

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Degradace elektroizolačních systémů vysokým napětím

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří KUBEŠ**
Osobní číslo: **E12N0141P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Degradace elektroizolačních systémů vysokým napětím**
Zadávající 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 účinky elektrického pole na elektroizolační materiály.
2. Zhodnoťte účinky elektrických stromečků na různé materiály.
3. Podrobně rozeberte problematiku degradace elektrické izolace současných kabelů.
4. Navrhňte systematiku dlouhodobých zkoušek izolací kabelů.
5. Analyzujte možnosti práce se získanými daty.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

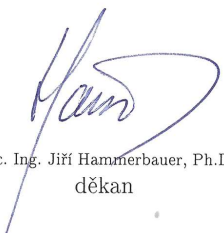
Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V., Polanský, R., Pihera, J., Prosr, P., Trnka, P.: Diagnostika elektrických zařízení, ISBN 978-80-7300-232-9, BEN technická literatura Praha, 2008
2. Elektronické informační zdroje
3. MENTLÍK, V., TRNKA, P., MAGDALÉNA, T., LUMÍR, Š. : Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, 1. vyd. Praha, Ben-technická literatura, 2011, 120 s. ISBN: 978-80-7300-412-5


Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014


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




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

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na degradaci elektroizolačních systémů vysokým napětím. V této práci je popsán vliv elektrického pole na elektroizolační materiály a popsána problematika degradace elektrické izolace současných kabelů. Jsou zde zhodnoceny i účinky elektrických stromečků. Elektrické stromečky byly experimentálně vytvořeny v různých materiálech epoxidové pryskyřice. Následně byly zkoumány a vyhodnocovány.

Klíčová slova

Elektroizolační materiál, izolant, dielektrikum, polarizace, stárnutí, degradace, elektrické stromečky, izolace kabelu, zkoušky izolace

Abstract

This study is focused on the degradation of electrical insulation systems by high voltage. This work describes the influence of the electric field on electrical insulating materials and discussed the issue of degradation of electrical insulation current cables. There are also evaluated the effects of electrical trees. Electrical trees were experimentally produced in various materials epoxy resin. Were investigated and evaluated.

Key words

Electrical insulating material, insulator, dielectric, polarization, aging, degradation, electrical trees, cable insulation, insulation tests

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 9.5.2014

Jiří Kubeš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a trpělivost při metodickém vedení práce.

Děkuji RICE za poskytnuté přístroje pro zkoumání stromečků. Děkuji také všem, které jsem nejmenoval, byť přispěli třeba jen „troškou do mlýna“.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 PŮSOBNÍ ELEKTRICKÉHO POLE NA ELEKTROIZOLAČNÍ MATERIÁL	11
1.1 IZOLANTY A DIELEKTRIKA	12
1.2 DIPÓLOVÉ MOMENTY	13
1.3 TYPY ELEKTRICKÉ POLARIZACE	14
1.4 ROZDĚLENÍ IZOLANTŮ	16
1.5 RELATIVNÍ PERMITIVITA	17
1.6 DIELEKTRICKÁ ABSORPCE	18
1.7 ELEKTRICKÁ VODIVOST	18
1.8 ZTRÁTY V DIELEKTRIKU	19
1.8.1 Dielektrické ztráty v pevném dielektriku	20
1.9 ELEKTRICKÁ PEVNOST	21
1.10 MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ	22
1.11 STÁRNUTÍ ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	23
1.11.1 Tepelné stárnutí	23
1.11.2 Elektrické stárnutí	23
2 ELEKTRICKÉ A VODNÍ STROMEČKY	25
2.1 ELEKTRICKÉ STROMEČKY	26
2.2 MODELÝ RŮSTU STROMEČKŮ	26
2.3 VLIV BARIÉRY NA RŮST STROMEČKU	27
2.4 VLIV PLNIVA NA STROMEČKY	28
2.5 STROMEČKY V RŮZNÝCH MATERIÁLECH IZOLACÍ KABELŮ	30
2.6 PRŮBĚH TVORBY STROMEČKŮ	30
2.7 STROMEČKY V POLÁRNÍCH DIELEKTRIKÁCH S AMORFNÍ A ZESÍTĚNOU STRUKTUROU	32
2.8 STROMEČKY V KABELOVÉ IZOLACI ZESÍŤOVANÉHO POLYETHYLENU	32
2.9 STROMEČKY V NANOKOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH	32
2.10 STROMEČKY V SEMIKRYSTALICKÝCH POLYMERECH	32
3 DEGRADACE ELEKTRICKÉ IZOLACE KABELŮ	33
3.1 DEGRADACE PAPIŘU	34
3.2 DEGRADACE POLYMERU	34
3.3 TYPY VNĚJŠÍCH FAKTORŮ OVLIVŇUJÍCÍ ŽIVOTNOST POLYMERŮ	35
3.4 KYSLÍK	36
3.5 TEPLOTA	36
3.6 VODA	36
3.7 CHEMICKÉ LÁTKY	37
3.8 ŽIVÉ ORGANISMY	38
3.9 MECHANICKÉ STÁRNUTÍ	38
4 DLOUHODOBÉ ZKOUŠKY IZOLACÍ KABELŮ	39
4.1 NÁVRH DLOUHODOBÝCH ZKOUŠEK IZOLACÍ KABELŮ	41
5 EXPERIMENT	43
5.1 VZORKY	43
5.2 POZOROVANÉ VZORKY	44
5.3 ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU	47
5.4 ZÁVĚR EXPERIMENTU	48

ZÁVĚR	49
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	1
PŘÍLOHY	6

Seznam symbolů a zkratk

ρ_v	Vnitřní rezistivita
ρ_p	Povrchová rezistivita
σ	Elektrická vodivost [S/m]
E	Intenzita elektrického pole [V/m]
D	Indukce elektrického pole [C/m ²]
Q	Náboj [C]
ε	Absolutní permitivita [F/m]
ε_0	Permitivita vakua [F/m]
ε_R	Poměrná permitivita [-]
C	Kapacita [F]
R	Odpor [Ω]

Úvod

Elektroizolační systémy jsou nedílnou součástí každého elektrického zařízení. Tvoří dílčí podsystém elektrických zařízení. Slouží k izolaci částí s různým potenciálem a umožňují tak funkci elektrických zařízení. Proto je důležité sledovat jak působí degrační činitelé na tyto elektroizolační systémy, neboť jejich poruchy mohou končit nehodou. Na stav elektroizolačního materiálu má vliv mnoho činitelů, které mají za následek vlastní degradaci materiálu. Izolace je v průběhu svého života zatěžována elektricky, mechanicky, tepelně i chemicky.

Tato předkládaná práce je zaměřena především na degradaci elektroizolačního systému vlivem vysokého napětí. Toto napětí, kterým je daný systém namáhán má za následek snižování životnosti daného elektroizolačního materiálu. Proto existují rozličné zkoušky na ověřování životnosti materiálu a celého systému. Při měření je sledováno a vyhodnocováno mnoho parametrů, například elektrické, mechanické a tepelné účinky na elektroizolační materiály.

Následující text je rozdělen do pěti částí. V první části jsou popsány účinky elektrického pole na elektroizolační materiály, vyskytující se v kabelech a jiných elektroizolačních systémech. Dále jsou hodnoceny účinky elektrických stromečků na různé elektroizolační materiály. Tyto stromečky také byly prakticky jako experiment zhotoveny v materiálu pryskyřice pro lepší názornost a jejich výroba a pozorování je popsána v páté kapitole. V další části je rozebrána problematika degradace elektrické izolace současných kabelů. Součástí této práce je i návrh systematiky dlouhodobých zkoušek izolací kabelů, kterému se věnuje jedna z kapitol. Závěrem je popsán experiment, při kterém bylo využito získaných informací o degradaci elektroizolačních materiálů a o elektrických stromečcích.

1 Působení elektrického pole na elektroizolační materiál

Elektrické pole způsobuje elektrické namáhání materiálu. Svůj vliv na namáhání má tvar, velikost, frekvence, spojitost, hladiny i determinovanost napětí. Často se používá buď střídavé sinusové napětí o frekvenci 50 Hz a nebo namáhání stejnosměrným napětím. Lze rozdělit namáhání dlouhodobé či jen krátkodobé napěťovými pulzy normovaného tvaru. Existuje řada metodických zkoušek s prověřenou závislostí změny elektrických parametrů. Většinou jde o stárnutí určitou hodnotou napětí. Zkoumá se vodivostní proud a napěťová odolnost. Vodivostní proud totiž může způsobovat elektrolyzu. Prověřována je také odolnost izolace proti maximální rázové vlně, simulující atmosférický výboj [1].

Pásová struktura elektroizolačních materiálů, tedy obecně izolantů a dielektrik, vypadá tak, že energie potřebná k překonání zakázaného pásma je větší než 5 eV [2]. Pokud se dostaneme na teplotu 0 K [3], je valenční pás zcela obsazen a nedochází k žádné vodivosti. Při teplotě vyšší než je tato roste exponenciálně elektrická vodivost. Tepelný pohyb částic způsobuje srážky a tak elektron může získat energii a přejít do vodivostního pásu. Může také dojít k iontové vodivosti uvolněním slaběji vázaných iontů. V dielektrických tělesech působením vnějšího elektrického pole se objevují vázané elektrické náboje [4]. Vlivem vnějšího elektrického pole také dochází k polarizaci dielektrika. Dielektrika jsou složena z iontů, tedy kladně a záporně nabitých částic, které jsou k sobě vázány vazebnými silami. Vnější elektrické pole vychyluje vázané náboje z rovnovážných poloh. Tomu říkáme polarizace [5]. Ve většině případů je polarizace úměrná intenzitě elektrického pole [4].

Rozeznáváme dva typy polarizace [6]. U atomové polarizace se jádra atomů s kladným nábojem posouvají k záporné desce ve směru siločar a elektronové obaly se deformují do opačného směru. Z atomů se stávají takzvané elektrické dipóly. Druhým typem je orientační polarizace. Některé látky mají molekuly s charakterem dipólu i bez vnějšího elektrického pole. Navenek se dipóly neprojevují, protože jsou uspořádány chaoticky. K jejich usměrnění dojde až vnějším elektrickým polem, kdy se natáčí ve směru siločar tohoto pole [6]. Elektrické pole působí na kladné i záporné náboje. Ty se nemohou pohybovat, ale jen lokálně nepatrně posunovat. Oba typy náboje se posouvají opačným směrem a tím vzniká určitý dipólový moment [7]. Dipóly se na povrchu natáčí a vzniká tak malé vnitřní elektrické pole směřující proti vnějšímu poli. Z toho plyne, že intenzita pole v dielektriku je menší než ta,

která jej vyvolala [6]. Molekulární mechanismy polarizace je pohybem elektronů vůči jádru (tzv. elektronová polarizace), posunem iontů vůči sobě (tzv. iontová polarizace) a posunem dipólů ve směru elektrického pole (tzv. orientační polarizace) [7].

1.1 Izolanty a dielektrika

Izolanty procházejícímu proudu kladou velký odpor. Využití je především jako izolace vodivých těles o různém potenciálu. Sledovaným parametrem je u nich rezistivita, která musí být co nejvyšší [8]. Z použití jako izolantů také vyplývá, že musí mít velkou elektrickou pevnost.

U dielektrik je hlavní technickou vlastností schopnost polarizace v elektrickém poli. Lze je využít v kondenzátorech na hromadění elektrické energie nebo v elektrických obvodech jako kapacitní prvky. Zde je parametrem relativní permitivita, která musí být velká při co nejnižších dielektrických ztrátách. Ideálně je polarizace držena nekonečně dlouho. Reálně však dochází k samovolnému vybíjení. Z toho plynou požadavky na vysokou rezistivitu a elektrickou pevnost. Všechny izolanty jsou zároveň dielektrikem, ale opačně to neplatí [5]. Tepelný pohyb částic narušuje orientaci dipólů, a proto u izolantů nedochází k úplnému natočení [8].

Stav a kvalitu izolace charakterizují hodnoty elektrické vodivosti σ , vnitřní rezistivity ρ_v a povrchové rezistivity ρ_p [8]. Vnitřní rezistivita je definována jako poměr intenzity elektrického pole ku proudové hustotě uvnitř izolantu. Lze jej změřit vložení krychle o hraně 1 metr z daného materiálu mezi dvě elektrody. Velikost je pak rovna vnitřnímu odporu této krychle. Povrchová rezistivita je definována jako poměr intenzity elektrického pole ku proudové hustotě na povrchu izolantu. Lze jej změřit vložení čtverce o straně 1 metr z daného materiálu mezi dvě elektrody. Velikost je pak rovna odporu povrchu tohoto čtverce [9].

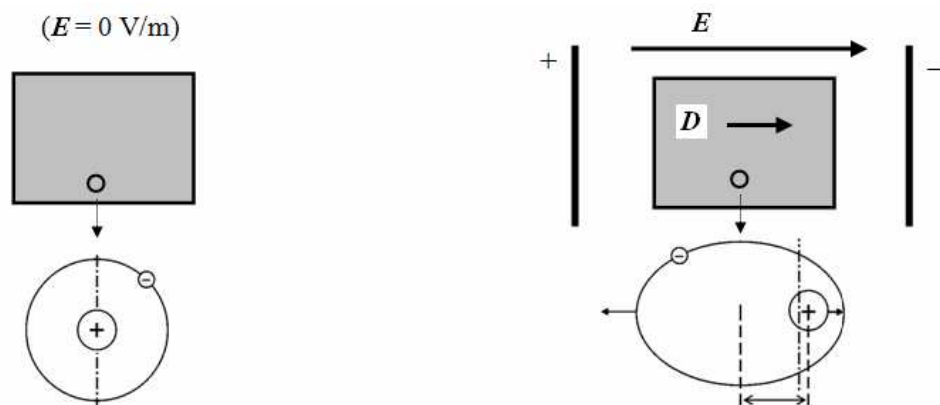
Každý izolant i dielektrikum se vyznačuje svými typickými vlastnostmi projevujícími se v praxi. Tyto vlastnosti mají různou fyzikální, chemickou a technologickou podstatu a určují tak elektrické, tepelné a mechanické chování daného materiálu [5]. Ideálně elektroizolační materiály nemají žádné volné nosiče náboje. Reálně lze však naměřit rezistivitu a konduktivitu, které jsou způsobeny obsahem malého množství volných nosičů náboje [8].

V elektrickém poli totiž dochází k posunům volných nábojů. Nosiče náboje vznikají v silných a slabých elektrických polích. Jako volné nosiče náboje u malých elektrických polí fungují ionty, které vznikají ionizací, neboli disociací nečistot příměsí. Uvolní se slabě vázané ionty, které jsou co by volné nosiče náboje v daném materiálu. Čím vyšší je relativní permitivita ϵ_R a teplota T , tím koncentrace volných nosičů náboje roste. U většiny izolantů a dielektrik má vodivost iontový charakter. Elektronová vodivost je prakticky zanedbatelná. Velká elektrická pole, tedy těsně před průrazem, mají vliv na elektronovou vodivost, která se začne výrazněji projevovat [5].

1.2 Dipólové momenty

Průvodním jevem elektrického pole je polarizace. U izolantů se jedná o podružný jev, a proto se u nich většinou neuvažuje, na rozdíl od dielektrik. Tento proces narušuje symetrii elektrických nábojů. V dielektriku se jeho následkem tvoří dipóly, z nichž každý má svůj dipólový moment. Vektor polarizace je pak součet všech elektrických dipólových momentů vztahených na jednotku objemu [5].

Dipólové momenty dělíme na dvě skupiny. První jsou indukované momenty. Vznikají následkem působení elektrického pole. Dipólům vzniklým tímto způsobem říkáme indukované dipóly. Názornou ukázkou vzniku můžeme vidět na obrázku 1, kde je vidět posun elektronů vůči jádru a vyosené těžiště soustavy. Druhým momentem je permanentní moment. Tyto vznikají nezávisle na vnějším elektrickém poli, protože jsou přirozenou vlastností molekul daného dielektrika. Takto vzniklým dipólům říkáme permanentní dipóly [10].



Obr. 1 vznik dipólu vlivem působení vnějšího elektrického pole převzato z [5]

1.3 Typy elektrické polarizace

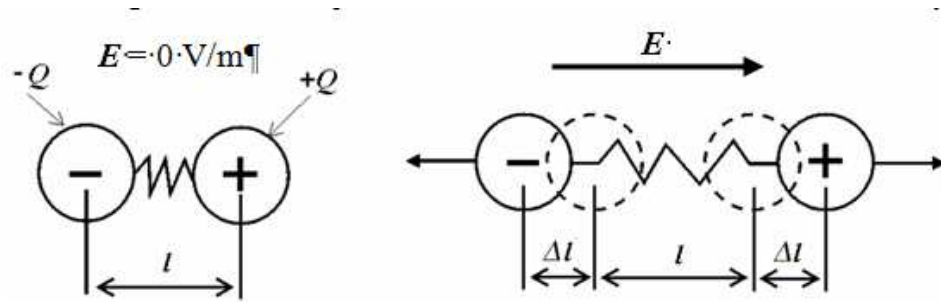
Můžeme je rozdělit na deformační nebo-li pružné a relaxační, nebo-li nepružné. Deformační se dále člení na polarizaci elektronovou a iontovou. Relaxační se dělí na polarizaci dipólovou a iontovou [11].

Deformační elektrická polarizace je velmi rychlá s dobou ustálení až 10^{-15} sekundy. Pružně vázané náboje se bezztrátově vychylují jen do menších vzdáleností. Je málo teplotně závislá a lze ji dělit na elektronovou a iontovou, která je pružná [5].

Naproti tomu relaxační elektrická polarizace je nepružná a pomalá. Posunutí nábojů je větší a je i delší relaxační doba, než u deformační polarizace. Při natáčení dipólů se částice třou a tato polarizace je tedy ztrátová. Jelikož teplota ovlivňuje pohyb nábojů, je teplotně závislá. Rozdělení je na dipólovou, iontovou relaxační a ještě lze vyčlenit objemovou a spontánní [5].

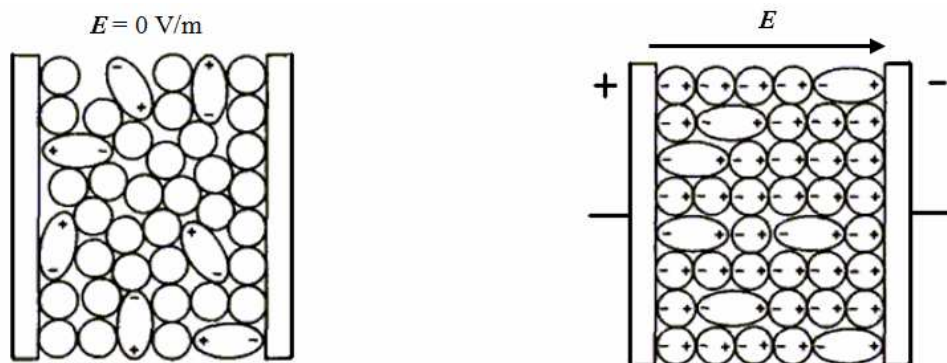
Elektronová polarizace atomu má vlivem elektrického pole posunutý elektronový obal proti jádru [12]. Doba ustálení je 10^{-16} až 10^{-14} s [11]. Pokud přestane pole působit, indukované elektrické momenty zanikají. Tato polarizace je mírně teplotně závislá, na frekvenci úplně nezávislá. Vyskytuje se ve všech látkách, v kterémkoliv skupenství [5].

Iontová pružná polarizace je u látek s iontovými krystaly. Ionty se pružně posunou, kladné ve směru pole, záporné proti. Má permanentní dipóly, které změní směr pomocí elektrického pole. K těmto dipólům se indukované dipóly buď přičítají nebo odečítají. Doba odezvy je 10^{-13} až 10^{-11} s [11]. Opět zde není závislost na frekvenci, ale je zvýšená ovlivnitelnost teplotou, protože vzdálenost mezi ionty s teplotou roste. Obdobu můžeme nalézt u krystalů s kovalentní vazbou, kde se vazební orbital protahuje působením elektrického pole. Dipólový moment je zvětšován o přídavek indukovaného momentu [5].



Obr.2 Ukázka vlivu indukovaného dipólu vyvolaného elektrickým polem převzato z [5]

Dipólová relaxační polarizace se projevuje u kapalin a plynů s polárními molekulami. Permanentní dipóly jsou natočeny zcela nahodile, teprve až elektrickým polem jsou nasměrovány jak je vidět na obrázku 3. Proti tomuto procesu natáčení působí tepelné kmity. Z toho také vyplývá delší doba ustálení a frekvenční závislost. Teplotní kmity jsou teplotně závislé a třením při natáčení vznikají polarizační ztráty [5]. Dipólové momenty jsou v těchto látkách vázány jen slabě. Polarizačními ztrátami se daný materiál zahřívá. Doba ustálení je 10^{12} až 10^{-8} s [11].

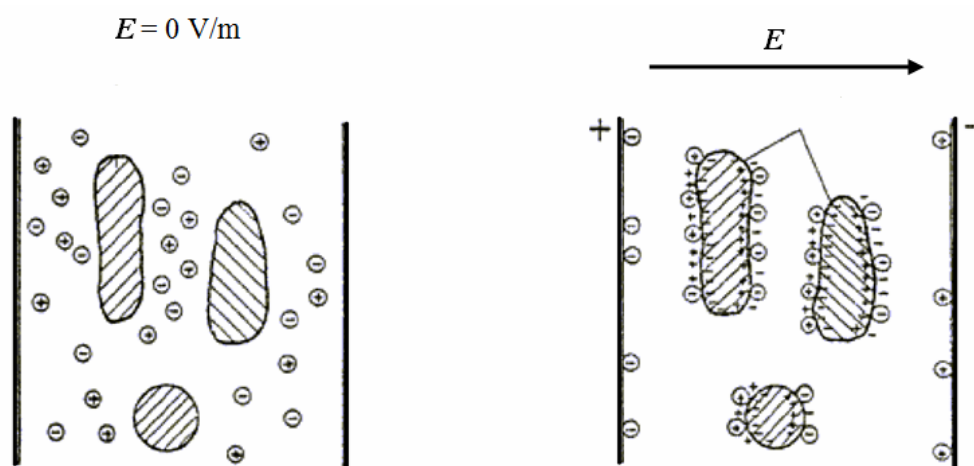


Obr. 3 vliv elektrického pole na natočení dipólů a nasycení převzato z [5]

Iontová relaxační polarizace je u látek s iontovou amorfní strukturou, jako jsou třeba skla nebo keramika se skelnou fází. Jedná se o nejjednodušší možnost tepelné polarizace iontů [11]. Ionty jsou zcela nahodile, většinou s dalšími příměsemi nebo nečistotami. Doba ustálení má exponenciální charakter. Je frekvenčně i teplotně závislá. S větší teplotou se zvětšuje počet polarizovatelných iontů, tedy roste polarizace. S tím souvisí i dielektrické ztráty. Elektrické pole působí na příměsné ionty, které se pohybují ve směru pole a tím narušují rozložení náboje. Tímto způsobem vzniká dipólový moment [5]. Doba ustálení je 10^{12} až 10^{-8} s [11].

Objemová polarizace se objevuje u pevných látek, v objemu vrstevnatých materiálů jako je lepenka, kde se pohybují volné náboje, které se hromadí na rozhraní nehomogenit tohoto

nehomogenního prostředí. Takto vznikají oblasti s prostorovým nábojem viditelné na obrázku 4 [5].



Obr.4 vliv elektrického pole na vznik prostorového náboje převzato z [5]

Spontánní polarizace se vyskytuje u pevných materiálů s doménovou strukturou, tedy u feroelektrických materiálů. Typické pro tyto materiály jsou vysoké relativní permitivity řádově až 10^4 [11]. Domény jsou polarizované oblasti, aniž by na ně muselo působit vnější elektrické pole. Navenek se materiál chová jako nepolarizovaný, neboť jednotlivé domény mají takové uspořádání, že se výsledné elektrické momenty navzájem vyruší. Až přiložením elektrického napětí se domény uspořádají ve směru pole [10]. Spontánní polarizace zanikne při určité teplotě, která se označuje jako Curieova teplota. Orientace je vyrušena vysokou intenzitou tepelných kmitů [5].

Také existují materiály, které se polarizují bez potřeby vnějšího elektrického pole. Jedná se především o piezoelektrika, u nichž se tak děje vnějším mechanickým napětím. Popřípadě pyroelektrika, u nichž vzniká na povrchu elektrický náboj při zahřátí [10].

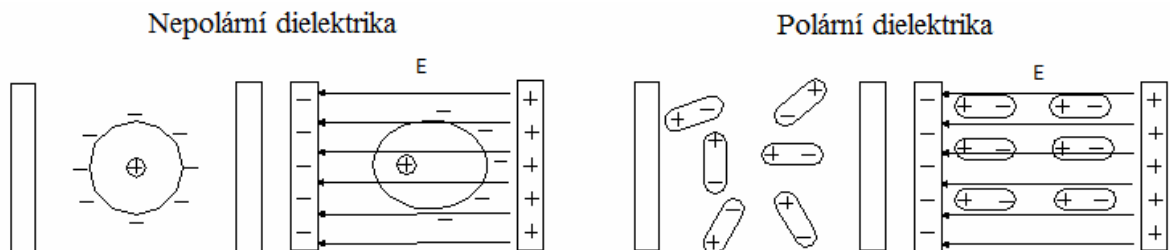
1.4 Rozdělení izolantů

Základní dělení je klasicky na pevné, kapalně a plynné látky. Tyto všechny lze dále členit na polární a nepolární. Nepolární molekuly mají souměrně rozprostřené kladné a záporné náboje. Těžiště nosičů jsou u obou polarit náboje totožná [13].

Nepolární látky obsahují jen kovalentní vazby bez permanentního dipólového momentu, tedy pouze elektronová polarizace. U plynů je $\epsilon_R = 1$, polarizace jen velmi slabá, u kapalin a plynů je $\epsilon_R = 1,8$ až 2 , klesá s teplotou a je frekvenčně nezávislá [5].

Naopak polární látky mají kovalentní vazby s permanentním dipólovým momentem. Rozložení kladných a záporných nábojů je u nich nesouměrné. I bez působení elektrického pole vytvářejí elektrické dipóly s nepravidelným uspořádáním. Jejich účinek se tedy navenek vyruší [13]. Jako základní je polarizace elektronová a k ní se přidává dipólová relaxační polarizace. U plynů je $\epsilon_R = 2$ až 3 , polarizace opět slabá. U kapalin a pevných látek $\epsilon_R = 3$ až $6,5$, závislá na teplotě i frekvenci.

Pouze pevné látky mohou mít iontový charakter a to buď amorfnní nebo krystalický. Iontové krystaly mají polarizaci elektronovou kombinovanou s iontovou pružnou. Relativní permitivita těchto látek roste s teplotou a může mít jakoukoliv hodnotu. Iontové amorfnní látky mají ještě navíc iontovou relaxační polarizaci s velkou hodnotou relativní permitivity. Pevné látky se mohou vyskytovat také jako feroelektrika, které mají elektronovou, iontovou pružnou a spontánní polarizaci. Vyznačují se silnou teplotní závislostí až do překročení Curieovy teploty. Permitivita je u nich nelineární, závislá na elektrickém poli. Typická je pro ně dielektrická hystereze [5].



Obr.5 vliv elektrického pole na polární a nepolární dielektrika převzato z [13]

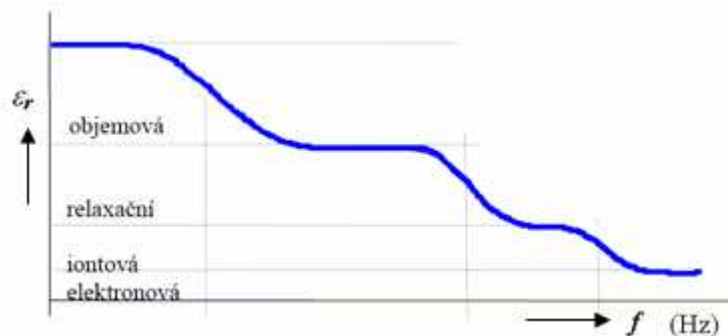
1.5 Relativní permitivita

Veličina charakterizující elektrický stav dielektrika vlivem elektrického pole se nazývá permitivita. Kvantitativně vyjadřuje polarizovatelnost látek. Platí vztah (1)

$$\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_R \quad (1)$$

Rozlišujeme tedy absolutní permitivitu ϵ , permitivitu vakua ϵ_0 a poměrnou permitivitu ϵ_R , která je měřítkem polarizace a také udává vlastnosti izolantu [10]. Velikost ϵ_R je závislá na vnitřní stavbě dielektrika, druhu polarizace a polarizovatelnosti molekul a atomů. Je ovlivnitelná teplotou a kmitočtem popřípadě intenzitou elektrického pole. Můžeme ji určit jako poměr kapacit kondenzátoru s dielektrikem a vakuem. Relativní permitivita je u dielektrik vždy větší než 1. Většinou bývá v rozmezí hodnot od 1 až 10 [14].

Pokud má materiál více druhů polarizací, relativní permitivita s frekvencí klesá. Některé druhy polarizací úplně mizí. Vše je vidět na následujícím obrázku 6 [5]. Relativní permitivita závisí na dipólovém momentu atomu dielektrika. Dále na množství atomů v jednotce objemu a schopnosti se natáčet vlivem elektrického pole [8].



Obr.6 vliv frekvence na relativní permitivitu převzato z [5]

1.6 Dielektrická absorpce

Jsou to děje probíhající v dielektriku po přiložení stejnosměrného napětí. Dielektrikum nemůže skokově sledovat změnu napětí. Na danou hodnotu se nabije až po určité době. Stejně tak vybíjení není okamžité. Příčinou všeho je dielektrická relaxace způsobená pomalou polarizací. Je to zpoždění prodlevy dielektrika po začátku působení elektrického pole [15].

1.7 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost spočívá v pohybu slabě vázaných nebo volných nábojů v elektrickém poli. Rozhodující je druh nosičů a jejich koncentrace. Rozlišujeme [9] iontovou, elektronovou, elektroforetickou, vnitřní a povrchovou vodivost. Iontová je způsobena příměsí iontů, nečistotami nebo vlastními ionty látky. Elektronová se vyskytuje v elektrických polích s vysokou intenzitou. Elektroforetická jsou koloidní částice v kapalných látkách. Za normálních podmínek se u pevných izolantů vyskytuje iontová elektrická vodivost

popřípadě elektronová vodivost [9]. Materiály hodnotíme dle měrného elektrického odporu ρ a měrné elektrické vodivosti γ [15].

Elektrická vodivost izolantů je řádově v rozmezí 10^{-6} až 10^{-18} S/m a s teplotou se zvětšuje. Ideální izolant žádné volné elektrony ani ionty neobsahuje. Vodivost je ideálně nulová a odpor je nekonečný [16].

1.8 Ztráty v dielektriku

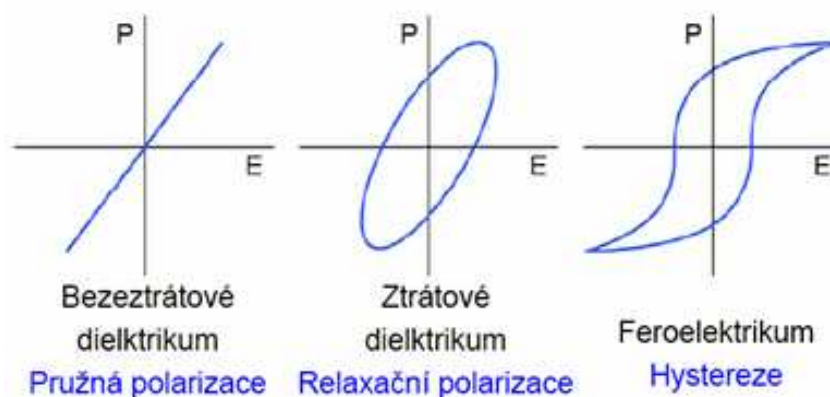
V elektrotechnických materiálech dochází k dielektrickým ztrátám, způsobující oteplení, v důsledku čehož dochází ke zhoršení funkčních vlastností. Někdy však lze dielektrické ztráty pozitivně využít k sušení látky. Ztráty lze rozdělit na tři druhy. Vodivostní, polarizační a ionizační. Součtem těchto dílčích ztrát získáme ztráty celkové, které lze přepočítat na jednotku objemu a získáme tak hustotu dielektrických ztrát [10].

Dielektrické ztráty vznikají působením elektrického pole. Příčinou je pohyb volných i vázaných nábojů, nehomogenity v dielektriku a částečné výboje. Stejnosečné pole způsobuje převážně vodivostní ztráty. Ztrátový výkon je úměrný vnitřnímu odporu dielektrika a kvadrátu tekoucího proudu. Střídavé pole má vyšší hodnoty ztrát, vodivostní ztráty jsou při něm rozšířeny o polarizační a ionizační [5].

Vodivostní ztráty se vyskytují u všech druhů izolantů. Jsou způsobeny volnými nosiči náboje a způsobují Jouleovy ztráty. Kinetická energie volných nosičů je předávána vázaným nosičům v atomu, čímž se produkuje teplo. Vodivostní ztráty závisí na vnější a vnitřní povrchové vodivosti. Volné nosiče se srážejí s kmitajícími částmi struktury materiálu [9].

Polarizační ztráty mají dielektrika se ztrátovými druhy polarizace. Jsou dány plochou v uzavřené křivce znázorněné na obrázku 7 [5]. Velikost ztrát, frekvenční a teplotní závislosti vycházejí z druhu vyskytující se polarizace [9].

Ionizační ztráty vznikají v plynech a v dutinkách pevných látek [5].



Obr. 7 Polarizační ztráty dány plochou uzavřené křivky převzato z [5]

Veličina vyjadřující míru ztrát je ztrátový činitel $\text{tg } \delta$. Je to bezrozměrná jednotka určující míru ztracené energie v izolantu [5]. Je závislý na frekvenci a s rostoucí frekvencí klesá [9]. Ztrátový úhel δ je posun fáze elektrické indukce v materiálu a vektoru elektrické intenzity pole. Ztrátový činitel popisuje ztrátové vlastnosti materiálu [17]. Další veličinou je ztrátový výkon vyjádřený ve wattech. Popřípadě měrné dielektrické ztráty jako výkon přepočtený na objem. Ztrátový výkon je veličina nezávislá na frekvenci [9]. Zvětšuje se však exponenciálně s teplotou [5]. Pro vyjádření ztrát při stejnosměrném napětí se nejčastěji používá měrný odpor, neboli rezistivita. Při střídavém napětí se používá ztrátový činitel $\text{tg } \delta$. Výpočet dielektrických ztrát se provádí přes náhradní paralelní obvod, který simuluje fyzikální význam parametrů dielektrika. Obsahuje ideální bezeztrátový kondenzátor C a svodový odpor R reprezentující ztráty. Pokud se lépe měří sériové zapojení, jsou pak přepočteny parametry na paralelní [5].

1.8.1 Dielektrické ztráty v pevném dielektriku

Obecně se vyskytují všechny tři druhy ztrát, vodivostní, polarizační i ionizační. U elektronové polarizace lze počítat se zanedbatelnými ztrátami. Značné dielektrické ztráty jsou u látek s orientační polarizací, tedy u polárních dielektrik [18].

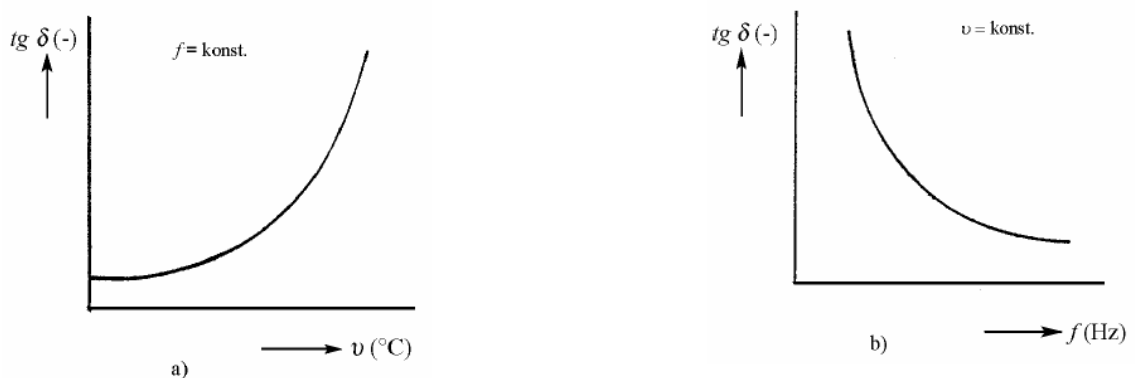
Nepolární pevné látky mají pouze ztráty vodivostní. Důvodem je pružná bezeztrátová polarizace. Ztráty jsou velmi malé. Vhodné je využití ve vysokofrekvenčních obvodech [15].

U iontových izolantů se ztráty odvíjejí od těsnosti uložení částic. Při těsném uložení iontů je pružná bezeztrátová polarizace. Vliv iontové tepelné relaxační polarizace lze zanedbat. Při

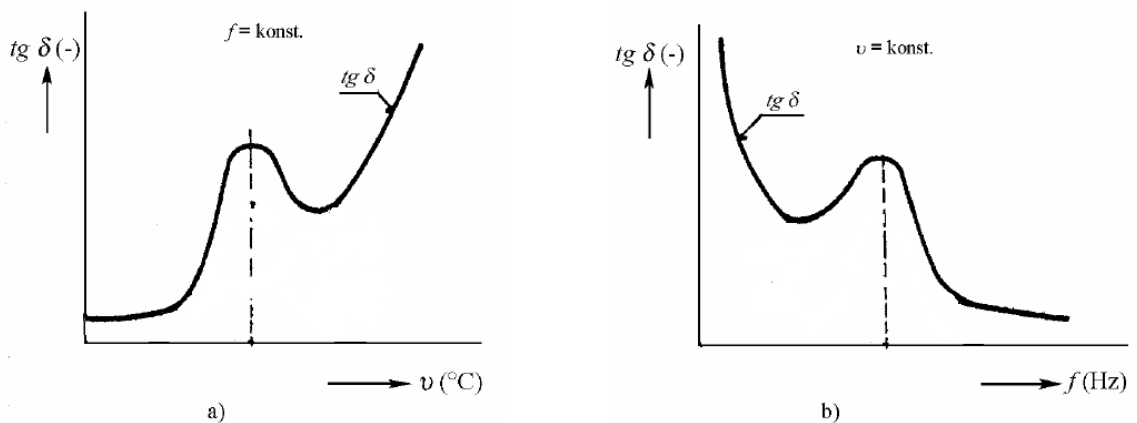
vystavení střídavému elektrickému poli jsou ztráty vodivostního charakteru a látka se jeví jako nepolární. Při netěsném uložení iontů je kromě pružné polarizace ještě iontová relaxační polarizace. Ztráty jsou vodivostní a polarizační [9], [15].

Stejně tak iontové amorfnní látky mají také vodivostní a polarizační ztráty. Tyto dvě složky ztrát jsou v různém poměru podle chemického složení, poruch vnitřní stavby a povahy nečistot. Následkem tohoto jsou různé tvary charakteristik dielektrických ztrát v závislosti na teplotě a frekvenci [9], [15].

V polárních pevných látkách je ztrátová dipólová polarizace. Ztráty tak mají obě složky, vodivostní i polarizační. Někdy mohou být rozšířeny o ionizační ztráty v dutinkách [9], [15].



Obr. 8 Ztrátový činitel nepolárního dielektrika, závislost a) teplota b) kmitočet převzato z [9]



Obr. 9 Ztrátový činitel polárního dielektrika, závislost a) teplota b) kmitočet převzato z [9]

1.9 Elektrická pevnost

Pokud budeme zvyšovat intenzitu elektrického pole a dosáhneme tak určité velikosti, může dojít u pevných izolantů k průrazu, popřípadě u kapalných a plyných materiálů k přeskoku. Pokud jsou síly elektrického pole působící na nabitě částice atomu dielektrika

větší než síly udržující částice v hranici atomu, materiál se poruší a dojde k průrazu. Izolant se stává vodivý a vede proud. Velikosti napětí při němž došlo k průrazu nebo přeskoku říkáme průrazné napětí. Jako elektrická pevnost je pak brána odpovídající intenzita tohoto elektrického pole. Rozlišujeme elektrický průraz, který vzniká nárazovou ionizací atomů a tepelný průraz, který je jako důsledek nadměrného zahřátí, kdy se vznikající teplo nestačí odvádět do okolí. Tepelný průraz je pomalejší proces než elektrický průraz [10], [19].

Při průrazu i přeskoku klesá napětí a roste proud. Elektrický výboj nastává, pokud je překročena určitá kritická hodnota gradientu pole. Existuje řada elektrických výbojů, samostatné, nesamostatné, vysokotlaké, nízkotlaké, ustálené, neustálené, úplné, částečné [20].

Elektrickou pevnost lze tedy chápat jako odolnost elektrickému poli. Ovlivnitelná je vnějšími podmínkami a záleží také na skupenství. Svůj vliv má i teplota, tloušťka dielektrika, vlhkost, tvar elektrod a další činitelé. Při dostatečně vysokém elektrickém napětí nastane u kapalných a plyných izolantů přeskok, který je nedestruktivní. Zplodiny vzniklé přeskokem se po určité době rozptýlí a izolace sama obnoví své vlastnosti. U pevných izolantů dochází k destruktivnímu průrazu, buď tepelnému, nebo elektrickému. Materiál je tak nevratně znehodnocen. Čistý elektrický průraz je velmi rychlý. Silné elektrické pole nárazově ionizuje elektrony. Určující pro elektrickou pevnost je homogenita elektrického pole a izolantu. Elektrická pevnost není závislá časovém průběhu přiloženého napětí. Tepelný průraz je časově náročnější. Dielektrickými ztrátami se lokálně materiál ohřívá, čímž se zvyšuje vodivost a ztráty rostou. Může dojít při nižších napětích k rovnováze mezi odvodem tepla a dielektrickými ztrátami. Při vyšších napětích je již chlazení nedostatečné a přehřátí neodvratitelné. Průraz je již nevyhnutelným procesem. Průrazná napětí plynů jsou o jeden řád nižší, než u kapalin [5], [21], [22].

1.10 Mechanické namáhání

Mechanické vlastnosti elektroizolačních materiálů se vyjadřují mechanickými veličinami, které hodnotí hlavně mechanické namáhání. Vyhodnocují se tak různé druhy pevností a tvrdostí. Dále se zkoumá pevnost v tahu, tlaku smyku a ohybu. Důležitá je také únava při cyklickém kmitavém zatížení. Zkoumá se i nasákavost či navlhavost materiálu. Navlhavost je příjem vody z vlhkého ovzduší, naproti tomu nasákavost je schopnost přijímání vody při namáčení ve vodě [10].

1.11 Stárnutí elektroizolačních materiálů

Vlivy působící na elektroizolační materiál způsobují fyzikální a chemické změny v materiálu. Stárnutím se elektroizolační materiály znehodnocují, protože se trvale zhoršují jejich funkční vlastnosti. Doba života izolace se stárnutím klesá. Stárnutím také klesá spolehlivost a bezpečnost zařízení. Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím stárnutí je teplota a působení elektrického pole [23].

1.11.1 Tepelné stárnutí

Vystavení izolantu vyšším teplotám vede ke zhoršení elektrických a mechanických vlastností. Struktura látky je narušována a dochází k rychlejšímu stárnutí. Tím zároveň klesá doba života výrobku z hlediska spolehlivosti a bezpečnosti. Z těchto důvodů jsou izolanty rozděleny do teplotních tříd dle tabulky 1, podle kterých lze zjistit maximální teplotu, při níž jsou izolanty ještě teplotně stálé [10].

Tab. 1 Rozdělení izolací do teplotních tříd převzato z [24]

Třída	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
Teplota T °C	90	105	120	130	155	180	200	220	250

Tepelným stárnutím dochází k fyzikálně chemickým procesům, které jsou nevratné. S teplotou roste rychlost chemických reakcí jako je oxidace, polymerace, polykondenzace, zesíťování molekul a depolymerace. Rozhodující není množství tepla ale hodnota teploty které je materiál vystaven [23]. Při tepelném namáhání se zkoumá tvarová stálost za tepla, odolnost vůči působení tepla, součinitel teplotní délkové a objemové roztažnosti, součinitel teplotní vodivosti a stanovení mezních teplot [10].

1.11.1.1 Modely tepelného stárnutí

Empirické Montsingerovo pravidlo pro souvislost mezi životností izolace t a teplotou v je následující (2) a vychází z Arrheniovy teorie. A a m jsou materiálové konstanty [25].

$$t = Ae^{-mv} \quad (2)$$

1.11.2 Elektrické stárnutí

Je jako následek působení elektrického pole, částečných výbojů, plazivých proudů, elektrických stromečků a účinků prostorových nábojů. Rozdělení na stejnosměrné a střídavé

namáhání nedokáže obsáhnout všechny aspekty degradace. Používá se tedy navíc pulzní namáhání. Možnosti zkoušení a zkoumání životnosti elektroizolačního materiálu je destruktivní nebo nedestruktivní záležitostí [9].

1.11.2.1 Částečné výboje

Podílí se na elektrické degradaci elektroizolačního materiálu. Mají elektroerozivní, chemické a tepelné účinky. Prvopočátkem jsou dutinky uvnitř izolantu, ve kterých působí elektrický oblouk. Vysoká intenzita elektrického pole v těchto místech může způsobit elektrický průraz. Stěny dutinek jsou narušovány dopadajícími ionty a elektrony. Tím se dutinky zvětšují. Postupně může dojít k proražení izolantu. Izolant se v důsledku částečných výbojů otepluje. Při vyšší teplotě se snižuje počet výbojů ale roste jejich amplituda. Snížení jejich počtu je v důsledku teplotní roztažnosti izolačního materiálu. Materiál se teplem roztahuje a zvětšuje svůj objem a povrchovou vodivost. Intenzita elektrického pole se ve vzduchové mezeře zmenšuje. Počet částečných výbojů se také snižuje. Důvodem proč je amplituda vyšší při vyšší teplotě lze vysvětlit vybíjením větší plochy. Dlouhodobým elektrickým namáháním se uplatňují chemické účinky. Nejdříve chemické reakce probíhají v odloučených produktech ve vzduchu za účasti vzdušné vlhkosti. Poté takto vytvořené produkty prostupují do izolantu a vytvářejí vodivé cesty, které mohou způsobit průraz. V dutinkách se kyslík mění vlivem výbojů na ozón, který dále oxiduje materiál. Ten může reagovat s oxidy dusíku a společně s vlhkostí se tvoří kyselina dusičná, která je k izolacím materiálů velmi agresivní [26], [27].

1.11.2.2 Modely elektrického stárnutí

Modely slouží k utváření vlivu elektrického pole na životnost materiálu. Používaný je exponenciální (3) a mocninný model (4) [9]

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

$$\tau_E = kE^{-n} \quad (4)$$

Tyto modely znázorňují stárnutí materiálu vystaveného elektrickému poli. Struktura systému, konfigurace elektrod ani rozložení pole nemá vliv na použitý model [9].

2 Elektrické a vodní stromečky

Působením elektrického pole, především stejnosměrného, může docházet k odtrhávání iontů, které zhoršují izolační vlastnosti tím způsobem, že bez viditelné degradace vzrostou ztráty. Výraznější degradace je již viditelná. Mezi hlavní děje stárnutí se řadí elektrické stromečky, vodní stromečky a částečné výboje. Pod mikroskopem můžeme vidět elektrické a vodní stromečky jako stromečkovité útvary bez pravidelné struktury. Kanálky tvořící stromečky jsou o velikosti jednotek mikronů v průměru, s větvemi o desítkách mikronů. Stěny kanálků jsou slabě vodivé a není pravidlem, že musí být zuhelnatělé. Proroste-li stromeček skrz izolaci, dojde k průrazu. Prakticky může průraz nastat i dříve. Stromečky jsou součástí souhrnného poškození izolace. Tím jsou zvýšené pravděpodobnosti poruch [9], [27], [28]. Ve slabších elektrických polích vznikají vodní stromečky. Pro jejich vznik je potřebný kontakt izolantu s vodním elektrolytem. Vodní stromečky se vyskytují ve větší míře ve vlhkém prostředí, ale poškozují izolaci jen málo. I jejich přemíra koncentrace ale může vést k průrazu izolantu [9]. Vodní stromečky jsou vodou naplněné mikrodutinky propojené kanálky. Vznikají pouze za předpokladu nehomogenit v izolaci, působení vody a současného působení elektrického pole. Proto je vhodné při přepravě kabelů obnažené konce kabelu osadit čepičkami zabraňujícími vnik vlhkosti [29].

Elektrické stromečky mohou předcházet elektrickému průrazu. Vyskytují se u pevných dielektrik, jako jsou kaučuky, epoxidové pryskyřice, polymery a další [30], [31]. Je to poškozující proces, způsobený částečnými výboji a pokračuje namáháním izolace chemickou degradací, jehož cesta připomíná „kořen stromu“. Mohou být vytvořeny vysokým divergentním elektrickým napětím přivedeným na bodové elektrody v izolačním materiálu. Pokračující částečné výboje dále elektrické stromečky rozšiřují a prodlužují rozkladem organických látek [32]. Tento proces se zastaví pokud stromeček dosáhne druhé elektrody nebo dojde k průrazu materiálu. Elektrické stromečky byly dlouho považovány za významné nebezpečí pro izolaci. Podle tvaru jsou rozlišovány různé druhy. Stromovité, větrovité, keřovité, motýlek a ostnaté. Většinou pozorování stromečků je jen optické, důležitější však je zkoumání charakteru vývoje těsně před průrazem [32].

Stromečky jsou členěny do tří kategorií [33] podle tvaru vytvořeného během prorůstání materiálu. Větrovitá struktura je typická tím, že vytváří mnoho odboček. Keřovité jsou typické hustě poškozenou oblastí tenkými kanálky. Třetí je kombinací těchto dvou typů.

2.1 Elektrické stromečky

Elektrické stromečky jako poruchový proces v syntetické pryskyřici a jiných materiálech. Je to jako jedna z příčin poruchy izolace v elektrických strojích, kabelových propojkách, plynem izolovaných spínačích a dalších. Tvorba elektrických stromečků je dlouhodobý poruchový mechanismus [34], kde jemná kanálková eroze roste z oblasti vysokého napětí prostřednictvím částečných výbojů. K selhání izolace dochází po připojení elektrod, kdy přes stromečkové kanálky začnou téct destruktivní proudy [34].

2.2 Modely růstu stromečků

Bylo navrženo mnoho variant modelů pro simulaci časového šíření stromečků. První kdo představil stochastický model [35] byl Niemeyer s předpokladem vodivých kanálků stromečků s pravděpodobností lokálního růstu úměrnému určité síle elektrického pole. Wiesmann [36] tento model zobecnil zavedením kritického elektrického pole a poklesem napětí vlivem kanálků stromečků. Kromě zavedení těchto základních modelů s uvažovaným prostorovým nábojem a vodivostí, bylo potřeba zavést složitější fyzikální modely s lavinovými výbojem [37]. Výhodou základního modelu je, že jeho algoritmus potřebuje méně času pro výpočet statistického určení doby průrazu. Mnoho studií zkoumá stromečky v homogenních materiálech, ale simulaci v kompozitech je věnována jen malá část [37], [38].

Nový deterministický model [39] předpokládá vodivé plazmové kanály bez prostorových nábojů. Elektrické pole je proto kvazistatické a může být vypočteno řešením Poissonovy rovnice. Aby bylo možné popsat různé materiály, byl původní zobecněný model rozšířen o lokální elektrické vlastnosti jako je průrazná pevnost. Tato veličina je měřítkem času výdrže elektrické izolace při určitém elektrickém poli. Jednotlivé dielektrické buňky se prorazí po čase T , když integrál převyší určitou velikost lokálního elektrického pole $E_{(t)}$, která se rovná průrazné pevnosti b_s jednotlivé buňky [39].

$$\int_0^T (E_{(t)} - E_C)^k dt = b_s \quad (5)$$

K poškození dochází pouze v případě, že lokální pole překročí hodnotu kritického pole E_c . To je v rozporu s globálním parametrem původního zobecněného modelu, který je definován do maximální velikosti počátečního elektrického pole. Velikost kritického

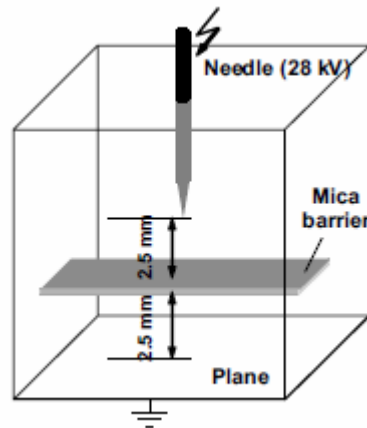
elektrického pole odpovídá použitému napětí tak, že při vysokém napětí je hodnota kritického pole nízká a taktéž naopak [39].

Neboť číselně vyjádřené stromečkové struktury se shodují alespoň kvantitativně s doprovodnými pokusy, nový model se zdá být důležitou pomůckou pro analýzu topologických otázek vztahujících se ke kompozitním izolačním materiálům. Představená průrazná pevnost jako vlastnost lokálních materiálů umožňuje analýzu elektrického stromečku v heterogenním dielektriku, založenou na důsledných statistikách. Elektricky silné bariéry prodlužují životnost polymerů [39] rozšířením průměrné trasy, kterou stromeček potřebuje pro přemostění elektrod. Slabé rozhraní zón mezi vloženými bariérami a okolními dielektrickými materiály vedou k významné redukci času průrazu v porovnání s případy, kdy rozhraní je neporušené [39].

2.3 Vliv bariéry na růst stromečku

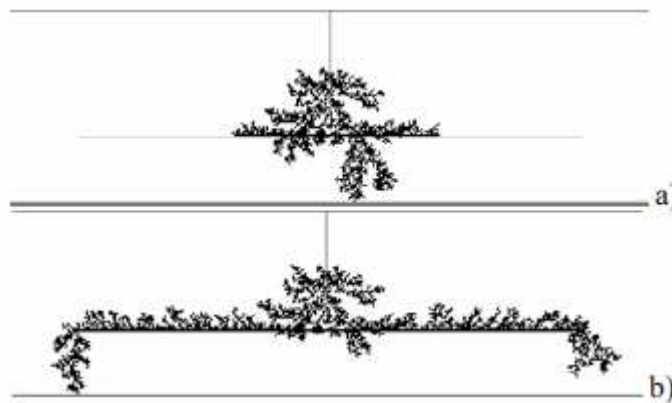
Jako bariéru lze použít slídový list [33], vložený do pryskyřice. Takovéto překážky v izolačních materiálech mají dva účely. Neumožňují projít stromečkům skrz ně, protože mají větší dielektrickou pevnost. Dokonce i v případě průniku se tvoří méně větví než v původní pryskyřici. Takto vytvořené překážky také prodlužují čas šíření stromečku, protože větve stromečku nepronikají skrz ale šíří se kolem bariéry a tím je prodloužena doba do průrazu. Šíření elektrického stromečku je ovlivněno použitým napětím a místní dielektrickou pevností. Slídovou bariéru lze použít na zastavení šíření stromečků [33].

Hlavní faktory ovlivňující tvorbu a růst uměle vytvořených stromečků [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46] je poloměr jehlové elektrody, vzdálenost jehlové elektrody od plošné zemnicí elektrody, velikost napětí, frekvence, použitý materiál a teplota. Vložením bariéry mezi jehlu a plošnou zemnicí elektrodu, znázorněné na obrázku 10, prodloužíme dobu do průrazu [47], [48], což je důležité především pro průmyslové izolační systémy, kde se zpravidla vyskytují kompozitní materiály [49].



Obr..10 Vložená bariéra mezi jehlovou a plošnou zemnicí elektrodu převzato z [49]

Jelikož bariéry prodlužují dobu do průrazu, je výhodné používat kompozitní materiály. Polyethylentereftalát je bariéra, kterou stromečky mohou prorůst [49], proto je vhodné používat slídové materiály nebo použít větší počet vrstev. Na obrázku 11 je vidět rozdíl mezi těmito druhy bariéry na růst stromečku. Velký vliv na dobu výdrže má pevnost spoje na rozhraní bariéry pryskyřice. Čím je vložená překážka širší, tím delší cesty musí kanálky stromečků urazit a tím se doba opět prodlužuje. Vhodné je použití více překážek, ale musí se navzájem překrývat. Pokud se dostatečně nepřekryjí, pak se čas prodlouží jen málo [49].



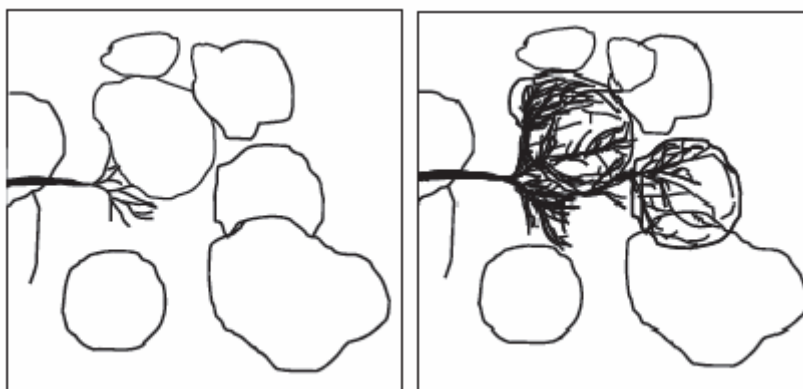
Obr. 11 vliv různých druhů bariéry na růst stromečku převzato z [49]

2.4 Vliv plniva na stromečky

V praxi izolační systémy nejsou homogenní, často směs různých izolačních materiálů. Vztah rozhraní plniva a pryskyřice působící na růst stromečků není zcela objasněn. Změna v šíření je vysvětlována tím, že na rozhraní plnivo pryskyřice dochází k snížení intenzity pole a rozptylu energie. Experimentem [50], [51] bylo zjištěno, že zkoumaný vzorek bez plniva má vyšší napětí pro vznik hlavního kmene stromečku, než vzorek s plnivem. Rozhraní pryskyřice plnivo je tedy uvažováno jako slabina pro vznik stromečku. Vysvětlením může být i vyšší

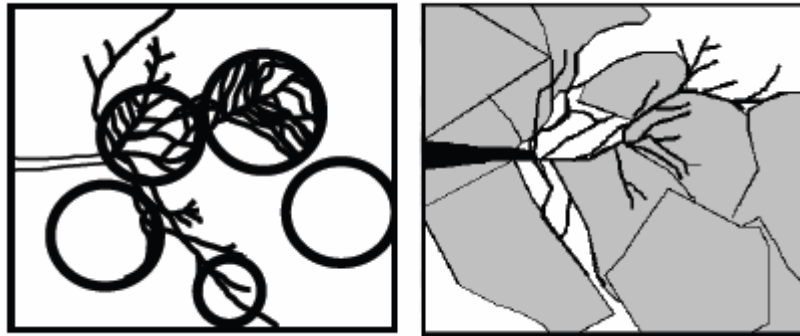
permitivita plniva, která přináší větší místní elektrické pole na špičce elektrody. Paradoxně napětí zahajující růst stromečku ve vzorku s plnivem je sníženo, ale plnivo jako takové brání dalšímu rozvoji stromečku. Snížené napětí nepřináší žádnou změnu ve způsobu založení hlavního „kmene“ stromečku [52].

Významný vliv má na způsob šíření srůst plniva a pryskyřice [52]. Na obrázku 12 můžeme vidět, jak stromeček prorůstá kolem plniva. Lze i pochytit velké větvení a členění stromečku, které částky plniva obklopuje. Každý stromeček má hlavní kmen a z něho se vyčleňují větve. Větev je brána jako sekundární kanál, který se dále větví. Velikost kanálů je od 30 μm až po kanálky velikostí jen 1 μm [53]. Zavedením plniva se počet odboček a větví zvětšuje, oproti vzorku bez plniva. Plnivo je odolnější proti výbojům než pryskyřice a tvoří tak překážku pro růst stromečku. Stromečky rostoucí ve vzorku bez výplně jsou tak proto rovnější. Rozhraní plniva a pryskyřice má vliv na směr šíření [52].



Obr. 12 ukázka stromečku obrůstajícího plnivo převzato z [52]

Tvar plniva také ovlivňuje tvorbu stromečků [52]. Výraznějšího ovlivnění se nám dostává u kulatých plniv, než u čtvercových tvarů. Kulaté tvary více brání v šíření stromečků. Tvar plniva nemá vliv na velikost napětí, při kterém stromečky rostou. U kruhovitěho tvaru se šíří stromeček podél rozhraní, dokud nepokryje plnivo. Zatímco u obdélníkového tvaru se šíří epoxidovou matricí dokud nenarazí na plnivo. Názorně je vidět na obrázku 13. Může to být způsobeno i rozložením elektrického pole. Příčina je také ve zbytkovém mechanickém namáhání a vlastnostmi fyzikálního a chemického srůstu plniva a pryskyřice [52].



Obr. 13 ukázka šíření stromečku ovlivněného kulatým a čtvercovým plnivem převzato z [52]

Vlhkost má příznivý vliv na rychlost tvorby stromečků. Příčinou je snížení elektrické pevnosti pryskyřice. I při zvýšené vlhkosti však plnivo vzniku stromečků zabraňuje. Závěrem lze říci, že plnivo tak může částečně fungovat jako ochrana proti šíření stromečků. [52]

2.5 Stromečky v různých materiálech izolací kabelů

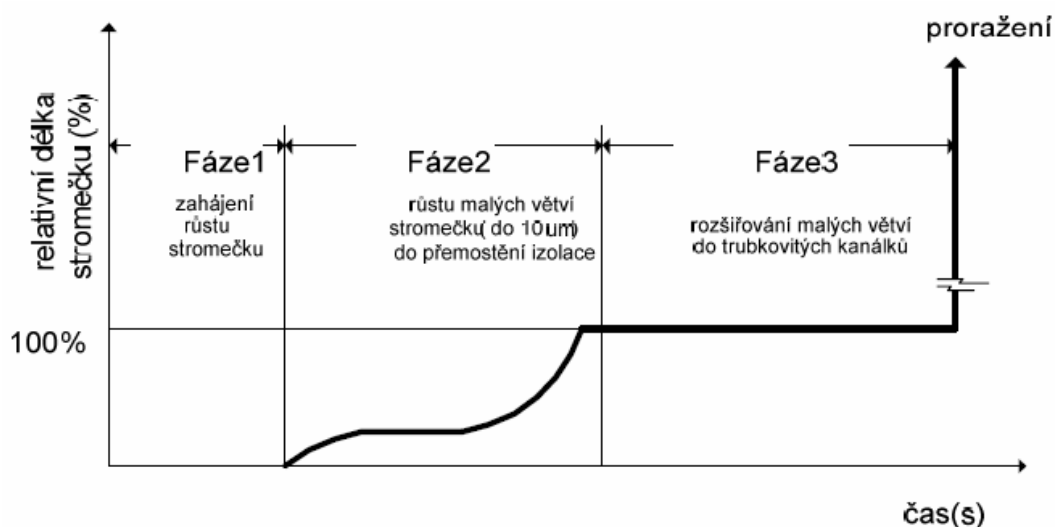
Polymerní materiály jako je polyethylen PE, síťovaný polyethylen XLPE, silikonové pryže, polvinylchlorid PVC a další jsou široce používány pro elektrické izolační materiály u přenosových a podzemních kabelů z důvodu jejich vynikajících elektrických, tepelných a mechanických vlastností [54]. Elektrické stromečky vytvářejí duté kanálky [41] uvnitř polymeru v dutinách, trhlinách, na nerovnostech, nečistotách výstupcích, odřeninách a vadách materiálu.

Složení materiálu hraje podstatnou roli pokud jde například o napětí počátku tvorby stromečku. Vyšší dielektrická pevnost vykazuje vyšší počáteční napětí. Statistická analýza je nezbytná pro vyhodnocení dat o chování izolace při vysokém napětí. Nejčastější používaná analýza je Weibullovo rozdělení. Díky statistickému vyhodnocení lze například říci, že napětí, při kterém vznikají stromečky v epoxidové pryskyřici je mnohem vyšší, neboť je to 4,6528kV než u silikonového kaučuku, kde je tato hodnota 3,1529 kV. [54]

2.6 Průběh tvorby stromečků

Studium dílčích vybíjecích charakteristik [55] elektrických stromečků ukázalo existenci různých fází vývoje. V průběhu počátečního stárnutí počet detekovaných výbojů roste, dokud se neobjeví první mikrokanálky na hrotu elektrody. Následně počet výbojů klesá. Je to způsobeno tvorbou jiných vláken na konci těchto kanálků. Jakmile vlákno dosáhne zemnicí

elektrody, můžeme pozorovat náhlé zvýšení počtu výbojů. K průrazu dojde až mnohem později s celkovým zvýšením počtu výbojů. Díky této analýze lze zjistit jednoduchým pulzním měřením zhoršování vzorku. Stejně chování lze pozorovat u uměle vytvořených dutin. Po přiložení napětí je výboji ovlivňován celý povrch dutiny. Následuje jejich snížení počtu, během čehož se soustřeďují kolem stěn. Stromečková vlákna rostou od hran dutin. Tyto vytvořené kanálky stromečku následně způsobí proděravění vzorku izolantu. Přes různé počáteční podmínky je patrné, že k průrazu izolace dochází touto cestou. Je to způsobeno strukturou materiálu popřípadě lokálními ději projevujícími se na slabých místech ve struktuře [55].



Obr. 14 Fáze růstu stromečků převzato z [27]

Částečné výboje uvnitř materiálu vytvářejí vodivé cesty. Toto rozšiřování můžeme rozdělit do tří časových fází z obrázku 14 [27].

V první fázi dochází k počátkům růstu stromečků, které lze zaznamenat jen velmi citlivou technikou. V druhé fázi se utváří první větev stromečku. Z této se pak člení dalším směrem k zemnicí elektrodě. Když stromeček dosáhne této elektrody, končí tato fáze. K průrazu ještě nedochází, neboť malé větvičky nedosahují potřebné vodivosti. Větve obsahují zbytky rozloženého polymeru. Nejtenčí větvičky dosahují v průměru jen 1µm. Velikost náboje výbojů způsobujících růst větví je 5 až 30 pC [27]. Doba potřebná k prvnímu spojení elektrod je asi čtvrtina z celkového času totálního průrazu. Třetí fáze navazuje na druhou a končí totálním průrazem dielektrika. Stromeček se v této fázi dále rozvíjí, větví a rozšiřuje kanálky na velikost větší než 10µm. Typická šířka je 60 až 150µm [27]. Takto široké kanálky jsou

duté. K totálnímu průrazu dojde po dosažení dutého kanálku uzemněné elektrody. V těchto kanálcích dochází k výbojům o velikosti náboje 50 až 220 pC [27].

2.7 Stromečky v polárních dielektrikách s amorfní a zesítěnou strukturou

Procesy růstu stromečku v polárním dielektriku [56] je doprovázeno změnou povrchové teploty dielektrika. Tyto změny teploty odpovídají změnám fáze, tedy růstu stromečku a průrazu. Přejít z jedné fáze do druhé je doprovázen zvýšením lokální teploty povrchu.

2.8 Stromečky v kabelové izolaci zesíťovaného polyethylenu

V Dlouhodobém měřítku jsou v izolaci stromečky finální destruktivní formou. Jejich růst je zahájen z různých vad izolace kabelu [57], [58], [59]. Tyto vady závisí na technice výroby, frekvenci použitého napětí, obsahu nečistot, vnitřním pnutí a fyzikální struktuře. Mechanismus zahájení tvorby u různých struktur stromečků v síťovaném polyethylenu (XLPE) začíná podobně [60]. Stejně tak mechanismus šíření stromečků je při vysoké frekvenci nad 500 Hz podobný. Opět lze vytvořené stromečky podle tvaru dělit na různé typy. K tomu lze využít fraktální analýzu, která zkoumá jejich tvar, rozvětvenost a členitost. Použitá frekvence napětí při kterém stromečky rostou má vliv na tvar vytvářených stromečků [60].

2.9 Stromečky v nanokompozitních materiálech

Stromečky vzniklé v nanokompozitních dielektrických materiálech [61] v důsledku přítomnosti nečistot jsou zkoumány pomocí modelu buněčného systému. Růst stromečků je zahájen z nečistot, bublin a vodivých částic. Stupeň degradace je závislý na množství nečistot. Přítomnost nanočástic snižuje elektrickou pevnost izolace. Vodivé částice přítomné v izolaci mohou vést také ke vzniku stromečků. Stromečky prorůstají nanokompozitem, jejich cesty jsou delší a komplikovanější. Proto mají nanokompozitní materiály delší životnost než materiály bez nanočástic [61].

2.10 Stromečky v semikrystalických polymerech

V semikrystalických polymerech dochází k významným změnám v chování stromečků. Velikost, počet a typ sferulitů obsažených v materiálu [62] mají vliv na růst stromečků a

průraznou pevnost. Získanými poznatky lze dojít k závěru, že kontrolou struktury materiálu při výrobě lze omezit riziko vzniku stromečků [62].

3 Degradace elektrické izolace kabelů

Můžeme se setkat s různými druhy a modifikacemi kabelů [63]. Kabely se liší materiálem použitým na izolaci vodiče. Nejčastěji jsou kabely s papírovou, nebo polymerovou izolací.



Obr. 15 Příklad kabelové izolace z polymerního materiálu převzato z [64]

Kabelový papír je vyráběn z vláken celulózy [65]. Používá se k tomu smrkové, topolové nebo jedlové dřevo. Papír se využívá většinou jako vícevrstvý. Technologie výroby ovlivňuje výsledné mechanické a elektrické vlastnosti. Dnes se v nových rozvodech moc nepoužívá. Jinak ho lze nalézt povětšinou v kombinaci s minerálními oleji. [65]

Druhý typ izolačního materiálu můžeme rozdělit do tří skupin [66]. První jsou vulkanizované elastomerické izolační látky, jako je například EPR, silikon, HEPR. Druhá jsou termoplastické polymery, jako je PVC, PP, EVA, PET, fluoropolymery. Třetí jsou zesítněné polymery XLPE. Všechny tyto materiály patří do skupiny polymerů, což jsou chemické sloučeniny s mnoha molekulami propojenými do dlouhých řetězců. Struktura těchto makromolekul vytváří mechanické a izolační vlastnosti [66].

Kaučuky a vulkanizované elastomery jsou ohebné a odolné vůči otěru [67]. Nevýhodou jsou nízké provozní teploty kolem 80°C a malá odolnost olejům, pohonným látkám a

oxidačním chemickým činidlům. Silikonové kaučuky jsou odolné vysokým teplotám až 250°C [68] ale jsou náchylné na otěr a přetržení [66].

Termoplastické polymery jsou tužší a provozní teploty jsou v rozmezí od 60°C [69] u PE a PVC až do 260°C u PTFE [70]. Všechny tyto látky mají charakteristickou teplotu, nad kterou ztrácí fyzikální hustotu a tím ztrácí své elektrické a mechanické vlastnosti [66].

Zesíťené polymery mají lepší mechanické a elektrické vlastnosti [66]. Jsou lisovány při vysoké teplotě a poté dochází k chemické změně ve vnitřní struktuře. Jsou odolné vysokým teplotám.

3.1 Degradace papíru

Papír podléhá řadě degradačních procesů [71]. Faktory ovlivňující degradaci lze rozdělit na vnější a vnitřní [72]. Mezi první z nich patří teplota, vlhkost, oxidy, ozón a biologičtí škůdci. Druhý typ faktorů je již ve výrobě, použitá plniva, chemické složení, vnesené nečistoty. Degradace papírů je chemická nebo fyzikální [71]. Chemická degradace je hydrolýza, oxidace, síťování, mikrobiologická degradace a mechanicko-chemická degradace. Fyzikální degradace je zvýšení obsahu krystalické fáze a relaxace volného objemu celulózy v amorfních částech. Působením vody dochází k hydrolýze, při níž se rozkládají chemické vazby. Polymerní řetězce se zkracují a tím se mění mechanické vlastnosti papíru. Oxidací se odštěpují elektrony z atomů. Tím vznikají ketonové, aldehydové a karboxylové skupiny. Foto destrukce probíhá dvěma reakcemi. Přímá fotolýza chemických vazeb přes energii fotonů, které zapříčiňují fotodestrukci celulózy. Nebo fotooxidaci celulózy jako radikálovou reakci, při které vznikají volné radikály reagující následně s kyslíkem a uhlovodíkovým zbytkem. Síťové reakce probíhají při stárnutí papíru. Při něm vznikají nové intra a intermolekulární vazby. Zvyšuje se tím celková pevnost, ale klesá pevnost vláken. Papír se tedy stává křehčím [71].

3.2 Degradace polymeru

Časem polymerní látky dozrávají, proměňují se a stárnou [73]. Mění se molekulární a nadmolekulární struktury. Veškeré tyto změny označujeme souhrnně jako stárnutí. Stárnutí zohledňuje faktor času. Degradace je změna struktury a vlastností v důsledku rozkladných reakcí polymeru. Rozlišujeme dvě degradační etapy polymeru [74].

První probíhá již ve zpracovatelském stroji a je tudíž velmi krátká. Tavenina plastu je vystavena vysoké teplotě a mechanickému smykovému namáhání. Může docházet ke snížení molární hmotnosti způsobené štěpením řetězců nebo odbouráváním makromolekulárního řetězce. U některých polymerů naopak dojde k zesílení, někdy vyvolanému s úmyslem přidání vhodných látek. Tak se děje například u síťovaného polyethylenu nebo většiny reaktoplastů. Proto se již při zpracování používá stabilizátorů. K síťování dochází terminačními reakcemi. Roste molární hmotnost a polymer se stává nerozpustný [74].

V pevném stavu probíhá druhá etapa degradace. Je působena vnitřními a vnějšími vlivy. Mezi vnitřní patří termodynamická nerovnováha [74].

Ke zpracování plastů se používá řada technologií [75]. Zpracování plastu spočívá v zahřátí, vytvarování a následném rychlém zchlazení. Plast je často v nerovnovážném stavu. Výrobek pak samovolně mění strukturu a vlastnosti. Těmto změnám říkáme fyzikální stárnutí. Někdy může docházet k dosmrštění, kdy se rozměry ochlazením zmenšují. Při rychlém ochlazení také dochází k procesu dokrystalizace. Takto vzniklé krystaly mají mnoho vad a nedokonalostí. Časem se některé úseky makromolekul vlivem tepelných pohybů přeuspořádají a tím se snižuje koncentrace defektů s rostoucím stupněm krystalinity polymeru. I po měsíci může probíhat dodatečná krystalizace. Dokrystalizace se nejlépe urychluje při zvýšené teplotě [74], [76].

Degradací dochází ke snížení průměrného polymerizačního stupně polymeru [77]. Zároveň s tím se může měnit konstituce strukturních jednotek polymerních řetězců. Štěpení kovalentních vazeb v hlavním řetězci makromolekul může být způsobeno vlivem působení tepla, ultrazvuku, mechanického namáhání, hydrolýzy nebo oxidace. K odbourávání makromolekul dochází dvojím způsobem. Prvním je depolymerizace, při které se odštěpují jednotlivé monomery. Druhý je štěpení řetězců, při kterém se odštěpují celé řetězce [77].

3.3 Typy vnějších faktorů ovlivňující životnost polymerů

Faktory poškozující polymery [78], které tím ztrácejí užité vlastnosti, jsou teplota, kyslík, voda, chemické látky, biologičtí činitelé, mechanické namáhání. Při praktickém

použití působí vždy několik faktorů najednou a způsobují chemické a fyzikální poškození [78].

3.4 Kyslík

Působením kyslíku se polymery oxidují [76]. Rychlost tohoto procesu závisí na struktuře polymeru, UV záření, teplotě, mechanickém namáhání a katalyzátorech. Fotooxidace je rychlejší za působení UV záření popřípadě za přítomnosti vlhkosti. Voda difúzuje do polymeru, zvětšuje vzdálenost mezi makromolekulami, tím je usnadněn přístup kyslíku a hydrolyze polymeru. V polymeru se zvětšuje obsah karbonylových skupin v makromolekule, které působí jako fotosenzibilátory podporující fotooxidaci. Mechanické namáhání může zapříčinit roztržení chemické vazby. Namáhaný polymer více reaguje s prostředím. Na povrchu se polymeru může rozrušovat [78].

3.5 Teplota

Teplota mění chemickou strukturu [79] termooxidací nebo tepelnou destrukcí. Tím se nevratně mění vlastnosti materiálu. Zvýšením teploty o 10 °C se probíhající chemické reakce urychlí dvakrát. Transport změkčovadel, stabilizátorů a jiných přísad z polymeru je ovlivňován teplotou a může urychlit korozi polymeru. Změna teplot zapříčiňuje rozměrové změny polymeru a související objemová roztažnost vede k vnitřnímu pnutí a vzniku trhlinek. Při určité teplotě které říkáme teplota skelného přechodu se polymer mění z vláčného kaučukovitého stavu do křehkého sklovitého. Tvarová stálost za tepla udává schopnost polymeru za dané teploty zachovat tvar při působení určitých deformačních sil. Modul pružnosti popisuje tvarovou stálost a čím je polymer odolnější deformacím, tím je vyšší stálost. Pokud se polymer nalézá v nízkých teplotách oproti teplotě skelného přechodu, stává se křehkým [78].

3.6 Voda

Voda se do polymeru dostane jako vzdušná vlhkost, déšť, sníh, rosa, mlha. Má chemický, fyzikální i mechanický účinek. Fyzikální účinek je formou bobtnání materiálu, změna krystalinity a vyluhování přísad a plniv. Voda může fungovat jako změkčovadlo a ovlivňovat tak mechanické vlastnosti. Změnou obsahu vlhkosti dohází k objemovým změnám a mohou se tak vytvářet vnitřním pnutím trhlinky, prasklinky, pórovitost. Stabilita polymeru je

ohrožena vyluhováním změkčovadel a stabilizátorů. Mechanické působení vody na polymer je ve formě krup, prudkého deště, zmrznutím vody v polymeru [78].

3.7 Chemické látky

Difúze plynů do polymeru je ovlivňována teplotou. Změkčovadla a přísady migrují z polymeru a urychlují degradaci. Voda vymývá katalyzátory a degradační produkty, takže zpomaluje degradaci. Vymývá ale také antioxidanty a stabilizátory, a tím korozi polymeru urychluje. Způsobuje také hydrolýzu [78]. Difúzí mohou do polymeru pronikat nízkomolekulární chemikálie. Podmínkou jsou volné objemy vznikající tepelným pohybem segmentů makromolekul. Dále mohou pronikat chemikálie a plyny povrchem polymeru, nebo přenášet reakční produkty z povrchu do okolí. Rozhodující o odolnosti chemikáliím je chemická struktura a složení polymeru [78].

Chemikálie mohou způsobit nabobtnání polymeru nebo jeho rozpouštění. Tím dochází ke změnám fyzikálních vlastností. Makromolekuly se od sebe oddalují a zvyšuje se jejich pohyblivost. Polymer je elastičtější ale klesá elektrická pevnost a mění se dielektrické vlastnosti. Více krystalický polymer je odolnější rozpouštědlům [78]. Chemický vliv chemikálií vede k odbourávání polymerů. Polymer se v důsledku toho může stávat tvrdším, měkčím, nebo lepivějším [78].

Polyethylen je málo reaktivní látka odolná vůči kyselinám, zásadám, vodným roztokům solí a působení oxidačních činidel. Pokud však do něj zavedeme nějaký polární substituent, můžeme tyto vlastnosti výrazně zhoršit [78].

Polvinylchlorid podléhá dehydrochloraci. Je kompatibilní s řadou změkčovadel a modifikátorů houževnatosti. Tím lze nastavit v širokém rozsahu jeho mechanické vlastnosti. Nevýhodou je nízká tepelná stabilita. Při vyšších teplotách se odštěpují chlorovodíky [78].

Velký vliv má přítomnost plynných polutantů. Mezi ně patří ozón, oxidující polymery. Oxid dusičitý způsobuje štěpení hlavních řetězců, popřípadě síťování [78].

3.8 Živé organismy

Jejich činností může docházet k chemickému poškození, neboli biokorozi. Ta je způsobena enzymatickým odbouráváním polymerů nebo produkty metabolismu mikroorganismů způsobujících kyselou hydrolyzu [78].

Větší živočichové jako jsou savci, hmyz a další zapříčiňují svou činností především mechanické poškození. Plísně navíc zvyšují vlhkost a s ní související sorpci vody do polymeru [78].

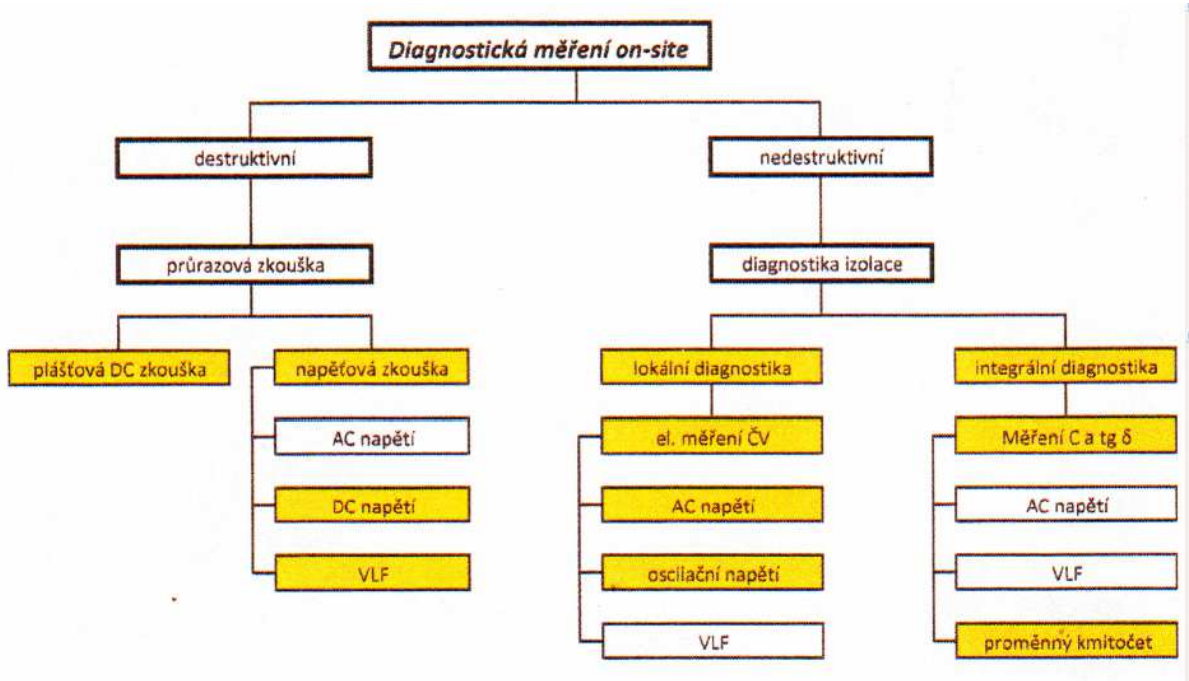
3.9 Mechanické stárnutí

Probíhá během výroby, následné montáže a při provozu elektrického zařízení [26]. Způsobeno je elektrodynamickými, elektromagnetickými a tepelnými silami. Mechanické namáhání jsou rázy zkratovými proudy, otěry nebo vibrace. Tyto mechanické vlivy částečně eliminujeme vhodně použitým elektroizolačním materiálem s dobrými mechanickými vlastnostmi. Využívají se vícesložkové kompozitní materiály. Při výrobě mají mechanické vlivy a namáhání velký vliv na degradaci materiálu. Skleněná vlákna, epoxidové pryskyřice a slídy jsou odolné mechanickým vibracím, čehož lze s výhodou využít. U vysokonapěťových točivých strojů jsou nejvýznamnějšími degradačními činiteli tepelné a mechanické namáhání. Proto se daná izolace při dlouhodobých zkouškách prověřuje i na tyto dva nepomíjitelné faktory [26].

4 Dlouhodobé zkoušky izolací kabelů

Na kabelech se běžně provádí prvotní měření specializovaným zařízením, které určí velké množství parametrů, vykazujících kvalitu. Tímto prvotním měřením se prokáží počáteční vlastnosti kabelu, podle kterých pak lze porovnávat změnu parametrů v čase [80]. Diagnostika má velký význam pro dlouhodobé zkoušky kabelů [81]. V průběhu života kabelu se zkoumají změny počátečních vlastností a parametrů způsobené namáháním a přirozeným stárnutím. Diagnostika kabelů slouží k včasnému odhalení míst, kde mohou vznikat poruchy. Tím se dají ušetřit náklady spojené s nefunkčností zařízení.

Diagnostika je způsob zjišťování stavu izolace nedestruktivním způsobem. Měří se hodnoty fyzikálních parametrů určující stav izolace. Diagnostika může nahradit provoní zkoušku [82]. Můžeme ji rozdělit na dvě skupiny [83]. Diagnostika online, probíhající za provozu a diagnostiku off-line probíhající mimo provoz. Při on-line diagnostice může být zařízení sledováno trvale pomocí senzorů, nebo pomocí přenosných měřicích přístrojů. Diagnostika off-line má variantu off-site, při které se odebere vzorek, který je pak podrobován testům v laboratořích, a variantu on-site, která se dále člení dle obrázku 16.



Obr. 16 rozdělení diagnostického měření on-site převzato z [83]

Normy které musí kabely plnit jsou dány typem kabelu. Jsou například normy na silové kabely 0,6/1 kV odolné proti ohni ve speciálním provedení pro elektrárny ČSN 34 7660-3A,

kabely pro drážní vozidla se speciální odolností proti požáru ČSN EN 50264-2, vícežilové a vícepárové kabely pro nadzemní a podzemní uložení ČSN 34 7616-2, izolované vodiče pro venkovní vedení a příslušné armatury pro jmenovité napětí nad AC 1 kV a do 36 kV ČSN EN 50397-1, distribuční kabely pro střední napětí s papírovou izolací ČSN 34 7406, kabely a vodiče izolované PVC pro jmenovitá napětí do 450/750 V ČSN 34 7410-3 a mnoho dalších. Na základě těchto norem jsou podnikové normy, které z těchto vycházejí. Jako například norma PNE 347625 pro vn kabely se zesíťnou PE izolací pro distribuční sítě do 35 kV, PNE 34 7659-5 pro kabely plastové pro distribuční sítě o jmenovitém napětí 0,6/1 kV a další..

Prováděné zkoušky jsou předprovozní a provozní [81]. Existuje řada normovaných i nenormovaných metod na zkoušky kabelů. Zkoušky na výskyt elektrických stromečků se neprovádějí a neexistují na ně ani žádné normy.

Předprovozními zkouškami se zkoušejí normy, které musí vyrobené kabely plnit. Provozní zkoušky se provádí během života kabelu. Provádějí se například zkouška napětím ČSN 34 7010-82. Měření tloušťky izolace, celistvosti pláště, podélná smrštitelnost pláště, tloušťky pláště a vnějších rozměrů dle zkušebních metod ČSN EN 60811-1-1. Izolační odpor při 70 °C a zkouška vysokým napětím ČSN 34 7010-82. Dále se zkouší mechanické vlastnosti izolace a pláště před stárnutím vzorku zkouška ČSN EN 60811-1-1, po stárnutí vzorku a po stárnutí hotového kabelu ČSN IEC 811-1-2. Zkouška nasákavosti ČSN EN 60811-1-3. Zkouška úbytku hmotnosti ČSN IEC 811-3-2, zkouška tlakem při vysoké teplotě a zkouška tepelným nárazem ČSN IEC 811-3-1, zkouška tepelné stability ČSN IEC 811-3-2, zkouška prodloužení při nízké teplotě a zkouška rázem na kabelu při nízké teplotě ČSN IEC 811-1-4, zkouška odolnosti proti popraskání ČSN IEC 811-4-1, zkouška samozhášivosti ČSN EN 50265-2-1. Norma ČSN EN 60270 technika zkoušek vysokým napětím měření částečných výbojů. Zkoušky v podmínkách požáru na šíření plamene různými směry ČSN EN 60 332. Doplnující zkušební metody ČSN 34 7010-82. Zkouška AC napětím ČSN 34 7410-2, Měření částečných výbojů ČSN EN 60851-5, Zkouška stability kabelu ČSN IEC 885-2, Tepelná závislost tg d IEC 60502-2, Zkouška impulsním atmosférickým napětím ČSN IEC 60-1, 4 hodinová zkouška AC napětím ČSN 34 7010-82. Dále se provádí nenormované zkoušky stárnutí, životnostní zkouška, průběžné zkoušky jakosti výroby a mnohé další.

4.1 Návrh dlouhodobých zkoušek izolací kabelů

Doporučuji určit počáteční vlastnosti kabelové izolace. Změřit elektrické parametry izolace kabelu, izolační odpor, elektrickou pevnost, vazební impedance, kapacitu a reflektometricky změřit parametry kabelu. Změřit mechanické parametry, tedy pevnost v tahu a tažnost pláště a tepelnou odolnost.

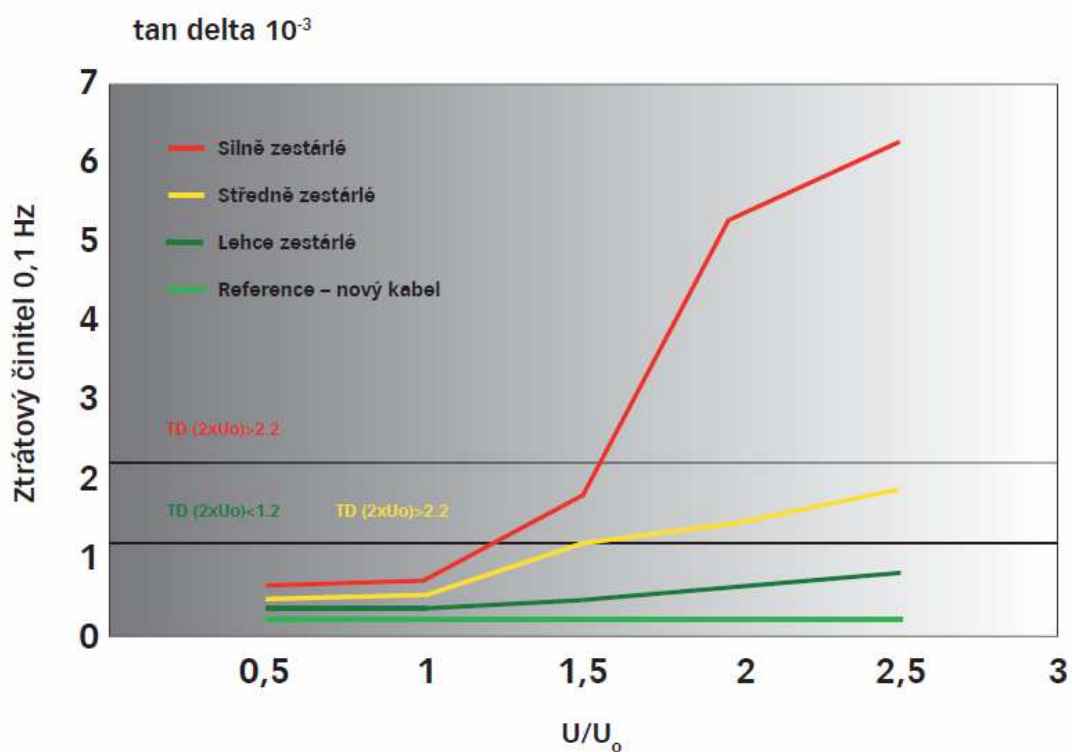
Navrhuji změřit izolační odpor stejnosměrným proudem provádět dle [84] alespoň 500 V při 0,1 mA. Požadovaný izolační odpor musí plnit alespoň 1 M Ω . Změřit elektrické pevnosti při tloušťce materiálu 2mm. Měřičem kapacity změřit kapacitu mezi vodiči při 2 a 50 Hz a vyhodnotit rozdíl takto naměřených kapacit. Lokalizovat nehomogenity a poruchy reflektometrickým měřením. Vyhodnotit echogram vzniklý tímto měřením, tedy průběh impedance po délce obvodu. Změřit pevnost v tahu a tažnost pláště dle normy ČSN EN 60811-501 určené pro zkoušky izolačních materiálů kabelů a jejich plášťů. Nechat tepelně stárnout izolaci podle normy ČSN EN 60811-401 v horkovzdušné peci a poté vyhodnotit znovu mechanické vlastnosti nastárnutých materiálů normou ČSN EN 60811-501.

Kontrolovat kabelovou izolaci po instalaci nebo pokládce. Změřit elektrické parametry a zjistit vady způsobené pokládkou. Zkouška kabelové izolace dle návrhu tabulky 2., podle napětí a času expozice. Provádět po pokládce.

Číslo	Napěťová zkouška	Napětí	Trvání	Požadavek
1	Zkouška PE pláště Stejnosemné napětí DC Svodový proud < 0,2 mA/100m	5 kV	5 minut	Bez průrazu
2	Zkouška PVC pláště Stejnosemné napětí DC Svodový proud < 0,2 mA/100m	3 kV	6 minut	Bez průrazu
3	Zkouška izolace Střídavé napětí 50Hz AC Střídavé napětí 0,1 Hz AC	2U _{0ef}	80 minut	Bez průrazu
		3U _{0ef}	60 minut	Bez průrazu

Tab. 2 návrh zkoušky kabelové izolace

Provádět průběžnou diagnostiku kabelu. Každých 10 let změřit elektrické a mechanické parametry, sledovat časové degradační změny izolace a určit předpoklad životnosti kabelu. Změřit izolační odpor stejnosměrným napětím. Změřit ztrátový činitel $\tan \delta$ izolace střídavým napětím sinusového průběhu frekvencí 0,001 až 0,2 Hz měřicím diagnostickým zařízením a vyhodnotit jej v závislosti na napětí jako je tomu na obrázku 17. Zároveň změřit kapacitu při 2 a 50 Hz, vyhodnotit rozdíl a porovnat s měřením počátečního stavu kabelové izolace. Změřit částečné výboje dle normy ČSN EN 60885-2. Ověřit izolační pevnost kabelu zvýšeným napětím ss na $2U_0$ po dobu 10 minut popřípadě střídavým napětím o frekvenci 0,1 Hz. Dále změřit kabelovou izolaci dle návrhu tabulky 2. Vyhodnotit degradační změny kabelu a stanovit trend a určit předpoklad zbytkové životnosti kabelu.



Obr. 17 vyhodnocení ztrátového činitele v závislosti na napětí převzato z [85]

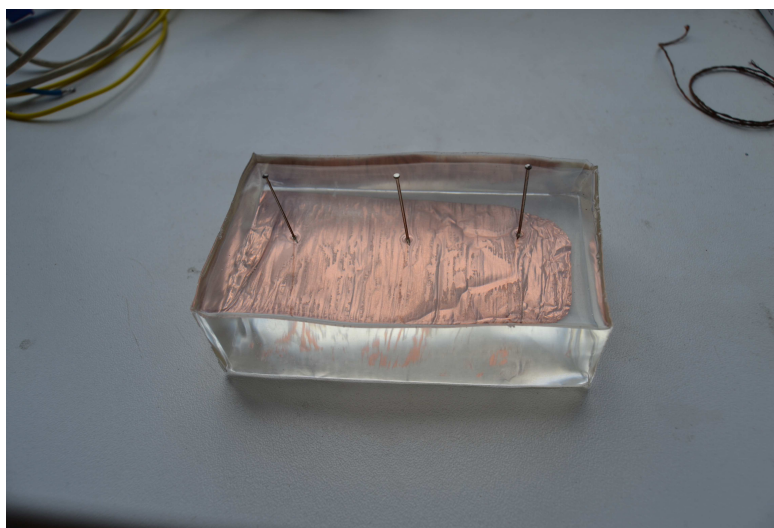
Doporučuji zkoušet elektrickou izolaci kabelů na elektrické stromečky. Navrhuji následující postup zkoušky. Vzít vzorek izolace alespoň 4 cm velký. Vzorek nechat vysušit po dobu 1 hodiny při teplotě 60 °C. Do vzorku zapíchnout jehlovou vn elektrodu poloměru 0,5 mm zkosenou od špičky v délce 2 mm, a na druhé straně přilepit zemnicí elektrodu ve formě vodivé pásky. Nechat exponovat vzorek konstantním střídavým napětím 25 kV. Nechat stárnout až do samotného úplného průrazu materiálu. Změřit čas po který byl vzorek vystaven napětí a intenzitu pole. Zhodnotit stav vytvořeného stromečku. Vyhodnotit předpoklad životnost izolace za provozních podmínek, ve kterých bude izolace provozována.

5 Experiment

Na základě získaných informací o degradaci izolací kabelů byla provedena degradace izolace elektrickým stárnutím. Prakticky byla sledována problematika elektrických stromečků vytvořených v elektroizolačním materiálu. Jelikož jsou izolace kabelů vyráběny jen z materiálu polymerů, které jsou neprůhledné a stromečky by byly špatně pozorovatelné, byly vytvořeny stromečky v reaktoplastické průhledné pryskyřici. V průhledném materiálu se lépe vyhodnocuje a sleduje jejich růst. Předmětem experimentu bylo pozorovat růst elektrických stromečků v různých materiálech pryskyřice a vyhodnotit získané výsledky.

5.1 Vzorky

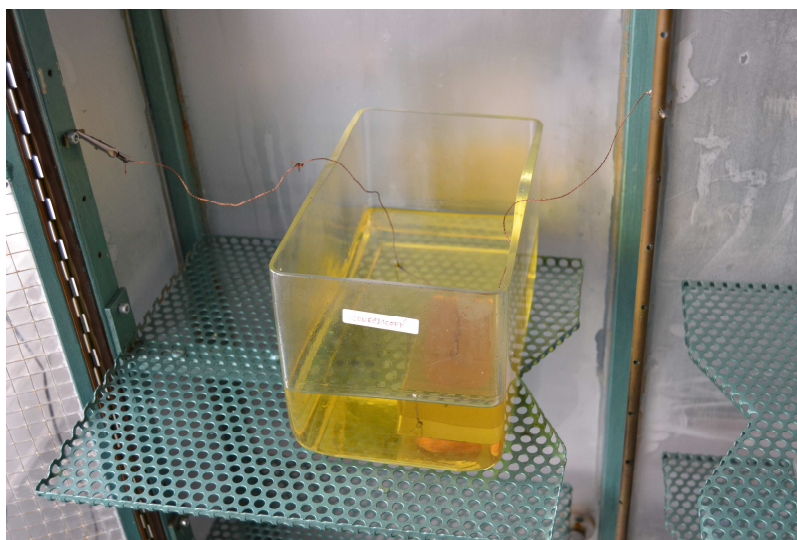
Z hliníkového plechu byly vytvořeny formičky 10x5x3 cm, do kterých byly následně nality dobře promíchané dvousložkovou zalévací elektrotechnické pryskyřice různých druhů. Do takto připravených vzorků byly vloženy jehlové elektrody do hloubky 2 mm od povrchu. Průměr hrotu 0,4 mm se zkosením od špičky do 2 mm délky. Jehlové elektrody byly od sebe vzdáleny 3 cm. Vytvořený vzorek se poté nechal vytvrdnout. Na obrázku 16 je vidět prostorové uspořádání experimentálního vzorku vytvrzené pryskyřice s jehlovými elektrodami a přilepenou zemnicí elektrodou.



Obr. 16 Vzorek připravený pro stárnutí a tvorbu stromečků

Po vytvrzení byl vzorek vystaven vysokému napětí 50Hz v zařízení pro dlouhodobé zkoušky střídavým napětím zobrazeném v příloze A. Na jehlové elektrody bylo přiváděno vysoké napětí a jako zemnicí elektroda sloužila nalepená vodivá fólie zespoda vzorku. Aby nedocházelo k přeskokům z vn elektrody na zemnicí elektrodu, byl vzorek vložen do olejové

lázně, kterou můžeme vidět na obrázku 17. V praxi elektrické stromečky rostou při jmenovitém napětí a normálním provozu elektrického zařízení. Růst stromečku byl iniciován zvýšeným napětím, tedy vyšším než je jmenovité napětí při provozu, aby růst stromečků byl urychlen. Poté co v elektroizolačním materiálu vyrostly stromečky a došlo k průrazu materiálu, byly vzorky vyjmuty. Dále probíhala jejich úprava. Vzorky byly rozřezány na menší části v těsné blízkosti stromečků a opracovány. Rozřezané vzorky pak byly následně broušeny a leštěny v několika krocích na leštičce v příloze B, aby bylo možné je pozorovat pod mikroskopem. K broušení bylo použito smirkových papírů o hrubosti 400 až 2000. Následně byly vyleštěny a vyfoceny. Vzorky byly vytvořeny z více druhů pryskyřice pro možnost porovnávání vytvořených stromečků. Cílem experimentu bylo ověřit degradaci izolace vysokým napětím růstem stromečků, které se vyskytují i v kabelech vn.



Obr. 17 Olejová lázeň se v vzorkem s připojenými elektrodami

5.2 Pozorované vzorky

První druhy zkoumané pryskyřice byly dvousložkové LH 198 a PR 108 vytvrditelné při 200 °C. Proto musely být vytvrzována v peci přibližně 35 minut. Poměr míchání pryskyřice a tvrdidla byl 1:2. Problém byl s následným napíchnutím jehlové elektrody do materiálu, protože během jedné minuty se z tuhající hmoty stala úplně tvrdá, do které již nebylo možné jehlovou elektrodu zapíchnout. Dalším problémem byla průhlednost pryskyřice, neboť byla nažloutlá. Protože byla velmi odolná, bylo použito vyššího napětí pro vytvoření stromečků a celkovému průrazu materiálu.

V porovnání s ostatními druhy pryskyřice se stromečky v pryskyřici LH 198 i PR 108 tvořily méně a byly méně rozvětvené. Příkladám to faktu, že pryskyřice byla stárnutá rychle

vysokým napětím a tedy došlo dříve k průrazu materiálu, než se stihly stromečky rozrůst a více rozvětvit. Této tezi odpovídají i pozorované vzniklé laloky viditelné především na obrázku přílohy C.

Z přílohy C je viditelné, že v pryskyřici LH 198 se při napětí 75 kV a době expozice 1 minuta tvořily především laloky, tvorba větví stromečku byla jen minimální. Při 50 kV době expozice 3 minuty příloha E lze již pozorovat větvi více. A při 30 kV době expozice 25 minut příloha D je patrné, že vzorek má větvi nejvíce. Tétož výsledku jsem dosáhl i u pryskyřice PR 108. Jak je vidět na příloze F kdy byla vystavena 75 kV po dobu 1,5 minuty, jsou vidět především laloky. V příloze G je pak vidět několik větviček stromečku vzniklých při 45 kV a době expozice 5 minut. Z toho tedy usuzuji, že čím nižší napětí, tím více se stromeček větví. To souvisí také s dobou expozice. Čím déle je vzorek vystaven, tím více je stromeček rozvětven.

Dalším druhem byla epoxidová čirá zalévací hmota EC 141. Poměr míchání epoxidové pryskyřice a aminového tužidla W 241 byl 1:2. Výhodou u ní byla doba vytvrzení 48 hodin při 23°C a lepší průhlednost. Stromečky se v ní tvořily daleko více. Oproti předchozí pryskyřici byla tato exponována po delší dobu. Můj úsudek o vlivu doby vystavení vzorku elektrickému stárnutí se mi potvrdil i zde. Stromeček který rostl 36 hodin byl daleko více členitější a rozrostlejší viz příloha J, než stromeček vzniklý při době růstu 21 hodin viz příloha K.

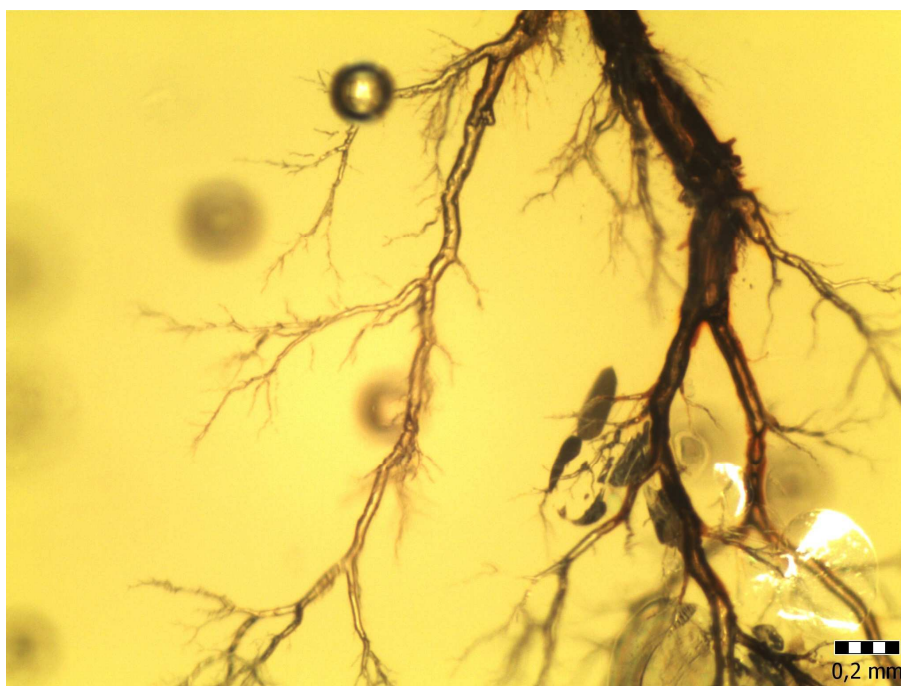
Byly vytvořeny také vzorky s čirou licí epoxidovou pryskyřici CER smíchanou s tvrdidlem 1:2. Stromečky v ní byly více členité a rozšířené do prostoru než tomu bylo u předchozích druhů pryskyřic. V příloze N je vidět vzorek stárnutý 26 hodin při 20 kV.

Dále byl zkoumán vliv tloušťky vzorku na růst stromečku při stejném napětí v pryskyřici EC 141. Vzorky s menší vzdáleností tedy 1,5 cm mezi elektrodami jako je v příloze H měli větve hustěji u sebe a připomínali keřovitý typ stromečku. Vzorky s větší vzdáleností tedy 2,5 cm mezi elektrodami jako je v příloze I neměli větve tak husté a připomínali spíše větvovitý typ stromečku. Jako důvod usuzuji velikost prostoru, ve kterém se mohly šířit.

Vložením dvou jehlových elektrod proti sobě, průměr hrotu 0,4 mm se zkosením od špičky do 2 mm délky, kdy jedna byla jehlová zemnicí elektrodu a druhá jehlová vn

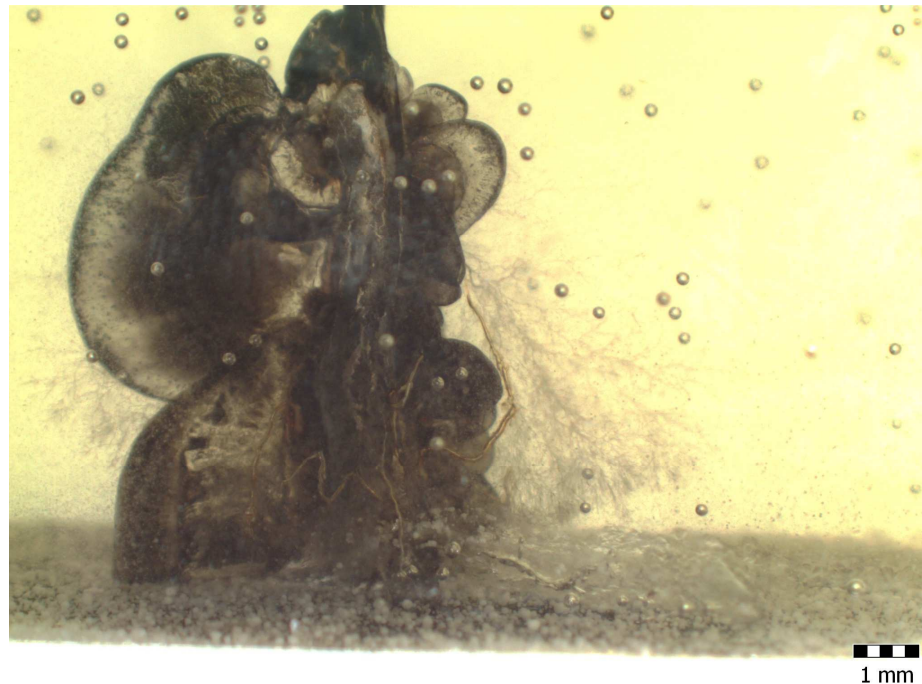
elektroda, bylo zkoumáno, zda se stromečky budou šířit z obou elektrod. Tato myšlenka se potvrdila, názorně je ukázáno v příloze L. Lze si také povšimnout, že konce větví stromečku se zastavily těsně před povrchem vzorku. Důvodem mohou být zbytková povrchová napětí, která brání dalšímu šíření vláken, neboť na konci vláken již není dostatečný potenciál k dosažení druhé elektrody .

Jak se ukázalo, kanálky opravdu nemusí být vždy černé nebo zuhelnatělé. Některé jsou průhledné, jako na obrázku 18. To přisuzuji vzniku méně sazí při procesu degradace a druhu zvolené pryskyřice.



Obr. 18 ukázka kanálků stromečku

Dle teoretických předpokladů by mělo plnivo zpomalit růst stromečku. Proto bylo jako experiment vloženo do pryskyřice EC 141 plnivo o velikosti částic 50 μm . Tento experiment se však nezdařil a funkce plniva se tak nepovedlo ověřit, neboť dříve než se pryskyřice vytvrdila, kleslo plnivo ke dnu, jak je tomu vidět na obrázku 19. Nemohlo tedy růstu nijak bránit ani oddalovat průraz materiálu. Proto pro možné další experimenty s plnivem navrhuji vylepšení ve formě míchání plniva a pryskyřice během tuhnutí, za předpokladu, že nebudou vmíchávány bubliny vzduchu, popřípadě použití méně viskózní pryskyřice, ve které by plnivo nepadalo ke dnu.



Obr. 19 plnivo na spodku vzorku

Prakticky byla také ověřena funkce bariéry. Otázkou bylo, zda může zabránit dalšímu růstu stroměčků a zastavit nebo oddálit totální průraz materiálu. Jako bariéra bylo použito slídového pásku Relanex, který byl vložen na dno vzorku do materiálu pryskyřice CER. Bariéra měla rozměry 10x5 cm a zakrývala celé dno. Výsledkem bylo zabránění průrazu. Větve stroměčku se šířily po této bariéře, především po směru vláken bariéry viz. příloha M, ale skrz neprošly a k celkovému průrazu nedošlo vůbec. Provedený experiment tak potvrzuje předpoklad, že bariéra může zabránit šíření stroměčků. Dále bylo pozorovatelné, že stroměček byl více členitý viz příloha O než v materiálu CER bez bariéry viditelné v příloze N. To vyhodnocuji jako důsledek toho, že nedošlo k průrazu, a proto docházelo k neustálému šíření a větvení již stávajících kanálků.

5.3 Zhodnocení experimentu

Provedený experiment potvrdil předpoklad, že při vysokém napětí rostou v izolačním materiálu elektrické stroměčky, které tento materiál degradují. Pozorována byla doba potřebná pro vytvoření stroměčku v materiálu, popřípadě doba do průrazu. Nelze obecně stanovit čas pro dané napětí, při kterém elektrické stroměčky vznikají ani dobu do průrazu. Dále byl zkoumán vliv tloušťky materiálu na tvar elektrického stroměčku. Pozorován byl tvar a rozvětvenost vytvořených stroměčků v různých materiálech. Zkoumán byl také vliv

velikosti napětí na růst elektrických stromečků. Ze získaných teoretických poznatků o vlivu plniva na šíření stromečků, byl proveden pokus s plnivem. Experimentálně byla zkoušena bariéra v podobě Relanexu na ovlivnění růstu stromečků.

5.4 Závěr experimentu

Pozorováním jsem došel k závěru, že čím je použito vyšší napětí, tím dojde dříve k průrazu a stromečky se moc nevětví, tvoří se spíše laloky naplněné zplodinami. Pokud je materiál vystaven vysokému napětí delší dobu, stromečky se více větví a prorůstají celým materiálem. Dále bylo zjištěno, že v různých materiálech mají stromečky různý tvar, rozvětvenost a členitost. V pryskyřici LH 198 a PR 108 bylo pozorováno vždy jen pár větví stromečku. Příčinou bylo použité vysoké napětí, protože tato pryskyřice byla velmi odolná a při nižším napětí nebyly pozorovány žádné náznaky degradace stárnutím. V pryskyřici EC 141 byly pozorovány rozrostlé stromečky, protože bylo použito nižšího napětí než u předchozích druhů a vzorky byly stárnuty delší dobu. Stromečky v ní měly větvovitou strukturu. V pryskyřici CER měly stromečky kombinaci větvovitě a keřovitě struktury. Každá větev měla po své délce hodně postraních krátkých kanálků a stromečky tak byly „chlupatější“ než u pryskyřice EC 141.

Dále jsem zjistil, že v tlustším materiálu se stromečky více šíří do prostoru a více větví, než je tomu u tenčího materiálu. Čím je materiál tlustší, tedy vzdálenost mezi elektrodami větší, stromečky jsou více rozvětveny do prostoru. Naopak u menších vzdáleností elektrod jsou stromečky spíše keřovitěho tvaru. Při vložení dvou jehlových elektrod proti sobě, tedy jedné vn a druhé zemnicí, rostou elektrické stromečky z obou elektrod. Pokud je zemnicí elektroda v provedení přilepené vodivé pásky z jedné strany vzorku a použita jehlová vn elektroda proti, rostou stromečky směrem od jehlové elektrody k zemnicí. To je způsobeno tím, že u špičky vn elektrody je vyšší intenzita pole způsobující degradaci a růst kanálků elektrických stromečků. Po vložení dvou jehlových elektrod proti sobě rostou stromečky z obou elektrod k opačné elektrodě. Vliv plniva se mi nepodařilo prokázat, ale pro další pokusy bych navrhoval použít méně viskózní materiál, aby plnivo nemohlo padat ke dnu popřípadě nechat pryskyřici tvrdnout při občasném míchání, aby bylo plnivo rozšířeno v celém vzorku. Funkci bariéry jsem prokázal, bariéra opravdu může zpomalit popřípadě úplně zastavit šíření elektrických stromečků a zabránit průrazu materiálu.

Závěr

Degradace izolace probíhá po celý její život. Proto na ni jsou kladeny vysoké nároky. V této práci byla popsána degradace elektroizolačních systémů vysokým napětím. Celkem je rozdělena na pět částí.

V první části je popsáno působení elektrického pole na elektroizolační materiály. Jsou zde popsány vlastnosti izolantů a dielektrik a z nich vyplývající chování při vystavení elektrickému poli, jako je polarizace, ztráty a vodivost v dielektriku a celkové stárnutí materiálu. Druhá část je věnována elektrickým stromečkům, modelu jejich růstu a průběhu tvorby. Informace k této kapitole byly čerpány především z odborných článků a výzkumů týkajících se stromečků. Z nich také byly získány poznatky o vlivu plniva a bariéry na růst stromečku, které pak byly aktivně využity v experimentu v páté kapitole. Třetí kapitola je zaměřena na degradaci elektrické izolace kabelů. Rozebrány jsou především vnější vlivy působící na izolaci kabelů. Papírová izolace je zmíněna jen okrajově, protože je již na ústupu. Ve čtvrté kapitole jsou zmíněny nejčastější zkoušky kabelové izolace a normy, které musí kabely plnit. Součástí je také vlastní návrh systematiky dlouhodobých zkoušek izolací kabelů, rozšířený o návrh s doporučením na zkoušení izolace na růst elektrických stromečků, které doposud zkoušeny nejsou a neexistují na ně ani žádné normy. Pátou kapitolou je pak experiment. Při něm byly vytvořeny vzorky s elektrickými stromečky. Jako materiál byla zvolena pryskyřice, protože v materiálu izolace kabelu by byly špatně pozorovatelné. Použité pryskyřice byly LH 198, PR 108, EC 141 a CER. Sledován byl tvar stromečků, které se v nich vytvořily. Dalšími sledovanými parametry byly čas potřebný pro vytvoření a napětí, při kterém se šířily. Ze získaných teoretických předpokladů byl experimentálně zkoušen vliv plniva na růst stromečků. Předpokládaný efekt se však nedostavil a vliv plniva nebyl prokázán, protože plnivo kleslo na dno vzorku a neúčastnilo se procesu růstu stromečků. Jako poučení bych tedy pro další pokusy navrhoval použít méně viskózní materiál, aby plnivo nemohlo padat ke dnu popřípadě nechat pryskyřici tvrdnout při občasném míchání, aby bylo plnivo rozšířeno v celém vzorku. Naopak vliv bariéry ve formě Relanexu byl úspěšně prokázán. Bariéra může zastavit šíření stromečků. Fotky stromečků prokazující tvrzení a vyhodnocení experimentu jsou přiloženy v příloze pro lepší názornost a ukázkou.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TRNKA, Pavel. Zbytková životnost elektroizolačních systémů. In: Zbytková životnost elektroizolačních systémů [online]. 2009 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:0zC6zilaHlkJ:www.elektrorevue.cz/file.php%3Fid%3D20000307-d1de4d2d85+&cd=9&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>
- [2] Vazba v pevných látkách a jejich vlastnosti. In: Vazba v pevných látkách [online]. VSCHT Praha, 2013 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/ach/vyuka-baklarske-oach2/CrystBond.pdf>
- [3] Fyzika polovodičů: pásové diagramy. Fyzika polovodičů 2000 [online]. 2000 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.trunky.cz/bp/fypolo/4.htm>
- [4] TOMÁŠ, Martin. Dielektrikum ve statickém elektrickém poli. Dielektrika: Fyzika normálních dielektrik [online]. 2009 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://dielektrika.kvalitne.cz/dielvestatpoli.html>
- [5] Elektroizolační materiály a dielektrika. In: Elektroizolační materiály a dielektrika [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CD>
- [6] JANDORA, Radek. Elektrické pole. Elektrické pole [online]. 2000 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f13.htm#vodice>
- [7] TOMÁŠ, Martin. Mechanismy polarizace. Dielektrika: Fyzika normálních dielektrik [online]. 2009 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://dielektrika.kvalitne.cz/mechpolar.html>
- [8] LEUCHTER, Jan. Izolanty. In: Izolanty [online]. 2009 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: http://user.unob.cz/leuchter/4_P%C5%98_BAK_izolanty.pdf
- [9] JABŮREK, Ladislav. Studium elektrického namáhání drážkové izolace [online]. BRNO, 2009 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7481/Bakalarka_Jaburek.pdf?sequence=1 VUT Brno.
- [10] Elektroizolační materiály: izolanty a dielektrika. In: Elektroizolační materiály [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: http://www.janoud.cz/sub/jcueltech/04b_izolanty.pdf
- [11] PŘIKRYL, Tomáš. DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI TEPELNĚ NAMÁHANÝCH DRÁŽKOVÝCH IZOLACÍ. VUT Brno, 2008. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/16192/Bakalarska%20prace.PDF?sequence=1> . Bakalářská práce. VUT Brno.
- [12] ŠTĚPÁNEK. Chemická vazba. In: Přednášky z obecné chemie [online]. 2013 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: http://lynette.natur.cuni.cz/stepanek/vyuka/chemicka_vazba.pdf
- [13] EŠNER, Ondřej. Technologie: izolanty a dielektrika. [online]. 2005 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: http://ondatra.humlak.cz/%8Akola/Technologie_2.0_Izolanty%20a%20dielektrika%20zm!.doc
- [14] BUREŠ, Jiří. Relativní permitivita. ConWerter: jednotky a tabulky [online]. 2002 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/relativni-permitivita.htm>
- [15] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [16] DUŠÁNEK, Miroslav. Elektrotechnologie. In: Elektrotechnologie [online]. 2005 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: http://5ep.wz.cz/data/ucebnice_elt.pdf
- [17] JEŽÍK, Jan. STUDIUM DIELEKTRICKÉ RELAXACEV ZÁKLADNÍCH MATERIÁLECH DPS A V IZOLACÍCH KABELŮ. VUT Brno, 2011. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/1749/xjezik01_diplomova_prace.pdf?sequence=1 . Diplomová práce. VUT Brno.
- [18] DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI TUHÝCH LÁTEK. In: DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI TUHÝCH LÁTEK [online]. 2009 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_4.pdf
- [19] ŠAVEL, Josef. Elektrická pevnost. In: Električka [online]. 2005 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/terminolog/eterminolog2definition.2006-04-22.5895106704>
- [20] JEŘÁBEK, Michal. Analýza vícefaktorového namáhání elektroizolačních Materiálů. VUT Brno, 2009. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/7101/DP_Je%C5%99%C3%A1bek_Michal.pdf?sequence=1 . Diplomová práce. VUT Brno.

- [21] Veličiny a vztahy v nauce o dielektrikách: fyzika normálních dielektrik. Dielektrika: fyzika normálních dielektrik [online]. 2009 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://dielektrika.kvalitne.cz/zaklad.html>
- [22] PALKO, Radek. Teoretický rozbor elektrického průrazu. ZCU Plzeň, 2012. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/3917/Teoreticky%20rozbor%20elektrického%20prurazu%20Radek%20Palko.pdf?sequence=1> . Diplomová práce. ZCU Plzeň.
- [23] KUČERA, Miroslav. Účinky vícefaktorového namáhání na vlastnosti elektroizolačních materiálů. VUT Brno, 2009. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7480/Bak%C3%A11%C3%A1%C5%99sk%C3%A1%20pr%C3%A1ce%20-%20Miroslav%20Ku%C4%8Dera.pdf?sequence=1> . Bakalářská práce. VUT Brno
- [24] Třídy teplotní odolnosti elektrické izolace a meze oteplení. In: Třídy teplotní odolnosti [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.trasfor.sk/documents/Teplotnitridy.pdf>
- [25] TRNKA, Pavel. Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů. In: [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/394/r0c1c2.pdf?sequence=1>
- [26] PAVLÍČEK, Marek. Modely stárnutí elektroizolačních materiálů. ZCU Plzeň, 2012. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/3914/Diplomova%20prace-Marek%20Pavlicek.pdf?sequence=1> . Diplomová práce. ZCU Plzeň.
- [27] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [28] Elektrické stromečky: fenomén v elektroizolačních materiálech. Odborné časopisy [online]. roč. 2010, č. 1 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40272.pdf>
- [29] PLÁČEK, Ivo. Diagnostika kabelů vysokého napětí. ZCU Plzeň, 2012. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2783/Bc%20prace%20Diagnostika%20kabelu%20vn.pdf?sequence=1> . Bakalářská práce. ZCU Plzeň.
- [30] THUE, W.A. Electrical power cable engineering. Electrical power cable engineering. 2003, č. 2, 417 p.
- [31] MALIK, N.H., A.A. AL-ARAINY a M.I. QURESHI. Electrical insulation in power systems. Power engineering. 1998, č. 3, 394 p.
- [32] PARTIAL DISCHARGE CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL TREES PRIOR TO BREAKDOWN. ELECTRICAL TREES [online]. 2008 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4664491&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D4664491>
- [33] Propagation of electrical tree growth in a composite solid insulation consisted of epoxy resin and mica sheets. Electrical tree [online]. 2010 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5568239>
- [34] Seventh International Conference on Dielectric Materials, Measurements, and Applications, 23-26 September 1996, venue, University of Bath, UK: The effect of absorbed water on electrical treeing in epoxy resins. London: The Institution, c1996, xviii, 397 p. Conference publication (Institution of Electrical Engineers), no. 430. ISBN 08-529-6670-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=607383&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D607383>
- [35] NIEMEYER, L., L. PIETRONEM a H. J. WIESMANN. Fractal dimension of dielectric breakdown. Phys. Rev. Lett. 1984, vol. 52, pp. 1033-103.
- [36] WIESMANN, H. J. a H. R. ALLER. A hctal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics. Appl. Phys. 1986, vol. 60, pp. 1770-177.
- [37] DISSADO, L. A. a P. J. J. SWEENEY. Physical model for breakdown structures in solid dielectrics. Phys. Rev. 1993, vol. 48 pp. 16261-16268.
- [38] SWEENEY, P. J. J., L. A. DISSADO a J. M. COOPER. Simulation of the effect of barriers upon electrical treeing. J. Phys. D: Appl. Phys. 1992, vol. 25, pp. 113-119.
- [39] SOCIETY, IEEE Dielectrics and Insulation. 2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, October 14 - 17, 2001, Four Points Hotel, Kitchener, ON, Canada: A new deterministic model for tree growth in polymers with barriers [online]. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2001 [cit. 2014-05-05]. ISBN 07-803-7053-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=963635&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D963635>

- [40] CHAMPION, J. V. a S. J. DODD. The effect of material composition and temperature on electrical tree growth in epoxy resins. *Dielectric Materials*. 2000, No. 473, pp. 30 – 34
- [41] DISSADO, L a J FOTHERGILL. *Electrical degradation and breakdown in polymers*. London: P. Peregrinus, c1992, xix, 601 p. IEE materials, 9. ISBN 08-634-1196-7.
- [42] AUCKLAND, D. W., S. M. F. KABIR a B. R. VARLOW. Effect of barriers on the growth of trees in solid insulation. *Effect of barriers on the growth of trees*. 1992, Vol.139, pp. 14 – 20.
- [43] SHIMIZU, N. a C. LAURENT. Electrical tree initiation. *Dielectr. Electr. Insul.* 1998, Vol. 5, pp. 651 – 659.
- [44] DISSADO, L. A., S. J. DODD, J. V. CHAMPION, P. J. WILLIAMS a J. M. ALISON. Of electrical tree structures in solid polymeric insulation. *Dielectr. Electr. Insul.* 1997, Vol. 4, pp. 259 – 279.
- [45] CHAMPION, J. V. a D. J. DODD. The effect of voltage and material age on the electrical tree growth and breakdown characteristics of epoxy resin. *Electrical tree growth and breakdown characteristics*. 1995, 28, pp. 398 – 407.
- [46] MAYOUX, C. Degradation of insulating materials under electrical stress. *Dielectr. Electr. Insul.* 2000, Vol. 7, pp. 590 – 601
- [47] COOPER, J. M. The effect of barriers on electrical treeing. *Diel. Mat., Measurem. and Appl.*, Canterbury, U.K. 1986, pp. 238 – 241.
- [48] VOGELSANG, R., R. BRÜTSCH, T. FARR a K. FRÖHLICH. Electrical tree propagation along barrier-interfaces in epoxy resin. *Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena*. 2002., pp. 946 – 950.
- [49] The Effect of Barriers on Electrical Tree Propagation in Composite Insulation Materials. The Effect of Barriers on Electrical Tree [online]. 2006, 13/1 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=1624282&queryText%3DThe+Effect+of+Barriers+on+Electrical+Tree+Propagation+in+Composite+Insulation+Materials>
- [50] KURNIANTO, R., Y. MURAKAMI, N. HOZUMI a M. NAGAO. Characterization of Tree Growth in Filled Resin: The effect of filler and moisture content. *Dielectr. Electr. Insul.* 2007, Vol.14, pp.427-435.
- [51] KURNIANTO, R., Y. MURAKAMI, N. HOZUMI a M. NAGAO. The Use of Fractal Dimension in Characterizing Tree Growth in Filled Epoxy Resin under Humid Condition. *Fundamentals and Materials*. 2006, Vol. 126, pp.1187-1192.
- [52] Investigation of Filler Effect on Treeing Phenomenon in Epoxy Resin under ac Voltage. Investigation of Filler Effect on Treeing [online]. 2008, 15/4 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4591234&queryText%3DInvestigation+of+Filler+Effect+on+Treeing+Phenomenon+in+Epoxy+Resin+under+ac+Voltage>
- [53] DISSADO, L. A. a J. C. FOTHERGILL. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. Electrical Degradation. 1992.
- [54] ORGANIZER: INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG, School of Electrical Engineering and Informatics. 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics: Statistical study on tree inception voltage of silicone rubber and epoxy resin [online]. Piscataway: IEEE, 2011 [cit. 2014-05-05]. ISBN 978-145-7707-537. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6021510&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D6021510>
- [55] Electrical Insulation, IEEE Transactions: Electrical Breakdown Due to Discharges in Different Types of Insulation [online]. 1981 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4080801&queryText%3DELECTRICAL+BREAKDOWN+DUE+To+DISCHARGES+IN+DIFFERENT+TYPES+OF+INSULATION>
- [56] Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2005): June 5-9, 2005, the Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu, Japan [online]. Piscataway, NJ: Available from IEEE Operations Center, c2005, 3 v. [cit. 2014-05-05]. Inception and growth of treeing in polar dielectrics. ISBN 48-868-6064-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1496242&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D1496242>
- [57] CHAMPION, J. V., S. J. DODD, Y. ZHAO, A. S. VAUGHAN, M. BROWN, A. E. DAVIES, S. J. SUTTON a S. G. SWINGLER. Morphology and Growth of Electrical Trees in a Propylene/ethylene Copolymer. *Dielectr. Electr. Insul.* 2001, Vol. 8, pp. 284-292.

- [58] DAVID, E., J. PARPAL a J. CRINE. Influence of Internal Mechanical Stress and Strain on Electrical Performance of Polyethylene. Dielectr. Electr. Insul. 1996, Vol. 3, pp. 248-57.
- [59] CHAMPION, J. V. a S. J. DODD. The Effect of Material Composition and Temperature on Electrical Tree Growth Epoxy Resins. Proceedings of Dielectric Materials, Measurement and Applications. 2000., No. 473, pp. 314-319.
- [60] Investigations of electrical trees in the inner layer of XLPE cable insulation using computer-aided image recording monitoring. Dielectrics and Electrical Insulation [online]. 2010, page 685 - 693 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5492239&queryText%3DInvestigations+of+Electrical+Trees+in+the+Inner+Layer+of+XLPE+Cable+Insulation+Using+Computer-aided+Image+Recording+Monitoring>
- [61] 2012 IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials: Electrical degradation due to treeing in nanocomposite dielectric materials with impurities [online]. Piscataway: IEEE, 2012 [cit. 2014-05-05]. ISBN 978-146-7328-524. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6318970&queryText%3DElectrical+Degradation+due+to+Treeing+in+Nanocomposite+Dielectric+Materials+with+Impurities>
- [62] Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, 17-21 September 2000: venue, Heriot Watt University, Edinburgh, UK [online]. London: Institution of Electrical Engineers, c2000, xiv, 522 p. [cit. 2014-05-05]. Conference publication (Institution of Electrical Engineers): The structure of electrical trees in semi-crystalline polymers, no.473. ISBN 08-529-6730-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=888134&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D888134>
- [63] Druhy elektrických vodičů a kabelů. ProProjektanty [online]. 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.proprojektanty.cz/vodice-a-kabely/181-druhy-elektricky-vodicu-a-kabelu>
- [64] KABEL CYKY 4Bx4. In: KABEL [online]. 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/kabel-cyky-4bx4-p680-045>
- [65] ČERMÁK, Michal. Analýza úrovně síťování kabelové izolace. ZČU Plzeň, 2012. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2665/DP_CERMAK_2012.pdf?sequence=1. Diplomová práce. ZČU Plzeň
- [66] ELEKTRICKÉ KABELY. In: ENcables [online]. 2008 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.encables.cz/data/elektricke-kabely-obecne.pdf>
- [67] HADERKA, Martin. Vliv parametrů vulkanizace na mechanické vlastnosti elastomerů. UTB ve Zlíně, 2006. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/2074/haderka_2006_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [68] LEDERER, Jaromír. SILIKONOVÉ POLYMERY. In: SILIKONY [online]. UJEP Ústí nad Labem, 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/SILIKONY_.pdf
- [69] DUCHÁČEK, VRATISLAV. TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY: MODERNÍ POLYMERNÍ MATERIÁLY. Chemické listy [online]. 1996, Chem. Listy 91, 23 -29 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1997_01_23-29.pdf
- [70] MATERIÁLOVÝ LIST: POLYTETRAFLUORETHYLEN (PTFE). In: EPP Plasty [online]. 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz/pdf/PTFE.pdf>
- [71] Vlastnosti papíru a jeho degradace. In: Degradace papíru [online]. 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_vlastnosti_papiru/teorie.htm
- [72] Poškození papíru. In: Poškození materiálu [online]. Univerzita Hradec Králové, 2011 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.uhk.cz/cs-cz/fakulty-a-pracoviste/filozoficka-fakulta/katedry-a-ustavy/katedra-pomocnych-ved-historickyh-a-archivnictvi/eDokumenty/Documents/Konzervace%20a%20restaurov%C3%A1n%C3%AD/po%C5%A1kozen%C3%AD%20archivn%C3%ADho%20materi%C3%A1lu.pdf>
- [73] Polymery. In: Degradace plastů [online]. VOŠ restaurování, 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://vyuka.z-moravec.net/download/koroze-plastu.pdf>
- [74] Odolnost plastů vůči degradaci a stárnutí. In: Degradace plastů [online]. 2010 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEkM/NeM%20Kro/Odolnost%20plastu%20vu

[ci%20starnuti%20a%20degradaci%20recyklace.ppt](#)

[75] LENFELD, Petr. ROZDĚLENÍ TECHNOLOGIÍ NA ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ.

In: Technologie [online]. Technická univerzita Liberec, 2011 [cit. 2014-05-05]. Dostupné

z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/02.htm

[76] KOROZE PLASTŮ. In: Plasty [online]. ČVUT v Praze, 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné

z: http://umi.fs.cvut.cz/files/kkm_koroze_plastu.pdf

[77] PROKOPOVÁ, Irena. Makromolekulární chemie [online]. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007, 207 s. [cit. 2014-05-05]. Degradace polymeru. ISBN 978-807-0806-623. Dostupné

z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-978-80-7080-662-3/pdf/204.pdf

[78] Faktory způsobující korozi a degradaci polymerů. In: Koroze materiálu [online]. 2009 [cit. 2014-05-05]. Dostupné

z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/3_2.pdf

[79] Polymery. In: Polymery [online]. VŠCHT v Praze, 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné

z: <http://www.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>

[80] Měření kabeláže. Svět sítí [online]. 2001 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z:

<http://www.svetsiti.cz/clanek.asp?cid=Mereni-kabelaze-2862001>

[81] Zkoušení kabelů a diagnostika s technologiemi BAUR. In: Zkoušení kabelů [online]. 2013 [cit.

2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.baur.cz/upload-sys/download/448224.pdf>

[82] PNE 34 7626. Provozní zkoušky vn kabelových vedení. PRAHA: REASy ČR a VSE, 1999

[83] KŘIVÁNEK, František. Diagnostika kabelových vedení 22 kV v PREDistribuce, a.s. a vývoj poruchovosti kabelů VN za dobu používání diagnostiky částečných výbojů. Západočeská univerzita v Plzni, 2013. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/10067>. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

[84] ČSN 33 1600 ed. 2. Revize a kontroly elektrických spotřebičů během používání. ČSN, 2010.

[85] Zkoušení kabelů a diagnostika s technologiemi BAUR. BAUR [online]. 2013 [cit. 2014-05-09].

Dostupné z: <http://www.baur.cz/upload-sys/download/448224.pdf>

Přílohy

Příloha A – Zařízení pro dlouhodobé zkoušky střídavým napětím



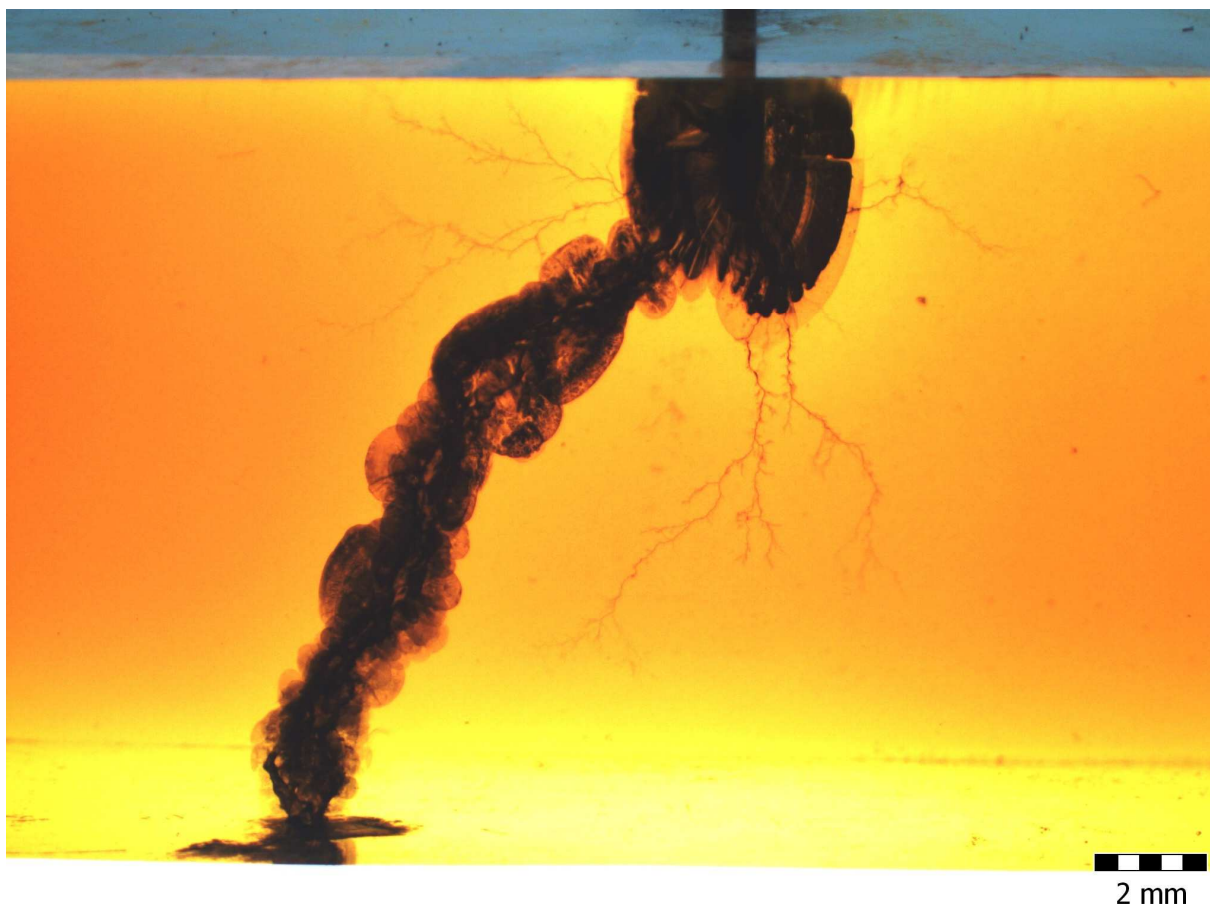
Příloha B - leštička



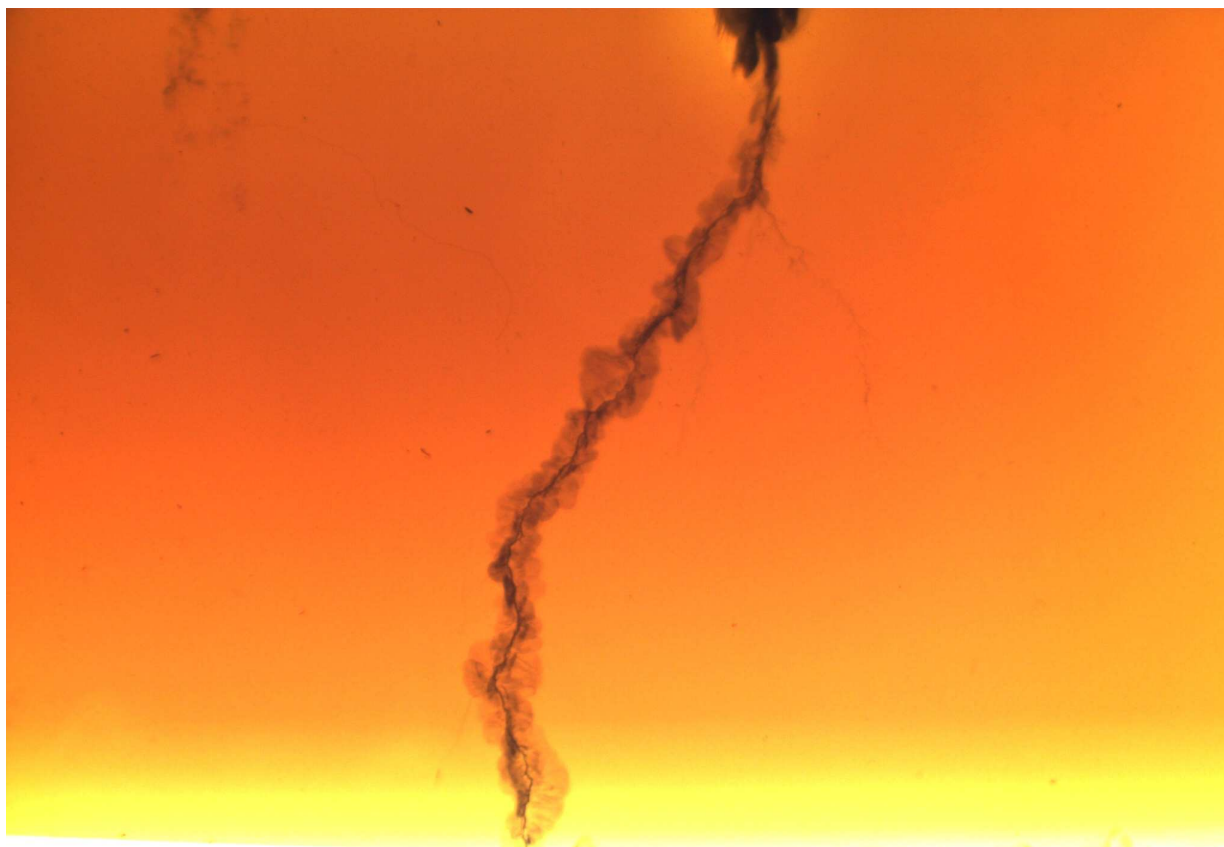
Příloha C – pryskyřice LH 198 stárnutá při 75 kV



Příloha D – pryskyřice LH 198 stárnutá při 30 kV

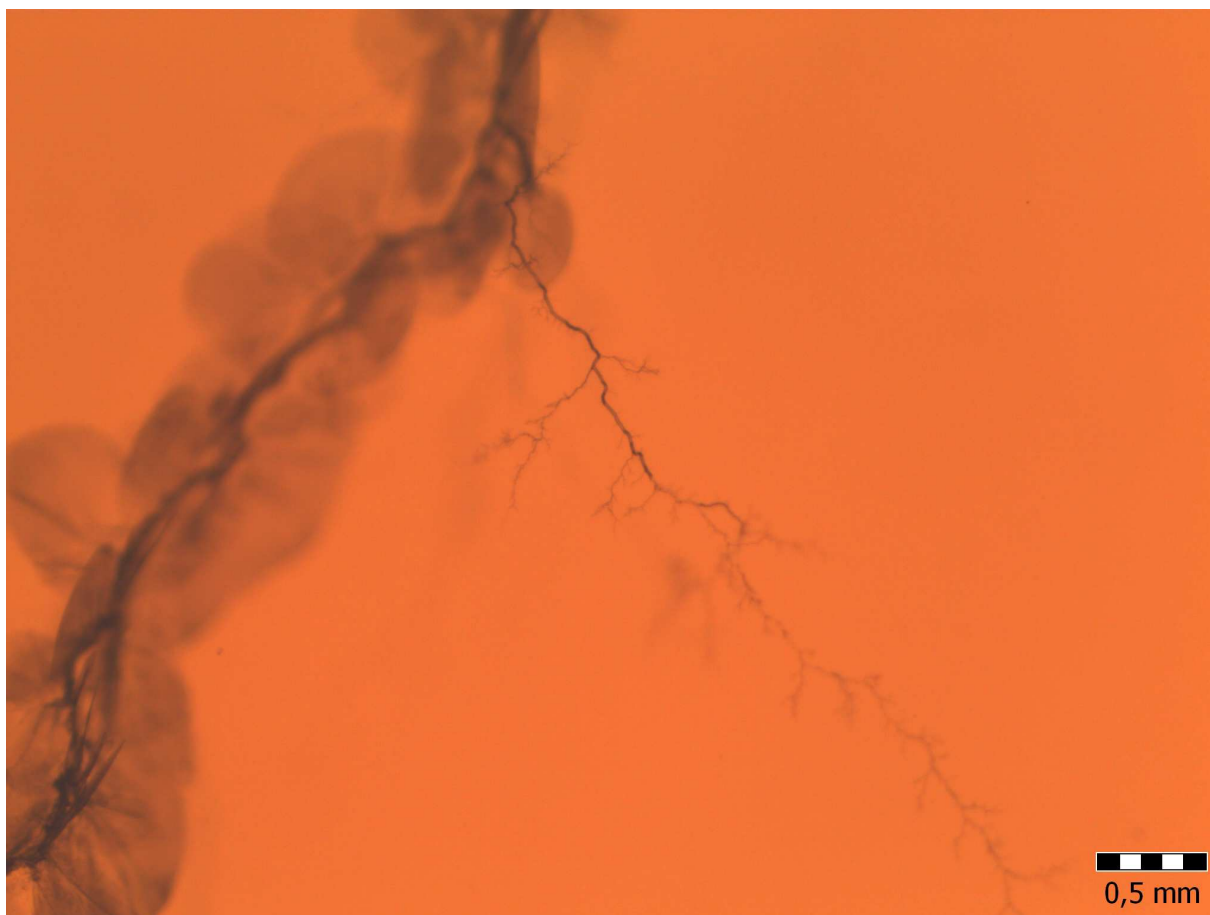


Příloha E – pryskyřice LH 198 stárnutá při 50 kV



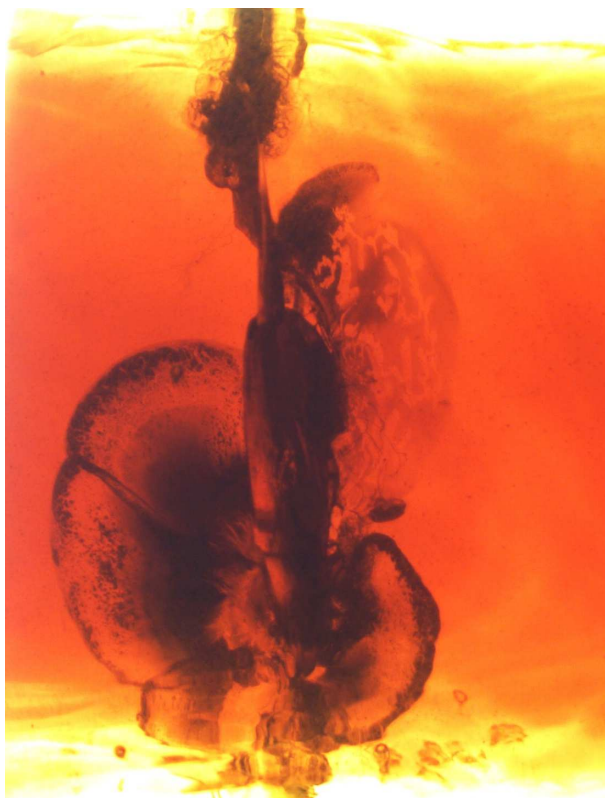
2 mm

Příloha E – pryskyřice LH 198 stárnutá při 50 kV – přiblíženo na větev

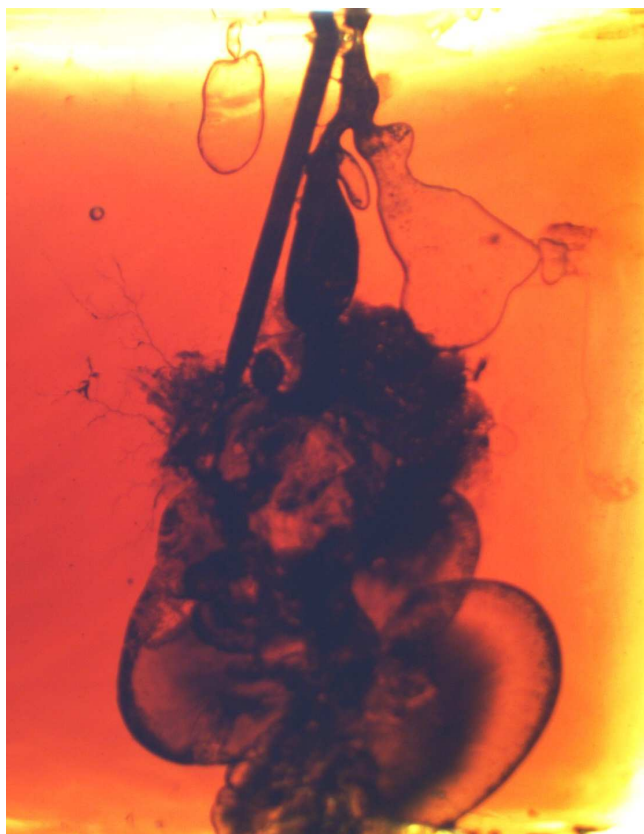


0,5 mm

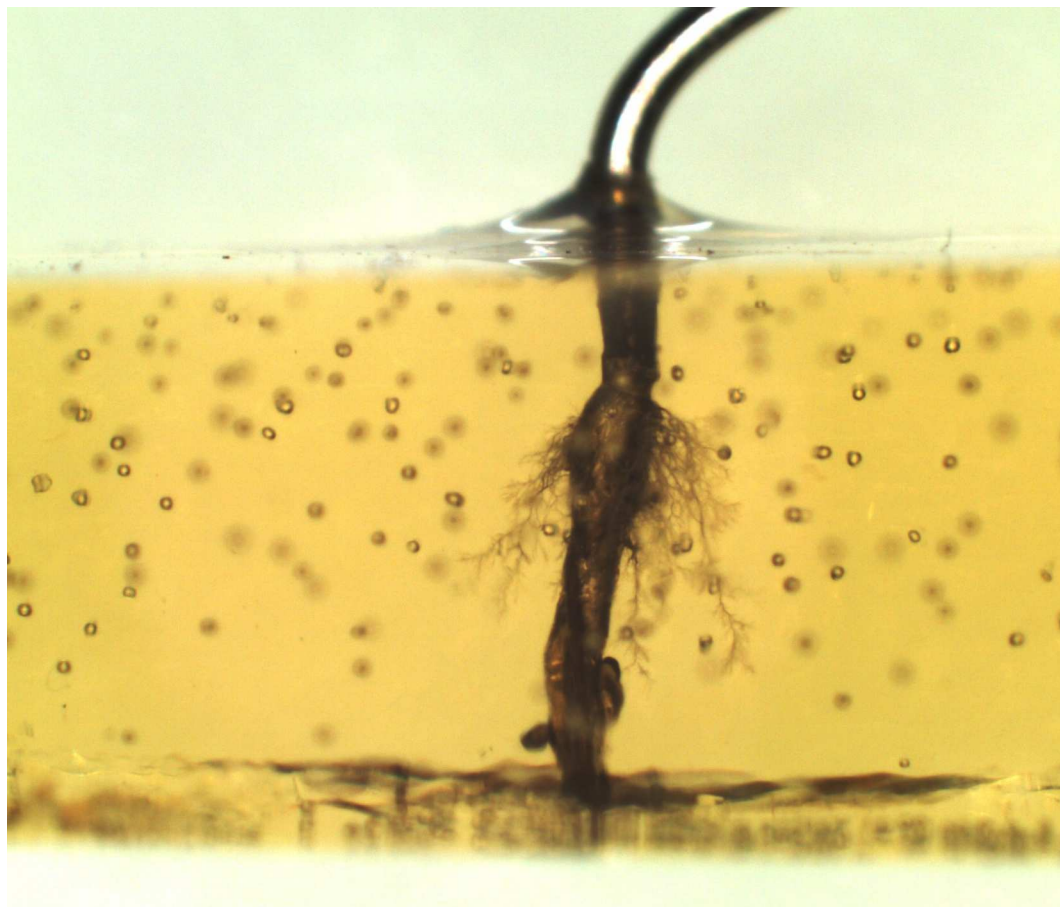
Příloha F – pryskyřice PR 108 stárnutá při 75 kV



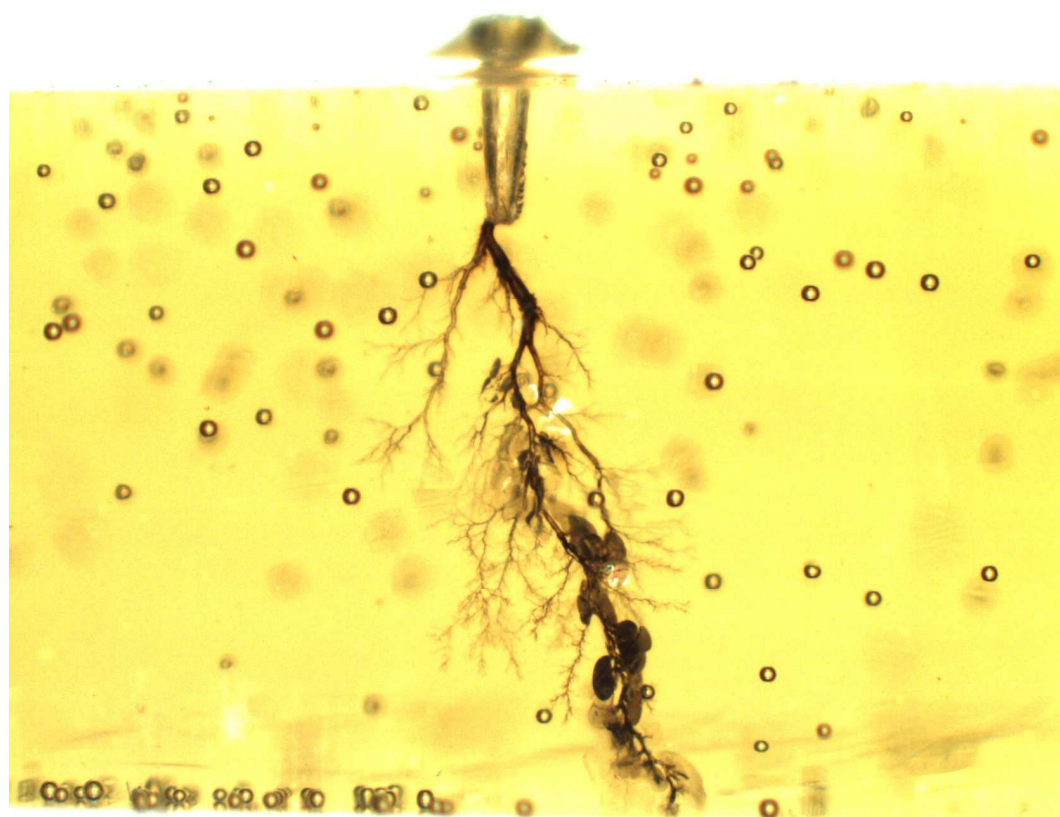
Příloha G – pryskyřice PR 108 stárnutá při 45 kV



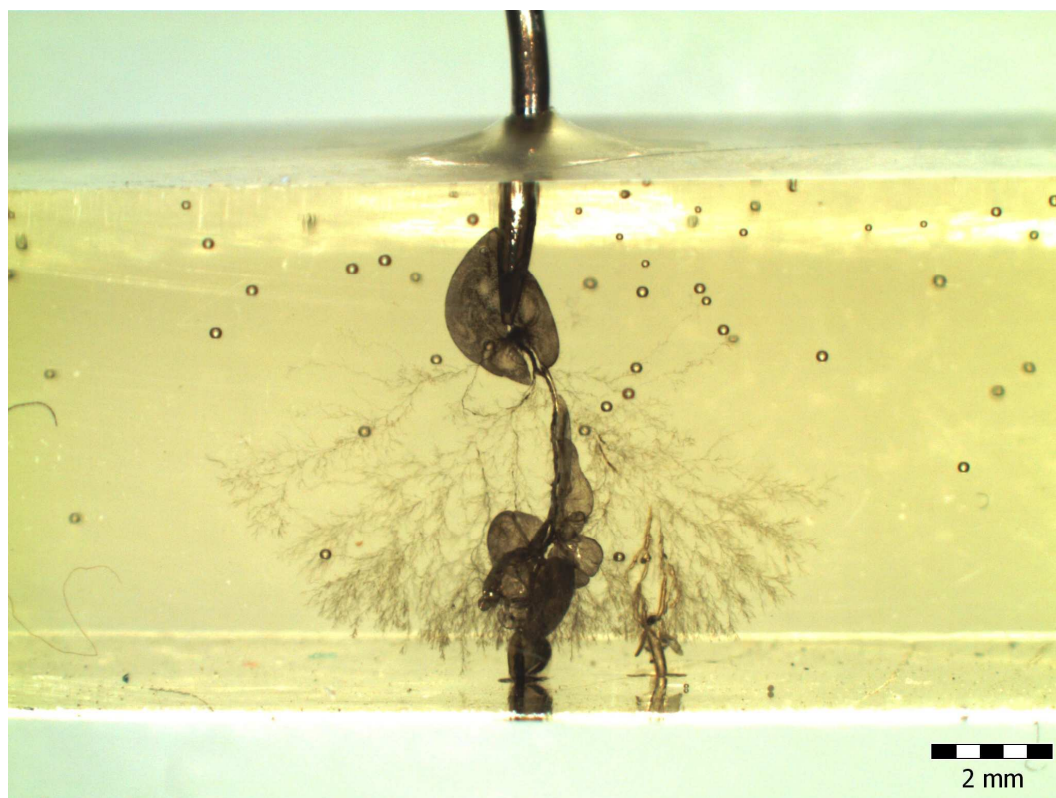
Příloha H – pryskyřice EC 141 stárnutá při 20 kV



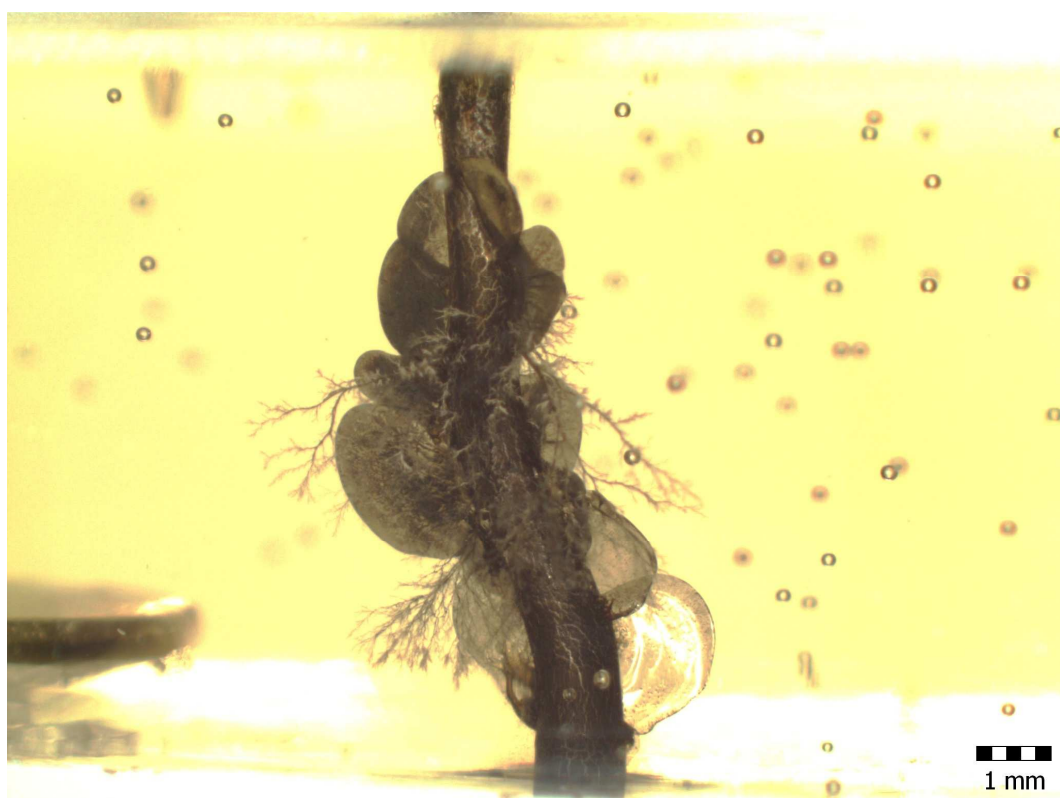
Příloha I – pryskyřice EC 141 stárnutá při 20 kV



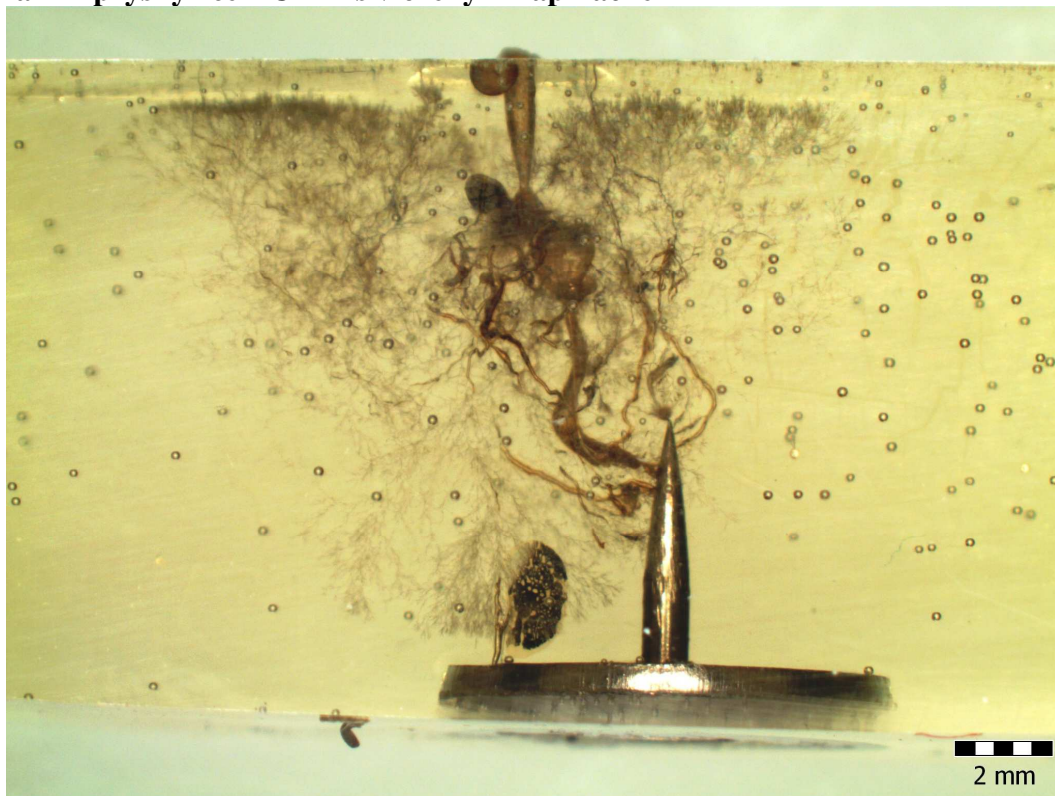
Příloha J – pryskyřice EC 141 stárnutá 36 hodin



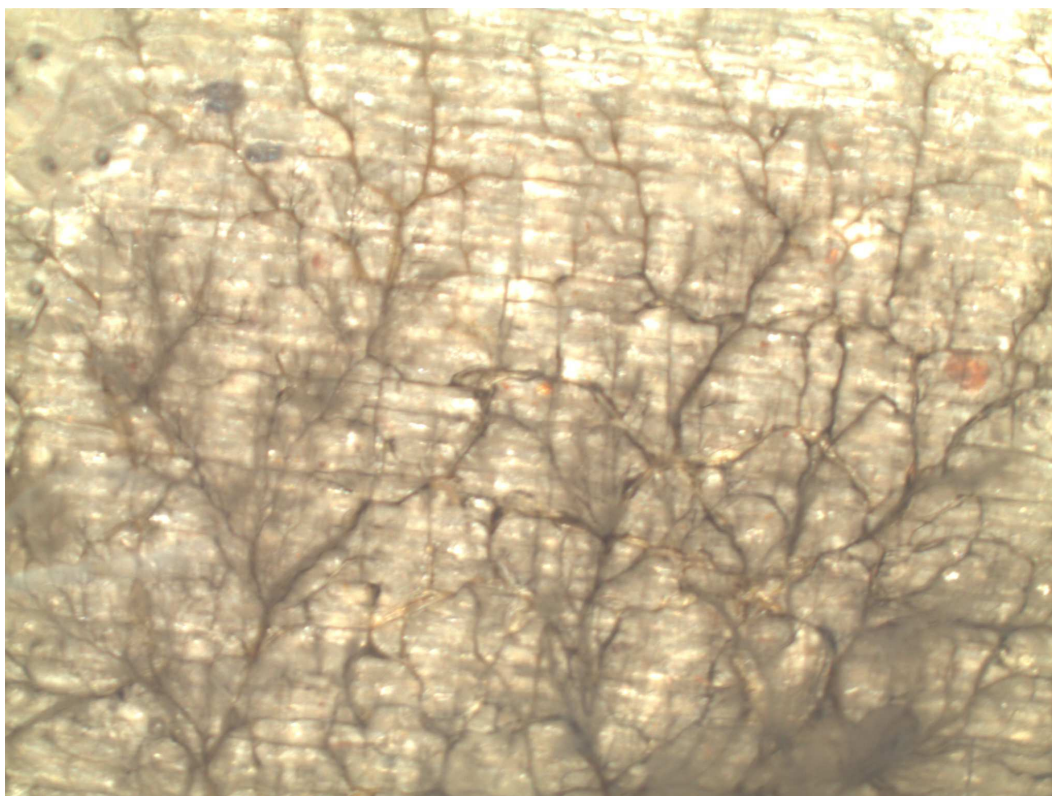
Příloha K – pryskyřice EC 141 stárnutá 21 hodin



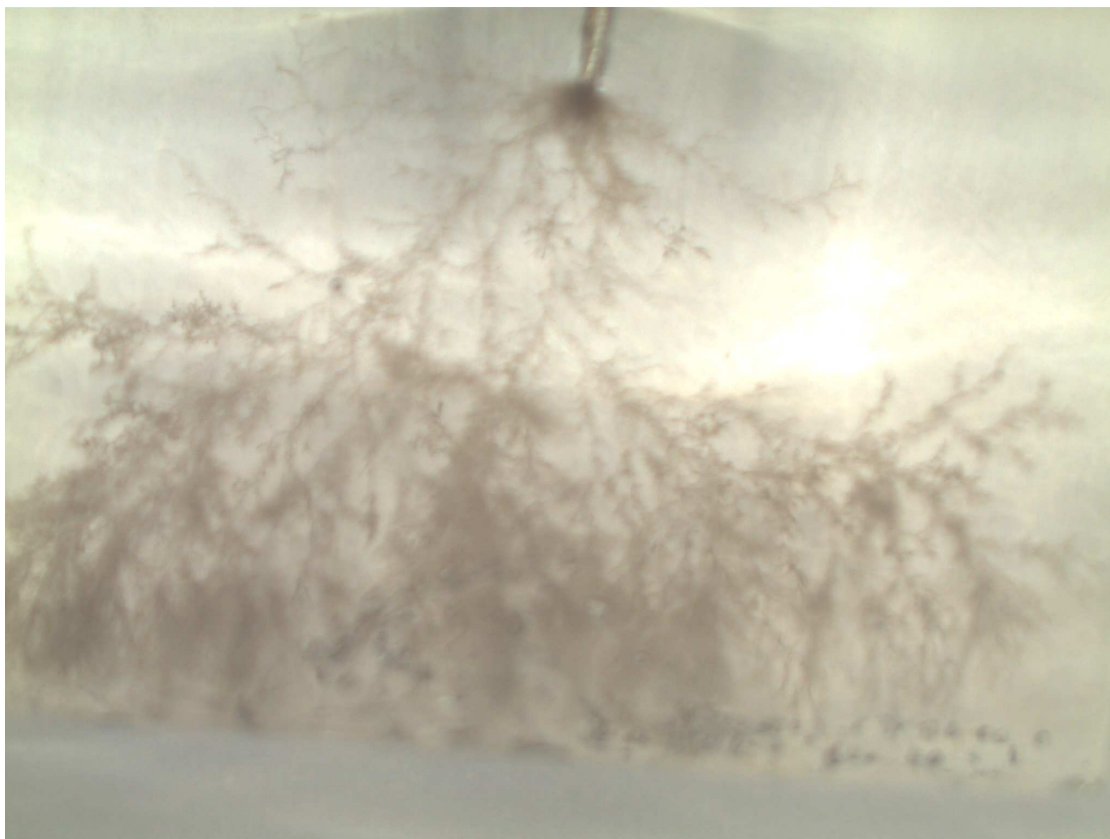
Příloha L – pryskyřice EC 141 s vloženým napínákem



Příloha M – pryskyřice CER s vloženou bariérou



Příloha N – pryskyřice CER



Příloha O – pryskyřice CER s bariérou

