

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Modely stárnutí elektroizolačních materiálů**

**vedoucí práce: Ing. Pavel Trnka, Ph.D.  
autor: Bc. Marek Pavlíček**

**2012**



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek PAVLÍČEK**  
Osobní číslo: **E10N0198P**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Modely stárnutí elektroizolačních materiálů**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište procesy v elektroizolačních materiálech probíhající během technického života el. zařízení.
2. Uveďte fyzikálně - chemické účinky degradačních procesů na elektroizolační materiály.
3. Uveďte možná matematická vyjádření časových závislostí degradačních jevů.
4. Navrhněte způsob jak popsat degradační jev pomocí matematické funkce vhodné pro počítačové systémy.
5. Použijte navržené postupy pro poskytnutá data.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V. a kol. : Diagnostika elektrických zařízení, BEN, 2008.
2. Internetové databáze, elektronické informační zdroje
3. Materiály KET
4. Normy IEC, EN, ČSN, IEEE

Vedoucí diplomové práce:

**Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**


Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předmětem této diplomové práce je popsat procesy a účinky degradačních procesů, které probíhají během technického života v elektroizolačních materiálech. Dále uvést matematické modely popisující život elektroizolačních materiálů. Poslední část diplomové práce je zaměřena na popsání degradačního jevu matematickou funkcí a aplikovat ji na poskytnutá data.

## **Klíčová slova**

Stárnutí izolanů, matematické modely, elektrické trsy, tepelné stárnutí.

**Abstract**

The subject of this thesis is to describe the processes and effects of degradation processes that take place during the technical life of electrical insulation materials. In addition to state mathematical models describing the life of electrical insulation materials. The last part of this thesis is focused on describing the degradation phenomenon mathematical functions and apply it to the provided data.

**Key words**

Aging of insulating systems, mathematical models, electrical treeing, thermal aging.

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. 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.

V Plzni dne 11.5.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlovi Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.



## Obsah

Úvod.....	10
<b>1. Procesy v elektroizolačních materiálech.....</b>	<b>12</b>
<b>2. Elektrické stárnutí.....</b>	<b>13</b>
2.1. Růst elektrických trsů.....	14
2.1.1. Důsledek namáhání kompozitního izolačního systému elektrickým polem.....	17
2.2. Vysokofrekvenční pulzní namáhání.....	18
2.3. Částečné výboje.....	18
2.3.1. Elektroerozivní účinky.....	19
2.3.2. Tepelné účinky.....	19
2.3.3. Chemické účinky.....	19
2.4. Modely elektrického stárnutí.....	20
<b>3. Tepelné stárnutí.....</b>	<b>22</b>
3.1. Modely tepelného stárnutí.....	22
3.1.1. Aktivační energie.....	25
3.2. Tepelné stárnutí při provozu generátorů.....	25
3.3. Teplotní odolnost.....	28
<b>4. Vliv ostatních činitelů na degradaci elektroizolačních materiálů.....</b>	<b>28</b>
4.1. Kyslík.....	29
4.2. Vlhkost.....	29
4.3. Záření.....	29
4.4. Chemikálie.....	30
4.5. Mikroorganismy.....	30
4.6. Povětrnostní vlivy.....	30
4.7. Mechanické stárnutí.....	31
4.8. Znečišťující látky.....	31
<b>5. Stárnutí EIS v transformátorech.....</b>	<b>32</b>
5.1. Stárnutí olejů a elektroizolačních systémů olej+papír.....	33
5.2. Měřené parametry z hlediska životnosti transformátorů.....	33
5.2.1. Průrazné napětí.....	33
5.2.2. Vlhkost, obsah vody.....	34

5.2.3. Číslo kyselosti.....	34
5.2.4. Dielektrický ztrátový činitel tgδ a rezistivita.....	34
5.2.5. Oxidační stabilita.....	35
5.2.6. Barva oleje.....	35
5.2.7. Kaly a usazeniny.....	36
5.2.8. Mezipovrchové napětí.....	37
5.2.9. Bod vzplanutí.....	37
5.2.10. Viskozita.....	37
5.2.11. Korosivní síra.....	38
5.3. Složení papíru.....	38
5.3.1. Hydrolyza.....	39
5.3.2. Posouzení stárnutí papíru.....	40
<b>6. Vícefaktorové modely stárnutí.....</b>	<b>42</b>
6.1. Interakce degradačních činitelů.....	43
6.2. Crineúv model.....	43
6.3. Modely u kterých je třeba získat materiálové konstanty experimentálně..	45
6.3.1. Simoniho model.....	45
6.3.2. Ramuúv model.....	45
6.3.3. Faluúv model.....	46
<b>7. Parametry, které byly použity při zpracovávání naměřených dat.....</b>	<b>47</b>
7.1. Vnitřní a povrchová rezistivita.....	47
7.1.1. Měření povrchové a vnitřní rezistivity Voltampérovou metodou.....	48
7.2. polarizační indexy.....	51
7.3. Ztrátový činitel.....	52
<b>8. Zpracování a vyhodnocení poskytnutých naměřených dat stárnutí různých druhů izolačních materiálů.....</b>	<b>54</b>
<b>9. Popis degradačního jevu pomocí matematické funkce vhodné pro počítačové systémy.....</b>	<b>62</b>
<b>10. Zpracování dat zrychleného stárnutí transformátorové lepenky.....</b>	<b>68</b>
<b>11. Závěr.....</b>	<b>70</b>
<b>12. Použitá literatura.....</b>	<b>72</b>

## Přehled použitých zkratk

Zkratka	Význam zkratky	Český překlad
DP	degree of polymera	stupeň polymerace (PPS)
EIS	electrical insulating systém	Elektroizolační systém
Hot-spot		Teplota nejteplejšího místa
ppb	parts per bilion	dílů či částic na jeden bilion
tg $\delta$		ztrátový činitel
UHF	ultra high frequency	ultra vysoká frekvence
VPI	vacuum pressure impregnation	vakuově tlaková impregnace

## Úvod

Fenomén stárnutí by lidstvo raději ignorovalo, zatímco v průmyslu je tento jev potřeba nadále zkoumat. U jednotlivce by znalost konce jeho vlastní existence měla drtivý psychologický dopad, ale u zařízení a strojů je tato znalost pro výrobce a spotřebitele zásadní.

Za posledních sto let bylo v oblasti elektrické izolace učiněno velkého pokroku. Kolem roku 1875 představil Maxwell svou teorii dielektrické absorpce. V roce 1889 odhalil Paschen své zkušenosti s elektrickými průrazy v plynu spolu v závislosti na tlaku a vzdálenosti elektrod. O deset let později Townsend nastínil svou teorii o přeskokách v plynech. O dvacet let později Wagner nastínil svou teorii tepelných průrazů pevných látek. V roce 1930 vývoj kvantové mechaniky konečně vysvětlil rozdíl mezi vedením elektrického proudu v kovech a izolantech. I přes tento pozoruhodný pokrok bylo velmi obtížné vysvětlit techniku stárnutí materiálů a předpovědět tak životnost elektroizolačních systémů.

Stárnutí je definováno jako nevratné změny vlastností elektroizolačního materiálu na základě působení jednoho nebo více faktorů. Vlivným faktorem je určitý fyzický tlak vycházející z činnosti okolí. Stárnutí představuje nevratnou změnu (degradaci) v závislosti na čase. Stav elektroizolačního materiálu je ovlivňován různými činiteli. Vedle elektrické a tepelné zátěže také chemická a mechanická zatížení a zajisté jejich společné působení na izolační materiál [4].

Rozlišujeme mnoho různých zkoušek životnosti podle toho, jestli degradační faktory působí jednotlivě nebo se vzájemně doplňují. Při takových měřeních sledujeme elektrické parametry a tepelné i mechanické účinky. Podle těchto naměřených dat pak můžeme materiály vhodným způsobem rozřadit. Izolační materiály musí pro dané nasazení splňovat řadu náročných kritérií [1].

Při studiu stárnutí EIS sledujeme působící faktory. Pokud rozhoduje převážně jeden působící faktor, hovoříme o jedno faktorovém stárnutí. Pokud ovlivňuje stárnutí více než jeden faktor, hovoříme o stárnutí s více faktory. Stárnutí sledovaného EIS probíhá v různých etapách. EIS je v každé etapě namáhán obecně různými vlivy. Může se jednat o různé kombinace působících faktorů nebo o namáhání pouze jedním faktorem [1].

V této práci, jsou nejprve uvedeny fyzikální i chemické procesy, které probíhají v elektroizolačních materiálech, ať už pevných nebo kapalných, během jejich technického života. Jako největší původce degradace izolačních materiálů je považováno tepelné a elektrické namáhání, kterým je věnována největší pozornost. Dále jsou popsány různé vady, které mohou při provozu izolačních materiálů nastat a samozřejmě i různé vlivy prostředí, které mohou mít neblahý vliv na provoz těchto materiálů.

Při snaze určit životnost elektroizolačních materiálů se využívají matematické modely, které popisují chování materiálů v různých prostředích. Stejně tak i v této práci jsou uvedeny nejznámější modely, které slouží k učení životnosti a hlavně bezpečného chodu zařízení.

V poslední části diplomové práce jsou zpracovány a vyhodnoceny data o stárnutí materiálů při různých teplotách a jsou určeny funkce, podle kterých izolační materiál degraduje.

## 1. Procesy v elektroizolačních materiálech

Při testování elektrické izolace je třeba mít určitou představu o tom, co se od izolace očekává. Materiál musí samozřejmě vydržet určité elektrické i tepelné namáhání. V mnoha případech však musí vydržet i určité mechanické pnutí. Velké síly působící na elektrické vodiče, tedy i na izolaci, jsou způsobeny například točivým momentem stroje, který je výsledkem síly vytvořené protékajícím proudem vodičem, tudíž vznikem magnetického pole. Velké množství izolantů je vyráběno jako podpora pro elektrické vodiče, zde při normálních stavech k takovému druhu namáhání většinou nedochází, pokud nedojde ke zkratům, které mohou vytvořit obrovské mechanické síly mezi vodiči. Izolace tedy musí mít takové vlastnosti, aby odolávala jak normálnímu provozu, tak i abnormálním zatížením [9].

Zvýšené teploty mohou způsobit celou řadu účinků. Termoplastický materiál může ze své podstaty slábnout, při zvýšené teplotě u něj dochází k tání. To může být způsobeno i za velmi krátký časový interval. Zvýšená teplota po dlouhou dobu může také způsobit degradaci na úrovni chemického působení. Například u reaktoplastů dochází vlivem dlouhodobě zvýšené teploty k zesíťování. Materiál je pak podstatně křehčí a vibrace pak mohou způsobit mechanický zlom [9].

Když k tomu přidáme vliv prostředí, určení životnosti izolace se stává obtížnější. Přítomnost vzduchu kolem vyhřívané izolace může vést k oxidační degradaci. V závislosti na použitém materiálu pak dochází buď ke zkřehnutí nebo naopak měknutí materiálu. Vliv jiných chemických látek na izolační systém je pak zřejmý [9].

Už při výrobních fázích procesu, může docházet k poškození nebo stárnutí materiálu. Výroba musí být proto velmi precizní. Je třeba bedlivě sledovat například proces potahování elektrických vodičů izolací, zda nedochází k určitému pnutí nebo aby nedocházelo k oděrům. Tyto mechanické vady by pak měly velmi významný vliv v zavedení izolačního systému do provozu [9].

Izolačních materiálů se vyrábí a používá velké množství. V této práci jsou uvedeny obecně izolační materiály pro točivé stroje a dále také izolační materiály používané v transformátorech.

## 2. Elektrické stárnutí

Elektrické stárnutí je způsobeno elektrickým namáháním a můžeme jej klasifikovat podle tvaru, frekvence, hladiny nebo spojitosti. Nejčastější namáhání je střídavým napětím o frekvenci 50Hz. V rozvodných soustavách se setkáváme s elektrickým namáháním způsobeným zejména atmosférickými výboji. Vysokofrekvenční namáhání se pak projevuje v digitálních systémech. Elektrické stárnutí se projevuje klesající vnitřní rezistivitou a pozvolným nárůstem ztrátového činitele [6].

Elektrické stárnutí zahrnuje účinky působení elektrického pole a vznik částečných výbojů, plazivých proudů, elektrických stromečků (elektrických trsů), elektrolyzy, účinky prostorových nábojů [1].



**Obr.1:** (*Electrical treeing*) Elektrický stromeček při působení vysokého napětí na elektroizolační materiál. Převzato z: [3].

Spolehlivost elektrických zařízení výrazně ovlivňuje vznik tzv. elektrických stromečků. Jedná se o útvary připomínající stromovité, či kořenovité tvary. Jsou doprovázeny degradačními jevy, které mohou vést až k průrazům elektroizolačního materiálu i při jmenovitých napětích zařízení. Velmi často se s tímto jevem můžeme setkat u vysokonapěťových kabelů. Prakticky se jedná o vodivé cesty mezi místy s jiným potenciálem v materiálu, které vznikají působením elektrického pole. Tento jev vzniká v místech s přimíchanou nečistotou nebo při porušení elektroizolačního materiálu například ostrým předmětem (hrot). V takovýchto místech mohou pak

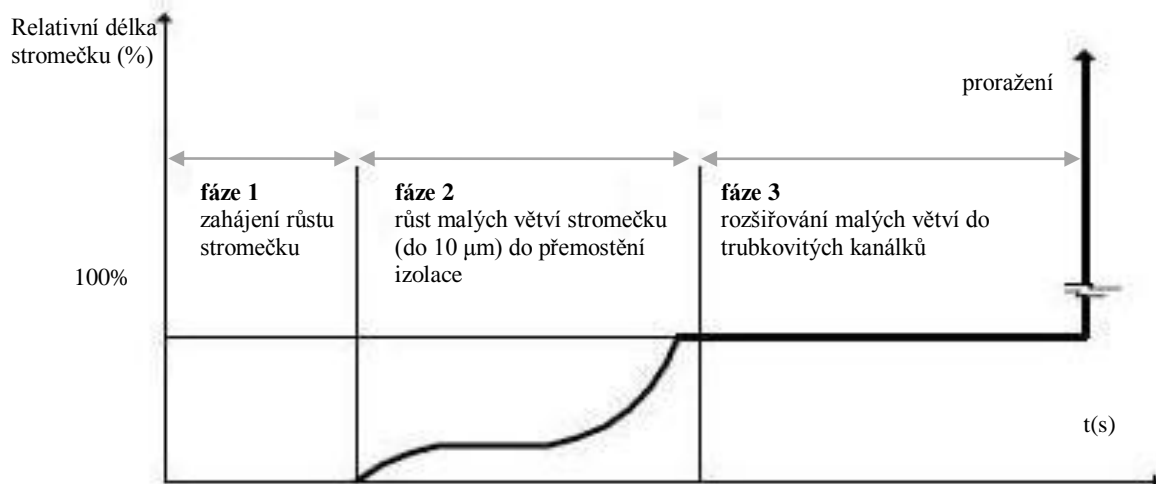
vznikat jevy popsané dále i při jmenovitých napětích. Každý materiál má jinou hodnotu kritické (maximální) intenzity elektrického pole. Velikost intenzity elektrického pole na hrotu (ostré hraně) je dána podle vztahu [2]:

$$E = -\text{grad } \varphi \text{ (V}\cdot\text{m}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

Velikost elektrické intenzity je větší, čím větší je derivace potenciálu dle dané souřadnice v prostoru [2].

Vodivé kanálky stromečkovitých tvarů mohou být vyplněné plynem nebo degradačními zplodinami. Zplodiny, které vznikají při rozkladu elektroizolačních materiálů, jsou velmi často vodivé. V dutinách větví elektrických stromečků se může objevit i kapalina. Tato kapalina může do materiálu zatékat z okolí nebo může vzniknout uvnitř materiálu jako produkt chemických reakcí spojených s degradací. Je mnoho mechanismů zapříčiňujících vodivost stromečkovitých struktur uvnitř materiálu. Například makromolekulární struktury na bázi uhlíkových řetězců zanechávají po degradaci uhlík, čímž se může vytvářet druhotná vodivost [2].

### 2.1. Růst elektrických trsů



**Obr.4:** Fáze růstu elektrického stromečku v izolaci. Převzato z: [2].



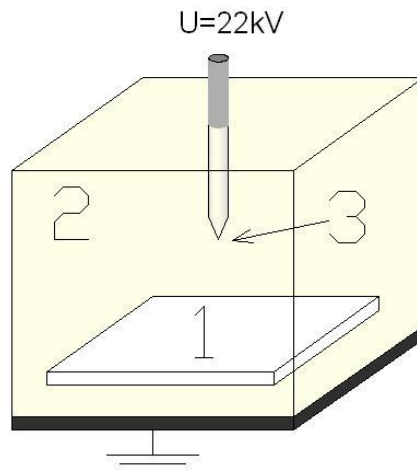
Růst elektrického stroměčku uvnitř izolace je nejčastěji popisován a modelována pomocí hrotu jehly a uzemněné elektrody, přiložených na krychličku epoxidové pryskyřice nebo zalitím do jejího objemu. Elektrický stroměček je vytvářen šířením vodivých cest elektroizolačním materiálem vlivem působení vnitřních částečných výbojů. Pozorovatelné vodivé cesty připomínají svým tvarem strom nebo keř [2].

**Fáze 1** nastává v okamžiku počátku růstu stroměčku, toto stádium se dá detekovat jenom velmi citlivou technikou [2].

**Fáze 2** nastává po vytvoření první větve stroměčku. Z této první větve elektrického stroměčku pak rostou další malé větve směrem k uzemněné elektrodě. Tato fáze končí dosažením uzemněné elektrody elektrickým stroměčkem. Průraz při dosažení první větve elektrody nenastává, protože malé větve mají tak malou vodivost, že proud jimi tekoucí je nedostatečný. Tyto malé větve mají v hlavních částech průměr menší než 10  $\mu\text{m}$  a menší než 1  $\mu\text{m}$  ve velmi tenkých špičkách [2].

**Fáze 3** nastává v okamžiku prvního spojení elektrod a končí totálním průrazem dielektrika. V této části se stroměček rozvětňuje a rozšiřují se jeho kanálky na velikost větší než 10  $\mu\text{m}$ . Tyto kanálky jsou již duté a jakmile jeden kontinuálně dutý kanálek dosáhne uzemněné elektrody, dochází k totálnímu průrazu dielektrika [2].

Pro znázornění a lepší pochopení předchozího obrázku s různými fázemi růstu elektrických trsů uvažujme testovaný objekt tvaru krychle 4x4 cm z epoxidové pryskyřice, přičemž uvnitř je slídová páska 2x4cm. V krychli je také zapuštěn hrot a z druhé strany je krychle uzemněna. Na hrot působíme napětím 28kV [8].

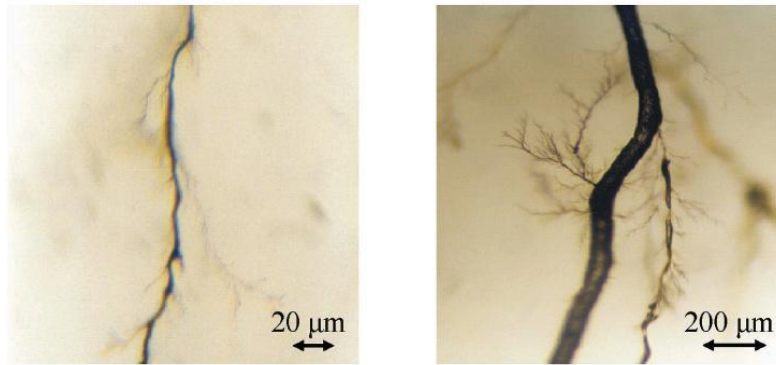


- |   |   |
|---|---|
| 1 | <i>slídová páska</i>                    |
| 2 | <i>prostředí z epoxidové pryskyřice</i> |
| 3 | <i>hrot jehly</i>                       |

**Obr.3:** Princip testu, kdy na jehlu přivádíme vysoké napětí [8].

Treeing a tvorba větviček začne ihned po přiložení napětí. Šíření větví pokračují k uzemněné elektrodě, kde se zadržují o vloženou slídovou pásku. Trsy se i nadále množí na povrchu slídové pásky. Jedná se o proces, který vyžaduje většinu z celkového času před zhroucením izolace [8].

Když jsou dosaženy hrany pásky, přichází rapidní nárůst vytváření nových větví, které hledají uzemněnou elektrodu. K průrazu nedochází hned po dosažení první odbočky elektrody, ale generují se další odbočky a zvětšuje se jejich průměr mezi 50-200mm. V této fázi spojitost a vodivost kanálů způsobuje průraz. V tomto uvedeném experimentu docházelo k průrazům od 50 do 100 hodin od započetí experimentu. Ve všech experimentech však k průrazu došlo, pokud byla slídová páska nějakým způsobem poškozena, například ohýbáním [8].

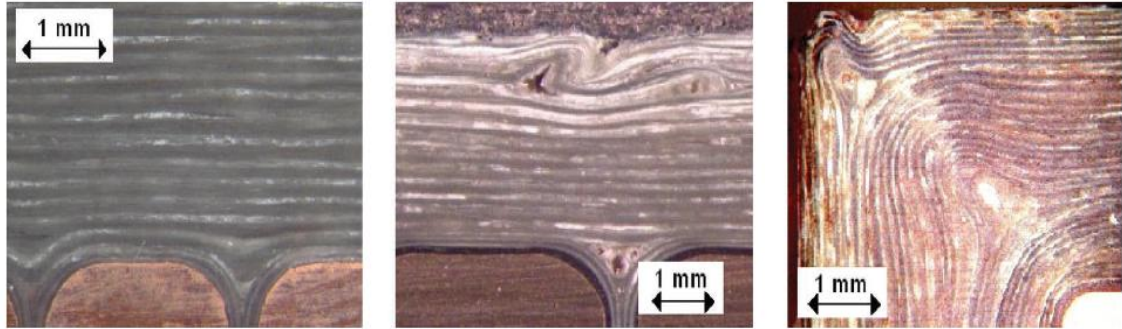


**Obr.4:** Malý trs vlevo a širší kanál napravo, který je dostatečně vodivý na to aby způsobyl průraz. Převzato z: [8]

### 2.1.1. Důsledek namáhání kompozitního izolačního systému elektrickým polem

Na dalším experimentu je vidět jak elektrické trsy, jako důsledek elektrického namáhání přímo poškodí izolaci tyčí používaných v generátorech, které byly izolovány metodou VPI a zatíženy trojnásobným jmenovitým napětím stroje. Vodivé cesty jsou vyznačeny pomocí rentgenové technologie nebo se dají vysledovat postupným odstraňováním slídové pásky, v níž je vypálena díra. Těmito metodami bylo vysledováno, že elektrický trs se začal rozrůstat od okraje vodiče zvyšováním elektrického pole a dále se nerozrůstal nikoliv přímo skrz k druhé elektrodě, ale následoval okraje pásky, alespoň do určité míry [8].

Zkrat je tedy schopen nastat v případě, že slídová izolace měla nějaká skryté vady, jako dutinky, praskliny, byla delaminována, měla polámané nebo poškozené vrstvy slídy. Z těchto výsledků vyplývá, že elektrické vodivé cesty se vyskytují u izolací, které jsou do určité míry poškozeny nebo stačí, že byly nevhodně ohýbány. Je tedy zřejmé, že na životnosti izolace má velký vliv výrobní kvalita, jako například správný impregnační proces u VPI a omezení ohybů slídy [8].



*Obr.5: Vlevo je vidět vzorová správně vyrobená izolace. Další dva obrázky ukazují různé defekty nebo špatné vrásčité skládání slídy. Převzato z: [8].*

## 2.2. Vysokofrekvenční pulzní namáhání

Způsobované např. měniči kmitočtu nebo napětí v obvodech řízených pohonů. Pulzní namáhání je způsobené pulzním napětím obdélníkového tvaru o strmosti napěťové hrany větší než  $500 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$  a frekvenci větší než 1 kHz. Vysokofrekvenční pulzní namáhání ve výkonových aplikacích je poměrně nová záležitost. Vzhledem k tomu, že způsobuje zvýšenou degradaci izolačních systémů, je třeba mu věnovat zvýšenou pozornost. V případě pulzního napětí nastává degradace izolačních materiálů nejen hodnotou napětí, ale i vlivem strmých nárůstů napětí na izolaci [ $\text{kV} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ]. Vlivem vysoké frekvence se strmý nárůst napětí na izolačním systému periodicky opakuje v řádu jednotek až desítek kHz. Vysoká frekvence způsobuje dielektricky ohřev materiálu. Dalším jevem spojeným s pulzním namáháním je zvýšená aktivita výbojové činnosti [6].

## 2.3. Částečné výboje

Jsou dalším významným faktorem při elektrické degradaci elektroizolačního materiálu hlavně z dlouhodobého hlediska. Částečné výboje mohou mít účinky:

- elektroerozivní
- tepelné
- chemické

### 2.3.1. *Elektroerozivní účinky*

Vznikají v důsledku působení elektrického oblouku v dutinkách uvnitř izolantu. Při vysokých hodnotách intenzity elektrického pole může koncentrace elektrického pole v tomto místě způsobit čistě elektrický průraz. Ionty a elektrony bombardují stěny dutinek, čímž způsobují erozi stěn a to vede k jejich dalšímu rozšiřování. Tímto způsobem může dojít k celkovému proražení izolantu [20].

### 2.3.2. *Tepelné účinky*

Opakovaným působením částečných výbojů se izolant otepluje a může docházet k tepelné nestabilitě materiálu. Klesá hodnota napětí tepelného průrazu [20]. Vlivem zvýšené teploty dochází k snížení četnosti částečných výbojů, avšak dochází k nárůstu amplitudy výbojů. Pokles četnosti částečných výbojů může být připisán teplotní roztažnosti izolačního materiálu. To má za následek zvětšování objemu nebo také zvyšování povrchové vodivosti. To vede k snížení intenzity elektrického pole ve vzduchové mezeře. Následně dochází ke snížení četnosti částečných výbojů. Nárůst amplitudy v závislosti na teplotě, může být vysvětlen vybíjením větší plochy [1].

### 2.3.3. *Chemické účinky*

Vznikají při dlouhodobém elektrickém namáhání. V první fázi se chemické reakce odehrávají v produktech odloučených ze vzduchu za působení vzdušné vlhkosti. Ve druhé fázi vniklé produkty z předchozích reakcí difundují do blízkého pevného izolantu a vytvářejí tak vodivé oblasti, které mohou vést k průrazu. Například, pokud dutinky obsahují kyslík, tak v důsledku výbojové činnosti dochází ke vzniku ozónu, který má intenzivní oxidační účinky. Ozón a oxidy dusíku mohou za působení vzdušné vlhkosti vytvářet kyselinu dusičnou, která je velmi agresivní k izolačním materiálům [1].

## 2.4. Modely elektrického stárnutí

Veškeré poznatky se skládají z experimentálních měření. Jsou používány následující modely při vlivu elektrického pole na životnost izolace [1] :

Mocninný model:

$$\tau_E = k \cdot E^{-n} \quad (2)$$

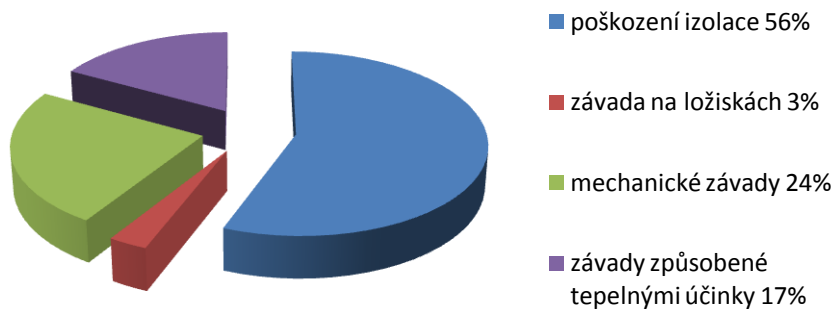
Exponenciální model:

$$\tau_E = e^{-bE} \quad (3)$$

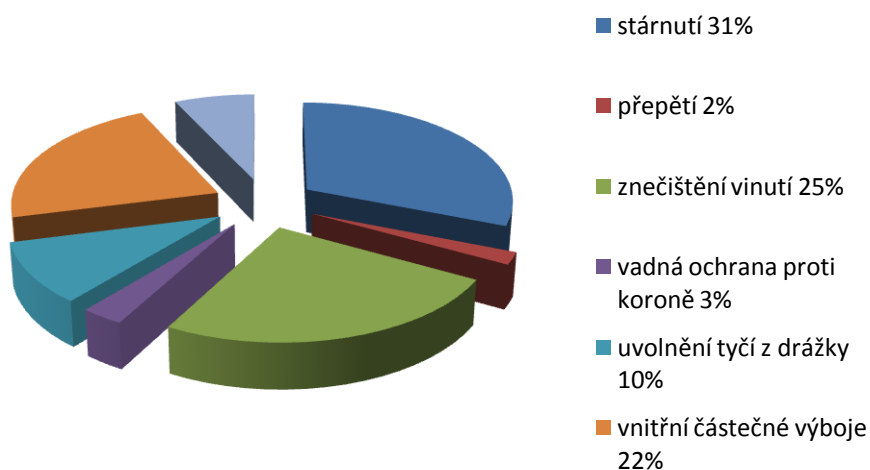
$\tau_E$	<i>životnost izolace [h]</i>
$E$	<i>intenzita elektrického pole [kV.mm<sup>-1</sup>]</i>
$K, n, b$	<i>konstanty určené experimentálně</i>

Vztahy popisují závislost životnosti na intenzitě elektrického pole. Modely neuvažují rozložení elektrického pole ani strukturu izolačního materiálu. I přes to, jsou tyto modely vcelku přesné a dá se podle nich určit přibližná doba životnosti izolačního materiálu. Problém však nastává, pokud hladina intenzity není příliš vysoká. Pak se tyto modely stávají neúčinnými, při určování životnosti. To je vysvětlováno teorií, že při nižších hladinách intenzity nedochází k takové degradaci. Záleží tedy na tom, zda překročíme určitou hranici intenzity elektrického pole [1].

Ačkoli je elektrický průraz příčinou poškození izolace, není to dominantní faktor stárnutí. Mechanismu stárnutí dominuje tepelné degradace pojiva (pryskyřice) a mechanické namáhání způsobené vibracemi, spínacími impulsy a různou teplotní roztažností více materiálů [8].



*Obr.6: Poměr hlavních závad na generátorech [8].*



*Obr.7: Příčiny poškození izolace u generátorů [8].*

### 3. Tepelné stárnutí

Již v roce 1913 Steinmetz a Lamme zveřejnili studii týkající se teploty a elektrické izolace, kde nastínili teorii, že ke zhoršení vlastností izolace (izolační papír) dochází v pevně dané teplotě. Nicméně domnívali se, že izolace trpí nevýznamně do 90 °C a že míra zhoršení nastává při teplotách mezi 100 °C až 125 °C, kde životnost byla otázkou několika týdnů. Jinými slovy, že stárnutí nenastává, pokud teplota nepřekročí určitou hranici. Mimo jiné se v té době soudilo, že pokud izolace dostane v určitých intervalech šanci vychladnout, tak se účinky tepelného stárnutí snižují, protože při trvalém provozu údajně neměla šanci se “obnovit“. [9]

#### 3.1. Modely tepelného stárnutí

Koncem dvacátých let téhož století, byl tento údaj povýšen na hodnotu 105 °C a byla tak určena reprezentativní teplota pro materiál teplotní třídy A. I když V.M. Montsinger v roce 1930 obhajoval spíše konzervativnější teplotu 95 °C. Kromě toho Montsinger věřil, že na konci života materiálu má převahu čistě mechanická závada. Zároveň uvedl myšlenku, že mechanické stárnutí nastává v celém průběhu teplotního namáhání, tedy ne až za pevnou hranicí výtčenou určitou číselnou hodnotou. To bylo v ostrém kontrastu se Steinmetzem. Údaje nahromaděné za 9 let výzkumu pevnosti v tahu papíru stárnutého v oleji i ve vzduchu reprezentoval rovnicí [9]:

$$\tau = A \cdot e^{-RT} \quad (4)$$

$A$  a  $R$       *materiálové konstanty, které jsou určeny experimentálně.*

$T$               *teplota ve stupních Celsia*



Ve skutečnosti tento empirický vztah uvádí, že životnost tepelné izolace se snižuje na polovinu každým zvýšením nebo naopak zdvojnásobuje snížením o 8 °C, pro izolanty třídy A a o 10 °C pro izolanty třídy B. V průběhu dalších let se toto pravidlo definovalo jako pravidlo “deseti stupňů” [9].

Další řešení k určení životnosti materiálu byla studie podle *Dakin-Arrhenia*. Pozoroval, že fyzické změny při tepelném stárnutí jsou způsobeny chemickými pochody, ale navíc připustil, že stárnutí je způsobeno více faktory najednou než jen pravidlem o deseti stupních. To popisuje v následujícím vztahu [9]:

$$\tau = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (5)$$

$\tau$	<i>životnost izolace [h]</i>
$A, B$	<i>materiálové konstanty, určené především aktivační energií</i>
$T$	<i>teplota [K]</i>

Přesněji

$$\tau = a \cdot e^{\frac{Wa}{RT}} \quad (6)$$

$Wa$	<i>aktivační energie procesu [eV]</i>
$R$	<i>univerzální plynová konstanta (8,315 J.grad<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>)</i>
$a$	<i>konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul</i>
$T$	<i>absolutní teplota [K].</i>

Životnost materiálu je tedy exponenciální funkcí teploty stárnutí, tj. se zvýšením teploty se exponenciálně zkracuje délka životnosti. Práce W. Bussinga dává do souvislosti změny chemické stavby izolantů vyvolané působením teploty. Zhoršují se jejich fyzikálních vlastnosti. Rychlost chemické reakce lze považovat za rychlost stárnutí. Vynesením logaritmu času na jednu osu a na druhou reciproční hodnotu absolutní teploty (1/T) získáme přímku odpovídající životnosti materiálu (Arrheniův graf) [6].

$$\ln \tau = \ln A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (7)$$

Jestliže je  $\ln \tau$  vykresleno proti převrácené hodnotě absolutní teploty výsledkem by měla být přímka. V případě, že do stárnutí zasahují chemické reakce, výsledná křivka se určitým způsobem zakříví. Tento vztah se stal páteří pro stárnutí způsobené tepelným stárnutím [9].

Tepelné stárnutí tedy zahrnuje chemické a fyzikální změny, které vznikají v důsledku chemických a degradačních reakcí vlivem teploty. Jedná se např. o depolymerační reakce, difúzi apod. [1].

Základní proces degradace materiálu je tepelné stárnutí, kdy se přeruší upevňovací síly mezi molekulami [4].

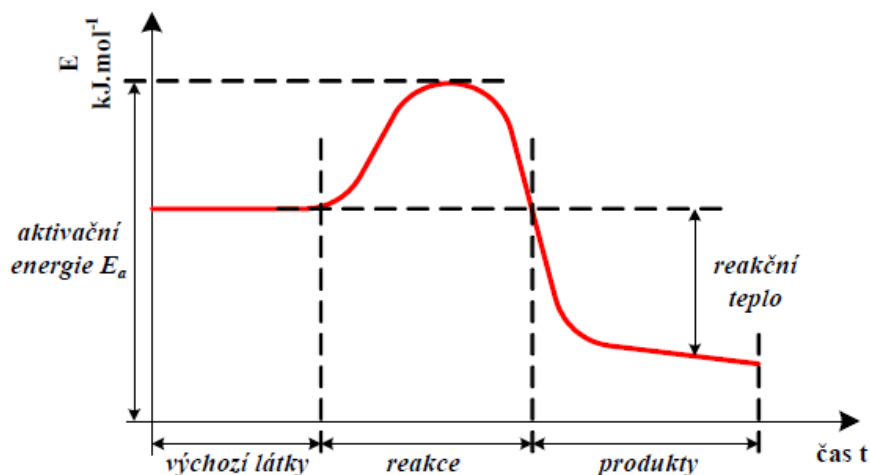
Negativně mohou působit jednak vysoké ale i nízké teploty okolního prostředí, či teploty vyšší než je teplota okolního prostředí, způsobené ztrátami elektrické energie vznikající v elektrickém zařízení, jehož je izolace součástí.

Vysoká teplota urychluje průběh většiny korozních dějů. Má za následek stárnutí organických materiálů, především izolantů tepelně namáhaných, způsobuje měknutí termoplastů, zalévacích látek a tmelů s nízkým bodem měknutí. S poklesem teploty klesá i pružnost látek, které tím tvrdnou a křehnou, vzrůstá také pevnost v tahu, klesá však tažnost a tím i u některých látek odolnost proti rázovému namáhání. Rychlá změna teplot způsobuje rychle se měnící rozměry materiálu, a tím dochází k popraskání a porušení těsnosti [5].

Tepelné stárnutí není významné u časově krátkých procesů. Je-li testovaný vzorek vystaven velké intenzitě elektrického pole, tepelné stárnutí může být pozorovatelné. Například částečné výboje mohou urychlit tepelné stárnutí. Vedle raných a stochastických selhávání v materiálu by měla oblast vanové křivky pro tepelné namáhání představovat část zbytkové doby života [4].

### 3.1.1. Aktivační energie

Aktivační energie je definována jako energie, která musí být látce dodána, aby daná reakce mohla proběhnout. Obvykle se značí  $E_a$  a její základní jednotkou je  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Podstatu aktivační energie dokresluje obrázek č. 8 [7].



**Obr.8:** Podstata aktivační energie. Převzato z: [7].

V elektrotechnologické diagnostice je aktivační energie rozhodující veličinou ovlivňující životnost všech elektroizolačních materiálů. Čím větší aktivační energii daný materiál má, tím více odolává chemickým reakcím, které způsobují degradační pochody v jeho vnitřní struktuře. Velikost aktivační energie dobře reflektuje degradační procesy a její vývoj v závislosti na době provozu je velmi žádanou informací [7].

### 3.2. Tepelné stárnutí při provozu generátorů

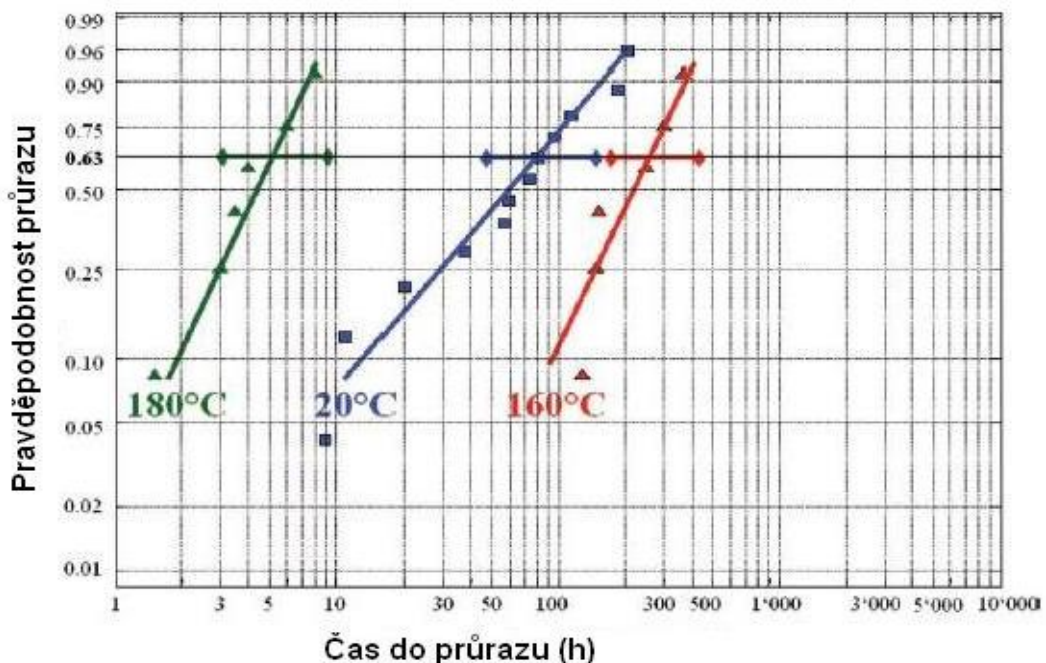
Izolační systémy na bázi epoxidové pryskyřice a slídy se převážně používají jako izolace u velkých generátorů již od roku 1960. Izolační materiál se skládá z pryskyřice slídy a skleněných vláken. Ke sledování procesu stárnutí na povrchu materiálu slouží elektronový mikroskop. Hlavním důvodem je, že změny zapříčiněné stárnutím se značně projevují na povrchu materiálů. Dalšími zobrazovacími nástroji pro analyzování procesu stárnutí jsou rentgeny a analýza technikou infračerveného

spektra. Výsledky experimentů ukazují, že u epoxidové pryskyřice dochází k hydrolytické (rozkladné) reakci a slída rovněž podstupuje strukturální změny [10].

Ve velkých generátorech v elektrárnách je izolace vinutí při provozu vystavena kombinaci tepelných, elektrických, vibračních a tepelně-mechanických namáhání. Moderní vodiče v generátoru se obvykle skládají z dlouhých měděných lan obdélníkových profilů, které jsou pokryty kompozitní izolací. Kompozitní izolace se skládá z vláknitých materiálů a částičky lepené slídy společně se syntetickou epoxidovou pryskyřicí. Slída je používána, protože je to vynikající materiál pro odolávání částečným výbojům [10].

Pomocí IR spektra lze odhalit, že rozklad epoxidové pryskyřice probíhá hydrolytickou reakcí. Na základě hydrolytické reakce epoxidové pryskyřice, jsou produkovány organické kyseliny a kationty ve slídě jsou od ní separovány za pomoci kyselin a ionizace, která probíhá pod elektrickým namáháním. To vede k degradaci slídy. Jinými slovy důvodem stárnutí kompozitní izolace na bázi epoxidové pryskyřice a slídy je selhávání rozhraní mezi těmito složkami [10].

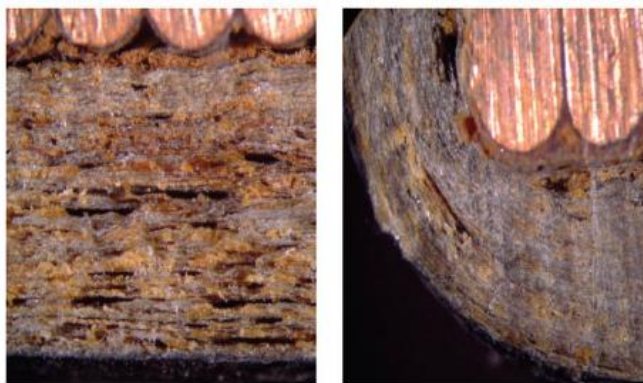
Následující část textu se zaměřuje na praktické ukázky defektů, které se vyskytují v provozu generátorů. Na níže uvedeném obrázku lze vidět, že nižší teplota neznamená vždy nejlepší životnost.



Obr.9: Graf ukazuje vliv teploty a napětí na životnosti izolace. Převzato z: [8].

Výsledky ukazují, že životnost izolace je vyšší při 160 °C než při 20 °C, což je v souladu s údaji výše. To lze vysvětlit vyšší flexibilitou pryskyřice při zvýšené teplotě, která minimalizuje riziko trhlin, ale také snižuje vnitřní pnutí a to kvůli vytvrzovací reakci, která obvykle probíhá kolem teploty 160 °C. To může mít velký vliv na zvýšení životnosti [8].

Nicméně, při teplotě 180 °C je tepelná degradace pojiva dominantním faktorem stárnutí a životnost izolace tyče se podstatně zmenšuje. Optimální teplota pro dlouhou životnost elektrických izolací na bázi epoxidových pryskyřic a slídy je asi 90 °C, což je v rámci běžného provozního rozsahu velkých generátorů [8].



**Obr.10:** Ukazuje izolaci tyčí vodního generátoru po 37 letech používání. Stav pojiva se velmi zhoršil, jsou vidět dutiny a delaminace izolačního systému. Převzato z: [8].

Dalším poškozením izolace může být únik chladicí vody přímo chlazených generátorů do izolačního systému. Toto poškození provází výrazné zbarvení izolace. Konečná fáze selhání izolace je obvykle způsobena elektrickým průrazem. Který je způsoben na základě procesu stárnutí. Rychlost tvorby elektrických trsů závisí, jak již bylo řečeno, na vadách v izolaci. Tyto vady jsou způsobeny buď při výrobě, nebo během stárnutí materiálu [8].

### 3.3. Teplotní odolnost

Teplotní odolnost je důležitým kritériem při rozlišování elektroizolačních materiálů. Materiály rozdělujeme do teplotních tříd, podle podobných vlastností materiálů. Každá třída má svou maximální teplotu [6].

*Tabulka 1. Zobrazení používaných teplotních tříd [21].*

<b>Třída</b>	70	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
<b>Teplotní hranice (°C)</b>	70	90	105	120	130	155	180	200	220	250

Pro určení tepelné třídy materiálu používáme zkoušky zrychleného tepelného stárnutí. Určíme tak křivky odolnosti tepelného namáhání. Z těchto experimentálně zjištěných křivek lze vytvářet modely stárnutí teplotou a také spočítat předpokládanou zbytkovou životnost [6].

## 4. Vliv ostatních činitelů na degradaci elektroizolačních materiálů

Degradačních činitelů existuje celá řada, od základních až po okrajové a velmi specifické. Pro jednotlivá prostředí je vždy charakteristický určitý soubor degradačních činitelů. Pro podnebí je to vlhkost, teplota, sluneční záření, tlak vzduchu, srážky, aerosol, prach a písek, mikro a makroorganismy. V průmyslovém prostředí se ke klimatickým činitelům přidávají ještě exhalace. Mezi nejběžnější znečištění prostředí patří  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HCl}$ , ozónem, parami organických rozpouštědel a sulfidační prostředí. V provozním prostředí degradují materiál provozní činitelé elektrického původu (elektromagnetické pole, přepětí, zkraty apod.), provozní činitelé mechanického původu (chvění, vibrace, akustický tlak) a různé formy záření [5].

### **4.1. Kyslík**

Je aktivním činitelem všech oxidačních a redukčních procesů, podporuje stárnutí izolačních částí vyrobených z organických látek (při čemž jde o procesy převážně oxidační) a urychluje atmosférickou korozi kovových materiálů, zejména za působení vlhkosti a znečištění atmosféry [5].

### **4.2. Vlhkost**

Hlavním zdrojem vlhkosti je atmosféra, ve které se izolant nachází. Působením vlhkosti a vody se elektrické vlastnosti většiny pevných i kapalných izolantů zhoršují. Při styku pevné látky s vlhkostí nastávají dva děje, adsorpce vody na povrchu a absorpce vody do objemu látky. Navlhání je často provázeno bobtnáním organických materiálů, které se vlivem vyšších teplot urychluje chemickými změnami anorganických nekovových materiálů. Dále může docházet k vyluhování složek z izolantu některé látky, které pak mohou způsobovat korozi dalších částí zařízení. Vlhkost zhoršuje dielektrické vlastnosti vzduchu a izolantů. A naopak, pokud bude vlhkost příliš nízká, může dojít k vysychání některých materiálů, které je často provázeno objemovými změnami, deformací, změnami mechanických vlastností i povrchových [5].

### **4.3. Záření**

U izolantů vystaveným slunečním paprskům dochází ke světelnému stárnutí, které má za následek sluneční záření. Absorbovaná část slunečního záření může vyvolávat fotochemickou a fotooxidační degradaci materiálu [5].

Ultrafialové záření má za následek urychlené zhoršení vlastností, případně destrukce některých látek, především izolantů organické povahy, jako například charakteristické rozpraskání a vytváření trhlin na povrchu některých materiálů (pryžové vulkanizátory, polyvinylchloridy), nebo ztvrdnutí a zkřehnutí některých materiálů (polyetylen). Infračervené záření zapříčiňující ohřev vrchních částí materiálu má za následek změnu elektrických a fyzikálních vlastností a vytvářejí se

předpoklady pro degradaci vlastností materiálů. U izolantů jsou pak předpoklady ke vzniku tepelného průrazu [5].

#### **4.4. Chemikálie**

Způsobují různá poškození a je jim nutno přikládat zvýšenou pozornost. V praxi se většinou setkáváme s interakcí různých chemických vlivů při působení rozličných okolních podmínek. Elektroizolační materiály nejsou jen základní materiály, ale složité systémy obsahující další příměsi. Celková odolnost elektroizolačního systému se může značně lišit od odolnosti jednotlivých základních látek, či materiálů [1].

#### **4.5. Mikroorganismy**

Jsou další degradační faktor působící na elektroizolační materiály, zejména pak ty, na organické bázi. Mohou využívat elektroizolační materiál jako zdroj energie, což způsobí chemické, mechanické i elektrické narušení izolace. Jedná se zejména o bakterie a plísně, u nichž je předpoklad větší agresivity s růstem okolní vlhkosti a teploty. To může přímo souviset i s vystavením materiálu povětrnostním vlivům [1].

#### **4.6. Povětrnostní vlivy**

Přináší změny teploty, proudění vzduchu, srážky, znečišťující látky, záření apod. Proudění vzduchu způsobuje unášením mechanických částic rozrušování povrchu materiálu, což umožňuje rychlé pronikání znečišťujících látek (solí) a vlhkosti do materiálu. Při působení elektrického pole to vede ke vzniku elektrolytu. Měkčené materiály zpravidla vystavením povětrnostním podmínkám tvrdnou, dochází v nich k zesíťování řetězců. Jiné látky mohou například měknout. Pokud se významně mění povrchová vrstva vystaveného elektroizolačního materiálu, může docházet ke značnému mechanickému pnutí [1].



#### **4.7. Mechanické stárnutí**

elektroizolačních materiálů je třeba sledovat vzhledem k procesu výroby a jejích kroků, při montáži a samozřejmě během provozu elektrického zařízení. Často bývá mechanické namáhání EIS vlivem elektrodynamických, elektromagnetických nebo tepelných sil jednou z hlavních příčin degradace a změn vlastností EIS. Mezi mechanické namáhání patří například rázové účinky zkratových proudů, dále vliv otěrů nebo vibrací [1].

Mechanické vlivy se snažíme omezit v co největší míře a to hlavně vhodným výběrem elektroizolačního materiálu s dobrými mechanickými vlastnostmi. Trendem jsou speciálně vytvrzované vícesložkové kompozitní materiály. Jako nosné složky se používají aramidová vlákna nebo skleněná tkanina, které zajišťují vysokou mechanickou odolnost v některých případech vyšší než u kovů. Mechanické namáhání může být významným faktorem při degradaci zejména v počátečních fázích výrobního procesu, kdy může docházet k překročení některých parametrů při nedodržení výrobních procesů [6].

Bylo zjištěno, že izolační materiály na bázi epoxidové pryskyřice slídy a skleněných vláken jsou velmi odolné vůči mechanickým vibracím. Tepelné a mechanické namáhání jsou dominující faktory stárnutí izolace ve vysokonapěťových točivých strojích. Vytrvalostní zkoušky je třeba provádět při působení alespoň těchto dvou významných faktorů [8].

#### **4.8. Znečišťující látky**

Mohou pocházet jak z umělých, tak z přírodních zdrojů. Za přítomnosti vlhkosti způsobují povrchovou vodivost, vznik kyselých či zásaditých roztoků, chemické i elektrolytické napadení elektroizolačního materiálu [1].

## 5. Stárnutí EIS v transformátorech

Transformátory jsou důležité součásti při transformaci a přenosu elektrické energie. Z důvodu bezpečnosti je nutné sledovat provozní spolehlivost. Některé parametry jako tg $\delta$  lze snímat online, dostáváme tak aktuální přehled o stavu stroje [19].

Dále je možné monitorovat částečné výboje PD-detektorem, za jehož pomoci sledujeme výbojovou činnost. Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách ohledně elektrického stárnutí, výbojovou činností dochází k degradaci izolačních systémů a zároveň dochází k vytváření plynů v oleji, které nadále urychlují stárnutí. Částečné výboje se měří UHF senzorem, který detekuje výbojovou činnost na základě akustické odezvy částečných výbojů [19].

Důležitou sledovanou veličinou u transformátorů je teplota. Sleduje se na různých místech na vinutí, dále teplota okolí, teplota oleje. Z vypočítaných hodnot se vypočítávají důležité veličiny jako obsah vody v papírové izolaci, teplota nejteplejšího místa (hot-spot teplota) [19].

Proces degradace je funkce s mnoha parametry, jako je teplota, obsah vlhkosti, obsah reaktivních plynů, kyselin, korozivní síry atd. Teplota je základní parametr a nejdůležitější činitel pro životnost stroje. Řada provozních stavů se projevuje zvýšením teploty v transformátoru. Rozložení teploty ve stroji není homogenní. Části, na které působí vyšší teplota jsou více degradovány. Při výpočtech životnosti podle normy se vychází z již zmiňované hot-spot teploty [19].

Hot-spot teplotu nelze změřit, vypočítává se z provozního stavu transformátoru a záleží také na typu a výkonu transformátoru. Blíží se jí teplota vrchní vrstvy oleje [19].

## 5.1. Stárnutí olejů a elektroizolačních systémů olej+papír

Stejně jako stárnutí kompozitních izolantů v točivých strojích, tak i stárnutí izolačních olejů způsobuje určité změny vlastností materiálu, ať už chemické nebo fyzikální, které mohou vést k závadám nebo také přímo ohrozit provozní bezpečnost. Takovými činidly jsou hlavně kyslík společně s teplotou nebo vlhkostí, dále chemické látky, nerovnoměrné zatížení, mechanické a elektrické namáhání [14].

Olej v elektrických strojích slouží jednak jako izolační materiál, dále jako chladicí médium a také případně zhasí elektrický oblouk.

U olejů jsou důležité zejména tyto vlastnosti [18]:

- Vysoká izolační pevnost k odolávání předepsanému napěťovému namáhání v provozu.
- Dostatečně nízká viskozita tak, aby jeho schopnost cirkulovat a přenášet teplo nebyla zhoršená.
- Odpovídající nízkoteplotní vlastnosti v souladu s nejnižší teplotou, očekávanou v místě provozu.
- Odolnost vůči oxidaci pro maximalizování jeho životnosti.

## 5.2. Měřené parametry z hlediska životnosti transformátorů

### 5.2.1. Průrazné napětí

Suchý a čistý olej vykazuje přirozeně vysoké průrazné napětí. Volná voda a pevné částice výrazně snižují průrazné napětí. Měření průrazného napětí slouží jako ukazatel přítomnosti znečišťujících látek. Používá se klasické kulové jiskřiště ponořené ve zkoušeném oleji a měříme tak nejmenší průrazné napětí [18].

### 5.2.2. *Vlhkost, obsah vody*

Voda se do oleje dostává degradací celulózy a oleje nebo přímo ze vzdušné vlhkosti. Rozpustnost vody je závislá na stavu zestárnutí oleje, druhu oleje a je uvedena v mg/kg. Většina vody je vázána v papíru a teplotní změny nijak zvlášť nepozměňují množství vody v něm vázaném, ale teplotní změny velmi ovlivňují obsah vody v oleji [14].

### 5.2.3. *Číslo kyselosti*

Toto číslo udává množství KOH (hydroxid draselný), potřebného k neutralizaci kyselých reagujících složek v 1g oleje. Stárnutím se v oleji zvyšuje koncentrace naftenové kyseliny, kyseliny sírové, siřičité atd. Číslo kyselosti se určuje potenciometrickou metodou [14].

### 5.2.4. *Dielektrický ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ a rezistivita*

Parametry citlivé na přítomnost rozpustných polárních látek a produktů stárnutí. Přijatelné hranice jsou závislé na typu zařízení. Existuje obecně vztah mezi  $\text{tg } \delta$  a rezistivitou, s klesající rezistivitou roste  $\text{tg } \delta$ . Jsou to teplotně závislé parametry. Měření rezistivity je důležité pro monitorování oleje v provozu, jak se ukázalo je poměrně úměrné oxidačním kyselinám a je ovlivněno nežádoucími znečišťujícími látkami, jako jsou soli kovů a voda. Jiné směsi, přítomné v použitých olejích, které mohou ovlivnit rezistivitu, obsahují aldehydy ketony a alkoholy. Vzrůst teploty snižuje hodnotu rezistivity, stejně jako voda po dosažení bodu saturace srážením, při nízké teplotě [18].

### 5.2.5. Oxidační stabilita

Je schopnost oleje při tepelné zátěži a působení kyslíku odolávat oxidaci. Slouží jako odhad průměrné životnosti. V olejích se přirozeně vyskytují oxidační inhibitory, zpomalující proces stárnutí. Podle toho můžeme tedy oleje rozdělit na [14]:

- neinhibované (obsahující pouze přirozené inhibitory)
- sloučeniny fenolového typu (syntetické oxidační inhibitory), které se v transformátorech používají pro zvýšení oxidační stability.

Pro měření obsahu inhibitoru slouží tyto metody [14]:

- infračervená spektroskopie
- chromatografická metoda na tenké vrstvě
- kolorimetrická metoda

### 5.2.6. Barva oleje

Barva oleje transformátoru je důležitý ukazatel při hodnocení stavu izolace. Vyjadřuje se číselnou hodnotou na základě porovnávání s barevnou škálou normálů. Tato vlastnost je velmi užitečná v praxi, kdy lze poměrně snadno posoudit kvalitu izolačního oleje. Čím vyšší číslo nebo rychle rostoucí, tím je kvalita oleje horší. Toto může naznačovat zrychlující se degradaci vlivem například vody, nečistot, uhlíku nebo různých usazenin [14].

Minerální nezestárnutý olej je bezbarvý a průhledný, zatímco olej se syntetickými oxidačními inhibitory je žlutý. Po 174 dnech se stává lehce nazelenalý. Barva minerálního oleje se stává tmavší z bezbarvé až po průsvitně hnědou. Po 264 dnech stárnutí při teplotě 110 °C se olej se syntetickými oxidačními inhibitory změní na světle hnědou, zatímco barva minerálního oleje se změní na spáleně hnědou a neprůhlednou. V důsledku stárnutí se vytvoří malé množství suspendovaných částic. Lze tedy usoudit, že stárnutí oleje se syntetickými oxidačními inhibitory je pomalejší než u minerálních olejů. To znamená, že těmito přísadami můžeme proces stárnutí zpomalit [15].



a) Minerální olej

b) olej se syntetickými  
oxidačními inhibitory

**Obr.11:** Olej zestárlý při teplotě 110°C za 0, 40, 174, 264 dnů. Převzato z: [15].

### 5.2.7. Kaly a usazeniny

Jsou to nerozpustitelné částice v oleji (usazeniny). Jedná se o produkty oxidace nebo degradace. Jsou to různé pevné částice jako uhlík, oxidy kovů. Kaly jsou zoxidované aromatické uhlíky (asfaltény a asfalogení kyseliny) na které se vážou polární uhlovodíky [14].

Při oxidaci uhlovodíků, reakcí peroxidů s tvořenými radikály nebo katalytickým působením kovů a vody na volné radikály vzniknou mastné kyseliny a jiné kyslíkaté látky. Mýdla se pak vytváří při působení mastných kyselin, pevných částic a vody [14].

Asfaltény vznikají oxidací aromatických a aromaticko-cyklanických uhlovodíků. Chvěním a stárnutím pevných částí, zejména celulózy se tvoří pevné částice [14].

Kaly jsou nežádoucí, protože způsobují ohřívání a další polymerační reakce. Usazují se v teplejších místech transformátorů. To způsobuje horší odvádění tepla z povrchu vinutí. Dále v sobě kaly zadržují vlhkost, čímž se snižuje izolační odpor mezi vodiči a mohou tak vznikat mezizávitové zkratky nebo další jiné přeskoky [14].

Před naplněním oleje do transformátoru je třeba olej filtrovat aby došlo k zachycení částic. To se dělá za pomoci membránových filtrů o velikosti pórů 0,8 – 5  $\mu\text{m}$ . Počet částic se určuje v 100  $\text{cm}^3$  mikroskopem [18].

#### 5.2.8. *Mezipovrchové napětí*

Odhaluje mezi olejem a vodou rozpustné polární znečišťující látky a také stupeň zestárnutí oleje. Na rozhraní se vyskytují organické látky s karboxylovou nebo hydroxylovou skupinou. Způsoby měření jsou následující [14]:

- Měření síly, potřebné pro odtržení platinového prstence nebo tenké skleněné destičky z kapalného izolantu
- Kapková metoda – určení hmotnosti a objemu kapalného izolantu z kapiláry do vzduchu a do měřené kapaliny (obě kapaliny musí mít stejnou teplotu). Zestárnutí oleje se dá tímto způsobem i dobře odhadnout vizuálně podle velikosti kapky [14].

#### 5.2.9. *Bod vzplanutí*

Je to teplota, při níž se vznítí a následně zhasne směs par testované látky a vzduchu. U kapalných izolantů by měla být vyšší než 150  $^{\circ}\text{C}$  [14].

#### 5.2.10. *Viskozita*

Je důležitý údaj, reprezentuje odvádění tepla. Charakterizuje vnitřní tření a tedy síly mezi molekulami izolantu. Čím větší tato síla je, tím je pohyb kapaliny více brzděn. Zestárlé oleje mají větší viskozitu než nové [14].

Dynamická viskozita – v soustavě SI znamená sílu, která je potřebná k posunu vrstvy o ploše 1  $\text{m}^2$  oproti stejné vrstvě ve vzdálenosti 1 m o 1 m ve vodorovné rovině. Základní jednotka 1 Pa [14].

$$\eta = \nu \cdot \rho \cdot 10^3 \quad (8)$$

$\eta$  hustota proměřované kapaliny při teplotě určení viskozity [g.cm<sup>-3</sup>]

Kinematická viskozita – určení dobou průtoku objemu dané kapaliny způsobené gravitační silou kalibrovaným skleněným kapilárním otvorem viskozimetru při známé teplotě. Základní jednotkou je 1 stokes – St [m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>] [14].

$$\nu = C \cdot t \quad (9)$$

$C$  konstanta viskozimetru [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]

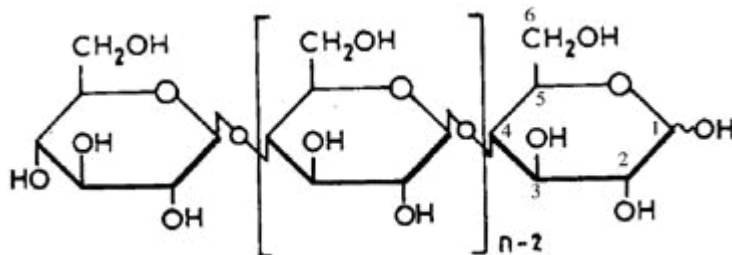
$t$  střední hodnota doby průtoku viskozimetru [s]

### 5.2.11. Korozivní síra

Reaguje s kovovými povrchy a vytváří sulfidy kovů. To se děje při teplotách nad 300 °C, kdy se rozkládají molekuly, které obsahují síru. Sulfidy mědi se usazují na povrchu celulózového papíru a snižují tak izolační odpor, protože vlivem těchto částecek může dojít k elektrickému výboji [14].

### 5.3. Složení papíru

Celulóza je hlavní složkou buničiny, z níž se papír vyrábí. Izoluje se ze dřeva odstraněním ostatních složek jako je lignin, hemicelulóza, oleje atd. Na obrázku je vzorec celulózy [C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>]<sub>n</sub> [14].



Obr.12: Vzorec celulózy. Převzato z: [14].

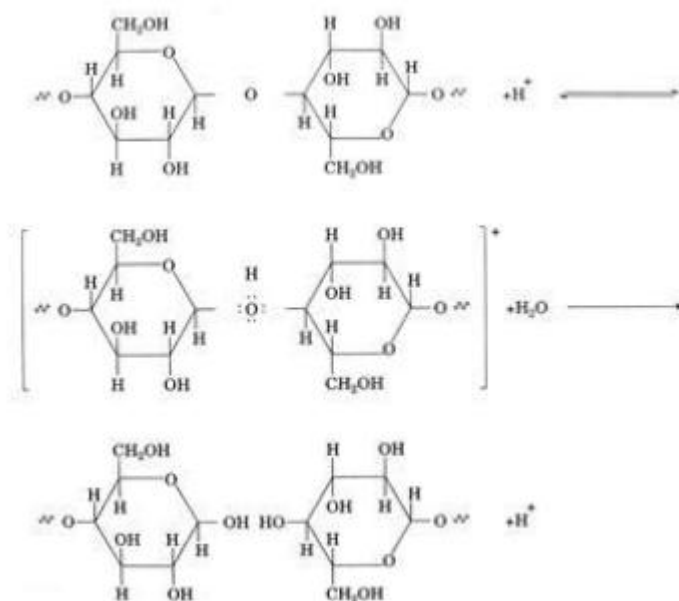


Na degradaci papíru mají vliv různé faktory. Mezi tzv. vnitřní faktory se zahrnuje kvalita a chemické složení papíru, nečistoty, použitá plniva a vnější faktory jsou zejména teplota, účinek oxidů síry, vlhkost atd. [14].

Vlastnosti papíru jsou dány druhem použitých vláknitých surovin pro jejich výrobu a záleží také na jejich zpracování. Papír je velmi hydrofobický, tedy má schopnost přijímat, ale také uvolňovat molekuly vody. Nejprve se molekuly vody naskládají po povrchu vláken v jedné vrstvě, kde jsou vázány vodíkovým můstkem. Pokud se vlhkost dále zvyšuje, naváže se dalších 6 až 7 vrstev molekul vody na první vrstvu [17].

### 5.3.1. Hydrolýza

Je rozklad chemických vazeb při působení vody. Glykosidická vazba v celulóze je stabilní v neutrálním nebo mírně alkalickém prostředí. V kyselém prostředí tato vazba podléhá hydrolýze. Dochází k postupnému zkracování polymeračního řetězce. To má za následek ztrátu mechanických vlastností papíru [14].



**Obr.13:** Hydrolýza glykosidické vazby. Převzato z: [14].

### 5.3.2. Posouzení stárnutí papíru

Celobiozové složky, které jsou propojeny kyslíkovými můstky v dlouhý řetězec, strukturně představují makromolekulu celulózy. Výraz průměrný polymerační stupeň PPS (v zahraničních pramenech označovaný DP) označuje průměrnou velikost takové makromolekuly a definuje se jím počet základních molekul kruhové formy glukózy v řetězci makromolekuly celulózy pomocí poměru jejich hmotností [16].

$$\text{PPS} = \frac{G_p}{G_m} \quad (10)$$

$G_p$             *hmotnost molekuly polymeru (glukózy)*

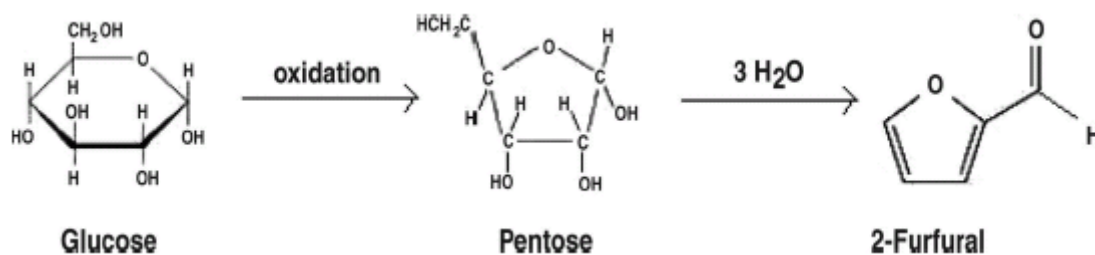
$G_m$             *hmotnost molekuly monomeru (glukózy)*

Izolační papíry v transformátorech obsahují více jak 90 % čisté celulózy. Tepelné namáhání způsobuje ztrátu mechanických vlastností. Při teplotách nad 100 °C dochází k vývoji degradačních plynů. Při teplotách 150 °C až 170 °C dochází ke štěpení vazeb C-O, C-C a C-H, objevují se plyny CO, CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>. Teploty 270 °C a více narušují celulózová vlákna do takové míry, že se objevují uhelné zbytky. Pokud je materiál vystaven dostatku kyslíku, projeví se i oxidační stárnutí, které ještě více uspíší proces stárnutí [14].

Problém s monitorováním papíru je takový, že je obtížné získat vzorek k testování a pokud je vzorek k dispozici, nemusí odrážet celkový stav izolačního papíru.

Stupeň polymerizace PPS (DP) se u papíru obvykle pohybuje kolem 1000. Při stárnutí se řetězce polymeru rozdělují na menší řetězce a tak hodnota PPS neustále klesá. Hodnota 200 a méně je obvykle naznačuje konec životnosti izolačního materiálu. V této době papír ztratil svou mechanickou pevnost [17].

Mezi produkty rozkladu celulózy patří oxid uhelnatý (CO), oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>), organické kyseliny, voda a volné molekuly glukózy. Glukózové prstence lze dále rozložit na další látky zvané furany [17].



**Obr.14:** Formování furfuralu z glukózového monomeru. Převzato z:[17]

V kyselém prostředí glukóza produkuje 2-HMF (2-hydroxymethylfurfural). Ten může být dále rozkládán na kyselinu mravenčí a vodu nebo na kyselé polymery. Rozklad kyseliny mravenčí vede následně ke vzniku oxidů uhlíku. Produkty oxidační hydrolyzy jsou především kyseliny [17].

Pro určení degradace papírové izolace je dominantní složkou přítomnou v oleji 2-furaldehyd. Není možné měřit PPS přímo z izolačního papíru při provozu transformátoru. Lze však získat určitý odhad z koncentrace částic (c) furfuralu na bilion částic (ppb). Použijeme následující rovnici [17]:

$$\text{PPS} = \frac{\log_{10}(0,88c) - 4,51}{-0,0035} \quad (11)$$

Stárnutí papíru v prostředí při konstantní teplotě, vlhkosti a koncentraci kyslíku lze popsat pomocí Arrheniova vztahu [17]:

$$\frac{1}{\text{PPS (doba stárnutí)}} - \frac{1}{\text{PPS (na začátku)}} = A \times \text{doba stárnutí} \times e^{-E/(RT)} \quad (12)$$

<i>A</i>	<i>konstanta závislá na chemickém prostředí</i>
<i>E</i>	<i>aktivační energie reakce stárnutí (J/mol)</i>
<i>R</i>	<i>konstanta plynu (8.314 J/mol)</i>
<i>T</i>	<i>teplota v kelvinech</i>

Ve skutečném transformátoru jsou teplotní změny dány zátěží a podmínek prostředí, ve kterém se transformátor nachází. Arrheniův vztah tyto změny nebere v úvahu. Přesto pomocí rovnice lze použít k odhadu životnosti papíru [17].

Hodnoty PPS u transformátorů se liší podle toho, jestli se jedná o dolní část vinutí nebo horní část. To je způsobeno nižšími teplotami ve spodní části kvůli lepší cirkulaci oleje a tudíž lepšímu chlazení. Vyšší tepelné odolnosti papíru se dosahuje přidávkem dusičnanových sloučenin (močovina, melamin, dikyandiamid, polyakrylamid) kyanoethylací a acetylací [17].

## 6. Vícefaktorové modely stárnutí

Popisují životnost zkoumaného materiálu a zároveň napomáhají pochopit děje, které v materiálu probíhají. Čím lepší máme znalosti o fyzikálně chemických vlastnostech zkoumaného materiálu (např. hodnoty aktivační energie, teploty skelného přechodu, rychlosti koagulace, rychlosti pohybu náboje, vznik prostorového náboje atd.) a o vnějších měřitelných fenomenologických projevech (např. doby do průrazu, průrazná napětí, resorpční charakteristiky, izolační odpor atd.), tím konkrétnější model stárnutí lze sestavit. Je velmi obtížné zahrnout do modelu stárnutí veškeré aspekty, které stárnutí ovlivňují. Snaha je tedy zahrnout těchto činitelů co nejvíce. Mezi klíčovými faktory jako jsou elektrické a tepelné namáhání, které způsobují kontinuální degradaci materiálu, tak je třeba zahrnout faktory, které již byly popsány, jako biologické faktory, účinky chemikálií, působení klimatických podmínek, záření atd. Nejméně popsaných modelů je pak při působení vysokofrekvenčního pulzního namáhání [6].

Jak již bylo řečeno, velký podíl na stárnutí izolačního systému má stárnutí elektrické. Přesný mechanismus však do dneška není plně znám, vychází se hlavně z empirických poznatků. Pro určování životnosti je používán exponenciální a mocninný model. Tyto modely však popisují pouze jediný degradační faktor [6].

Jestliže je materiál vystaven vlivu elektrického pole a současně zvýšené teplotě pak k selhání materiálu dochází dříve, než kdyby působily tyto faktory zvlášť. Výsledné stárnutí není pouze algebraický součet těchto účinků [6].

### 6.1. *Interakce degradačních činitelů*

**Přímou interakci** lze popsat jako stav, kdy se jednotlivě působící faktory navzájem ovlivňují do takové míry, že jejich působení je diametrálně odlišné od stavu, kdy se uplatňují tyto vlivy jednotlivě. Typickým příkladem takového působení je oxidace za zvýšené teploty. Samotná zvýšená teplota nijak radikálně materiál neovlivňuje, ovšem za přítomnosti kyslíku velmi výrazně urychluje oxidační reakce. Stejně tak jako oxidace při pokojové teplotě nijak významně materiál nedegraduje [6].

**Nepřímou interakci** můžeme definovat jako situaci, kdy několik faktorů působí současně na materiál, jednotlivě působící vlivy zůstávají nezměněny, jako by působily samostatně, ale k ovlivnění dochází prostřednictvím jejich účinků. Jako nepřímou interakci můžeme označit například současné působení mechanického namáhání a působení elektrického pole. Mechanické namáhání může rozrušit materiál a tím dojde k nárůstu částečných výbojů, které způsobují rychlejší degradaci materiálu [6].

Nejčastěji používané modely jsou:

Simonio model, Ramuův model, Fallouův model a model podle Crinea. Tyto modely ukazují rozdílné přístupy k této problematice. Simonio, Ramuův a Faluův model jsou více méně empirickými vztahy, kde je třeba některé konstanty získat experimentálně v modelových podmínkách [6].

Příkladem plnohodnotného fyzikálního modelu může být Crineův model.

### 6.2. *Crineův model*

Zde všechny parametry mají svůj fyzikální význam. Crine vysvětluje proces stárnutí pomocí představy dvojité potenciálové jámy. Energetická bariéra odděluje provozuschopný stav od stavu selhání. Aby se systém dostal z provozuschopného stavu do stavu selhání, potřebuje dostatečnou energii potřebnou k překonání energetické bariéry. Pravděpodobnost získání dostatečné energie k přechodu bariéry, tj. pravděpodobnost selhání systému, je dána Boltzmanovou statistikou. Tomuto procesu významně napomáhá elektrické pole tím, že deformuje energetickou bariéru. Výška energetické bariéry se na straně provozuschopného stavu snižuje a o stejnou

hodnotu se na straně poruchového stavu zvyšuje. Tím se významně zvyšuje pravděpodobnost přechodu z jedné polohy do druhé [6].

Na obrázku č.15 můžeme vidět, že přechod částice (nosič elektrického náboje) z bodu A do bodu B a naopak je stejně pravděpodobný. Pravděpodobnost přechodu částice z jednoho bodu do druhého roste, pokud se zvýší teplota. Částice mají vyšší kinetickou energii. Naopak při zvýšení potenciálové bariéry  $W$  (výška bariéry) pravděpodobnost klesá. V situaci kdy na látku nepůsobí žádné elektrické pole, částice zaujímají rovnocenné energetické úrovně a přechody jsou tedy stejně pravděpodobné v obou směrech. Pokud začne na látku působit elektrické pole, tak se změní energetické úrovně (na obrázku značeno jako  $A'$  a  $B'$ ) částic a částice  $A'$  má před sebou nižší energetickou bariéru než částice  $B'$ . Pravděpodobnost přechodu z  $A'$  do  $B'$  je tedy větší než obráceně [11].

Číselné vyjádření těchto pravděpodobností [11]:

$$P(A' \rightarrow B') = e^{-\frac{W-\Delta W}{kT}} \quad (13)$$

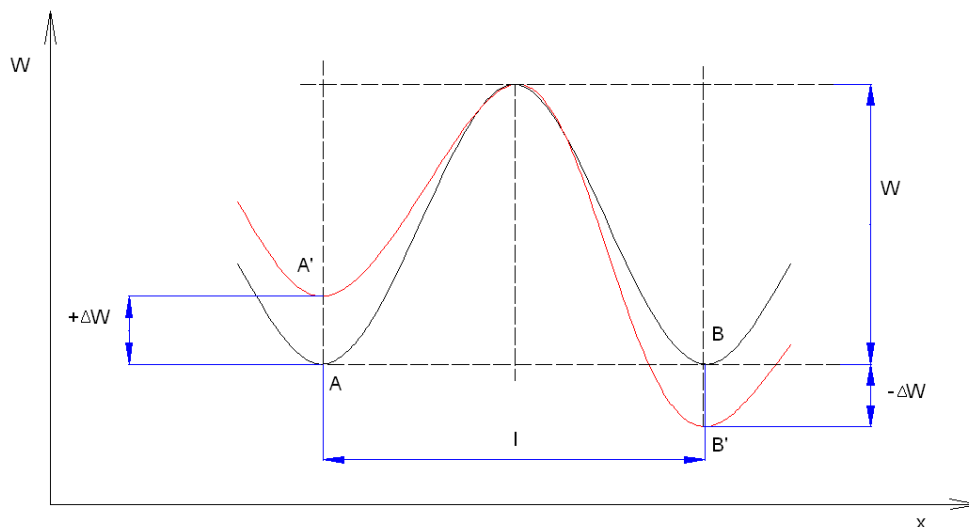
$$P(B' \rightarrow A') = e^{-\frac{W+\Delta W}{kT}} \quad (14)$$

$W$	<i>velikost potenciálové bariéry [kJ.mol<sup>-1</sup>]</i>
$k$	<i>Boltzmanova konstanta [1,381.10<sup>-23</sup>J.K<sup>-1</sup>]</i>
$T$	<i>Termodynamická teplota [K]</i>

Čas potřebný k přechodu energetické bariéry do stavu selhání je podle Crinea doba života izolačního systému. Crine uvádí, že střední doba života materiálu je střední doba přechodu energetické bariéry, kterou lze vyjádřit pomocí Boltzmanovy statistiky a pomocí zákonů termodynamiky [6].

$$\tau = \left( \frac{h}{k_B T} \right) e^{\frac{\Delta W}{k_B T}} \cosh \left( \frac{e_p \lambda E}{k_B T} \right) \quad (15)$$

$h$	<i>Planckova konstanta</i>
$k_B$	<i>Boltzmanova konstanta</i>
$\Delta W$	<i>volná aktivační energie [kJ.mol<sup>-1</sup>]</i>
$\lambda$	<i>vzdálenost mezi oběma stavy pro daný fyzikální děj</i>
$e_p$	<i>elektrický náboj částic ovlivňujících proces stárnutí</i>



Obr.15: Dvojitá potenciálová jáma [11].

### 6.3. Modely u kterých je třeba získat materiálové konstanty experimentálně

#### 6.3.1. Simoniho model [19].

$$\tau(T, E) = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \cdot e^{\alpha \frac{B}{T}} \cdot f(E) \quad (16)$$

$f(E)$	obecná funkce vyjadřující vliv elektrického pole
$T$	termodynamická teplota
$A, B$	materiálové konstanty

#### 6.3.2. Ramuúv model

Model elektrického stárnutí s tepelnou závislostí [19].

$$\tau(T, E) = c(T) E^{-n(T)} e^{-B \frac{1}{T}} \quad (17)$$

Platí následující substituce

$$c(T) = e^{c_1 - c_2 \Delta \left( \frac{1}{T} \right)} \quad (18)$$

$$n(T) = n_1 - n_2 \Delta \left( \frac{1}{2} \right) \quad (19)$$

$C_1, c_2, n_1, n_2, B$       *materiálové konstanty*

### 6.3.3. Faluív model

Induktivně odvozený poloempirický model je založen na exponenciálním modelu pro elektrické stárnutí [19].

$$\tau = e^{A(E) + \frac{B(E)}{T}} \quad \mathbf{E} > \mathbf{0} \quad (20)$$

kde platí

$$A(E) = A_1 + A_2 E \quad (21)$$

a dále

$$B(E) = B_1 + B_2 E \quad (22)$$

$A_1, A_2, B_1, B_2$       *konstanty určené experimentálně*

Předchozí uvedené modely sice vycházejí z termodynamiky, ale vždy je třeba experimentálně určit konstanty pro každý izolační materiál [19].



## 7. Parametry, které byly použity při zpracování naměřených dat

### 7.1. Vnitřní a povrchová rezistivita

Rezistivita ( $\rho$ ) udává číselně odpor vodiče dlouhého 1 m o průřezu 1 m<sup>2</sup> při teplotě 20 °C. Vodiče mají rezistivitu v rozmezí 10<sup>-2</sup> až 10<sup>1</sup> μΩm, odporové materiály v rozmezí 0,2 až 2 μΩm. Vnitřní rezistivita  $\rho_v$  (Ωm) je u izolantů v rozmezí 10<sup>6</sup> až 10<sup>18</sup>. (Jantar má 10<sup>15</sup> až 10<sup>17</sup>). Jedná se o poměr mezi intenzitou stejnosměrného elektrického pole a hustoty ustáleného proudu uvnitř izolantu. Je to odpor materiálu umístěného mezi dvěma elektrodami (jedna elektroda je umístěna pod vzorkem a druhá leží na jeho povrchu). Povrchová rezistivita  $\rho_p$  (Ω) je u izolantů nižší než vnitřní. Obecně je to poměr intenzity elektrického pole k proudové hustotě v povrchové vrstvě materiálu. Vlivem znečištění a vlhkosti mohou vznikat tzv. plazivé proudy. Povrchový elektrický odpor  $R_S$  je odpor materiálu měřený mezi dvěma elektrodami umístěnými na jeho povrchu [12].

Povrchová i vnitřní rezistivita je závislá na použitém materiálu a mění se v závislosti na změnách prostředí. Tyto změny mohou nastat pomalu nebo rychle. K měření velkých odporů jako izolačních odporů, odporů izolantu a polovodičů nelze obvykle použít běžné metody pro měření středních odporů, protože citlivost měřicích přístrojů i indikátorů vyvážených používaných pro měření středních odporů je většinou nedostatečná a izolační odpor měřicích zařízení i jednotlivých elementů bývá často řádově porovnatelný s měřeným odporem. Tyto odpory se často měří vysokým napětím, a proto se celé měření včetně měřicího přístroje musí dokonale izolovat a stínit, abychom odstranili vliv nežádoucích svodových proudů procházejících izolací a po povrchu izolace [13].

Zdroje napětí pro měření musí být dostatečně stabilní. Používají se různé doporučené napěťové hladiny, avšak nejčastěji se používají napěťové hladiny 100, 500, 1000 V. Je nutné uvést hodnotu zkušebního napětí, pokud odpor zkoušeného materiálu závisí přímo na napětí samotném [11].

## Měřicí metody

Způsoby měření a metodami pro měření vnitřní a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů se zabývá norma ČSN IEC 93 [11].

- **Přímé (Voltampérová metoda)**

Po přiložení stejnosměrného napětí na měřený materiál odečítáme proud, který materiálem prochází. Odpor se následně dopočítá [11].

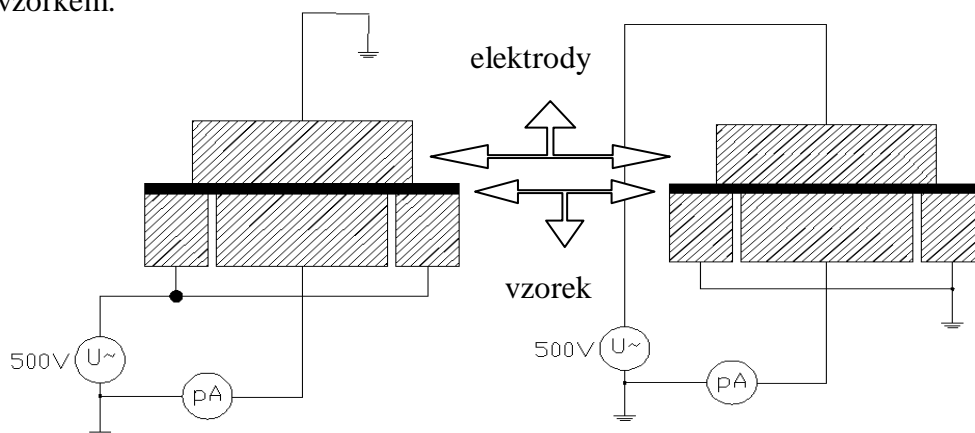
- **Porovnávací**

Metoda založená na porovnávání, nebo-li hledání poměru mezi odporem neznámého materiálu a známých odporů, která jsou zapojeny do můstku [11].

Při měření vnitřní rezistivity dojde k nabití materiálu, které by ovlivnilo měření povrchové rezistivity, díky změnám, které v materiálu proběhnou. Proto musíme nejdříve měřit povrchovou rezistivitu a poté teprve vnitřní rezistivitu [13].

### 7.1.1. Měření povrchové a vnitřní rezistivity Voltampérovou metodou

Jde o nejjednodušší metodu přímého odečítání proudu, procházejícího vzorkem.



**Obr.16:** Schéma zapojení při měření

**Obr.17:** Schéma zapojení při měření

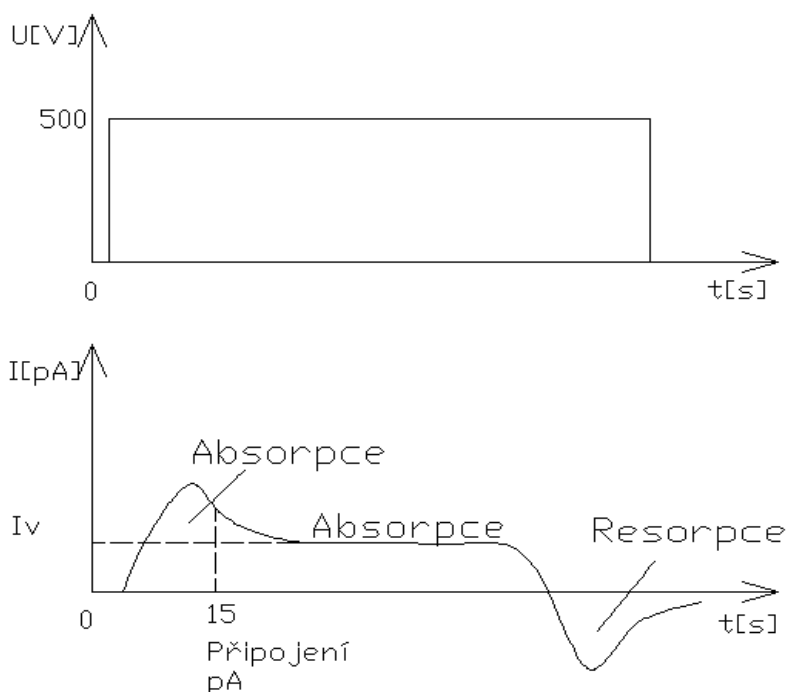
*Povrchové rezistivity [13].*

*vnitřní rezistivity [13].*

Pro kvalitní materiály je nutné použít velmi citlivý ampérmetr s citlivostí minimálně  $10^{-16}$ . Neznámý odpor materiálu se vypočítá podle [11]:

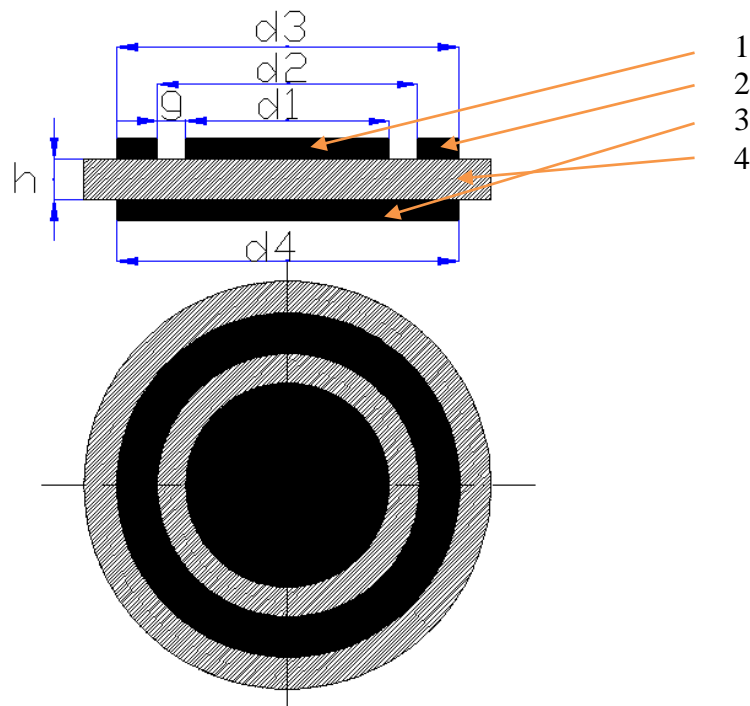
$$R_x = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (23)$$

$R_x$             *neznámý odpor*  
 $U$               *přiložené napětí [V]*  
 $I$                 *proud procházející vzorkem [A]*



**Obr.18:** Průběh proudu vzorkem po připojení napětí [13].

Měřené vzorky mohou mít různé tvary. Při měření vnitřního odporu musí být průměr nebo délka měrné elektrody alespoň desetinásobek tloušťky zkušební tělesa. Rozměr nechráněné elektrody se má rozměrově rovnat vnitřnímu rozměru ochranné elektrody. Při měření povrchového odporu má být šířka mezery mezi chráněnou a ochranou elektrodou minimálně dvojnásobek tloušťky zkušební tělesa. A rozměr chráněné elektrody má být minimálně desetinásobek tloušťky zkušební tělesa [11].



**Obr.19:** Elektrodotová uspořádání pro měření vnitřního a povrchového odporu.

1- chráněná(měrná) elektroda, 2- ochranná elektroda, 3- ochranná elektroda, 4 vzorek [11].

Vodivost izolantů je způsobena přítomností volných nebo slabě vázaných iontů příměsí a nečistot a částečně i iontů vlastní látky, které se za přítomnosti vnějšího elektrického pole mohou pohybovat [11].

Koncentrace i pohyblivost nosičů nábojů jsou značně teplotně závislá (exponenciálně rostou s teplotou), proto i vnitřní konduktivita  $\gamma_v$  a vnitřní rezistivita  $\rho_v$  jsou závislé na teplotě [11].

Měření vnitřní rezistivity se převádí na měření vnitřního odporu  $R_v$ , který se počítá z proudu procházejícího vnitřkem izolantu mezi měřicí a napěťovou elektrodou a z přiloženého napětí. Odpor lze také měřit přímo megaohmmetrem.

$\rho_v$  se pak počítá z rozměrů vzorku (elektrodotového systému) a odporu  $R_v$  [1]:

$$\rho_v = R_v \frac{S_{ef}}{h} = R_v \frac{(dm + c)^2}{4.h} \quad (24)$$

$\rho_v$	<i>vnitřní rezistivita [<math>\Omega \cdot m</math>]</i>
$R_v$	<i>vnitřní odpor [<math>\Omega</math>]</i>
$S_{ef}$	<i>efektivní plocha měřící elektrody [<math>m^2</math>]</i>
$dm$	<i>průměr měřící elektrody [<math>m</math>]</i>
$c$	<i>šířka mezery mezi měřící a ochranou elektrodou [<math>m</math>]</i>
$h$	<i>tloušťka vzorku [<math>m</math>]</i>

## 7.2. Polarizační indexy

Polarizační indexy využívají pro popis stavu materiálu časovou proměnnost absorpčního proudu. Jsou to bezrozměrná čísla. Jednominutový polarizační index  $\pi_1$  je definován jako poměr absorpčních proudů v patnácté a šedesáté sekundě po přiložení napětí na vzorek. Polarizační indexy jsou nezávislé na rozměrech stroje [1].

Izolační odpor citlivě reaguje na nejslabší místo izolačního systému. Jeho pokles je často spojen s vlivem vlhkosti a vodivých nečistot. Při měření se provádějí dvě odečtení absorpčního proudu v časech 15 a 60 s po přiložení napětí na měřený objekt. Za absolutní velikost izolačního odporu se považuje hodnota změřená 60 s po přiložení napětí. Obě hodnoty jsou výchozími pro určení minutového polarizačního indexu  $\pi_1$  [1].

$$\pi_1 = \frac{i_{15}}{i_{60}} \quad [-] \quad (25)$$

$i_{15}$	<i>absorpční proud odečtený 15s po přiložení napětí,</i>
$i_{60}$	<i>absorpční proud odečtený 60s po přiložení napětí na zkoušený objekt. [1]</i>

Izolační materiály, které jsou v dobrém stavu, mají polarizační index výrazně větší než jedna. Kvalitní izolace mohou dosahovat hodnot 3 až 6. Na druhou stranu vlhké izolace nebo poškozené mají přibližně stejné hodnoty vodivostního a absorpčního proudu a proto se hodnota blíží k jedné [1].

### 7.3. Ztrátový činitel $\tan \delta$

Ve střídavém elektrickém poli se zpožďuje časový průběh elektrické indukce za průběhem intenzity elektrického pole. Toto zpoždění je právě o úhel  $\tan \delta$ . Jedná se o dielektrické ztráty. Na následujícím obrázku je znázorněn pro bližší představu fázorový diagram reálného dielektrika, který představuje rozložený proud přitékající do dielektrika do složek, na jejichž základě je možné si udělat obrázek o velikosti ztrátového činitele  $\delta$  [11].

*$I_{co}$  proud jímž se nabíjí geometrická kapacita  $C_0$*

*$I_{bzp}$  proud odpovídající rychlým bezztrátovým polarizacím (elektronová, iontová)*

*$I_a$  absorpční proud odpovídající ztrátovým pomalým polarizacím.*

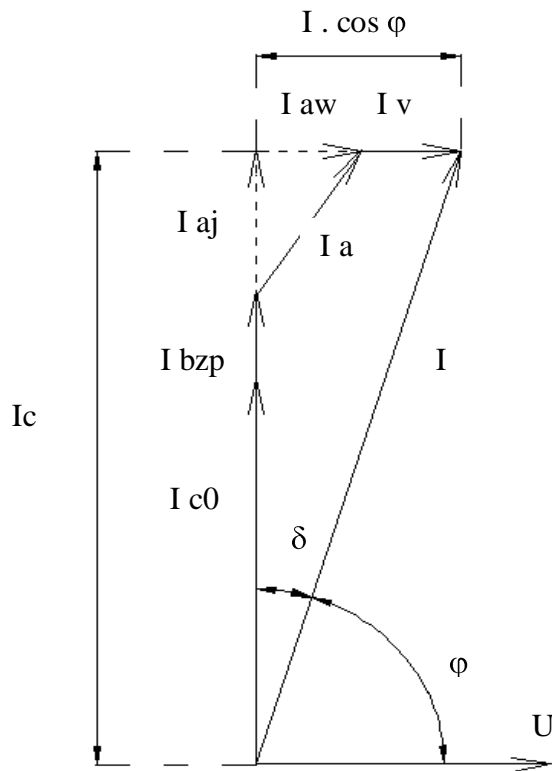
- Lze jej rozložit na dvě složky  $I_{aw}$  a  $I_{aj}$

*$I_{aj}$  jalová (bezztrátová) složka*

*$I_{aw}$  ztráty v dielektriku pokud prochází proud  $I_a$*

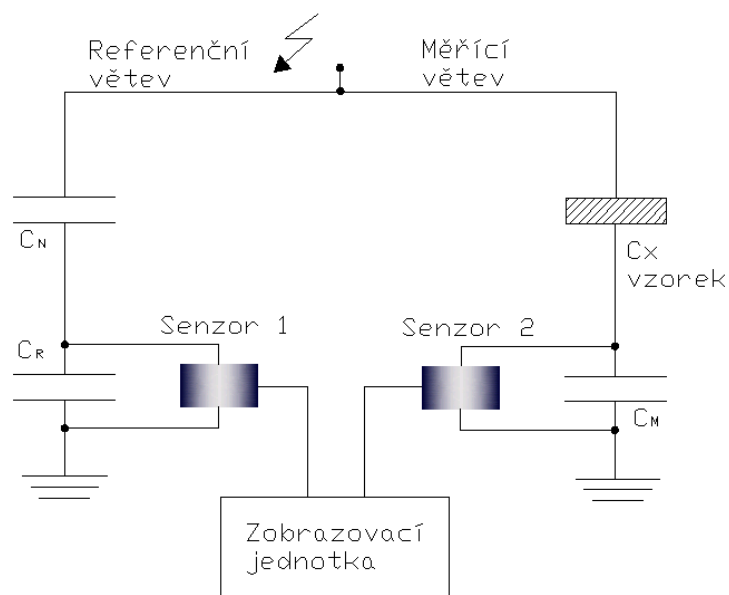
*$I_v$  vodivostní proud způsoben nenulovou el. vodivostí (ve fázi s napětím)*

*V bezztrátovém dielektriku by fázor proudu předbíhal napětí o fázový úhel  $\varphi=90^\circ$*



**Obr.20:** Fázorový diagram reálného dielektrika [11].

Data, která jsou zpracována v této práci byly změřeny pomocí automatického můstku pro měření dielektrických ztrát. Můstek vychází z principu Sheringova můstku a automaticky zobrazuje  $\text{tg}\delta$  nebo  $C_x$ .



**Obr.21:** Princip automatického můstku [11].

Větve můstku jsou kapacitními děliči, kondenzátory  $C_X$  a  $C_N$  jsou vyskonapět'ové a  $C_M$  a  $C_R$  nízkonapět'ové. Tento můstek nemusí být úplně vyvážen, protože se měří fázový úhel mezi napětími na nízkonapět'ových impedancích. Nízkonapět'ové kondenzátory  $C_M$  a  $C_R$  jsou hrubě nastaveny tak, že dělicí poměry větví jsou stejného řádu. Ztrátový úhel  $\text{tg}\delta$  se určí z fázového úhlu mezi napětími, která se objeví na nízkonapět'ových kondenzátorech [11].

## 8. Zpracování a vyhodnocení poskytnutých naměřených dat stárnutí různých druhů izolačních materiálů

V teoretické části jsou popisovány různé izolační materiály. Data, která jsou v této práci zpracována, se týkají izolačních systémů olej+papír nebo samotných olejových izolačních systémů.

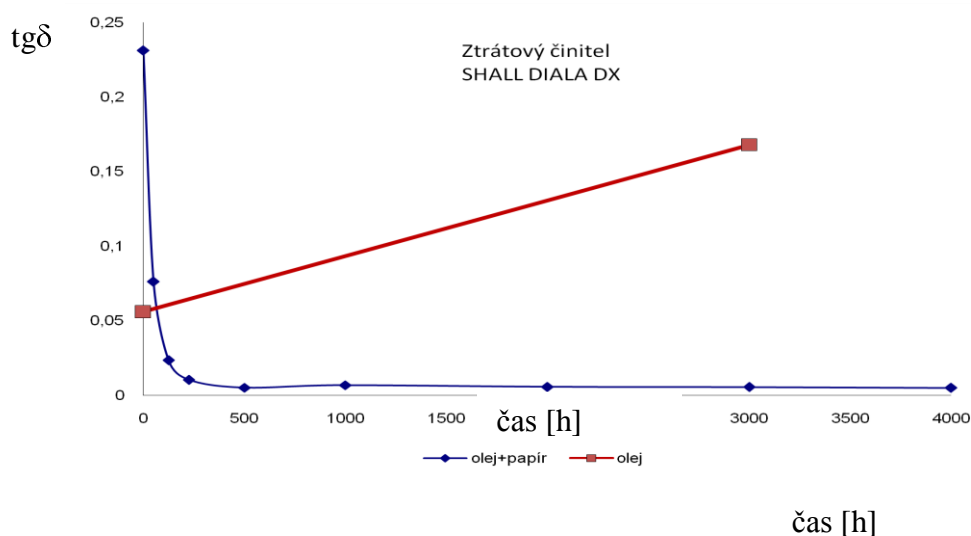
První část dat, které jsou v této práci uvedeny a zpracovány se týká izolačních systémů na bázi papíru a oleje. Izolační papír byl nasáknut olejem a po dobu 4000 hodin při teplotě 90 °C nechán stárnout. Během časového intervalu byl měřen izolační odpor systému a ztrátový činitel  $\tan \delta$ . Pro srovnání jednotlivých systémů byla použita vnitřní rezistivita, ztrátový činitel  $\text{tg} \delta$ , a polarizační index. Izolační materiál stárnul po dobu 4000 hodin při teplotě 90 °C.

Jednotlivé druhy olejů, které byly po tuto dobu testovány jsou následující:

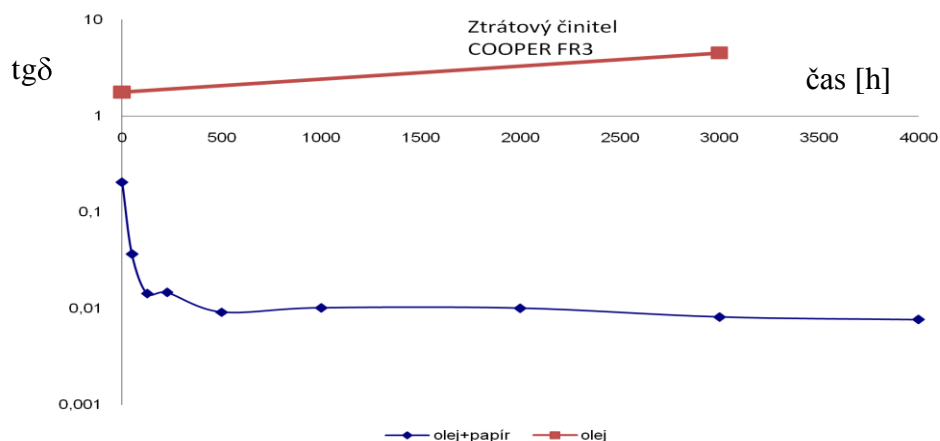
- SHELL DIALA DX
- COOPER FR3
- řepkový olej
- rafinovaný řepkový olej
- slunečnicový olej
- rafinovaný slunečnicový olej
- TECHNOL Y 3000.



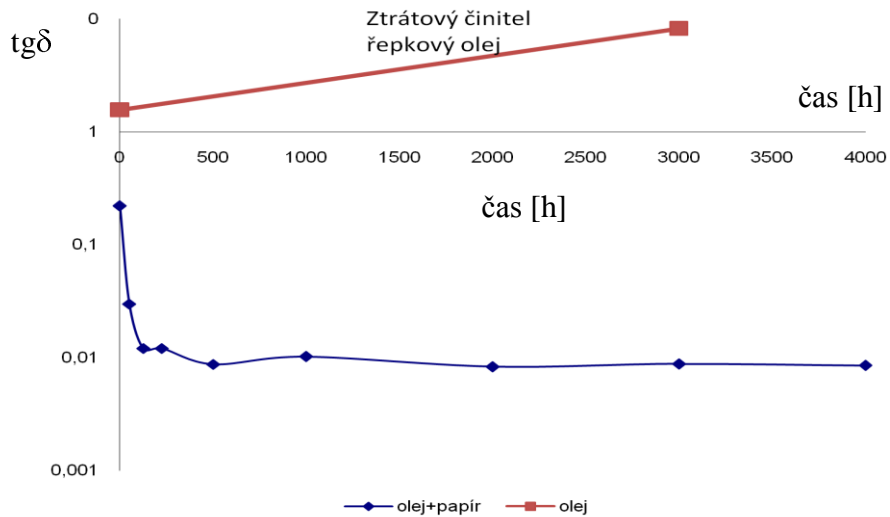
Následující grafy zobrazují závislost ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  v závislosti na čase (4000 hodin). Modrá křivka znázorňuje systém olej+ papír a červená křivka samotný olej. Bohužel pro samotný olej byly k dispozici pouze dvě hodnoty, proto se závislost zdá být lineární. Počáteční pokles ztrátového činitele u systému olej+papír znamená postupné prosakování papíru olejem. Ve výsledných grafech je snadno rozpoznatelné, že systém olej+papír je stálejší a má lepší izolační vlastnosti než samotný olej.



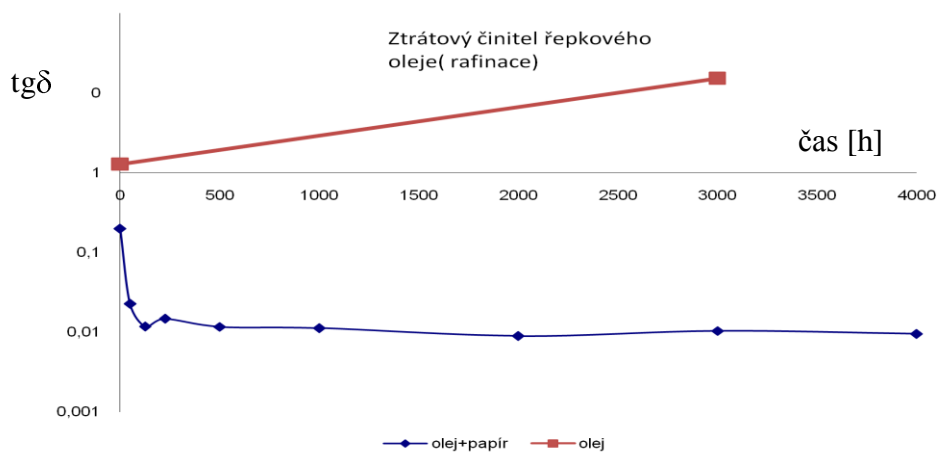
Obr.22: Průběh  $\text{tg } \delta$  pro olej SHELL DIALA DX.



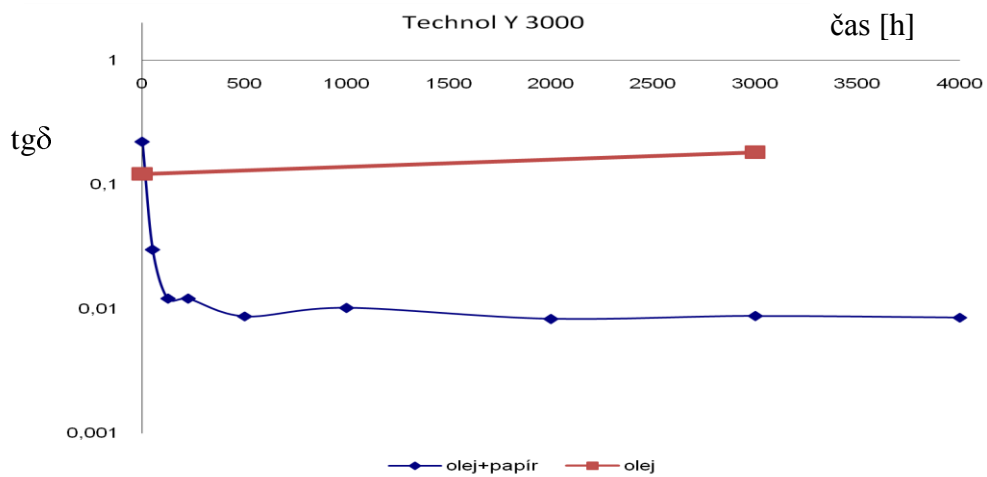
Obr.23: Průběh  $\text{tg } \delta$  pro olej COOPER FR3.



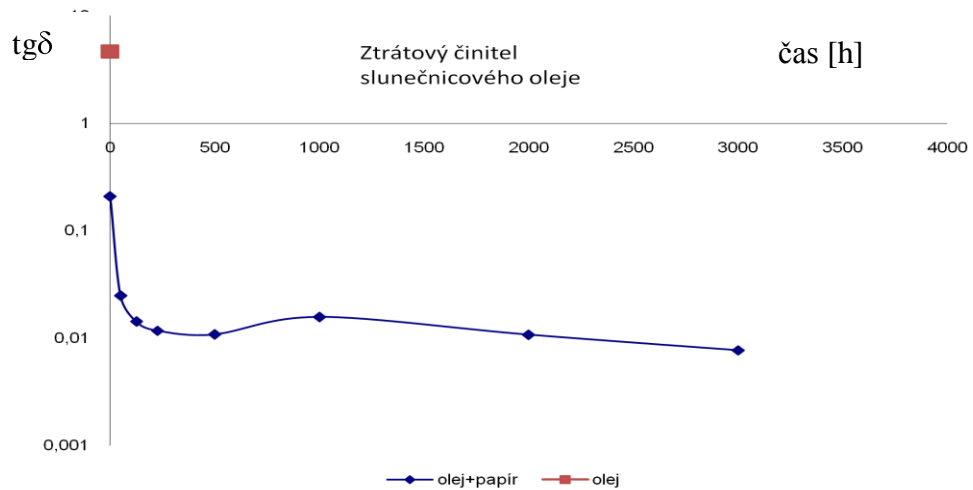
Obr.24: Průběh tgδ pro řepkový olej.



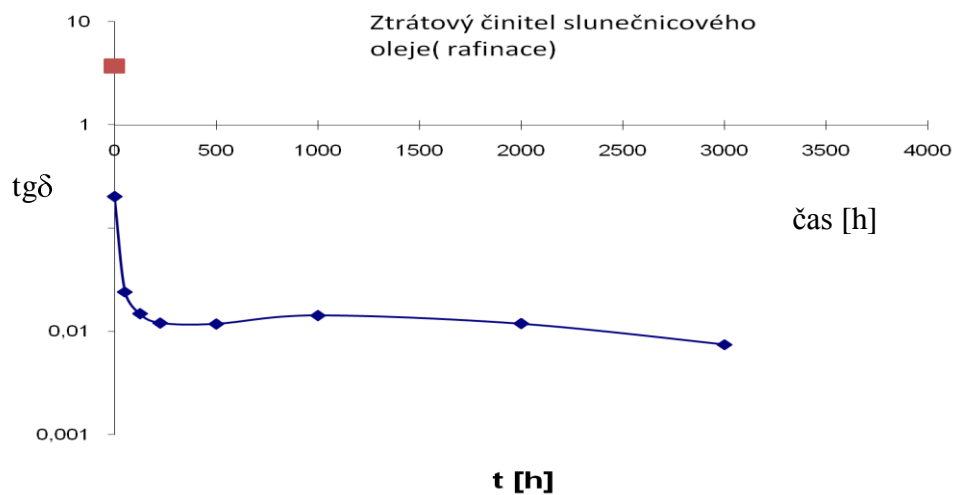
Obr.25: Průběh tgδ pro rafinovaný řepkový olej.



Obr.26: Průběh tgδ pro olej TECHNOL Y3000.

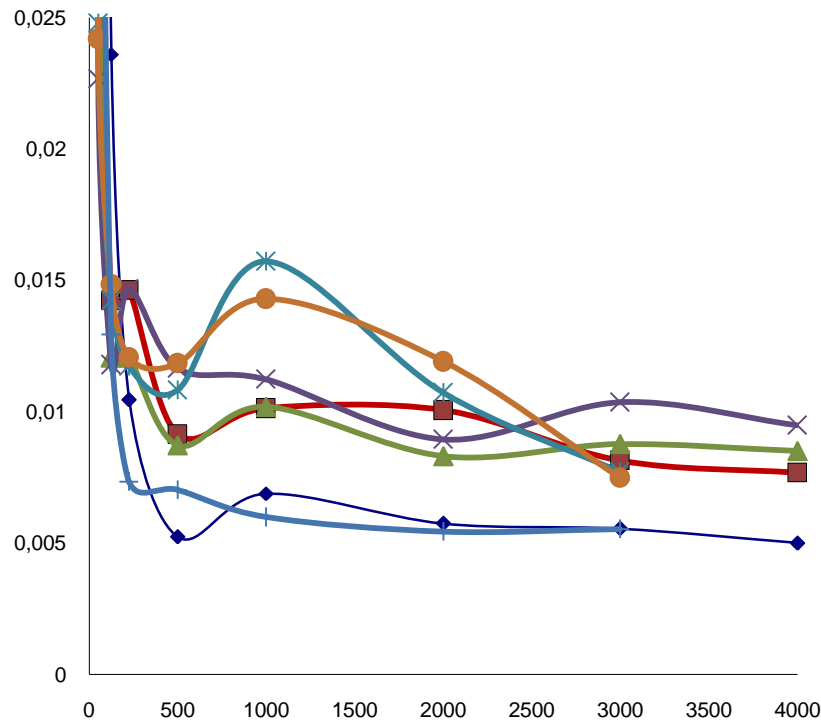


*Obr.27: Průběh  $tg\delta$  pro slunečnicový olej.*



*Obr.28: Průběh  $tg\delta$  pro rafinovaný slunečnicový olej.*

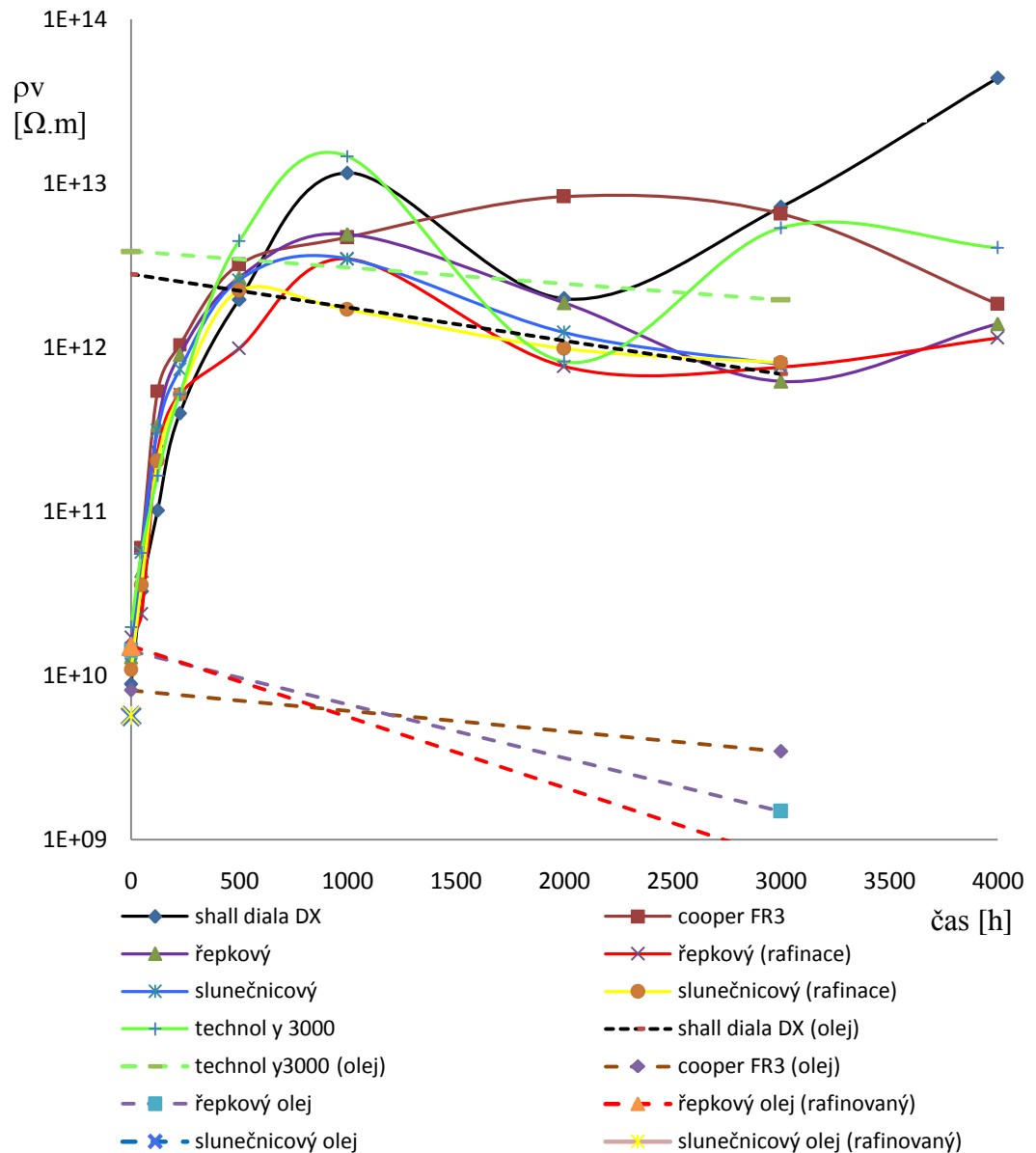
Z posledních dvou grafů u samotného rafinovaného i nerafinovaného slunečnicového oleje, je uvedena pouze hodnota  $tg\delta$  na začátku měření, ale hodnotu ve 3000 hodinách již nebylo možné odečíst, kvůli vysychání oleje.



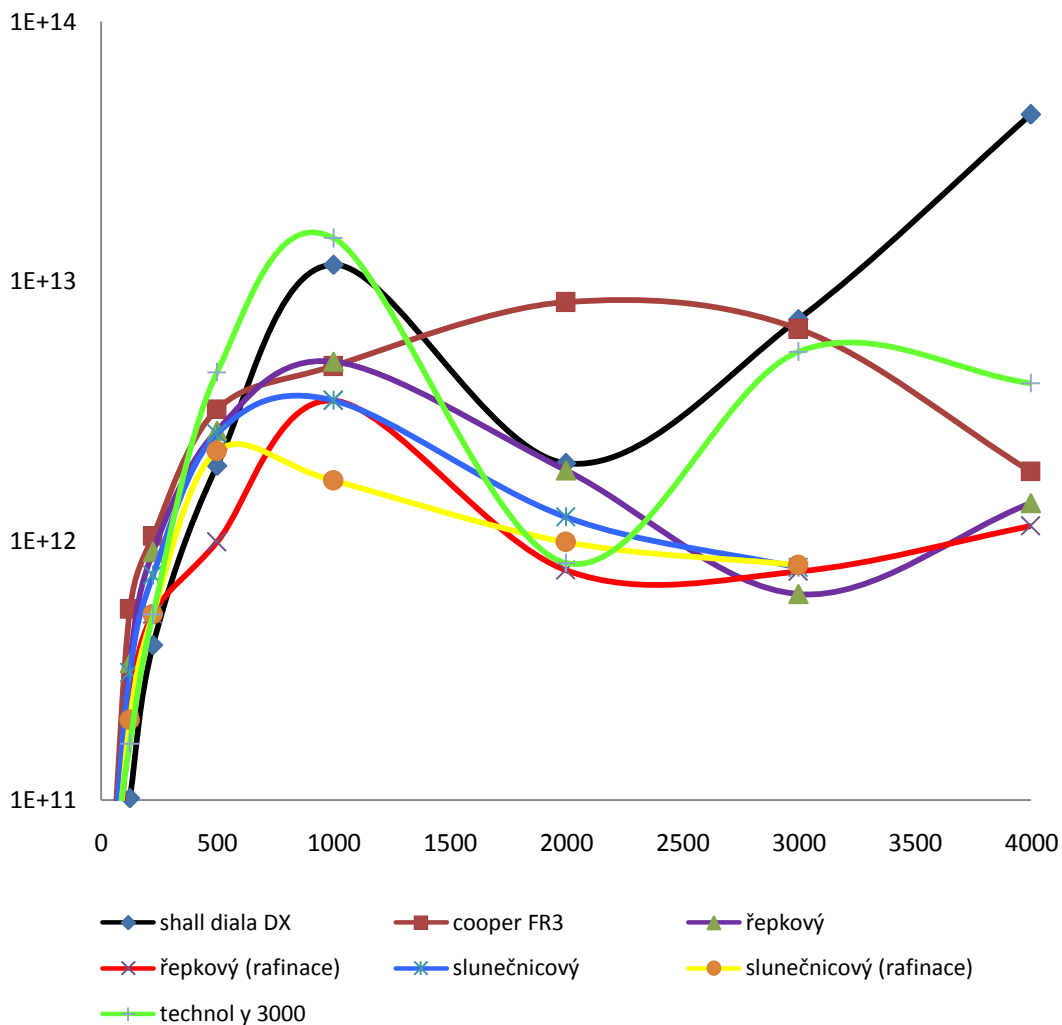
**Obr.29:** Průběh  $\text{tg}\delta$  v závislosti na čase pro uvedené impregnované izolační systémy.

Hodnoty systému olej+papír jsou si svým charakterem průběhu velmi podobné. Z počátku u všech hodnota  $\text{tg}\delta$  klesá kvůli nasákavosti papíru a následně si drží stálý průběh kolem určité hodnoty. To, že zde nejsou vidět žádné razantní změny v průběhu je způsobeno hlavně stálostí teploty, která byla po celou dobu testování a také doba, po kterou byl materiál stárnut není potřebně dlouhá, proto nelze určit žádný trend, který by naznačoval konec životnosti v daném časovém limitu. Při bližším prozkoumání trendu stárnutí samotných olejů vyplývá, že nejkvalitnější olej je SHELL DIALA DX, jehož ztrátový činitel  $\text{tg}\delta$  má po dobu 3000 hodin nejmenší rozptyl hodnot a drží se kolem hodnoty  $\text{tg}\delta=0,0065$ . Podobné vlastnosti vykazuje olej TECHNOL Y 3000.

Porovnání uvedených druhů olejů slouží i následující graf. Znárodnující vnitřní rezistivitu v závislosti na čase.



**Obr.30:** Průběh vnitřní rezistivity izolačních systémů olej+papír v porovnání s průběhy se samostatnými oleji



**Obr.31:** Průběh vnitřní rezistivity izolačních systémů olej+papír

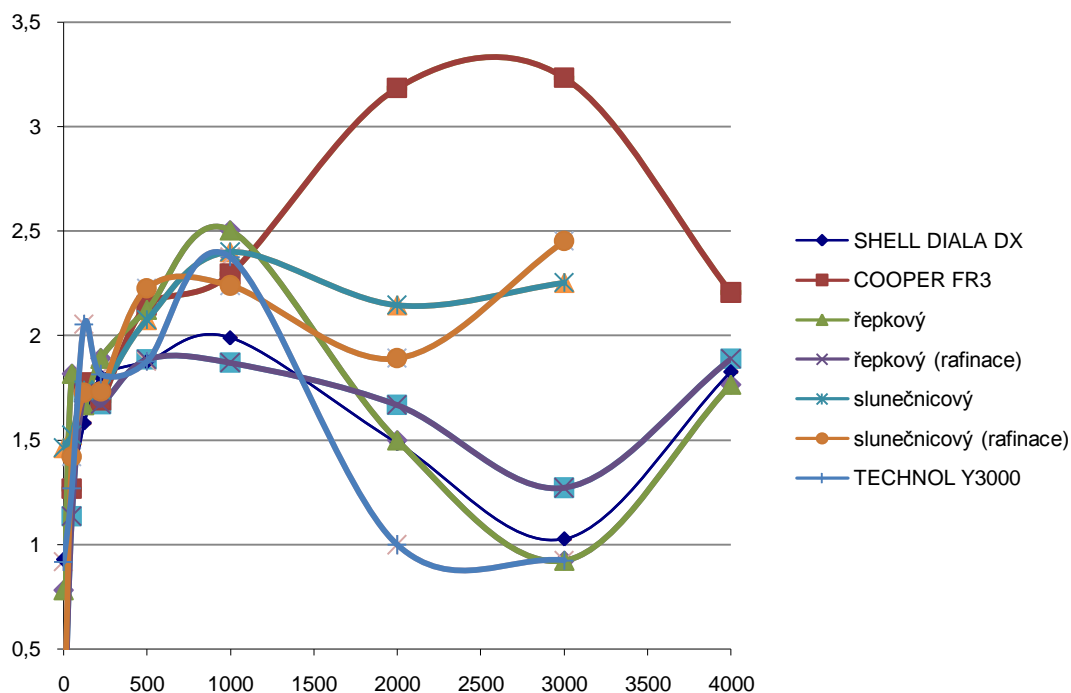
Graf popisující rezistivitu izolačních systémů jen potvrzuje, že izolační systém olej+papír (SHELL DIALA DX) má největší elektrickou odolnost a trend křivky v období mezi 3000 až 4000 hodinami naznačuje i dlouhou životnost. Zvlnění křivek v počáteční fázi je způsobeno impregnací oleje do papíru, než se olej vsákne a izolační systém pak začne vykazovat stálejší parametry.

Pro porovnání jsou v grafu č. 30 zakresleny čerchované čáry průběhu vnitřní rezistivity pro samotné oleje. Jednoznačně je tedy vidět, že přidáním papíru značně zvýšíme životnost i odolnost izolačního systému.

U samotných olejů byly k dispozici pouze počáteční a koncové hodnoty po (3000 hodinách) vnitřní rezistivity. Proto lineární charakter stárnutí je pouze orientační a udává spíše trend, než průběh stárnutí. Všechny oleje mají podle předpokladů po uplynutí 3000 hodin sníženou hodnotu vnitřní rezistivity.

U slunečnicového oleje následně chybí koncová hodnota z toho důvodu, že olej byl v takovém stavu, že se nedal změřit izolační odpor, prakticky došlo k vyschnutí oleje.

Poslední srovnání poskytnutých izolačních systému je znázorněno pomocí závislosti **polarizačního indexu** na čase.



*Obr.32: Průběh polarizačních indexů jednotlivých izolačních systémů olej+papír.*

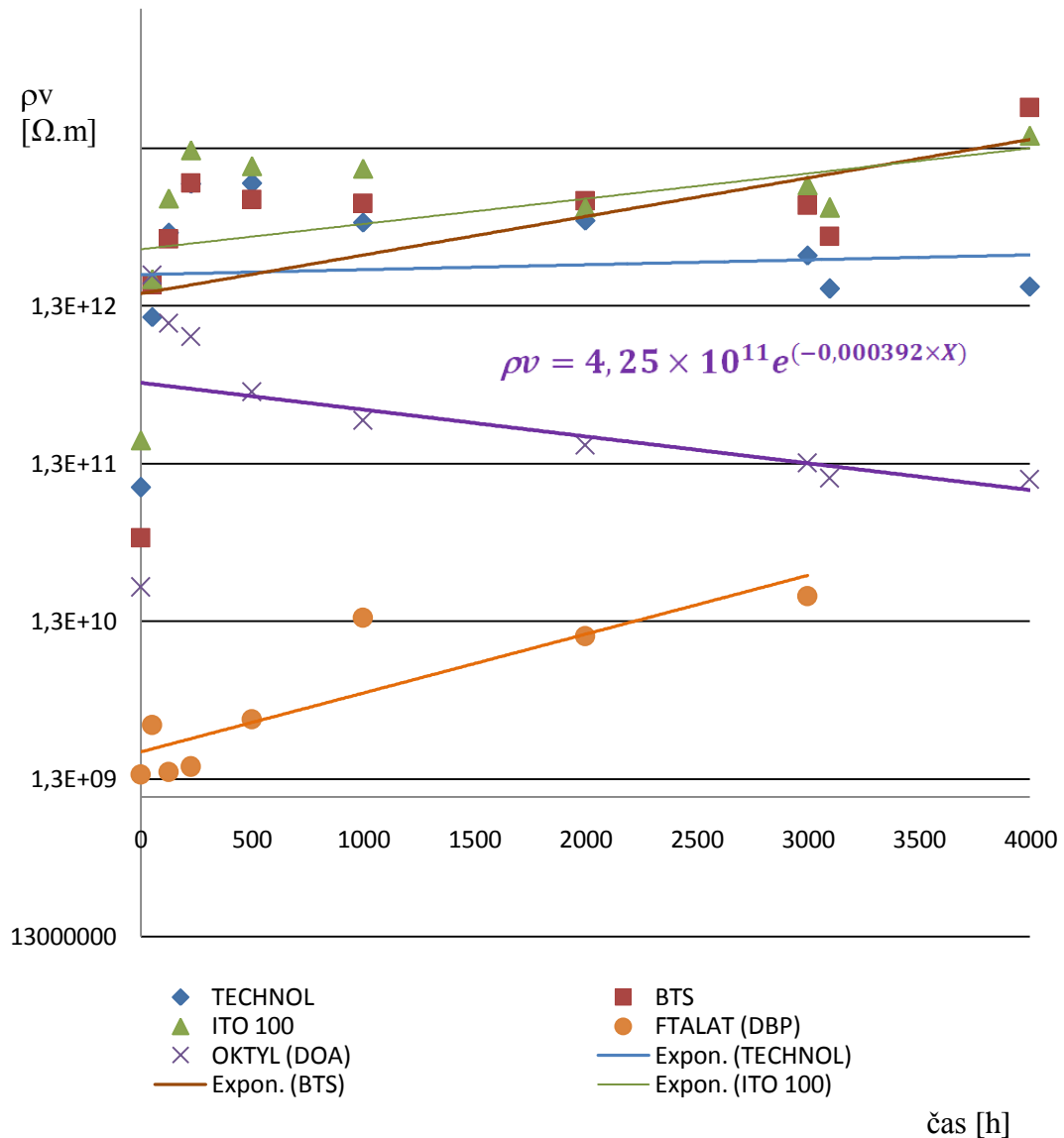
Kvalitní izolační systémy mají polarizační index výrazně větší než 1. Pokud se průběh blíží k jedné, to může znamenat například navlhlou izolaci.

## 9. Popis degradačního jevu pomocí matematické funkce vhodné pro počítačové systémy

Na následujícím grafu jsou znázorněny další vzorky izolačních systémů impregnant+papír. Vnitřní rezistivita je vynesena na logaritmické ose Y kvůli lepšímu porovnání mezi izolačními systémy. Počáteční rozptyl hodnot vnitřní rezistivity je opět způsoben nasakováním impregnantu do papíru. Určení trendu nejlépe odpovídalo při aplikování exponenciální spojnice trendu, která věrohodně kopíruje průběh vnitřní rezistivity v závislosti na daném časovém úseku, tedy 4000 hodin. A to především pro vzorky, kde byl impregnantem oktyl.

Pro ostatní impregnanty není rovnice regrese uvedena kvůli narůstajícímu trendu. Prakticky není možné, aby vnitřní rezistivita do nekonečna narůstala, klesající trend by byl pozorovatelný až po delší době než je 4000 hodin. Použitelná křivka je tedy v tomto případě pouze pro oktyl. Trend naznačuje pozvolný pokles vnitřní rezistivity podle exponenciální funkce.





**Obr.32:** Vnitřní rezistivita pro různé typy izolačních systémů papír+impregnant.

Pro porovnání, v tabulce č. 2 jsou uvedeny naměřené hodnoty vnitřní rezistivity  $\rho_v$  pro izolační systém, kde byl impregnantem oktyl a hodnoty spočítané podle exponenciální regresní křivky. Z počátku se hodnoty neshodují kvůli velkému rozptylu hodnot z již uvedených důvodů nasákavosti impregnantu do papíru, ale s postupem času se hodnoty ustálí a jsou hodnotám z regresní křivky velmi podobné. Lze tedy říci, že tato matematická funkce celkem věrohodně popisuje průběh vnitřní rezistivity v závislosti na čase. Tím lze získat určitou představu o životnosti izolačního materiálu.

Exponenciální rovnice popisující průběh vnitřní rezistivity izolačního systému papír+impregnant (Oktyl):

$$\rho v = 4,25 \times 10^{11} e^{(-0,000392 \times X)} \quad (26)$$

**Tabulka 2.** Porovnání naměřených a vypočtených hodnot vnitřní rezistivity  $\rho v$  pro izolační systém papír + impregnant, kde impregnantem je oktyl.

Čas[h]	Naměřené hodnoty $\rho v$	Vypočítané hodnoty $\rho v$ podle exponenciální funkce
0	21461408802	4,00E+11
50	2,05E+12	3,92E+11
125	1,01E+12	3,81E+11
225	8,33E+11	3,66E+11
500	3,70E+11	3,29E+11
1000	2,44E+11	2,70E+11
2000	1,70E+11	1,83E+11
<b>3000</b>	<b>1,31E+11</b>	<b>1,23E+11</b>
3100	1,05E+11	1,19E+11
4000	1,03E+11	83384675636

Hodnota odpovídající 3000 hodinám stárnutí. Z grafu je vidět, že se hodnoty téměř protínají. I v tabulce lze snadno zjistit, že si jsou hodnoty velmi podobné. Pokud zanedbáme úvodní rozptyl naměřených hodnot, lze si všimnout určité podobnosti od časové hodnoty 500 hodin.

Tato funkce je určena prakticky pouze experimentálně a nezahrnuje vliv různých činitelů, které na materiál působí v běžném provozu. Pro věrohodný matematický model by bylo nutné laboratorní prostředí přizpůsobit podmínkám a vlivům, které na izolační materiál působí ve skutečnosti. Čím více vlivů působících na elektroizolační materiál by bylo možné v laboratorních podmínkách simulovat, tím přesnější regresní křivka, popisující skutečnou životnost materiálu by se dala určit.

Rovnice regrese se svým způsobem podobá rovnici (5), která byla uvedena ve studii podle *Dakin-Arrhenia*.

Lze tedy předpokládat, že exponenciální proložení naměřených hodnot má smysl a zakládá se na již roky prověřených empirických vztazích.

Při stanovení životnosti tedy uvažujeme příklad elektroizolačního materiálu, pro který je stanovena exponenciální regresní křivka.

$$\rho_v = 4,25 \times 10^{11} e^{(-0,000392 \times \tau)} \quad (27)$$

$\tau$	životnost izolace [h]
$\rho_v$	vnitřní rezistivita [ $\Omega \cdot m$ ]

Základem je stanovení hodnoty vnitřní rezistivity, kterou pokládáme za hodnotu nevyhovující dalšímu provozu. Pro každý materiál je tato hodnota jiná a pro izolační materiály používané v praxi je stanovena normou. Pro příklad definujeme požadovanou hodnotu vnitřní rezistivity, která již nevyhovuje a je tedy předpoklad porušení bezpečnosti a pravděpodobnosti selhání elektroizolačního materiálu. Tuto hodnotu zvolíme  $\rho_v = 4,25 \times 10^6 [\Omega \cdot m]$

Nyní dosadíme do exponenciální funkce (27) hodnotu vnitřní rezistivity  $\rho_v$  a vypočteme hodnotu  $\tau$  v hodinách. Tedy čas zbývající do konce technického života izolačního materiálu.

$$4,25 \times 10^6 = 4,25 \times 10^{11} \times e^{(-0,000392 \times \tau)}$$

$$\frac{4,25 \times 10^6}{4,25 \times 10^{11}} = e^{(-0,000392 \times \tau)}$$

$$1 \times 10^{-0,5} = e^{(-0,000392 \times \tau)}$$

$$\ln 1 \times 10^{-0,5} = (-0,000392 \times \tau)$$

$$-11,512925 = -0,000392 \tau$$

$$\tau = \mathbf{29369,7 [h]}$$

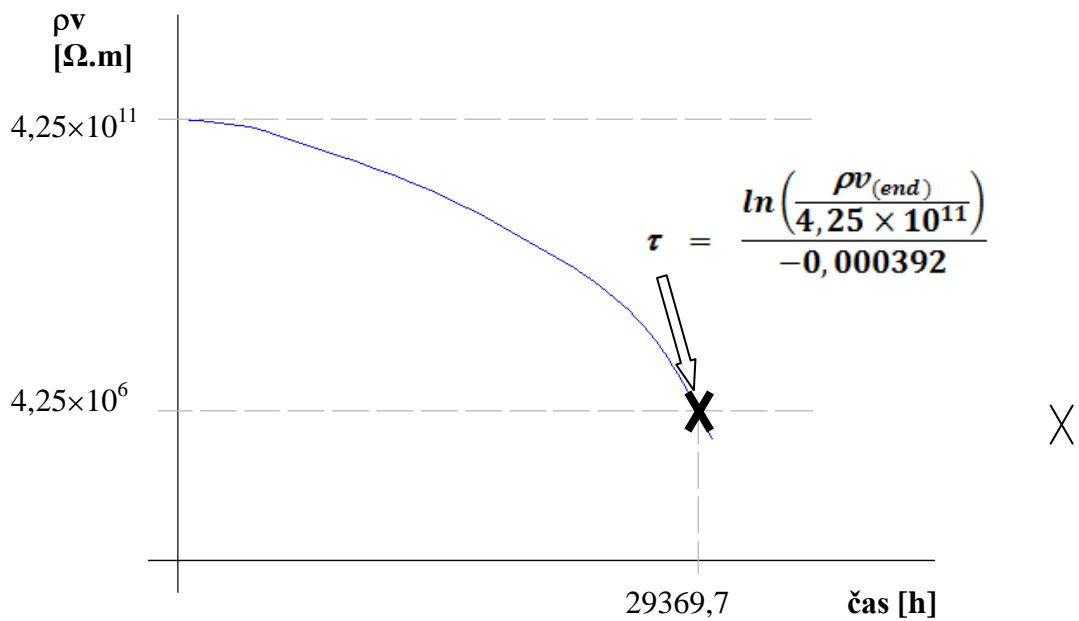
Převáděno na dny  $\Rightarrow \tau = 1223,7$  dnů

Matematická funkce pro uvedený příklad izolačního systému:

$$\tau = \frac{\ln\left(\frac{\rho_v(\text{end})}{4,25 \times 10^{11}}\right)}{-0,000392} \quad (28)$$

$\tau$  životnost izolace [h]

$\rho_v(\text{end})$  vnitřní rezistivita, která již není vyhovující požadavkům na elektroizolační materiál [ $\Omega \cdot m$ ]

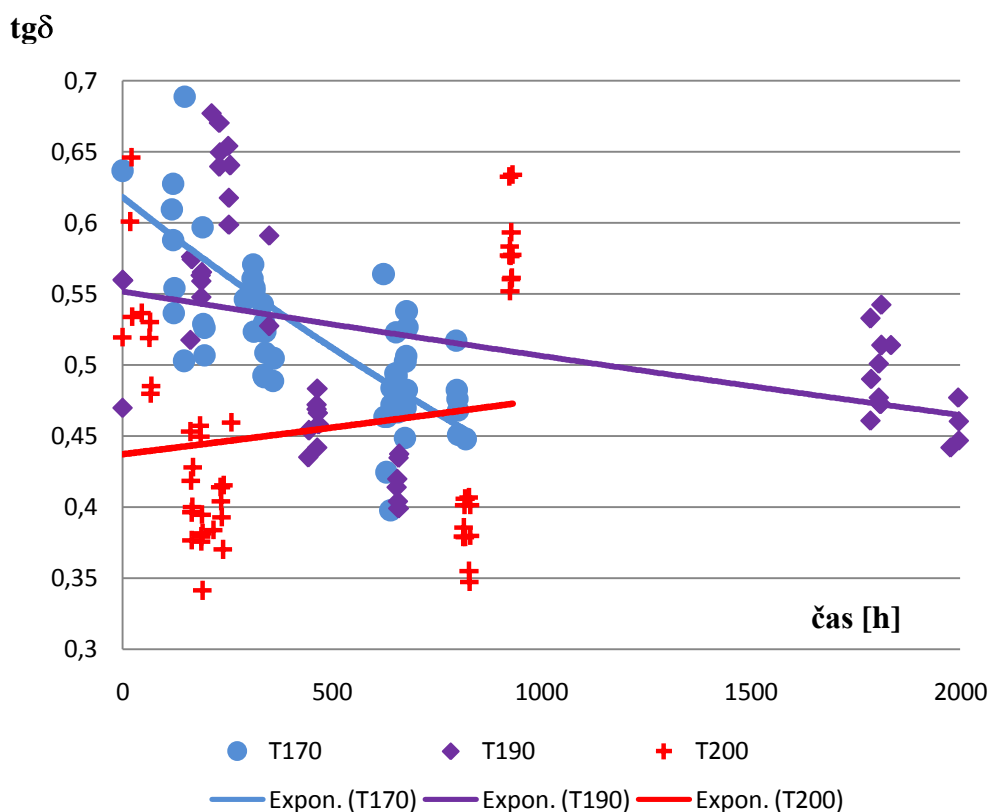


**Obr.33:** Grafické určení životnosti podle exponenciální regresní funkce.

Tento způsob by bylo možné aplikovat na různé druhy elektroizolačních materiálů. Nevýhodou je zdlouhavé měření, protože je třeba určit klesající trend vnitřní rezistivity. Na model se díváme z čistě makroskopického hlediska, zadáme tedy určitá vstupní data v podobě minimální požadované hodnoty vnitřní rezistivity a následně máme k dispozici výsledek v hodinách zbývajících do konce životnosti, aniž by nás zajímalo, co se děje ve struktuře zkoumaného materiálu.

## 10. Zpracování dat zrychleného stárnutí transformátorové lepenky

Další izolační materiál, který byl nechán stárnut, je transformátorová lepenka. Zrychlené stárnutí bylo provedeno při teplotách 170 °C, 190 °C a 200 °C. Ztrátový činitel se měřil pomocí automatického můstku pro měření dielektrických ztrát. Následující graf zobrazuje naměřené hodnoty ztrátového činitele v určitém časovém intervalu, které jsou proloženy exponenciální regresní křivkou.



**Obr.:** Průběh  $\text{tg}\delta$  u měřeného vzorku transformátorové lepenky v závislosti na čase pro 3 různé teploty.

Pro následující zpracování dat vycházíme ze skutečnosti, že vnitřní rezistivita a ztrátový činitel  $\text{tg}\delta$  jsou vůči sobě v nepřímé úměrnosti, přesněji, pokud se zvyšuje vnitřní rezistivita, klesá ztrátový činitel  $\text{tg}\delta$ . To znamená, že je možné aplikovat závěr z předešlé kapitoly, s tím rozdílem, že v tomto případě hledáme stoupající trend. Pro určení křivky životnosti lze použít pouze křivku pro teplotu  $T=200$  °C.

Křivky pro teploty 170 °C a 190°C nemají stoupající trend, není tedy možné na ně aplikovat předešlé závěry. Pro určení křivky životnosti by bylo nutné nechat izolační materiál stárnout pro danou teplotu déle, až do doby, kdy by křivka začala vykazovat rostoucí charakter.

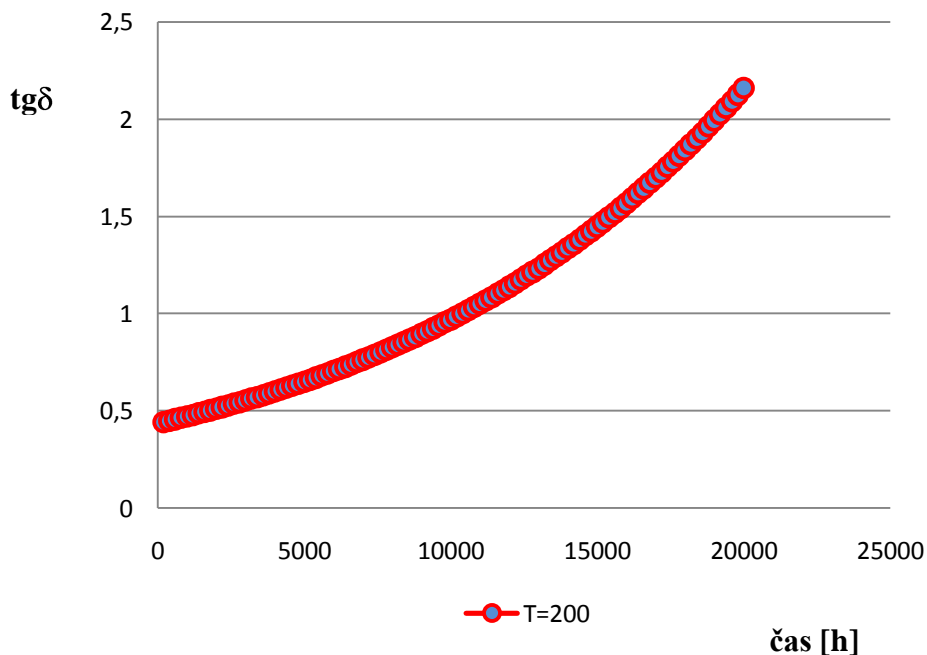
Regresní rovnice ztrátového činitele  $\text{tg}\delta$  v závislosti na čase pro teplotu 200 °C je následující:

$$\text{tg}\delta = 0,436e^{(0,00008 \times \tau)} \quad (29)$$

Pro nalezení časového intervalu životnosti měřeného vzorku transformátorové lepenky lze použít následující vztah:

$$\Delta\tau = \frac{\ln\left(\frac{\Delta\text{tg}\delta}{0,436}\right)}{0,00008} \quad (30)$$

Exponenciální regresní křivka byla vykreslena v časovém intervalu 25 000 h. Obecně je známo, že rychle stoupající průběh  $\text{tg}\delta$  v závislosti na čase naznačuje blížící se selhání materiálu.



**Obr.:** Vypočítaný průběh  $\text{tg}\delta$  u měřeného vzorku transformátorové lepenky v závislosti na čase pro teplotu 200°C.

## 11. Závěr

Vzhledem k nasazení elektroizolačních materiálů v klíčových částech různých elektrických zařízení, je a bude stárnutí těchto materiálů intenzivně studováno. Při návrhu elektrických zařízení je nutné brát v úvahu podmínky, ve kterých bude elektrické zařízení vykonávat svou činnost. Nejvíce ovlivňujícími faktory jsou teplota a působící elektrické pole. Je nutné však uvažovat i další činitele, jako například vlhkost, chemické účinky, mechanické namáhání a celá řada činitelů, jejichž následkem dochází ke zhoršování vlastností elektroizolačních materiálů. To může mít za následek degradaci materiálu až do takového stavu, kdy začne selhávat a následně může dojít k ekonomickým ztrátám, ne-li přímo porušení bezpečnosti a ohrožení lidí.

Proto je důležitá znalost životnosti každého elektrického zařízení, potažmo elektroizolačního materiálu. Určení zbytkové životnosti je však velmi komplikované z důvodu různorodosti prostředí a působících vlivů. Existuje však celá řada matematických modelů, které nám napomáhají odhadnout životnost zařízení. Většina matematických modelů potřebuje k určení životnosti konstanty, které je nutno získat experimentálně.

Při popisování křivky životnosti elektroizolačních materiálů v této práci bylo nejprve nutné porovnat různé materiály na základě parametrů jako je vnitřní rezistivita  $\rho_v$ , polarizační index  $\rho_i$  a ztrátový činitel  $\text{tg}\delta$ .

První skupina dat, které jsem měl k dispozici, bylo stárnutí různých druhů olejů spolu s daty popisující zrychlené stárnutí stejných druhů olejů a papíru v časovém intervalu 4000 hodin. První výsledky podle předpokladů ukazují, že ztrátový činitel  $\text{tg}\delta$  má menší hodnotu při kombinaci oleje a papíru, než samotný olej. Dále jsou uvedeny závislosti vnitřní rezistivity a také polarizačních indexů impregnovaného papíru a na základě těchto parametrů jsou porovnány. Papír impregnovaný olejem SHELL DIALA DX vykázal nejlepší vlastnosti a nebyly znatelné žádné známky degradace. Z těchto průběhů však nebyly patrné žádné velké sklony k degradaci materiálů.

Při porovnávání další skupiny izolačních systémů papír + impregnant, byla z jedné křivky patrná určitá tendence k snižování vnitřní rezistivity v závislosti na času. Tímto izolačním systémem byl papír impregnovaný oktylem. Naměřené hodnoty jsem se rozhodl proložit exponenciální regresní křivkou, která věrohodně



kopírovala trend naměřených hodnot. Z rovnice regresní křivky jsem obecně vyjádřil životnost  $\tau$  v hodinách. Pokud je tedy známa hodnota vnitřní rezistivity, která již nevyhovuje dalšímu provozu elektroizolačního materiálu. Pomocí této funkce lze orientačně zjistit zbytkovou životnost. Je však velmi důležité, aby izolační materiál při zrychleném stárnutí byl co nejvěrněji vystaven podmínkám, které působí na elektrické zařízení ve skutečnosti. Jedná se tedy o makroskopický model, který vstupní veličiny přemění na výstupní za pomoci matematické funkce a konstant, určených experimentálně.

Tento závěr jsem dále vyzkoušel na dalším měřeném elektroizolačním systému, kterým byla transformátorová lepenka. Zrychlené stárnutí bylo prováděno při teplotách 170°C, 190°C a 200°C. Měření bylo prováděno pomocí automatického můstku, pomocí kterého se měřil ztrátový činitel  $\text{tg}\delta$ . Mezi vnitřní rezistivitou  $\rho_v$  a ztrátovým činitelem  $\text{tg}\delta$  platí nepřímá úměrnost, pokud se tedy jeden z těchto parametrů zvětšuje, druhý klesá. Lze tedy aplikovat předešlé závěry. Naměřené hodnoty ztrátového činitele  $\text{tg}\delta$  jsou proloženy exponenciální křivkou. Na rozdíl od vnitřní rezistivity, v tomto případě pro určení životnosti je potřeba rostoucí trend, protože klesající je jen dočasný. Rostoucí trend byl v tomto případě pouze pro teplotu  $T = 200$  °C. Pro stanovení životnosti u ostatních teplot, je třeba nechat materiál stárnout delší časový interval. Nicméně pro teplotu  $T = 200$  °C jsem určil exponenciální regresní rovnici a pomocí excelu vypočítal životnostní křivku až do hodnoty 20 000 hodin. V této hodnotě odpovídá ztrátový úhel  $\text{tg}\delta = 2,16$ .

Tento způsob určení životnosti se dá uplatnit, pokud je naměřen dostatečný počet hodnot, které vykazují určitý trend. Pro vnitřní rezistivitu  $\rho_v$  klesající a pro  $\text{tg}\delta$  rostoucí.

## 12. Použitá literatura

- [1] MENTLÍK, Václav. PIHERA, Josef. POLANSKÝ, Radek. PROSL, Pavel. TRNKA, Pavel. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vydání. Praha : BEN – Technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9
- [2] TRNKA, Pavel. PIHERA, Josef. Širůček Martin. Elektrické stromečky – fenomén v elektroizolačních materiálech. [online]. [cit.2012-01-10]. Dostupné z WWW: <http://www.4-construction.com/cz/clanek/elektricke-stromecky-fenomen-v-elektroizolacnich-materialech/>
- [3] Department of Engineering, University Road Leicester, United Kingdom. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [online]. [cit. 2012-01-15]. Dostupné z WWW: <http://www2.le.ac.uk/departments/engineering/research/electrical-power/electrical-insulation-and-dielectric-phenomena>
- [4] Graz University of Technology. Institute of High Voltage Engineering and System Management. Austria. Life Time Investigations at Electric Insulation Systems. [online]. [cit.2012-01-15]. Dostupné z WWW: [https://online.tugraz.at/tug\\_online/voe\\_main2.getvolltext?pCurrPk=8084](https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getvolltext?pCurrPk=8084)
- [5] MORWITZOVÁ, Gabriela. Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni. Klimatotechnologické zkušebnictví. [online]. [cit.2012-02-09]. Dostupné z WWW: [ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/47.pdf](http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/47.pdf)
- [6] TRNKA, Pavel. Elektrevue-časopis pro elektrotechniku. Zbytková životnost elektroizolačních systémů. [online]. [cit.2012-02-10]. Dostupné z WWW: <http://elektrevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/35/zbytkova-zivotnost-elektroizolacnich-systemu/>

- [7] POLANSKÝ, Radek. Elektrotechnologie-časopis pro elektrotechniku. Tepelné stárnutí elektroizolačních kapalin. [online]. [cit.2012-02-10]. Dostupné z WWW: <http://elektrotechnologie.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/tepelne-starnuti-elektroizolacnich-kapalin/>
- [8] Brütsch, Rudolf. Tari, Makoto. Fröhlich, Klaus. Weiers, Tilman. Vogelsang, Ruben. *Insulation Failure Mechanisms of Power Generators*. [online]. [cit. 2012-03-08]. Dostupné z WWW: <http://www.ieee.com>
- [9] Brancato, E.L. Insulation aging a historical and critical review. [online]. [cit. 2012-03-08]. Dostupné z WWW: <http://www.ieee.com>
- [10] Jia, Z. D. Tsinghua University. Beijing. China. Xie, H. K. Xi'an Jiaotong University. Xi'an. China. [online]. [cit.2012-03-08]. Dostupné z WWW: <http://www.ieee.com>
- [11] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vydání. Praha : BEN – Technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6
- [12] Střední průmyslová škola Trutnov: Elektrotechnologie. [online] 2012 [cit. 2012-01-05]. Skripta. Dostupné z WWW: <[http://5ep.wz.cz/data/ucebnice\\_elt.pdf](http://5ep.wz.cz/data/ucebnice_elt.pdf) >
- [13] Poznámky z předmětu : TEL/KET. Technologie elektroniky. Katedra technologií a měření. Západočeská univerzita v Plzni. Rok 2011/2012
- [14] Bartošová, Denisa. Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni. Diplomová práce. Stárnutí výkonových transformátorů. Rok 2011.
- [15] Liao, Ruijin. Liang, Shuaiwei. Yang, Yang. Hao, Jian. Li, Jian. Chongqing University, China. Comparison of Ageing Results for Transformer Oil-paper

Insulation Subjected to Thermal Ageing in Mineral Oil and Ageing in Retardant Oil [online]. [cit. 2012-03-08]. Dostupné z WWW: <http://www.ieee.com>

[16] Neumann, Jacek. ELDIAG, s.r.o. DGA - Plynová chromatografie - příklad a možnosti hodnocení. [online]. [cit. 2012-04-03]. Dostupné z WWW: <http://www.diagnostikovani.cz/texty/dga.html>

[17] Lelekakis, Nick. Guo, Wenyu. Martin, Daniel. Wijaya, Jaury. SINTEF, Trondheim, Norway. A Field Study of Aging in Paper-Oil Insulation Systems. [online]. [cit. 2012-01-04]. Dostupné z WWW: <http://www.ieee.com>

[18] Česká technická norma. ČSN EN 60422. Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních – Návod pro kontrolu a údržbu

[19] MENTLÍK, Václav. TRNKA, Pavel. Trnková, Magdalena. Šašek, Lumír. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie. 1. vydání. Praha : BEN – Technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-412-5

[20] ČSN EN 60270 „Technika zkoušek vysokým napětím – Měření částečných výbojů“.

[21] ČSN EN 60085 „Elektrická izolace – Teplotní klasifikace“.