

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Využití aktivační energie pro popis chování
elektroizolačních systémů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Martin STEINBACH**
Osobní číslo: **E12B0057P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Využití aktivační energie pro popis chování elektroizolačních systémů**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

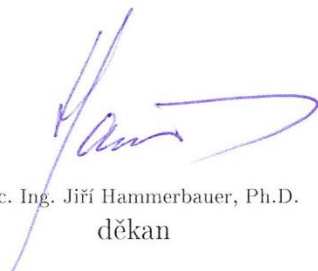
1. Popište elektroizolační systémy točivých a netočivých elektrických strojů.
2. Uveďte degradační mechanismy těchto elektroizolačních systémů.
3. Popište aktivační energii a její využití pro popis stárnutí elektroizolačních systémů.
4. Uveďte, jakým způsobem lze určit aktivační energii.
5. Určete aktivační energii z předložených experimentálních dat.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. Mentlík V., Dielektrické prvky a systémy, BEN, Praha 2006, ISBN: 80-7300-189-6, 240 str.
2. Mentlík V. a kol, Diagnostika elektrických zařízení, BEN, Praha 2008, ISBN: 978-80-7300-232-9, 440 str.
3. Mentlík V. a kol., Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN, Praha 2011, ISBN: 978-80-7300-412-5, 120 str.
4. Internetové zdroje
5. Odborné články zahraničních autorů

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jakub Souček**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na využití aktivační energie z hlediska popisu a chování v elektroizolačních systémech. Je zde popsáno základní rozdělení izolačních materiálů a způsoby výroby elektroizolačních systémů. Dále jsou zde uvedeny degradační mechanismy, které na elektroizolační systémy působí.

Klíčová slova

Aktivační energie, degradace, elektroizolační systém, izolant, namáhání, Resin-Rich, stárnutí, VPI, zbytková životnost

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on using of the activation energy from the viewpoint to the description and behavior in electroinsulation systems. There is described basic distribution insulation materials and manufacturing methods of electroinsulation systems in this bachelor. Further there are presented a degradation mechanisms that act on electroinsulation systems.

Key words

Activation energy, degradation, electroinsulation system, insulant, stress, Resin-Rich, aging, VPI, residual life

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 2.6.2015

Martin Steinbach

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakobovi Součkovi za cenné profesionální rady, předložená experimentální data, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ELEKTROIZOLAČNÍ MATERIÁLY	11
1.1 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	11
1.1.1 <i>Rezistivita</i>	12
1.1.2 <i>Relativní permitivita</i>	12
1.1.3 <i>Ztrátový činitel</i>	13
1.1.4 <i>Elektrická pevnost</i>	13
1.1.5 <i>Tepelná klasifikace</i>	14
1.2 ROZDĚLENÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	15
1.2.1 <i>Pevné izolanty</i>	16
1.2.2 <i>Kapalné izolanty</i>	16
1.2.3 <i>Plynné izolanty</i>	16
2 ELEKTROIZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH STROJŮ	17
2.1 ELEKTRICKÉ STROJE	17
2.1.1 <i>Točivé elektrické stroje</i>	17
2.1.2 <i>Netočivé elektrické stroje</i>	17
2.2 IZOLAČNÍ SYSTÉMY TOČIVÝCH STROJŮ	18
2.2.1 <i>Nízkonapěťové izolační systémy</i>	18
2.2.2 <i>Vysokonapěťové izolační systémy</i>	19
2.3 IZOLAČNÍ SYSTÉMY NETOČIVÝCH STROJŮ	20
2.3.1 <i>Suché izolační systémy</i>	21
2.3.2 <i>Zalévané izolační systémy</i>	21
2.3.3 <i>Spojené izolační systémy</i>	21
3 DEGRADACE ELEKTROIZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ	22
3.1 DEGRADAČNÍ MECHANISMY	22
3.1.1 <i>Tepelné namáhání</i>	22
3.1.2 <i>Elektrické namáhání</i>	23
3.1.3 <i>Mechanické namáhání</i>	23
3.1.4 <i>Působení prostředí</i>	24
3.1.5 <i>Kombinované</i>	25
3.1.6 <i>Zrychlené stárnutí</i>	26
4 URČOVÁNÍ AKTIVAČNÍ ENERGIE ELEKTROIZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ	27
4.1 AKTIVAČNÍ ENERGIE	27
4.2 POPIS ZÍSKÁVÁNÍ AKTIVAČNÍ ENERGIE	28
5 URČENÍ AKTIVAČNÍ ENERGIE Z PŘEDLOŽENÝCH EXPERIMENTÁLNÍCH DAT	31
ZÁVĚR	35
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	37
SEZNAM PŘÍLOH	39

Seznam symbolů a zkratk

E_a	Aktivační energie [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]
k	Reakční rychlost [s^{-1}]
A	Před-exponenciální (frekvenční) faktor [s^{-1}]
T	Absolutní teplota [K]
R	Univerzální plynová konstanta 8,31447215 [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$]
λ	Parametr životnosti
A'	Parametr Arrheniova modelu
ε	Absolutní permitivita [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
ε_0	Permitivita vakua $8,854 \cdot 10^{-12}$ [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
ε_r	Relativní permitivita
S	Plochy elektrod kondenzátoru [m^2]
d	Vzdálenost elektrod [m]
C	Kapacita kondenzátoru [F]
C_0	Kapacita vakuového kondenzátoru [F]
ρ	Rezistivita [$\Omega \cdot \text{m}$]
δ	Ztrátový úhel [°]
$tg\delta'$	Polarizační ztrátový činitel
$tg\delta_s$	Vodivostní ztrátový činitel
$tg\delta$	Celkový ztrátový činitel
E_p	Elektrická pevnost [$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$]
U_p	Průrazné napětí [V]
RTE	Relativní index tepelné odolnosti
RR	Resin-Rich
VPI	Vacuum Pressure Impregnation
τ	Doba života [h]
a, b, k, n	Konstanty
E	Intenzita elektrického pole [$\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$]

Úvod

Pokrok v oblasti elektrotechniky se s postupem času hodně zrychluje. S rychlým vývojem nových součástek, přístrojů, zařízení, motorů atd. je zapotřebí také stálé zlepšování jejich vlastností. Trendem v moderní době je neustálé zmenšování zmíněných elektrotechnických prvků při snaze zachovat jejich vlastnosti, v našem případě zejména elektrické vlastnosti. Následkem je např. zmenšování izolačních vzdáleností, a pro zachování stejných elektrických vlastností tím pádem klade větší požadavky na elektrickou pevnost izolačního materiálu. S tím souvisí vhodná volba kvalitnějších a odolnějších materiálů použitých pro výrobu elektroizolačních systémů, které jsou z hlediska spolehlivosti nejslabším článkem elektrického zařízení.

Tato práce je zaměřena na rozdělení izolačních materiálů do základních skupin, na popis elektroizolačních systémů, které jsou nutnou podmínkou a nedílnou součástí každého točivého i netočivého stroje pro jejich bezproblémový chod, dále se zabývá rozбором degradačních mechanismů v elektrických strojích, kde tyto procesy probíhají, ať už přímo spojené s provozem daného zařízení nebo nepřímo spojené s vnějšími vlivy.

Zejména je pak práce zaměřena na využití aktivační energie, kterou lze popsat chování elektroizolačních systémů a ze které lze odhadnout dobu zbytkové životnosti. Součástí je také experimentální část, ve které je podle teoretického popisu uvedeného v této práci určena velikost aktivační energie z předložených naměřených dat testovaného vzorku.

1 Elektroizolační materiály

Elektroizolační materiály tvoří velmi rozsáhlý soubor, jsou rozděleny do dvou základních skupin. A to na **dielektrika** nebo **izolanty**, přičemž každá skupina má svoje specifické technické vlastnosti a parametry podle kterých jsou rozdělovány [2,3,4].

Dielektrika – jsou látky, v nichž může existovat vlastní elektrické pole a jejich hlavní technickou vlastností je schopnost polarizovat se v elektrickém poli. Jako hlavní parametr uvažujeme relativní permitivitu [2].

Izolanty – jsou látky, které obsahují jen zanedbatelně malé množství volných nosičů náboje a jejich hlavní technická vlastnost je schopnost klást velký odpor průchodu elektrického proudu. Jako hlavní parametr uvažujeme rezistivitu [2].

Pojem dielektrikum má tedy obecnější význam v tom smyslu, že každý izolant je dielektrikem, nikoli však obráceně. U dielektrik využíváme především schopnost jejich polarizace a v elektrických zařízeních vystupují jako **aktivní** prvky. Izolanty se používají k vzájemnému odizolování, zamezení průchodu elektrického proudu, dvou elektricky aktivních prvků s různým potenciálem a v porovnání s dielektriky se jeví jako prvky **pasivní**.

V následujících kapitolách se pohlíží na elektroizolační materiály z pohledu izolačních, na jejich základní rozdělení a jejich elektrické vlastnosti, které jsou pro ně z hlediska použitelnosti v elektrotechnice klíčové [2,3,4].

1.1 Elektrické vlastnosti izolačních materiálů

Dobrym izolantem se rozumí takový materiál, který musí vykazovat určité požadované vlastnosti, a to zejména vlastnosti elektrické. Mezi elektrické vlastnosti patří **elektrická pevnost**, ta by měla být u izolačních materiálů co nejvyšší, dále **rezistivita**, která je u dobrých izolačních materiálů větší než 10^{12} [Ωm], **relativní permitivita** v řádu jednotek a co nejmenší **ztrátový činitel**. Všechny tyto vlastnosti jsou závislé na provozních podmínkách izolačního materiálu [2].

Po izolačních materiálech nepožadujeme pouze nutné elektrické vlastnosti, ale také musí mít i další dobré potřebné vlastnosti, jako jsou **mechanické**, **tepelné** a **fyzikálně-chemické**, těmito vlastnostmi se dále ale tato práce zabývat nebude.

1.1.1 Rezistivita

V technické praxi se u izolantů zjišťuje elektrický odpor častěji než (u vodičů naopak) vodivost. Rezistivita, nebo též měrný (přepočítaný na jednotku plochy/objemu) elektrický odpor je účelný zejména z hlediska možnosti vzájemného porovnávání materiálů. Rozlišujeme dva druhy rezistivity, kterými jsou **vnitřní** a **povrchová** rezistivita. Značí se řeckým písmenem ρ a její jednotky jsou $[\Omega \cdot \text{m}]$ [3].

Vnitřní rezistivita $[\Omega \cdot \text{m}]$ – je vnitřní odpor přepočítaný na jednotku objemu, který vyjadřuje poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a hustoty ustáleného proudu uvnitř izolantu [2].

Povrchová rezistivita $[\Omega]$ – je povrchový odpor přepočítaný na jednotku plochy, který vyjadřuje poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a proudové hustoty v povrchové vrstvě izolantu [2].

1.1.2 Relativní permitivita

Relativní permitivita (dříve označována jako dielektrická konstanta) patří mezi hlavní parametry a její praktický význam je jako veličina charakterizující chování izolantů v elektrickém poli (schopnosti polarizace). Na rozdíl od polarizovatelnosti je předností ϵ_r její měřitelnost. Zkráceně lze tedy napsat, že ϵ_r charakterizuje vlastnosti izolantu a je měřítkem jeho polarizace. Relativní permitivitu lze získat ze vztahu pro kapacitu a její odvození ukazuje rovnice (1).

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d} = \epsilon_r \cdot C_0 \Rightarrow \epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

kde:	ϵ ...	Absolutní permitivita $[\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$
	ϵ_0 ...	Permitivita vakua $8,854 \cdot 10^{-12} [\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$
	ϵ_r ...	Relativní permitivita
	S ...	Plochy elektrod kondenzátoru $[\text{m}^2]$
	d ...	Vzdálenost elektrod $[\text{m}]$
	C ...	Kapacita kondenzátoru $[\text{F}]$
	C_0 ...	Kapacita vakuového kondenzátoru $[\text{F}]$

Relativní permitivitu lze tedy definovat jako poměr kapacity kondenzátoru, jehož dielektrikem je uvažovaný izolant a kapacity kondenzátoru (totožné uspořádání a rozměry), jehož dielektrikem je vakuum. Jedná se o bezrozměrnou veličinu [3,4].

1.1.3 Ztrátový činitel

Veličina δ se nazývá ztrátový úhel, tangentou tohoto úhlu je pak ztrátový činitel $tg\delta$. Ztrátový činitel v praxi vyjadřuje míru ztracené energie přeměněnou v izolantu na teplo a může nám poskytnout rychlou informaci o kvalitě daného izolantu. V ideálním izolantu se ztrátový činitel blíží k nule, v reálném izolantu však nikoli a jeho celková velikost je dána součtem polarizačních a vodivostních ztrát, viz rovnice (2) [4].

$$tg\delta = tg\delta' + tg\delta_s \quad (2)$$

kde: $tg\delta$... Celkový ztrátový činitel
 $tg\delta'$... Polarizační ztrátový činitel
 $tg\delta_s$... Vodivostní ztrátový činitel

Jde o bezrozměrnou veličinu a jeho číselné vyjádření je buď desetinným číslem (např. 0,002), násobkem mocniny deseti se záporným exponentem (např. $2 \cdot 10^{-3}$) nebo v procentech (např. 0,2%). Kvalitativně je materiál považován za dobrý, pokud je jeho $tg\delta$ menší než 10^{-3} , z elektroizolačního hlediska považujeme materiál za špatný s $tg\delta$ větším než 10^{-2} . Nejvíce výpovědi schopné je měření $tg\delta$ v závislosti na napětí, frekvenci či teplotě [3].

1.1.4 Elektrická pevnost

Základním úkolem elektroizolačního materiálu je vzájemné elektrické oddělení míst s různým elektrickým potenciálem, kde elektrická pevnost je zcela jednoznačně charakterizující veličinou pro daný elektroizolační materiál. Elektrická pevnost je prakticky využívána pro dimenzování elektrických zařízení [1].

Přiložíme-li na izolant napětí vyšší, než je určitá kritická hodnota napětí pro daný izolant, dochází k jevům, při kterých lavinově roste počet volných nosičů elektrického náboje i jejich pohyblivost a izolant přestává plnit svou funkci. V závislosti na skupenství izolantu se jedná o **průraz** u pevných izolantů, u izolantů plynného či kapalného skupenství o **přeskok**. Průraz izolantu vždy představuje nekontrolovatelné zvýšení elektrické vodivosti, ta je buď **trvalého**

charakteru u pevných izolantů, nebo **dočasného** charakteru, při kterém dochází k regeneraci u plyných a kapalných izolantů.

Průrazné napětí, je taková hodnota napětí, při které dojde k **průrazu** či **přeskoku** v izolantu, intenzita elektrického pole příslušející tomuto napětí se označuje jako elektrická pevnost. Elektrickou pevnost E_p je vhodnější definovat z důvodu praktičtějšího hodnocení izolantů, je dána poměrem průrazného napětí U_p k tloušťce d izolantu v místě průrazu [2,3].

$$E_p = \frac{U_p}{d} [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3)$$

Pozn.: V praxi se hodnoty elektrické pevnosti blíží k vysokým hodnotám, proto se používají jednotky $[\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}]$.

1.1.5 Teplotní klasifikace

Provoz elektrického zařízení doprovází nežádoucí oteplení celého stroje, tudíž i jeho izolačního systému. Izolační systém je jednou z nejdůležitějších částí elektrického stroje, bez něhož by nebylo provozu-schopné. Je nutné zajistit, aby izolanty použité pro tento účel vyhověly všem náročným požadavkům z hlediska vlastností a byly tedy odolné i vůči působení zvýšené teploty, která je nejvýznamnějším degradačním činitelem způsobující stárnutí izolantů. Tepelné vlastnosti izolantů se vyjadřují materiálovými konstantami [2].

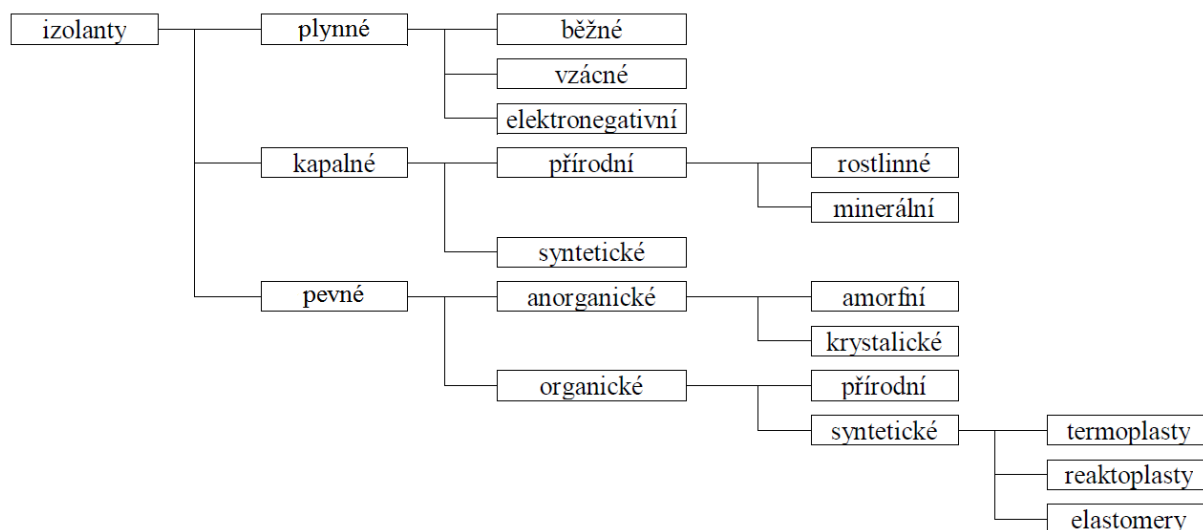
Každý izolant spadá do určité tepelné oblasti použití, ta je závislá především na jeho struktuře. K aplikaci vhodného izolantu je nutná znalost nejen teplotních konstant, ale také jeho trvalá tepelná odolnost. Z tohoto důvodu jsou izolanty rozděleny do teplotních tříd, ty vyjadřují maximální přípustnou provozní teplotu materiálu. Definuje se také relativní index tepelné odolnosti (RTE), ten udává číselnou hodnotu teploty ve stupních Celsia, při níž má materiál po předpokládanou dobu svého života uspokojivé vlastnosti v porovnání se známým standardním materiálem. Teplotní třídy s příslušnými hodnotami teploty a teplotními indexy RTE uvádí *Tab. 1* [1].

Tab. 1: Teplotní třídy izolantů s indexem RTE[10]

Relativní index teplotní odolnosti RTE [°C]	Tepelná třída [°C]	Předchozí označení
< 90	70	70
> 90 - 105	90	Y
> 105 – 120	105	A
> 120 – 130	120	E
> 130 – 155	130	B
> 155 – 180	155	F
> 180 – 200	180	H
> 200 – 220	200	N
> 220 – 250	220	R
> 250	250	250

1.2 Rozdělení izolačních materiálů

Jak již bylo uvedeno výše, materiály pro elektroizolační systémy elektrických zařízení tvoří velmi rozsáhlou skupinu. Určité skupiny izolantů v sobě sdružují řadu společných vlastností, a proto je užitečné rozdělení do skupin podle určitých kritérií. Vlastnosti izolantů jsou především odrazem jejich chemického složení a struktury, a proto se jako nejlogičtější zdá rozdělení právě podle těchto kritérií. Základní rozdělení vyplývá ze samotného skupenství látek, další pak z jejich původu a vzniku, na *Obr. 1* je znázorněno přehledné schéma rozdělení všech izolantů [2,4].

**Obr. 1:** Rozdělení izolantů [2]

Z prvního bloku schématu lze vidět tři základní rozdělení izolanů. Rozdělení na **pevné**, **kapalné** a **plynné** izolanty, které vychází ze skupenství látek. Tyto tři základní rozdělení jsou zjednodušeně popsány v dalším textu této práce.

1.2.1 Pevné izolanty

Pevné izolanty zahrnují velké množství látek, nejvíce ze všech izolanů. Proto je vhodné rozdělení a podotknutí ještě podle druhého bloku viz *Obr. 1*, na **anorganické** a **organické** izolanty. V pevných izolantech nastane buď čistě elektrický průraz, nebo tepelný průraz, oba mají destruktivní účinek a izolan je trvale znehodnocen, což vede k jeho nutné výměně. Ze všech tří skupin mají ale nejvyšší elektrickou pevnost a rezistivitu.

Anorganické pevné izolanty – můžeme z hlediska struktury rozdělit do dvou základních skupin, a to na látky bez pravidelného strukturálního uspořádání, tzv. amorfni (např. sklo) a látky vykazující pravidelné uspořádání, tzv. krystalické složené z velkého množství krystalů (např. azbest, slída, keramika) [2].

Organické pevné izolanty – jsou izolanty, které vznikly z přírodních makromolekulárních látek a mohou být buď původu živočišného (šelak, hedvábi) nebo rostlinného (kalafuna, kopál, jantar atd.), ale mohou být vyrobeny zpracováním přírodních surovin (celulóza, papír, pryž) [2].

1.2.2 Kapalné izolanty

Kapalné izolanty se používají jako izolační kapaliny a vzhledem k dobré tepelné vodivosti a viskozitě také jako chladicí média, proto mají v elektrotechnice širokou oblast použití. Dobře vyplňují daný prostor, ze kterého odvádí přebytečné teplo, usnadňují zhasení výboje a elektricky odlehčují zatížení pevných izolanů [2,4].

1.2.3 Plynné izolanty

Plynné izolanty jsou látky, které mají v porovnání s ostatními izolanty nejnižší elektrickou pevnost ze všech izolanů. Na druhou stranu ale také disponují celou řadou výhodných vlastností, např. nezávislé dielektrické ztráty na frekvenci a extrémně nízké hodnoty konduktivity pokud nejsou ionizované. Výhodou je také to, že rovnoměrně vyplňují celý objem a po průrazu jsou schopné rychlé regenerace (obnovení izolačních vlastností) [2,4].

2 Elektroizolační systémy elektrických strojů

Elektroizolační systém je soustava jednoho či více různých elektroizolačních materiálů (složek) a jejich kombinací, ke kterým je přidána vodivá část použitá v elektrickém zařízení a jsou součástí každého točivého i netočivého elektrického stroje.

2.1 Elektrické stroje

Elektrický stroj je nutno brát jako celek několika podsystémů s určitou spolehlivostní schopností, kde výpadek jednoho z podsystémů znamená ukončení provozuschopnosti celého stroje. Nejcitlivější a zároveň nejkritičtější částí elektrického stroje je jeho izolační subsystém, který je základní a zároveň klíčovou součástí pro chod všech elektrických točivých i netočivých strojů, proto jsou materiály používané v izolačních podsystémech důkladně kontrolovány z hlediska degradace a degradačních vlivů. Požadavky, které klademe na izolační systémy, jsou náročné a jsou nezbytné pro jejich následné použití. Provádí se celá řada měření a diagnostických zkoušek, které slouží jako výchozí informace jednotlivých izolačních materiálů, ta slouží pro rozdělení do daných tříd dle jejich vlastností [7].

2.1.1 Točivé elektrické stroje

Zařízení sloužící pro přeměnu elektromechanické energie a je založeno na principu elektromagnetické indukce. Skládají se ze dvou hlavních částí, statoru a rotoru. **Stator** tvoří nepohyblivou část elektrického stroje a **rotor** tvoří část pohyblivou, která se otáčí společně s vytvořeným točivým magnetickým polem [12].

Mohou nastat dva případy chodu elektrického stroje. Pokud je elektrická energie přeměňována na mechanickou, pak hovoříme o motorickém chodu a stroj je označován jako **motor**, v druhém případě, kdy je mechanická energie přiváděna na hřídel elektrického stroje, je tento stroj v generátorickém režimu a je označován jako **generátor** [12].

2.1.2 Netočivé elektrické stroje

Netočivé elektrické stroje neobsahují žádnou rotační část a mezi nejznámější netočivé elektrický stroj patří **transformátor**, dále do této skupiny strojů lze zařadit **lineární elektromotor**, který nevykonává pohyb rotační, ale posuvný. Patří sem také **reproduktory**, ty mají funkci elektro-akustického měniče, který přeměňuje elektrickou energii

na mechanickou energii ve formě zvuku [12].

2.2 Izolační systémy točivých strojů

Izolační systémy točivých strojů lze rozdělit do dvou základních skupin na **nízkonapět'ové** a **vysokonapět'ové**. Dělení se určuje podle pracovního napětí, na jaké zařízení pracuje. Na základě tohoto kritéria se odlišuje volba a následná aplikace použitého izolačního systému [1].

2.2.1 Nízkonapět'ové izolační systémy

Nízkonapět'ové izolační systémy jsou takové systémy, které se používají pro zařízení, u nichž je jejich hodnota střídavého jmenovitého sdruženého napětí menší než 1000V (mezi fázemi). Skládají se ze tří stupňů: **izolace vodičů**, **vyložení drážek** (ochrana izolace vodičů) a **impregnace**.

Izolace vodičů – je závislá především na velikosti pracovního napětí, důležitým aspektem je také její účel a umístění ve stroji. Pro vytvoření lze použít několik způsobů, lakování nebo smaltování, opředení a ovinutí bavlnou, skleněnými vlákny a dalšími materiály či kombinací pevné a nanášené izolace. Provedení izolace vodičů se při označování značí kódem, který je tvořen písemnými symboly. Význam jednotlivých písmen ve značení izolace vodičů je následující:

1. *písmeno udává charakter vodiče (L – lakovaný, O – pro ovinutí)*
2. *písmeno značí materiál vodiče (L – měď, A – hliník)*
3. *písmeno označuje materiál izolace (B – bavlněná příze, E – PET folie, K – skleněná příze, L – elektroizolační lak, P – neimpregnovaný papír, atd.)*
4. *písmeno pro speciální označení (N – několikanásobné ovinutí, A – zvláštní provedení)*

Pozn.: U pravoúhlých vodičů následuje za tímto písemným označením ještě označení číselné, které udává informaci charakterizující jejich rozměr a přírůstek, který je způsoben izolací.

Vyložení drážky – je ochrana před poškozením, chrání vlastní izolaci uloženého vodiče vinutí před poškozením o stěnu drážky. Jako materiál pro provedení drážkového vyložení se používá drážková lepenka, kombinace drážkové izolace nebo Nomex[®] [1].

Impregnace – se provádí za účelem zlepšení vlastností izolačních materiálů (např. elektrické a mechanické). Funkcí impregnace je také ochrana impregnovaných látek před škodlivým působením různých nežádoucích vlivů a zajištění odvodu tepla do okolí. Princip impregnace je založený v nasycování materiálů vhodnými látkami, jde o vyplňování volného prostoru pórů molekulami impregnující látky, kterou je materiál nasycován. Impregnační proces se u nízkonapěťových izolačních systémů obvykle provádí namáčením, zakapáváním nebo zaplavováním, výběr jednotlivé technologie procesu se volí dle použitého impregnačního laku a lze ho obecně popsat v několika krocích. Proces začíná předsušením, které je nutné pro odstranění vody z impregnovaného materiálu, která se v něm v určitém množství vyskytuje. Ve druhém kroku následuje vlastní impregnační proces, ve kterém je použit vhodný impregnační lak a vhodná technologie procesu, při kterém je materiál nasycován impregnačním lakem. Poté musí dojít k odkapání přebytečného množství laku, pokud laky obsahují ředidla a rozpouštědla, jsou tyto látky odstraněny. Celý proces impregnace je ukončen vytvrzením impregnantu [1].

2.2.2 Vysokonapěťové izolační systémy

V současnosti jsou pro výrobu vysokonapěťových izolačních systémů točivých strojů používány dvě značně rozdílné technologie. Jednou z technologií je technologie **Resin-Rich** (RR), z českého překladu vyplývá, že se jedná o technologii, kdy použitý materiál již obsahuje pryskyřici. Druhou technologií je technologie **Vacuum Pressure Impregnation** (VPI), což v překladu znamená vakuově tlaková impregnace.

Tyto dvě technologie mají svoje specifika, výhody a omezení v provedení a před použitím je nutné promyslet všechna kritéria. Hlavním rozdílem mezi technologií RR a VPI je v tom, že potřebujeme složitě a tedy drahé zařízení pro VPI. Zatím co pro technologii Resin-Rich postačují pouze přípravky pro přesné vytvrzování. Pokud jde hlavně o velké stroje (turboalternátory), je VPI náročnější. Výhodou je však značná úspora materiálu cca až o 6% a celková homogennost systému. Pokud je vinutí technologií VPI proimpregnováno v celku, prakticky neexistuje možnost opravy. Řešením je impregnovat jednotlivé části zvlášť. U Resin-Rich není problém vadnou cívku vyměnit. Která technologie je lepší nelze tedy jednoznačně říci [1].

Resin-Rich – má jako základ třísložkový kompozit s výchozím izolačním předimpregnovaným materiálem, ten je dodáván ve formě polotovaru, obvykle s procentuálním podílem pojiva 30 až 40 procent. Zpracováním polotovaru se na připraveném základu (vodivé části) vytvoří izolační kompaktní trubka s požadovanou tloušťkou stěny. Takto připravené části vinutí jsou vkládány přímo do drážek stroje, kde je prakticky po pospojování a dohotovení čel bez dalších úprav vinutí schopné plnit svou funkci. Izolace zcela vyhovuje kladeným požadavkům díky velmi dobré elektrické pevnosti i ostatním požadovaným vlastnostem [1].

VPI – je způsob technologie výroby hlavní izolace, který nese název podle rozhodující výrobní operace (vakuově tlakové impregnace). Jde o systém, ve kterém tvoří základní materiál savá slídová páska, ta se prosytí impregnantem při impregnačním procesu. V případech, kdy je potřebný dokonalý impregnační systém zpevňující vinutí při výborných izolačních i teplotních vlastnostech, např. v případě trakčních motorů má tato technologie největší význam. Tato technologie je navíc při použití bez rozpouštědlových pryskyřic velmi šetrná k životnímu prostředí [1].

2.3 Izolační systémy netočivých strojů

Nejznámějším netočivým strojem je **transformátor**, proto bude v této části popsán právě jeho izolační systém a jejich druhy.

Transformátor umožňuje přenášet elektrickou energii z jednoho obvodu do druhého prostřednictvím vzájemné elektromagnetické indukce, používá se pro transformaci (přeměnu) střídavého napětí (z nižšího na vyšší nebo naopak) při stálé frekvenci a výkonu nebo pro galvanické oddělení elektrických obvodů. Je složen ze tří hlavních částí: **vinutí**, **magnetický obvod** a **izolační systém** [12]. Za nejdůležitější část lze považovat izolační systém transformátoru, ten nám prakticky zajišťuje bezporuchový chod a životnost celého stroje. Dělení izolačního systému transformátoru se dělí do tří základních druhů:

- *Suché izolační systémy*
- *Zalévané izolační systémy*
- *Spojené izolační systémy*

2.3.1 Suché izolační systémy

Suchý izolační systém transformátoru, je takový druh systému, ve kterém není použit žádný tekutý impregnant. Použitými izolačními materiály jsou v těchto strojích izolanty na bázi lepenky, papíru, Nomexu[®] a kombinované materiály (např. Kapton se skleněnou tkaninou).

2.3.2 Zalévané izolační systémy

Zalévaný izolační systém transformátoru, je takový druh systému, ve kterém jsou cívky zalité v pryskyřici, tento systém má oproti systému spojeného z tuhých a kapalných izolantů (používaného v olejovém transformátoru) několik výhod, je odolný vůči teplotním a mechanickým rázům, vlhkosti a chemikáliím. Přidáním vhodných aditiv, což jsou látky přidávané do jiných látek, v našem případě pryskyřice, s cílem upravit (vylepšit) jejich vlastnost, může mít samozhášivý charakter. Příkladem může být zalévací pryskyřice na bázi alifatických glycidyleterů s tvrdidlem [1]. Tento systém nepřispívá k šíření požáru, jelikož neobsahuje žádnou olejovou náplň a je používán tam, kde je zapotřebí větší požární bezpečnosti, například na vysokých budovách, v podzemí či továrních halách. Dobré vlastnosti jsou na úkor vyšší ceny a hlučnosti.

2.3.3 Spojené izolační systémy

Spojení tuhých a kapalných izolantů je izolační systém transformátoru, ve kterém je buď samostatně použito izolační médium ve formě kapaliny, nejčastěji se používají oleje, které jsou vyrobené z ropy a patří do skupiny minerálních olejů nebo syntetické izolační kapaliny (obě kapaliny slouží zároveň jako chladící médium), nebo společně v kombinaci s papírem používané u transformátorů vysokých výkonů. Při poruše existuje možnost opravy poškozeného vinutí. V okamžiku, kdy jsou diagnostikou zjištěny zhoršené vlastnosti papírové izolace, musí být vyrobeno nové vinutí, při zjištění zhoršených vlastností u oleje se může nechat olej regenerovat, nebo okamžitě vyměnit za nový. Výhodou tohoto systému je nižší cena při zachování stejných parametrů, nevýhodou je pak samotný olej, který je vysoce hořlavý a má velice pomalý biologický rozklad.

3 Degradace elektroizolačních systémů

Součástí každého elektrického zařízení jsou elektroizolační systémy, které vlivem provozních podmínek ve kterých pracují, podléhají degradačním mechanismům. Tyto degradační mechanismy jsou nežádoucí jevy a mají značný vliv na životnost elektroizolačních systémů. Existuje obor, zabývající se těmito nežádoucími jevy působícími na materiály a zařízení, volbou optimálních materiálů, ochranou materiálů a konstrukčním řešením. Tento obor se nazývá klimatotechnologie, jejímž úkolem je zabezpečení provozní spolehlivosti a prodloužení technické životnosti strojů a zařízení, ve kterých jsou elektroizolační systémy použity [2, 16].

3.1 Degradační mechanismy

V praxi, kde jsou elektroizolační systémy použity, na ně nikdy nepůsobí jednotlivé degradační mechanismy jednotlivě, vždy jich působí hned několik najednou a spolu pak ovlivňují vlastnosti a dobu životnosti elektroizolačního systému použitého ve stroji. Toto společné působení má za následek, že po určité době dochází k poruchám provozuschopnosti elektrického stroje. Mezi degradační mechanismy patřící do skupiny ovlivňujících elektroizolační systémy patří [8]:

- *Tepelné namáhání*
- *Elektrické namáhání*
- *Mechanické namáhání*
- *Působení prostředí*

Pozn.: Uvedené degradační mechanismy jsou řazeny podle stupně jejich degradačního účinku na elektroizolační systémy, některé degradační mechanismy mají totiž na izolační systémy větší vliv, některé zase menší.

3.1.1 Tepelné namáhání

Životnost elektroizolačního systému a tím pádem i celého elektrického stroje, jelikož je to jeden z nejslabších článků sériového spolehlivostního řetězce celého zařízení, závisí výrazně právě na teplotě. Teplo vznikající ve strojích vlivem přeměny ztrát a teplota okolního prostředí, ve kterém stroj pracuje, spolu působí na izolační systém [11].

Jedná se o nejvýznamnější degradační faktor, během kterého dochází k nevratným fyzikálně-chemickým změnám ve strukturách použitých izolačních materiálů. Fyzikální a chemické změny jsou důsledkem různých chemických degradačních reakcí vyvolaných teplotou, kde **chemické** změny jsou např. oxidace, polykondenzace a polymerace, depolymerace a rozklad některých složek materiálů. Mezi **fyzikální** změny lze zařadit např. změnu hmotnosti, pevnosti nebo pružnosti.

Všechny tyto reakce probíhají při všech teplotách, kde s rostoucí teplotou dochází také ke zvyšování rychlosti těchto reakcí, o které však nerozhoduje množství přivedené tepelné energie, ale hodnota teploty. Se zvýšením teploty se exponenciálně zkracuje délka životnosti.

3.1.2 Elektrické namáhání

Elektrické namáhání je jedním z dalších velmi důležitých faktorů, které ovlivňují dobu života elektroizolačních systémů. Zahrnují se do něj všechny účinky působení elektrického pole a magnetického pole, plazivých proudů, částečných nábojů, elektrolýzy, účinku prostorových nábojů, elektrických stromečků apod. Jedná se tedy o různé těžko popsateľné procesy a přesný mechanismus působení na životnost izolantu však v současné době není příliš znám. Jsou používány hlavně dva modely empirického charakteru popisující vliv elektrického pole na dobu života izolačního materiálu [13]. Jedná se o mocninový model uvedený rovnicí (4) a exponenciální model viz (5).

$$\tau = k \cdot E^{-n} \quad (4)$$

$$\tau = a \cdot e^{-bE} \quad (5)$$

kde: τ ... Doba života [h]
 a, b, k, n ... Konstanty
 E ... Intenzita elektrického pole [$\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$]

3.1.3 Mechanické namáhání

Zdrojem mechanického namáhání je působení elektromagnetických, elektrodynamických nebo tepelných sil. Stroje jsou tomuto druhu namáhání vystaveny během výroby, manipulace, přepravy a jejich provozu. Mechanické namáhání se při výrobě výrazně projevuje u vinutí strojů a zařízení, během ručního nebo strojního vkládání. V provozu jde hlavně o vliv vibrací

a mechanických rázů, ty mohou mít mnoho příčin, např. špatné mechanické spojení elektromotoru s poháněným zařízením. Vlivem vibrací jsou namáhány a trpí nejvíce ložiska a hřídele, vibrace také působí na vinutí stroje a jejich elektroizolační systémy [14].

3.1.4 Působení prostředí

Prostředí, které obklopuje stroje, přístroje a zařízení má na použité materiály obecně nežádoucí vliv. Kromě již dříve zmíněných mechanismů, se jedná o působení, které také ovlivňuje dobu životnosti elektroizolačního systému elektrického stroje. Účinkem atmosférických vlivů se mění struktura a chemické složení materiálů, kde míra těchto změn záleží na druhu prostředí, době expozice, na použitých materiálech, technologii a konstrukci elektrických zařízení [15]. Z hlediska charakteru prostředí působícího na elektroizolační systémy rozlišujeme následující vlivy:

- *Podnebí – teplota, vlhkost, záření, biologické vlivy*
- *Prostředí – průmyslové znečištění atmosféry*
- *Provoz – mechanické namáhání, vliv elektrického pole, radiační vlny*

Teplota – ovlivňuje izolační systém zařízení ve všech etapách po celou dobu jeho životnosti, kde izolační systém musí být schopen v těchto podmínkách plnit svou funkci. Teplota může na izolační systém působit buď krátkodobě, nebo dlouhodobě. Dlouhodobé působení teploty způsobuje a vede k nevratným změnám ve struktuře i vlastnostech materiálu. Krátkodobé působení nemusí takové změny vyvolat a může se jednat i o změny vratné. Teplo většinou působí spolu s kyslíkem, který díky společnému spojení způsobuje komplikované a agresivní termo-oxidační namáhání.

Vlhkost – přítomnost je zdrojem volných nosičů elektrického náboje vznikajících disociací molekul vody ze vzduchu. Působení vody může být jak na povrchu, tak i uvnitř izolantu vlivem navlhavosti materiálu, při které se voda absorbuje do izolantu. Vlivem působení vlhkosti se zhoršují elektrické i mechanické vlastnosti izolantů. Z hlediska elektrického se zhoršuje vnitřní a povrchový odpor, narůstají dielektrické ztráty a permitivita materiálu. Z mechanického hlediska se snižuje pevnost materiálu.

Záření – jedná se o degradační vliv, kde je jeho energie přímo úměrná frekvenci, nejhůře působícím zářením je proto infračervené záření. Ve spojení s teplotou je výsledek ještě horší, neboť vzájemné působení obou vlivů současně zvyšuje účinek jednotlivých vlivů.

Biologické vlivy – jsou způsobeny např. vlivem bakterií, hub, plísní, hmyzu a zvířat. Plísně spolu s houbami narušují materiál, na kterém jsou přichyceny, tím dochází ke zhoršování jeho vlastností.

Prach – jde o složku obsaženou v ovzduší, jedná se o tuhé částice s průměrem menším než 500 μ m. Usazování prachu má za následek zhoršený odvod tepla, tím přispívá k urychlení tepelné degradace materiálu. Výskyt prachu v izolačním systému způsobuje zhoršení izolačních vlastností a snižuje jeho dobu životnosti.

3.1.5 Kombinované

Kombinované namáhání je reálnou situací stárnutí elektroizolačních systémů, jelikož výsledné namáhání není jen součtem dvou po sobě následujících vlivů. Jestliže je izolační materiál vystaven např. současně působení teploty a elektrického pole, dochází k rychlejší degradaci daného materiálu. Ve výsledku většinou k selhání dojde mnohem dříve, než při vystavení materiálu jednotlivým vlivům zvlášť. To nastává v situaci, kdy spolu interagují dva nebo více vlivů současně. Druhy interakce zásadně rozlišujeme na dva základní druhy, na přímou a nepřímou interakci [13].

Přímá interakce – je popsána jako stav, kdy se jednotlivé působící vlivy navzájem ovlivňují do takové míry, že jejich působení je diametrálně odlišné od stavu, kdy působí tyto vlivy zvlášť. Typickým příkladem působení přímé interakce je oxidace za zvýšené teploty. Samotná zvýšená teplota nemá na materiál radikální vliv, ovšem za přítomnosti kyslíku velmi výrazně urychluje oxidační proces. Taktéž jako oxidace při pokojové teplotě nemá na degradaci materiálu nijak zásadní vliv [13].

Nepřímá interakce – je stav definovaný jako situace, kdy několik faktorů působí současně na materiál, jednotlivé působící vlivy zůstávají nezměněny, jako by působily každý zvlášť, ale k ovlivnění dochází prostřednictvím jejich účinků. Za nepřímou interakci lze označit například současné působení elektrického pole a mechanického namáhání. Mechanické namáhání totiž může rozrušit materiál (praskliny), v těch dochází k vytváření částečných nábojů, které přispívají k rychlejšímu stárnutí materiálu [13].

3.1.6 Zrychlené stárnutí

Skutečně věrohodná data o životnosti materiálů můžeme získat jen dlouhodobým sledováním změn, kterým podléhají v průběhu jejich reálného stárnutí. V praxi ale nemůžeme čekat několik desítek let, než se potvrdí archivní kvality určitého typu materiálu. Obvykle potřebujeme tyto informace získat podstatně rychleji. K tomuto účelu slouží tzv. zrychlené zkoušky stárnutí. Jedná se o zkoušky, při kterých se výrazně zkracuje doba degradace materiálu, např. použitím umělého zvětšení zátěže vybraného faktoru stárnutí.

Hlavní požadavek těchto zkoušek je, aby z chování z určitého souboru téhož typu, podrobeného zvýšenému namáhání, bylo možné předvídat časový průběh sledovaných parametrů při nižších úrovních namáhání. Výsledky lze efektivně využívat ke kontrole běžné výroby a i pro zpětné ovlivňování činností v předvýrobních etapách.

Podle povahy se tyto zkoušky dají rozdělit na chemické (stanovení absorpce kyslíku) a fyzikální (zvýšená teplota, tlak kyslíku či vzduchu, vyšší koncentrace ozónu, zesílení světla). Zrychlené stárnutí za pomoci zvýšené teploty lze použít např. pro zařazení izolačního materiálu do teplotní třídy [13,17].

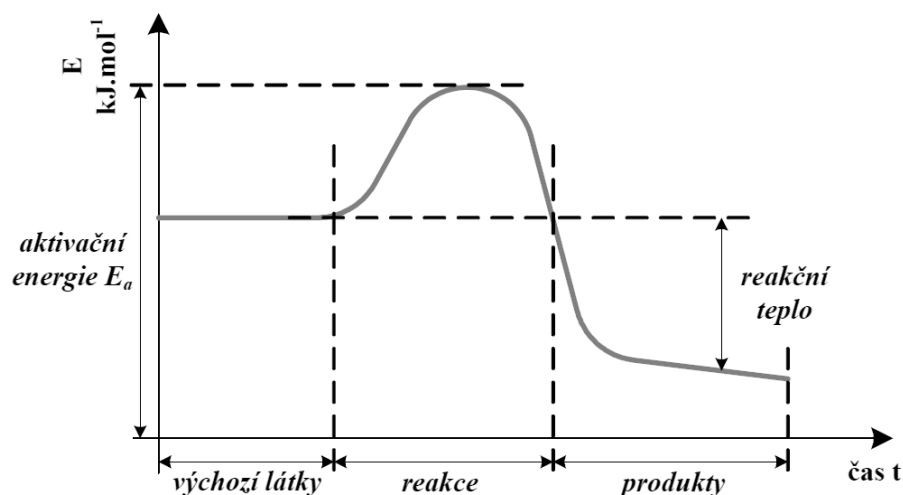
4 Určování aktivační energie elektroizolačních systémů

Určování aktivační energie elektroizolačních systémů se provádí za účelem diagnostiky a určení stavu degradace elektroizolačního systému, tím se snaží odhadovat dobu jejich zbytkové životnosti. Spolehlivost je dána schopností elektroizolačního systému odolávat vůči působícímu degradačnímu mechanismu. Sledování schopnosti, jak dokáží elektroizolační systémy odolávat těmto mechanismům je velice komplexní a časově náročná problematika. Z těchto důvodů se za účelem sledování spolehlivosti elektroizolačních systémů provádí tzv. zrychlené zátěžové zkoušky. Urychlení degradačních procesů elektroizolačních systémů lze dosáhnout pomocí většího namáhání, než kterému jsou běžně vystavovány při provozních podmínkách, a tím v kratším čase docílit degradace materiálu. Stárnutí elektroizolačních systémů je simulováno pomocí teploty nebo elektrického napětí. Během umělého stárnutí jsou potom sledovány elektrické a mechanické parametry [7].

Zrychlené zátěžové zkoušky slouží k sestavení křivek odolnosti vůči působícímu degradačnímu mechanismu. Tyto křivky se určují pomocí degradačních činitelů uvedených výše, viz kapitola č. 3.1. Na degradaci elektroizolačních systémů lze pohlížet z několika hledisek. Využívají se vnější a vnitřní modely. Vnější modely sledují projevy z makroskopického hlediska, naopak vnitřní modely sledují strukturu materiálu a chování systému z mikroskopického hlediska. V kapitole č. 4 je popsán vnitřní model degradačních procesů, do kterého spadá aktivační energie, která využívá pro popis stárnutí mikroskopické hledisko a její hodnotu lze získat právě z naměřených křivek odolnosti vůči působícímu degradačnímu mechanismu [8].

4.1 Aktivační energie

Stav elektroizolačního systému, vzhledem k jeho degradaci vlivem působících degradačních mechanismů, lze určit pomocí aktivační energie. Tato fyzikálně-chemická veličina je definována jako minimální potřebná energie, která musí být látce dodána k převedení látky do stavu schopného chemické reakce. Popis průběhu této energie a její podstata je znázorněna na *Obr. 2*.



Obr. 2: Podstata aktivační energie endotermické reakce[9]

V elektrotechnologické diagnostice je aktivační energie rozhodující veličinou ovlivňující životnost všech elektroizolačních materiálů a je jedním z důležitých parametrů pro určování zbytkové životnosti elektroizolačních systémů. Čím větší aktivační energii daný materiál má, tím více odolává chemickým reakcím, které způsobují degradační pochody v jeho vnitřní struktuře. Velikost aktivační energie dobře reflektuje všechny tyto degradační procesy a její vývoj v závislosti na době provozu je velmi žádanou informací [9, 5].

O každém elektroizolačním materiálu vypovídá několik různých velikostí aktivačních energií. Zkoumání odolnosti materiálu vůči působícímu degradačnímu faktoru z hlediska elektrotechniky, se provádí za účelem stanovení právě té velikosti aktivační energie, která bude danou degradací co nejpřesněji popisovat. Na základě sledování vhodných elektrických parametrů, lze hodnotu této velikosti aktivační energie určit. V praxi existuje několik způsobů určování aktivační energie, ale mnohé z nich jsou velmi časově náročné.

4.2 Popis získávání aktivační energie

Pro stanovení velikosti aktivační energie lze vyjít z tzv. Arrheniovy rovnice viz (6), která popisuje závislost reakční rychlosti daného materiálu na působící teplotě. Z této rovnice je patrné, že podmínkou při zvýšení teploty je také zákonitý růst reakční rychlosti, což je způsobeno přivedením dodatečné energie zahřátím tohoto materiálu [5].

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (6)$$

- kde: k ... Reakční rychlost [s^{-1}]
 A ... Před-exponenciální (frekvenční) faktor [s^{-1}]
 E_a ... Aktivační energie [$J \cdot mol^{-1}$]
 R ... Univerzální plynová konstanta $8,31447215 [J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}]$
 T ... Absolutní teplota [K]

Výpočet aktivační energie podle tohoto modelu lze použít pouze za předpokladu, že degradačním mechanismem působícím na daný materiál je pouze teplota. Využití převrácené funkce se používá pro získání křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu mechanismu, protože uvažujeme, že vlivem vzrůstající teploty bude doba životnosti daného materiálu klesat. Životnostní funkci a její předpoklad znázorňuje rovnice (7).

$$k^{-1} = \lambda(T) = \frac{1}{A} \cdot e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (7)$$

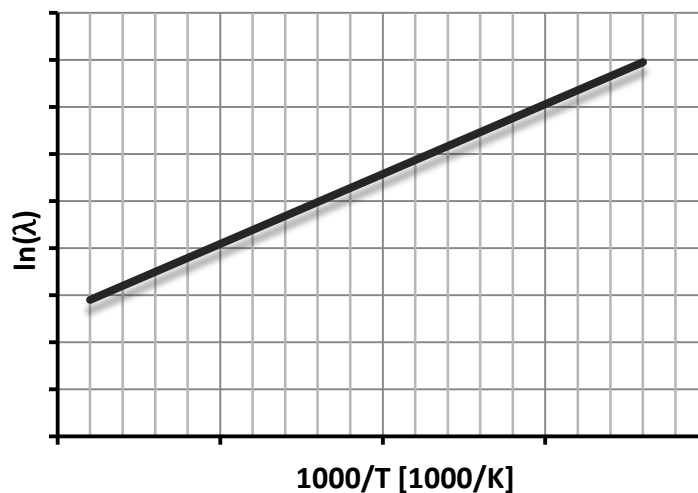
$$\lambda(T) = A' \cdot e^{\frac{E_a}{RT}}$$

- kde: λ ... Parametr životnosti
 A' ... Parametr Arrheniova modelu

Zlogaritmováním životnostní funkce je získána lineární životnostní závislost na reciproké teplotě (převrácená hodnota teploty) [5]. Lineární životnostní závislost je popsána rovnicí (8).

$$\ln[\lambda(T)] = \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln(A') \quad (8)$$

Zobrazení této závislosti je na Arrheniovu grafu viz *Obr. 3* a je z něj patrné, že sklon funkce udává podíl $\frac{E_a}{R}$.



Obr. 3: Lineární životnostní závislost na reciproké teplotě [5]

První pohled může být zavádějící a může se zdát, že se vzrůstající teplotou stoupá životnost daného materiálu, to je ale způsobeno tím, že je použito reciproční měřítko na ose x. Při reciproční závislosti teplota na ose x klesá [5].

Výsledný výpočet velikost aktivační energie se vypočítá podle rovnice (9). Vykreslení Arrheniova grafu se v praxi provádí v závislosti na $\frac{1000}{T}$ a tím lze získat aktivační energii rovnou v jednotkách $[\text{k}] \cdot \text{mol}^{-1}$. V některých případech se můžeme setkat s uvedenou jednotkou eV , kde hodnota $1eV$ je rovna $96,485336521 [\text{k}] \cdot \text{mol}^{-1}$ [5].

$$E_a = \frac{\partial[\ln\{\lambda(T)\}]}{\partial\left(\frac{1000}{T}\right)} \cdot R [\text{k}] \cdot \text{mol}^{-1} \quad (9)$$

Aproximováním lineární funkcí, naměřených a sestrojených životnostních křivek, získáme aktivační energii, kde sklon této křivky je úměrný první parciální derivaci zlogaritmované životnostní funkce.

5 Určení aktivační energie z předložených experimentálních dat

Testovaným vzorkem pro experiment byl třísluškový kompozitní materiál RELANEX, vytvrzovaný technologií Resin-Rich, od výrobce COGEBI Tábor a.s. Stárnutí vzorku bylo provedeno v horkovzdušných pecích při teplotách **190°C**, **200°C** a **210°C**. Horkovzdušné pece použité pro experiment jsou k vidění na *Obr. 4*.



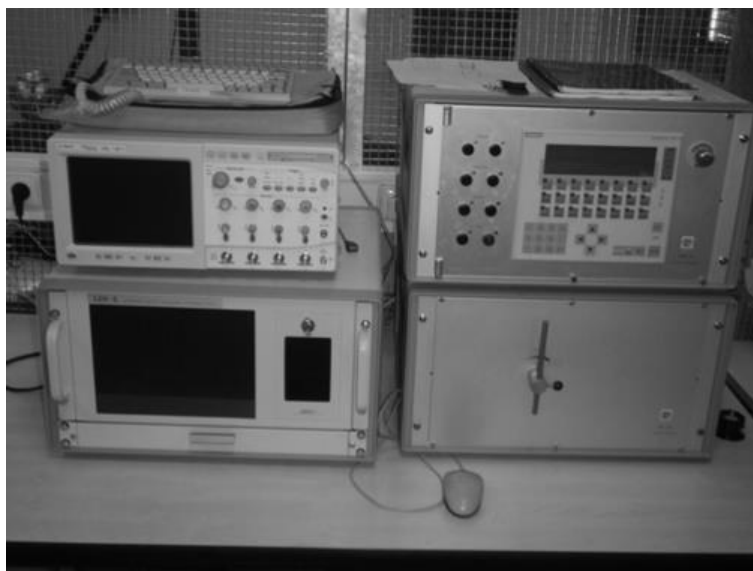
Obr. 4: Horkovzdušné pece [5]

Měřením důležitých elektrických parametrů testovaného vzorku v průběhu stárnutí v horkovzdušných pecích pro stanovené teploty byly získány hodnoty, které se dále použily k sestavení životnostních křivek odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru. Stěžejním elektrickým parametrem pro měření byl ztrátový činitel $tg\delta$. Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg\delta$ pro stanovené teploty a časy ve kterých byly hodnoty odečteny, jsou zaznamenány v *Tab. 2*.

Tab. 2: Poskytnuté naměřené údaje testovaného vzorku

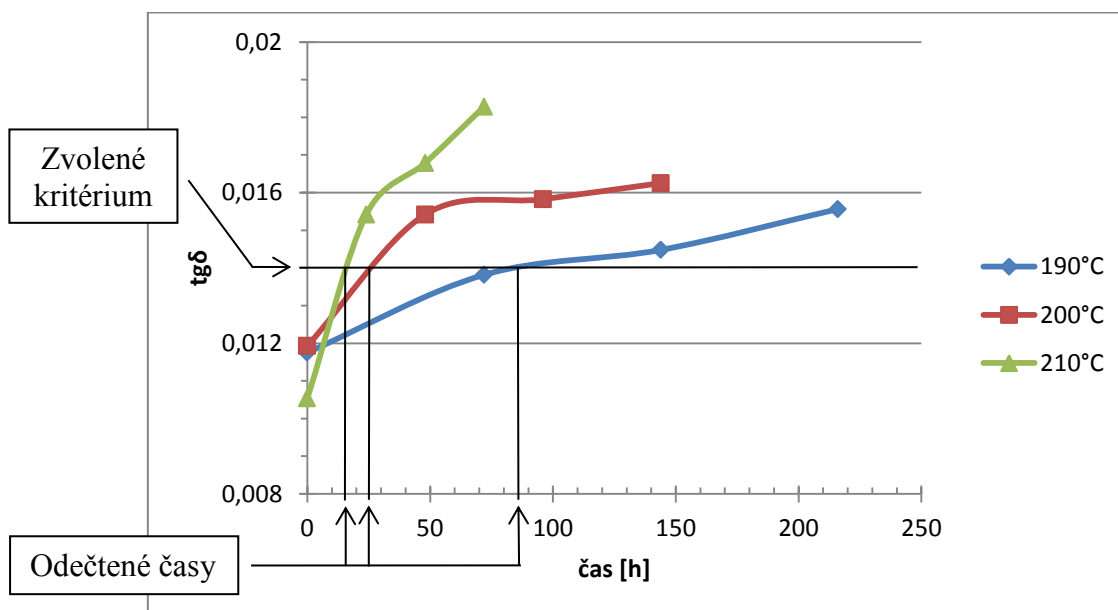
190 °C		200 °C		210°C	
Doba stárnutí [h]	$tg\delta$	Doba stárnutí [h]	$tg\delta$	Doba stárnutí [h]	$tg\delta$
0	0,011754314	0	0,011929801	0	0,010542287
72	0,013818765	48	0,015419407	24	0,015418992
144	0,014479889	96	0,015825501	48	0,0167892
216	0,015563	144	0,01625369	72	0,018285

Ztrátový činitel byl měřen za pomoci automatického můstku vycházejícího z klasického principu Scheringova můstku. Výhodou použití tohoto můstku je, že nemusí být zcela vyvážen, protože se měří fázové posuny mezi jednotlivými napětími. Signály v digitální podobě jsou následně přenášeny pomocí optických kabelů do zobrazovací a vyhodnocovací jednotky [1]. Zobrazovací a vyhodnocovací zařízení pro měření ztrátového činitele $tg\delta$ je zobrazeno na *Obr. 5*.



Obr. 5: Měřicí zařízení pro vyhodnocení hodnoty $tg\delta$ LDV-5 [5]

Třísložkový kompozitní materiál byl stárnut při stanovených teplotách a jeho ztrátový činitel byl proměřován při konstantním napětí 0,5 kV. Kritérium ztrátového činitele, při kterém je už materiál nevyhovující požadovaným vlastnostem, byl zvolen **$tg\delta = 0,014$** . Na základě námi zvoleného kritéria se poté stanovily jednotlivé doby pro zvolené teploty, kdy ztrátový činitel tuto hodnotu překročí. Princip odečítání času, kdy je hodnota $tg\delta$ překročena, pro jednotlivé teploty je patrný z *Obr. 6*. Zvětšené jednotlivé grafy pro různé teploty, ze kterých byla doba času odečtena, jsou přiloženy v příloze.

Obr. 6: Graf závislosti $\text{tg}\delta$ na času pro různé teploty

Odečtené časy pro jednotlivé teploty a stanovené kritérium $\text{tg}\delta = 0,014$ jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3: Příslušná teplota a čas pro stanovené kritérium $\text{tg}\delta$

Teplota [°C]	Čas [h]
190	84
200	25,5
210	16

Z odečtených hodnot času při působení různého teplotního zatěžování se dopočítaly potřebné jednotlivé složky, které jsou obsaženy v rovnici (8), pro vytvoření výsledného Arrheniova grafu křivky odolnosti vůči teplotě. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4: Přepočítané hodnoty pro konstrukci křivky odolnosti

$\ln(\lambda)$	$1/T$ (1/K)	$1000/T$ (1000/K)
4,430816799	0,002159128	2,159127712
3,238678452	0,002113495	2,113494663
2,772588722	0,002069751	2,069750595

Příklady výpočtu:

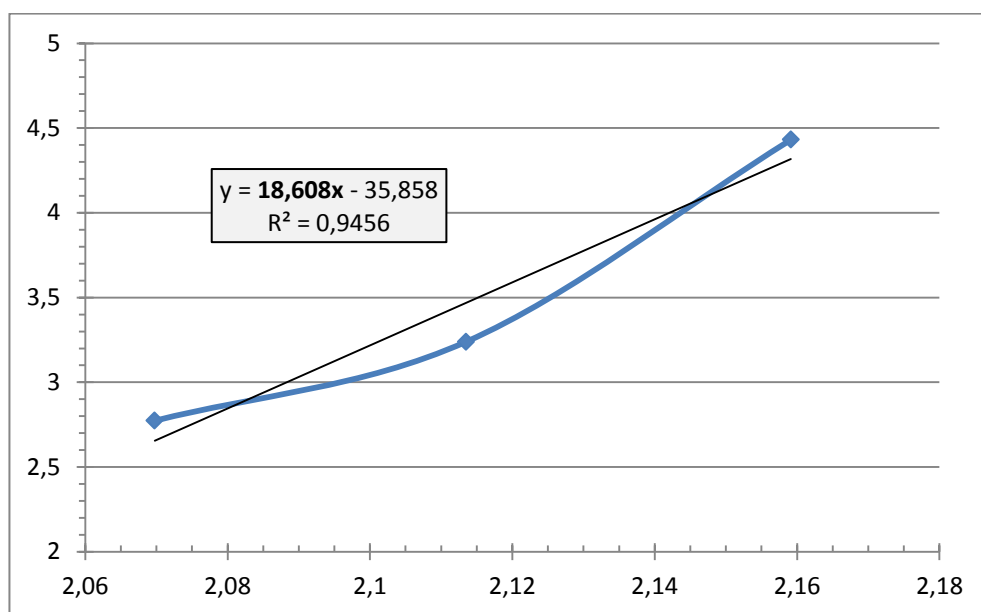
$$\ln(\lambda) = \ln(84) = 4,430816799 \quad (10)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{190 + 273,15} = 0,002159128 \quad (11)$$

$$\frac{1000}{T} = \frac{1}{190 + 273,15} \cdot 1000 = 2,159127712 \quad (12)$$

Pozn.: Příklady výpočtů jsou provedeny pro první řádek *Tab. 4*.

Z dopočítaných složek viz *Tab. 4*, byl sestrojen Arrheniův graf křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru tříložkového kompozitního materiálu RELANEX, který je zobrazen na *Obr. 7*.



Obr. 7: Graf křivky odolnosti vůči teplotě testovaného vzorku

V kapitole č. 4.2 je psáno, že ze sklonu této křivky lze určit velikost aktivační energie viz rovnice (9). Hodnota velikosti aktivační energie testovaného vzorku je potom dána výpočtem uvedeným níže viz (13).

$$E_a = 18,608 \cdot 8,31447215 = 154,716 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (13)$$

Tab. 5: Souhrn hodnot aktivační energie testovaného vzorku

-	$\frac{\partial[\ln\{\lambda(T)\}]}{\partial\left(\frac{1000}{T}\right)}$	Koeficient spolehlivosti regrese R^2	E_a [kJ·mol ⁻¹]	E_a [eV]
Tříložkový kompozitní materiál RELANEX	18,608	0,9456	154,716	1,604

Závěr

Elektroizolační materiály lze rozdělit do dvou základních skupin, na dielektrika a izolanty. Dielektrika vystupují v elektrických zařízeních jako aktivní prvky, izolanty pak jako prvky pasivní. Elektroizolační materiály mají celou řadu vlastností, stejně tak jako ostatní materiály, v našem případě nás nejvíce zajímají vlastnosti elektrické. Do elektrických vlastností spadá elektrická pevnost, rezistivita, ztrátový činitel a relativní permitivita. Provádí se také zařazování do různých teplotních tříd, které nám usnadňují rychlejší výběr použitého izolačního materiálu pro danou aplikaci a jeho vhodnost tak, aby splňoval požadavky na teplotní odolnost a vlastnosti při působení teploty, jelikož je teplota jeden z nejvýraznějších degradačních faktorů. Základní rozdělení izolantů se provádí podle jejich struktury na plynné, kapalně a pevné skupenství, další pak z jejich původu a vzniku.

Elektroizolační systémy elektrických strojů lze rozdělit na izolační systémy točivých strojů a izolační systémy netočivých strojů. Základní rozdělení izolačních systémů točivých strojů je na nízkonapěťové, které se skládají ze tří stupňů (izolace vodičů, vyložení drážek, impregnace) a vysokonapěťové. Rozdělení izolačních systémů netočivých strojů lze rozdělit na tři skupiny, a to na suché, zalévané a spojené.

Výroba elektroizolačních systémů může být provedena dvěma způsoby, technologií Resin-Rich nebo VPI. U technologie VPI tvoří základní materiál savá slídová páska, je dražší než Resin-Rich a proto se hodí hlavně pro sériovou výrobu a pro menší stroje. Nevýhodou této technologie je, že se impregnace celého stroje provádí v celku a při poruše se nedá vadná součást vyměnit. U technologie Resin-Rich tvoří základ třísluškový kompozit s výchozím izolačním předimpregnovaným materiálem, jednotlivé části jsou ovíjeny zvlášť a proto existuje možnost výměny při poruše.

Na elektroizolační systémy působí během provozu ale i mimo něj degradační mechanismy. Tyto mechanismy jsou nežádoucí jevy a mají vliv na spolehlivost a životnost celého elektrického zařízení, jelikož je izolační systém nejslabším článkem celého spolehlivostního řetězce. Nejvýznamnějším degradačním faktorem je bezpochyby teplota, která nám exponenciálně se zvýšením teploty zkracuje dobu života izolačního materiálu a tím

pádem i celého zařízení. Dalšími degradačními mechanismy jsou např. elektrické namáhání, mechanické namáhání a působení prostředí.

Určování aktivační energie elektroizolačních systémů se provádí za účelem diagnostiky a určení stavu degradace elektroizolačního systému, tím se snaží odhadovat dobu jejich zbytkové životnosti. V našem experimentu byl testovaným vzorkem tříslučkový kompozitní materiál RELANEX vytvářený technologií Resin-Rich, kde byly pro výpočet aktivační energie použity poznatky z kapitoly č. 4, ve které je popsán Arrheniův model pro získávání aktivační energie a který využívá pro odhadování zbytkové životnosti právě teplotu. Zpracováním předložených naměřených dat pro různé teploty stárnutí a pro zadané kritérium $tg\delta = 0,014$ nám vyšla velikost aktivační energie $154,716 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ a v přepočtu na elektronvolty $1,604 \text{ eV}$. Tuto hodnotu však nelze porovnat s žádnou jinou, neboť po prostudování českých i zahraničních článků jsem nenašel žádný stejný experiment pro náš testovaný materiál. Z tohoto důvodu by bylo zapotřebí pokračovat v dalších experimentech, např. měřeními tohoto materiálu Termogravimetricky (TG) a následně po vyhodnocení velikosti aktivační energie obě tyto hodnoty porovnat. Naše hodnota v porovnání s hodnotou z TG měření by pak sloužila k sestavení univerzálních modelů stárnutí právě pro tento materiál.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [2] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [3] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 314 s. ISBN 80-7300-190-2.
- [4] LIPTÁK, Jan a Josef SEDLÁČEK. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 168 s. ISBN 80-01-03191-9.
- [5] SOUČEK, J., TRNKA, P., SVOBODA, M. Určování aktivační energie elektroizolačních systémů. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, 2012. s. 781-784. ISBN: 978-80-214-4514-7.
- [6] SOUČEK, J. *Využití Weibullova rozdělení a aktivační energie pro popis chování izolačních systémů*. In *Elektrotechnika a informatika 2012 - část první*. Plzeň: 2012. ISBN: 978-80-261-0120-8.
- [7] MENTLÍK, V., TRNKA, P., MAGDALÉNA, T., LUMÍR, Š. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. 1. vyd. Praha: Ben-technická literatura, 2011, 118 s. ISBN: 978-80-7300-412-5.
- [8] MENTLÍK, V., PIHERA, J., POLANSKÝ, R., PROSR, P., TRNKA, P. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN: 978-80-7300-232-9.
- [9] POLANSKÝ, R. *Tepelné stárnutí elektroizolačních kapalin*. *Elektrorevue*, 2008, roč. 2008, č. 9, s. 1-9. ISSN: 1213-1539.
- [10] ČSN EN 60085 ed. 2. *Elektrické izolace – Tepelné hodnocení a značení*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [11] FRK, Martin. *Nedestruktivní diagnostika termikanitu v průběhu elektrického a tepelného namáhání: Non-destructive diagnostics of thermikanit during electrical stress and thermal ageing : zkrácená verze Ph.D. Thesis*. [Brno: Vysoké učení technické v Brně], c2007, 26 s. ISBN 978-80-214-3411-0.
- [12] SKALA, Bohumil. *Přednášky z předmětu elektrické stroje*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2010.
- [13] TRNKA, P., *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů*: Katedra technologií a měření, ZČU v Plzni, Plzeň 2006.

- [14] KOUTSKÝ, Jaroslav. *Degradační procesy a predikce životnosti*. vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995, 167 s. ISBN 80-708-2177-9.
- [15] KUDLÁČEK, Ivan. *Degradační procesy I*. Praha: ČVUT, 1994.
- [16] TRNKA, P. *Zbytková životnost elektroizolačních systémů*. *Elektrorevue*, 2009, roč. 10, č. 22, s. 1-7. ISSN: 1213-1539.
- [17] POLSTEROVÁ, H. *Spolehlivost v elektrotechnice*. Brno: Vysoké učení technické, 2003. 82 s.

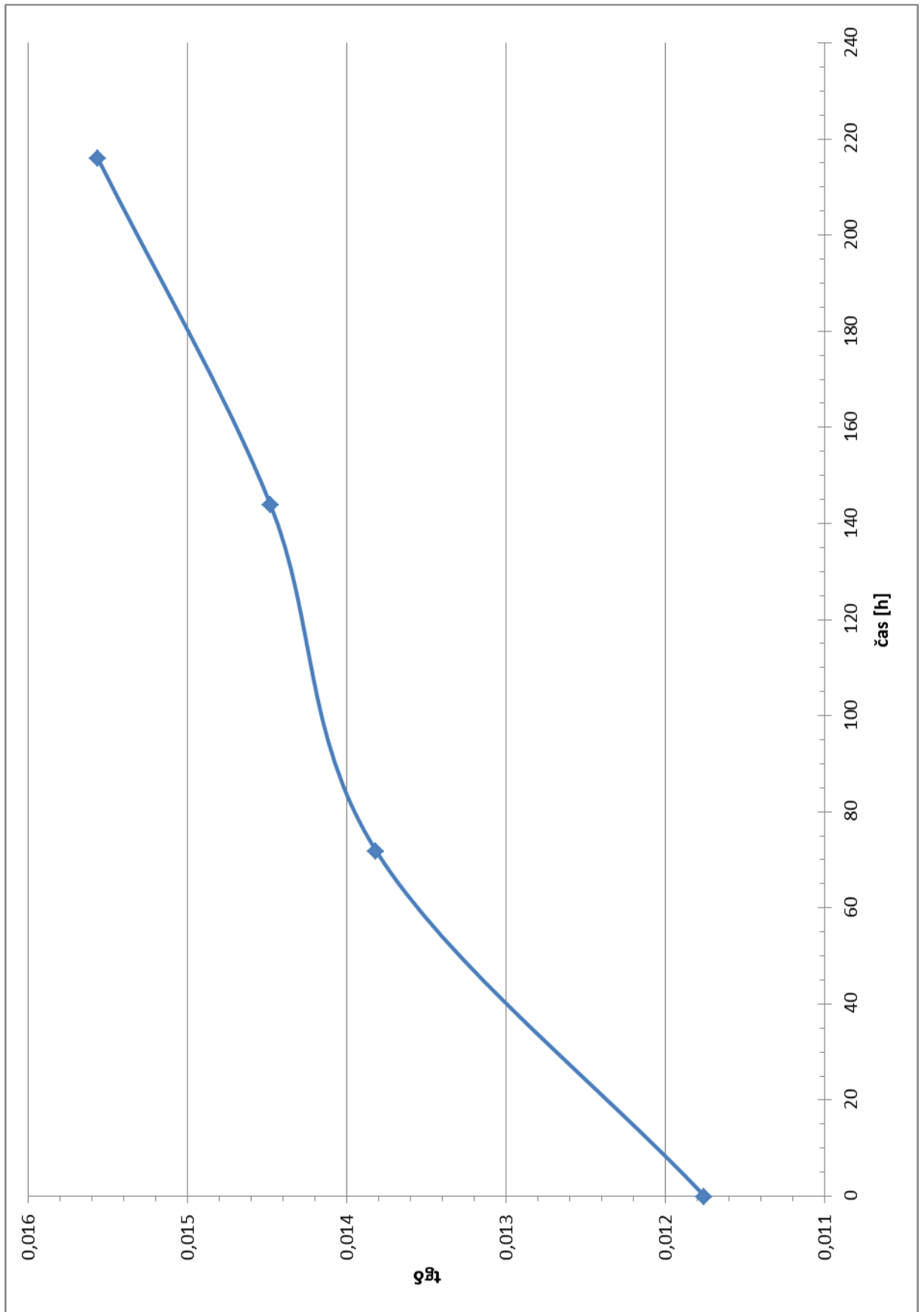
Seznam příloh

Příloha A - Graf závislosti $\text{tg}\delta$ na době expozice pro teplotu 190 °C

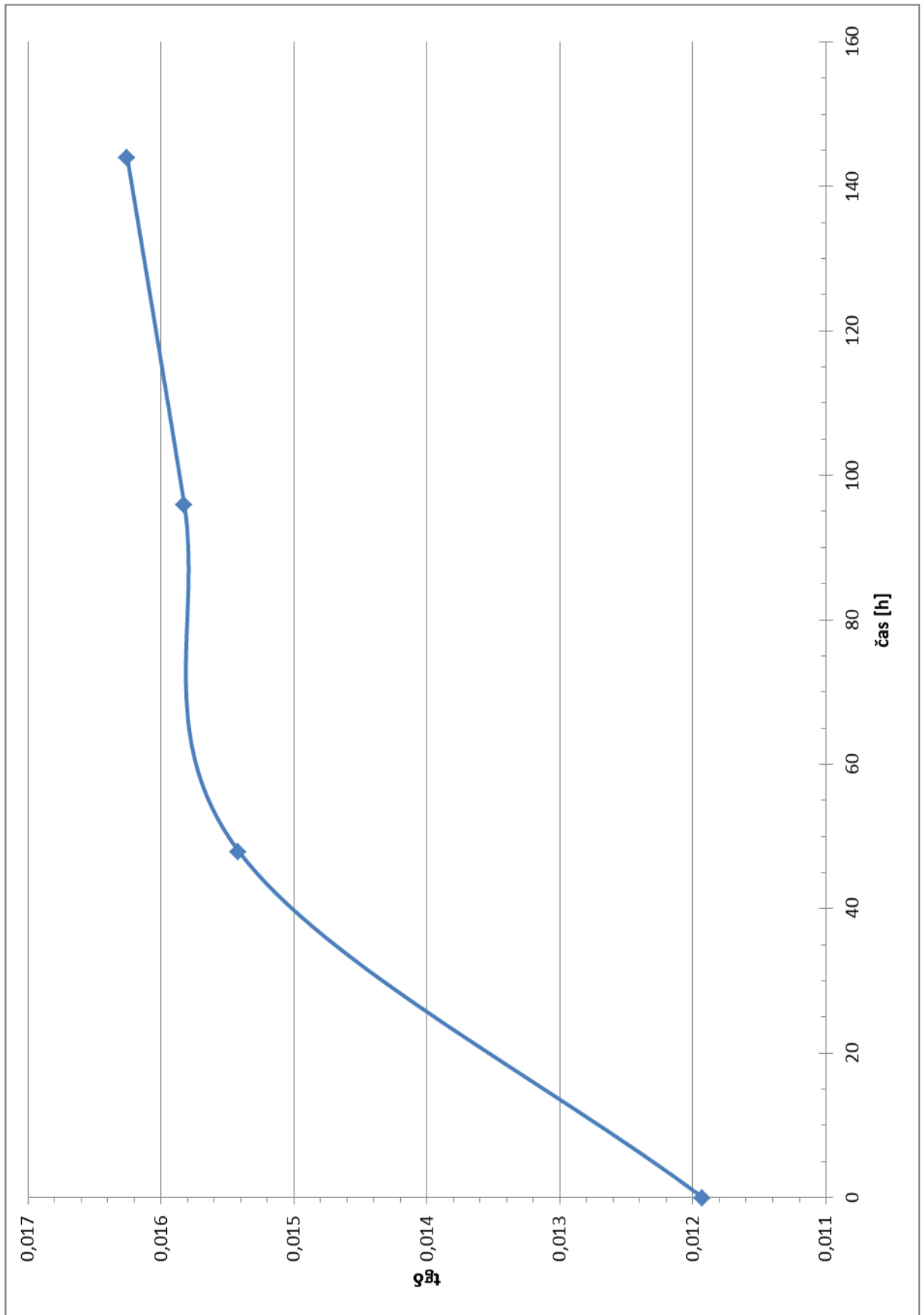
Příloha B - Graf závislosti $\text{tg}\delta$ na době expozice pro teplotu 200 °C

Příloha C - Graf závislosti $\text{tg}\delta$ na době expozice pro teplotu 210 °C

Příloha A - Graf závislosti $\text{tg}\delta$ na době expozice pro teplotu 190 °C



Příloha B - Graf závislosti tgδ na době expozice pro teplotu 200 °C



Příloha C - Graf závislosti $\tan\delta$ na době expozice pro teplotu 210 °C

