

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Určování tepelné odolnosti elektroizolačních materiálů**

**Pavel Fukač**

**2014**

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

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

Jméno a příjmení: Bc. Pavel FUKAČ  
Osobní číslo: E12N0005K  
Studijní program: N2644 Aplikovaná elektrotechnika  
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika  
Název tématu: Určování tepelné odolnosti elektroizolačních materiálů  
Zadávací katedra: Katedra elektroenergetiky a ekologie

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

1. Shrňte současný stav v oblasti elektroizolační techniky pro velké točivé stroje.
2. Popište hlavní degradační vlivy působící na elektroizolační materiály v provozu.
3. Seznamte se s normou ČSN EN 60216.
4. Na dodaném souboru naměřených dat vyhodnoťte vybrané parametry tepelné odolnosti.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. STONE, G. : Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair, Hoboken, NJ, Wiley-Interscience, c2004, 371 p. ISBN 04-714-4506-1
2. ČSN EN 60216, Elektroizolační materiály - Vlastnosti tepelné odolnosti, Praha, Český normalizační institut, 2002
3. Elektronické informační zdroje (databáze SCIENCE DIRECT, SCOPUS, Interscience-Wiley, apod.)

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Radek Polanský, 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

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku elektroizolační techniky velkých točivých strojů. Je rozdělena na čtyři části. Úvodní část rekapituluje technické řešení izolačních systémů těchto strojů, nové možnosti v oblasti elektroizolačních materiálů a technologií. Druhá část rekapituluje nejvýznamnější degradační vlivy působící na elektroizolační materiály v provozu se zaměřením na jejich tepelné namáhání. Ve třetí části se zabývá definicemi současných standardů a soustřeďuje se na postupy, podle kterých se tepelná odolnost izolantů zkouší a následně zařazuje do příslušných tepelných tříd. Drží se platných norem, které byly pro její zpracování v rozhodující míře použity. Kapitoly čtvrté části práce Vás seznámí s hodnocením vybraných parametrů tepelné odolnosti podle zavedených standardů a také s využitím termických analýz jako vhodných alternativních metod. Závěr práce obsahuje porovnání vyhodnocených dat všech použitých metod a dává odpověď na možnosti aplikace termických analýz pro hodnocení tepelné odolnosti izolantů v praxi.

## **Klíčová slova**

tepelná odolnost, elektroizolační materiál, elektroizolační systém, Arrheniův zákon, teplota skelného přechodu, částečné výboje, relativní index tepelné odolnosti, termické analýzy, diferenční skenovací kalorimetrie, termomechanická analýza v dynamickém režimu, termogravimetrická analýza, teplotní index, graf tepelné odolnosti.

## **Abstract**

The presented thesis is focused on issues concerning the insulation technologies for large rotating machines. It's divided into four parts. The introductory part recapitulates the technical solutions insulation systems of these machines and new opportunities in the area of electrical insulating materials and technologies. The second part summarizes the most significant degradation influences affecting the electrical insulating materials in service, with the focus on the thermal stresses. The third part deals with the definitions of existing standards and focuses on the methods by which the thermal endurance of insulating materials is tested and subsequently is classified in the relevant of thermal class. The fourth part introduces you to the evaluation of selected parameters thermal endurance according to established standards and also with the use of thermal analysis as suitable alternative methods. The conclusion compared results of all methods for the data evaluation and answered to the question regarding possibilities for application of thermal analysis classification the thermal endurance in practice.

## **Key words**

thermal endurance, electrical insulating material, electrical insulating system, Arrhenius law, glass transition temperature, partial discharges, relative thermal endurance index, thermal analyses, differential scanning calorimetry, thermomechanical analysis in dynamic mode, thermogravimetric analysis, temperature index, thermal endurance graph.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 7.5.2014

.....

Pavel Fukač

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Radku Polanskému, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval všem blízkým za trpělivost a podporu po celou dobu mého studia.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1 ELEKTROIZOLAČNÍ TECHNIKA PRO VELKÉ TOČIVÉ STROJE.....</b>	<b>12</b>
1.1 HISTORIE .....	12
1.1.1 Klíčový materiál - slída .....	12
1.1.2 Částečné výboje .....	14
1.1.3 Chlazení.....	15
1.2 AKTUÁLNÍ ŘEŠENÍ VYSOKONAPĚŤOVÝCH IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ VELKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ.....	16
1.2.1 Systém vakuově-tlakové impregnace – VPI (Vacuum Pressure Impregnation).....	17
1.2.2 Systém Resin- Rich - RR .....	18
1.2.3 Porovnání systémů VPI a Resin- Rich.....	19
1.3 VÝBĚR Z MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH V SOUČASNOSTI V IZOLAČNÍCH SYSTÉMECH VELKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ .....	20
1.4 MOŽNOSTI BUDOUCÍHO VÝVOJE .....	21
<b>2 HLAVNÍ DEGRADAČNÍ VLIVY PŮSOBÍCÍ NA ELEKTROIZOLAČNÍ MATERIÁLY V PROVOZU .....</b>	<b>23</b>
2.1 TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ.....	24
2.2 ELEKTRICKÉ NAMÁHÁNÍ .....	26
2.3 MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ .....	27
2.3.1 Odstředivá síla.....	27
2.3.2 Magnetická síla.....	27
2.3.3 Přechodné jevy.....	29
2.4 NAMÁHÁNÍ Z VNĚJŠÍHO PROSTŘEDÍ (OKOLNÍ VLIVY) .....	29
2.5 VÍCEČETNÉ NAMÁHÁNÍ NĚKOLIKA FAKTORY SOUČASNĚ.....	30
<b>3 HODNOCENÍ TEPELNÉ ODOLNOSTI DLE ČSN EN 60 085 A ČSN EN 60 216 .....</b>	<b>32</b>
3.1 SOUČASNÝ VÝVOJ VE ZKOUŠENÍ TEPELNÉ ODOLNOSTI ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ (EIM).....	32
3.2 ZÁKLADNÍ DOKUMENTY .....	33
3.2.1 Změny proti předchozí normě .....	33
3.3 VYBRANÉ ZÁKLADNÍ POJMY .....	34
3.4 TEPELNÁ TŘÍDA.....	36
3.4.1 Příklady různých elektroizolačních materiálů (EIM) pro základní teplotní třídy.....	37
3.5 HODNOCENÍ TEPELNÉ ODOLNOSTI A KLASIFIKACE.....	41
3.6 HODNOCENÍ EIM .....	41
3.6.1 Výběr teplot stárnutí a trvání cyklů.....	41
3.6.2 Vyhodnocení vlastností pro několik teplotních hladin v závislosti na čase stárnutí:.....	42
3.6.3 Protokol o zkoušce: .....	43
3.7 HODNOCENÍ EIS.....	44
<b>4 VYHODNOCENÍ VYBRANÝCH PARAMETRŮ TEPELNÉ ODOLNOSTI NA DODANÉM SOUBORU NAMĚŘENÝCH DAT .....</b>	<b>46</b>
4.1 HODNOCENÍ EIM .....	46
4.2 POUŽITÉ MĚŘÍCÍ METODY.....	46
4.2.1 Termické analýzy.....	46
4.2.2 Diferenční skenovací kalorimetrie (differential scanning calorimetry – DSC).....	47



4.2.3	Termogravimetrická analýza (thermogravimetric analysis – TGA).....	47
4.2.4	Termomechanická analýza v dynamickém režimu (thermomechanical analysis in dynamic mode – DTMA) .....	48
4.3	POSTUP ZKOUŠKY .....	49
4.3.1	Stanovení koncových bodů výchozí životnostní křivky.....	49
4.3.2	Sestrojení grafu tepelné odolnosti.....	50
4.3.3	Stanovení teplotního indexu.....	52
4.4	VYHODNOCENÍ POKUSŮ Z TERMICKÝCH ANALÝZ .....	52
4.4.1	Teploty a doby expozice vzorků.....	52
4.4.2	Vyhodnocení naměřených hodnot .....	52
4.4.3	Odvození kritériálních hodnot a výpočet rovnic.....	57
4.4.4	Zanesení výsledků do grafu tepelné odolnosti.....	58
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>60</b>
<b>6</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>PŘÍLOHA.....</b>	<b>63</b>

## Seznam symbolů a zkratk

ATE	Index stanovené tepelné odolnosti (assessed thermal endurance index)
$d$	Tloušťka izolace [mm]
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie (differential scanning calorimetry)
DTMA	Termomechanická analýza v dynamickém režimu (thermomechanical analysis in dynamic mode)
$E''$	Ztrátový modul
EIM	Elektroizolační materiál (electrical insulating material)
EIS	Elektroizolační systém (electrical insulating system)
$E_p$	Elektrická pevnost [kV/mm]
$H$	Tepelný tok [W]
HIC	Půlicí interval (halving interval)
Hz	Jednotka frekvence (Hertz)
K	Boltzmannova konstanta ( $8,6173324 \times 10^{-5}$ ) [eV/K]
$L$	Životnost izolace [hod]
Gy	Jednotka ionizujícího záření (Gray)
PD	Částečné výboje (partial discharges)
$R^2$	Koeficient determinace
RTE	Relativní index tepelné odolnosti (relative thermal endurance index)
RTI	Relativní teplotní index
TGA	Termogravimetrická analýza (thermogravimetric analysis)
TI	Teplotní index (temperature index)
$U$	Součinitel přenosu tepla [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]
$\theta_0$	Absolutní termodynamická teplota 0 [K] (- 273,15 °C)
$\lambda$	Měrná tepelná vodivost [ $\text{W}/\text{mK}$ ]
$\rho$	Rezistivita (též měrný elektrický odpor) [ $\Omega \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ]; [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]
$\chi^2$	Rozdělení pravděpodobnosti (chí kvadrát)

## Úvod

Tato práce se ve svém úvodu zabývá materiály a technologiemi používanými k výrobě izolačních systémů vinutí velkých točivých strojů. Získané informace jsou důležité v další části práce, pro správné stanovení vhodných kritérií a metod hodnocení životnosti těchto izol. systémů. Izolační systém je klíčová část každého elektrického stroje. Jeho úkolem je oddělení vinutí a elektrických částí od magnetického obvodu a kostry stroje. Pokud dojde vlivem namáhání ke zkrácení jeho životnosti, dochází následně k poruše. Stroj je pak nutno vyřadit z provozu a přistoupit k náročné opravě, pokud je vůbec možná. Tomu je třeba systematicky předcházet.

Životnost izolačního systému ovlivňuje mnoho faktorů. Jedná se o tepelné, elektrické, mechanické a dalšími vlivy okolního prostředí, které svým stresovým mechanismem ovlivňují rychlost degradace izolačního systému. Dominantním stresovým faktorem je tepelné namáhání, které je nejčastější příčinou postupné degradace izolačního materiálu a jeho následného selhání. Stárnutí je často velmi pomalý proces, trvající desítky let. Při vývoji nových izolačních materiálů je potřeba predikovat jejich životnost, ale nelze provádět takto dlouhé zkoušky. K získání potřebných informací je nutno degradační proces urychlit metodami zrychleného stárnutí, kdy je zkušební materiál namáhán zvýšenou teplotou. Zvýšená teplota urychlí degradační děje v jeho vnitřních strukturách a materiál zestárne rychleji. Pro účely těchto zkoušek byla vypracována řada norem ČSN EN 60 216, ze kterých je v této práci čerpáno. V uvedených normách najdeme, jak tyto procesy formulovat, a jak vhodně interpretovat následně získané výsledky.

Důležitým parametrem z pohledu těchto norem je výběr vhodné zkušební metody a volba správného kritéria stárnutí. Tato práce vznikla na základě potřeby ověřit použité kritérium koncového bodu na daném souboru naměřených dat. Dalším úkolem bylo ověření možnosti použití termických analýz, jako alternativních metod k již zavedeným postupům. Termické analýzy popisující změny fyzikálně-chemických vlastností látek při jejich ohřevu jako dynamické funkce teploty a času. Mají schopnost zachytit změny ve vnitřní struktuře materiálu. Široké možnosti těchto metod dávají dobrý předpoklad k tomu, aby jich bylo možno využít k určování kritéria životnosti materiálu v návaznosti na jeho tepelné stárnutí.

# 1 Elektroizolační technika pro velké točivé stroje

## 1.1 Historie

Než začneme popisovat současný stav elektroizolační techniky velkých točivých strojů, je dobré se krátce podívat do historie tohoto oboru, jehož rozvoj začal zhruba koncem 19. století.

Je zajímavé, že již jedny z prvních velkých pomaloběžných alternátorů (3,75 MVA, 2,2kV, Niagara, USA, 1894) měly izolační systém založený na slídě. Jako hlavní izolace zde byla použita lístková slída nanesená na lakovanou bavlnu. Nicméně většina výrobců turbo-generátorů tehdejší doby začala používat celulózu, protože použití slídy v dlouhých statorech bylo s tehdejšími technologiemi velmi obtížné. Záhy se však zjistilo, že turbo-generátory s izolací na bázi celulózy začaly mít časté poruchy a jejich životnost byla velmi nízká. [1]

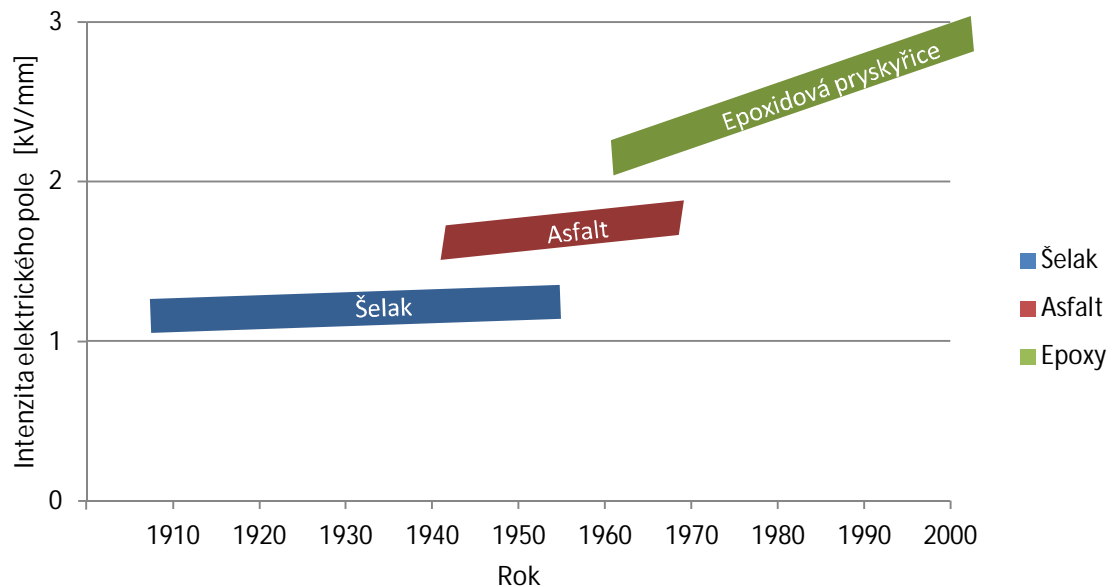
Vývoj izolačních systémů statorového vinutí pokračoval od přírodních materiálů na izolační systémy na bázi asfalto-slídových kompozitů. Slídovo-asfaltové izolace měly své výhody i nevýhody. Takový izolační systém poskytoval velmi dlouhou životnost. Obsahoval převážně anorganické materiály a snášel dobře částečné výboje. Nevýhodou byla jeho nižší tepelná odolnost. Tento izolační systém se udržel ve výrobě poměrně dlouho a řada starších strojů s tímto typem izolace je stále v provozu a je předpoklad, že zůstane v provozu ještě několik dalších desetiletí.[2]

### 1.1.1 Klíčový materiál - slída

Laboratorními testy se zjistilo, že slída je jako materiál extrémně odolná vůči částečným výbojům. I když nosný materiál izolace často „zmizel“, slída, která zůstala na místě, poškozena nebyla. Již dříve bylo zjištěno, že slída má nejlepší tepelné vlastnosti z izolačních materiálů. Vzhledem ke svým vlastnostem tak byla slída shledána jako dokonalý a nejlepší materiál pro izolace velkých strojů již na úsvitu 20. století. [3] A přestože jsme již na začátku století 21., stále je toto zjištění platné.

Vývoj směrem k vyššímu jmenovitému výkonu a vyššímu jmenovitému napětí požaduje izolaci se stále lepšími vlastnostmi. Graf na *Obr. 1.1* poskytuje přehled o historickém vývoji

izolačních systémů založených na bázi slídy v souvislosti s rostoucí intenzitou elektrického pole.[4]



Obr. 1.1 Vývoj izolačních systémů založených na bázi slídy v závislosti na zvyšování intenzity elektrického pole [4]

Slída je zpracovávána (štěpena) chemicko-tepelným, nebo termo-mechanickým, nebo hydro-mechanickým procesem a dále pak je zpracovávána standardními papírenskými technologiemi na slídový papír. Podle způsobu technologie výroby rozlišujeme finální produkt na kalcinovaný nebo nekalcinovaný slídový papír. Bezděk [5] dále porovnává vlastnosti obou slídových papírů s ohledem na jejich signifikantní přednosti. **Kalcinovaný slídový papír** při porovnání s nekalcinovaným slídovým papírem má tyto lepší vlastnosti:

- *vyšší počáteční hodnoty elektrické pevnosti,*
- *velmi dobré mechanické vlastnosti vytvrzeného kompozitu (lepší pevnost v tahu),*
- *menší tloušťku izolační pásky při zachování srovnatelných izolačních vlastností.*

**Nekalcinovaný slídový papír** má na druhou stranu oproti kalcinovanému jednu důležitou vlastnost: *je velmi dobře impregnovatelný*, čehož se s výhodou využívá v systémech vakuově-tlakové impregnace – VPI.

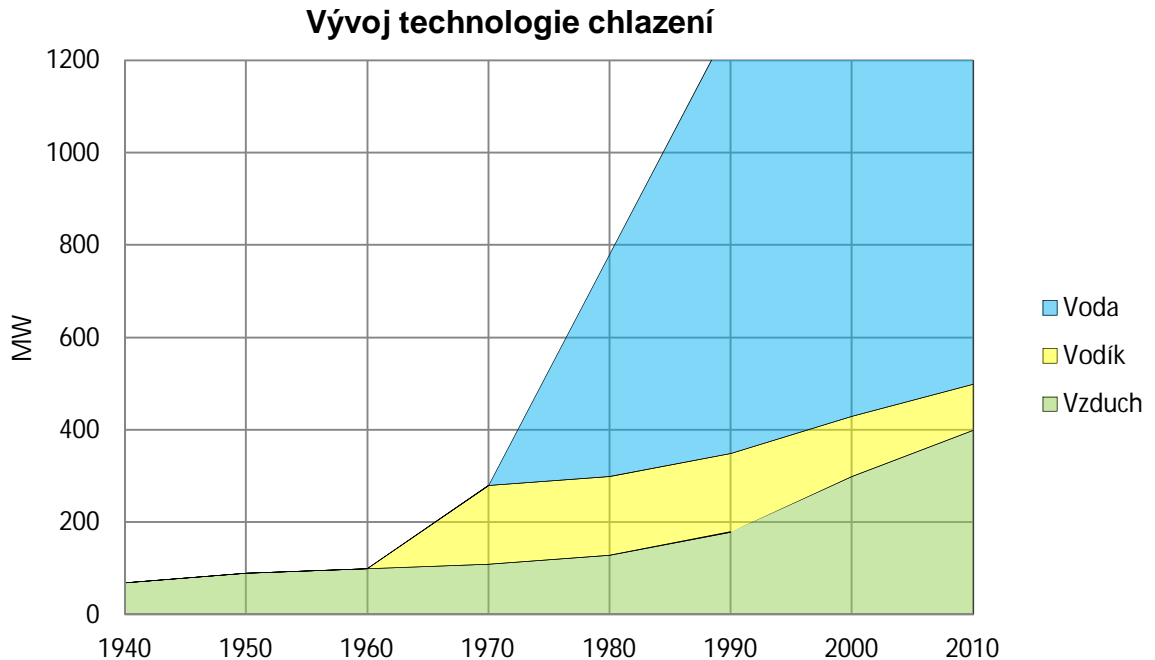
### 1.1.2 Částečné výboje

Jak již bylo uvedeno na začátku, starší stroje bez použití slídy v izolačním systému byly vysoce náchylné k poruchám souvisejícím s činností částečných výbojů. To je důvod, proč prakticky všechny izolační systémy strojů provozovaných v současnosti obsahují anorganické komponenty jako je slída a sklo. Tyto anorganické komponenty nejsou vážně ovlivněny částečnými výboji. Na druhou stranu, částečné výboje nepříznivě působí na organické materiály, které tvoří pojivo v izolačním systému. Staré micafoliové izolační systémy se šelakem mají sklon k pórovitosti z důvodu postupného odpařování těkavých látek obsažených v šelaku. Následující generace asfaltových izolačních systémů si prošla dlouhou cestu směrem k redukci pórovitosti v základní izolaci. I přesto izolační systémy založené na asfaltu mají sklon k "bobtnání" nebo "nafukování" pokud se překročí určitý teplotní rozsah, zpravidla přes teplotní třídu 130 (B). Navíc další slabina této izolace je vyšší možnost pohybu jednotlivých vodičů ve svazku. Důsledkem tohoto pohybu je vytvoření dutin a následná zvýšená aktivita částečných výbojů v těchto místech. I přesto podle dostupných závěrů měly termoplastové (asfaltové) izolace za následek významné snížení počtu poruch způsobených částečnými výboji. Moderní izolační systémy na epoxidové nebo polyesterové bázi nabízejí lepší spojení (pevnější slepení). To ve výsledku vede ke snížení vnitřní aktivity částečných výbojů než v předcházejících systémech.[6]

Stárnutí izolačního systému zásluhou činnosti částečných výbojů se nejlépe vyhneme tak, že v průběhu výrobního procesu statorových tyčí zajistíme, aby nedošlo k vytvoření pórů a prázdných míst. Vakuově-tlaková impregnace (VPI) je takový technologický proces, který tento požadavek zajišťuje. Tento proces byl původně vyvinutý pro menší stroje (asynchronní motory apod.). Technologii VPI se ještě budeme podrobněji zabývat v kapitole 1.2.1. Dnes můžeme nalézt VPI vinutí ve stále rostoucí počtu synchronních generátorů. Někteří evropští výrobci užívají VPI proces v strojích až do cca 300 MW výkonu a vzestupný trend pokračuje. Nicméně oprava statorových tyčí s VPI technologií je stále problematická a představuje výzvu pro další vývoj této technologie.[6]

### 1.1.3 Chlazení

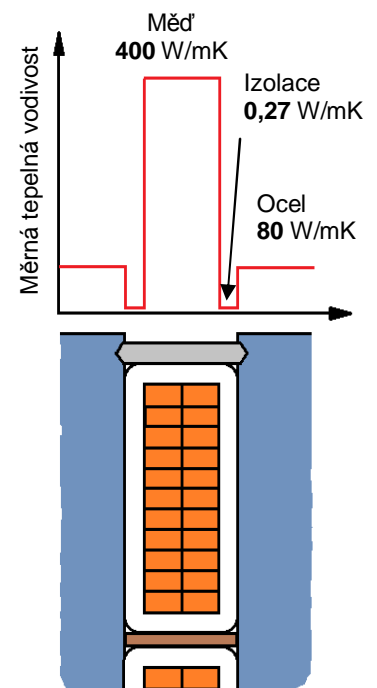
S rostoucím výkonem generátorů se zvyšovali nároky na odvod ztrátového tepla. Nasazení chladících médií je dobře patrné na grafu historického vývoje. *Obr. 1.2.*



*Obr. 1.2 Vývoj technologie chlazení v závislosti na zvyšování výkonu generátorů [7]*

Vlastnosti elektroizolačních materiálů z hlediska přenosu tepla z povrchu měděného vodiče na povrch vlastní izolace nejsou vůbec ideální. Zpravidla dobrý elektroizolační materiál je zároveň dobrý tepelný izolant. Tato fyzikální podstata věci vždy byla a je výzvou pro sofistikovaná technická řešení a hledání optimálního způsobu, jak co nejlépe odvést ztrátové teplo mimo generátor. S tím souvisí požadavek na elektroizolační systémy z hlediska dobrého přenosu tepla z jejich vnitřního povrchu na povrch vnější.

*Obr. 1.3 Hlavní izolace jako nežádoucí tepelná bariéra s nízkou tepelnou vodivostí. [8]*



## 1.2 Aktuální řešení vysokonapěťových izolačních systémů velkých točivých strojů

Jak již bylo předesláno v úvodu, práce je soustředěna na určování tepelné odolnosti elektroizolačních materiálů. Abychom mohli pochopit funkci a význam jednotlivých vlastností těchto materiálů, je nutné se seznámit s izolačními systémy generátorů a technologií jejich výroby.

Jako u každé výrobní technologie, i zde můžeme najít vliv starších a zavedených výrobních postupů, které často spolurozhodují o rychlosti inovačních procesů a při volbě nasazení nových materiálů.

Stone [2] shrnuje důležité okolnosti, které často hrají rozhodující vliv při volbě současných izolačních systémů a které rozhodně nelze opomenout:

- *Dobré provozní zkušenosti s dřívějšími verzemi stejného izolačního systému (značně konzervativní trh).*
- *Komerční dostupnost používaných materiálů.*
- *Poměrná výše nákladů na základní materiály a technologie v tvrdém konkurenčním prostředí.*
- *Konstrukční výhody nebo omezení daného systému izolace vztažené k očekávané životnosti a ekonomice provozu finálního stroje.*

Dále uvádí [2] v současné době nejvýznamnější a široce používané výrobní postupy pro výrobu izolačních systémů statorů se vkládaným vinutím jsou tyto čtyři:

- *Vakuově-tlaková impregnace (VPI) jednotlivých cívek a tyčí.*
- *Vakuově-tlaková impregnace kompletních statorů (GVPI).*
- *Hydraulické formování jednotlivých cívek a tyčí používajících resin-rich pásy*
- *Tlakové vytvrzování jednotlivých cívek a tyčí ve formách, také používajících resin-rich pásy.*

V praxi se také můžeme setkat s různými kombinacemi těchto metod. Pryskařičná pojiva používaná ve výše uvedených impregnačních postupech můžeme třídit podle obsahu rozpouštědla na vysoko nebo nízko-obsahové a bezrozpouštědlové.[2]



Nicméně pro zjednodušení celého problému lze shrnout tyto technologie do dvou, v současné době používaných systémů: Resin-Rich (RR) a Vacuum Pressure Impregnation (VPI).

### 1.2.1 Systém vakuově-tlakové impregnace – VPI (Vacuum Pressure Impregnation)

V tomto systému je základním materiálem savá slídová páska, která se prosytí impregnantem.[9] Savý izolant, který tvoří základ, se skládá ze **tří komponent**:

- **Plnivo**

Savá slídová páska. Zhotovená z nekalcinovaného slídového papíru, díky čemuž dosahujeme dobré savosti. Savost materiálu je velmi důležitá, neboť i při větším počtu vrstev (více než 10) je potřeba, aby došlo k dokonalému proimpregnování všech vrstev. Důležité jsou i mechanické vlastnosti pro ovíjení jako ohebnost a min. pevnost v tahu (80 N/cm šířky).

- **Nosná část**

Skleněná tkanina, nebo polyimidová či jiná fólie.

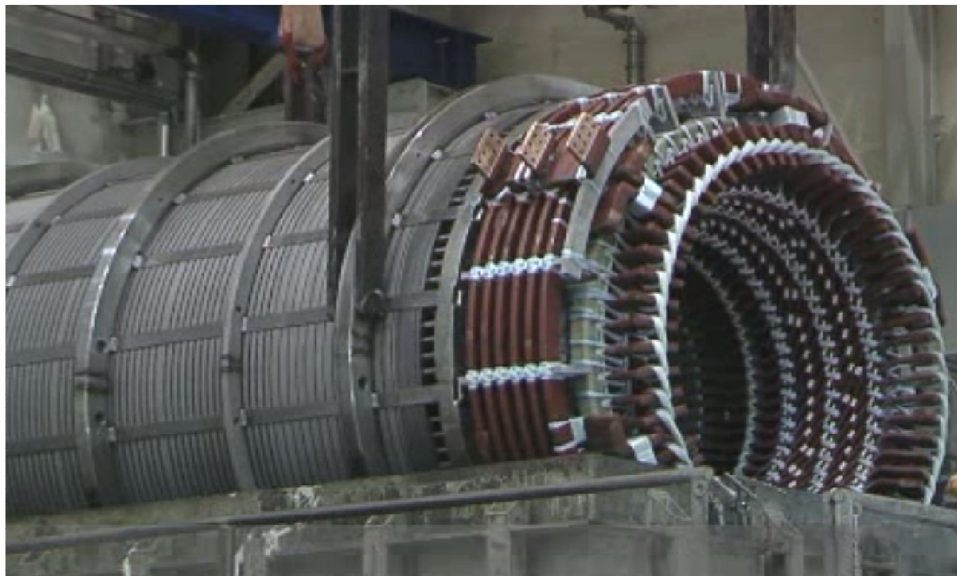
- **Pojivo**

Epoxidová nebo novolaková pryskyřice. Obsah v pásce se pohybuje pouze do cca sedmi procent.

Mentlík [9] dále uvádí následující technologický postup: Impregnace se provádí v autoklávu s možností ohřevu a chlazení. Jako impregnant se používají bezrozpuštědlové epoxidové, polyesterové či silikonové pryskyřice, které poskytují požadované elektro-mechanické vlastnosti a lze je použít pro teplotní třídy 180 (H) a 200. Zpracované izolované vinutí nejdříve sušíme při teplotách nad 100 °C po dobu cca 20 hodin. Poté je vinutí nebo celý stator umístěn do impregnační nádoby, kde je vakuum (pro odstranění zbytku vlhkosti a vzduchu) a ode dna je zaplaveno. Po určitém čase je vakuum zrušeno a zavede se přetlak inertního plynu nad hladinu impregnantu. Po vytažení z impregnace se vinutí přemístí do sušárny, kde dojde k jeho finálnímu vysušení a vytvrzení. Vlastní čas vytvrzení v sušárně není příliš dlouhý (uvádí se cca 20 hod). Pouze je důležité pro prvních několik hodin s vinutím otáčet, aby nedošlo k nerovnoměrnému stékání impregnantu do spodní části. Důležitá „zelená“ poznámka na závěr: Technologie díky použití bezrozpuštědlových impregnantů nezatěžuje životním prostředím výpary ředidel.

Pro ilustraci problematiky uvádím příklad, kdy Z. Zhou a kolektiv [10] prováděli zkoušky za účelem porovnání kvality impregnačních pryskyřic. Vzorky slídové pásky obsahovaly před impregnací 8% hm. lepivé složky s podílem více jak 80% hm. slídy ve slídovém papíru. Po impregnaci se samozřejmě zvýšil podíl pryskyřic a i tak se obsah slídy se ve výsledné izolaci pohyboval kolem 65% hm. Izolační systém vykazoval průraznou pevnost vyšší jak 33kV/mm.

Další příklad z technologické operace impregnování izolačního systému systémem GVPI (global vacuum pressure impregnation) s obchodním názvem MICALASTIC®, který vyvinula společnost Siemens [11], můžeme vidět na fotografii. *Obr. 1.4*.



*Obr. 1.4* Zavážení celého statoru do impregnačního zařízení – systém GVPI [11]

### 1.2.2 Systém Resin- Rich - RR

Technologie je podle Mentlíka [9] stejně jako v předchozím případě postavena na třísložkovém kompozitu. Zásadní rozdíl je v obsahu pojiva. Izolační páska je „bohatá“ na obsah pryskyřice (odtud její anglický název). Pojivem je reaktoplastická bezrozpuštědlová novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Jako nosná část je použita skleněná tkanina. Izolační bariéru tvoří kalcinovaný slídový papír, který je hutný, pevnější a méně nasákavý. Materiál se dodává suchý, nelepivý, ve stavu částečně přetvrzeném (tzv. „B stav“) a s co nejdelší dobou skladovatelnosti. Tloušťka pásky je od 0,15 do 0,2 mm; šířka cca 2cm. Zpracování je následující: Na připravený základ tyčového vinutí (zpravidla Roebelova tyč) se

vytvoří potřebná vrstva materiálu dle jmenovitého napětí stroje. Vytvrzení probíhá ve formách umožňujících stlačení izolace na předepsaný rozměr při teplotách 160 až 170 °C po dobu řádově jedné hodiny (závisí na druhu pryskyřice a tloušťce izolačního návinu). Používají se tzv. latentní tvrdidla na bázi komplexů aminů fluoridu boritého, které se začínají rozpadat při cca 100 °C a tím spustí polymeraci reaktoplastického pojiva. Následné ochlazování musí být pozvolné. Poté následuje standardní proces vysoušení. Po vyjmutí tyče vinutí – cívky z formy, je připravena bez dalších úprav k montáži do stroje. Izolace vykazuje velmi dobrou elektrickou pevnost, i ostatní požadované vlastnosti.

Příkladem materiálu pro použití v systému Resin-Rich je například páska Relanex® v tloušťkových variantách 0.22mm až 0.28mm [5]. Skládá se z:

- *kvalitního kalcinovaného slídového papíru (plošná hmotnost 30g/m až 160g/m),*
- *epoxy-novolakové pojivové báze,*
- *nosné skleněné tkaniny (tloušťka 0,12 - 0,14mm; plošná hmotnost ~ 33g/m).*



Obr. 1.5 Špičkový stroj na automatické ovíjení cívek generátorů s řízením pohybu v 6-ti osách. (převzato z [12]).

### 1.2.3 Porovnání systémů VPI a Resin- Rich

Pro oba systémy platí, že čím nižší je obsah pojiva ve vytvrzené izolační trubce, tím jsou nižší hodnoty ztrátového činitele při zvýšené teplotě. Při porovnávání systémů z hlediska plniva, je dlouhodobá napěťová odolnost izolačního systému při použití nekalcinovaného slídového papíru v izolační trubce lepší oproti kalcinovanému. Je snaha v Resin-Rich pásce

navyšovat obsah nejmenších částic slídy, což má pozitivní vliv na pevnost celého izolačního systému. [5]

Tab. 1.1 Orientační složení a parametry současných izolačních systémů VPI a Resin-Rich [13]

	Obsah slídy [%]	Obsah pojiva [%]	Obsah skelné tkaniny [%]	Tepelná vodivost $\lambda$ [W/mK]	Max el. pevnost $E_{p_{max}}$ [kV/mm]	Tepelná třída	Tloušťka izolace d [mm/18 kV]	Součinitel přenosu tepla U [W/m <sup>2</sup> K]
R-R standard	54	36	10	0,25	2,75	155	3,8	66
R-R vylepšený	57	33	10	0,27	3,7	155 až 180	2,8	96
VPI standard	62	28	10	0,28	3	155 až 180	3,6	78
VPI vylepšený	68	22	10	0,365	4,0	180	2,6	140

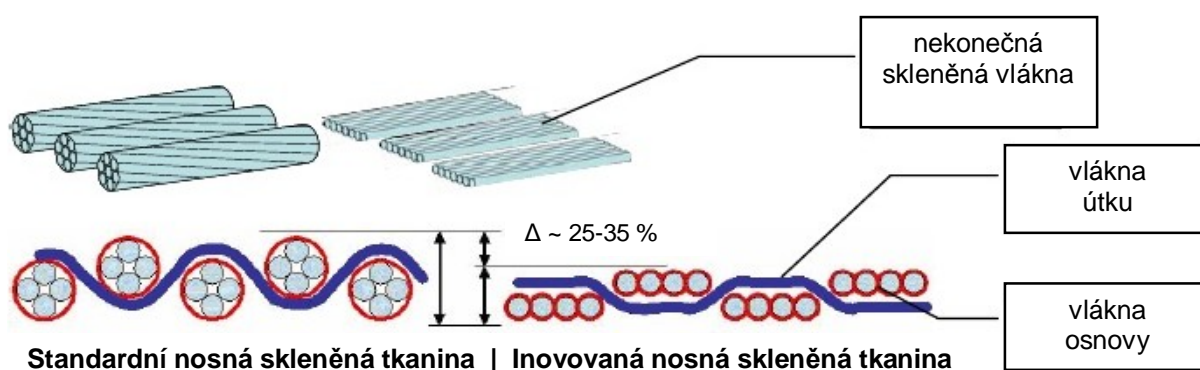
Technologie Resin-Rich a Vacuum Pressure Impregnation (VPI) jsou rozdílné, každá je specifická určitými vlastnostmi a má své výhody i nevýhody. Systém Resin-Rich potřebuje přesné přípravky pro vytvrzování a značnou technologickou kázeň. Kvalita zpracování je o něco více závislá na lidském faktoru oproti VPI. VPI je náročnější hlavně pokud jde o velké stroje (turboalternátory). Hlavní rozdíl je v potřebě náročného a tedy drahého zařízení. Výhodou u VPI je úspora materiálu až o 6% a homogenost systému. Pokud je vinutí technologií VPI proimpregnováno v jeden celek, je možnost následné opravy velmi obtížná, až nemožná. U systému Resin-Rich není problém vadnou cívku vyměnit. Která technologie je lepší nelze jednoznačně určit, ale v současné době se v celosvětovém měřítku více používá systém VPI. [9]

### 1.3 Výběr z materiálů používaných v současnosti v izolačních systémech velkých točivých strojů

Hlavní částí izolačního systému je izolace. Jejím úkolem je oddělení vinutí a elektrických částí od magnetického obvodu a kostry generátoru. Tato práce se nezabývá dalšími částmi izolačního systému, jako jsou polovodivé a vodivé vrstvy, sloužící k rozložení napěťového potenciálu, či řízení elektrického pole<sup>1</sup>, výplňové materiály apod. O slídě jako klíčovém materiálu již bylo psáno v jedné z úvodních statí (1.1.1). Také pojiva již byla představena v kapitole pojednávající o aktuálních izolačních systémech (1.2) a není třeba je zde opět zmiňovat.

<sup>1</sup> tzv. protikorónová ochrana

Kromě pojiva a plniva obsahují vícesložkové kompozity také nosnou část, která zajišťuje požadované mechanické vlastnosti. Aktuálně používanými materiály pro její výrobu jsou polyetylnftalátová (PEN) fólie, polyetylenteraftalátová (PET) fólie, polyesterová fólie či rouno a především skleněná tkanina. Standardní skleněnou tkaninu tvoří stáčená vlákna. Celková tloušťka skleněné tkaniny je přibližně 0,14 mm. Přenáší hlavní tahové síly. Pro její výrobu se dnes téměř výhradně používají bezalkalická hlinito-boro-silikátová skla, známá jako tzv. **E-skla**. Mají velmi dobré elektroizolační a mechanické vlastnosti. Jeden z velkých výrobců přišel před několika lety s inovačním řešením plochého uspořádání vláken. Pokud použijeme skleněnou tkaninu zpracovanou novou technologií, při níž se vlákna rovnají vedle sebe - viz *Obr. 1.6*, lze dosáhnout celkové tloušťky tkaniny pouze 0,12 mm. Další výhodou je zvětšená kontaktní plocha pro pojivové pryskyřice. [9]



*Obr. 1.6 Porovnání standardní a inovované skelné tkaniny [13]*

Příkladem dalších materiálů, které je dobré zde zmínit pro jejich výborné dielektrické vlastnosti a velmi dobrou tepelnou odolnost ( $\sim 220$ ), jsou:

- **Nomex<sup>®</sup>** (*Aramid*)

Papírenskými technologiemi zpracovaná vlákna aromatického polyamidu – aramidu.

- **Kapton<sup>®</sup>**

Polyimid s výbornými elektrickými vlastnostmi, dodávaný zpravidla ve formě folií.

## 1.4 Možnosti budoucího vývoje

Určitou představu o možném směru dalšího vývoje lze získat, pokud se podíváme na základní vlastnosti materiálů, ze kterých je složený aktuální izolační systém velkých točivých strojů. Velký prostor je stále ve zlepšení tepelné odolnosti pojiv a obecně ve zlepšení tepelné

vodivosti celého izolačního systému. Je vidět, že **teplota hraje v izolačních systémech klíčovou roli**. Přehled některých základních vlastností je uveden v následující tabulce.

Tab. 1.2 Přehled vlastností jednotlivých komponent izolačního systému na bázi slídy, skla a pryskyřice.[13]

	Plnivo <b>Slída</b>	Nosná část <b>E-sklo</b>	Pojivo <b>Pryskyřice</b>
Elektrická pevnost při 20 °C $E_p$ [kV/mm]	60 - 200	10 - 40	20 - 45
Tepelná vodivost $\lambda$ [W/mK]	0,25 - 1,7	1,0	0,12 - 0,2
Měrný elektrický odpor $\rho$ [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	$10^{14} - 10^{17}$	$>10^{10}$	$10^{13} - 10^{16}$
Mechanické vlastnosti	↓	↑	↔
Bod tání nebo teplota skelného přechodu $T_g$ [°C]	1200	840	80 - 180

Velké naděje se aktuálně vkládají do nových materiálů s plnivem obsahujícím nanočástice. Nanokompozity vykazují lepší mechanické a elektrické vlastnosti, jako zvýšenou tuhost a především tolik žádanou lepší tepelnou vodivost a také koeficient tepelné roztažnosti. Prakticky jsou ale zatím nepoužitelné z důvodu obtížné výroby a vysokým cenám nanoplňiv. Je třeba především dokončit výzkum, pak je šance jejich většího uplatnění i v oblasti elektroizolačních systémů.[14]

Většina výzkumu se soustřeďuje na izolační systém statoru a zpravidla je opomíjen izolační systém rotoru. To není úplně správně, neboť **v blízké budoucnosti bude muset čelit izolační systém rotoru novým výzvám**. Snaha zlepšit energetickou účinnost velkých strojů nás nutí k vývoji nových budících systémů. Zde jsou největší naděje vkládány do použití vysokoteplotních supravodičů pro budicí vinutí synchronních generátorů. Koncept vývoje nového budicího vinutí předpokládá, že toto vinutí z vysokoteplotního supravodivého materiálu<sup>2</sup> bude schopno vytvořit mg. pole asi 2 T a proudová hustota supravodivého vodiče bude dosahovat hodnot  $10^3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Cíle tohoto vývoje jsou známe: o 0,5 - 1,5 % vyšší účinnost celého generátoru, menší rozměry při stejném výkonu, až pětikrát menší reaktance, atd. Tento vývoj se neobjede bez vývoje nových izolačních systémů schopných pracovat při vysokých teplotních gradientech v prostředí velmi nízkých teplot.[2]

<sup>2</sup> materiál je supravodivý při teplotách vyšších než 77 K

## 2 Hlavní degradační vlivy působící na elektroizolační materiály v provozu

Stresových vlivů, které ovlivňují stupeň degradace izolace statorového i rotorového vinutí je celá řada. Stručně řečeno se jedná o tepelné, elektrické, mechanické a dalšími vlivy okolního prostředí. Pro jejich podrobnější rozdělení a popis bylo v celé této kapitole, až na jasně vyznačené výjimky, čerpáno z knihy G. Stone [2].

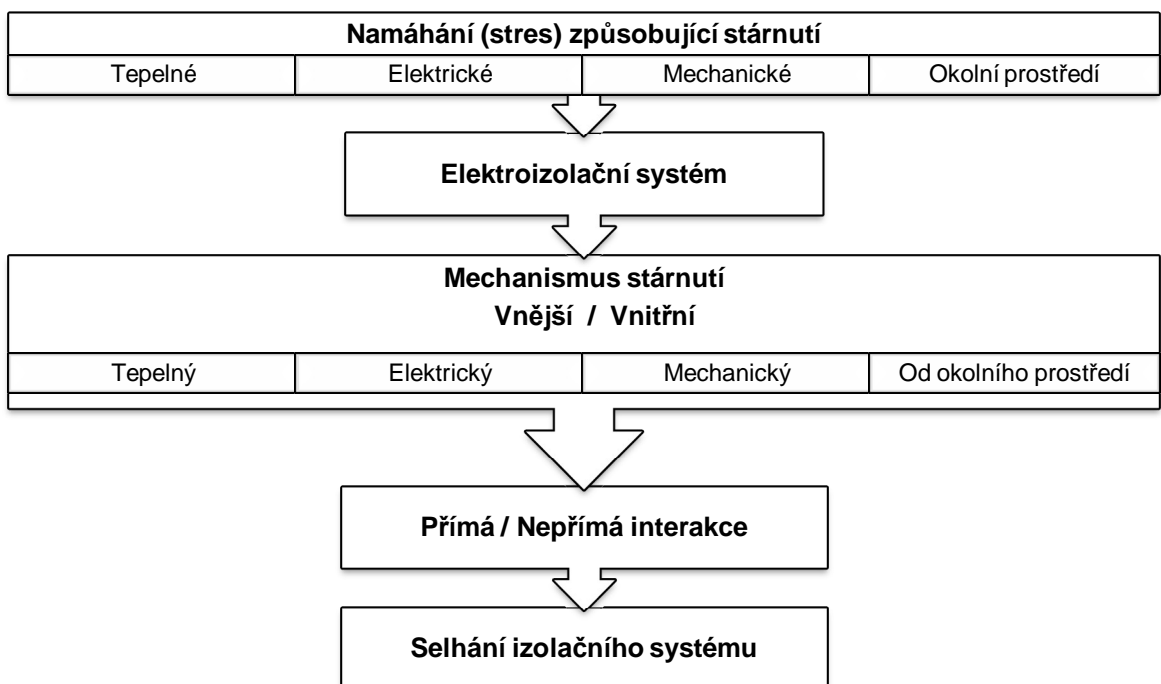
Stresových vlivů zpravidla působí vždy několik najednou současně, a tedy můžeme mluvit o "týmovém namáhání"<sup>3</sup> izolace. Ještě než se jednotlivými druhy namáhání budeme podrobněji zabývat, je důležité zohlednit časový rozměr a provést jejich rozdělení na:

- *konstantní namáhání,*

kteří představuje provozní teplota, střídavé napětí 50 Hz a mechanické namáhání od magnetické indukce 100 Hz. Životnost vychází z počtu provozních hodin. A dále na:

- *přechodové<sup>4</sup> namáhání,*

kteří zpravidla pochází od zkratů. Zde je životnost izolačního systému úměrná počtu těchto namáhání.



Obr. 2.1 Schematické znázornění základního procesu stárnutí. [15]

<sup>3</sup> jinými zdroji uváděno též jako multistresové namáhání

<sup>4</sup> krátkodobé nebo také dynamické namáhání



## 2.1 Tepelné namáhání

Nejčastější příčina postupné degradace izolačního materiálu a jeho následného selhání je tepelné namáhání. Jejím hodnocením se budeme dále zabývat v následujících kapitolách. Izolační systém vinutí je nezbytné vždy hodnotit podle jeho schopnosti fungovat pod tepelnou zátěží. Zátěž způsobuje provozní teplota vinutí. Teplo vyvinuté Joulovými ztrátami z  $RI^2$ , ztrátami vířivými (Foucaultovy) proudy a ztrátami od bludných proudů v měděných vodičích. Dále je třeba zahrnout teplo vznikající ztrátami v magnetickém obvodu (hysterezní, vířivými proudy atd.). Ohřev izolace od dielektrické relaxace při polarizaci dielektrika v elmag. poli můžeme pro (v tomto případě velmi nízkou) frekvenci 50 Hz zanedbat. V moderních izolacích **vyšoká teplota způsobuje chemické reakce** (oxidaci u vzduchem chlazených strojů apod.) pokud tyto pracují nad svou provozní teplotou. **Oxidační procesy** způsobují křehnutí izolace nebo snižují soudržnost izolace (ztrátu pojivé síly nebo impregnantu) a mohou vést k oddělení jednotlivých vrstev izolace od sebe, tzv. proces delaminace. V případě oxidačního procesu se jedná o chemickou reakci prvního řádu, kde je rychlost reakce řízená **Arrheniovým zákonem**, který říká, že reakční rychlost je závislá na teplotě látek (reaktantů) takto:

- *Se zvyšující se teplotou se zvyšuje rychlostní konstanta a tím i reakční rychlost.*
- *Se snižující se hodnotou aktivační energie u katalyzovaných reakcí se zvyšuje rychlostní konstanta a tím i reakční rychlost.*

Z pohledu problematiky tepelného namáhání byl formulován následující základní vztah pro výpočet životnosti izolace (L, v hodinách) v souvislosti s její teplotou (T v Kelvinech):

$$L = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (2.1)$$

kde A a B jsou konstanty označované jako před-exponenciální faktor a jako aktivační energie. Jejich hodnoty jsou stanovené zpravidla experimentálně při zkouškách. Známe tvrzení<sup>5</sup>, že životnost vinutí se snižuje o 50 % pro každých 10 K nárůstu teploty, se této rovnici blíží, avšak ze dvou důvodů je rovnice (2.1) „pouze“ aproximací:

- *Rovnice platí jen při relativně vysokých provozních teplotách.*
- *Obvykle probíhá více chemických reakcí současně, a tudíž jednoduchý model*

---

<sup>5</sup> Montsingerovo pravidlo.



*počítající s reakční rychlostí prvního řádu není zcela platný.*

Zde Stone [2] také nepřesně uvádí, že pod prahovou hodnotou, která je různá pro každý izolační materiál, žádné tepelné stárnutí nenastane<sup>6</sup>. Nicméně protože rovnice ( 2.1 ) je pevně zavedená v normách, je obecně malá vůle tento model zpřesnit.

G. C. Montanari a L. Simoni [16] uvádějí Arrheniův model životnosti izolace ( $L$ , v hodinách) při tepelném namáhání ve tvaru<sup>7</sup>:

$$L = L' \cdot \exp\left(\frac{A_e}{k \cdot \Theta}\right) \quad (2.2)$$

kde  $A_E$  je aktivační energie degradačního procesu;  $k$  je Boltzmannova konstanta;  $\theta$  je absolutní termodynamická teplota a  $L'$  je životnost pro  $\theta = \infty$ . Rovnice ( 2.1 ) či ( 2.2 ) jsou **základem veškerých zrychlených zkoušek stárnutí** izolace, které se používají k odhadu "teplotní životnosti" vinutí a také pro stanovení teplotní třídy izolace.

Variantou teplotní zátěže je tepelně-mechanické tlakové namáhání, které se nejvýrazněji projevuje u velmi velkých strojů. Je známé, že změna zatížení stroje způsobí změnu teploty vinutí. Jestliže teplota vinutí rychle vzroste z klidové teploty na jeho provozní teplotu, měděné vodiče se axiálně roztáhnou s přibližně stejnou rychlostí. V některých případech, ale může být vyšší provozní teplota naopak prospěšná:

- *Zabraňuje navlhání vinutí (vysoušecí efekt) a vytváření vodivých cest na povrchu izolace.*
- *V případě vzduchových bublin vytvořených při chybách ve výrobní technologii může vyšší teplota způsobit zvětšení objemu izolace a tím vytlačení vzduchu z bublin což vede ke snížení částečných výbojů.*
- *Ve starších typech izolace, které jsou za nízkých teplot uvolněné v drážce (což způsobuje vibrace a abrazi izolace v provozu) opět působí vyšší teplota na zvětšování objemu a tím k vymezení těchto vůlí.*

<sup>6</sup> Toto tvrzení není zcela správné, jelikož vždy platí, že chemické reakce, tedy i stárnutí, probíhají za všech okolností i při všech teplotách. Ovšem, vždy se jedná o čas, který se úměrně zkracuje či prodlužuje. Je zřejmé, že při relativně nízké provozní teplotě se stárnutí výrazně zpomaluje, to však neznamená, že neprobíhá.

<sup>7</sup> Různých způsobů vyjádření Arrheniova zákona můžeme najít v odborné literatuře i více.

## 2.2 Elektrické namáhání

Elektrické, resp. napěťové namáhání je hlavním<sup>8</sup>, nikoli však jediným kritériem, pro stanovení tloušťky izolace statorového vinutí. Dále může elektrické napětí sítě přispívat k stárnutí izolace, pokud se vyskytnou částečné výboje (PD – Partial Discharges). Částečné výboje obsahují elektrony a ionty které "ostřelují" pevnou izolaci. Organické materiály jako jsou laky, polyestery, asfalty a epoxidové pryskyřice degradují pod tímto "ostřelováním" v důsledku rozbíjení (štěpení) určitých chemických vazeb jako například vazba C - H. Při dostatečně dlouhém čase částečné výboje vlivem eroze organických částí izolace vytvoří v místě svého působení otvor, což v důsledku vede k selhání a poruše. V případě přítomnosti částečných výbojů je účinek hladiny el. namáhání ( $E$  v kV/mm) na životnost izolace ( $L$  v hodinách) velmi často prezentován rovnicí:

$$L = c \cdot E^{-n} \quad (2.3)$$

kde  $c$  je konstanta získaná experimentálně při zkouškách a  $n$  je konstanta mocninné funkce<sup>9</sup>. Stejně jako u tepelného stárnutí, i zde platí, že pod prahovým napětím elektrického namáhání lze rychlost stárnutí zanedbat a pro zjednodušení situace počítat s tím, že se žádné stárnutí nevyskytuje. Toto prahové napětí je rovno zhášecímu napětí výbojů, kde  $E$  je pak rovno zhášecímu napětí výbojů dělené tloušťkou izolace. Někdy je  $E$  v rovnici ( 2.3 ) nahrazené  $E - E_0$ , kde  $E_0$  je mezní napětí pod kterým již stárnutí nenastává. Jestliže napěťové namáhání v závislosti na době do poruchy zakreslíme do grafu s logaritmickými osami, bude sklon čáry podle rovnice ( 2.3 ) roven  $n$ . Konstanta  $n$  je obvykle udávána pro izolační systémy strojů v rozsahu od 9 do 12. Jestliže předpokládáme, že hodnota  $n = 10$ , pak 2násobnému zvýšení napěťového namáhání odpovídá asi 1000násobné zkrácení životnosti izolace. Z toho je zřetelné, že **napěťové namáhání má velmi silný vliv na životnost izolace, při současném výskytu částečných výbojů**. I když zde uvádíme, že  $n$  je konstanta, v některých pramenech se uvádí, že  $n$  se může měnit s úrovní el. namáhání. Pak modelujeme vliv zatížení na životnost jako exponenciální průběh, příkladem je rovnice:

<sup>8</sup> Jedním ze základních parametrů izolačního materiálu je jeho elektrická pevnost. Její hodnota je dána podílem změřeného průrazného napětí  $U_p$  k/ke tloušťce izolantu  $h$ . Označuje se  $E_p$  a v praxi je nejčastěji uváděna v jednotkách kV/mm (kV/cm).

<sup>9</sup> V anglické literatuře je tato konstanta uváděna pod názvem "power-law".

$$L = a \cdot E^{-b \cdot E} \quad (2.4)$$

kde  $a, b$  jsou konstanty stanovované experimentálně. Nicméně, tento model se pro točivé stroje používá jen velmi zřídka. Jako u Arrheniova modelu pro tepelnou zátěž, i zde model dle rovnice ( 2.4 ) umožňuje provádět stanovení životnosti izolačního systému založené na zrychlených zkouškách stárnutí prováděných při vysokém napěťovém namáhání. Tento způsob hodnocení životnosti je již normalizován<sup>10,11</sup> a lze pomocí něj stanovit potřebnou tloušťku izolace pro tento způsob namáhání.

## 2.3 Mechanické namáhání

Jsou známé tři hlavní zdroje mechanického namáhání:

### 2.3.1 Odstředivá síla

V rotoru je izolační systém vystavený značné odstředivé síle. Toto (ne-vibrační) silové působení má tendenci mačkat nebo deformovat izolaci. Izolace buď má, nebo nemá schopnost, aby vydržela takové síly, což se záhy projeví. Schopnost izolace odolávat tomuto namáhání lze zkusit a hodnotit různými krátkodobými testy. S tímto namáháním je spojená jen velmi malá degradace a stárnutí izolace, ačkoli se vyskytují materiály mající sklon k "tečení za studena" směrem od silového působení, což může vést k poruše.

### 2.3.2 Magnetická síla

Další časté mechanické namáhání způsobuje elektrický proud síťového kmitočtu, který vyvolává oscilaci magnetické síly o dvojnásobné frekvenci. Tyto síly jsou výsledkem působení dvou magnetických polí excitované protékajícím proudem v horní a spodní části každé cívky/tyče v každé drážce statoru. Tyto pole spolu vzájemně interagují, a excitují síly, které působí na jednotlivé vodiče a stejně tak i na celou cívku/tyč, aby primárně vibrovaly v drážce směrem nahoru a dolů. Síla  $F$  působící v radiálním směru na horní cívku při 100 Hz pro 50 Hz protékající proud je pro 1 metr cívky/tyče dána vztahem:

---

<sup>10</sup> IEEE 1043–1996, "IEEE Recommended Practice for Voltage Endurance Testing of Form Wound Bars and Coils."

<sup>11</sup> IEC 60034, Part 18, Section 32 - 34, "Rotating Electrical Machines: Functional Evaluation of Insulation Systems: Test Procedures for Form-Wound Windings".

$$F = \frac{k \cdot I^2}{d} \quad [\text{kN/m}] \quad (2.5)$$

kde  $I$  je efektivní proud protékající Roebelovou tyčí, nebo  $I = n \cdot I_0$ , kde  $I_0$  je efektivní proud vodičem/tyčí násobený počtem závitů cívky,  $d$  je šířka statorové drážky v metrech a konstanta zohledňující prostorové uspořádání vodiče  $k = 0,96$ . Při zohlednění časové dimenze pro harmonický proud platí:

$$I = I_m \cdot \sin \omega t = I_m \cdot \sin(2\pi f t) \quad (2.6)$$

Po dosazení a úpravě dostáváme rovnici ( 2.5 ) ve výsledném tvaru:

$$F = \frac{k \cdot I_m^2 \cdot (1 - \cos 2\omega t)}{2d} \quad (2.7)$$

Tento vztah vyjadřuje čistou sílu působící na vinutí ve spodní části statorové drážky. Kromě tohoto silového namáhání je zde také síla o stejné frekvenci pocházející z rotoru, způsobená jeho rotujícím magnetickým polem. Tato síla také působí na vinutí/tyče statoru, ale tvoří pouze zhruba 10% celkové radiální síly.

Jestliže jsou cívky ve statorové drážce volné, způsobí tyto síly vibraci a základní izolace se odírá o povrch drážky. Podobně působí magnetické síly v čelech vinutí, kde může docházet při nedostatečném upevnění k vibracím mezi sebou navzájem, nebo vůči klínování nebo vůči podpěrné konstrukci a opět o odírání izolace. Na rozdíl od tepelných a napěťových namáhání, zde nemáme vhodné modely, které by popisovali vztah mezi amplitudou kmitů a degradací resp. životností izolace. Určité modely můžeme v odborné literatuře najít, ale jsou špatně aplikovatelné a neposkytují základ pro zrychlené zkoušky stárnutí pod vibrační zátěží. Je pravda, že lze provádět výpočty, při kterých modelujeme statorovou (Roebelovu) tyč jako vrstvený vetknutý nosník a dojít k výsledkům poskytující vztah mezi počtem cyklů do poruchy a amplitudou kmitů, ale v odborných kruzích tyto výpočty zatím nebyly v širší míře přijaty.

### 2.3.3 Přechodné jevy

Třetí důležité mechanické namáhání způsobují přechodné jevy: zkraty obecně, zapínání motorů nebo vypnutí ze synchronismu v případě generátorů. Tyto jevy způsobují přechodové proudy, které mohou být 5x i vícekrát větší než běžný provozní statorový proud. Výsledkem je magnetická síla 25x nebo vícekrát silnější než za normálního provozu. Síly úměrné stejnosměrné složce přechodového proudu dle rovnice ( 2.5 ) mají tendenci ohýbat cívky-tyče v čelech vinutí. Pokud vinutí těmto silám neodolá, může dojít k tvorbě prasklin v izolaci. Jestliže se přechodové děje vyskytují častěji, pak se čela vinutí postupně uvolní a dál pokračují děje popsané v této stati výše.

Opět není determinován žádný model, který by dával přehled, jakému počtu přechodovým dějům může vinutí, resp. izolace odolat. Namísto toho výrobci velkých točivých strojů provádějí výpočty sil pro rozličné situace přechodových dějů, které se mohou v praxi vyskytnout a podle toho stanovují, zda vinutí tomuto jednotlivému zatížení odolá. Stárnutí zde obvykle není bráno v potaz.

## 2.4 Namáhání z vnějšího prostředí (okolní vlivy)

Namáhání vlivem vnějšího prostředí je souborem faktorů, které pocházejí z prostředí obklopujícího generátor, a které mohou vést k poruše. Jedny z těchto faktorů jsou:

- *vlhkost kondenzující na/v izolaci vinutí,*
- *olej z ložisek nebo ze systému olejového těsnění ve vodíkem chlazených strojích,*
- *vysoká vlhkost,*
- *agresivní chemikálie,*
- *abrazivní částice obsažené v chladicím vzduchu nebo ve vodíku,*
- *částice uvolněné ve stroji z opotřebenosti brzdových čelistí (pokud jsou použity) nebo uhlík z opotřebenosti kartáčů (pokud jsou použity),*
- *nečistoty a úlomky zanesené do stroje z okolního prostředí, jako je hmyz, polétavý popílek, uhelný prach, a další prachové částice, které jsou spojeny s průmyslovou produkcí (cement, celulóza, chemické zbytky, atd.),*
- *radiace.*

Každý z těchto vlivů může ovlivnit izolaci statoru a rotoru různým způsobem. V některých případech tyto "ovlivňující faktory" sami o sobě nezpůsobí stárnutí, ale v

kombinaci s dalším namáháním mohou vést ke stárnutí a degradaci izolace. Například, vlhkost a/nebo olej, kombinovaný s částečně vodivými částicemi (např. částicemi uhlíkového kartáče a tak dále.) může vytvořit vodivý film přes izolaci, ve kterém následně způsobí napěťové namáhání povrchové proudy a elektrické (uhlíkové) stopy. Olej a špína v kombinaci s vlhkostí se mohou usazovat na rotoru, ve ventilačních otvorech statoru a mezi cívkami v čelech vinutí, kde blokují proudění chladicího vzduchu. To značně zvyšuje riziko tepelné degradace. Olej může také negativně působit jako lubrikant, který usnadňuje možný pohyb mezi vinutím a drážkami statoru nebo rotoru, což v důsledku vede k odírání izolace. Nízká vlhkost chladicího vzduchu zvyšuje elektrickou pevnost plynného prostředí, což paradoxně vede k větší aktivitě částečných výbojů v čelech statorového vinutí. Podobně chemikálie jako jsou kyseliny a ozon mohou rozkládat izolaci a snižovat její mechanickou pevnost. S těmito faktory často nelze přímo spojovat stupeň degradace izolace. Ve zrychlené zkoušce stárnutí jsou buď přítomny, nebo ne.

Radiace v důsledku nukleární reakce je poněkud odlišná od dalších faktorů. Radiace již sama o sobě může vést k rozštěpení chemické vazby a způsobit křehkost izolace. Vyšší radiační úroveň = rychlejší stárnutí. Proces je podobný tepelné degradaci s tím rozdílem, že povrch degraduje rychleji než vnitřek, což je u tepelné degradace naopak. Moderní izolační materiály mají práh necitlivosti cca 0.1 MGy (mega gray), a jsou způsobilé fungovat s dávkou 2 MGy po dobu jejich životnosti, kdy pracují v prostředí s ionizujícím zářením. To se naštěstí může vyskytovat jen v jaderných elektrárnách, na vojenských plavidlech apod.

## 2.5 Vícečetné namáhání několika faktory současně

Mnoho z výše popsaných procesů vedoucí k poruše ve skutečnosti nezávisí jen na jednotlivém namáhání, způsobující postupnou degradaci izolace vinutí. Dva nebo více faktorů od různých způsobů namáhání působící vzájemně, mohou mít za následek degradaci. K již jmenovaným v předchozím textu lze zahrnout další příklady:

- *Tepelná degradace v statorovém vinutí vedoucí k delaminaci, což umožní částečným výbojům erozi a vytvoření otvoru v izolaci.*
- *Únavová trhлина v měděném vodiči přímo chlazeném vodou, způsobená vibracemi v koncích vinutí mající za následek únik vody do izolace, což v důsledku vede k zemnímu spojení.*
- *Degradace polovodivého nátěru izolace, způsobená nekázní při výrobě nebo*

***provozem generátoru za vysokých teplot opět vede k částečným výbojům. Ty vytvoří ozon, který následně chemicky napadá izolaci.***

Klíčovým faktorem rychlejšího procesu vedoucího k poruše izolačního systému je přítomnost dvou nebo více stresových faktorů.

G. Montanari a L. Simoni se ve své práci [16] pokusili vytvořit matematické modely vícečetného namáhání. Příkladem je kombinace tepelně-napětově-mechanického namáhání popsaná rovnicí:

$$L = L_0 \exp\left\{\left[h - bT - b'' \cdot (M - M_0)\right] \cdot (E - E_0) - (m - b'T) \cdot (M - M_0) - BT\right\} \quad (2.8)$$

kde  $L$  je životnost izolace při více-stresovém namáhání,  $L_0$  je referenční životnost (referenční hodnota životnosti; při referenční teplotě, myšleno za nepřítomnosti jiného namáhání způsobující stárnutí),  $T$  je tepelné,  $M$  je mechanické a  $E$  je elektrické namáhání působící na izolaci,  $M_0$  a  $E_0$  jsou referenční (prahové) hodnoty mechanického resp. elektrického namáhání,  $h$  je koeficient vyjadřující elektrickou pevnost pro exponenciální model,  $b$  je nezávislá konstanta stanovená zpravidla experimentálně při zkouškách,  $m$  je koeficient mechanické odolnosti a  $B$  je základní parametr popisující tepelnou odolnost.  $B$  souvisí s půlicím intervalem HIC (3.3); lze ho vyjádřit jako podíl  $A_E$  (aktivační energie degradačních procesů) ku  $k$  (Boltzmannova konstanta). I přes použitou linearizaci některých proměnných je výsledný model poměrně složitý.

Je vidět, že modely stárnutí, které by umožnily výrobcům velkých točivých strojů predikovat schopnost izolace pracovat pod tímto "multistresovým" zatížením, by musely být velmi komplexní. Z těchto důvodů jsou zatím veškeré pokusy zahrnout všechny faktory do takovýchto modelů v podstatě nepoužitelné.

### 3 Hodnocení tepelné odolnosti dle ČSN EN 60 085 a ČSN EN 60 216

#### 3.1 Současný vývoj ve zkoušení tepelné odolnosti elektroizolačních materiálů (EIM)

Snaha co nejvíce zefektivnit současné elektrické stroje nutí konstruktéry a projektanty a výpočtáře vtěsnat do co nejmenších rozměrů co největší výkon. Tato snaha vede ke zvyšování nároků na izolační systém a zdůrazňuje tak důležitost této části elektrických strojů. Při výrobě je pak třeba věnovat mimořádnou pozornost vývoji, návrhu a technologii izolačních systémů. [9]

Údaje o tepelných schopnostech elektroizolačních materiálů založené na zkušenostech se časem ukázaly jako nepraktické z důvodu rychlého rozvoje polymerových a izolačních technologií na straně jedné a příliš dlouhého času potřebného k získání patřičných zkušeností z provozu na straně druhé. K získání potřebných informací je proto třeba procesy urychlit novými metodami jako jsou procesy zrychleného stárnutí a nové zkušební postupy. Z těchto důvodů byla vypracována řada norem IEC 60216. V těchto normách najdeme jak tyto procesy formulovat a jak interpretovat následně získané výsledky.[17]

Vypracované fyzikálně-chemické modely pro procesy stárnutí, vedly k takřka univerzálnímu přijetí Arrheniova modelu k popisu rychlosti stárnutí. Z tohoto modelu vyplývá pojem teplotního indexu (TI) jako jednobodové charakteristiky založené na výsledcích zrychleného stárnutí. (O teplotním indexu bude podrobněji pojednáno v následující kapitole.) Jak však ukázal čas, velké statistické odchylky zkušebních dat, které se vyskytly spolu s častou podstatnou odchylkou od ideálního chování, prokázaly potřebu zkoušek k získání platného základního fyzikálně-chemického modelu. Navíc byl shledán další komplikující faktor, a to že vlastnosti materiálu podrobeného procesu stárnutí se nemusí zhoršovat stejnou rychlostí. Pro různé aplikace mohou platit různé koncové body. Z tohoto vyplývá, že izolační materiál může mít i více než jeden teplotní index, který je odvozen například z měření různých vlastností a užití různých koncových bodů.[17]



## 3.2 Základní dokumenty

Hlavním dokumentem, kterým se řídíme, je v současnosti platná norma ČSN EN 60085 ed.2: Elektrická izolace - Tepelná klasifikace[18]. Norma je v platnosti od září 2008. Tato norma je českou verzí evropské normy EN 60085:2004 a má status české technické normy. Do vydání této současné normy platila dřívější ČSN 33 0250 z 1988-12-05, která byla s účinností od 2007-09-01 zrušena. Do uvedeného data platily obě dvě normy souběžně. Dalších souvisejících norem je celá řada, za nejvýznamnější pro naše hodnocení tepelné odolnosti je dnes uváděn soubor norem ČSN EN 60126. [17] Podkladem k této normě je norma IEC 60216, která popisuje vlastnosti tepelné odolnosti elektroizolačních materiálů a je složena z několika částí:

- *Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky;*
- *Část 2: Volba kritérií zkoušek;*
- *Část 3: Předpisy pro výpočet charakteristik dlouhodobé tepelné odolnosti;*
- *Část 4-1: Pece na stárnutí - Jednokomorové pece;*
- *Část 4-2: Pece na stárnutí - Přesné pece pro použití do 300 °C;*
- *Část 4-3: Pece na stárnutí - Vícekomorové pece;*
- *Část 5: Směrnice pro použití charakteristik tepelné odolnosti*

### 3.2.1 Změny proti předchozí normě

Změn je celá řada, nicméně největší se týká značení tepelných tříd. V ČSN 33 0250 bylo nejdříve zavedeno označení tepelných tříd písmeny Y, A, E, B, F, H a čísla 200, 220 a 250. Novější ČSN EN 60085 ed. 2 již zavádí označení tepelných tříd čísla. Porovnání číselného označení tříd a dřívějšího označení tříd písmeny je uvedeno v tabulce *Tab. 3.1* na str. 37 této práce.[18]

Užitečný doplněk k normě IEC 60216 je relativní teplotní index (RTI), získaný současným stárnutím známého referenčního materiálu se zkoušeným materiálem. Tímto způsobem lze eliminovat některé z nejistot zkoušek zrychleného stárnutí, jako například nejistoty spjaté s regulací teploty pece. Dále je třeba ještě uvést, že statistické testy jsou stále považovány za nezbytné. Z tohoto důvodu byl zaveden pojem půlící interval (HIC), který indikuje rychlost změn při stárnutí s teplotou.[17]

### 3.3 Vybrané základní pojmy

Abychom byli schopni správně definovat tepelnou odolnost izolantů a orientovat se v této problematice, je nutné zavést základní pojmy používané při stanovení tepelné odolnosti materiálů. Zde je uveden výběr některých podstatných pojmů tak, jak je definují zdroje [18] a [19]:

- ***EIM - elektroizolační materiál (electrical insulating material)***

Pevná látka se zanedbatelně nízkou elektrickou vodivostí, nebo jednoduchá kombinace takových látek, používaná k oddělení vodivých částí s různým elektrickým potenciálem.

- ***jednoduchá kombinace elektroizolačních materiálů (simple combination of electrical insulating materials)***

Kombinace EIM dodaná pro výrobu zařízení ve spojeném stavu. Příkladem může být ohebný materiál skládající se z papíru nalepeného na PET fólii. Elektroizolační materiály, které jsou spojované až v průběhu výrobního procesu zařízení, tvoří „jednoduchou“ kombinaci v tomto smyslu.

- ***EIS - elektroizolační systém (electrical insulating system)***

Zde izolační struktura, která obsahuje jeden nebo více elektroizolačních materiálů (EIM) společně s přidruženými vodivými částmi, použitá v elektrotechnickém zařízení.

- ***tepelná třída (thermal class)***

Zařazení a označení EIM/EIS, které se číselně rovná maximální teplotě použití ve stupních Celsia, pro kterou je EIM/EIS vhodný a je možno ho použít.<sup>12</sup>

- ***RTE - relativní index tepelné odolnosti (relative thermal endurance index)***

Je vyjádřen číselnou hodnotou teploty v °C a je stanoven porovnáním odhadnuté doby do dosažení koncového bodu kandidátského materiálu s odhadnutou dobou do dosažení koncového bodu kontrolního materiálu. Porovnání se dělá při teplotě jeho tepelné odolnosti (ATE). V předchozí normě ČSN 33 0250 byl uveden dnes ještě známý **Relativní teplotní index (RTI)**. Dnes je tento index uveden jako doplněk k normě IEC 60216. RTI je definovaný jako teplotní index zkušebního materiálu získaný z doby, která odpovídá teplotnímu indexu známého referenčního materiálu za předpokladu, že jsou oba materiály vystaveny stejnému stárnutí a také stejným diagnostickým procesům při porovnávací zkoušce.

---

<sup>12</sup> Pozn. dle definice ČSN EN 60085: „Může nastat potřeba přiřadit stejnému EIM/EIS různé tepelné třídy pro různé provozní podmínky. Označení, že nějaký elektrotechnický výrobek má konkrétní tepelnou třídu, neznamená a nesmí se z něj vyvozovat, že každý izolační materiál, použitý v jeho konstrukci, má stejnou tepelnou schopnost.“

- **ATE - Index stanovené tepelné odolnosti (assessed thermal endurance index)**<sup>13</sup>

Číselná hodnota teploty v °C, do níž má kontrolní materiál známé a vyhovující provozní vlastnosti v konkrétní aplikaci.<sup>14</sup>

- **kandidátský materiál (candidate material)**

Materiál, pro který chceme stanovit jeho tepelnou odolnost.<sup>15</sup>

- **kontrolní materiál (control material)**

Materiál se známou tepelnou odolností zjištěnou z provozních zkušeností, který se použije pro porovnávací zkoušky s kandidátským materiálem.

- **TI - teplotní index (temperature index TI)**

Je vyjádřen číselnou hodnotou teploty v °C, odvozenou z grafu závislosti jeho tepelné odolnosti pro stanovenou dobu 20 000 hodin (lze specifikovat i jinou dobu). Stanovuje se koncový bod a provádí se odvození charakteristik tepelné odolnosti experimentálním způsobem. Ve zkušebním postupu je třeba stanovit řadu hodnot, jako je tvar, rozměry, počet vzorků a dále také dobu expozice, popis souvisejících vlastností a metody jejich určení. Volba vlastností by měla významně korespondovat s funkcí materiálu při jeho praktickém použití. Neméně důležité je provádět kondicionování vzorků před a po testování. Kondicionování je důležité pro zajištění stejných podmínek pro všechny testované vzorky.[20]

- **HIC - půlicí interval (halving interval HIC)**

Číselná hodnota teplotního intervalu v kelvinech, který má za následek zkrácení doby pro dosažení koncového bodu při teplotě rovnající se TI o polovinu. Příklad grafického vyjádření tohoto intervalu je zřejmý z grafu Obr. 3.1.

- **graf tepelné odolnosti (thermal endurance graph)**

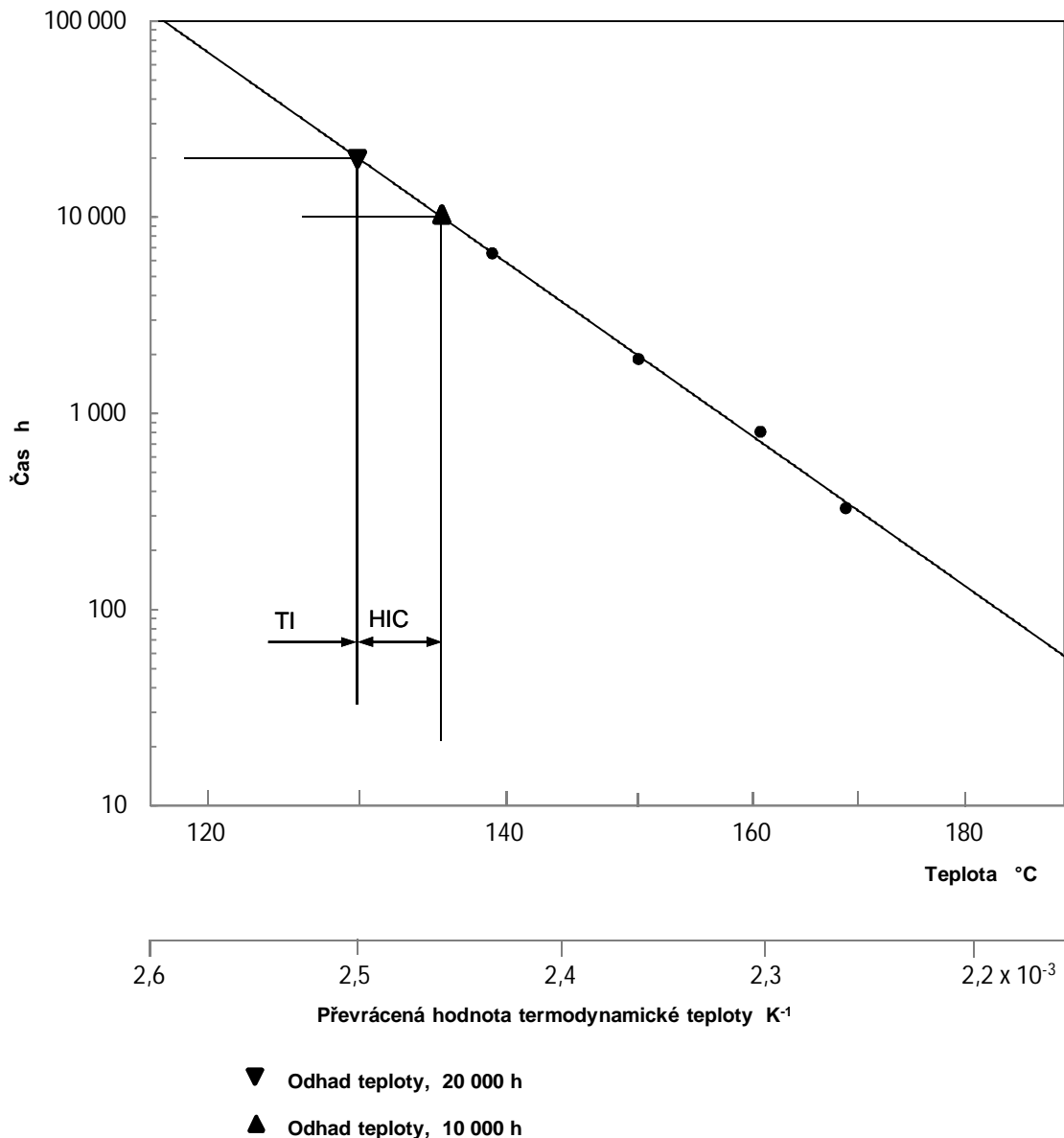
Graf, ve kterém zakreslují výsledky a měření při zkoušce tepelné odolnosti jako logaritmus doby pro dosažení specifikovaného koncového bodu oproti převrácené hodnotě termodynamické (absolutní) zkušební teploty – příklad takového grafu je na obrázku Obr. 3.1.

---

<sup>13</sup> Někdy se nazývá index "absolutní" tepelné odolnosti.

<sup>14</sup> Upozornění: Hodnota ATE může být pro stejný materiál v různých aplikacích odlišná.

<sup>15</sup> Určení se provádí současně probíhajícím tepelným stárnutím tohoto materiálu a kontrolního materiálu.



Obr. 3.1 Graf tepelné závislosti [17]

### 3.4 Tepelná třída

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, teplota je v elektrotechnických zařízeních velmi často převládajícím faktorem stárnutí působícím na elektroizolační materiály, proto jsou užitečné určité základní tepelné třídy, které jsou v širším měřítku mezinárodně uznávané. Je-li stanovena **tepelná třída pro elektroizolační materiál**, je tím míněna **nejvyšší teplota ve stupních Celsia, pro kterou je užití EIM vhodné**. Tepelná třída přiřazená materiálu použitému v izolačním systému neznamená automaticky, že tepelná třída systému je stejná jako u tohoto materiálu, nebo že tepelná třída systému je stejná jako u materiálu s nejnižším

označením třídy v případě, že v systému je použito více materiálů s různými označeními třídy.[18]

Teplotní třídou je maximální hodnota teploty, pro kterou je materiál vhodný v provozu. Dříve byly teplotní třídy označovány velkými písmeny.[9] Přehled teplotních tříd je uveden v tabulce *Tab. 3.1*.

*Tab. 3.1 Tepelná klasifikace elektroizolačních materiálů<sup>16</sup> – (převzato z normy[18])*

RTE nebo ATE	Tepelná třída	Předchozí označení
< 90	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	
> 220 - 250	220	
>250	250	

### 3.4.1 Příklady různých elektroizolačních materiálů (EIM) pro základní teplotní třídy

Mentlík [9] uvádí přiřazení základních konstrukčních materiálů k jednotlivým teplotním třídám takto:

- **90(Y):** *Papír, dřevo, bavlna, hedvábí, přírodní impregnanty, minerální oleje.*
- **105 (A):** *Tvrzené materiály třídy 90 impregnované lakem nebo izolačním olejem.*
- **120(E):** *Tvrzený papír, přírodní tkanina v kombinaci s fenolickou pryskyřicí.*

<sup>16</sup> Tato tabulka poskytuje označení tepelné třídy odpovídající různým teplotním intervalům RTE pro EIM. Velká písmena ve třetím sloupci odkazují na označení třídy v dřívějším vydání IEC 60085 (1984). Označení "Y" se vztahuje také na hodnoty RTE nižší než 90.

- **130(B):** Skleněná vlákna nebo sulfátový papír v kombinaci s fenolickými pryskyřicemi nebo některými upravenými asfalty. Anorganický materiál tvrzený pojivem.
- **155(F):** Kompozitní materiály ze skleněné tkaniny, epoxidové nebo polyesterové pryskyřice a slídového papíru, polyethyltereftalátové (PET) rohože a fólie, aramidové materiály, polyesterové laky. Jde často o materiály třídy 130, které jsou vylepšené pojivy, silikonem nebo alkydovými laky s vyšší tepelnou odolností.
- **180(H):** Silikonové pryskyřice, modifikované epoxidové pryskyřice, aramidy, polyamidy, slídové materiály, skleněné tkaniny. Zpravidla materiály zhotovené z anorganického materiálu pojeného silikonovou pryskyřicí nebo lepidlem ekvivalentních technických parametrů.
- **< 200:** Materiál je 100% vyroben z anorganických materiálů.

Podrobnější přehled elektroizolačních materiálů<sup>17</sup> je uveden v tabulce Tab. 3.2 :

Tab. 3.2 Přiřazení používaných elektroizolačních materiálů (EIM) pro základní teplotní třídy [21]:

Třída izolace	Hlavní (H) /vedl. (V)	Izolační materiál	Izolační pojivo, látka, nebo povlakový materiál použitý společně s izolantem specifikovaným v předchozím sloupci	Ve spojení s impregnantem
90 (Y)	H	Bavlna, hedvábí, nebo další přírodní rostlinná nebo živočišná vlákna O Regenerovaná celulóza O Celulóza acetát O Polyamidové vlákno O Papír a výrobky z papíru O Lepenka O Fibr O Dřevo O Anilínová pryskyřice Močovinnová pryskyřice	Žádný	Žádný
	V	Akrylová pryskyřice Polyetylen Polystyren Vinylchlorid (měkký nebo tvrdý) Vulkanizovaný přírodní kaučuk	Žádný	Žádný

<sup>17</sup>Většina materiálů je často pouze známa pod obchodními názvy konkrétních výrobců. Tomu je dobré se při základní klasifikaci vyhnout, a proto jsou použity obecné chemické a technické názvy

105 (A)	H	Impregnovaná nebo do izolační kapaliny ponořená bavlna, hedvábí, nebo další přírodní rostlinná a živočišná vlákna O Regenerovaná celulóza O Celulóza acetát O Polyamidové vlákno O Papír a výrobky z papíru O	Žádný	Olejem modifikovaná přírodní pryskyřice O Keramika, kopálová pryskyřice O Ostatní přírodní pryskyřice O Deriváty celulózy Lak O Materiály s vyšší tepelnou odolností O Izolační olej a syntetický izolační olej O
		Lepenka O Fibr O Dřevo O	Žádný	
		Lakovaná tkanina (na základě bavlna, hedvábí, nebo další přírodní rostlinná nebo živočišná vlákna, regenerovaná celulóza, celulóza acetát, nebo polyamidové vlákno) O Lakovaný papír O	Olejem modifikovaná, přírodní nebo syntetická laková pryskyřice O	
		Vrstvené dřevo	Fenolová pryskyřice	
		Celulóza acetátová fólie O Acetobutyrtová fólie O Spojená polyesterová pryskyřice Smaltovaný drát olejovým lakem O Smaltovaný drát polyamidovou pryskyřicí Smaltovaný drát polyvinylformalem (1)	Žádný	
V	Polychloropren-nitrilová pryž	Žádný	Jako předchozí výše	
120 (E)	V	Smaltovaný drát polyuretanovou pryskyřicí Smaltovaný drát epoxidovou pryskyřicí	Žádný	Olejem modifikovaný asfalt a olejem modifikovaný syntetický lak Spojená polyesterová pryskyřice Materiál s tepelnou odolností vyšší než epoxidová pryskyřice
		Celulózou plněné tvářené výrobky O Laminovaná bavlna O Laminovaný papír O	Melaminová pryskyřice Fenolová pryskyřice O Fenol-furalová pryskyřice	
		Spojená polyesterová pryskyřice Triacetát celulóza fólie Polyetylen tereftalanová fólie O Polyetylen tereftalanové vlákno O	Žádný	
		Lakem ošetřená polyetylen tereftalanová tkanina	Olejem modifikovaná alkydová pryskyřice	
130 (B)	H	Skleněné vlákno ☐ O Azbest ☐ O	Žádný	Olejem modifikovaný asfalt a olejem modifikovaný syntetický lak O Spojená polyesterová pryskyřice O Epoxidová pryskyřice O Polyuretanová pryskyřice O (jestliže budou vystaveny silnému mechanickému namáhání, tak to nejsou vhodné materiály. V takovém případě, je lepší použít nemodifikovanou fenolovou pryskyřici.) Materiál s vyšší tepelnou odolností O
		Lakovaná skleněná tkanina O Lakovaný azbest O	Olejem modifikovaná syntetická laková pryskyřice	
		Výrobky ze slídy (s nebo bez podpůrného materiálu) O	Šelak, asfalt nebo živičné směsi O Olejem modifikovaná syntetická pryskyřice O Alkydová pryskyřice O Spojená polyesterová pryskyřice O Epoxidová pryskyřice	
	V	Sklolaminát O Laminovaný azbest O Tvářené výrobky plněné minerálním materiálem O	Melaminová pryskyřice O Fenolová pryskyřice O	
		Smaltovaný drát silikonovou pryskyřicí (2) Smaltovaný drát Polyetylen tereftalanem (2)	Žádný	
		Tvářené výrobky plněné minerálním materiálem Polyfluorinat etylenová pryskyřice (3)	Spojené polyesterovou pryskyřicí Žádný	
155 (F)	V	Skleněné vlákno ☐ O Azbest ☐ O	Žádný	Pryskyřice uvedené níže vykazující vynikající tepelnou

		Lakovaná skleněná tkanina O Lakovaný azbest O Výrobky ze slídy (s nebo bez podpůrného materiálu) O	Pryskyřice uvedené níže vykazující vynikající tepelná odolnost Alkydová pryskyřice Epoxidová pryskyřice Spojená polyesterová pryskyřice Polyuretanová pryskyřice Silikon alkydová pryskyřice O	odolnost Alkydová pryskyřice Epoxidová pryskyřice Spojená polyesterová pryskyřice Polyuretanová pryskyřice Silikon alkydová pryskyřice O Silikon fenolová pryskyřice O Materiál s vyšší tepelnou odolností O
180 (H)	H	Skleněné vlákno ▯ O Azbest ▯ O	Žádný	Silikonová pryskyřice O
		Lakovaná skleněná tkanina O Lakovaný azbest O	Silikonová pryskyřice	
		Pogumovaná skleněná tkanina O	Silikonová pryž O	
		Výrobky ze slídy (s nebo bez podpůrného materiálu) O Sklolaminát O Laminovaný azbest O	Silikonová pryskyřice O	
		Silikonová pryž	Žádný	
220 (C)	H	Slída O Keramika O Sklo O Křemík O Anorganické materiály s vlastnostmi podobnými výše uvedeným O (Poznámka: Nejvyšší přípustná teplota je omezená materiálem fyzikálními, chemickými, a elektrickými vlastnostmi materiálu pro každou pracovní teplotu).	Žádný	Anorganická pojiva jako sklo nebo cement O
		V	Lakovaná skelná tkanina O Lakované azbest - slídové výrobky O	Silikonová pryskyřice s vynikající tepelnou odolností (nejvyšší přípustná teplota 220 °C) O
	Polytetrafluoroethylenová pryskyřice (nejvyšší přípustná teplota 220 °C)		Žádný	

## Poznámka:

Materiály označené ▯ přísluší k aktuální tepelné třídě v případě, že jsou impregnovány materiálem uvedeným ve sloupci 5. Materiály označené O mají osvědčení "Thermal-Endurance Classifying Committee of the Institute of Electrical Engineers" Japonska a jsou dostatečně vhodné jako materiál konkrétní tepelné třídy.

## Další poznámky:

(1) Smaltovaný drát polyvinylformal je klasifikovaný do třídy 120 (E), (V) v tabulce IEC. Nicméně Japonci zjistili, že by měl být klasifikovaný do třídy 105 (A), pokud nevykazuje vynikající tepelnou odolnost.

(2) Smaltovaný drát silikonovou pryskyřicí, smaltovaný drát polyetylen tereftalanem. Při testech používající části zkoušených dílů, při Marlettenovo testu, nebo při motorovém testu, při nichž byl použit tento materiál jako drát pro vinutí, ukázaly tyto materiály tepelnou odolnost o cca 30- 40 °C vyšší než smaltovaný drát polyvinylformalem. Proto jsou zařazeni do teplotní třídy 130 (B).

(3) Polytrifluorinát etylenová pryskyřice. Mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou proměnné v závislosti na výrobních podmínkách. Při dobrém výrobním procesu dosahuje tepelná odolnost materiálu 130 °C po delší dobu.



### 3.5 Hodnocení tepelné odolnosti a klasifikace

Dle normy ČSN EN 60085 [18] je důležité připomenout, že tepelná klasifikace izolačních materiálů nemůže být použita pro izolační systém složený z těchto komponent, pokud předem neověříme její platnost. A naopak, tepelná klasifikace materiálu nemůže být odvozena z tepelné třídy izolačního systému, v němž je jednou komponentou. Proto je vždy důležité rozlišovat mezi EIM a EIS s přihlédnutím na příslušné normativy, které hodnotí jejich tepelnou odolnost.

- ***Elektroizolační materiály (EIM)***

Elektroizolační materiály a jednoduché kombinace izolačních materiálů hodnotíme podle ČSN EN 60216, s nezbytnými odkazy na očekávané provozní podmínky.

- ***Elektroizolační systémy (EIS)***

Elektroizolační systémy hodnotíme podle ČSN EN 61857 a zařídíme podle IEC 62114.

### 3.6 Hodnocení EIM

Celý zkušební proces včetně výpočtů a vyhodnocení je podrobně specifikován v ČSN EN 60216 a není nutno ho v této práci podrobně popisovat. Proto zde uvádím dle mého názoru 3 důležité body zkušebního procesu z této normy.

#### 3.6.1 Výběr teplot stárnutí a trvání cyklů

K výběru teplot stárnutí a trvání cyklů při plánování zkoušky tepelné odolnosti materiálu slouží tabulka

*Tab. 3.3.* Řádek v tabulce odpovídající odhadnutému TI uvádí navržené doby stárnutí ve dnech při teplotách pece, které se objevují v záhlaví příslušných sloupců. Výsledky na začátku zkoušky stárnutí mohou odůvodnit upravení cyklů stárnutí nebo dodatečných teplot stárnutí.[17]

Tab. 3.3: Navržené teploty a doby expozice[17]

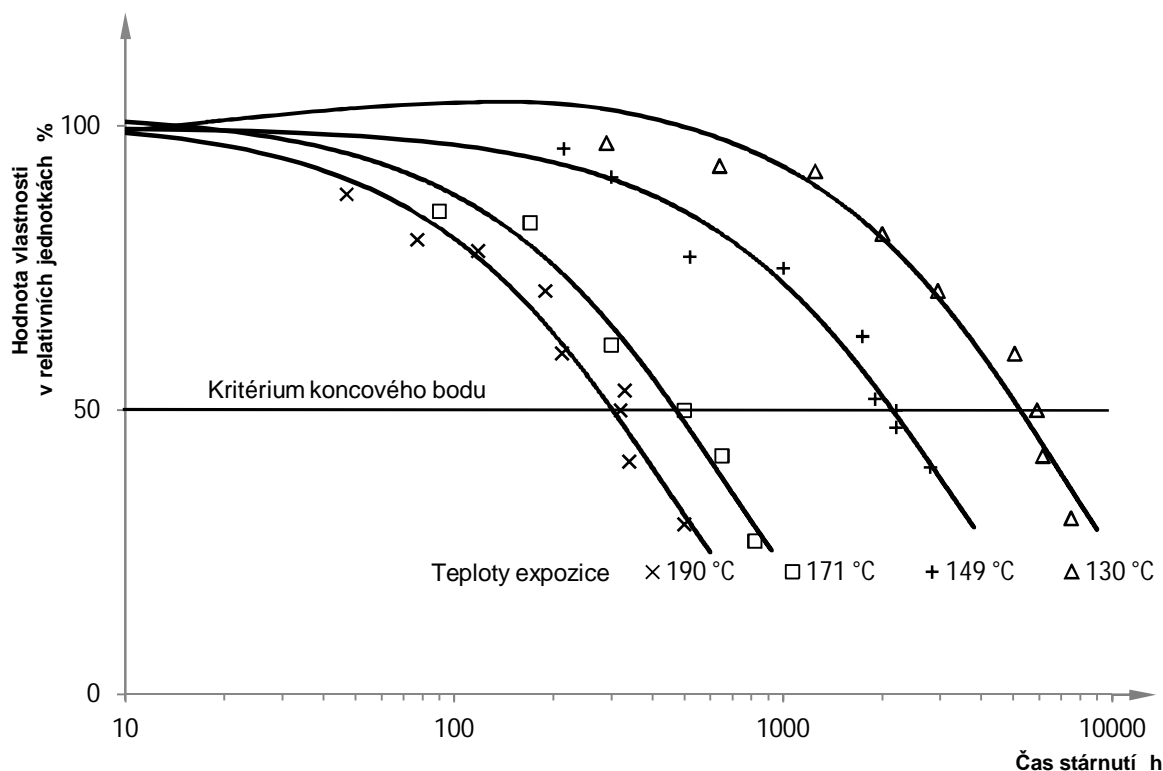
Předpokládaná hodnota TI v rozsahu °C	Teplota expozice °C																											
	Polička: trvání expozičního cyklu ve dnech																											
	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	360				
95 - 104	28		14		7		3		1																			
105 - 114		28		14		7		3		1																		
115 - 124			28		14		7		3		1																	
125 - 134				28		14		7		3		1																
135 - 144					28		14		7		3		1															
145 - 154						28		14		7		3		1														
155 - 164							28		14		7		3		1													
165 - 174								28		14		7		3		1												
175 - 184									28		14		7		3		1											
185 - 194										28		14		7		3		1										
195 - 204											28		14		7		3		1									
205 - 214												28		14		7		3		1								
215 - 224													28		14		7		3		1							
225 - 234														28		14		7		3		1						
235 - 244															28		14		7		3		1					
245 - 254																28		14		7		3		1				

POZNÁMKA 1 Tato tabulka je určena v první řadě pro cyklické ověřovací zkoušky a nedestruktivní zkoušky, ale může se použít také jako návod pro volbu vhodných časových intervalů pro destruktivní zkoušky. V tomto případě se mohou vyžadovat doby cyklů 56 dní, nebo i více.

POZNÁMKA 2 Při prodlužování zkušebního programu předpokládáním dodatečných vzorků při teplotě pod teplotou nižší původně plánované teploty stárnutí, se má pro učení TI brát v úvahu teplotní interval 10 K a trvání cyklu 42 dnů.

### 3.6.2 Vyhodnocení vlastností pro několik teplotních hladin v závislosti na čase stárnutí:

V každé teplotní skupině vzorků se získá hodnota vlastností pro každý vzorek po každém časovém intervalu stárnutí. Z těchto hodnot (je-li nutné interpolací - viz Obr. 3.2), se získá doba pro dosažení koncového bodu a následně se vypočítá její logaritmus jako hodnota na ose y.[17]



Obr. 3.2 Vlastnosti výběrového rozptylu - Určení doby pro dosažení koncového bodu při každé teplotě (destruktivní a nedestruktivní zkoušky) [17]

### 3.6.3 Protokol o zkoušce:

Výstupem vlastní zkoušky je protokol o zkoušce. Protokol o provedené zkoušce musí obsahovat:[17]

- *popis zkoušeného materiálu včetně rozměrů a všech expozic vzorků,*
- *zkoumanou vlastnost, zvolený koncový bod, a pokud je to procentní hodnota, pak výchozí hodnotu vlastnosti,*
- *zkušební metodu použitou pro zjištění vlastnosti (například odkazem na normu),*
- *všechny důležité informace o postupu zkoušky, například prostředí stárnutí,*
- *jednotlivé zkušební teploty s příslušnými údaji s rozlišením:*
  - pro nedestruktivní zkoušky, jednotlivé doby pro dosažení koncového bodu, s grafem změny vlastností s dobou stárnutí,
  - pro zkoušky odolnosti, počet a doby trvání cyklů stárnutí, s počty vzorků, které dosáhly koncového bodu během cyklů,
  - pro destruktivní zkoušky, doby stárnutí a jednotlivé hodnoty vlastností, s grafy změny vlastnosti v závislosti na době stárnutí.

- *graf tepelné odolnosti,*
- *teplotní index a půlící interval zaznamenaný v definovaném tvaru,*
- *hodnoty  $\chi^2$  a  $k^{-1}$  v případě nutnosti podle ČSN EN 60216-3,*
- *všechny poruchy v prvním cyklu podle ČSN EN 60216-3.*

Výsledek zapisujeme ve tvaru **TI = xxx, HIC = yy,y** [17]

### 3.7 Hodnocení EIS

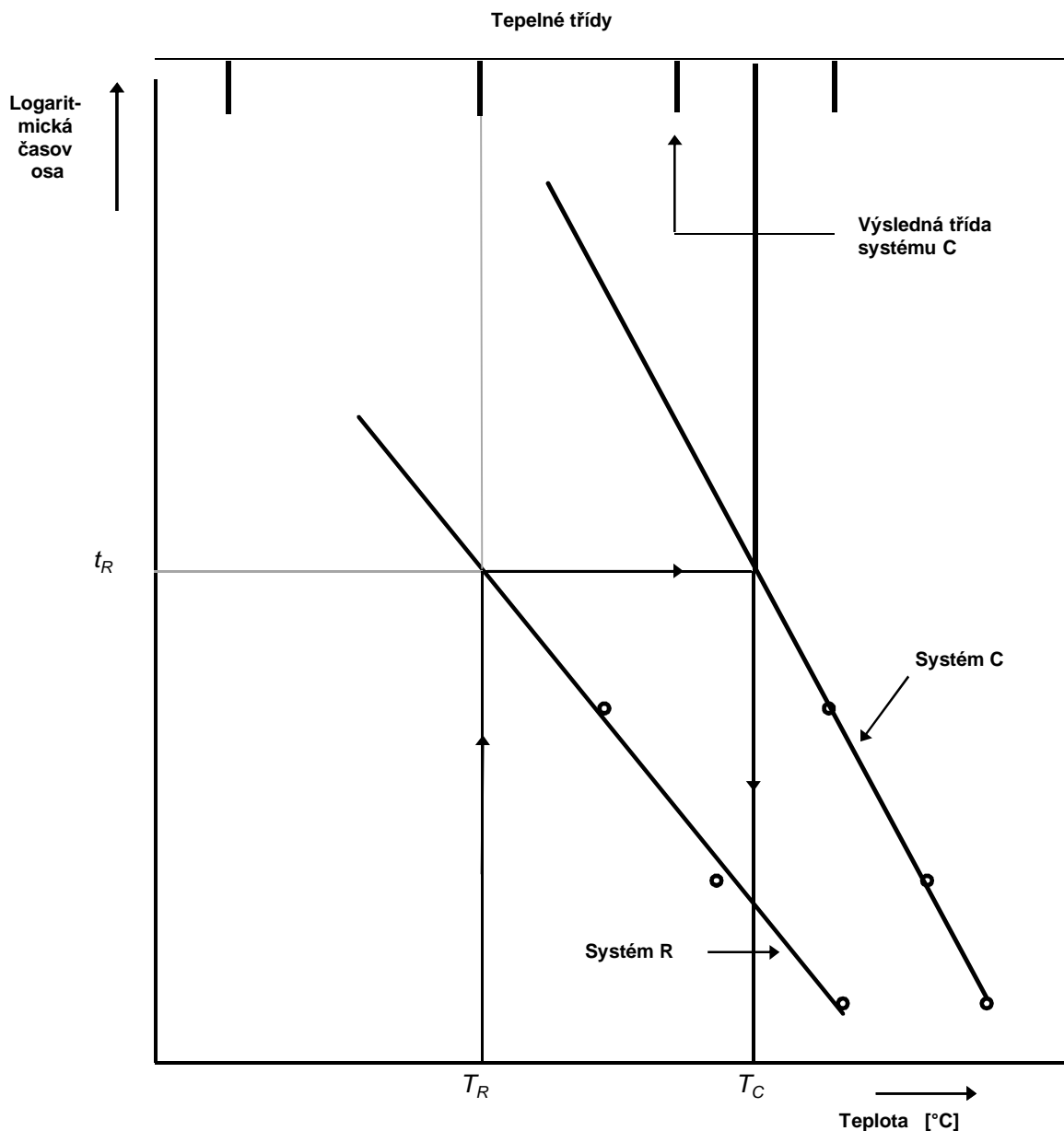
V praxi se častěji setkáváme s EIS než-li s EIM. Z tohoto důvodu je důležité i hodnocení izolačních systémů. Popis a metodika hodnocení EIS je uveden v normě ČSN EN 61857-1 [22] z které je čerpáno v této kapitole. Zkušební postupy pro tepelné hodnocení EIS jsou uvedeny v IEC 61857 (všechny části) a IEC 61858. Norma ČSN EN 61857-1 zavádí normalizovaný zkušební postup pro srovnávací hodnocení předpokládané životnosti elektroizolačních systémů (EIS) v souladu s IEC 60505.

EIS obsahuje mnoho různých komponent zvolených tak, aby vydržely měnící se elektrická, mechanická a tepelná namáhání vyskytující se v různých částech konstrukce elektrotechnického výrobku. Užitečná životnost EIS závisí na způsobu uspořádání jednotlivých komponent, na jejich vzájemném ovlivňování a na tom, jak každá z těchto komponent přispívá k elektrické a mechanické celistvosti EIS. Není tedy možné specifikovat jeden zkoušený předmět, který by reprezentoval všechny elektrotechnické výrobky.

Celý zkušební proces je opět podrobně specifikován ve výše uvedených normách, kde v každé části jsou popsány konkrétní zkoušené předměty: tloušťka izolace, povrchové cesty a ochrana proti výbojům, kde je to požadováno, musí odpovídat stanovenému maximálnímu jmenovitému napětí a normám pro zařízení používaným v praxi. Zkoušenými předměty mohou být skutečné elektrotechnické výrobky, jejich součásti, nebo nefunkční modely představující výrobky. Součásti a nefunkční modely mají zahrnovat všechny podstatné prvky EIS použitého v elektrotechnickém výrobku. Pro referenční a kandidátský EIS musí být použity identické zkoušené předměty.

Pro vyhodnocení zkoušky se provede lineární regresní analýza v Arrheniových souřadnicích (logaritmická doba života v závislosti na převrácené hodnotě absolutní teploty)

podle IEC 60216-5. Z výsledků zkoušky referenčního EIS se vypočítá doba života v hodinách pro EIS ATE ( $T_R$ ) referenčního EIS. Tepelná třída přiřazená kandidátskému EIS musí být rovná  $T_c$  nebo nižší než  $T_c$ . Není-li EIS ATE ( $T_R$ ) referenčního EIS k dispozici, musí být použita hodnota ve stupních Celsia jeho tepelné třídy. Výsledky mohou být znázorněny v grafu tepelné odolnosti vynesemím bodů střední doby života (logaritmické střední hodnoty), jak můžete vidět na *Obr. 3.3*. Do grafu se vynesou výsledky zkoušky referenčního EIS. Čára se poté extrapoluje na EIS ATE ( $T_R$ ) a odečte se odpovídající doba života v hodinách ( $t_R$ ). Vynesou se výsledky zkoušky kandidátského EIS. Čára se následně extrapoluje na  $t_R$  a odečte se odpovídající teplota ( $T_c$ ).  $T_c$  je pak EIS RTE kandidátského EIS.



Obr. 3.3: Arrheniův graf pro srovnání kandidátského systému C s referenčním systémem R [22]

## 4 Vyhodnocení vybraných parametrů tepelné odolnosti na dodaném souboru naměřených dat

Úkolem/cílem této práce je vyhodnocení dodaných dat. Hodnocení vzorků nebo souboru naměřených dat nezávislým hodnotitelem, který není seznámen s podmínkami expozice jednotlivých vzorků, přináší lepší objektivitu při vyhodnocení zkoušek. Hodnotitel není zatížen znalostí průběhu zkoušek jednotlivých vzorků. Avšak z důvodu komplexního pohledu na celý experiment, považuji za důležité uvést bližší informace a podrobnosti, týkající se použitých měřících metod.

### 4.1 Hodnocený EIM

Pro pokus byl vybrán dvousložkový kompozitní materiál pro plošné spoje s obchodním názvem Lamplex FR4. Jedná se o epoxidový laminát (tl. 1,5 mm) vyztužený skleněnými vlákny, založený na brómované epoxidové pryskyřici. Materiál je určen pro teploty do 135 °C. [23] Bližší informace o hodnoceném materiálu lze najít v materiálovém listu výrobce, který je uveden v příloze na straně č. 63.

### 4.2 Použité měřící metody

#### 4.2.1 Termické analýzy

Termické analýzy jsou podskupinou strukturálních analýz popisující změny fyzikálně-chemických vlastností látek při jejich ohřevu či chlazení.[20] Pomocí těchto experimentálních metod se zjišťují fyzikální a chemické vlastnosti materiálů jako dynamické funkce teploty a času. Zkušební vzorky jsou vystaveny předem definovanému teplotnímu programu ve zkušebním přístroji při stanovených atmosférických podmínkách (vzduch, inertní plyn) a v průběhu zkoušky se graficky zaznamenávají teplotní anebo časové změny sledovaného parametru. Z takto zjištěných grafických závislostí, které jsou charakteristické pro každý materiál, lze potom vyhodnotit [24]:

- *strukturní změny (teplotu skelného přechodu, fázový přechod v pevném stavu, tání/krytalizaci, sít'ování, hmotnost, vypařování, sublimaci),*
- *mechanické vlastnosti (elastické chování, tlumení),*
- *teplotní vlastnosti (specifickou tepelnou kapacitu, teplotu tání/krytalizace, roztažnost, koeficient roztažnosti),*

- *chemické reakce (rozklad a teplotní stabilitu v různých plynných prostředích, dehydrataci, chemické reakce v roztocích nebo plynné fázi, reakce s plyny).*

#### 4.2.2 Diferenční skenovací kalorimetrie (differential scanning calorimetry – DSC)

Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) sleduje tepelné účinky spojené s fázovými přechody a chemickými reakcemi jako funkci teploty a tím poskytuje řadu informací pro fyzikální charakteristiku materiálů. Metoda sleduje rozdíl v tepelném toku do/od vzorku a do/od referenčního materiálu při stejné teplotě a zaznamenává jej jako funkci teploty. Referenční vzorek je inertní materiál jako například oxid hlinitý nebo jen prázdná zkušební miska. V průběhu zkoušky je teplota obou materiálů, vzorku a referenčního materiálu, zvyšovaná konstantní rychlostí. Za konstantního tlaku platí, že změna tepelného toku je ekvivalentem změny entalpie. [25] Přístroj zaznamenává rozdíl tepelného toku mezi vzorkem a referenčním materiálem:

$$\Delta \frac{dH}{dt} = \left( \frac{dH}{dt} \right)_{\text{vzorku}} - \left( \frac{dH}{dt} \right)_{\text{reference}} \quad (4.1)$$

Tepelný tok může být buď kladný, nebo záporný podle druhu probíhající reakce<sup>18</sup>. Při endotermickém procesu (např. většina fázových přechodů, dehydratace, určité rozkladné reakce), je tepelný tok do vzorku vyšší než to referenčního materiálu. Z toho důvodu je  $\Delta dH/dt$  kladný. Při exotermickém procesu (např. krystalizace, síťování polymerů, oxidační reakce, určité rozkladné reakce) je to naopak, a  $\Delta dH/dt$  je záporný.[25]

#### 4.2.3 Termogravimetrická analýza (thermogravimetric analysis – TGA)

Termogravimetrická analýza (TGA) je analytická metoda sledující váhové změny materiálu při jeho ohřevu a zaznamenává jej jako funkci teploty, nebo za konstantní teploty sleduje váhové změny materiálu a zaznamenává je jako funkci času. Byla vyvinuta k určování teplotní stability materiálu a jeho prchavých složek. Měření obvykle probíhá v

---

<sup>18</sup> Exotermická (exotermní) reakce je chemická reakce, při níž se uvolňuje energie, obvykle ve formě tepla. Naopak endotermická (endotermní) reakce je chemická reakce, při níž se absorbuje energie (spotřebovává teplo).

atmosféře vzduchu nebo inertního plynu<sup>19</sup>. Hmotnost se zaznamenává jako funkce rostoucí teploty. Pro snížení oxidační rychlosti je měření někdy prováděno ve slabé kyslíkové atmosféře (1 až 5% O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> nebo He). Moderní přístroje často zaznamenávají kromě váhových změn také teplotní rozdíl mezi vzorkem a referenčním materiálem (diferenční termická analýza nebo DTA) nebo rozdíl tepelného toku do/od vzorku a do/od referenčního materiálu (diferenční skenovací kalorimetrie nebo DSC).[26] Pro naše měření byl použit právě takový kombinovaný přístroj, simultánní termický analyzátor TA Instruments SDT Q600. Tento analyzátor umožňuje simultánní záznam změny váhy a vývoje tepelného toku v průběhu ohřevu vzorku (tj. simultánní analýzu TGA + DSC). Přístroj je instalován na katedře technologií a měření Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. [27]



Obr. 4.1 Simultánní termický analyzátor TA Instruments SDT Q600

#### 4.2.4 Termomechanická analýza v dynamickém režimu (thermomechanical analysis in dynamic mode – DTMA)

Termomechanická analýza (TMA) je analytická metoda pro zjišťování vlastností materiálu pod mechanickým zatížením při změně teploty. Touto metodou je možné získat např. velmi zajímavý a důležitý parametr, a to součinitel délkové teplotní roztažnosti  $\alpha$  v oblasti před dosažením teploty skelného přechodu  $\alpha_1$  a následně po dosažení této teploty  $\alpha_2$ , tedy ve sklovitém či kaučukovitém stavu materiálu.[27] .

Při analýze našeho materiálu byla použita DTMA, kdy je zkušební vzorek (navíc oproti TMA), zatížen dynamickou, oscilující silou. Vlastnímu měření předchází poměrně náročná příprava normalizovaného zkušební vzorku, který se umístí mezi pohyblivou a pevnou část zkušebního zařízení. Možností vlastního uchycení je celá řada, ale v našem případě bylo použito velmi citlivé měření v tří-bodovém ohybu.

---

<sup>19</sup> Zpravidla se používá dusík, ale též například helium nebo argon.



Přes pohyblivé rameno je vzorek zatížen přesně stanovenou oscilací a je postupně zvyšována teplota. Jako funkce teploty, kmitočtu a napětí lze vyhodnotit řadu údajů [28]:

- *teplotu skelného přechodu,*
- *koeficient tepelné roztažnosti v daném teplotním intervalu,*
- *bod měknutí a tání materiálu,*
- *objemová relaxace nekystalických materiálů (smrštění),*
- *moduly pružnosti,*
- *změnu viskoelastických vlastností látek,*
- *zbytkové pnutí v materiálu,*
- *tečení (creep).*



Obr. 4.2 Termomechanický analyzátor TA Instruments TMA Q400EM

## 4.3 Postup zkoušky

### 4.3.1 Stanovení koncových bodů výchozí životnostní křivky

Vlastnímu vyhodnocení dat získaných z termických analýz (odstavec 4.2.1) předcházelo stanovení výchozí životnostní křivky pro daný materiál na základě jeho delaminace. Kritérium delaminace bylo vzato jako ukončení životnosti materiálu, tj. dosažení koncového bodu. Stanovení potřebných teplot a časů stárnutí bylo provedeno se zřetelem na požadované dosažení kritéria tohoto koncového bodu na základě předběžných orientačních zkoušek.

Vzorky zkušebního materiálu byly následně podrobeny zrychlenému tepelnému stárnutí v laboratorní peci. Průběh stárnutí vzorků byl v pravidelných intervalech vizuálně monitorován. Čas do první zjištěné delaminace vzorku byl vždy zaznamenán. Zjištěné hodnoty byly následně zpracovány. Jako koncový bod pro stanovení výsledné životnostní křivky pro danou úroveň teplotního namáhání byla stanovena doba, která je **průměrem** ze zjištěné doby do delaminace a předchozí doby, kdy materiál ještě nejevil známky poškození delaminací. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce *Tab. 4.1*.

Nebyly zcela dodrženy rozsahy expozičních teplot a použité extrapolace podle normy ČSN EN 60 216-1, která pro snížení nejistot při výpočtu charakteristiky tepelné odolnosti uvádí následující požadavky:

- *nejnižší expoziční teplota musí být taková, aby střední hodnota doby pro dosažení koncového bodu byla větší než 5 000 hodin,*
- *nejvyšší expoziční teplota musí být taková, aby střední hodnota doby pro dosažení koncového bodu byla větší než 100 hodin,*
- *extrapolace nutná pro stanovení TI nesmí být větší než 25 K.*

Z těchto důvodů byla dále použita metoda zjednodušeného postupu výpočtu, což citovaná norma [17] připouští.

Tab. 4.1 Přehled teplot zrychleného stárnutí s průměrem výsledných časů potřebných pro delaminaci vzorků

Teplota stárnutí [°C]	170	180	190	200
Reciproká teplota stárnutí [K <sup>-1</sup> ]	0,0022566	0,0022068	0,0021591	0,0021135
Koncový bod [hod]	624,0	180,0	90,0	32,5

#### 4.3.2 Sestrojení grafu tepelné odolnosti<sup>20</sup>

Získané hodnoty byly zaneseny do **grafu tepelné odolnosti** (*thermal endurance graph*) na Obr. 4.3. Pro sestrojení grafu byl použit nejvíce rozšířený tabulkový procesor Microsoft Excel, který disponuje potřebnými funkcemi s jedinou výjimkou. Není schopen rozumně graficky znázornit nelineární horizontální osu tak, aby byla odstupňovaná v nelineární teplotní stupnici v °C, orientované s teplotou vzrůstající zleva doprava. Z tohoto důvodu je v souladu s požadavkem normy [29] stupnice hlavní horizontální osy vyznačena v převrácených hodnotách termodynamické teploty vypočítaných podle vzorce:

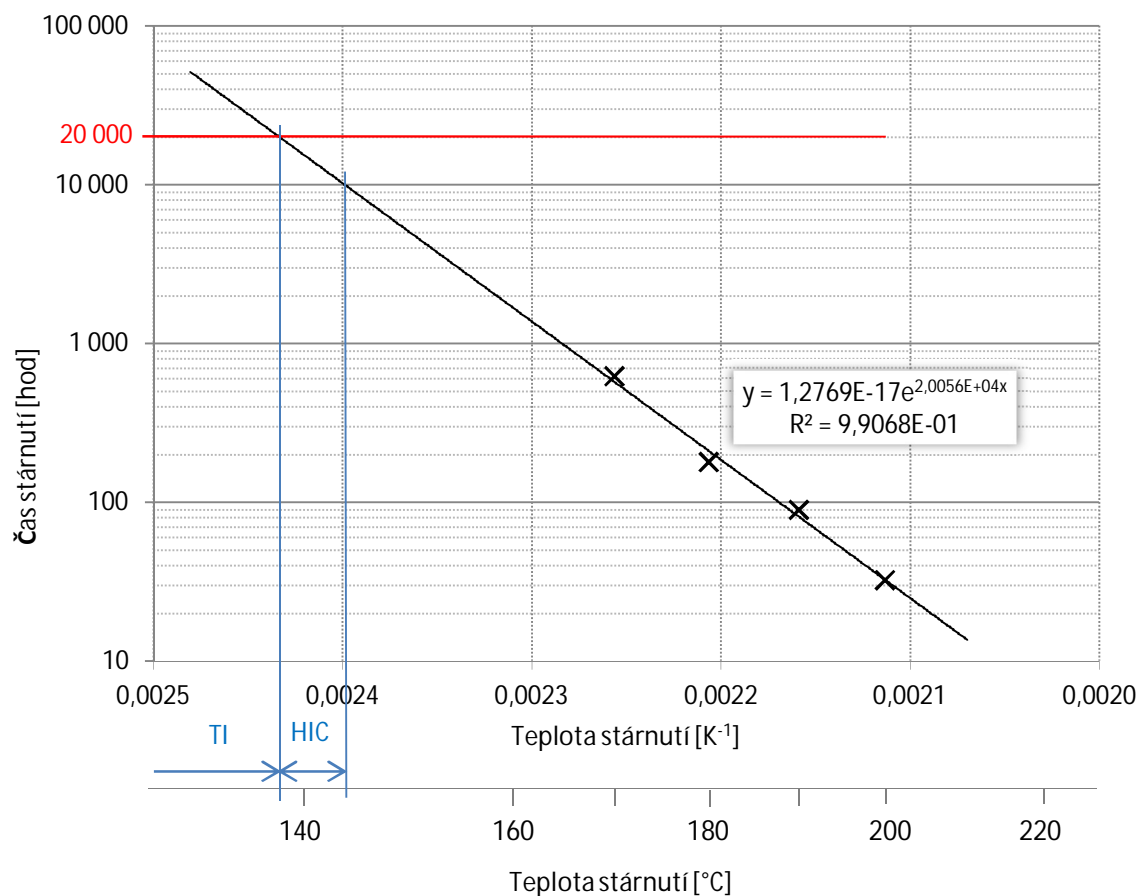
$$x_i = \frac{1}{(g_i + \Theta_0)} = \frac{1}{(g_i + 273,15)} \quad (4.2)$$

<sup>20</sup> graf, ve kterém je logaritmus doby pro dosažení specifikovaného koncového bodu ve zkoušce tepelné odolnosti zakreslený oproti převrácené hodnotě termodynamické (absolutní) zkušební teploty

Byla zakreslena a vypočítána regresní přímka jako funkce stárnutí, která vyjadřuje vztah mezi teplotou a dobou potřebnou k dosažení koncového bodu, tj. do doby delaminace materiálu, podle vztahu:

$$y_i = A \cdot e^{\frac{B}{\Theta}} = A \cdot e^{\frac{B}{\vartheta_i + 273,15}} \quad (4.3)$$

kde  $y_i$  je doba potřebná pro stálou změnu v hodnotě vlastnosti, A a B jsou konstanty regresní funkce (závisí na materiálu a diagnostické zkoušce),  $\Theta$  je absolutní teplota rovnající se  $\vartheta + \Theta_0$ ,  $\vartheta$  je teplota ve stupních Celsia (proměnná  $x$ ) a  $\Theta_0 = 273,15$  K.[29] Vypočítaná hodnota koeficientu determinace  $R^2$  je vyšší než 0,99, což ukazuje velice těsnou závislost mezi naměřenými hodnotami a zvoleným proložením. Tímto byly částečně eliminovány nejistoty vyplývající z výše zmiňovaného nedodržení expozičních teplot a časů. V grafu byla vyznačena horizontální přímka požadované normované životnosti pro stanovenou dobu 20 000 hodin.



Obr. 4.3 Graf tepelné odolnosti s vypočtenou rovnicí regresní přímky a koeficientem determinace.

Do takto sestrojeného grafu byla jako průsečík regresní přímky s požadovanou hodnotou životnosti zakreslena hodnota teplotního indexu (TI) v °C. Dále byla zakreslena hodnota půlícího intervalu (HIC) což je hodnota teplotního intervalu v kelvinech, který má za následek zkrácení doby pro dosažení koncového bodu při teplotě rovnající se TI o polovinu. [17]

### 4.3.3 Stanovení teplotního indexu

Z grafu tepelné odolnosti byly odečteny hodnoty:

$$TI_g = 138, HIC_g = 5,7$$

Výrobce udává katalogová hodnota maximální pracovní teploty je 125 – 130 °C, což je hodnota, která se blíží vypočítaným parametrům. Je tedy patrné, že i přes určité odchylky od normovaných postupů je přesnost získaných výsledků vyhovující.

## 4.4 Vyhodnocení pokusů z termických analýz

### 4.4.1 Teploty a doby expozice vzorků

Vzorky zkušebního materiálu byly v souladu s normou [17] podrobeny zrychlenému tepelnému stárnutí v laboratorní peci. Použité teploty expozice vzorků a jednotlivé doby stárnutí jim odpovídající, můžete vidět v následující tabulce *Tab. 4.2*.

*Tab. 4.2 Tabulka použitých teplot a dob expozice vzorků.*

Teplota stárnutí [°C]	Použité doby expozice vzorků [hod]													
170						96					192	288	384	480
180					48				96	120	144	168		
190				24			48	60	72	84				
200	10	15	20		25	30								

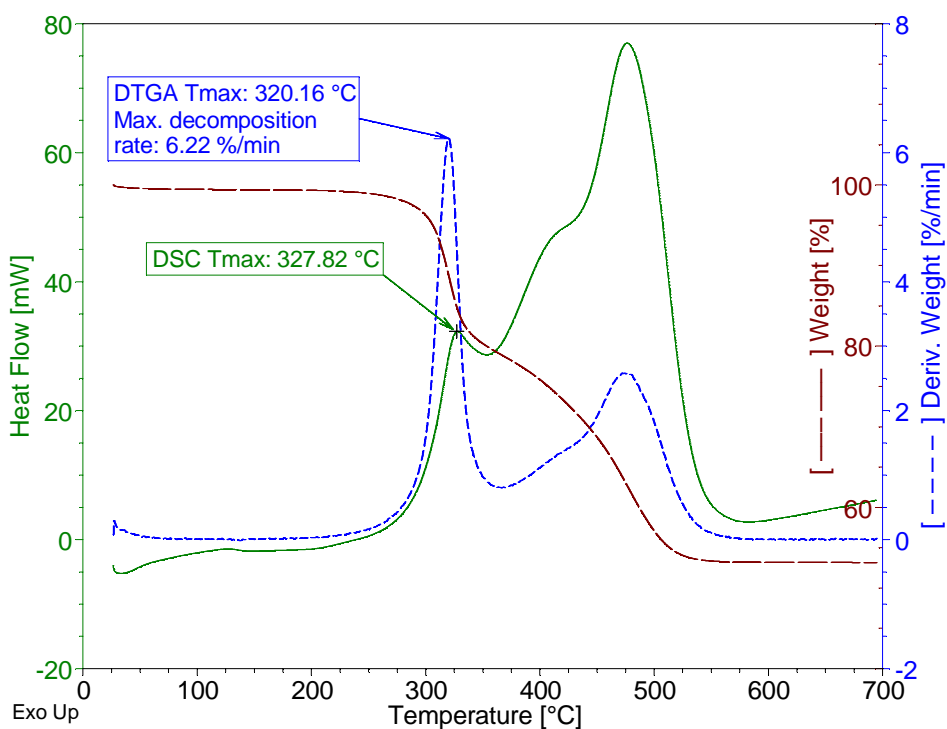
### 4.4.2 Vyhodnocení naměřených hodnot

Při simultánní termogravimetrické analýze byla zaznamenávána teplota lokálního maxima derivace termogravimetrické křivky (DTGA  $T_{max}$ ) při první rozkladné reakci, u které se očekávala požadovaná linearita při změně hodnot v závislosti na teplotě a času stárnutí zkušebních vzorků materiálu. Zjištěné maximum u každého vzorku odpovídá maximální rychlosti úbytku jeho hmotnosti při rozkladu pryskyřičného pojiva.[30] Naměřené teploty jsou zaznamenány v následující tabulce:

Tab. 4.3 Naměřené hodnoty DTGA -  $T_{max}$  pro stanovené teploty a časy zrychleného stárnutí.

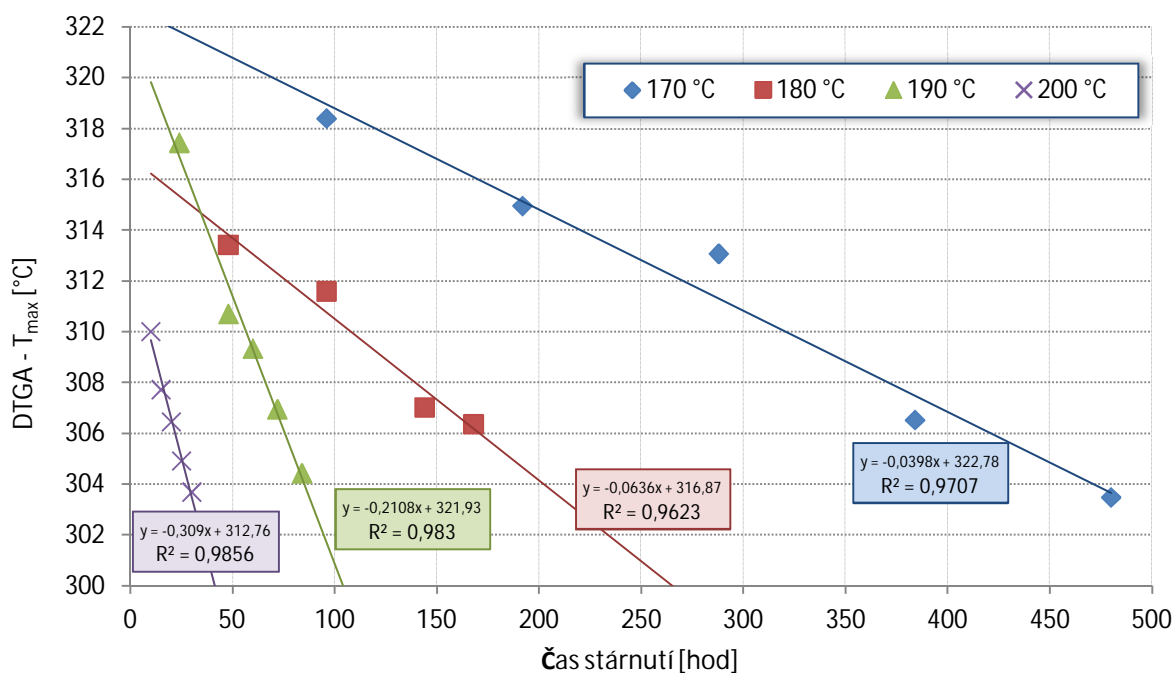
	Teplota stárnutí [°C]			
	170	180	190	200
Čas stárnutí [hod]	DTGA - $T_{max}$ [°C]			
10				310,03
15				307,74
20				306,47
24			317,46	
25				304,93
30				303,71
48		313,44	310,72	
60			309,35	
72			306,97	
84			304,45	
96	318,41	311,61		
120				
144		307,04		
168		306,38		
192	314,97			
288	313,09			
384	306,54			
480	303,50			

Způsob grafického vyhodnocení DSC a TGA měření je patrný z příkladu na následujícím grafu Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Příklad průběhů DSC, TGA a DTGA vč. záznamu sledovaných píků analyzovaného vzorku stárnutého 96 hodin při teplotě 170 °C [31]

Naměřené hodnoty pro každou teplotu stárnutí byly zaneseny do grafu zobrazující jejich závislost na čase stárnutí. Graf byl v tabulkovém procesoru doplněn o lineární spojnice trendu a vypočítanou rovnici lineární regrese. Vypočítané regresní rovnice jsou dále použité v odstavci 4.4.3 pro následné odvození kritériálních hodnot. Tabulkovým procesorem vypočítané hodnoty koeficientu determinace  $R^2$  neklesají pod 0,95 a potvrzují správnost zvoleného lineárního proložení.



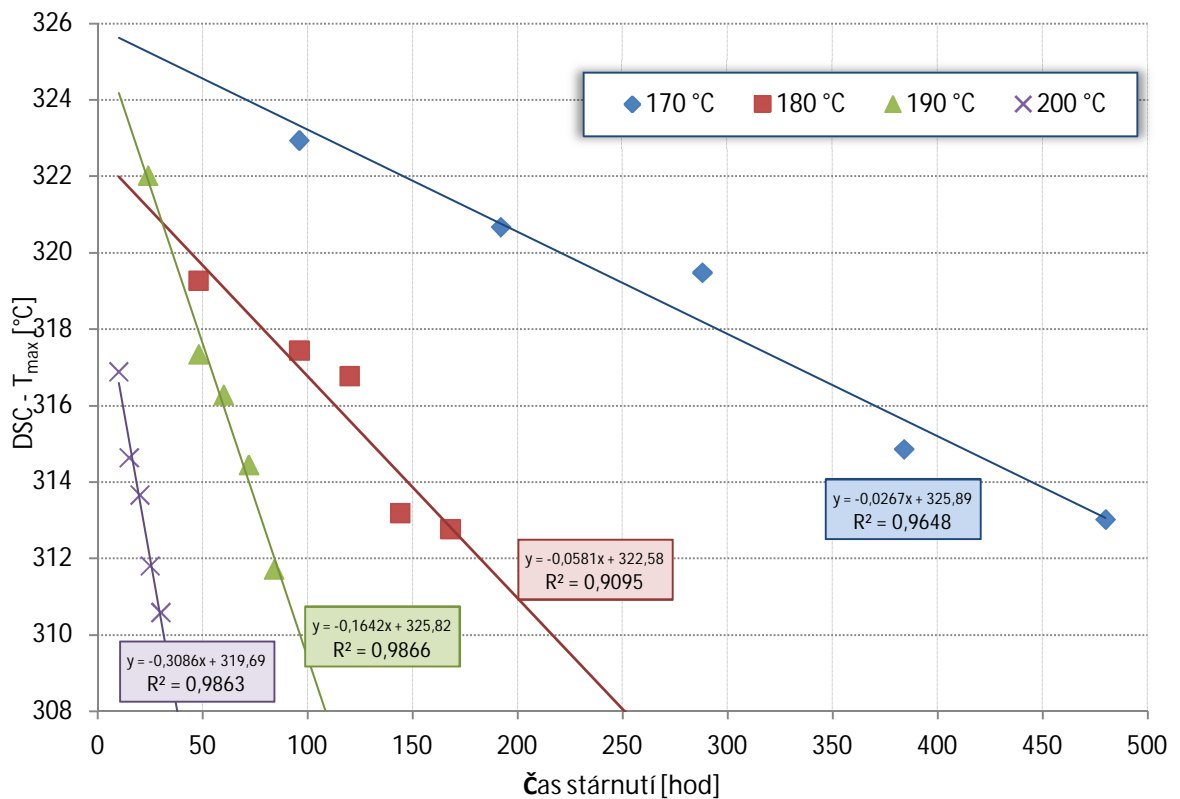
Obr. 4.5 Graf závislosti  $DTGA - T_{max}$  na čase stárnutí pro jednotlivé teploty stárnutí

V případě simultánní diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) vykazovaly požadovanou linearitu teploty dosažení maxima odpovídající první termo-oxidační reakci. Zjištěná maximum u každého vzorku odpovídá maximální hodnotě extermické reakce při rozkladu pryskyřičného pojiva. [30] Naměřené teploty jsou zaznamenány v tabulce Tab. 4.4 .

Tab. 4.4 Naměřené hodnoty DSC -  $T_{max}$  pro stanovené teploty a časy zrychleného stárnutí

	Teplota stárnutí [°C]			
	170	180	190	200
Čas stárnutí [hod]	DSC - $T_{max}$ [°C]			
10				316,89
15				314,64
20				313,66
24			322,02	
25				311,81
30				310,59
48		319,27	317,34	
60			316,28	
72			314,45	
84			311,71	
96	322,94	317,44		
120		316,77		
144		313,19		
168		312,77		
192	320,67			
288	319,48			
384	314,86			
480	313,02			

Naměřené teplotní údaje byly stejně jako u DTGA zaneseny do grafu Obr. 4.6, zobrazující jejich závislost na čase stárnutí.

Obr. 4.6 Graf závislosti DSC -  $T_{max}$  na čase stárnutí pro jednotlivé teploty stárnutí

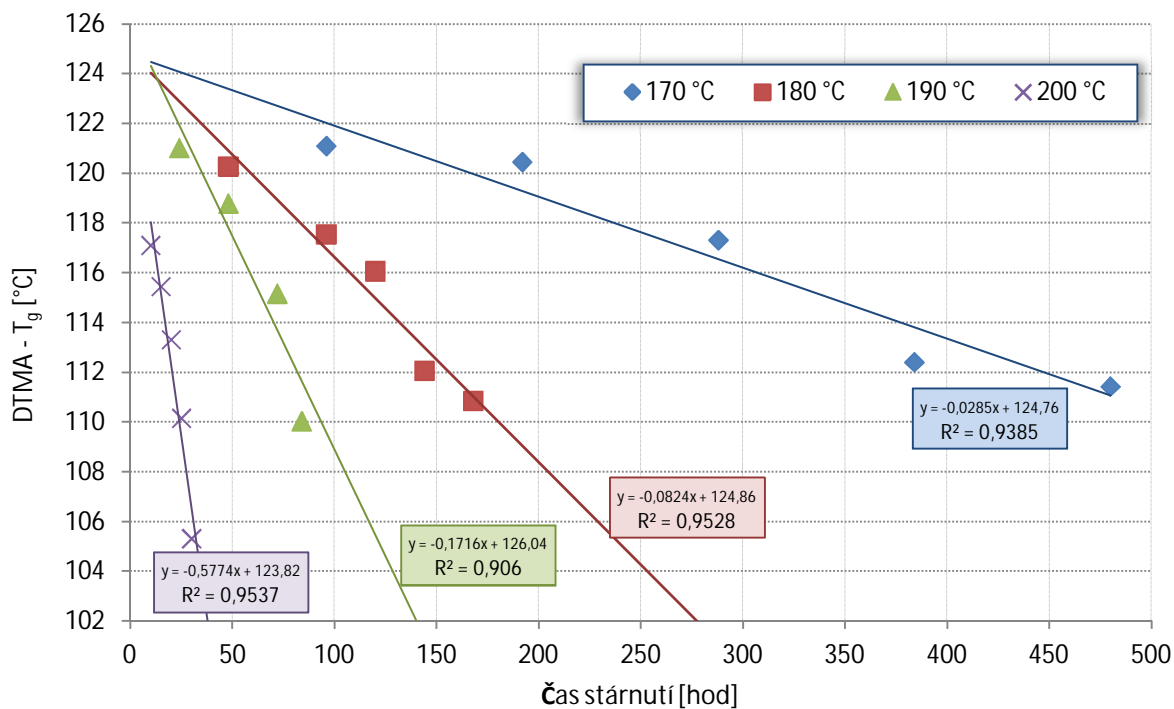
V případě poslední z použitých metod, termomechanické analýzy v dynamickém režimu (DTMA), byla zaznamenávána teplota skelného přechodu  $T_g$ , která byla vyhodnocovaná z maxima píku ztrátového modulu  $E''$ . [30]

Tab. 4.5 Naměřené hodnoty DTMA -  $T_g$  pro stanovené teploty a časy zrychleného stárnutí

	Teplota stárnutí [°C]			
	170	180	190	200
Čas stárnutí [hod]	DTMA - $T_g$ [°C]			
10				117,11
15				115,45
20				113,32
24			121,03	
25				110,16
30				105,32
48		120,28	118,79	
60				
72			115,17	
84			110,04	
96	121,10	117,56		
120		116,07		
144		112,06		
168		110,85		
192	120,46			
288	117,32			
384	112,41			
480	111,43			

Naměřené hodnoty byly zpracovány totožným způsobem jako v předchozích dvou případech. Zjištěné výsledky ukazují pokles naměřených hodnot v lineární závislosti na postupující dobu stárnutí, z čehož lze usuzovat na zvyšující se degradaci síťování polymeru pojava. Polymer se stává vlivem stárnutí více citlivý na teplotní namáhání. [30]



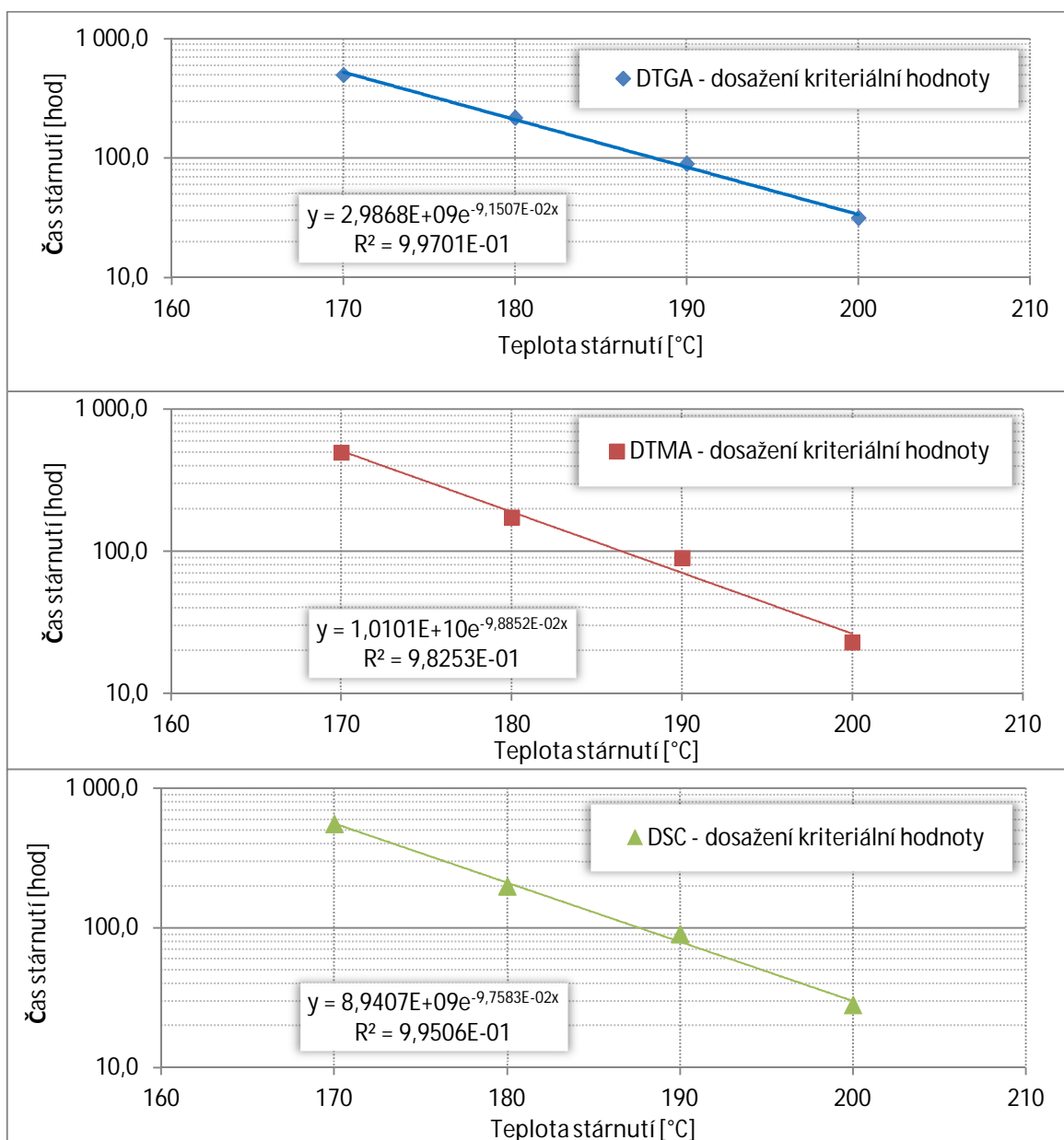

 Obr. 4.7 Graf závislosti DTMA - T<sub>g</sub> na čase stárnutí pro jednotlivé teploty stárnutí

#### 4.4.3 Odvození kritériálních hodnot a výpočet rovnic

Kritériální hodnoty byly odvozeny z časů delaminace. Byla zvolena teplota stárnutí 190 °C, pro kterou byl již dříve zjištěn koncový bod životnosti materiálu 90 hod (čas delaminace). Tato kritériální hodnota byla použita pro stanovení výchozích bodů křivek termických analýz na teplotě stárnutí 190 °C. Pro zjištění zbývajících třech hodnot pro teploty 170, 180 a 200 °C byly použity jednotlivé regresní rovnice, vypočítané za použití vestavěných funkcí tabulkového procesoru Microsoft Excel, z grafů uvedených v odstavci 4.4.2.

Tab. 4.6 Vypočítané kritériální hodnoty z regresních rovnic pro DTGA, DTMA a DSC.

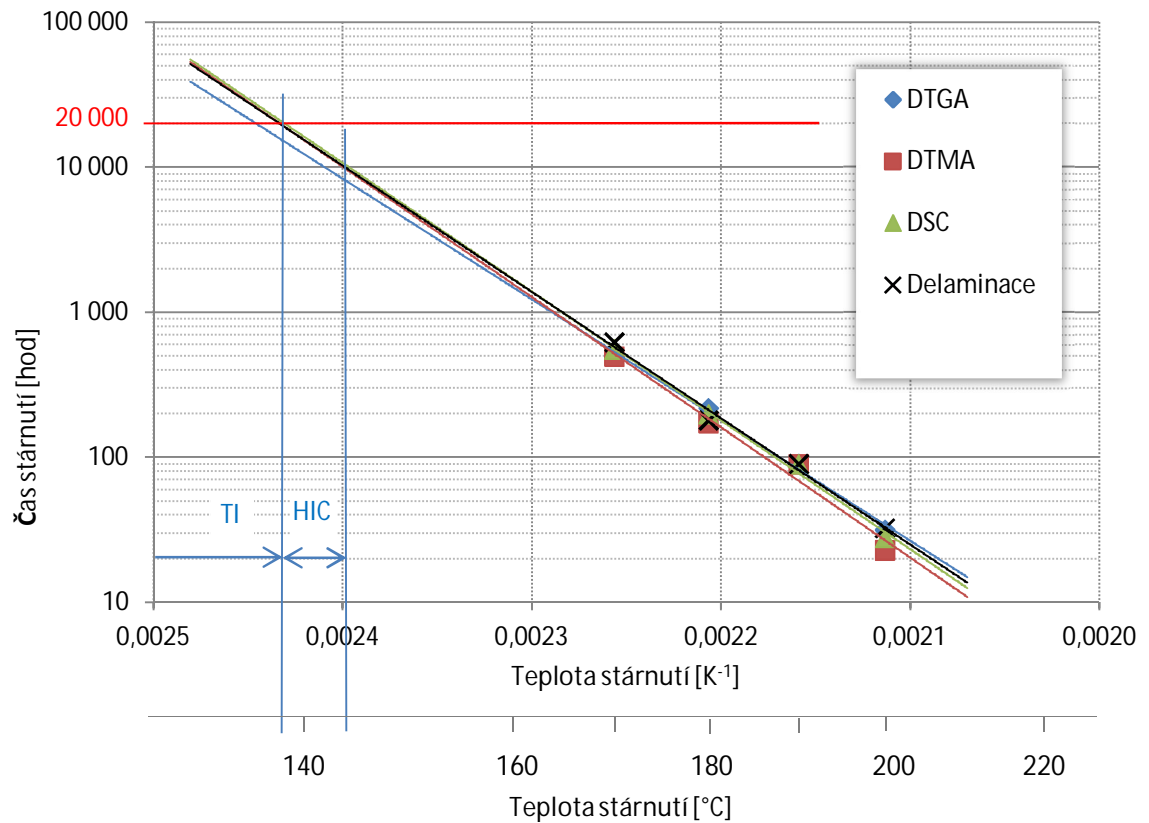
Teplota stárnutí		Čas do kritéria [hod]			
[°C]	[K <sup>-1</sup> ]	DTGA	DTMA	DSC	Delaminace (změřeno)
170	$2,25657 \times 10^{-3}$	498,0	496,8	556,2	624,0
180	$2,20677 \times 10^{-3}$	218,7	173,1	198,6	180,0
190	$2,15913 \times 10^{-3}$	90,0	90,0	90,0	90,0
200	$2,11349 \times 10^{-3}$	31,7	22,9	28,0	32,5



Obr. 4.8 Životnostní přímky použitých metod DTGA, DTMA a DSC, sestavené z vypočítaných koncových bodů pro jednotlivé teploty stárnutí.

#### 4.4.4 Zanesení výsledků do grafu tepelné odolnosti

Pro vynesení výsledků termických analýz byl použit graf tepelné odolnosti získaný v odstavci 4.3.2 (stránka 50). Vypočítané hodnoty byly před zanesením do grafu tepelné odolnosti přepočteny ze °C na převrácené hodnoty termodynamické teploty v  $K^{-1}$  – viz tabulka Tab. 4.6 .



Obr. 4.9 Graf tepelné odolnosti se zanesenými životnostními přímkami s extrapolací hodnot pro všechny použité měřící metody

Ze souhrnného grafu je zřetelné, že průběh všech vynesných životnostních přímek vykazuje velice dobrou shodu. Touto grafickou shodou jsme potvrdili, že výsledky získané z termických analýz, jsou pro daný zkušební materiál LAMPLEX FR4 plně srovnatelné s výsledky získanými při testu životnosti zkušebního materiálu na základě jeho delaminace.

## 5 Závěr

Získané informace potvrzují, že užitečný život elektroizolačního materiálu (EIM) nebo elektroizolačního systému (EIS) může být ovlivněn elektrickým, tepelným, mechanickým namáháním, nebo namáháním vyvolaným vlivy okolního prostředí, která působí buď jednotlivě, nebo v kombinaci. Většina poznatků v této práci se týká případu, kde dominantním faktorem stárnutí je tepelný faktor. Zjištěním z více nezávislých zdrojů bylo potvrzeno, že tepelné stárnutí izolačního systému ovlivňuje především epoxidovou pryskyřici – pojivo, oproti jiným materiálům v izolačním systému, což potvrdil také D. Manns [32] provedenými zkouškami.

V normách, které jsou v práci použity, je stanovena řada tepelných tříd, které mohou být přiřazeny EIM nebo EIS na základě toho, že: *„bylo prokázáno zkouškou nebo z provozních zkušeností, že jsou schopné plnit svou funkci uspokojivě při určité teplotě v konkrétní aplikaci“*. [18] Kromě tepelných faktorů ovlivňuje schopnost EIS plnit svoji funkci mnoho dalších faktorů, jako elektrické a mechanické namáhání, vibrace, škodlivá prostředí a chemikálie, vlhkost, znečištění a radiace. Všechny takové faktory je třeba brát při návrhu konkrétních elektrotechnických zařízení v úvahu. Je také nutné zdůraznit, že používané zkušební postupy umožňují pouze přibližná srovnání, a není možné podle nich stanovit význam a použití konkrétního EIS v plném rozsahu. Takové informace je možné získat pouze na základě dlouhodobých zkušeností z provozu.

V práci bylo s dobrými výsledky ověřeno použité kritérium koncového bodu na daném souboru naměřených dat. Zpracovaná a vyhodnocená data ukazují na možné použití termických analýz jako významných alternativních metod k již zavedeným postupům. Pro vyvození jednoznačných závěrů bude potřeba tyto poznatky hlouběji ověřit na rozsáhlejších souborech zkušebních materiálů a širším spektru použitých teplot a časů tepelného stárnutí.

## 6 Použitá literatura

- [1] V. Sihvo, „Insulation System in an Integrated Motor Compressor,“ Diss. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2010.
- [2] G. Stone, *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair.*, Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2004, p. 371.
- [3] B. G. Lamme, „High-Speed Turbo-Alternators-Designs and Limitations,“ sv. vol. XXXII, č. 1, Jan. 1913.
- [4] R. Perers, U. Lundin, M. Leijon, „Development of synchronous generators for Swedish hydropower: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 11, č. 5, p. 1008–1017, June 2007.
- [5] Z. Bezděk, „Slídové materiály typu Resin Rich s nosnou skleněnou tkaninou pro vysokonapěťové izolace točivých elektrických strojů,“ Plzeň, 2007.
- [6] G. Klempner and I. Kerszenbaum, *Handbook of Large Turbo-generator Operation and Maintenance*, 2nd Edition ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008, p. 880.
- [7] Y. Sabater, „World’s Largest Air-cooled Turbogenerator in operation,“ *Power and Energy Society*, . 04 2009. [Online]. Available: <http://pes.ieee.ch/assets/Uploads/pes/downloads/0409/03yvsaaadvantagesinaircooled2c.pdf>. [Přístup získán 23 02 2014].
- [8] M. Tari, K. Yoshida, S. Sekito - Toshiba Corporation; J. Allison, R. Brüttsch, A. Lutz - Von Roll Isola, „A High Voltage Insulating System with Increased Thermal Conductivity for Turbo Generators,“ v *Coil Winding, Insulation and Electrical Manufacturing Conference*, Berlin, 2001.
- [9] V. Mentlík, *Dielektrické prvky a systémy*, 1. vyd. editor, Praha: BEN - technická literatura, 2006, p. 235.
- [10] Z. Zhou, J. Li, D. Min, G. Yin, S. Li a J. Mao, „Evaluation of VPI insulating materials and insulation system,“ July 19-23, 2009.
- [11] Siemens AG, „High-tech from Erfur tplant – Innovation center for generator technology,“ Siemens AG, 2012. [Online]. Available: [http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/generators/Werksschrift\\_Erfurt\\_en.pdf](http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/generators/Werksschrift_Erfurt_en.pdf). [Přístup získán 10 02 2014].
- [12] Micamation, Ltd., „Insulating machine MI-364,“ Micamation Ltd., 2014. [Online]. Available: <http://www.micamation.com/index.php?mp=2&sp=65&lang=E>. [Přístup získán 25 02 2014].
- [13] W. Ladstätter, P. Marek, W. Grubelnik, F. Senn, „New insulation technology impacts generator design,“ v *Power-Gen Conference 2006*, Orlando USA, 2006.
- [14] T. Havel, „Perspektivní materiály izolačního systému elektrických strojů,“ *Bakalářská Práce. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň*, 2012.
- [15] ČSN EN 60505, „Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů,“ © Český normalizační institut, Praha, 04/2012.
- [16] G. Montanari a L. Simoni, „Aging Phenomenology and Modeling,“ sv. 28, č. 5, pp. 755 - 776, 1993.
- [17] ČSN EN 60216-1, „Elektroizolační materiály – Vlastnosti tepelné odolnosti - Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky,“ © Český normalizační institut,

- Praha, 2002.
- [18] ČSN EN 60085, „Elektrická izolace - Tepelné hodnocení a značení,“ © Český normalizační institut, ed.2. Praha, 2008.
- [19] ČSN EN 60216-5, „Elektroizolační materiály - Vlastnosti tepelné odolnosti - Část 5: Určení relativního indexu tepelné odolnosti (RTE) izolačního materiálu,“ © Český normalizační institut, ed. 2. Praha, 2009.
- [20] V. Mentlík, J. Pihera, R. Polanský, P. Prosr, P. Trnka, Diagnostika elektrických zařízení, Praha: BEN - technická literatura, 2008, p. 440.
- [21] Shimizu Ohta, „Temperature Classes of Electrical Insulators, Three Bond Technical News, Japan,“ 1 12 1985. [Online]. Available: <http://www.threebond.co.jp/en/technical/technicalnews/pdf/tech13.pdf>. [Přístup získán 27 03 2014].
- [22] ČSN EN 61857-1, „Elektrické izolační systémy - Postupy pro tepelné hodnocení -Část 1: Všeobecné požadavky - Nízké napětí,“ © Český normalizační institut, ed.3. Praha, 2009.
- [23] Mentlík, V., Polanský, R., „Termické analýzy a elektrotechnický design,“ Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 2009.
- [24] Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ústav fyziky a materiálového inženýrství, „Termické analýzy; učební texty,“ 2010. [Online]. Available: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_06.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_06.pdf). [Přístup získán 16 04 2014].
- [25] Humboldt-Universität Berlin, „Differential scanning calorimetry investigation of polymers,“ 08 12 2011. [Online]. Available: [http://polymerscience.physik.hu-berlin.de/anleitg/dsc12\\_hu.pdf](http://polymerscience.physik.hu-berlin.de/anleitg/dsc12_hu.pdf). [Přístup získán 02 04 2014].
- [26] E. Öner, „Thermogravimetric Analysis (TGA),“ 01 01 2007. [Online]. Available: [http://www.uzaktanegitimplatformu.com/UEP/uep\\_ylisans/ey2/ey2\\_download/Practice%20Guide\\_Section%202\\_TGA.pdf](http://www.uzaktanegitimplatformu.com/UEP/uep_ylisans/ey2/ey2_download/Practice%20Guide_Section%202_TGA.pdf). [Přístup získán 03 04 2014].
- [27] V. Mentlík, R. Polanský, „Aspekty strukturální elektrotechnologické diagnostiky,“ časopis *ELEKTRO*, pp. 6-11, 01 05 2008.
- [28] Flanders' PlasticVision, „Dynamic Thermo-Mechanical Analysis (DTMA),“ 09 04 2013. [Online]. Available: [http://www.plasticvision.be/files/ckfinder/files/130409\\_0105-02\\_FlandersPlasticVision\\_Opmaak%20fiches%20VKC\\_testen\\_ENG5.pdf](http://www.plasticvision.be/files/ckfinder/files/130409_0105-02_FlandersPlasticVision_Opmaak%20fiches%20VKC_testen_ENG5.pdf). [Přístup získán 05 04 2014].
- [29] ČSN EN 60216-3, „Elektroizolační materiály – Vlastnosti tepelné odolnosti - Část 3: Předpisy pro výpočet charakteristik dlouhodobé tepelné odolnosti,“ © Český normalizační institut, Praha, 01/2007.
- [30] R. Polanský, P. Prosr, M. Pinkerová, „Determination of thermal endurance of electrical insulating material by thermal analyses,“ v *Proceedings of the 13th international scientific conference*, Brno, 2012.
- [31] R. Polanský, P. Prosr, M. Čermák, „Determination of the thermal endurance of PCB FR4 epoxy laminates via thermal analyses,“ *Polymer Degradation and Stability*, sv. 105, č. ISSN 0141-3910, pp. 107-115, July 2014.
- [32] D. Manns, „Thermal endurance testing of rotor turn insulating materials,“ *Electrical Insulation*, 2006. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on, Toronto, Ont., 2006.

## 7 Příloha

Basismaterial für die Leiterplattenindustrie



Zertifiziert nach DIN ISO 9001-2000

### Lamplex® FR4-Cu

Multifunktionelles FR-4 System Tg 135°C  
IPC-4101B, Specification Sheet 21

UL File E 143003

Lamplex FR4-Cu ist ein Standard FR-4 System für die Herstellung von Leiterplatten. Durch die guten thermischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften dieses Epoxidharz – Systems bietet dieses Basismaterial ein sehr gutes Leistungsspektrum bei Leiterplatten mit unterschiedlichsten Konstruktionen und Anforderungen. Lamplex FR4-Cu Laminat sind lieferbar als Tafelware oder Zuschnitte in den Dicken 0,8 – 3,2 mm mit einseitiger und doppelseitiger Kupferkaschierung. Standard Kupferdicken sind 18, 35, 70 und 105 µm.

Typische Werte IPC-4101B Specification Sheet 21 Laminatdicke $\geq 0,50\text{mm}$ , Harzgehalt 40%					
Eigenschaft		Einheit	Typische Messwerte	Spezifikation	Prüfmethode
					IPC-TM-650 oder wie beschrieben
Glasumwandlungstemperatur Tg	DSC	°C	135	$\geq 110$	2.4.25
Zersetzungstemperatur	TGA	°C	290		2.4.24.6
Maximale Arbeitstemperatur MOT		°C	125 / 130		UL
T 260 / T 288, Laminatdicke 1,52mm		min.	$> 12 / > 5$		2.4.24.1
Thermischer Ausdehnungskoeffizient CTE	TMA				
Z-Achse < Tg		ppm/°C	50 - 70		2.4.24
Z-Achse > Tg		ppm/°C	290		
Z-Achse 50-260°C, $\geq 0,50\text{ mm}$		%	4,2		
X / Y-Achse < Tg		ppm/°C	15		
X / Y-Achse > Tg		ppm/°C	17		
Kupferhaftfestigkeit (Standard Kupfer)	$\geq 35\ \mu\text{m}$				
Nach therm. Stress		N/mm	1,45	1,05	2.4.8
Bei 125°C		N/mm	1,25	0,70	2.4.8.2
Nach Prozesslösungen		N/mm	1,45	0,80	2.4.8.3
Spezif. Durchgangswiderstand	nach Feuchtebehandl. E 24/125	Mohm-cm	$4 \cdot 10^8$	$10^6$	2.5.17.1
		Mohm-cm	$7 \cdot 10^7$	$10^3$	
Oberflächenwiderstand	nach Feuchtebehandl. E 24/125	Mohm	$3 \cdot 10^6$	$10^4$	2.5.17.1
		Mohm	$6 \cdot 10^6$	$10^3$	
Wasseraufnahme		%	0,30		2.6.2.1
Dielektrizitätskonstante		1 MHz	4,8	5,4	2.5.5.2
		1 GHz	4,5		2.5.5.3
Verlustfaktor		1 MHz	0,015	0,035	2.5.5.9
		1 GHz	0,016		
Lötbadbeständigkeit (288°C)					
Eintauchen		sec.	$> 20$		
Auflegen		sec.	$> 20$		
Durchschlagfestigkeit		kV	45	40	2.5.6.2
Kriechstromfestigkeit CTI	$> 0,50\text{mm}$	Volt	200	Klasse 3	UL-746A ASTM D3638
Brennbarkeit		Einstufung	V-0	V-0	UL94

Die Daten in diesem Bulletin sind unverbindliche Richtwerte und dienen nur zur Information.  
Ein Gewährleistungsanspruch kann daher aus diesen Angaben nicht abgeleitet werden.

Lamitec-Dielektra GmbH  
Carl-Zeiss-Strasse 7  
D-89231 Neu-Ulm  
Tel.: 0731/72903-0  
Fax: 0731/72903-11

Lamitec-Dielektra GmbH  
Kaiserstrasse 127  
D-51145 Köln  
Tel.: 02203/48-0  
Fax: 02203/48-488

E-mail: [info@lamitec.de](mailto:info@lamitec.de)  
<http://www.lamitec.de>

Lamplex FR4-Cu DS  
Rev. 1-D  
01.01.2007