximum změnilo pouze minimálně a lze předpokládat, že by se dál neposunovalo.

- **$\text{tg } \delta$**

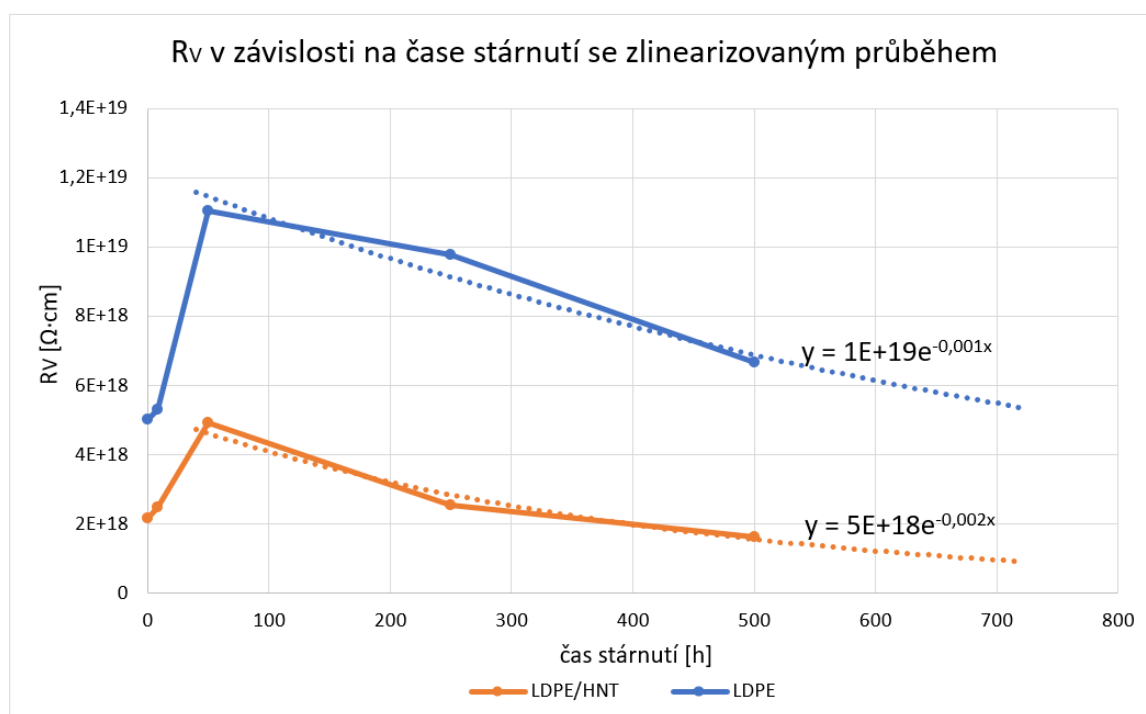
Jelikož je ztrátový činitel veličina vycházející z obou výše uvedených složek relativní permitivity, platí pro něj stejné výsledky. Pro LDPE vykazuje ztrátový činitel rostoucí charakter se snižující se frekvencí. U LDPE/HNT se opět vyskytuje posouvající se lokální maximum.

- **$R_V$**

Hodnoty vnitřní rezistivity potvrzují teoretické předpoklady, které uvádí, že hodnota  $R_V$  se u LDPE pohybuje v rozmezí  $10^{15}$ – $10^{18}$ . Během stárnutí se vlastnosti izolace zhoršují, a tedy hodnoty  $R_V$  se dle očekávání (při zanedbání prvních dvou měření, kde mohlo dojít ke změnám ve struktuře materiálu) v čase snižují.

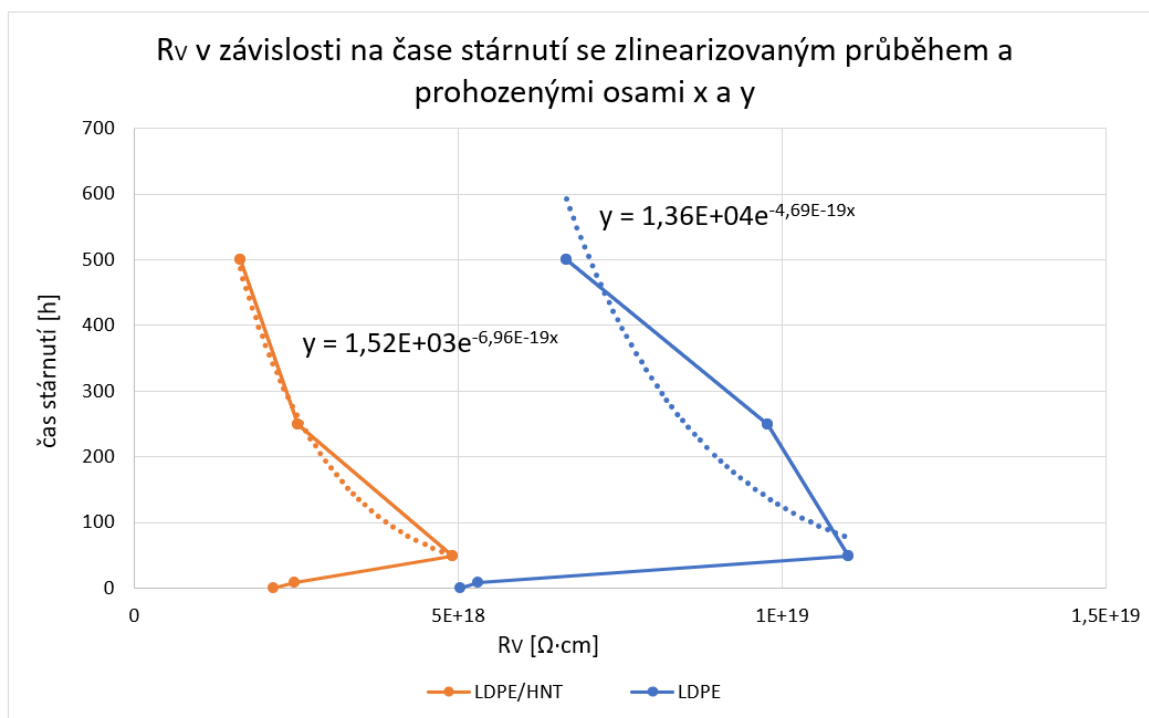
### 8.5.1 Stanovení životnosti při AC stárnutí

Jelikož byl tento experiment prováděn pouze při jedné hodnotě stárnucího napětí, je nutné pro stanovení životnosti použít metody hledání koncového bodu popsané více v kapitole 6.2. Tato metoda byla aplikována na základě zjištěných dat z naměřené vnitřní rezistivity  $R_V$ , jelikož ostatní parametry se příliš nemění, nebo u nich nelze předpokládat další vývoj. Při výpočtu byly zanedbány první dva intervaly stárnutí. Pro potřeby zlinearizování průběhu a získání funkčního předpisu byl použit exponenciální tvar, jelikož zlinearizovaný průběh exponenciálního tvaru se více blíží naměřeným hodnotám než při použití mocninného tvaru.



Obr. 8.17:  $R_V$  v závislosti na čase stárnutí se zlinearizovaným průběhem.

Po proložení spojnicí trendu exponenciálního charakteru jsou získány funkce, pomocí nichž lze dopočítat hodnotu doby stárnutí pro zvolený koncový bod hodnoty  $R_V$ . Tento funkční předpis však po zpětném vyjádření  $x$  není příliš přesný, a proto jsou na Obr. 8.18 pro lepší počítání prohozeny osy  $x$  a  $y$ . Po opětovném zlinearizování jsou získány vztahy, do nichž lze přímo dosazovat zvolený koncový bod  $R_V$ .



Obr. 8.18:  $R_V$  v závislosti na čase stárnutí se zlinearizovaným průběhem a prohozenými osami  $x$  a  $y$

Tabulka 8.8: Doby do dosažení koncového bodu pro různé koncové body  $R_V$ .

zvolený koncový bod $R_V$ [Ω·cm]		1E+18	5E+17	1E+17	5E+16	1E+16	5E+15	1E+15
LDPE	doba do dosažení koncového bodu [h]	8509	10757	12977	13285	13536	13568	13593
LDPE/HNT		753	1068	1414	1464	1505	1511	1515

Rovnice pro výpočet dob do dosažení koncového bodu:

- LDPE

$$y = 1,36 \cdot 10^4 \cdot \exp(-4,69 \cdot 10^{-19} \cdot x)$$

- LDPE/HNT

$$y = 1,52 \cdot 10^3 \cdot \exp(-6,96 \cdot 10^{-19} \cdot x)$$

kde  $y$  = doba do dosažení koncového bodu a  $x$  = zvolený koncový bod.

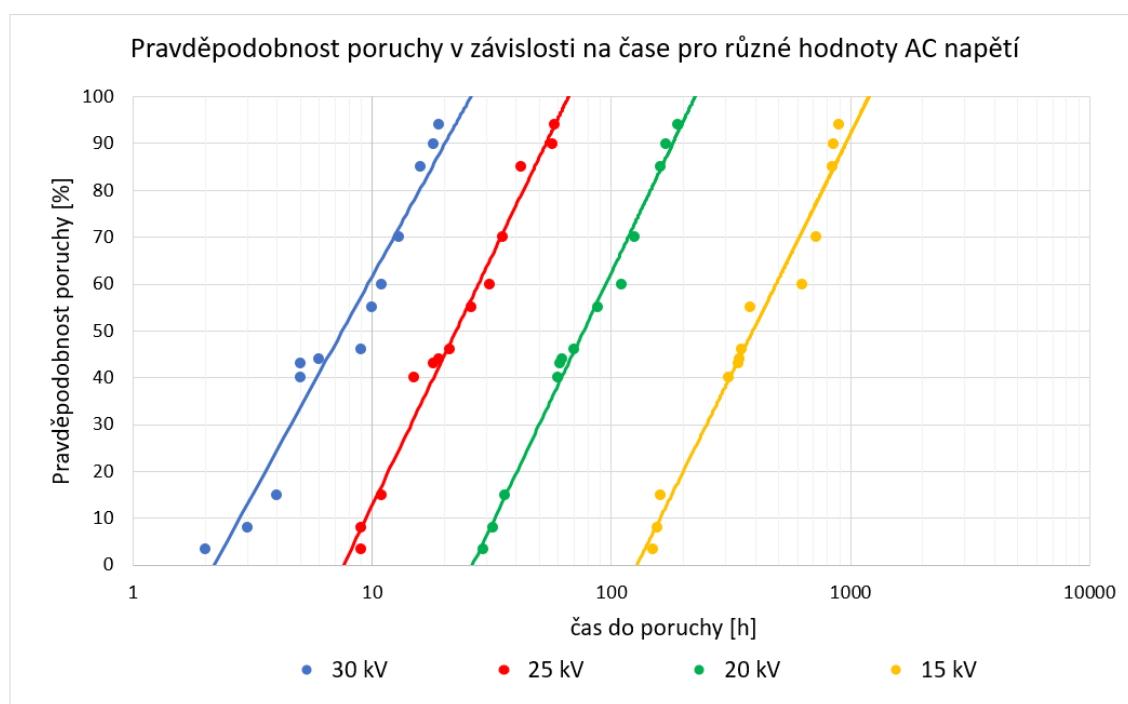
Jako poslední v tabulce byla zvolena hodnota  $10^{15}$ , což je hodnota udávaná jako minimální hodnota pro  $R_V$  dle Tabulky 4.2. Při intenzitě elektrického napětí  $E$  z Tabulky 8.9 je doba k dosažení koncového bodu u čistého LDPE téměř 13 600 hodin, zatímco u LDPE s příměsí HNT je to pouze 1515 hodin. Při zanedbání mírné odchylky mezi elektrickými

intenzitami  $E$  působících na oba druhy vzorků, lze považovat obě působící intenzity  $E$  za stejně velké. Z tabulky 8.8 tedy plyne, že příměsí 3 % HNT do LDPE se sníží jeho životnost na téměř desetinu.

Tabulka 8.9: Přepočet stárnocího napětí 1,5 kV na elektrickou intenzitu  $E$ .

vzorek	prům. tloušťka [mm]	$E$ [kV/mm]
LDPE	0,330	4,550
LDPE/HNT	0,306	4,908

Pro přepočítání životnosti na jinou napěťovou úroveň by bylo třeba změřit rezistivitu  $R_V$  při jiném stárnocím napětí, aby se dal předpovědět další vývoj, jak je tomu v Obr. 8.19.



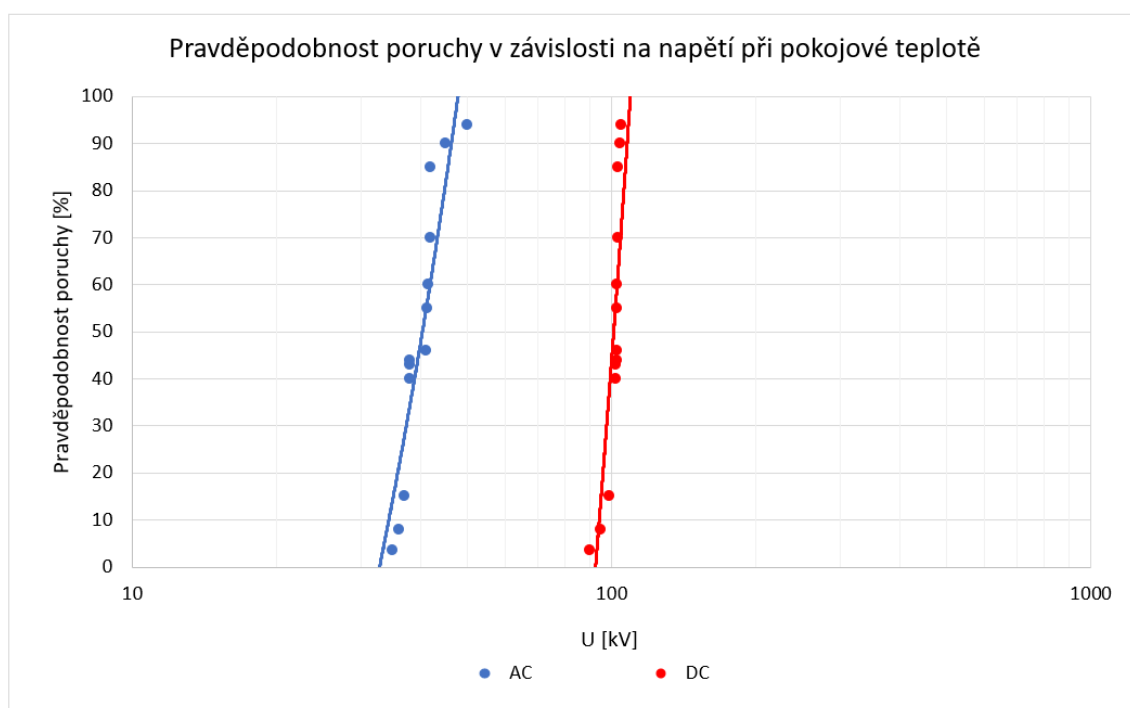
Obr. 8.19: Pravděpodobnost poruchy v závislosti na čase pro různé hodnoty AC napětí [41].

V grafu jsou znázorněny pravděpodobnosti poruchy v závislosti na provozní době pro 4 různé úrovně napětí (30 kV, 25 kV, 20 kV, 15 kV) pro polymerní materiál na bázi termoplastu PET. V článku [41] však nejsou uvedeny rozměry vzorků, tudíž nelze aplikovat stejný vývoj životnosti při jiných napěťových hladinách i na tento experiment.

### 8.5.2 Stanovení životnosti pro DC stárnutí

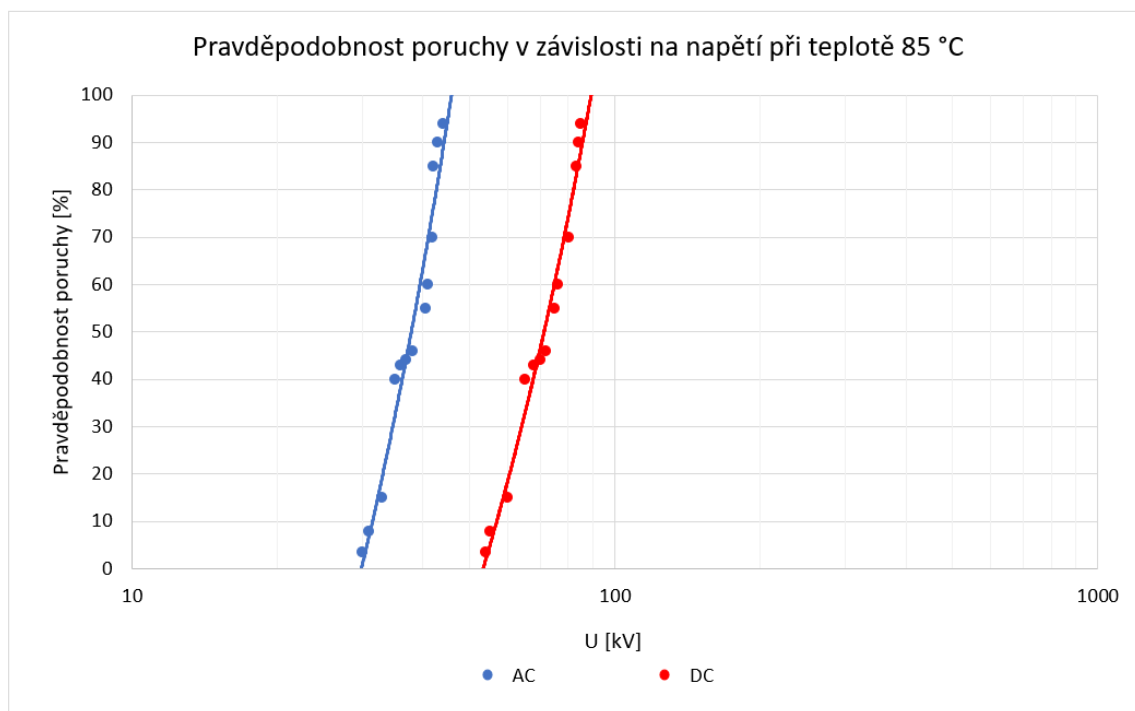
Pro stanovení životnosti při namáhání DC napětím, bude použit článek [41] z důvodů uvedených v kapitole 7. Ve zmíněném experimentu se testuje materiál PET, který byl podroben několika zátěžím, jak při působení AC napětí, tak při DC napětí.

Jako první proběhly zkoušky na nezestárnutém materiálu při pokojové teplotě (Obr. 8.20), teplotě 85 °C (Obr. 8.21). Poslední zkouška je na navlhnutém materiálu (Obr. 8.22), při čemž byly vzorky PET nemočeny po dobu 14 dnů ve vodě, poté byly měřeny při pokojové teplotě. Výsledky těchto AC i DC měření jsou zobrazeny na grafech níže.

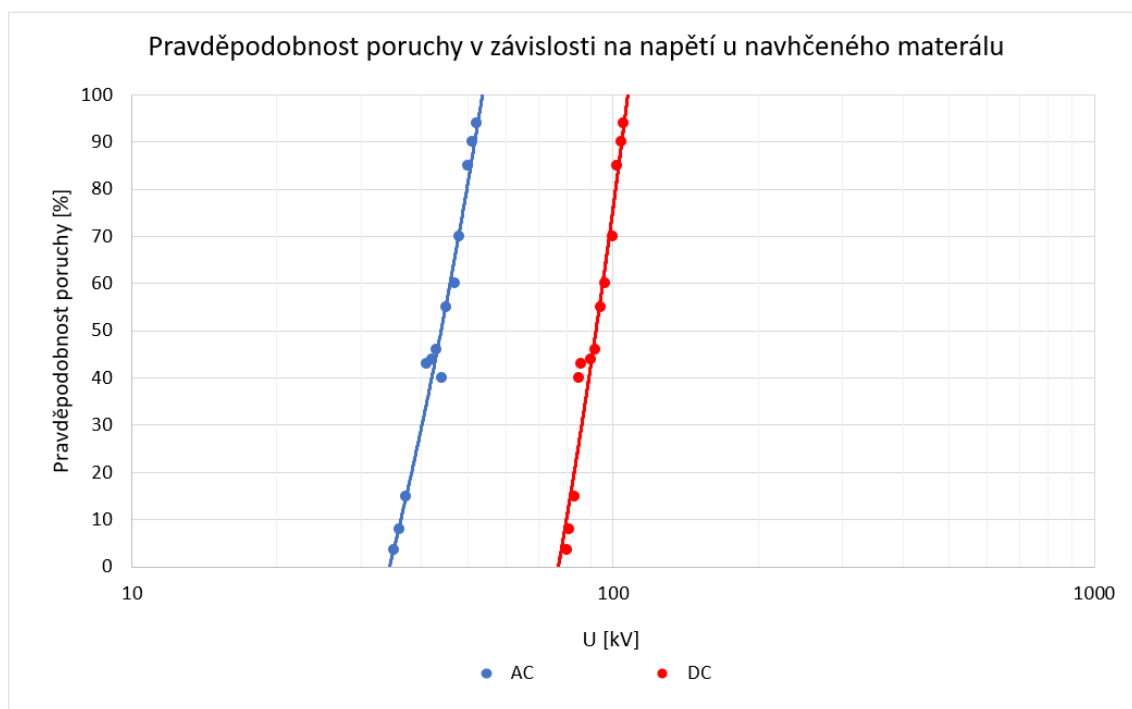


Obr. 8.20: Pravděpodobnost poruchy v závislosti na napětí při pokojové teplotě [41].





Obr. 8.21: Pravděpodobnost poruchy v závislosti na napětí při teplotě 85 °C [41].

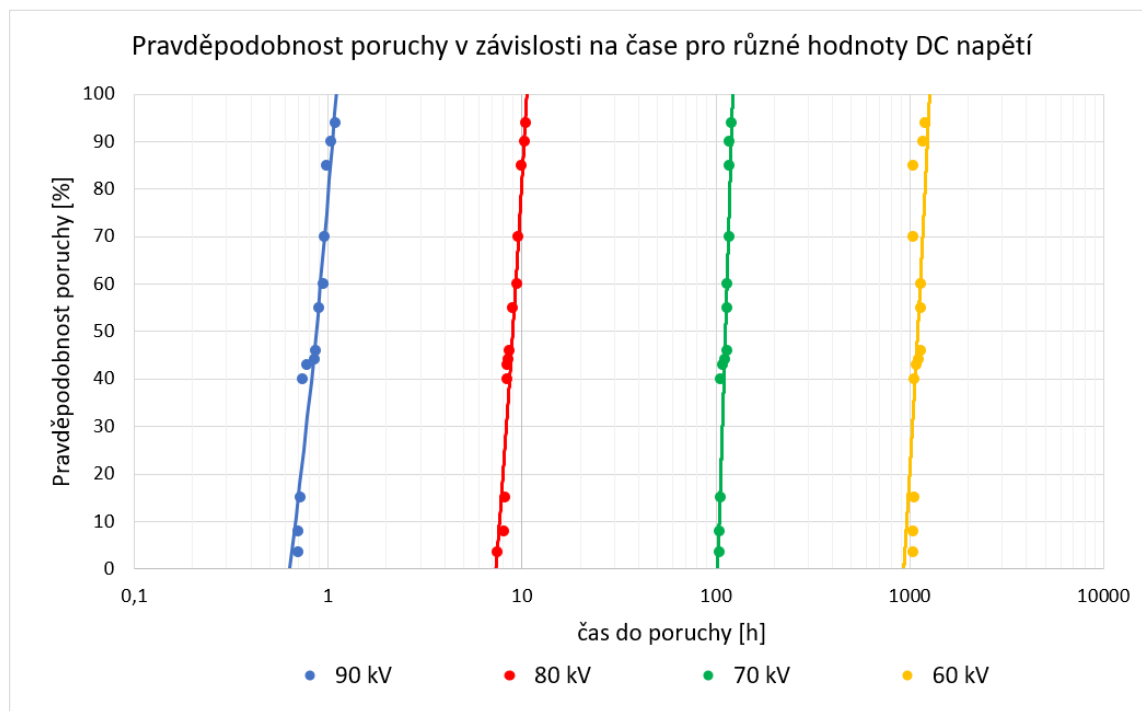


Obr. 8.22: Pravděpodobnost poruchy v závislosti na napětí u navhčeného materiálu [41].

Z grafů je patrné, že při AC napětí dochází k poruše při výrazně nižším napětí než u DC napětí. Dle [41] je to způsobeno hlavně kvůli dielektrickým ztrátám, které jsou při AC namáhání větší. Největší pokles napětí je při měření za zvýšené teploty. Naopak téměř žádná

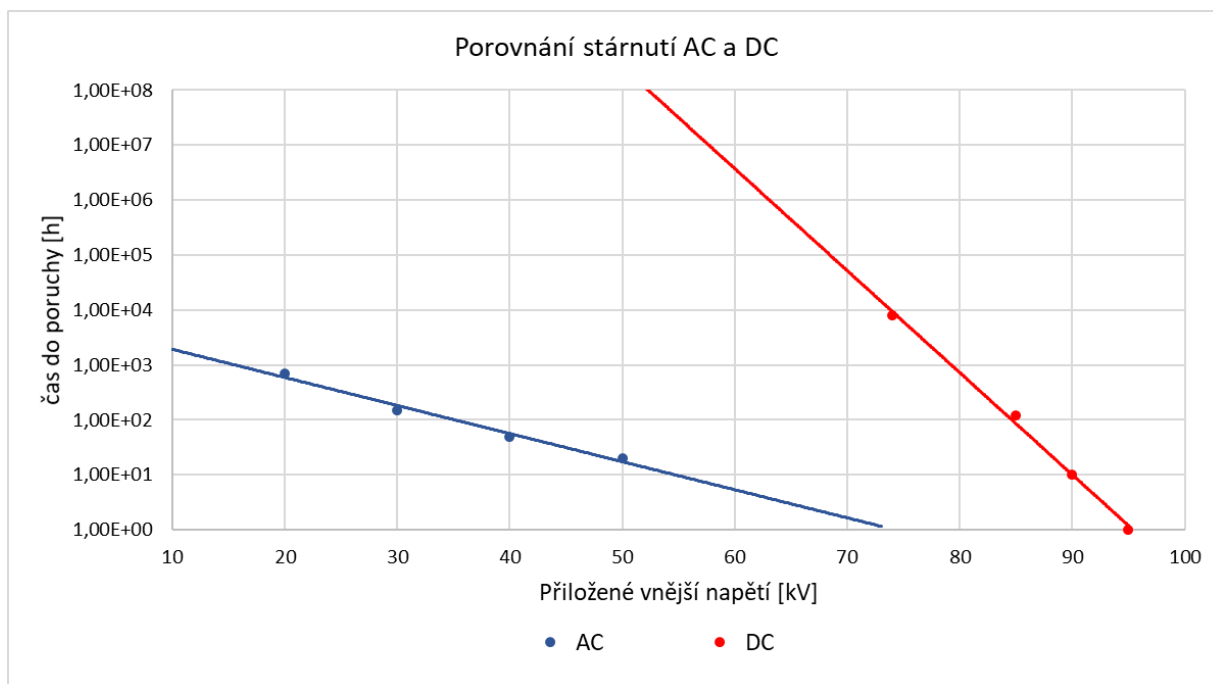
změna nenastala při měření na navlhnutém materiálu, kdy voda během 24 hodin nestihla prorazit jednotlivé vrstvy materiálu.

Další experimentem bylo AC i DC stárnutí, při kterém byly vzorky PET vloženy mezi elektrody umístěné v oleji pro eliminaci výskytu částečných výbojů.



Obr. 8.23: Pravděpodobnost poruchy v závislosti na čase pro různé hodnoty DC napětí [41].

Z porovnání Obr. 8.19 a 8.23 je zřejmé, že k poruše dojde výrazně dříve při AC namáhání. Dle [41] je to způsobeno vyššími dielektrickými ztrátami při AC stárnutí a nižšími ohmickými ztrátami při DC stárnutí. Navíc při AC namáhání dochází k většímu výskytu částečných výbojů, které degradační proces zrychlují. Přehledný průběh AC a DC stárnutí je zobrazen na Obr. 8.24.



Obr. 8.24: Porovnání AC a DC stárnutí [41].

## Závěr

Určování životnosti může být prováděno několika metodami založené na statistických výpočtech. Nejedná se však o exaktní přístup, jde o výpočty vycházející z empirických vztahů. Je tedy nutné, aby před samotným určováním životnosti bylo o daném systému zjištěno a změřeno co nejvíce informací. Díky dostatečné diagnostice posuzovaného systému lze pak do empirických vztahů dosadit takové konstanty, které mohou výslednou životnost určit s vyšší přesností.

Zrychlený proces stárnutí byl prováděn při jedné hodnotě napětí 1 kV, tudíž pro vyhodnocení životnosti bylo třeba použít metodu hledání koncového bodu. Sledovanými parametry byly elektrická pevnost, vnitřní rezistivita, ztrátový činitel, reálná a imaginární složka relativní permitivity. Tyto hodnoty byly zaneseny do grafu v závislosti na době stárnutí. Následně byla grafem proložena spojnice trendu mocninného charakteru, do již předpisu se za čas dosadily zvolené koncové body.

Z vyhodnocení vnitřní rezistivity  $R_V$  bylo zjištěno, že životnost čistého LDPE při intenzitě  $E=4,5 \text{ kV/mm}$  je necelých 13 600 hodin, zatímco LDPE s příměsí 3 % HNT při téměř stejné intenzitě  $E$  pouze 1515 hodin. Příměs HNT má tedy výrazný negativní vliv na životnost LDPE. Dále bylo zjištěno, že AC stárnutí je výrazně rychlejší a to zejména kvůli větším dielektrickým ztrátám, než v případě DC stárnutí.

Pro přesnější vyhodnocení by bylo vhodné experiment zrychleného stárnutí provádět při více úrovních napětí. V tomto případě byl však pokus omezen počtem vzorků a kapacitou zdroje pro stárnutí. Dále je třeba brát ohled na fakt, že se tento experiment týkal pouze elektrického stárnutí. V praxi by však na materiál působily další vlivy, zejména teplota. Při aplikaci LDPE/HNT jako izolace podmořských kabelů by navíc značně na materiál působila vlhkost. Všechny tyto další vlivy by životnost více snižovaly, proto je nutné s nimi pro praktické použití počítat či provést další experimenty zaměřené na tepelné a povětrnostní stárnutí.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KÜCHLER, Andreas. *High voltage engineering*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-642-11992-7.
- [2] *SF6 Gas or Sulfur Hexafluoride Gas Properties*. Electrical4U [online]. 2019 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/sulfur-hexafluoride-sf6-gas-properties/>
- [3] BOUDA, Václav. *Materiály pro elektrotechniku*. Praha. České vysoké učení technické. 2000. ISBN 80-010-2232-3.
- [4] *Application Guide. ABB AB* [online]. [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1HSM%209543%2023-02en&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [5] *Fluorid sírový SF6*. Integrovaný registr znečišťování [online]. [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/40>
- [6] PREVE, Christian, R. MALADEN, D. PICCOZ, J.-M. BIASSE. *Validation Method and Comparison of SF6 Alternative Gases*. CIGRE Session 2016. Paris. 2016.
- [7] *Transformer Oil: Testing, Types & Properties*. Electrical 4 U. 2019 [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/transformer-insulating-oil-and-types-of-transformer-oil/>
- [8] BARTHE, pascal, M. CHAUGNY, S. ROUDIER, L. D. SANCHO. *Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách (BAT) pro rafinaci minerálních olejů a plynů*. JRC science and policy reports. 2015 [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/3/BREF\\_REF\\_02\\_2017\\_CS\\_FINAL\\_1.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/3/BREF_REF_02_2017_CS_FINAL_1.pdf)
- [9] *Oil-Filled Cable*. McGraw-Hill Dictionary of Scientific & Technical Terms. 2003. [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Oil-Filled+Cable>
- [10] KRACÍK, Jaroslav. *Keramika*. Geologie VŠB. [online]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/keramika.html>
- [11] SKÁCEL, Vladimír, Jana FRIEDLOVÁ, Karel NEJEZCHLEB. *Keramické materiály a jejich použití v elektrotechnice*. [Online] 2006. [cit. 2020-04-09]. <http://www.t-ceram.com/csvts-2006.pdf>
- [12] *Ceramic insulator 3d model*. Turbosquid. [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.turbosquid.com/3d-models/ceramic-insulator-3d-model/976394>
- [13] *Glass Insulator Disks On A Power Line*. CanStockPhoto. [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.canstockphoto.com/glass-insulator-disks-on-a-power-line-63866464.html>
- [14] DISSADO L.A., FOTHERGILL J.C. *Electrical degradation and breakdown in polymers*, IEE Materials and Devices Series 9, Peter Peregrinus, 1992. ISBN 978-0863411960.
- [15] DOEDENS, Espen H. *Organic Contaminants in Crosslinked Polyethylene for Demanding High Voltage Applications*. Chalmers University of technology. Department of Materials and Manufacturing Technology. 2012. 58 s., 28 s. příloh. Vedoucí diplomové práce Dr. Susanne Nilsson.
- [16] KIM, C, Z. JIN, X. HUANG, P. JIANG, *Polym.Degrad. and Stabil.* 2007.

- [17] SHIMIZU N, C. LAURENT. *Electrical tree initiation*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. vol.5, no.5, s. 651-659. 1998.
- [18] EICHHORN, R.M. *Treeing in Solid Extruded Electrical Insulation*. IEEE Transactions on Electrical Insulation. vol.EI-12, no.1, s. 2-18. 1977.
- [19] PEACOCK, A. J. *Handbook of Polyethylene: Structures, Properties and Applications*. CRC Press. 2000. ISBN 978-0-824-79546-7.
- [20] ARGAUT, P., H. AUCLAIR, E. FAVRIE. *Development of 500 kV low density polyethylene insulated cable*. 3rd International Conference on Power Cables and Accessories 10kV - 500kV. London. 1993.
- [21] PLATE, W. J., T. H. LING, J.F. NUCCIO. *Reassessment of Polyethylene Power Cable*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. vol.82, no.69, s. 990-1002. 1963.
- [22] ZHAO, Junwei. *Dynamics of space charge and electroluminescence modelling in polyethylene*. University of Southampton. Faculty of Physical and Applied Science. Electronics and Computer Science. 144 s. 2012.
- [23] MOORE, G. F. *Electric cables Handbook, 3rd Edition*. BICC Cables Ltd. 1997. ISBN 978-0-632-04075-9.
- [24] VOGELSANG, R., O. SEKULA, H. NZFFENEGGER, W. WEISSENBERG. *Long-term experiences with XLPE cable systems up to 550 kV*. Konferenca slovenskih elektroenergetikov. CIGRE SC B1. Kranjska Gora. 2009.
- [25] KHALIL SALAH, M. *International research and development trends and problems of HVDC cables with polymeric insulation*. IEEE Electrical Insulation Magazine. vol.13, no.6, s. 35-47. 1997.
- [26] *Electrical Properties of Plastic Materials*. Professional Plastics. [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/ElectricalPropertiesofPlastics.pdf>
- [27] CHEN, N., C. WAN, Y. ZHANG. *Effect of nano-CaCO<sub>3</sub> on mechanical properties of PVC and PVC/Blendex blend*. ELSEVIER. vol.23, no.2, s. 169-174. 2004.
- [28] CHOO CHIN TZE, Wilson. *Space Charge Determination in HVDC Power Cable and its Influence on Electric Field*. University of Southampton. Faculty of engineering, science and Mathematics. School of electronics and computer science. 189 s., 9 s. příloh. 2010.
- [29] SILLARS, R.W. *Electrical insulating materials and their application*. Peter Peregrinus Ltd. Herts. 1973. ISBN 0901223409.
- [30] *PVC Cables*. Relemac. [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <http://www.relemaccables.com/pvc-cables.html>
- [31] LIU, Wenfeng, Lu CHENG, Shengtao LI. *Review of electrical properties for polypropylene based nanocomposite*. ELSEVIER. Composites communications. vol.10. s. 221-225. 2018.
- [32] MADDAH, H.A. *Polypropylene as a promising plastic a review*. American Journal of Polymer Science. vol.6, no.1, s. 1-11. 2016.
- [33] *Co znamená PET, HDPE, BOPP, C/PE či ABS?*. samosebou.cz. 2019. [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2019/04/12/co-znamená-pet-hdpe-bopp-c-pe-ci-abs/>

- [34] NASH, J.I. *Biaxially oriented polypropylene film in power capacitors*. Polymer Engineering and science. vol.18, no. 13, s. 862-870. 1988.
- [35] KURAHASHI, K., Y. MATSUDA, Y. MIYASHITA, T. DEMURA, A. UEDA, K. YOSHIDO. *The application of novel polypropylene to the insulation of electric power cable*. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. 2002.
- [36] TANAKA, T. *Dielectric nanocomposites with insulating properties*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. vol.12, no.5, s. 914-928. 2005.
- [37] MENTLÍK, Václav, J. PIHERA, R. POLANSKÝ, P. PROSR, P. TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. BEN – technická literatura. Praha. 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [38] IEC 62271-100. *High-voltage switchgear and controlgear – part 100: Alternating-current circuit-breakers*. Geneva: International standart, 2008.
- [39] IEEE Std C37.100.1. *IEEE Standard of Common Requirements for High Voltage Power Switchgear Rated Above 1000V*. New York: IEEE-SA Standards Board, 2007.
- [40] LAURENC, Jiří. *Rázový impulz „Surge“*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~laurenc/download/emc-surge.pdf>
- [41] FEILAT, Eyad, S. GRZYBOWSKI, P. KNIGHT, L. DORIOTT. *Breakdown and aging behavior of composite insulation system under DC and AC high voltages*. WSEAS Transactions on Circuits and Systems 4(7). s. 780-878. 2005.
- [42] CACCIARI, M., G. C. MONTANARI. *Optimum design of life tests for insulating materials, systems and components*. IEEE Transactions on Electrical Insulation. vol.26, no.6, s. 1112-1123. 1991.
- [43] SOUČEK, Jakub. *Degradační procesy v elektroizolačních strukturách*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Disertační práce. 2016.
- [44] *Weibullovo rozdělení*. Matematická biologie. [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=aplikovana-analyza-klinicky-a-biologicky-dat--aplikovana-analyza-preziti--parametricke-odhady--hlavni-rozdeleni-pravdepodobnosti-v-analize-preziti--weibullovo-rozdeleni>
- [45] FEILAT, Eyad. *Lifetime Assessment of Electrical Insulation*. Electric Field. Chapter 11. InTechOpen. 2018.
- [46] ČSN EN 62068-1 *Elektroizolační systémy – Elektrická namáhání vyvolaná opakovanými impulzy*. Všeobecná metoda hodnocení elektrické odolnosti. 2004.
- [47] GRZYBOWSKI S. S. BANDARU. *Effect of multistress on the lifetime characteristics of magnet wires used in flyback transformer*. Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 2004.
- [48] TRNKA, Pavel. *Životnost izolačního systému VPI při pulzním namáhání*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. 2007.
- [49] KLIMESCH, R., D LITTMANN a F.-O. MÄHLING. *Polyethylene: High-pressure*. Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition). s. 7181-7184. ELSEVIER. 2001.
- [50] POLANSKÝ, Radek, Petr KADLEC, Z. KOLSKÁ, V. ŠVORČÍK a P. SLEPIČKA. *Testing the applicability of LDPE/HNT composites for cable core insulation*. Polymer Testing. ELSEVIER. vol.78, 2019.
- [51] Podpurné materiály společnosti Novocontrol. [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <http://www.novocontrol.com/>

- [52] *Model 8009 Resistivity Test Fixture. Instruction Manual.* Keithley. 2019. [online].  
[cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.tek.com/manual/model-8009-resistivity-test-fixture>
- [53] KADLEC, Petr. *Elektroizolační kompozitní materiály se sníženou hořlavostí.*  
Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Disertační práce. 2019.



## Přílohy



*Příloha A: Uložení vzorků do zdroje pro stárnutí.*



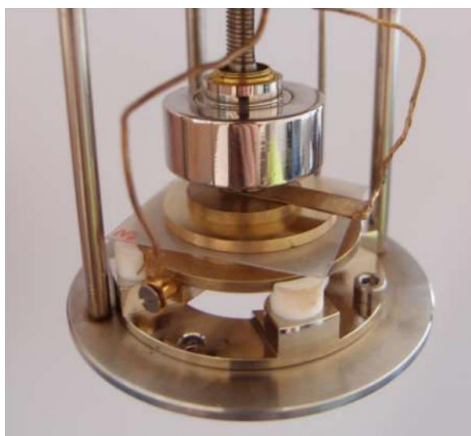
*Příloha B: Uložení vzorků do zdroje pro stárnutí.*



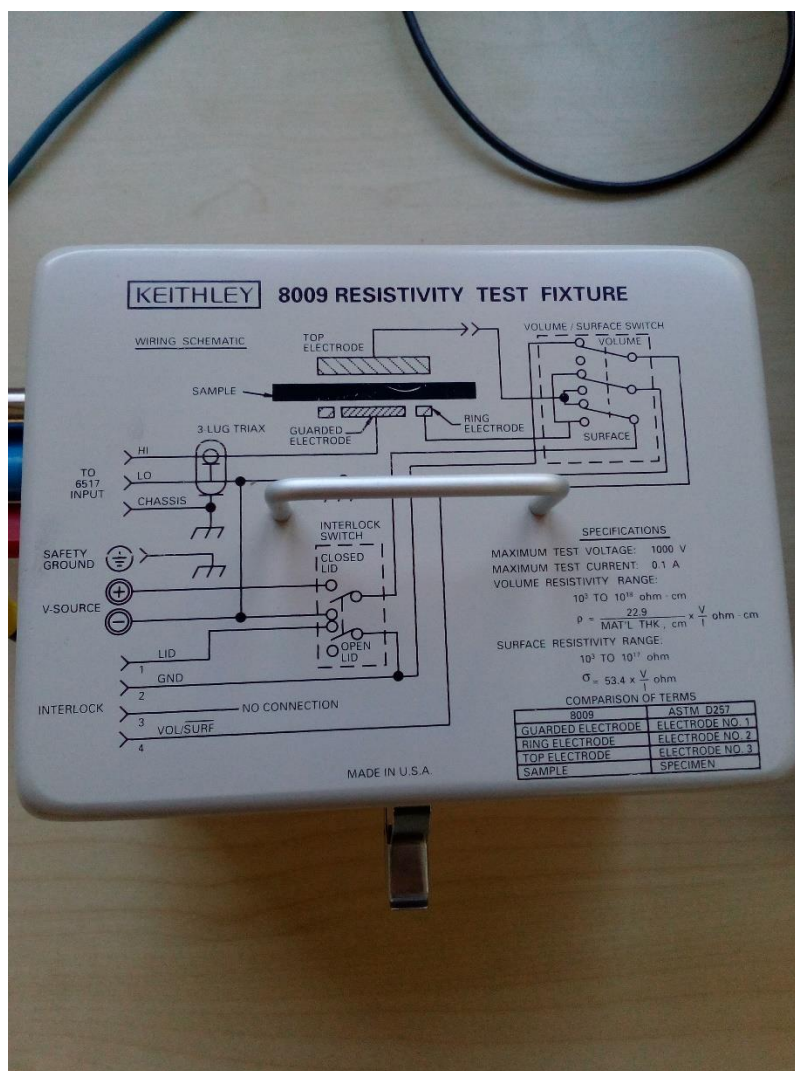
Příloha C: Díra po elektrickém průrazu.



Příloha D: Uložení vzorku v měřicím přípravku.



Příloha E: Uložení vzorku v měřícím aparátu (převzato z [52]).



Příloha F: KEITHLEY 8009 Resistivity test fixture (pohled shora).



Příloha G: KEITHLEY 8009 Resistivity test fixture (pohled do přístroje).