

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**PLZEŇ, 2016**

**Ing. Jakub Souček**

# DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor  
(ve zkratce Ph.D.) v oboru

Elektrotechnika

**Ing. Jakub Souček**

## **Degradační procesy v elektroizolačních strukturách**

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

*Datum státní doktorské zkoušky:* 6.2.2014

*Datum odevzdání práce:* 10.6.2016

**V Plzni, 2016**

## **Prohlášení o duševním vlastnictví**

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou během doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu na konci této práce.

V Plzni, 10. 6. 2016

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému školiteli doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za systematické vedení, rady, trpělivost a připomínky během zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat Jaroslavu Bartoňovi při výpomoci s experimentálním měřením. Další velké díky také patří mým kamarádům a spolupracovníkům na KET za ohleduplnost a rady během zpracování práce. A v poslední řadě bych chtěl vyjádřit poděkování své rodině za trpělivost a nekončící podporu během studia.

## Degradační procesy v elektroizolačních strukturách

Předložená disertační práce se zabývá popisem degračních procesů v elektroizolačních strukturách, které jsou implementovány do statistických, fyzikálních a statisticko-fyzikálních modelů stárnutí pro odhad zbytkové životnosti.

Úvodní teoretická část se zabývá základními aspekty problematiky modelů stárnutí, které jsou rozděleny na fyzikální, statistické a fyzikálně-statistické modely.

V další části práce je popsán navržený model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degračního faktoru, který je založen na fyzikálním principu. Model vychází z předpokladu, že při nízkých úrovních vlivu degračního faktoru stárnutí téměř neprobíhá a uvnitř elektroizolačních systémů probíhá odlišný degrační mechanismus, než popisují prozatímní modely. S tímto modelem úzce souvisí návrh metody pro odhad mezní hodnoty vlivu degračního faktoru pomocí pravděpodobnostního modelu.

Disertační práce se dále zaměřuje na implementaci modelů stárnutí, které jsou založeny na fyzikálním principu do modelů statistických. Zde je prezentován navržený pravděpodobnostní model s využitím tepelného stárnutí, který odstraňuje nevýhodu výpočtu pravděpodobnosti doby do poruchy pro proměnnou intenzitu vlivu degračního faktoru.

V závěru je prezentován postup získávání aktivačních energií po dosažení mezní hodnoty vlivu degračního faktoru elektroizolačních kapalin.

# **Degradation Processes in Electroinsulating Structures**

This dissertation thesis deals with the description of electroinsulating systems in view of lifetime using models of aging.

The theoretical part deals with fundamental aspects of aging models, which are divided into physical, statistical and physical-statistical models.

In following text is presented the developed model that respect the threshold value of influence of temperature on aging of electroinsulating systems and it is based on a physical principle. The model is based on the assumption that aging at low levels of the degradation factor almost does not occur. Another assumption is that before reaching the threshold value of the degradation factor occur different degradation mechanisms. This model is closely related to a method for the estimation of threshold value of the degradation factor using probability model.

Thesis is also focused on the implementation of models of aging that are based on the physical principle in to the statistical models. Here it is presented developed probability model using the thermal aging, which obviates the disadvantage of calculating the probability of time to failure of the variable intensity of the degradation factor.

The description of electroinsulating systems using the activation energy and the process of its determination is presented at the end of this thesis.

130 Pages

67 Pictures

20 Tables

92 Equations

3 Annexes

## Obsah

<b>Použité symboly a značky .....</b>	<b>9</b>
<b>0 Úvod .....</b>	<b>15</b>
<b>1 Základní aspekty problematiky a současného stavu.....</b>	<b>16</b>
1.1 Statistické modely.....	17
1.1.1 Weibullovo rozdělení.....	17
1.2 Fyzikální a matematické modely .....	22
1.2.1 Modely tepelného stárnutí.....	24
1.2.2 Modely elektrického stárnutí.....	26
1.2.3 Simoniho model.....	29
1.2.4 Ramuúv model.....	31
1.2.5 Fallouúv model.....	32
1.2.6 Grzybowskiho model .....	33
1.2.7 Crineúv model .....	34
1.2.8 Model prostorového náboje .....	35
1.3 Fyzikálně-statistické modely .....	36
1.3.1 Montanariho pravděpodobnostní model .....	36
<b>2 Cíle disertační práce.....</b>	<b>40</b>
<b>3 Model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru.....</b>	<b>42</b>
3.1 Návrh modelu .....	42
<b>4 Pravděpodobnostní model s využitím modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru .....</b>	<b>50</b>

4.1	Určení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru $T_{TI}$ .....	52
4.2	Zhodnocení navrženého modelu.....	56
<b>5</b>	<b>Experimentální část.....</b>	<b>57</b>
5.1	Postup sestavení pravděpodobnostního modelu s využitím modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu pro naměřená experimentální data.....	58
5.2	Postup sestavení modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru.....	70
<b>6</b>	<b>Určení aktivační energie a křivek odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru elektroizolačních kapalin .....</b>	<b>76</b>
6.1	Aktivační energie.....	76
6.2	Experiment.....	78
6.2.1	<i>Křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru.....</i>	<i>81</i>
6.2.2	<i>Vyhodnocení.....</i>	<i>85</i>
<b>7</b>	<b>Přínosy disertační práce .....</b>	<b>87</b>
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>91</b>
<b>9</b>	<b>Reference .....</b>	<b>93</b>
	<b>Publikační činnost autora .....</b>	<b>99</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>103</b>
	Příloha 1 - Kinetická teorie látek.....	103
	Příloha 2 - Experiment na transformátorové lepence.....	106
	Příloha 3 - Experiment na elektroizolačních kapalinách.....	122



## Použité symboly a značky

ZNAČKA	JEDNOTKA	POPIS
$\beta$	[-]	parametr tvaru Weibullova rozdělení
$\eta$	[h]	parametr měřítka Weibullova rozdělení
$t$	[h]	doba do poruchy, čas
$f(t)$	[-]	hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení
$F(t)$	[-]	distribuční funkce Weibullova rozdělení
$R(t)$	[-]	pravděpodobnost bezporuchového stavu
$MTTF$	[h]	střední doba do poruchy (anglicky <i>Mean Time to Failure</i> )
$\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$	[-]	gamma funkce Weibullova rozdělení
$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$	[-]	vektor odhadovaných parametrů
$L(\theta)$	[-]	věrohodností funkce
$\hat{\beta}$	[-]	odhad parametru tvaru Weibullova rozdělení
$\hat{\eta}$	[h]	odhad parametru měřítka Weibullova rozdělení

ZNAČKA	JEDNOTKA	POPIS
$T$	[K]	teplota
$\tau$	[h]	životnost elektroizolačních systémů
$k$	[s <sup>-1</sup> ]	rychlost reakce
$A$	[s <sup>-1</sup> ]	předexponenciální faktor neboli frekvenční faktor Arrheniova modelu
$E_{al}$	[J·mol <sup>-1</sup> ]	aktivační energie degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru
$R$	[J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]	univerzální plynová konstanta, která má hodnotu $8,3144 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
$E$	[kV·mm <sup>-1</sup> ]	intenzita elektrického pole
$E_0$	[kV·mm <sup>-1</sup> ]	mezní hodnota intenzity elektrického pole
$R(S)$	[-]	intenzita stárnutí Simoniho modelu stárnutí
$T_0$	[K]	teplota standardních podmínek prostředí,
$V$	[V]	amplituda napětí
$f$	[Hz]	frekvence
$k_B$	[eV·K <sup>-1</sup> ]	Boltzmanova konstanta, která má hodnotu $8,6173 \cdot 10^{-5} \text{ eV}\cdot\text{K}^{-1}$
$\Delta G_0$	[eV]	volná aktivační energie

ZNAČKA	JEDNOTKA	POPIS
$\lambda$	[m]	šířka energetické bariéry
$e_p$	[C]	elektrický náboj ovlivňující proces stárnutí
$\eta(E,T)$	[h]	parametr měřítka Montanariho pravděpodobnostního modelu
$\beta(E,T)$	[-]	parametr tvaru Montanariho pravděpodobnostního modelu
$N_I$	[-]	koeficient odolnosti Montanariho pravděpodobnostního modelu
$E_s$	[kV·mm <sup>-1</sup> ]	referenční intenzita elektrického pole
$t_s$	[h]	doba do poruchy při intenzitě elektrického pole $E_s$
$N_c$	[-]	počáteční odolnostní koeficient
$E_T$	[kV·mm <sup>-1</sup> ]	mezní hodnota elektrického pole při teplotě $T$
$\nu$	[-]	parametr tvaru odolnostního koeficientu Montanariho pravděpodobnostního modelu
$t_{Fp}$	[h]	percentil
$p$	[-]	pravděpodobnost selhání elektroizolačního systému
$T_{Ti}$	[K]	dílčí mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru

ZNAČKA	JEDNOTKA	POPIS
$K_i$	[-]	dílčí korekční parametr modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru
$\tau_i$	[h]	životnost elektroizolačního systému v intervalu teplot $T \in \langle T_{Ti}, T_{T(i-1)} \rangle$
$E_{ai}$	[J·mol <sup>-1</sup> ]	aktivační energie dílčího degradačního mechanismu
$\tau_M(T)$	[h]	modifikovaný model tepelného stárnutí, pro $T \in (0, T_{T1})$
$D$	[K]	materiálová konstanta, která je charakterizována synergickým účinkem dílčích degradačních mechanismů
$K_M$	[-]	korekční parametr pro zachování podmínky $\tau_1(T_{T1}) = \tau_M(T_{T1})$
$T_{T1}$	[K]	mezní hodnota vlivu degradačního faktoru modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru
$B(T)$ a $C(T)$	[-]	funkce vymezující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru $T_{T1}$ v závislosti na teplotě $T$ , pro které platí $B(T) = 0; C(T) = 1$ pro $T \in \langle T_{T1}, \infty \rangle$ a $B(T) = 1; C(T) = 0$ pro $T \in (0, T_{T1})$ .
$\beta(T)$	[-]	funkce parametru tvaru Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě $T$
$\eta(T)$	[h]	funkce parametru měřítka Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě $T$
$\lambda(t, T)$	[-]	intenzita poruch v závislosti na teplotě $T$ a čase $t$

ZNAČKA	JEDNOTKA	POPIS
$x$	[K]	směrnice funkce parametru tvaru Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě $T$ v oblasti provozních teplot elektroizolačních systémů
$\hat{T}_{T1}$	[h]	odhad mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru
$y$	[-]	absolutní člen odhadu mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru
$\hat{\beta}(T)$	[-]	odhad funkce parametru tvaru Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě $T$
$\hat{\eta}(T)$	[h]	odhad funkce parametru měřítka Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě $T$
$M$	[kg·mol <sup>-1</sup> ]	molární hmotnost
$F$	[C·mol <sup>-1</sup> ]	Faradayova konstanta
$z$	[-]	počet elektronů
$I$	[A]	proud
$h$	[eV·s]	Planckova konstanta
$a$	[-]	materiálová konstanta

ZNAČKA	JEDNOTKA	POPIS
$b$	[-]	materiálová konstanta
$N$	[-]	materiálová konstanta
$c$	[-]	materiálová konstanta
$k_1$	[-]	materiálová konstanta
$k_2$	[-]	materiálová konstanta
$m_1$	[-]	materiálová konstanta
$m_2$	[-]	materiálová konstanta
$C'$	[-]	materiálová konstanta
$M_K$	[-]	multiplikativní konstanta charakterizující odhad konstanty $D$ definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů
$T_K$	[K]	absolutní hodnota poklesu teploty od mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru $T_{T1}$ charakterizující odhad konstanty $D$ definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů
$\hat{D}$	[K]	odhad konstanty definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů

## 0 Úvod



Elektroizolační systémy jsou klíčovou součástí každého elektrického zařízení, a proto je nezbytné sledovat jejich aktuální stav. Spolehlivost elektrických zařízení je dána odolností elektroizolačních systémů vůči působícím degradačním faktorům. Sledování těchto vlivů je velice komplexní a časově náročná problematika.

Pro určení aktuálního stavu a zbytkové životnosti těchto systémů je nezbytné znát popis a vliv jednotlivých degradačních mechanismů. Popis vlivu těchto jednotlivých degradačních mechanismů lze následně využít pro sestavení modelů stárnutí, podle kterých lze monitorovat a popisovat aktuální stav a zbytkovou životnost elektroizolačních systémů. Je tedy kladen největší důraz na sestavení co nejdůvěhodnějšího modelu stárnutí.

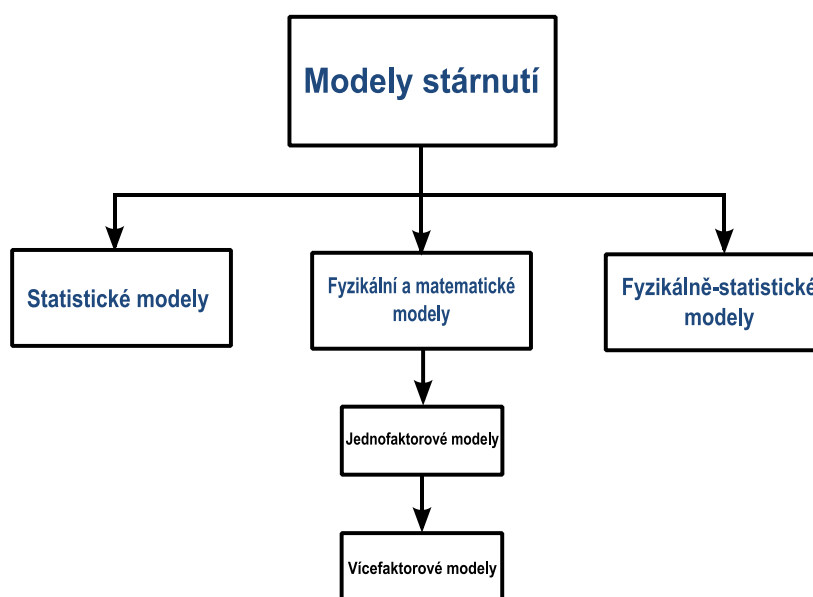
Popis degradace elektroizolačních systémů je potom závislý na co nejlepším pochopení fyzikálně chemických procesů. Čím lepší znalosti o těchto procesech jsou, tím konkrétnější model stárnutí lze sestavit. Jde tedy o zkoumání těchto systémů na mikroskopické a makroskopické úrovni a aplikaci závěrů při vytváření matematických nebo fyzikálních modelů.

Pokud jsou modely stárnutí sestaveny, musí následovat jejich ověření a aplikace. V dnešní době je snaha zavést takové modely, které by co nejlépe popisovaly stárnutí elektroizolačních systémů a byly by dobře aplikovatelné v praxi. Tato práce má tedy snahu vybrat nejdůležitější degradační mechanismy a zahrnout je do nově vytvořených modelů stárnutí jak na fyzikálním, tak statistickém principu.

# 1 Základní aspekty problematiky a současného stavu

Pro pochopení degradačních dějů uvnitř elektroizolačních systémů slouží modely stárnutí. Popis degradace izolačních systémů je potom závislý na co nejlepším pochopení fyzikálně chemických procesů. Čím lepší znalosti o těchto procesech jsou, tím konkrétnější model stárnutí lze sestavit. Modely stárnutí slouží pro popis životnosti daného materiálu, kde životnost je definována jako: „Způsobilost výrobku nebo zařízení plnit požadované funkce do mezního stavu stanoveného technickými podmínkami.“ [1]. Mezi působící degradační faktory patří zejména intenzita elektrického pole, teplota, mechanické namáhání, záření, vlhkost, biologické faktory, prach nebo chemické namáhání. Zahrnout všechny tyto degradační mechanismy do jednoho modelu je však prakticky nemožné. Z tohoto důvodu, je snaha sestavit takové modely stárnutí, které budou nejvíce korelovat se skutečným stavem a to zahrnutím takových degradačních faktorů, které k této degradaci nejvíce přispívají. Jednotlivé modely stárnutí pak lze rozdělit do těchto skupin, viz Obr. 1.1:

- statistické modely,
- matematické a fyzikální modely,
- pravděpodobnostní modely využívající matematické nebo fyzikální modely.



Obr. 1.1 Rozdělení modelů stárnutí elektroizolačních systémů



## 1.1 Statistické modely

Z hlediska provozu, návrhu a výroby elektrického zařízení je nutné znát nejen fyzikální principy degradace a chování jednotlivých prvků, ale je třeba také znát návrh životnosti těchto prvků pomocí pravděpodobnostního vyjádření a statistického chování jeho parametrů. Pro bezchybnou funkci elektrického zařízení je nutnou podmínkou jeho bezporuchový chod. Pomocí teorie spolehlivosti, lze předpovídat spolehlivost pomocí matematických modelů a nalézt tak kritická místa celého systému. Spolehlivost je definována jako: „*Obecná vlastnost spočívající ve schopnosti výrobku plnit po stanovenou dobu požadované funkce v míře pravděpodobnosti,  $\langle 0,1 \rangle$  resp.  $\langle 0 \div 100 \% \rangle$ , při zachování provozních parametrů daných technickými podmínkami.*“ [1]. Pro analýzu bezporuchovosti se v dnešní době využívají statistické a matematické modely založené na statistických rozděleních. Pro tento účel se nejčastěji v elektrotechnice využívají Weibullovo, např. [29] a [33], exponenciální a normální rozdělení.

Z důvodu, že normální a exponenciální rozdělení jsou jednoduchá a všeobecně známá, bude v kategorii statistických modelů popsáno pouze Weibullovo rozdělení.

### 1.1.1 Weibullovo rozdělení

Weibullova rozdělení se využívá za předpokladu, že u zkoumaného objektu nelze přijmout předpoklad o **konstantní intenzitě poruch** a využívá se pro popis bezporuchovosti elektrických zařízení, kdy bezporuchovost těchto zařízení a jejich podsystémů závisí na počtu provozních hodin, stáří nebo počtu vykonaných cyklů [2]. Hustota pravděpodobnosti dvouparametrového Weibullova rozdělení je dána vztahem (1.1).

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}, t > 0, \quad (1.1)$$

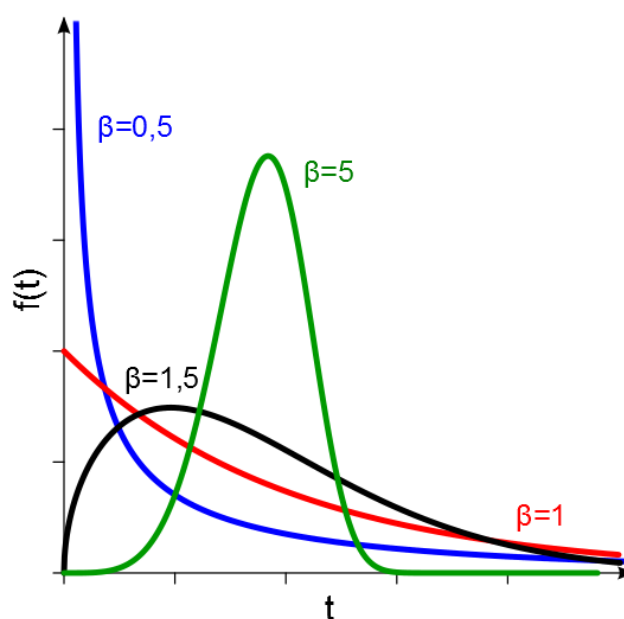
kde parametr  $\beta$  [-] ovlivňuje tvar funkce hustoty pravděpodobnosti, parametr  $\eta$  [h] mění měřítko na časové ose a  $t$  [h] je doba do poruchy.

Parametr  $\beta$  tedy ovlivňuje tvar výsledného rozdělení. Pokud  $\beta < 1$ , jedná se o tzv. „období počátečního výpadu“. Jde o relativně krátký úsek, na jehož počátku dochází ke značné poruchovosti, která rychle klesá.

Pokud  $\beta > 1$ , jedná se o období, ve kterém se zvyšuje se intenzita poruch. V tomto období dochází k stárnutí, opotřebení nebo únavě elektroizolačních systému.

Zvláštním případem je pokud  $\beta = 1$ , kde Weibullovo rozdělení je shodné s rozdělením exponenciálním. Jedná se o tzv. období "normálního" provozního využití". V tomto období dochází k poruchám elektroizolačních systémů zejména z náhodných příčin.

Tyto mezní hodnoty parametru  $\beta$  jsou charakteristické při konstrukci tzv. vanové křivky [2], [3]. Funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro různé parametry  $\beta$  je zobrazena na Obr. 1.2.



**Obr. 1.2** Funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro různé parametry

V souvislosti s tímto rozdělením se pro další výpočty zavádí funkce bezporuchovosti, kde bezporuchovost je způsobilost daného systému plnit svou funkci po stanovenou dobu bez poruchy. Pro číselné vyjádření se využívá pravděpodobnost bezporuchového stavu, definována jako doplněk distribuční funkce a vyjadřuje pravděpodobnost, že u daného prvku nenastane do doby  $t$  porucha, viz (1.2) [1].

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad (1.2)$$

kde  $F(t)$  je distribuční funkce spojité náhodné veličiny.

Střední doba do poruchy (*anglicky Mean Time to Failure, zkratka MTTF*) je další významnou statistickou veličinou. Je to statistická veličina, která slouží k hodnocení spolehlivosti elektrického zařízení a vypočte se dle vztahu (1.3) [4].

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma(z), \text{ kde } z = 1 + \frac{1}{\beta} \quad (1.3)$$

$\Gamma(z)$  se vypočítá dle vztahu (1.4). Jednotlivé hodnoty funkce  $\Gamma(z)$  jsou uvedeny v normě ČSN EN 61649, která se zabývá Weibullovou analýzou [2], [4].

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt, \quad (1.4)$$

Pro správné použití tohoto rozdělení je nutné provést přesný odhad jednotlivých parametrů. Pro odhad parametrů Weibullova rozdělení se nejčastěji využívá metoda maximální věrohodnosti (*MLE, anglicky Maximum Likelihood Estimation*) a metoda pravděpodobnostního grafu, která slouží pro vizuální kontrolu, zda lze pro modelování vlastností daného zařízení použít Weibullova rozdělení [1], [5].

Osy Weibullova pravděpodobnostního grafu mají speciálně transformovaná měřítka pomocí přirozených logaritmů. Nelineární distribuční funkce poté přechází ve funkci lineární. Na osu y se vynášejí doby do poruchy  $t$  v logaritmickém měřítku a na osu x se vynášejí ve dvojitým logaritmickém měřítku distribuční funkce, viz (1.5) [2], [4], [6].

$$\ln\{-\ln[1 - F(t)]\}, \quad (1.5)$$

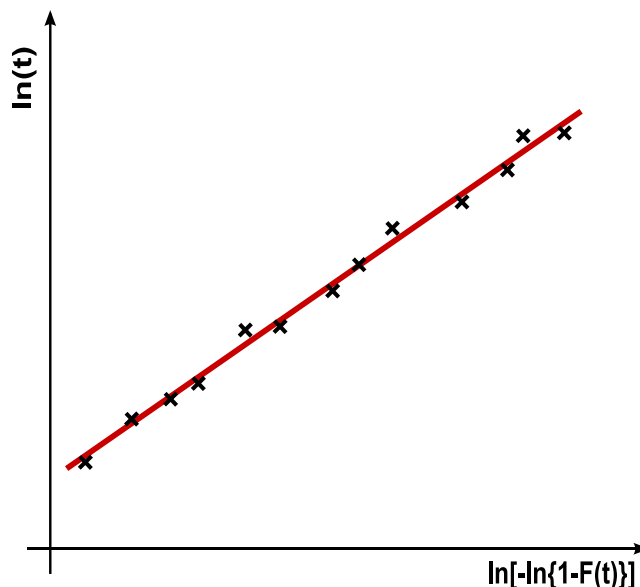
kde pro výpočet  $F(t)$  je použita Benardova aproximace, viz (1.6) [4], [5].

$$F_i(t) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}, \quad (1.6)$$

kde  $n$  je rozsah výběru a  $i$  je pořadová pozice datové položky.

Pokud jednotlivá empirická data leží v jedné přímce, viz Obr. 1.3, lze říci, že lze pro statistické modelování využít Weibullova rozdělení. Směrnice přímky poté určuje parametr tvaru  $\beta$  a absolutní člen přímky určuje parametr měřítka  $\eta$ . Podrobnější popis a odvození je

popsáno v ČSN EN 61649 [4]. Naopak, pokud jednotlivá empirická data neleží v jedné přímce, nelze Weibullovo rozdělení použít.



Obr. 1.3 Weibullův pravděpodobnostní graf

### Metoda maximální věrohodnosti

Odhad jednotlivých parametrů lze provést mnohými metodami, jako metoda maximální věrohodnosti, metoda nejmenších čtverců nebo pomocí metody momentů. Nejčastěji využívaná metoda pro odhad parametrů je metoda maximální věrohodnosti [3], [4], [7], [8]. Výhodou této metody je, že umožňuje odhad parametrů z datových souborů se složitými mechanizmy cenzurování, kde cenzurovaná data jsou data, která představují neúplný náhodný výběr. Nevýhodou této metody je, že má tendenci nadhodnocovat jednotlivé parametry u malých rozsahů výběru [4]. Pro odhad se využívají statistické softwary, jako např. MATLAB, STATISTICA nebo MINITAB.

Pokud jsou známa data jako soubor náhodných veličin, ve tvaru  $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ , stejně rozdělených do hustoty pravděpodobnosti  $f(t, \theta)$ , kde  $\theta$  je vektor odhadovaných parametrů ve tvaru  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ , pak lze zavést vztah pro odhad jednotlivých parametrů pro úplná data, jako věrohodnostní funkci  $L(\theta)$  ve tvaru (1.7) [7].

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \theta) \quad (1.7)$$

Namísto  $L(\theta)$  se velice často využívá jejího přirozeného logaritmu, protože práce se součtem je výrazně jednodušší než práce se součinem při zachování polohy extrému funkce, viz (1.8) [3], [7], [8].

$$\ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n f(t_i, \theta) \quad (1.8)$$

Maximálně věrohodný odhad  $\hat{\theta}$  parametrů  $\theta$  odpovídá maximum právě této funkce  $L(\theta)$ . Příslušná maxima věrohodností funkce jsou vypočítána pomocí parciální derivace přirozeného logaritmu této funkce, viz (1.9) [3], [7]. Řešením vzniklé rovnice jsou získány maximálně věrohodné odhady  $\hat{\theta}$ .

$$\frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (1.9)$$

Výsledná soustava rovnic pro necenzurovaná data Weibullovo rozdělení je potom dána rovnicemi (1.10) a (1.11) [10].

$$\frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \beta} = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^n t_i^\beta \ln(t_i) = 0, \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \eta} = -\frac{n}{\eta} + \frac{1}{\eta^2} \sum_{i=1}^n t_i^\beta = 0. \quad (1.11)$$

Řešením této soustavy rovnic lze získat konečný tvar rovnic (1.12) a (1.13), pomocí kterých lze vypočítat maximálně věrohodné obrazy parametrů  $\hat{\beta}$  a  $\hat{\eta}$ . Výsledné vztahy jsou také uvedeny v normě ČSN EN 61649 [4].

$$\frac{1}{\hat{\beta}} = \left[ \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\beta}} \ln(t_i) \right] \left[ \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\beta}} \right]^{-1} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(t_i), \quad (1.12)$$

$$\hat{\eta} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\beta}} \right]^{1/\hat{\beta}}. \quad (1.13)$$

Pro cenzurovaná data se postupuje stejným způsobem, s výjimkou formulace vztahu pro odhad jednotlivých parametrů, viz (1.14) [9].

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \theta) \prod_{j=1}^m R(t_j, \theta), \quad (1.14)$$

kde  $m$  je počet cenzurovaných dat a  $n$  počet dat celkem.

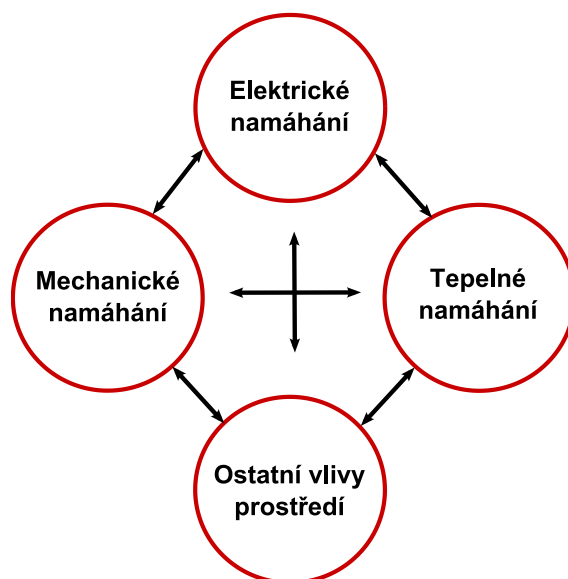
## 1.2 Fyzikální a matematické modely

Fyzikální a matematické modely stárnutí elektroizolačních systémů lze dělit na modely **fenomenologického** a **empirického** charakteru, dále lze tyto modely dělit dle počtu působících degradačních faktorů na **jednofaktorové** a **vícefaktorové**.

**Jednofaktorové** modely stárnutí elektroizolačních systémů jsou takové modely, u kterých je uvažován pouze jediný degradační faktor. Nejdůležitější jednofaktorové modely lze dále dělit na:

- modely tepelného stárnutí,
- modely elektrického stárnutí.

**Vícefaktorové modely** jsou předmětem velkého zájmu zkoumání, viz [11] - [29]. Pokud je izolační systém vystaven více degradačním mechanismům současně, dochází k podstatnému snížení životnosti, než by tomu bylo při vystavení těchto degradačních mechanismů zvlášť. Vliv jednotlivých degradačních mechanismů na izolační systém je znázorněn na Obr. 1.4.

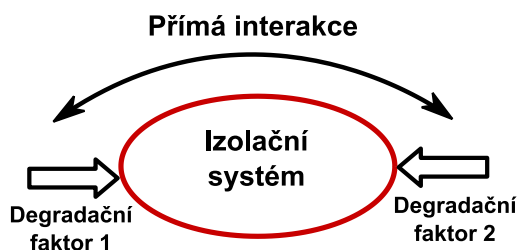


**Obr. 1.4** Vliv jednotlivých degradačních mechanismů na izolační systém

Výsledný model stárnutí nemusí být nutně algebraickým součtem těchto degradačních vlivů. Rozlišují se dva základní druhy interakcí:

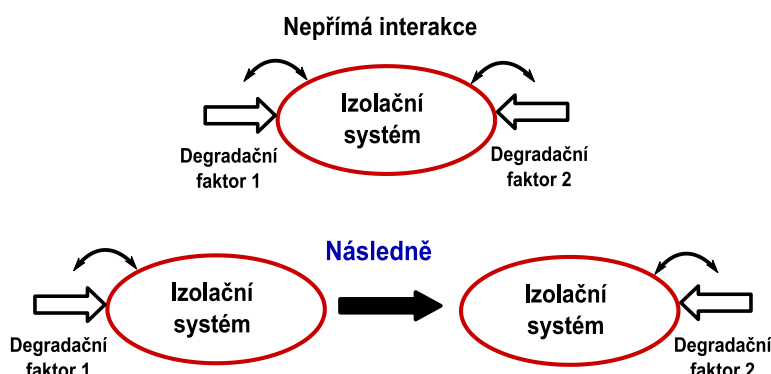
- přímá interakce,
- nepřímá interakce.

**Přímá interakce** je současná interakce všech degradačních vlivů, které se navzájem ovlivňují do takové míry, že jejich jednotlivé působení je výrazně odlišné od stavu, kdyby tyto faktory působily jednotlivě. Obr. 1.5 zobrazuje přímou interakci v případě izolačního systému vystaveného dvěma degradačním faktorům. Příkladem přímé interakce je oxidace za zvýšené teploty [14].



**Obr. 1.5** Přímá interakce v případě izolačního systému vystaveného dvěma degradačním faktorům [14]

**Nepřímá interakce** je současná interakce všech degračních vlivů, ale jednotlivé vlivy působí na izolační systém samostatně. Jde tedy o podmíněné ovlivňování vlastností izolačních systémů pomocí těchto degračních faktorů. Na Obr. 1.6 je schematické znázornění této interakce při působení dvou degračních faktorů. Jako příklad této interakce je působení elektrického a mechanického namáhání. Mechanického namáhání může způsobit rozrušení izolačního systému v podobě dutinek nebo trhlinek. V těchto nehomogenitách následně vznikají částečné výboje, které dále způsobují rychlejší stárnutí materiálu [14].



**Obr. 1.6** Nepřímá interakce při působení dvou degračních faktorů, [14]

Při sestavování jednotlivých vícefaktorových modelů stárnutí je třeba tyto interakce vzít v úvahu. V současné době existuje mnoho vícefaktorových modelů, které jsou založeny na současném působení elektrického, tepelného popřípadě mechanického namáhání. Některé z těchto modelů stárnutí jsou popsány níže. Nejčastěji jsou tyto modely empirického charakteru, ale existují i modely, které jsou charakteru fyzikálního [14]. V současnosti je tedy snaha vyvinout takový model, který bude fyzikálního charakteru a bude co nejvíce odpovídat skutečnosti.

### 1.2.1 Modely tepelného stárnutí

Teplota je jeden z nejvýraznějších degračních faktorů. Díky tepelnému namáhání dochází v izolačních systémech k nevratným fyzikálně chemickým procesům. Tyto procesy mohou následně zhoršit dielektrické vlastnosti těchto systémů, jako například zvýšení elektrické vodivosti nebo ztrátového činitele. Z tohoto důvodu se materiály s přibližně stejnými tepelnými vlastnostmi řadí do tzv. tepelných tříd, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 60085 [30] a zobrazeny v Tab. 1.1. Každé tepelné třídě je přiřazena mezní hodnota



teploty, do které jsou dané izolační materiály použitelné. Zařazení izolačních systémů do určité tepelné třídy je provedeno dle výsledků tzv. zkoušek zrychleného stárnutí.

**Tab. 1.1** Přehled tepelných tříd izolačních materiálů [30]

Tepelná třída	70	Y	A	E	B	F	H	N	R	250
Mezní teplota	70 °C	90 °C	105 °C	120 °C	130 °C	155 °C	180 °C	200 °C	220 °C	250 °C

O matematickou formulaci tepelného stárnutí se jako první pokusil **Montsinger**, který zjistil, že experimentální výsledky lze vyjádřit pomocí exponenciální funkce, která udává závislost doby života na teplotě [31], viz (1.15).

$$\tau(T) = A_M \cdot e^{-BT}, \quad (1.15)$$

kde  $A_M$  a  $B$  jsou materiálové konstanty,  $T$  je teplota [K] a  $\tau$  je doba života [h].

Nevýhodou tohoto modelu je, že se jedná o empirický model stárnutí a nepopisuje daný izolační systém z hlediska fyzikálně chemických procesů. Tento nedostatek se snažil odstranit **Dakin**, který celý mechanismus tepelného stárnutí založil na **Arrheniově** rovnici [32], viz (1.16).

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_{a1}}{RT}}, \quad (1.16)$$

kde  $k$  je rychlost reakce [ $s^{-1}$ ],  $A$  je předexponenciální faktor neboli frekvenční faktor [ $s^{-1}$ ],  $T$  je absolutní teplota [K],  $E_{a1}$  je aktivační energie degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru [ $J \cdot mol^{-1}$ ] a  $R$  je univerzální plynová konstanta, která má hodnotu  $8,314\ 47215\ J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ .

Tato rovnice popisuje závislost rychlosti reakce dané látky na teplotě. Z rovnice vyplývá, že při zvýšení teploty musí zákonitě růst rychlost reakce, což je způsobeno přivedením dodatečné energie zahřáním této látky [33], [34].

Dalším přístupem k dané problematice se zabývá práce **W. Büssinga**, která dává do souvislosti změny chemické stavby izolantů vyvolané působením teploty se zhoršováním jejich fyzikálních a chemických vlastností. Se zvyšováním teploty roste rychlost chemické

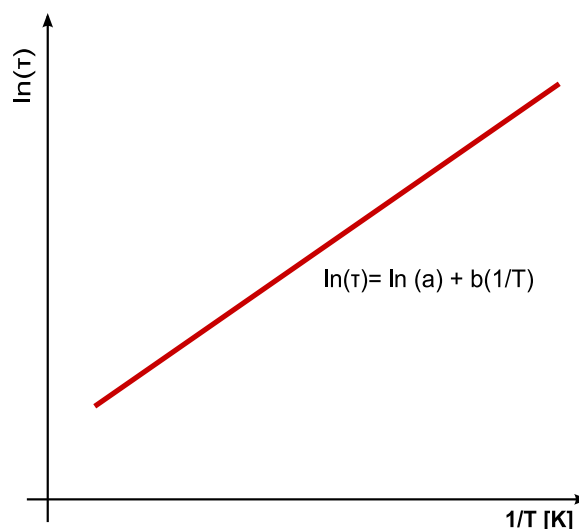
reakce a tím dochází k zvyšování rychlosti stárnutí, tj. snižuje se doba do poruchy elektroizolačního systému [14].

Za předpokladu, že se vzrůstající teplotou bude životnost izolačního systému klesat, lze zapsat model tepelného stárnutí následujícím způsobem (1.17) [32], [33].

$$\tau(T) = a \cdot e^{\frac{E_{a1}}{RT}} = a \cdot e^{\frac{b}{T}}, \quad (1.17)$$

kde  $\tau(T)$  je životnost izolačního systému [h] a  $a$  a  $b$  jsou materiálové konstanty. Hodnota  $a$  je potom dána jako převrácená hodnota předexponenciálního faktoru  $A$ , který udává frekvenci střetávajících se molekul.

Vynesení logaritmu životnosti na jednu osu a reciproční hodnoty teploty na osu druhou, lze získat křivku odpovídající životnosti izolačního systému, viz Obr 1.7. Této křivce se také někdy říká Arrheniův graf [35]. Rovnice (1.17) je tedy založena na fyzikálním principu a popisuje elektroizolační systém komplexněji než rovnice (1.15). Rovnice (1.17) se často označuje také jako **Büssingův teorém**.



**Obr. 1.7** Lineární životnostní závislost na recipročné teplotě

### 1.2.2 Modely elektrického stárnutí

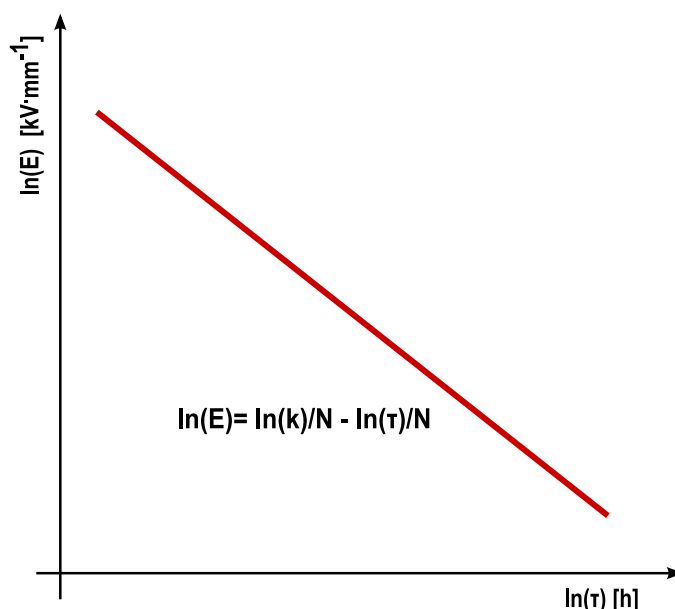
Intenzita elektrického pole je dalším z hlavních degračních faktorů, které výrazně ovlivňují izolační systémy. O mechanismu působení elektrického pole na izolační struktury není zatím moc známo, proto se v dnešní době využívají pouze empirické modely, které jsou založeny na experimentálních pozorování. Za všeobecně přijímané modely elektrického stárnutí jsou považovány **mocinný** a **exponenciální** model [11], [14].

**Mocninný model** je jedním z nejčastěji používaných modelů pro popis elektrického stárnutí a je dán vztahem (1.18) [13].

$$\begin{aligned}\tau(E) &= k_1 \cdot E^{-N}, \\ \ln \tau &= \ln k_1 - N \ln E,\end{aligned}\tag{1.18}$$

kde  $\tau$  je životnost izolačního systému [h] (tato hodnota bývá obvykle rovna parametru  $\eta$  Weibullova rozdělení),  $E$  je intenzita elektrického pole [ $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ],  $k_1$  a  $N$  jsou konstanty, které je nutno určit empiricky.

Pro kontrolu platnosti tohoto modelu se vynášejí naměřená data do grafu s logaritmickým měřítkem na obou osách. Pokud naměřená data leží v jedné přímce, lze tento model dále uplatnit [11]. Příklad mocninné funkce je zobrazen na Obr. 1.8.



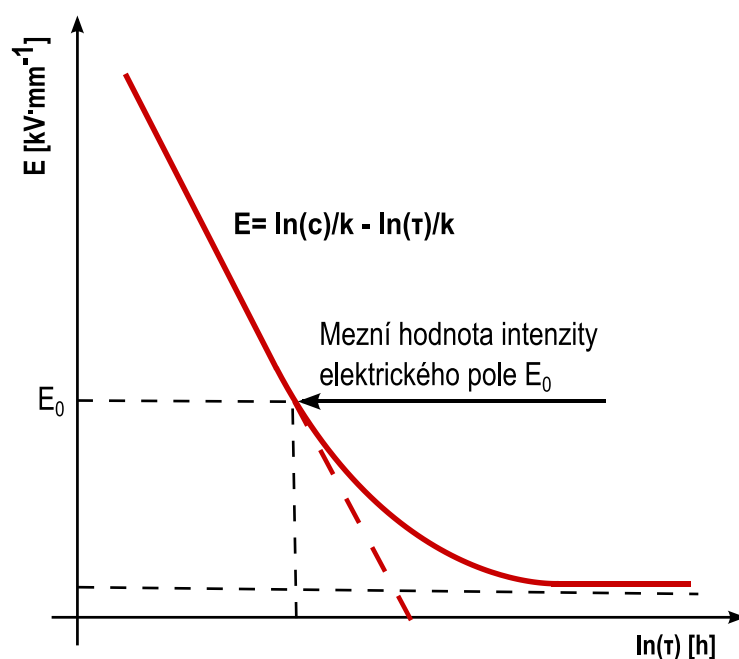
**Obr. 1.8** Mocninná funkce elektrického stárnutí zakreslená v logaritmických souřadnicích

Dalším často používaným modelem elektrického stárnutí je **exponenciální** model. Základní tvar tohoto modelu je dán vztahem (1.19) [13].

$$\begin{aligned}\tau(E) &= c \cdot e^{-k_2 E}, \\ \ln \tau &= \ln c - k_2 E,\end{aligned}\tag{1.19}$$

kde  $\tau$  je životnost izolačního systému [h],  $E$  je intenzita elektrického pole [ $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ],  $k_2$  a  $c$  jsou konstanty, které je nutno určit empiricky z experimentálních dat.

Opět je nutné ověřit platnost tohoto modelu vnesením naměřených dat do semilogaritmického grafu. Tento graf je zobrazen na Obr. 1.9. Pokud naměřená data leží v jedné přímce, která je na Obr. 1.9 znázorněna čárkovanou čarou, je předpoklad využití exponenciálního modelu elektrického stárnutí správný [11].



**Obr. 1.9** Exponenciální funkce elektrického stárnutí zakreslená v semilogaritmických souřadnicích

Problém s oběma modely může nastat při extrapolaci naměřených dat do skutečných provozních podmínek. Za předpokladu, že na daný izolační systém nebude působit žádné elektrické pole, bude životnost dle uváděných modelů výrazně nižší než ve skutečnosti. Tento fakt je odstraněn zavedením tzv. "mezní hodnoty  $E_0$ " (anglicky, threshold value), kde  $E_0$  [ $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ] je hodnota intenzity elektrického pole, při jejímž překročení probíhá proces stárnutí elektroizolačního systému výrazně rychleji, viz Obr 1.9. Jednotlivé modely elektrického stárnutí jsou proto upraveny. Upravené rovnice pro mocninný model [16] a exponenciální model [17] jsou uvedeny v rovnicích (1.20) a (1.21).

$$\tau(E) = \tau_0 \cdot \left[ \frac{E}{E_0} \right]^{-N}, \quad (1.20)$$

$$\tau(E) = \frac{K_2}{E - E_0} \cdot e^{[-K_1(E-E_0)]}, \quad (1.21)$$

kde  $E$  je intenzita elektrického pole [ $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ],  $\tau_0$  [h] je životnost izolačního systému při mezní hodnotě  $E_0$  [ $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ] a  $K_1$ ,  $K_2$  jsou konstanty.

### 1.2.3 Simonioho model

Kombinací elektrického a tepelného stárnutí se zabýval **Luciano Simoni**, viz studie [15] a [16]. Zavádí veličinu  $R(S)$ , která reprezentuje intenzitu stárnutí, kde  $S$  reprezentuje synergické namáhání elektroizolačního systému. Výsledné stárnutí je dáno superpozicí tepelného a elektrického namáhání. Simoni dále zavádí veličinu  $F(p)$ , která charakterizuje stárnutí elektroizolačního systému, kde  $p$  je vlastnost daného materiálu, která přímo ovlivňuje jeho životnost. Selhání celého systému nastává v okamžiku, kdy vlastnost  $p$  dosáhne limitní hodnoty. Vztah mezi  $F(p)$  a  $R(S)$  je potom dán vztahem (1.22) [15], [16].

$$R(S) = \frac{dF(p)}{dt} \rightarrow F(p) = \int R(S) dt \quad (1.22)$$

Pokud je intenzita stárnutí konstantní, lze vztah (1.22) vyjádřit v obecné formě vztahem (1.23).

$$F(p) = R(S) \cdot t, \quad (1.23)$$

kde  $t$  [h] je doba provozu elektroizolačního systému.

Stárnutí potom probíhá, tak že se postupně snižuje hodnota vlastnosti  $p$  do takové míry, kdy daný elektroizolační systém není schopen provozuschopného stavu. Tato mezní hodnota se značí  $p_L$  a charakterizuje dobu, při které dojde k poruše elektroizolačního systému. Životnost elektroizolačního systému pak lze zapsat jako převrácenou hodnotu veličiny  $R(S)$  pomocí vztahu (1.24) [11], [14], [15], [16].

$$\tau = \frac{1}{R(S)}, \quad (1.24)$$

Jak už bylo zmíněno výsledná intenzita stárnutí je dána superpozicí tepelného a elektrického namáhání a její obecný tvar popisuje rovnice (1.25), která vychází z obecných termodynamických teorií. Bližší odvození rovnice (1.25) je popsáno v publikacích [15] a [16].

$$R(S) = A \cdot e^{-\frac{B}{T}} \cdot e^{\left(\frac{a+b}{T}\right) \cdot f(E)}, \quad (1.25)$$

kde  $A$ ,  $B$ ,  $a$  a  $b$  jsou materiálové konstanty nezávislé na čase a elektrickém a tepelném namáhání,  $f(E)$  je funkce elektrického pole a  $T$  je teplota [K].

Z výše uvedeného vztahu je zřejmé, že pokud bude funkce intenzity elektrického pole rovna nule, přechází intenzita stárnutí v klasický **Arrheniův** vztah, viz (1.16). Pro další výpočet Simoni zavádí funkci elektrického pole jako:

$$f(E) = E - E_0, \quad (1.26)$$

kde  $E_0$  [kV·mm<sup>-1</sup>] je mezní hodnota intenzity elektrického pole a  $E$  [kV·mm<sup>-1</sup>] je intenzita elektrického pole, která působí na izolační materiál.

Z výše popsaných vztahů pak lze odvodit model termoelektrického stárnutí založený na exponenciálním modelu elektrického stárnutí, viz (1.27).

$$\tau(T, E) = \frac{1}{A} \cdot e^{-\frac{B}{T}} \cdot e^{-\left(\frac{a+b}{T}\right)(E-E_0)} \quad (1.27)$$

Jako alternativa k předchozímu modelu je zavedena funkce elektrického pole jako:

$$f(E) = \ln\left(\frac{E}{E_0}\right), \quad (1.28)$$

Odvození modelu termoelektrického stárnutí založeného na mocninném modelu elektrického stárnutí je popsáno v publikacích [15] a [16]. Výsledný model je charakterizován rovnicí (1.29).

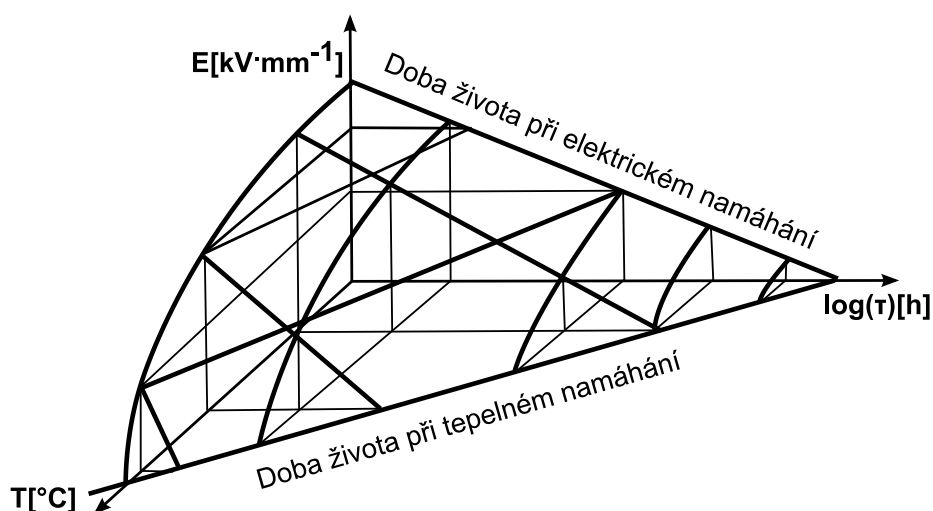
$$\tau(T, E) = \tau_0 \cdot e^{-B \cdot \Delta T} \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-N}, E \geq E_0, \quad (1.29)$$

kde  $\tau_0$  [h] je životnost izolačního systému při teplotě standardních podmínek prostředí a intenzitě elektrického pole  $E \leq E_0$ ,  $a$  a  $b$  jsou materiálové konstanty,  $T_0$  [K] je teplota

standardních podmínek prostředí,  $\Delta T$  je rovno  $\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$ ,  $N$  je rovno  $n - b \cdot \Delta T$  a  $n$  je rovno  $a + \frac{b}{T_0}$ .

Jak je z obou modelů patrné, jde o vynásobení vztahů popisující elektrické a tepelné namáhání. Nevýhodou těchto modelů je, že jsou založeny pouze na empirických vztazích.

Model dle vztahu (1.29) lze znázornit jako trojrozměrný graf, kde osy tohoto grafu jsou tvořeny intenzitou elektrického pole, teplotou a dobou života izolačního systému, viz Obr 1.10.



**Obr. 1.10** Grafické vyjádření doby života izolačních systémů dle Simoniho modelu stárnutí, [15]

#### 1.2.4 Ramuův model

Ramuův model popisuje kombinaci tepelného a elektrického stárnutí, viz studie [20]. Je jedním z dalších modelů, který je odvozený ze základních vztahů pro tepelné a elektrické namáhání. Vztah působících faktorů je v modelu charakterizován pomocí zavedených konstant. Jedná se o model elektrického stárnutí s tepelnou závislostí. Ramuův model je následně zapsán pomocí vztahu (1.30), viz [20] a [14].

$$\tau(T, E) = k(T) \cdot E^{-m(T)} \cdot e^{\frac{B(T_0 - T)}{T \cdot T_0}} = k(T) \cdot E^{-m(T)} \cdot e^{-B\Delta\left(\frac{1}{T}\right)}, \quad (1.30)$$

kde dále platí následující substituce:

$$k(T) = e^{k_1 - k_2 \Delta\left(\frac{1}{T}\right)} \quad \text{a} \quad m(T) = m_1 - m_2 \Delta\left(\frac{1}{T}\right), \quad (1.31)$$

kde  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  a  $B$  jsou konstanty,  $T$  je teplota a  $\Delta\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}$ .

Model může být dále zjednodušen:

$$\tau(T, E) = e^{k_1} \cdot E^{-\left[m_1 - m_2 \Delta\left(\frac{1}{T}\right)\right]} \cdot e^{-B \Delta\left(\frac{1}{T}\right)} \cdot e^{-k_2 \Delta\left(\frac{1}{T}\right)} = k \cdot E^{-\left[m_1 - m_2 \Delta\left(\frac{1}{T}\right)\right]} \cdot e^{-\tilde{B} \Delta\left(\frac{1}{T}\right)}, \quad (1.32)$$

kde  $k = e^{k_1}$  a  $\tilde{B} = (B + k_2)$  jsou konstanty.

U modelu v tomto tvaru je třeba určit pouze čtyři konstanty a lze ho vyjádřit v logaritmické formě, viz (1.33).

$$\ln[\tau(T, E)] = k_1 - \tilde{B} \Delta\left(\frac{1}{T}\right) - \left[m_1 - m_2 \Delta\left(\frac{1}{T}\right)\right] \cdot \ln E \quad (1.33)$$

Vztah (1.33) lze tedy interpretovat jako graf odolnosti vůči elektrickému a tepelnému namáhání vyjadřující stárnutí při konstantní teplotě v závislosti na elektrickém namáhání nebo jako stárnutí v závislosti na teplotě při konstantní intenzitě elektrického pole.

Opět je zřejmé, že jde o pouhé vynásobení vztahů popisující elektrické a tepelné namáhání. Nevýhodou tohoto modelu je, že je založen pouze na empirických vztazích a určování materiálových konstant může být značně obtížné.

### 1.2.5 Fallouův model

Fallouův model je dalším z empirických modelů, který vychází z exponenciálních modelů stárnutí při tepelném a elektrickém namáhání, viz studie [21]. Životnost izolačního systému je potom dána následujícím vztahem:

$$\tau(T, E) = e^{A(E) + \frac{B(E)}{T}}, \quad E > 0, \quad (1.34)$$



kde  $A(E)$  je rovno  $A_1 + A_2 E$  a  $B(E)$  je rovno  $B_1 + B_2 E$ .  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  a  $B_2$  jsou potom konstanty, které je nutno určit experimentálně. Tyto konstanty se nejčastěji určují pomocí zkoušek zrychleného stárnutí při konstantní teplotě.

Po dosažení jednotlivých konstant lze Fallouův model stárnutí přepsat do následujícího vztahu [11]:

$$\tau(T, E) = A_F \cdot e^{\left(\frac{A_2 + B_2}{T}\right)E} \cdot e^{\frac{B_1}{T}}, \quad (1.35)$$

kde  $A_F$  je nově zavedená konstanta.

Z rovnice je patrné, že pokud na daný izolační systém nepůsobí intenzita elektrického pole, model stárnutí přechází v klasický vztah dle **Büssinga**. Výsledný Fallouův model je ekvivalentní Simoniho modelu, viz rovnice (1.27). Nevýhodou tohoto modelu je, že nezahrnuje hladinu mezní intenzity elektrického pole, při které již nedochází k podstatnému stárnutí elektroizolačního systému a je opět pouze empirického charakteru.

### 1.2.6 Grzybowskiho model

Jedná se empirický model založený na kombinaci tepelného, elektrického a pulzního namáhání [27] a je dán vztahem (1.36).

$$\tau(V, T, f) = K f^{\left(m_1 + \frac{m_2}{V}\right)} e^{\left(\frac{A+B}{V+T}\right)}, \quad f > 0, \quad (1.36)$$

kde  $\tau$  je životnost izolačního systému [h],  $V$  je amplituda napětí [V],  $T$  je teplota [K],  $f$  je frekvence [Hz] a  $K$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $m_1$  a  $m_2$  jsou parametry, které je nutno určit pomocí experimentálních měření.

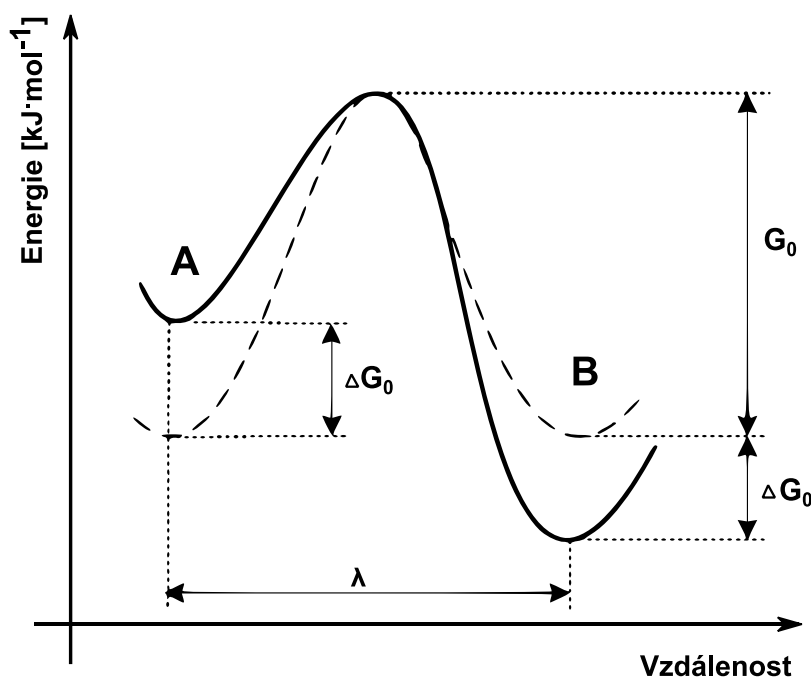
Z rovnice (1.36) je patrné, že se jedná o další empirický model, který je založen na exponenciálním modelu elektrického stárnutí (1.19) a **Büssingovo** vztahu (1.17).

Od ostatních se tento model liší zavedením frekvenčního stárnutí, které je reprezentováno vztahem  $f^{\left(m_1 + \frac{m_2}{V}\right)}$ . Model je však nedokonalý při úvaze použití stejnosměrného napětí, tedy

při nulové frekvenci. Je tedy zřejmé, že tento model je použitelný pouze pro střídavé nebo pulzní namáhání, kde se jednotlivé parametry charakterizující frekvenční stárnutí musí určit experimentálně.

### 1.2.7 Crineúv model

Předchozí uvedené modely jsou spíše empirického charakteru. Naproti tomu Crineúv model [22], [23], [24] vychází z termodynamiky a Boltzmanovy statistiky. Tento model je plnohodnotným fyzikálním modelem, kde všechny parametry tohoto modelu mají fyzikální charakter. Model vyplývá z představy, že stárnutí lze charakterizovat pomocí energetické bariéry, která odděluje provozuschopný stav elektroizolačního materiálu od stavu selhání, viz Obr. 1.11. Tento obrázek reprezentuje Crineúv termodynamický model pomocí dvojité potenciálové jámy. Aby se daný systém dostal z provozuschopného stavu *A* do stavu selhání *B*, musí být přivedena dodatečná energie k překonání této bariéry. Pravděpodobností tohoto přechodu je potom dána Boltzmanovou statistikou. Vnější elektrické pole tomuto procesu výrazně napomáhá, tím že zmenšuje velikost energetické bariéry.



Obr. 1. 11 Crineúv termodynamický model

Čárkovaná čára reprezentuje normální stav a plná čára reprezentuje stav izolačního systému za přítomnosti elektrického pole. Čas potřebný pro přechod ze stavu *A* do stavu *B*

přes energetickou bariéru je dle Crinea charakterizován jako doba života izolačního materiálu a lze jí zapsat jako:

$$\tau = \left( \frac{h}{k_B T} \right) e^{\frac{\Delta G_0}{k_B T}} \cosh \left( \frac{e_p \lambda E}{k_B T} \right), \quad (1.37)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,  $k_B$  je Boltzmanova konstanta,  $\Delta G_0$  je volná aktivační energie [eV],  $\lambda$  je šířka energetické bariéry,  $e_p$  je elektrický náboj ovlivňující proces stárnutí,  $E$  je intenzita elektrického pole [ $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ] a  $T$  je teplota [K].

Vztah (1.37) lze dále zjednodušit, za předpokladu, že na izolační materiál bude působit silné elektrické pole  $e_p \lambda E \gg k_B T$ , viz (1.38) [14].

$$\tau = \left( \frac{h}{2k_B T} \right) e^{\frac{\Delta G_0 + e_p \lambda E}{k_B T}}, \quad (1.38)$$

Je tedy patrné, že intenzita elektrického pole snižuje velikost energetické bariéry o hodnotu  $e_p \lambda E$  a tím snižuje celkovou životnost izolačního materiálu. Výhodou tohoto modelu je, že v oblasti vysokých hodnot intenzity elektrického pole, má křivka odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru exponenciální charakter a v oblasti nízkých hodnot intenzity elektrického pole má křivka pozvolný téměř lineární charakter. Tento fakt koresponduje s teorií mezní hodnoty elektrického pole  $E_0$ , jako je tomu v Simonioho modelu. Naopak nevýhodou tohoto modelu je obtížné určování šířky energetické bariéry  $\lambda$  a volné aktivační energie  $\Delta G_0$ , proto je použití tohoto modelu v praxi omezené.

### 1.2.8 Model prostorového náboje

Jedná se o další model, který stejně jako Crineův model vychází z fyzikálních zákonů. Byl navržen Dissadem, Mazzantim a Montanarim [25] a předpokládá, že prostorový náboj, který je injektován pomocí elektrod nebo způsoben nečistotami v izolačním systému je zodpovědný za nahromadění dodatečné energie, která dále snižuje velikost energetické bariéry a tím snižuje celkovou životnost izolačního systému. Je tedy zřejmé, že čím vyšší intenzita elektrického pole bude, tím vyšší bude koncentrace prostorového náboje. Tento model je, stejně jako Crineův model, popsán pomocí dvojité potenciálové jámy, viz Obr. 1.11 a je dán následujícím vztahem:

$$\tau(E, T) = \left( \frac{h}{2k_B T} \right) e^{\left( \frac{\frac{\Delta H}{h} - \frac{C'E^{2b}}{2} - \frac{\Delta s}{k_B}}{T} \right)} \cdot \ln \left( \frac{A_{eq}(E)}{A_{eq}(E) - A^*} \right) \cdot \left[ \cosh \left( \frac{\frac{\Delta}{k_B} - C'E^{2b}}{2T} \right) \right]^{-1}, \quad (1.39)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,  $k_B$  je Boltzmanova konstanta,  $C'$  a  $b$  jsou materiálové konstanty,  $\Delta$  je rovno  $G_B - G_A$ , kde  $G$  je volná aktivační energie [ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ] ve stavech  $A$  a  $B$ ,  $A_{eq}(E)$  je rovnovážná hodnota hodnoty  $A$ , kde  $A$  je konstanta získána pomocí rovnic pro chemické reakce, viz [25],  $A^*$  je kritická mez hodnoty  $A$ , při které dojde selhání (všechny tyto konstanty se získávají empiricky) a  $T$  je teplota [K].

Tento model lze však uplatnit pouze za předpokladu zatížení homogenního izolačního systému stejnosměrným napětím. Model byl dále rozšířen i pro použití střídavého napětí. Popisem tohoto rozšířeného modelu se zabývá studie [26]. Nevýhodou modelu je fakt, že  $\tau(E, T)$  není definována jako doba do poruchy, ale jako doba, při které dojde k vadám na izolačním systému, například ke tvorbě mikro dutin nebo trhlin [26].

### 1.3 Fyzikálně-statistické modely

Tato speciální skupina modelů stárnutí kombinuje statistická rozdělení s matematicko-fyzikálními modely.

#### 1.3.1 Montanariho pravděpodobností model

Montanariho pravděpodobností model [29], je statistický model, založený na Weibullově rozdělení. Pokud je elektroizolační systém vystavený kombinovanému stárnutí pomocí elektrického a tepelného namáhání, lze pro určení dob do poruchy využít distribuční funkci Weibullova rozdělení, viz (1.40).

$$F(t, E, T) = 1 - e^{-\left( \frac{t}{\eta(E, T)} \right)^{\beta(E, T)}}, \quad (1.40)$$

kde  $\eta = \eta(E, T)$  a  $\beta = \beta(E, T)$  jsou funkcí elektrického a tepelného namáhání. Parametr  $\eta$  charakterizuje dobu do poruchy s pravděpodobností 63,2 % a lze ho využít pro popis stárnutí elektroizolačního systému. Díky tomuto předpokladu, lze zapsat parametr  $\eta(E, T)$  jako životnostní model  $\tau = \tau(E, T)$ .

Pro popis parametru  $\eta(E, T)$  vychází tento model z upraveného mocninného modelu, viz [29], elektrického stárnutí uvažující mezní hodnotu intenzity elektrického pole, viz vztah (1.41). Po úpravě tento model lze zapsat následujícím způsobem:

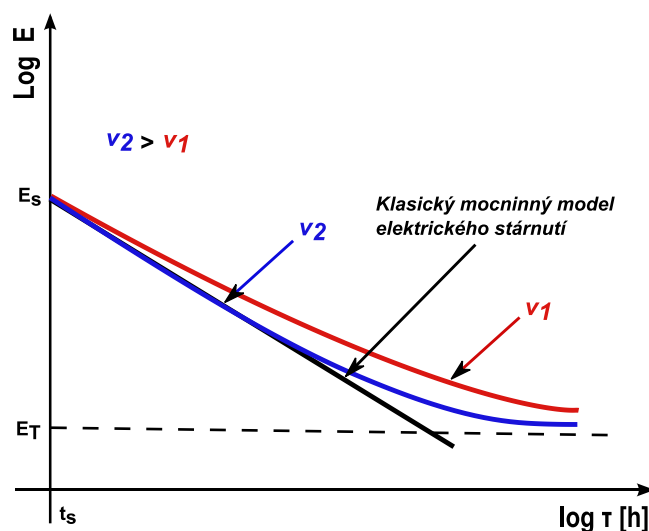
$$\eta(E, T) = \tau = t_s \cdot \left( \frac{E}{E_s} \right)^{-N_1}, \quad (1.41)$$

kde  $\tau$  je životnost izolačního systému;  $E_s$  je referenční intenzita elektrického pole, kde je tato hodnota charakterizována jako nejvyšší hodnota této intenzity elektrického pole při teplotě  $T$ ;  $t_s$  je doba do poruchy při intenzitě elektrického pole  $E_s$  a teplotě  $T$  a  $N_1$  je koeficient odolnosti, viz (1.42).

$$N_1 = \frac{N_c}{\left( 1 - \frac{E_s - E}{E_s - E_T} \right)^{\nu}}, \quad (1.42)$$

Koeficient odolnosti  $N_1$  je zaveden z důvodu dosažení optimálního zakřivení křivky odolnosti vůči působení degradačního faktoru. Tento koeficient je charakterizován parametrem tvaru  $\nu$ , referenční intenzitou elektrického pole  $E_s$ , mezní hodnotou elektrického pole  $E_T$  při teplotě  $T$  a počátečním odolnostním koeficientem  $N_c$ , kde  $N_c = N_1(E_s, t_s)$ .

Parametr tvaru  $\nu$  byl do tohoto modelu zaveden, protože různé materiály mohou mít odlišný tvar křivek odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru a to i za předpokladu stejného poměru intenzit  $\frac{E_T}{E_s}$ . Vliv parametru  $\nu$  na tvar křivek odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru je zobrazen na Obr. 1.12.



**Obr. 1.12** Vliv parametru  $\nu$  na tvar křivek odolnosti vůči působícímu namáhání

Dosažením parametru  $\eta(E, T)$ , viz (1.41), do rovnice (1.40) je získán následující pravděpodobnostní model:

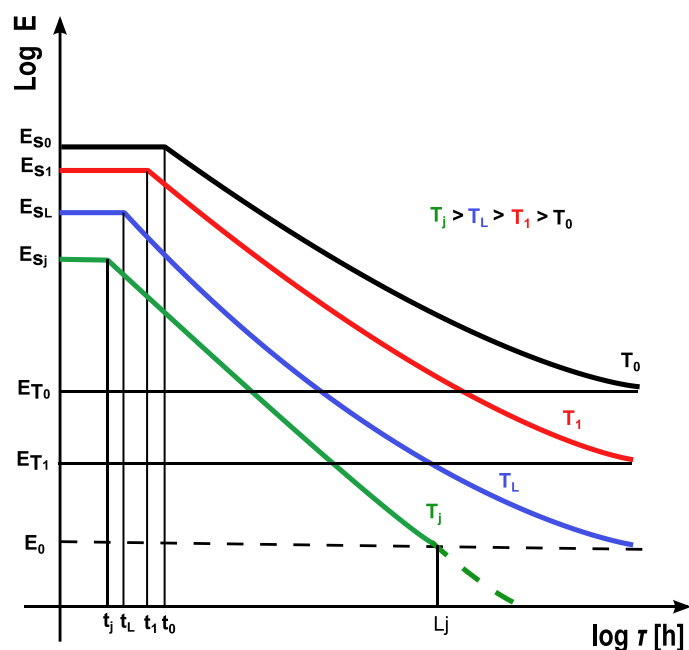
$$F(t, E, T) = 1 - e^{-\left[\frac{t}{t_s} \cdot \left(\frac{E}{E_s}\right)^{N_1}\right]^{\beta(E, T)}} \quad (1.43)$$

Montanariho pravděpodobnostní model, lze zapsat také pomocí percentilů  $t_{Fp}$  [h]:

$$t_{Fp} = \eta(E, T) \cdot \left(\ln\left[\frac{1}{1-p}\right]\right)^{\frac{1}{\beta(E, T)}} = t_s \cdot \left[\frac{E}{E_s}\right]^{-N_1} \cdot [-\ln(1-p)]^{\frac{1}{\beta(E, T)}}, \quad (1.44)$$

kde  $p$  je pravděpodobnost selhání elektroizolačního systému a  $t_{Fp}$  [h] je doba do poruchy elektroizolačního systému charakterizovaná pravděpodobností  $p$ .

Jedná se tedy o statistický životnostní model založený na Weibullově rozdělení využívající mocninný model elektrického stárnutí. Výhodou tohoto modelu je fakt, že zahrnuje mezní intenzitu elektrického pole při různých teplotách stárnutí, viz Obr. 1.13. Avšak nevýhodou tohoto modelu je, že nepopisuje degrační mechanismus elektroizolačních systémů z fyzikálního hlediska a je založen na empirickém vztahu elektrického stárnutí.



**Obr. 1.13** Křivky odolnosti vůči působícímu namáhání vycházející z mocninného modelu elektrického stárnutí při různých teplotách

Tento obrázek zobrazuje křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru vycházející z mocinného modelu elektrického stárnutí od teploty standardních podmínek prostředí  $T_0$  po teplotu  $T_j$ .  $T_L$  je potom limitní teplota pro mezní hodnotu elektrického pole  $E_0$ , kde  $T_j > T_L > T_0$ .

## 2 Cíle disertační práce

Jak bylo zmíněno výše, na elektroizolační systémy a elektrická zařízení působí mnoho degradačních mechanismů, které ovlivňují jejich životnost. Je téměř nemožné všechny tyto degradační mechanismy deterministicky popsat a zavést je do jednoho univerzálního modelu stárnutí. Sledováním a studiem degradačních mechanismů odehrávajících se uvnitř elektroizolačních systémů, lze však lépe popsat a následně modelovat skutečný stav těchto materiálů.

Je tedy snaha vytvořit takový model stárnutí s vybranými degradačními mechanismy, který by co nejvíce korespondoval se skutečným stavem. Tento model by měl být co nejjednodušší a co nejlépe aplikovatelný v praxi, pro on-line sledování zbytkové životnosti elektroizolačních systémů a elektrických zařízení. Existuje mnoho modelů [11]-[35], ale většina z nich je pouze empirického charakteru. Dále většina těchto modelů nezahrnuje mezní hodnoty vlivu degradačních faktorů. Je předpoklad, že při nízkých úrovních vlivu degradačních mechanismů, stárnutí elektroizolačních systémů téměř neprobíhá a uvnitř těchto systémů probíhá odlišný degradační mechanismus, než popisují současné modely. Naopak, při vyšších hodnotách stárnutí probíhá výrazně rychleji. Je tedy nutné identifikovat tyto degradační mechanismy a následně určit mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru, například pomocí statistických vyhodnocení.

*Z těchto důvodů byly navrženy následující cíle disertační práce:*

- **popsat elektroizolační materiály jak z hlediska fyzikálního, tak z hlediska statistického,**
- **stanovit nejdůležitější degradační faktory působící na elektroizolační systémy a zahrnout je do modelů stárnutí,**
- **z důvodu nemožnosti určení pravděpodobnosti a doby do poruchy elektroizolačních systémů pro variabilní intenzitu degradačního faktoru u**



**klasických statistických rozdělení, implementovat modely stárnutí, které jsou založeny na fyzikálním principu do modelů statistických, kde výsledný model bude tuto nevýhodu odstraňovat,**

- **vyvinout nové modely stárnutí, které budou založeny na matematicko-fyzikální podstatě a budou co nejlépe korespondovat se skutečným stavem elektroizolačních materiálů,**
- **u navržených modelů pro konkrétní elektroizolační materiály určit mezní hodnotu vlivu degračního faktoru, například pomocí statistických modelů,**
- **následně ověřit modely stárnutí pomocí experimentálního měření jak na kapalných tak pevných izolačních materiálech,**
- **u navržených modelů popsat degrační mechanismy před dosažením mezní hodnoty vlivu degračního faktoru.**

### 3 Model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru

Jedním z cílů disertační práce bylo navržení nového modelu stárnutí, který bude založen na matematicko-fyzikální podstatě a co nejlépe korespondovat se skutečným stavem elektroizolačních materiálů. U tohoto modelu následně určit mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru.

V současnosti je snaha vytvořit model stárnutí s vybranými degradačními mechanizmy, který by co nejvíce korespondoval se skutečným stavem a byl co nejlépe aplikovatelný v praxi pro on-line sledování zbytkové životnosti elektroizolačních systémů a elektrických zařízení, např. modely [20], [21], [22] a [29]. Aby tento model co nejvíce odpovídal skutečnosti, musí zahrnovat **mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru**. V případě modelu tepelného stárnutí jde tedy o teplotu  $T_T$  [K] před jejíž dosažení probíhá v elektroizolačním systému odlišný degradační mechanismus, než popisují prozatímní modely.

Navržený model vychází z předpokladu, že při nízkých úrovních vlivu degradačních mechanismů, stárnutí elektroizolačních systémů téměř neprobíhá a uvnitř těchto systémů probíhá odlišný degradační mechanismus.

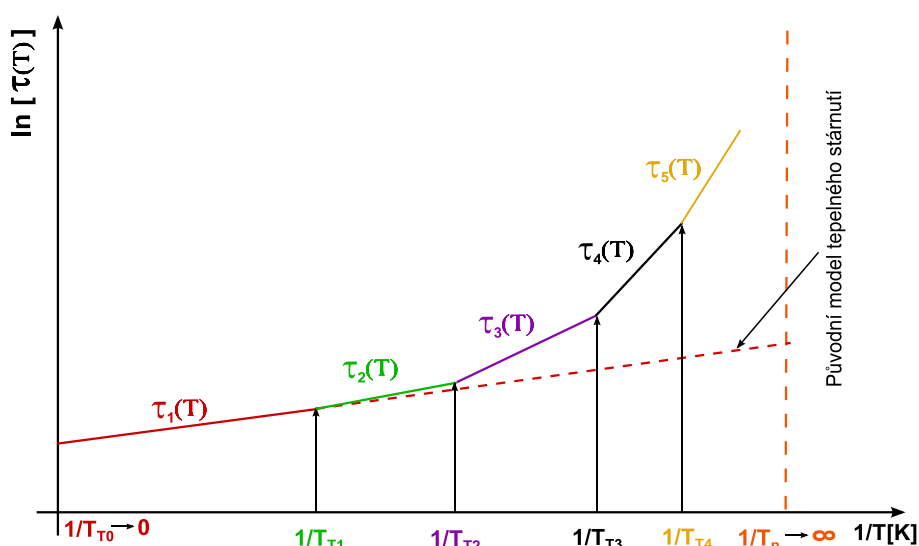
Popis degradace elektroizolačních systémů je závislý na co nejlepším pochopení fyzikálně chemických procesů. Čím lepší znalosti o těchto procesech jsou, tím lze sestavit konkrétnější model stárnutí. Z tohoto důvodu je nutné před samotným popisem navrženého modelu popsat kinetickou teorii látek, tato teorie je popsána v příloze 1.

#### 3.1 Návrh modelu

Klasický model tepelného stárnutí, který je založen na rovnici dle **Büssinga** [32], viz (1.17), nezahrnuje **mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru**. Z tohoto důvodu byl **navržen** „Model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu“, který je založen na klasickém modelu tepelného stárnutí (1.17) a snaží se tuto mezní hodnotu degradačního faktoru zahrnout pomocí matematicko-fyzikálních předpokladů.

Jak popisuje třetí termodynamický zákon, nelze dosáhnout teploty absolutní nuly, avšak lze se této teplotě limitně přiblížit. V tomto stavu se zastaví téměř veškerý tepelný pohyb částic, tj. je předpoklad téměř nulového stárnutí elektroizolačních systémů. Klasický Büssingův vztah sice tento fakt bere v potaz, ale výslednice dané rovnice nekoreluje se skutečným stavem.

Z výše uvedených důvodů navržený model vychází z předpokladu **nekonečného množství mezních stavů**, při jejímž překročení probíhají odlišné degradační mechanismy, než popisuje stávající rovnice (1.17). Mezní stavy jsou následně charakterizovány mezními teplotami  $T_{T1}$  až  $T_{Tn}$  a dílčími aktivačními energiemi  $E_{a1}$  až  $E_{an}$ . Aktivační energie  $E_{a1}$  až  $E_{an}$  tedy definují dílčí degradační mechanismy a charakterizují stárnutí elektroizolačního systému v intervalu mezních teplot  $T_{T1}$  až  $T_{Tn}$ . Grafické znázornění toho předpokladu v logaritmických souřadnicích je zobrazeno na Obr. 3.1.



**Obr. 3.1** Grafické znázornění navrženého modelu v logaritmických souřadnicích

Díky tomuto předpokladu lze zapsat model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu jako předpis funkce životnosti (3.1).

$$\begin{aligned}
 \tau(T) &= \tau_1 = K_1 \cdot a \cdot \tau_{T1}, \quad T \in \langle T_{T1}, \infty \rangle \\
 \tau(T) &= \tau_2 = K_2 \cdot a \cdot \tau_{T2}, \quad T \in \langle T_{T2}, T_{T1} \rangle \\
 &\vdots \\
 \tau(T) &= \tau_n = K_n \cdot a \cdot \tau_{Tn}, \quad T \in (0, T_{T(n-1)}),
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

kde  $\tau_i$  [h], pro  $i = (1 \text{ až } n)$ , je životnost elektroizolačního systému v intervalu teplot  $T \in \langle T_{Ti}, T_{T(i-1)} \rangle$  vycházející ze vztahu (1.17), viz rovnice (3.2) a  $K_i$  [-] je korekční parametr pro zachování podmínky  $\tau_{(i-1)}(T_{T(i-1)}) = \tau_i(T_{T(i-1)})$ , viz rovnice (3.3).

$$\tau_i = K_i \cdot a \cdot \tau_{Ti} = K_i \cdot a \cdot e^{\frac{E_{ai}}{RT}}, T \in \langle T_{Ti}, T_{T(i-1)} \rangle, \quad (3.2)$$

kde  $a$  [h] je převrácená hodnota předexponenciálního faktoru,  $T$  je teplota [K],  $E_{ai}$  je aktivační energie dílčí degradačního mechanismu [ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ] a  $R$  je univerzální plynová konstanta, která má hodnotu  $8,31447215 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

$$K_i = \frac{\tau_{T(i-1)}(T_{T(i-1)})}{\tau_{Ti}(T_{T(i-1)})}, \quad (3.3)$$

kde pro  $K_1$  platí  $K_1 = \frac{\tau_{T0}(T_{T0})}{\tau_{T1}(T_{T0})} = \frac{1}{1} = 1$ , pro  $T_{T0} \rightarrow \infty$ . Je tedy zřejmé, že člen  $\tau_1$  přechází v klasický **Büssingův** vztah, viz (1.17).

Hodnoty parametrů charakterizujících model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu pro jednotlivé dílčí degradační mechanismy definuje Tab. 3.1.

**Tab. 3.1** Hodnoty parametrů charakterizujících model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu pro jednotlivé dílčí degradační mechanismy

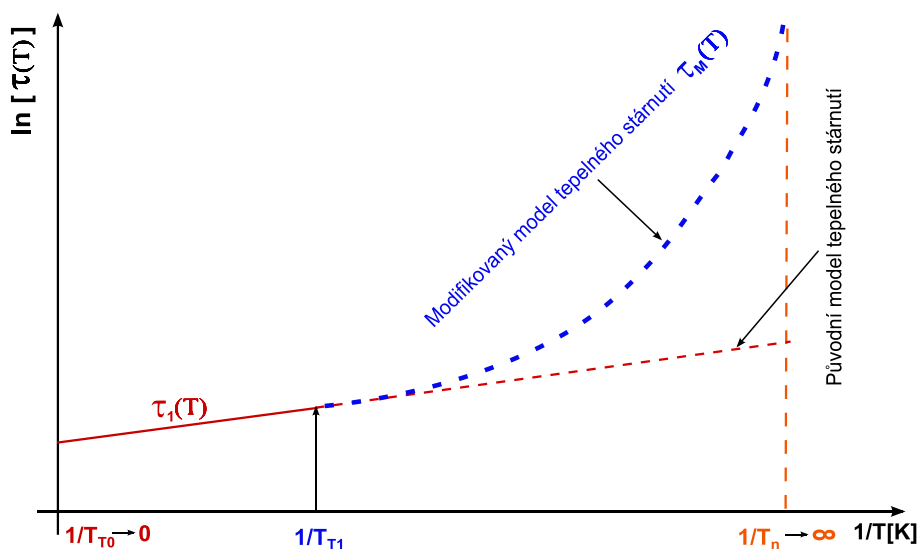
$i$	Interval $T_i$ [K]	$T_{Ti}$ [K]	$\tau_i$ [h]	$E_{ai}$ [ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]	$K_i$ [-]
1	$T \in \langle T_{T1}, \infty \rangle$	$\infty$	$\tau_1 = K_1 \cdot a \cdot \tau_{T1} = K_1 \cdot a \cdot e^{\frac{E_{a1}}{RT}}$	$E_{a1}$	$K_1 = \frac{\tau_{T0}(T_{T0})}{\tau_{T1}(T_{T0})} = 1$
2	$T \in \langle T_{T2}, T_{T1} \rangle$	$T_{T1}$	$\tau_2 = K_2 \cdot a \cdot \tau_{T2} = K_2 \cdot a \cdot e^{\frac{E_{a2}}{RT}}$	$E_{a2}$	$K_2 = \frac{\tau_{T1}(T_{T1})}{\tau_{T2}(T_{T1})}$
3	$T \in \langle T_{T3}, T_{T2} \rangle$	$T_{T2}$	$\tau_3 = K_3 \cdot a \cdot \tau_{T3} = K_3 \cdot a \cdot e^{\frac{E_{a3}}{RT}}$	$E_{a3}$	$K_3 = \frac{\tau_{T2}(T_{T2})}{\tau_{T3}(T_{T2})}$
⋮					
$n$	$T \in (0, T_{T(n-1)})$	$T_{T(n-1)}$	$\tau_n = K_n \cdot a \cdot \tau_{Tn} = K_n \cdot a \cdot e^{\frac{E_{an}}{RT}}$	$E_{an}$	$K_n = \frac{\tau_{T(n-1)}(T_{T(n-1)})}{\tau_{Tn}(T_{T(n-1)})}$

Pokud jsou obě strany rovnice (3.2) logaritmovány přirozeným logaritmem, je získána rovnice (3.4).

$$\ln(\tau_i) = \ln(a) + \ln(K_i) + \frac{E_{ai}}{RT}, \quad T \in \langle T_{Ti}, T_{T(i-1)} \rangle, \quad (3.4)$$

Grafické znázornění funkce (3.4) je následně zobrazeno na Obr. 3.1.

Jak bylo uvedeno výše, navržený model vychází z předpokladu **nekonečného množství mezních stavů**, při jejímž překročení probíhají odlišné degradační mechanismy, než popisuje stávající rovnice (1.17). Je tedy zřejmé, že výslednice dílčích degradačních mechanismů v logaritmickém měřítku před dosažením mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru je **exponenciálního charakteru**. Výsledný průběh modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu je zobrazen na Obr. 3.2.



**Obr. 3.2** Průběh modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru v logaritmických souřadnicích

Modifikovaný model tepelného stárnutí  $\tau_M(T)$  pro  $T \in (0, T_{T1})$  je potom charakterizován rovnicí (3.5).

$$\tau_M(T) = K_M \cdot a \cdot \tau_{TM} = K_M \cdot a \cdot e^{\left(\frac{D}{T}\right)}, \quad T \in (0, T_{T1}), \quad (3.5)$$

kde  $\tau_M$  [h] je modifikovaný model tepelného stárnutí,  $D$  [K] je materiálová konstanta, která je charakterizována synergickým účinkem dílčích degračních mechanismů,  $a$  [h] je převrácená hodnota předexponenciálního faktoru a  $K_M$  [-] je korekční parametr pro zachování podmínky  $\tau_1(T_{T1}) = \tau_M(T_{T1})$  a je dán vztahem (3.6).

$$K_M = \frac{\tau_{T1}(T_{T1})}{\tau_{TM}(T_{T1})} = \frac{e^{\left(\frac{E_{a1}}{RT_{T1}}\right)}}{e^{\left(\frac{D}{T_{T1}}\right)}} = e^{\left[\left(\frac{E_{a1}}{RT_{T1}}\right) - e^{\left(\frac{D}{T_{T1}}\right)}\right]} \quad (3.6)$$

Pokud jsou známy modely stárnutí  $\tau_1(T)$  pro interval teplot  $T \in \langle T_{T1}, \infty \rangle$  a  $\tau_M(T)$  pro interval teplot  $T \in (0, T_{T1})$ , které definují dílčí degrační mechanismy, lze zapsat výsledný model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu jako vztah (3.7).

$$\begin{aligned} \tau(T) = \tau_1 &= K_1 \cdot a \cdot \tau_{T1} = K_1 \cdot a \cdot e^{\frac{E_{a1}}{RT}} = a \cdot e^{\frac{E_{a1}}{RT}}, \quad T \in \langle T_{T1}, \infty \rangle \\ \tau(T) = \tau_M &= K_M \cdot a \cdot \tau_{TM} = K_M \cdot a \cdot e^{e^{\left(\frac{D}{T}\right)}} = e^{\left[\left(\frac{E_{a1}}{RT_{T1}}\right) - e^{\left(\frac{D}{T_{T1}}\right)}\right]} \cdot a \cdot e^{e^{\left(\frac{D}{T}\right)}}, \quad T \in (0, T_{T1}). \end{aligned} \quad (3.7)$$

Model (3.7) lze dále zjednodušit zavedením funkcí  $B(T)$  a  $C(T)$  vymezující mezní hodnotu vlivu degračního faktoru  $T_{T1}$  v závislosti na teplotě  $T$ . Výsledný model (3.7) je poté zapsán v následujícím tvaru:

$$\begin{aligned} \tau(T) &= a \cdot K_M^{B(T)} \cdot e^{\frac{E_{a1} \cdot C(T)}{RT}} \cdot e^{B(T) \cdot e^{\left(\frac{D}{T}\right)}} = a \cdot K_M^{B(T)} \cdot e^{\left[\left(\frac{E_{a1} \cdot C(T)}{RT}\right) + B(T) \cdot e^{\left(\frac{D}{T}\right)}\right]} = \\ &= a \cdot e^{\left[\left(\frac{E_{a1} \cdot B(T)}{RT_{T1}}\right) - B(T) \cdot e^{\left(\frac{D}{T_{T1}}\right)}\right]} \cdot e^{\left[\left(\frac{E_{a1} \cdot C(T)}{RT}\right) + B(T) \cdot e^{\left(\frac{D}{T}\right)}\right]} = \\ &= a \cdot e^{\left[\left(\frac{E_{a1} \cdot C(T)}{RT}\right) + \left(\frac{E_{a1} \cdot B(T)}{RT_{T1}}\right) + B(T) \cdot \left[e^{\left(\frac{D}{T}\right)} - e^{\left(\frac{D}{T_{T1}}\right)}\right]\right]} = a \cdot e^{\left[\left(\frac{E_{a1} \cdot (C(T) \cdot T_{T1} + B(T) \cdot T)}{R \cdot T \cdot T_{T1}}\right) + B(T) \cdot \left[e^{\left(\frac{D}{T}\right)} - e^{\left(\frac{D}{T_{T1}}\right)}\right]\right]}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

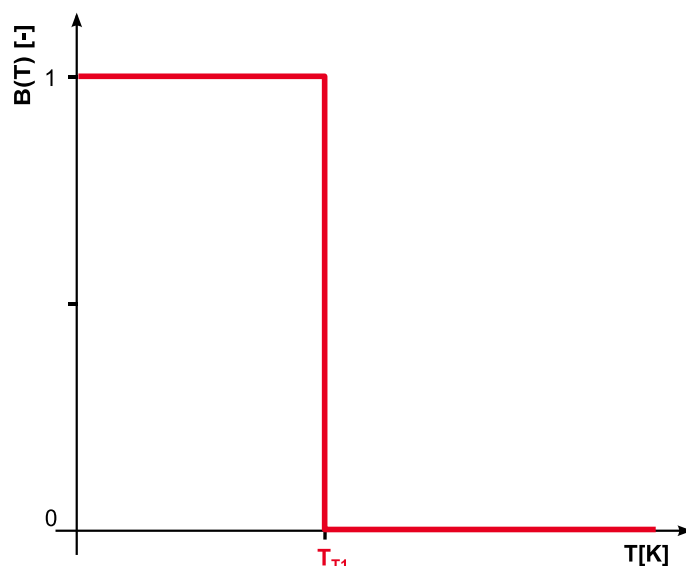
kde  $B(T)$  [-] a  $C(T)$  [-] jsou funkce vymezující mezní hodnotu vlivu degračního faktoru  $T_{TI}$  v závislosti na teplotě  $T$ , pro které platí  $B(T) = 0$ ;  $C(T) = 1$  pro  $T \in \langle T_{TI}, \infty \rangle$  a  $B(T) = 1$ ;  $C(T) = 0$  pro  $T \in (0, T_{TI})$ .

Funkce  $B(T)$  je následně charakterizována jako cyklometrická funkce  $-\arctg$  posunutá o  $\frac{1}{2}$  po ose  $B$ , vynásobená konstantou  $\frac{1}{\pi}$  a posunutá o teplotu  $T_{TI}$  násobenou konstantou limitně se blížíící k nekonečnu. Tato funkce je následně popsána rovnicí (3.9) a je zobrazena na Obr. 3.3.

$$B(T) = \frac{1}{\pi} \cdot \arctg \left[ \left( \lim_{s \rightarrow \infty} s \right) \cdot (T_{TI} - T) \right] + \frac{1}{2} =$$

$$\frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ \pi + 2 \arctg \left[ \left( \lim_{s \rightarrow \infty} s \right) \cdot (T_{TI} - T) \right] \right\} \quad (3.9)$$

kde  $s$  [-] je konstanta blížíící se limitně k nekonečnu a  $T_{TI}$  je mezní hodnota vlivu degračního mechanismu vymezující platnost navrženého modelu. Konstanta  $s$  byla zavedena pro zachování schodovitěho tvaru průběhu funkce  $B(T)$ .

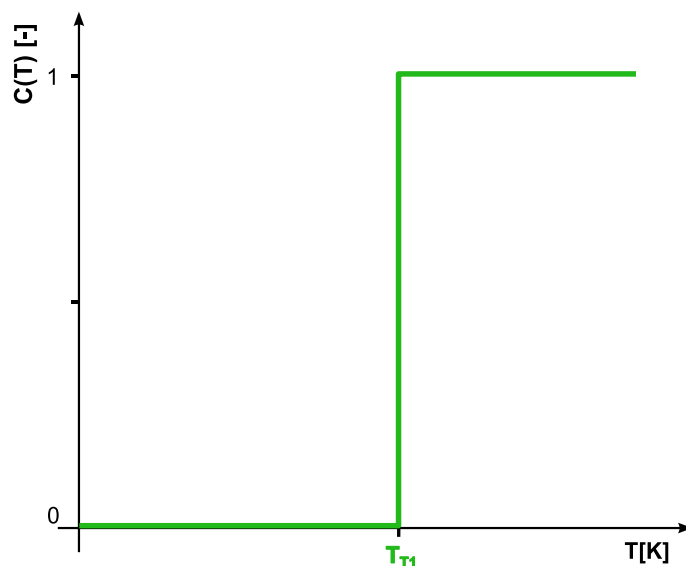


**Obr. 3.3** Funkce vymezující mezní hodnotu vlivu degračního faktoru  $B(T)$

Podobným způsobem jako  $B(T)$  je definována funkce  $C(T)$ . Má opačný průběh než funkce  $B(T)$  a vychází z cyklotrické funkce  $\arctg$ . Rozdíl teplot  $(T_{T1} - T)$  tedy nabývá opačného znaménka, tj.  $(T - T_{T1})$ . Funkce  $C(T)$  je následně popsána rovnicí (3.10) a je zobrazena na Obr. 3.4.

$$C(T) = \frac{1}{\pi} \cdot \arctg \left[ \left( \lim_{s \rightarrow \infty} s \right) \cdot (T - T_{T1}) \right] + \frac{1}{2} =$$

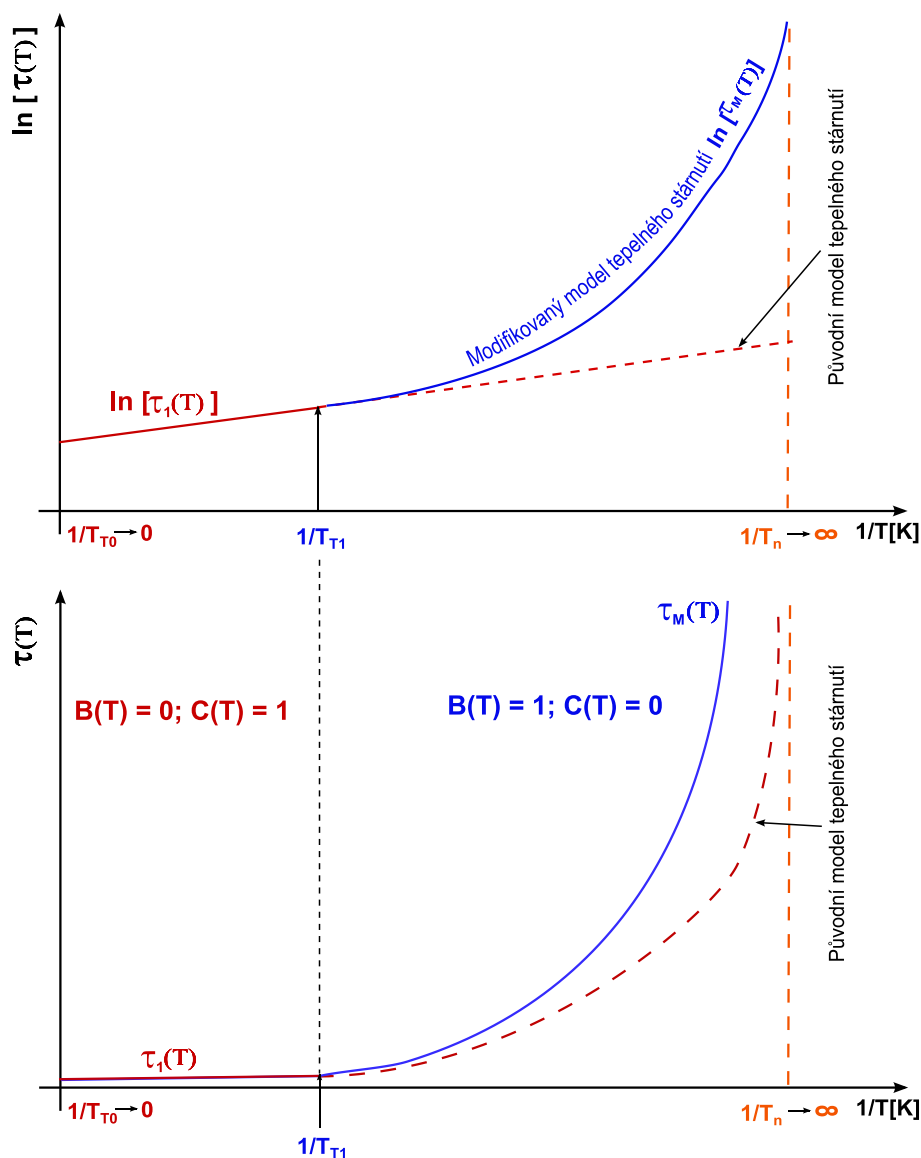
$$\frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ \pi + 2 \arctg \left[ \left( \lim_{s \rightarrow \infty} s \right) \cdot (T - T_{T1}) \right] \right\} \quad (3.10)$$



**Obr. 3.4** Funkce vymezující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru  $C(T)$

Grafické znázornění výsledného navrženého modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru je zobrazeno na Obr. 3.5.





**Obr. 3.5** Grafické znázornění výsledného navrženého modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru

Navržený model tepelného stárnutí elektroizolačních systémů tedy uvažuje pro teploty  $T \in (0, T_{T1})$  dvojitý exponenciální průběh, který je charakterizován materiálovou konstantou  $D$  definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů. Tato část modelu je charakterizována funkcemi vymežující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru  $B(T) = 1$  a  $C(T) = 0$ .

Pro teploty  $T \in \langle T_{T1}, \infty \rangle$  model uvažuje klasický **Büssingův** vztah, viz (1.17). Tento průběh je následně charakterizován funkcemi vymežující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru  $B(T) = 0$  a  $C(T) = 1$ .

## 4 Pravděpodobnostní model s využitím modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degračního faktoru

Dalším z cílů disertační práce je implementace modelů stárnutí, které jsou založeny na fyzikálním principu do modelů statistických. Výhodou aplikace statistického modelu jsou údaje distribuční funkce, které odhadují pravděpodobnost doby do poruchy pro konkrétní hodnotu intenzity působícího degračního faktoru. Tak lze získat důležité předpoklady o chování systému. Nevýhodou je, že pro proměnnou intenzitu vlivu degračního faktoru, je odhadovaná pravděpodobnost a doba do poruchy elektroizolačního systému vůči studovanému mechanismu nepředvídatelná. Z tohoto důvodu byl navržen pravděpodobnostní model s využitím modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degračního faktoru, který se snaží tuto nevýhodu odstranit.

S využitím postupu, který je popsán v kapitole 1.3.1, byl vytvořen pravděpodobnostní model s využitím navrženého modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degračního faktoru, viz kapitola 3. Tento model je stejně jako Montanariho pravděpodobnostní model [29] založen na Weibullově rozdělení a charakterizuje elektroizolační systémy z hlediska pravděpodobnosti poruchy izolačního systému v čase.

Pro popis dob do poruchy elektroizolačního systému je použita distribuční funkce, viz (4.1). Parametr  $\eta = \eta(T)$  je následně charakterizován navrženým modelem tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degračního faktoru (3.8), viz (4.2).

$$F(t, T) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta(T)}\right)^{\beta(T)}}, \quad (4.1)$$

$$\eta(T) = a \cdot K_M^{B(T)} \cdot e^{\frac{E_{a1} \cdot C(T)}{RT}} \cdot e^{B(T) \cdot e^{\left(\frac{D}{T}\right)}} =$$

$$a \cdot e^{-\left[ \left( \frac{E_{a1} \cdot (C(T) \cdot T_{T1} + B(T) \cdot T)}{R \cdot T \cdot T_{T1}} \right) + B(T) \cdot \left[ e^{\left(\frac{D}{T}\right)} - e^{\left(\frac{D}{T_{T1}}\right)} \right] \right]}, \quad (4.2)$$

kde  $K_M$  [-] je korekční parametr pro zachování podmínky  $\tau_1(T_{T1}) = \tau_M(T_{T1})$ ;  $D$  [K] je materiálová konstanta, která je charakterizována synergickým účinkem dílčích degradačních mechanismů;  $a$  [h] je převrácená hodnota předexponenciálního faktoru;  $E_{a1}$  [J·mol<sup>-1</sup>] je aktivační energie degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{T1}$  [K];  $R$  [J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup>] je univerzální plynová konstanta;  $B(T)$  [-] a  $C(T)$  [-] jsou funkce vymezující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru  $T_{T1}$  [K] v závislosti na teplotě  $T$  [K];  $\beta(T)$  [-] funkce parametru tvaru Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě  $T$  [K];  $\eta(T)$  [h] je funkce parametru měřítka Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě  $T$  [K] a  $t$  [h] je doba do poruchy elektroizolačního systému.

Dosazením vztahu (4.2) do vztahu (1.1), lze navržený pravděpodobnostní model zapsat jako:

$$F(t, T) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta(T)}\right)^{\beta(T)}} = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a} \cdot e^{\left[\left(\frac{E_{a1} \cdot (C(T) \cdot T_{T1} + B(T) \cdot T)}{R \cdot T \cdot T_{T1}}\right) + B(T) \cdot \left[e^{\left(\frac{D}{T}\right)} - e^{\left(\frac{D}{T_{T1}}\right)}\right]\right]} \right)^{\beta(T)}} \quad (4.3)$$

Tento model, lze také zapsat pomocí percentilů:

$$t_{Fp}(T) = \eta(T) \cdot \left(\ln\left[\frac{1}{1-p}\right]\right)^{\frac{1}{\beta(T)}} = a \cdot e^{\left[\left(\frac{E_{a1} \cdot (C(T) \cdot T_{T1} + B(T) \cdot T)}{R \cdot T \cdot T_{T1}}\right) + B(T) \cdot \left[e^{\left(\frac{D}{T}\right)} - e^{\left(\frac{D}{T_{T1}}\right)}\right]\right]} \cdot \left(\ln\left[\frac{1}{1-p}\right]\right)^{\frac{1}{\beta(T)}}, \quad (4.4)$$

kde  $p$  je pravděpodobnost selhání elektroizolačního systému a  $t_{Fp}$  [h] je doba do poruchy elektroizolačního systému charakterizovaná pravděpodobností  $p$ .

Hustota pravděpodobnosti navrženého pravděpodobnostního modelu je následně definována jako první derivace distribuční funkce (4.1) podle času a je dána ve tvaru (4.5).

$$\begin{aligned}
 f(t, T) &= \frac{d(F(t, T))}{dt} = \frac{\beta(T)}{\eta(T)} \cdot \left( \frac{t}{\eta(T)} \right)^{\beta(T)-1} \cdot e^{-\left( \frac{t}{\eta(T)} \right)^{\beta(T)}} = \\
 &= \frac{\beta(T) \cdot e^{-\left[ \left( \frac{E_{a1} \cdot (C(T) \cdot T_{T1} + B(T) \cdot T)}{R \cdot T \cdot T_{T1}} \right) + B(T) \cdot \left[ e^{\left( \frac{D}{T} \right)} - e^{\left( \frac{D}{T_{T1}} \right)} \right] \right]}}{a} \cdot \left( \frac{t \cdot e^{-\left[ \left( \frac{E_{a1} \cdot (C(T) \cdot T_{T1} + B(T) \cdot T)}{R \cdot T \cdot T_{T1}} \right) + B(T) \cdot \left[ e^{\left( \frac{D}{T} \right)} - e^{\left( \frac{D}{T_{T1}} \right)} \right] \right]}}{a} \right)^{\beta(T)-1} \\
 &\quad \cdot e^{-\left( \frac{t}{a} \cdot e^{-\left[ \left( \frac{E_{a1} \cdot (C(T) \cdot T_{T1} + B(T) \cdot T)}{R \cdot T \cdot T_{T1}} \right) + B(T) \cdot \left[ e^{\left( \frac{D}{T} \right)} - e^{\left( \frac{D}{T_{T1}} \right)} \right] \right]} \right)^{\beta(T)}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Pro přesné vyhodnocení jak modelu (3.8), tak modelu (4.3), je nutné určení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{T1}$ . Určením této mezní teploty se zabývá následující kapitola 4.1.

#### 4.1 Určení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru $T_{T1}$

Určení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{T1}$  vychází z navrženého pravděpodobnostního modelu (4.3), který je popsán v kapitole 4.

Pro další úvahy je zavedena veličina  $\lambda(t, T)$ , která charakterizuje intenzitu poruch v závislosti na teplotě  $T$ , čase  $t$  a je dána vztahem (4.6).

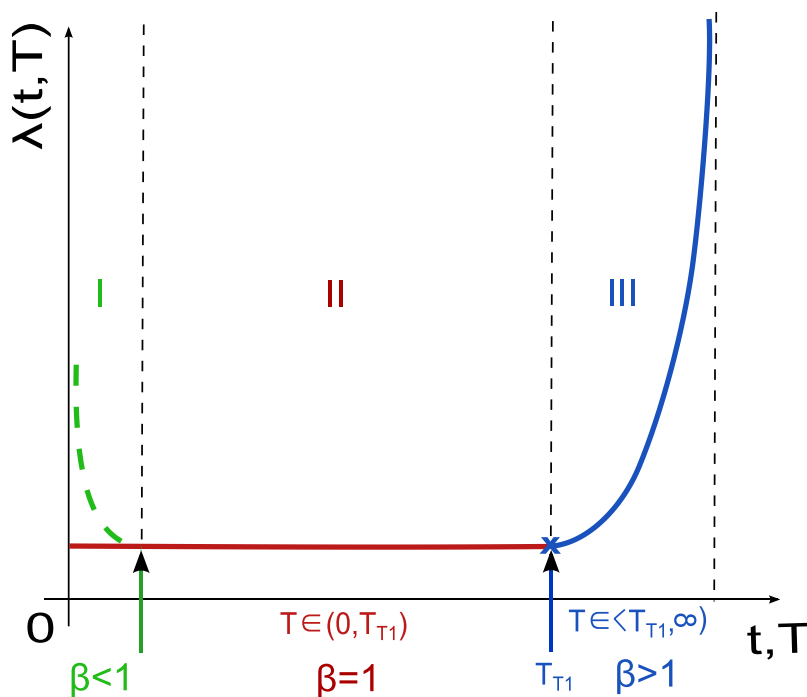
$$\lambda(t, T) = \frac{f(t, T)}{R(t, T)} = \frac{f(t, T)}{1 - F(t, T)} = \frac{\frac{\beta(T)}{\eta(T)} \cdot \left( \frac{t}{\eta(T)} \right)^{\beta(T)-1} \cdot e^{-\left( \frac{t}{\eta(T)} \right)^{\beta(T)}}}{e^{-\left( \frac{t}{\eta(T)} \right)^{\beta(T)}}} = \tag{4.6}$$

$$\frac{\beta(T)}{\eta(T)} \cdot \frac{t^{\beta(T)-1}}{\eta(T)^{\beta(T)-1}} = \frac{\beta(T) \cdot t^{\beta(T)-1}}{\eta(T)^{\beta(T)}} =$$

$$\frac{\beta(T) \cdot t^{\beta(T)-1}}{a^{\beta(T)}} \cdot e^{-\left[ \left( \frac{E_{a1} \cdot (C(T) \cdot T_{T1} + B(T) \cdot T)}{R \cdot T \cdot T_{T1}} \right) + B(T) \cdot \left[ e^{\left( \frac{D}{T} \right)} - e^{\left( \frac{D}{T_{T1}} \right)} \right] \right]^{\beta(T)}}, \quad t > 0,$$

kde  $F(t, T)$  [-] je distribuční funkce Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě  $T$ ,  $R(t, T)$  [-] je pravděpodobnost bezporuchového stavu v závislosti na teplotě  $T$ ,  $f(t, T)$  [-] je hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě  $T$  a  $t$  [h] je doba do poruchy elektroizolačního systému.

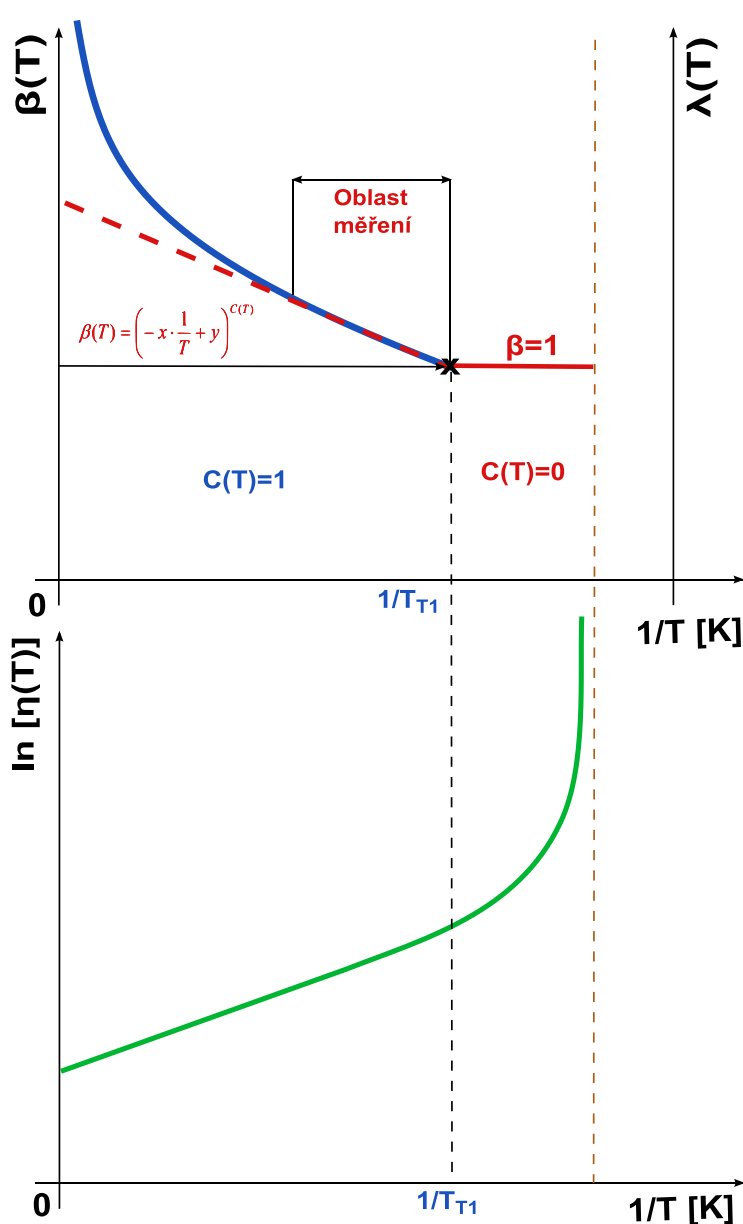
Z výsledného vztahu (4.6) je zřejmé, že intenzita poruch  $\lambda(t, T)$  je proměnná v závislosti na čase  $t$  [h] a teplotě  $T$  [K], která dále charakterizuje funkci parametru tvaru Weibullova rozdělení  $\beta(T)$  [-]. Pomocí těchto proměnných lze zakreslit tzv. vanovou křivku, viz Obr. 4.1 [4], která charakterizuje četnosti poruch elektroizolačního systému v čase  $t$  a teplotě  $T$ .



Obr. 4.1 Vanová křivka [4]

První **období I** se v tomto případě **neuvažuje**. **Období II** v případě určení mezní hodnoty charakterizuje běžný provoz, kde elektroizolační materiály stárnou velmi pomalu a dochází k náhodným poruchám (například úder blesku, přetížení). **Období III** naznačuje poruchy, které jsou spojeny s opotřebením elektroizolačních materiálů, tj. v této části křivky dochází k výraznému procesu stárnutí. [4]

Je tedy předpoklad, že při **přechodu** z **období II** do **období III** nastává mezní hodnota vlivu degradačního faktoru. To lze znázornit na Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Určení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{T1}$

V oblasti experimentálního měření a běžných provozních teplot elektrických zařízení lze výslednici parametru  $\beta(T)$  aproximovat lineární funkcí, která od mezní hodnoty vlivu degračního faktoru  $T_{TI}$  **nabývá hodnoty 1**, tj. je předpoklad pouze náhodných poruch. Tento vztah je popsán rovnicí (4.7).

$$\beta(T) = \left( -x \cdot \frac{1}{T} + y \right)^{C(T)}, \quad (4.7)$$

kde  $x$  [K] je směrnice funkce parametru tvaru Weibullova rozdělení  $\beta(T)$  [-] v závislosti na teplotě  $T$  v oblasti provozních teplot elektroizolačních systémů,  $y$  [-] je absolutní člen a  $C(T)$  [-] je funkce vymezující mezní hodnotu vlivu degračního faktoru  $T_{TI}$  v závislosti na teplotě  $T$ .

Vyjádřením teploty  $T$  a dosazením hodnoty  $\beta(T) = 1$ , viz předchozí úvaha, lze ze vztahu (4.7) odvodit výsledný odhad mezní hodnoty vlivu degračního faktoru  $\hat{T}_{TI}$  ve tvaru (4.8).

$$\hat{T}_{TI} = \frac{x}{y-1}, \quad (4.8)$$

kde  $\hat{T}_{TI}$  [K] je odhad mezní hodnoty vlivu degračního faktoru.

**Výhodou této metody je, že pro určení mezní hodnoty vlivu degračního faktoru  $T_{TI}$  není nutné této hodnoty při experimentálním měření dosáhnout**, lze jen z příslušného trendu parametru tvaru Weibullova rozdělení  $\beta(T)$ , tuto hodnotu odhadnout.

## 4.2 Zhodnocení navrženého modelu

Výhodou aplikace statistických modelů jsou údaje distribuční funkce, které odhadují pravděpodobnost doby do poruchy pro konkrétní hodnotu intenzity působícího degradačního faktoru. Tak lze získat důležité předpoklady o chování systému. Nevýhodou statistických modelů je, ale fakt, že tyto údaje lze aplikovat jen pro konkrétní hodnotu intenzity působícího degradačního faktoru. Z tohoto důvodu byl **navržen pravděpodobnostní model s využitím modelu tepelného stárnutí, který se snaží tuto nevýhodu odstranit.**

Navržený model je založen, na rozdíl od Montanariho pravděpodobnostního modelu, na fyzikálně odvozeném modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru a dokáže informovat o pravděpodobnosti poruchy elektroizolačního systému při **variabilní intenzitě** degradačního faktoru.

Další jeho výhodou je fakt, že **aproximací** funkce parametru tvaru  $\beta(T)$  Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě  $T$ , lze **získat** mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$ , která může být použita v modelech jiných. Naopak nevýhodou je, že model uvažuje pouze jediný degradační faktor a pro jeho určení musí být použito mnoha vzorků pro co nevěrohodnější statistický odhad.



## 5 Experimentální část

Pro ověření zmíněných předpokladů byl proveden experiment na čtyřech sadách testovacích vzorků, které se skládaly z transformátorové lepenky. Testovaná lepenka byla lesklá lepenka **Fassmann** o tloušťce 0,5 mm typu B.2.1 dle ČSN EN 60641-3-1 [36], vyráběná ze zamokra lisované sulfátové buničiny, kdy je výrobní proces zakončen kalandrováním.

Vzorky byly vystaveny tepelné degradaci na teplotách **160°C**, **170°C** a **180°C** po dobu **240 hodin**, kde v intervalech **120** a **240 hodin** byly proměřovány hodnoty elektrické pevnosti. Tyto teploty a měřicí časy byly zvoleny dle empirických zkušeností na KET FEL ZČU.

Elektrická pevnost testovaných vzorků byla provedena zkouškou elektrické pevnosti při plynule zvyšovaném sinusovém napětí o frekvenci 50 Hz dle normy ČSN EN 60243-1 (346463) [37], kde k průrazům vzorků docházelo mezi 10. až 20. sekundou díky nastavení náběhu napětí na  $400 \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$ . Elektrodotové uspořádání měřicího systému je zobrazeno na Obr. 5.1.



**Obr. 5.1** Elektrodotové uspořádání pro měření elektrické pevnosti

## 5.1 Postup sestavení pravděpodobnostního modelu s využitím modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru pro naměřená experimentální data

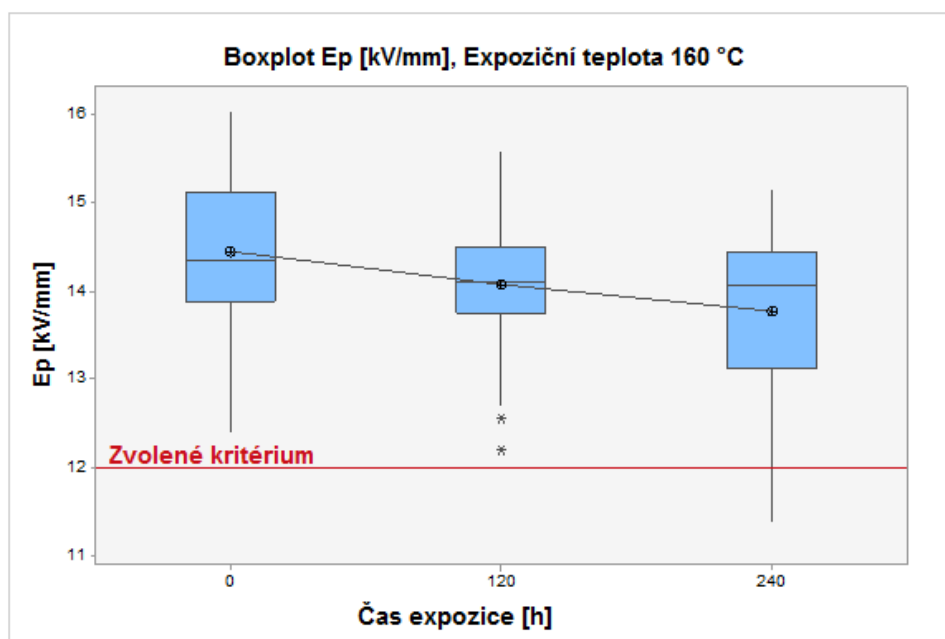
Pro co nejpřesnější vyhodnocení a odhadování parametrů Weibullova rozdělení bylo použito na každé sadě **50 testovacích vzorků**, které byly podrobeny zkoušce elektrické pevnosti.

Průběhy měření elektrické pevnosti při různých expozičních teplotách jsou zobrazeny na Obr. 5.2, Obr. 5.3 a Obr. 5.4. Pro větší přehlednost jsou průběhy na Obr. 5.2 - 5.4 vykresleny jako krabicové grafy, sestavené ve statistickém softwaru *Minitab 17*, které charakterizují medián, střední hodnotu, 1. a 3. kvartil. Úsečky vyjadřují variabilitu dat pod prvním a nad třetím kvartilem. Odlehlé hodnoty, pak mohou být vykresleny jako jednotlivé body.

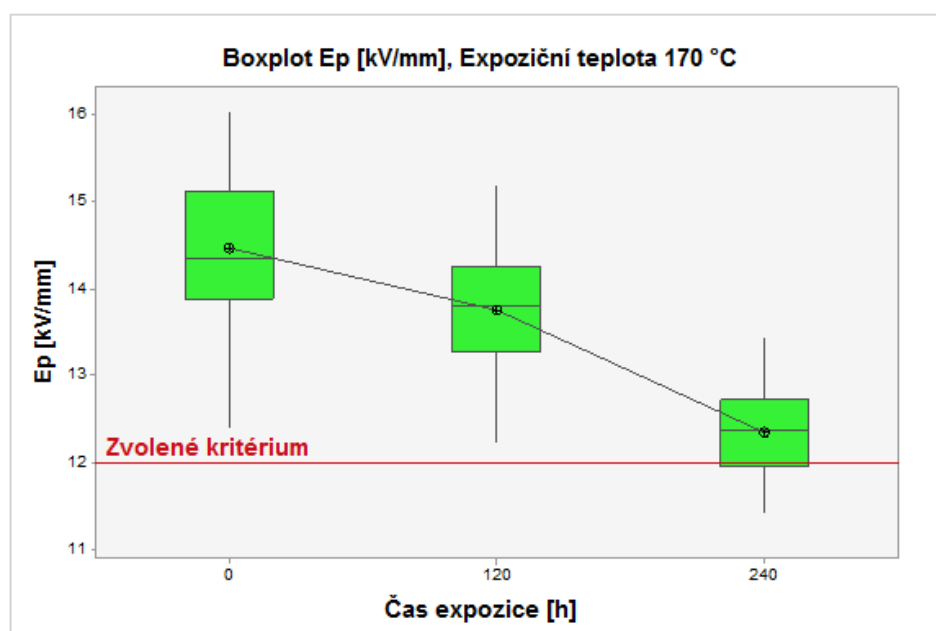
Jednotlivé hodnoty elektrické pevnosti a detailnější průběhy jsou přiloženy v příloze 2, viz Tab. P.2.1 až Tab. P.2.3 a Obr. P.2.8 až Obr. P.2.13. V příloze 2, viz Obr. P.2.1 až Obr. P.2.7, jsou dále vykresleny histogramy elektrické pevnosti při různých expozičních teplotách a měřicím čase.

Z výsledných charakteristik byly následně odečteny hodnoty dob do poruchy, které byly v tomto případě charakterizovány překročením zvolené kritériální meze **12 kV·mm<sup>-1</sup>**. Kritériální mez určuje výsledné časové měřítko, necharakterizuje výsledný tvar křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru. Tato mez byla zvolena jako 85 % hodnota střední hodnoty elektrické pevnosti transformátorové lepenky v dodaném stavu, dle empirických zkušeností na KET FEL ZČU a je zobrazena na následujících obrázcích červenou čarou.

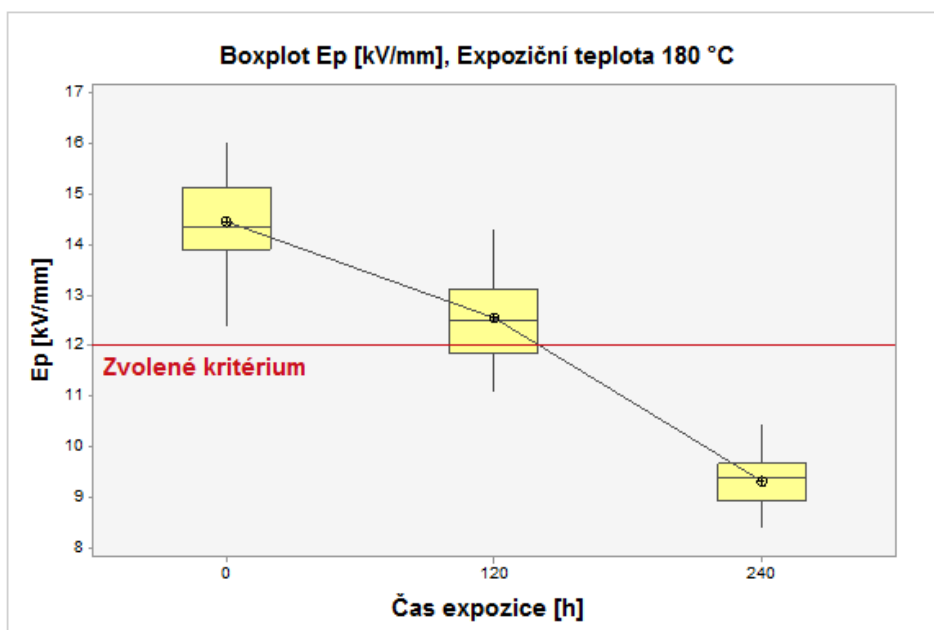
Doby do poruchy byly následně odečteny jako průnik jednotlivých průběhů elektrické pevnosti s kritériální mezí a jsou zobrazeny v Tab. P.2.4.



**Obr. 5.2** Průběh elektrické pevnosti při tepelné expozici 160°C

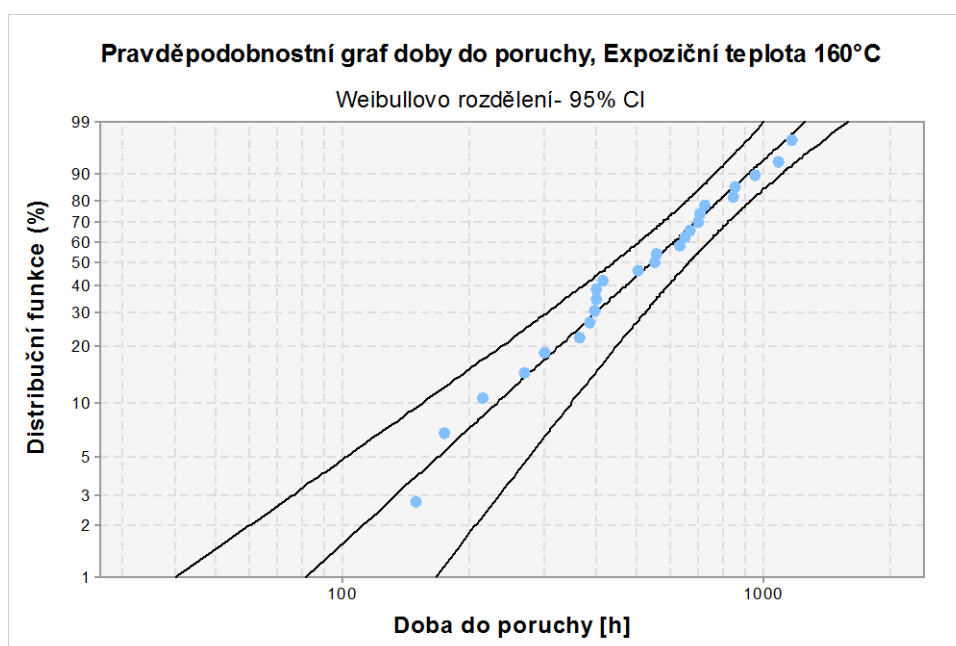


**Obr. 5.3** Průběh elektrické pevnosti při tepelné expozici 170°C

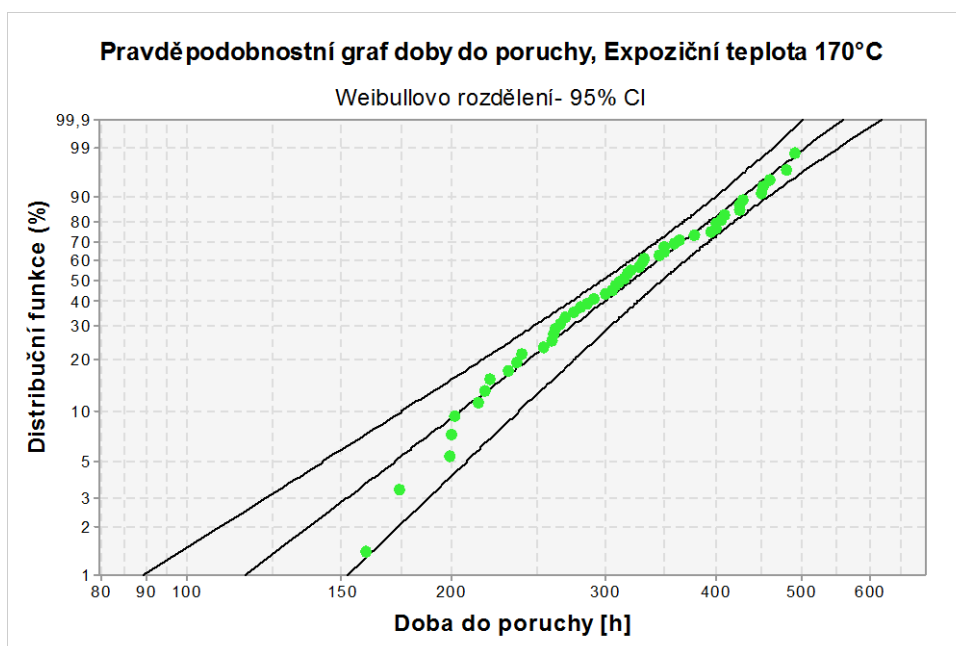


**Obr. 5.4** Průběh elektrické pevnosti při tepelné expozici 180°C

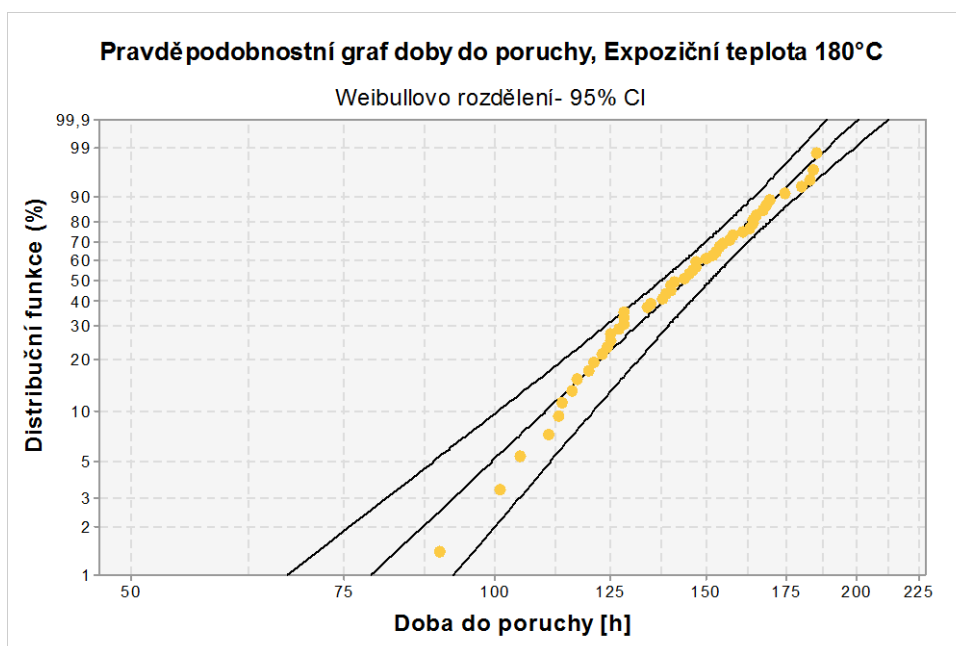
Před samotnou analýzou je nutné ověřit, zda pro modelování vlastností lze použít Weibullova rozdělení. Pro tento účel a vizuální kontrolu byl použit Weibullův pravděpodobnostní graf, viz kapitola 1.1.1. Z jednotlivých dob do poruchy byly následně pro různé úrovně tepelného zatížení sestrojeny pomocí statistického softwaru *Minitab 17* Weibullové pravděpodobnostní grafy, viz Obr 5.5, Obr 5.6 a Obr 5.7.



**Obr. 5.5** Weibulův pravděpodobnostní graf pro tepelné zatížení 160°C



**Obr. 5.6** Weibulův pravděpodobnostní graf pro tepelné zatížení 170°C



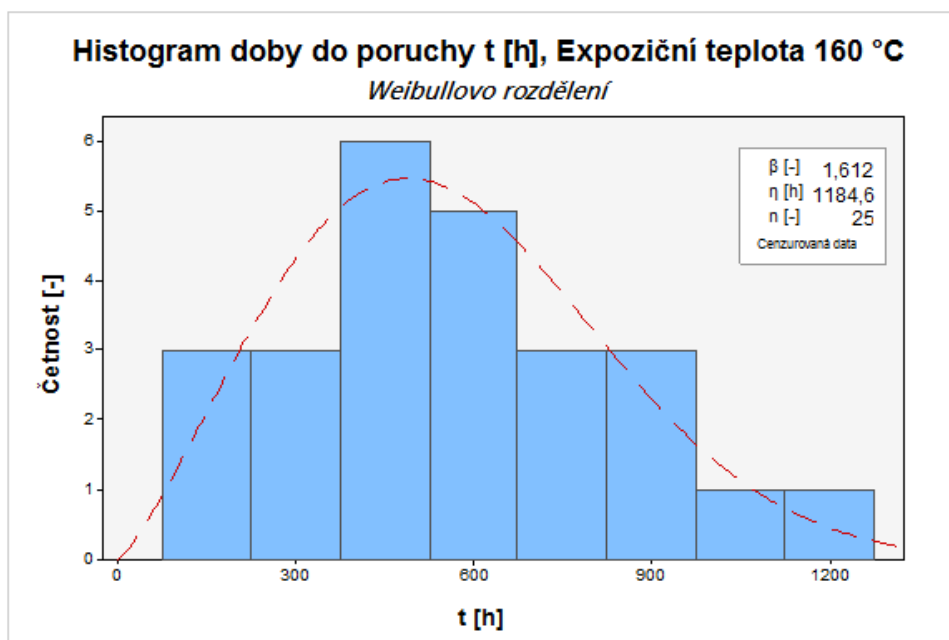
**Obr. 5.7** Weibulův pravděpodobnostní graf pro tepelné zatížení 180°C

Z předešlých průběhů je patrné, že pro naměřená empirická data lze použít Weibullova rozdělení a odhadnout jeho parametry.

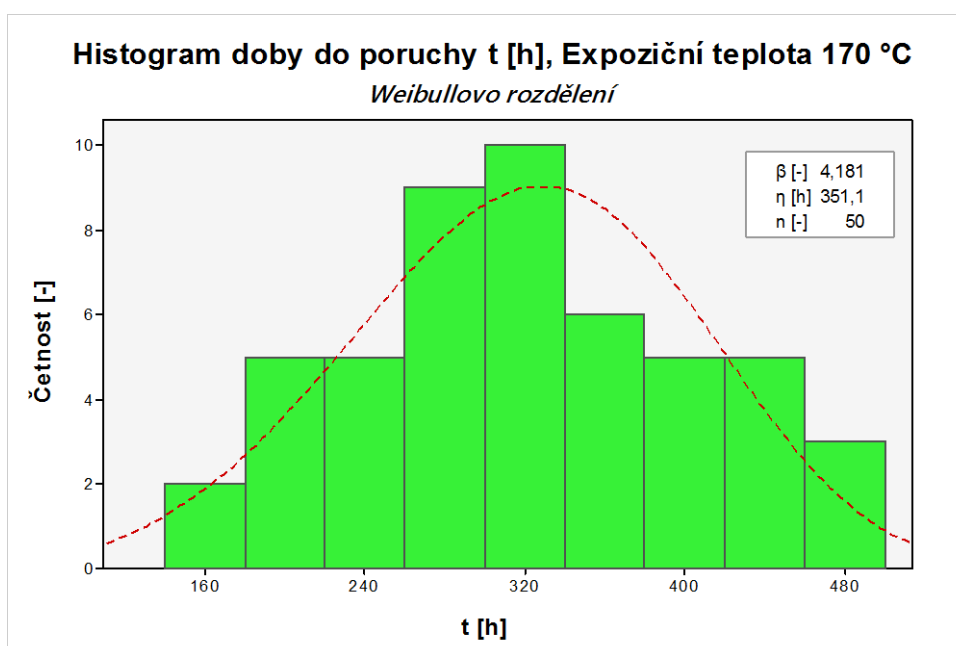
Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1.1, pro přesnější odhad jednotlivých parametrů Weibullova rozdělení se využívá metoda maximální věrohodnosti. S použitím statistického softwaru *Minitab 17* byly odhadnuty parametry Weibullova rozdělení, viz Tab. 5.1, kde pro úroveň

tepelného zatížení 160 °C byl proveden odhad pro cenzurovaná data, protože po zvolenou dobu experimentu byla kritériální mez  $12 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  překročena pouze v 25 případech z 50.

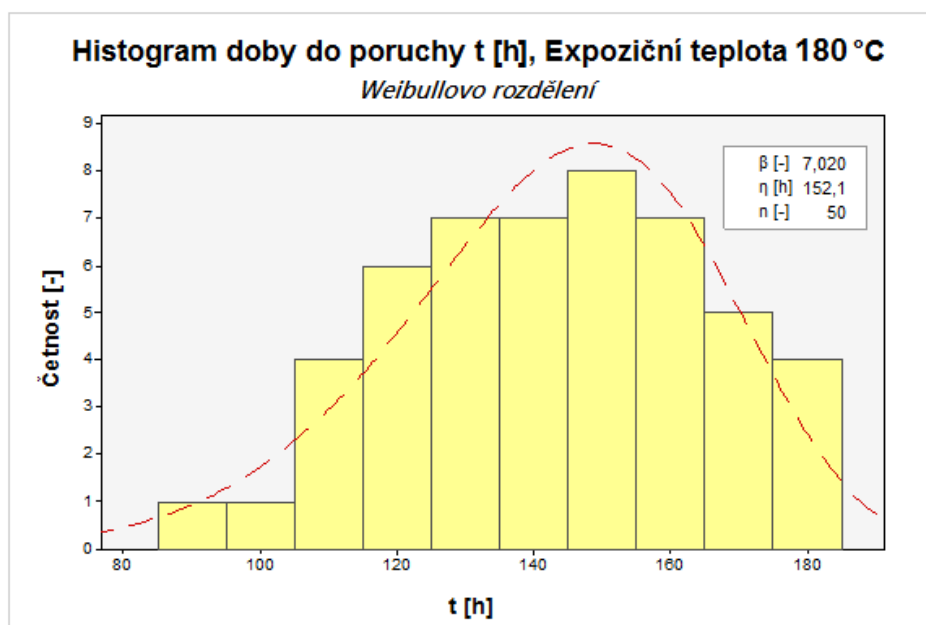
Histogramy dob do poruchy při různých expozičních teplotách jsou zobrazeny na Obr. 5.8, Obr. 5.9 , Obr. 5.10 a distribuční funkce jsou zobrazeny na obrázcích v příloze 2, viz Obr. P.2.14 až Obr. P.2.16.



**Obr. 5.8.** Histogram dob do poruchy transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 160 °C



**Obr. 5.9.** Histogram dob do poruchy transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 170 °C

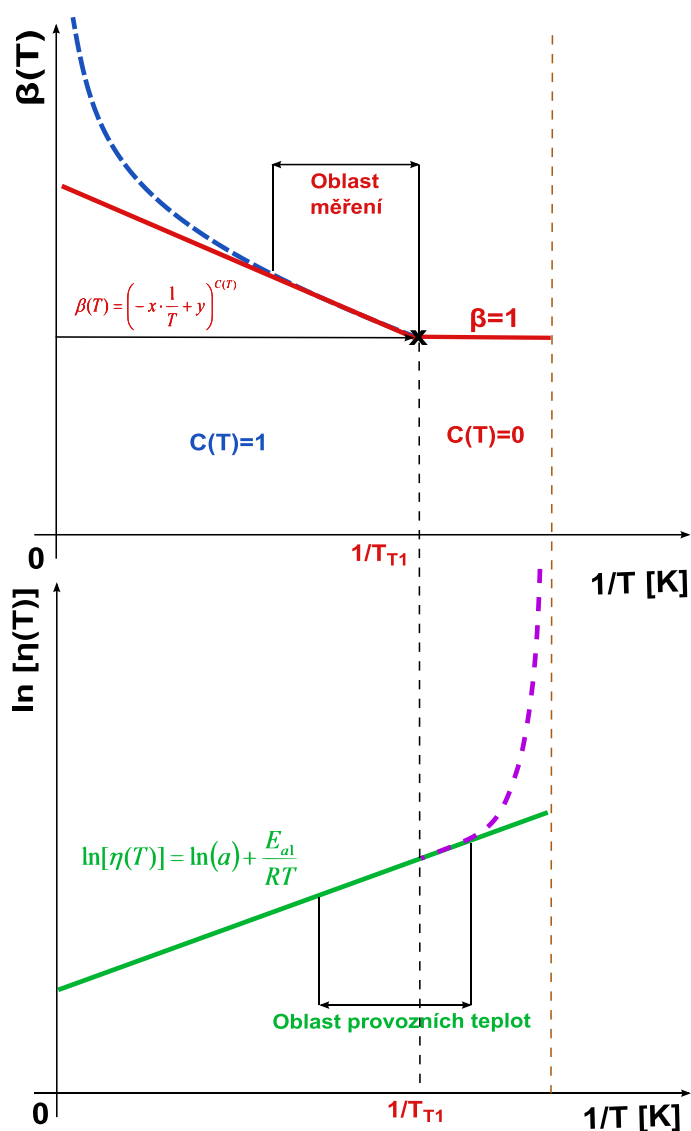


**Obr. 5.10.** Histogram dob do poruchy transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 180 °C

**Tab. 5.1** Odhad jednotlivých parametrů Weibullova rozdělení pro různé úrovně tepelného zatížení

Úroveň tepelného zatížení	Maximálně věrohodný odhad parametru $\hat{\beta}$ [-]	Maximálně věrohodný odhad parametru $\hat{\eta}$ [h]	Konfidenční interval [-]	Medián Me [h]	Střední doba do poruchy MTTF[h]
160 °C	1,612	1184,643	0,95	944	1061,412
170 °C	4,181	351,152	0,95	310	327,013
180 °C	7,020	152,119	0,95	141	144,751

Pro další vyhodnocení výsledného pravděpodobnostního modelu je předpoklad, že v oblasti experimentálního měření a běžných provozních teplot elektrických zařízení lze výslednici parametru  $\beta(T)$  aproximovat lineární funkcí, která od mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{T1}$  **nabývá hodnoty 1**, viz (4.7). Podobně lze i předpokládat lineární průběh parametru  $\eta(T)$  v logaritmickém měřítku, tj. model předpokládá pouze **Büssingův degradační mechanismus**, protože pro velmi nízké teploty je pravděpodobnost poruchy elektroizolačního systému velmi nízká a pro praktické vyhodnocení zanedbatelná. Tento předpoklad je zobrazen na Obr. 5.11.



**Obr. 5.11.** Předpokládaný průběh výsledného pravděpodobnostního modelu pro oblast experimentální a provozních teplot

Z Obr. 5.11 je patrné, že ve výsledném pravděpodobnostním modelu je zanedbána druhá část modelu, která charakterizuje odlišné dílčí degrační mechanismy.

Z předchozích předpokladů lze dále přepsat rovnici pro distribuční funkci Weibullova rozdělení navrženého pravděpodobnostního modelu (4.3) na vztah (5.1), rovnici pro výpočet percentilů (4.4) na (5.2) a rovnici hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení (4.5) na (5.3).

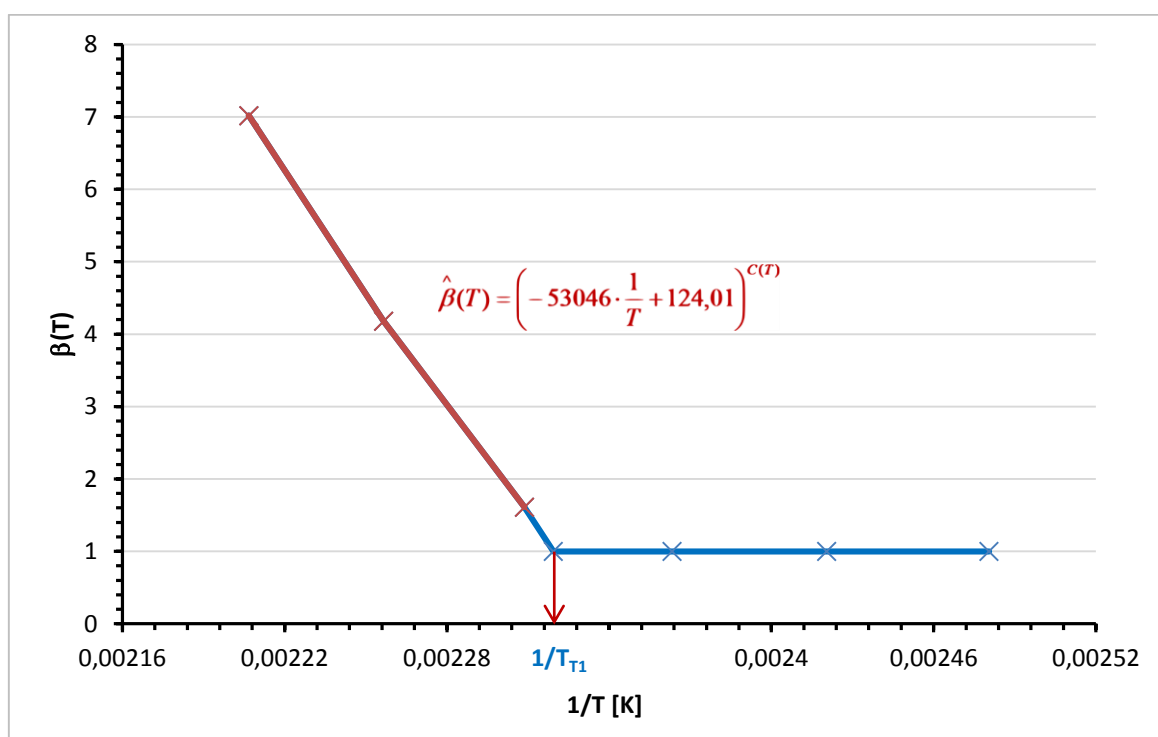


$$F(t, T) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a} \cdot e^{-\frac{E_{a1}}{RT}}\right)^{\beta(T)}}, \quad (5.1)$$

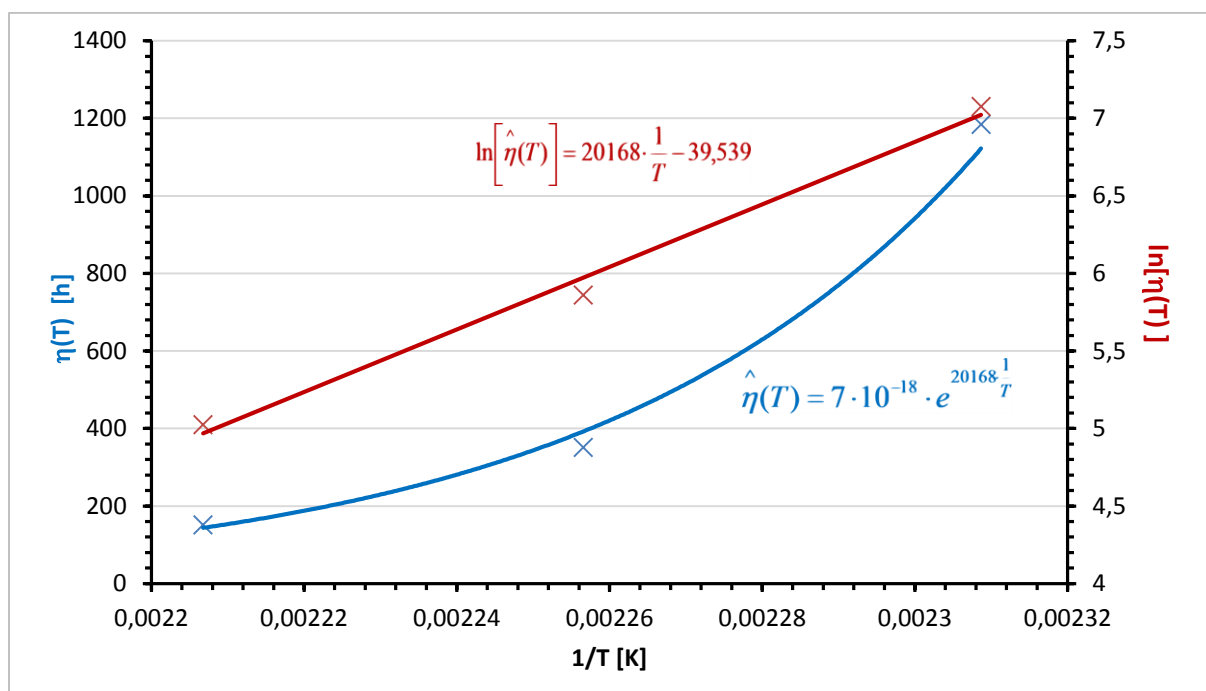
$$t_{Fp} = a \cdot e^{\frac{E_{a1}}{RT}} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{1}{1-p} \right] \right]^{\frac{1}{\beta(T)}}, \quad (5.2)$$

$$f(t, T) = \frac{\beta(T)}{a} \cdot e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} \left(\frac{t}{a} \cdot e^{-\frac{E_{a1}}{RT}}\right)^{\beta(T)-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{a} \cdot e^{-\frac{E_{a1}}{RT}}\right)^{\beta(T)}}. \quad (5.3)$$

Z odhadů jednotlivých parametrů Weibullova rozdělení, viz Tab. 5.1 a použitím vztahů (4.2) a (4.7), byly sestaveny průběhy odhadovaných parametrů  $\hat{\beta}(T)$  a  $\hat{\eta}(T)$  v závislosti na reciproké teplotě, které jsou zobrazeny na Obr. 5.12 a Obr. 5.13. Tyto odhadované průběhy následně poslouží k sestavení konečného pravděpodobnostního modelu.



**Obr. 5.12** Parametr tvaru Weibullova rozdělení v závislosti na reciproké teplotě



**Obr. 5.13** Parametr měřítka Weibullova rozdělení v závislosti na reciproké teplotě

Lineární aproximací funkce parametru tvaru Weibullova rozdělení  $\beta(T)$  v závislosti na reciproké teplotě, viz Obr. 5.12, byl získán parametr  $x$  [K], který charakterizuje směrnici funkce  $\beta(T)$  v oblasti provozních teplot elektroizolačních systémů, a absolutní člen  $y$  [-].

Výsledný odhad mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $\hat{T}_{T1}$  je vypočten dle vztahu (4.8) dosazením právě zmíněných parametrů  $x$  [K] a  $y$  [-]. Tento odhad popisuje rovnice (5.4).

$$\hat{T}_{T1} = \frac{x}{y-1} = \frac{53046}{124,01-1} = 431,23 \text{ K.} \quad (5.4)$$

Další vypočtené parametry a odhadované funkce popisuje Tab. 5.2, kde popis získávání aktivační energie  $E_{a1}$  bude popsán v následujících kapitolách.

**Tab. 5.2** Vypočtené parametry a odhadované funkce pravděpodobnostního modelu s využitím tepelného stárnutí

Popis	Předpis funkce / Hodnota parametru
Odhad průběhu $\hat{\beta}(T)$	$\hat{\beta}(T) = \left( -53046 \cdot \frac{1}{T} + 124,01 \right)^{C(T)}$
Odhad průběhu $\hat{\eta}(T)$	$\hat{\eta}(T) = 7 \cdot 10^{-18} \cdot e^{20168 \frac{1}{T}}$
Mezní hodnota degradačního faktoru $\hat{T}_{T1}$ [K]	431,23
Převrácená hodnota předexponenciálního faktoru a [h]	$7 \cdot 10^{-18}$
Aktivační energie degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru $T_{T1}$ , $E_{a1}$ [J·mol <sup>-1</sup> ]	167686,27
Funkce vymezující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru $C(T)$	$C(T) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ \pi + 2 \arctg \left[ \left( \lim_{s \rightarrow \infty} s \right) \cdot (T - 431,23) \right] \right\}$

Dosažením univerzální plynové konstanty  $R$ , která má hodnotu  $8,314\ 47215\ J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$  a parametrů z Tab. 5.2 do rovnice (5.1) pro distribuční funkci Weibullova rozdělení navrženého pravděpodobnostního modelu, do rovnice (5.3) pro výpočet hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení a do rovnice pro výpočet percentilů navrženého modelu, viz (5.2), je získán konečný tvar modelu (5.5), (5.6) a (5.7).

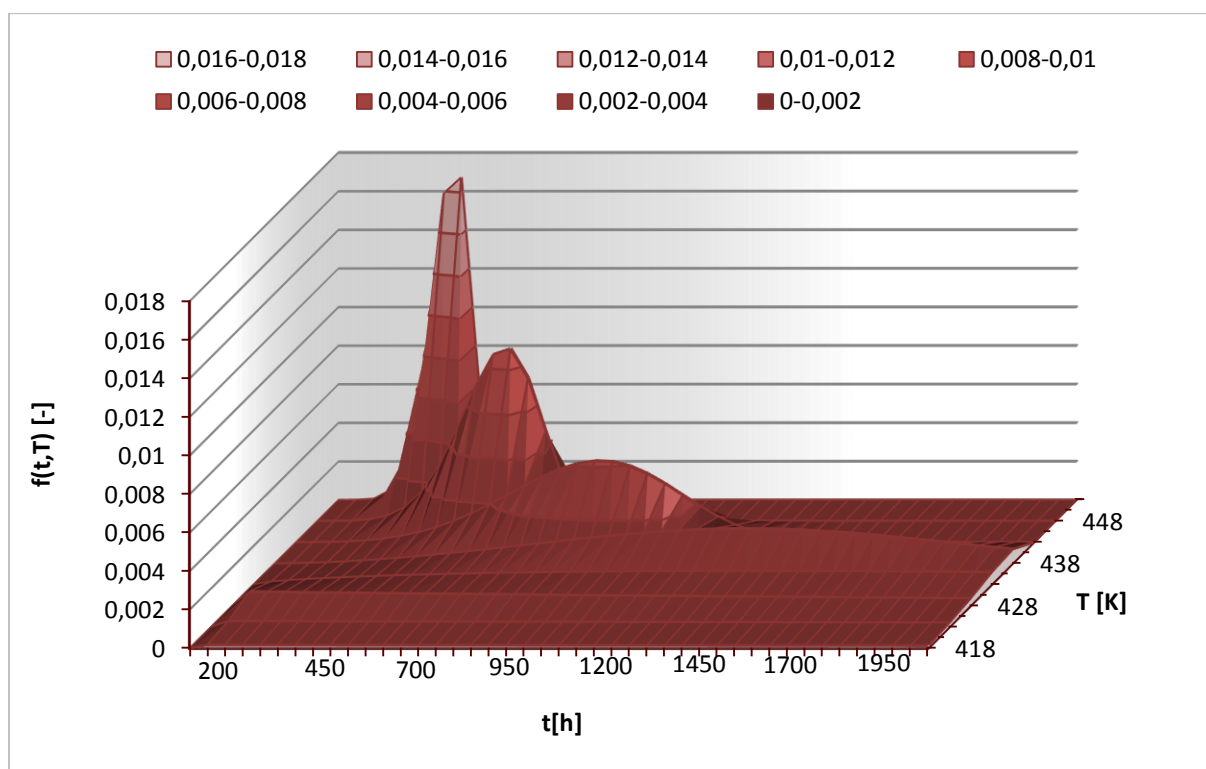
Pravděpodobnostní model s využitím tepelného stárnutí je následně definován jako:

$$F(t, T) = 1 - e^{-\left( \frac{t}{a} \cdot e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} \right)^{\hat{\beta}(T)}} = 1 - e^{-\left( \frac{t}{7 \cdot 10^{-18}} \cdot e^{-20168 \frac{1}{T}} \right)^{\left( -53046 \frac{1}{T} + 124,01 \right)^{C(T)}}}, \quad (5.5)$$

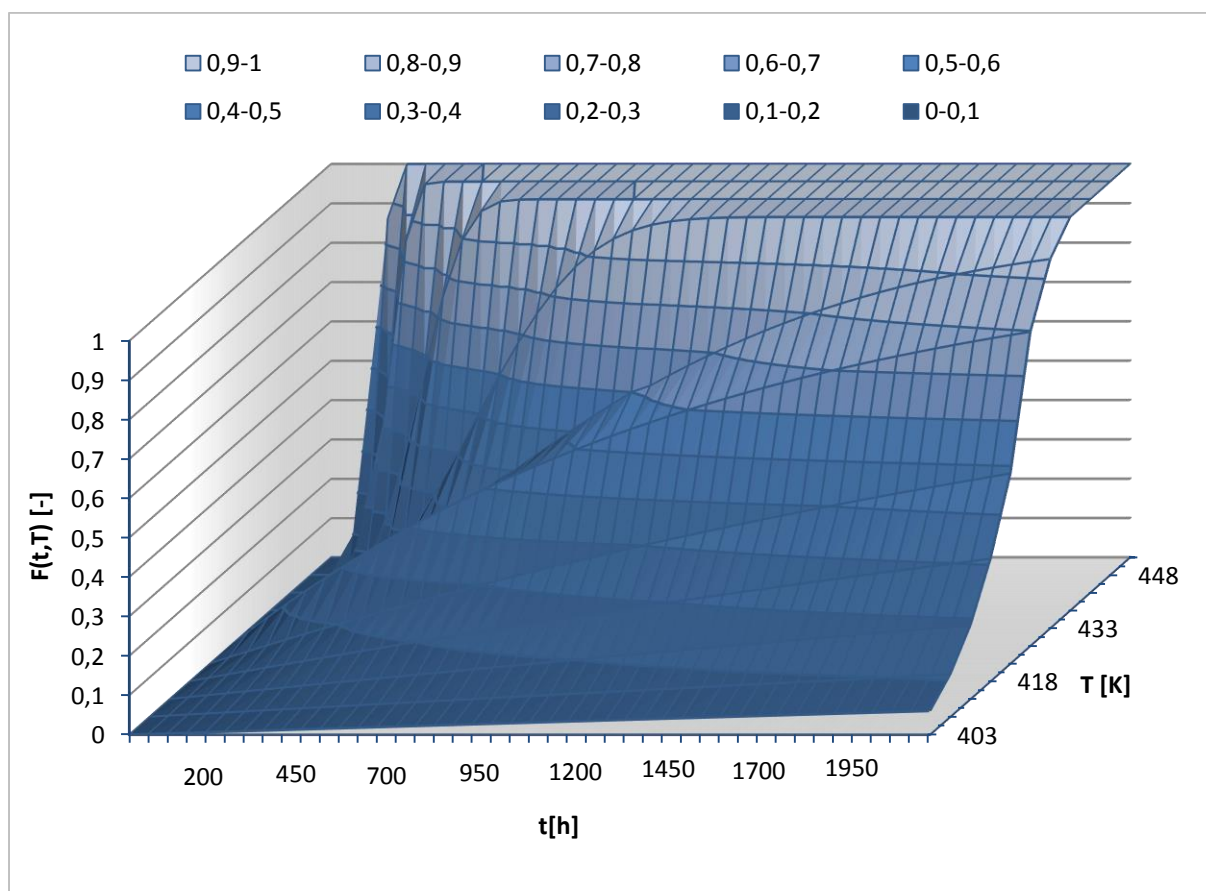
$$\begin{aligned}
 f(t, T) &= \frac{\hat{\beta}(T)}{a} \cdot e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} \left( \frac{t}{a} \cdot e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} \right)^{\hat{\beta}(T)-1} \cdot e^{-\left( \frac{t}{a} \cdot e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} \right)^{\hat{\beta}(T)}} = \\
 &= \frac{\left( -53046 \cdot \frac{1}{T} + 124,01 \right)^{C(T)}}{7 \cdot 10^{-18}} \cdot e^{-20168 \frac{1}{T}} \cdot \left( \frac{t}{7 \cdot 10^{-18}} \cdot e^{-20168 \frac{1}{T}} \right)^{\left[ \left( -53046 \frac{1}{T} + 124,01 \right)^{C(T)} - 1 \right]} \cdot e^{-\left( \frac{t}{7 \cdot 10^{-18}} \cdot e^{-20168 \frac{1}{T}} \right)^{\left( -53046 \frac{1}{T} + 124,01 \right)^{C(T)}}},
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

$$t_{Fp} = a \cdot e^{\frac{E_{a1}}{RT}} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{1}{1-p} \right] \right]^{\frac{1}{\hat{\beta}(T)}} = 7 \cdot 10^{-18} \cdot e^{20168 \frac{1}{T}} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{1}{1-p} \right] \right]^{\frac{1}{\left( -53046 \frac{1}{T} + 124,01 \right)^{C(T)}}}. \tag{5.7}$$

Pokud jsou známy vztahy (5.5) a (5.6), lze sestrojít průběhy odhadů distribuční funkce a hustoty pravděpodobnosti testované lepenky jako trojrozměrný graf v závislosti na teplotě. Tyto závislosti jsou zobrazeny na Obr. 5.14 a Obr. 5.15.



**Obr. 5.14** Trojrozměrný průběh odhadů hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení navrženého pravděpodobnostního modelu v závislosti na teplotě



**Obr. 5.15** Trojrozměrný průběh odhadů distribuční funkce Weibullova rozdělení navrženého pravděpodobnostního modelu v závislosti na teplotě

Trojrozměrný průběh odhadů distribuční funkce následně slouží jako výsledný pravděpodobnostní model s využitím tepelného stárnutí. Z výsledných obrázků je patrné, že distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení se mění s variabilní hodnotou působícího degradačního faktoru, v tomto případě s teplotou. Například z Obr. 5.14 je jasně vidět, že do mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru (431,23 K) nabývá hustota pravděpodobnosti exponenciálního rozdělení. Dále od této teploty má hustota pravděpodobnosti průběh klasického Weibullova rozdělení, který je dán funkcí  $\beta(T)$  parametru tvaru Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě  $T$ .

## 5.2 Postup sestavení modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru pro naměřená experimentální data

Postup sestavení modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru pro naměřená experimentální data plynule navazuje na kapitolu 5.1. Před samotným návrhem výsledného modelu je nutné a nezbytné určení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$ . Postup získávání této hodnoty je popsán v kapitole 4.1 a výslednou hodnotu pro naměřená experimentální data charakterizuje rovnice (5.4). Pokud je známa mezní hodnota vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$  lze přikročit k samotnému návrhu.

První část modelu pro  $T \in \langle T_{TI}, \infty \rangle$  je získána z křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru. Tato křivka je vyhodnocena z příslušných dob do poruchy, které jsou v tomto případě charakterizovány parametrem měřítka Weibullova rozdělení  $\eta$  v závislosti na teplotě  $T$ . Křivka odolnosti vůči působícímu faktoru  $\tau_1$  pro  $T \in \langle T_{TI}, \infty \rangle$  je následně zobrazena na Obr. 5.11 a popisuje jí rovnice (5.8).

$$\tau_1 = a \cdot e^{\frac{E_{a1}}{RT}} = 7 \cdot 10^{-18} \cdot e^{\frac{167686,27}{RT}}, \quad T \in \langle T_{TI}, \infty \rangle. \quad (5.8)$$

Druhá část modelu pro  $T \in (0, T_{TI})$  je popsána rovnicí (5.9). Z této rovnice je patrné, že model pro  $T \in (0, T_{TI})$  je charakterizován materiálovou konstantou  $D$  definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů a mezní hodnotou vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$ . Díky vysoké časové náročnosti příslušných experimentů nelze tuto konstantu experimentálně určit. Z tohoto důvodu bude v dalším vyhodnocování tato konstanta odhadnuta.

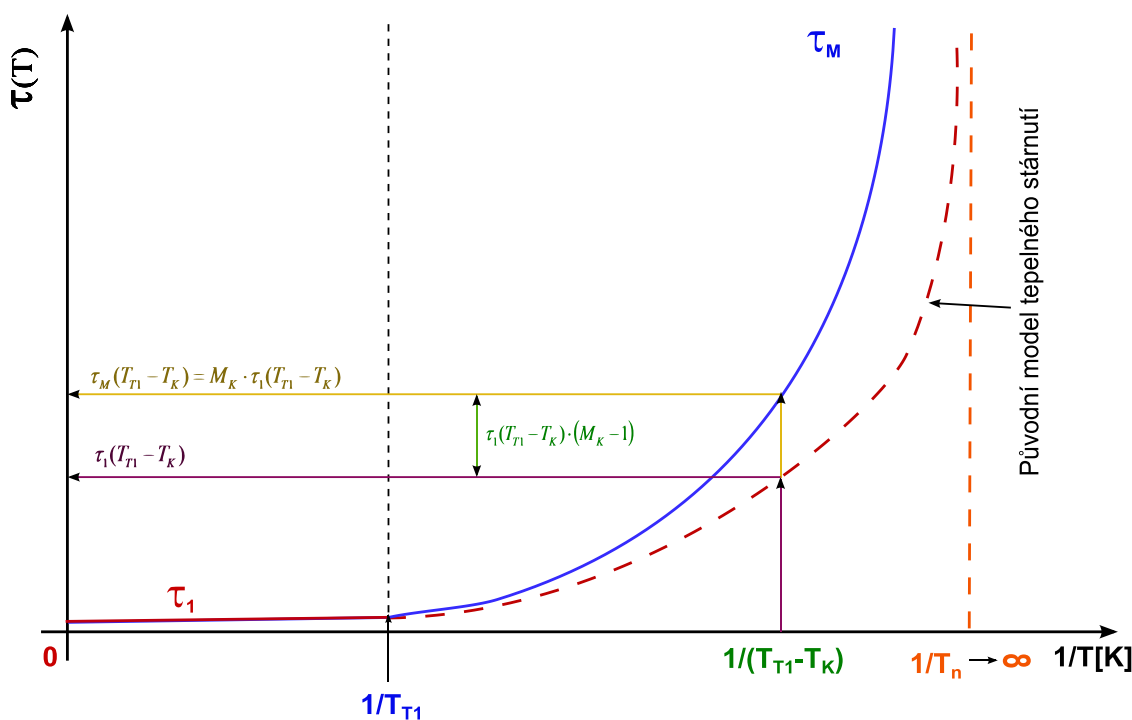
$$\tau_M = K_M \cdot a \cdot \tau_{TM} = K_M \cdot a \cdot e^{\left(\frac{D}{T}\right)} = a \cdot e^{\left[\left(\frac{E_{a1}}{RT_{TI}}\right) - e^{\left(\frac{D}{T_{TI}}\right)}\right]} \cdot e^{\left(\frac{D}{T}\right)}, \quad T \in (0, T_{TI}). \quad (5.9)$$

Konstanta  $D$  definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů je odhadnuta zavedením empirického pravidla. Toto pravidlo vychází z předpokladu, že při snížení teploty o  $T_K$  K od mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$ , vzroste životnost elektroizolačního

systému  $\tau_M$   $M_K$  krát oproti životnosti původního modelu tepelného stárnutí  $\tau_1$ . Tento předpoklad popisuje rovnice (5.10) a je zobrazen na Obr. 5.16.

$$M_K \cdot \tau_1(T_{T1} - T_K) = \tau_M(T_{T1} - T_K), \quad (5.10)$$

kde  $\tau_1$  [h] je životnost elektroizolačního systému pro  $T \in \langle T_{T1}, \infty \rangle$ ,  $\tau_M$  [h] je životnost elektroizolačního systému pro  $T \in (0, T_{T1})$ ,  $T_{T1}$  [K] je mezní hodnota vlivu degračního faktoru,  $M_K$  [-] je multiplikační konstanta a  $T_K$  [K] je absolutní hodnota poklesu teploty od teploty  $T_{T1}$ .



**Obr. 5.16** Grafické znázornění odhadu konstanty  $D$  definující synergický účinek dílčích degračních mechanismů

Dosazením rovnic (5.8) a (5.9) do vztahu (5.10) je získán tvar rovnice pro odhad konstanty  $\hat{D}$  definující synergický účinek dílčích degračních mechanismů, viz (5.11).

$$M_K \cdot a \cdot e^{\frac{E_{a1}}{R(T_{T1}-T_K)}} = a \cdot e^{\left[ \left( \frac{E_{a1}}{RT_{T1}} \right) - e^{\left( \frac{\hat{D}}{T_{T1}} \right)} \right]} \cdot e^{\left( \frac{\hat{D}}{T} \right)} \quad (5.11)$$

$$M_K \cdot e^{\frac{E_{a1}}{R(T_{T1}-T_K)}} \cdot e^{-\left( \frac{E_{a1}}{RT_{T1}} \right)} \cdot e^{e^{\left( \frac{\hat{D}}{T_{T1}} \right)}} \cdot e^{-e^{\left( \frac{\hat{D}}{(T_{T1}-T_K)} \right)}} = 1.$$

Z rovnice (5.11) je dále odvozen konečný tvar rovnice pro odhad konstanty  $\hat{D}$  definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů, viz (5.12). Řešením zmíněné rovnice jsou následně získány výsledné odhady konstanty  $\hat{D}$ . Detailnější odvození rovnice (5.12) je popsáno v příloze 2, viz rovnice (P.2.1) až (P.2.10).

$$\sqrt[{}_{T_{T1}}]{e^{\hat{D}}} - \sqrt[{}_{(T_{T1}-T_K)}]{e^{\hat{D}}} + \ln \left( M_K \cdot e^{\left[ \frac{E_{a1} \cdot T_K}{R \cdot T_{T1} \cdot (T_{T1}-T_K)} \right]} \right) = 0. \quad (5.12)$$

Pokud je znám postup odhadu konstanty  $D$  definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů, lze sestavit výsledný model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu.

Vypočtené a odhadované parametry pro různé hodnoty multiplikační konstanty  $M_K$  a absolutní hodnoty  $T_K$  poklesu teploty od mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru včetně jednotlivých funkcí tohoto modelu popisuje Tab. 5.3.



**Tab. 5.3** Vypočtené a odhadované parametry včetně jednotlivých funkcí modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu

	Modely tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru pro různé odhady konstant definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů		
	$\tau_1(T)$ [h]	$\tau_2(T)$ [h]	$\tau_2(T)$ [h]
Aktivační energie degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru $T_{T1}$ , $E_{a1}$ [J·mol <sup>-1</sup> ]	167686,27		
Odhad konstanty definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů, $\hat{D}$ [K]	1318,20	1472,37	1632,74
Absolutní hodnota poklesu teploty od mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru $T_{T1}$ , $T_K$ [K]	100	60	60
Multiplikační konstanta charakterizující odhad konstanty $D$ , $M_K$ [-]	3	2	3
Odhad mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru $\hat{T}_{T1}$ [K]	431,23		
Převrácená hodnota předexponenciálního faktoru $a$ [h]	$7 \cdot 10^{-18}$		
Funkce vymežující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru $B(T)$ [-]	$B(T) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ \pi + 2 \operatorname{arctg} \left[ \left( \lim_{s \rightarrow \infty} s \right) \cdot (431,23 - T) \right] \right\}$		
Funkce vymežující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru $C(T)$ [-]	$C(T) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ \pi + 2 \operatorname{arctg} \left[ \left( \lim_{s \rightarrow \infty} s \right) \cdot (T - 431,23) \right] \right\}$		

Je tedy známa první část modelu  $\tau_1$  pro  $T \in \langle T_{T1}, \infty \rangle$ , viz (5.8), odhad mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru degradačního faktoru  $\hat{T}_{T1}$ , funkce vymežující mezní hodnotu vlivu

degradáčního faktoru  $B(T)$  a  $C(T)$ , a odhad konstanty  $\hat{D}$  definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů. Dosazením vypočtených a odhadovaných parametrů včetně jednotlivých funkcí, viz Tab. 5.3, do rovnice (3.8), lze sestavit výsledný model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru. Výsledné rovnice modelu pro jednotlivé odhady popisují vztahy (5.13), (5.14) a (5.15).

$$\tau_1(T) = a \cdot e^{\left[ \frac{E_{a1} \left( C(T) \cdot \hat{T}_{T1} + B(T) \cdot T \right)}{R \cdot T \cdot \hat{T}_{T1}} \right] + B(T) \cdot \left[ e^{\left( \frac{\hat{D}_1}{T} \right)} - e^{\left( \frac{\hat{D}_1}{\hat{T}_{T1}} \right)} \right]} = \quad (5.13)$$

$$= 7 \cdot 10^{-18} \cdot e^{\left[ \left( \frac{167686,2 \cdot (C(T) \cdot 431,23 + B(T) \cdot T)}{R \cdot T \cdot 431,23} \right) + B(T) \cdot \left[ e^{\left( \frac{1318,20}{T} \right)} - e^{\left( \frac{1318,20}{431,23} \right)} \right] \right]},$$

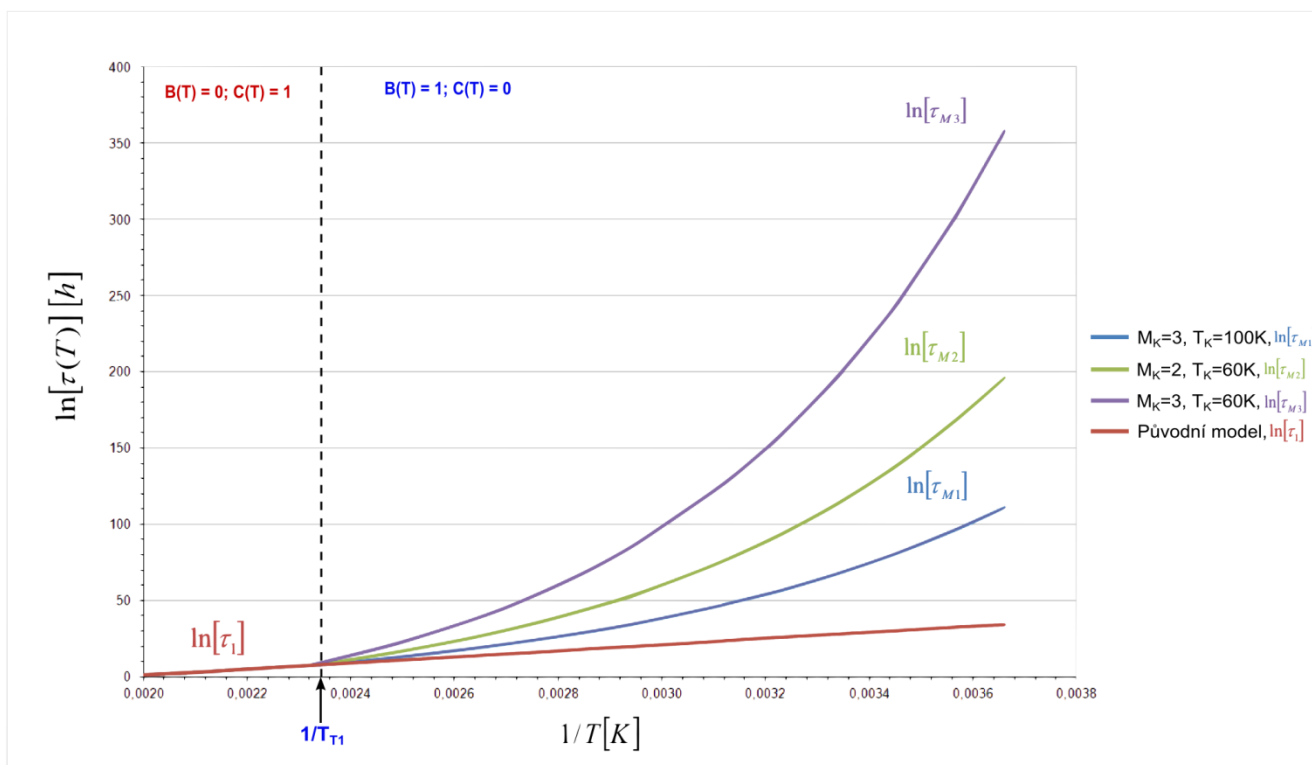
$$\tau_2(T) = a \cdot e^{\left[ \frac{E_{a1} \left( C(T) \cdot \hat{T}_{T1} + B(T) \cdot T \right)}{R \cdot T \cdot \hat{T}_{T1}} \right] + B(T) \cdot \left[ e^{\left( \frac{\hat{D}_2}{T} \right)} - e^{\left( \frac{\hat{D}_2}{\hat{T}_{T1}} \right)} \right]} = \quad (5.14)$$

$$= 7 \cdot 10^{-18} \cdot e^{\left[ \left( \frac{167686,2 \cdot (C(T) \cdot 431,23 + B(T) \cdot T)}{R \cdot T \cdot 431,23} \right) + B(T) \cdot \left[ e^{\left( \frac{1472,37}{T} \right)} - e^{\left( \frac{1472,37}{431,23} \right)} \right] \right]},$$

$$\tau_2(T) = a \cdot e^{\left[ \frac{E_{a1} \left( C(T) \cdot \hat{T}_{T1} + B(T) \cdot T \right)}{R \cdot T \cdot \hat{T}_{T1}} \right] + B(T) \cdot \left[ e^{\left( \frac{\hat{D}_3}{T} \right)} - e^{\left( \frac{\hat{D}_3}{\hat{T}_{T1}} \right)} \right]} = \quad (5.15)$$

$$= 7 \cdot 10^{-18} \cdot e^{\left[ \left( \frac{167686,2 \cdot (C(T) \cdot 431,23 + B(T) \cdot T)}{R \cdot T \cdot 431,23} \right) + B(T) \cdot \left[ e^{\left( \frac{1632,74}{T} \right)} - e^{\left( \frac{1632,74}{431,23} \right)} \right] \right]}.$$

Grafické znázornění výsledných odhadů modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru, dle rovnic (5.13) až (5.15), je zobrazeno na Obr. 5.17.



**Obr. 5.17** Odhady modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru

Z Obr. 5.15 je patrné, že navržený model zahrnuje mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru a pro  $T \in (0, T_{T1})$  má křivka odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru v logaritmicím měřítku exponenciální charakter. Pro teploty  $T \in \langle T_{T1}, \infty \rangle$  má křivka odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru v logaritmicím měřítku charakter lineární.

Výhodou tohoto modelu je tedy fakt, že zahrnuje mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru, je založen na fyzikálním principu a lépe koresponduje se skutečným stavem elektroizolačních systémů.

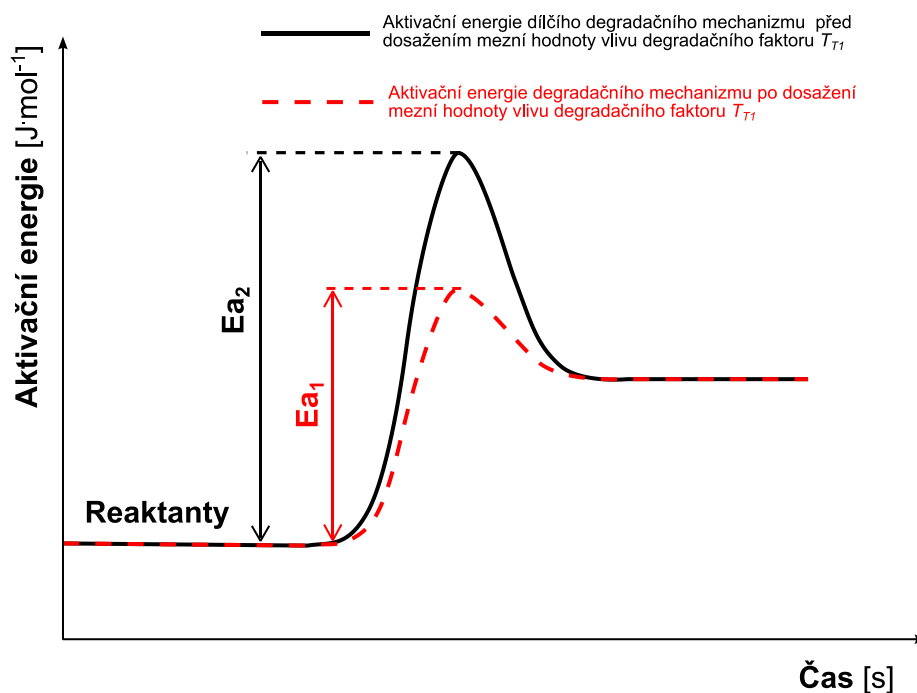
Nevýhodou je složité a zdlouhavé experimentální určování mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{T1}$  a díky vysoké časové náročnosti příslušných experimentů nemožnost experimentálním způsobem určit konstantu  $D$  definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů. Z těchto důvodů je tato konstanta pouze odhadována zavedením empirického pravidla, viz (5.12).

## 6 Určení aktivační energie a křivek odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru elektroizolačních kapalin

Dalším cílem disertační práce je popis degradace elektroizolačních systémů. Čím lepší znalosti o průběhu degradačního mechanismu jsou, tím snazší a jednodušší je popis výsledného modelu stárnutí. Pro tento účel byl zvolen parametr aktivační energie jako ukazatel tepelné odolnosti. Je tedy nutné nejdříve popsat co to aktivační energie vůbec je a jak se získává.

### 6.1 Aktivační energie

Pro správné pochopení rovnice (1.17) je nutné určit aktivační energii. Tato fyzikálně-chemická veličina je definována jako minimální potřebná energie, která musí být látce dodána k proběhnutí fyzikálně-chemické reakce [28]. Popis průběhu této energie je znázorněn na Obr. 6.1.



Obr. 6.1 Aktivační energie [28]

Zdrojem této energie jsou ionizační činitelé jako světlo, teplo nebo elektrické pole. Čím větší je tato energie, tím více daný materiál odolává degradačním vlivům. Je předpoklad, že se každý elektroizolační systém vykazuje několika různými aktivačními energiemi. Cílem je právě stanovit právě tu aktivační energii, která bude danou degradaci nejvíce popisovat. Aktivační energie se potom určuje pomocí sledování vhodných elektrických parametrů, například sledováním ztrátového činitele  $tg\delta$ . Energie je nejčastěji označována jako  $E_a$  a její jednotkou je  $[J \cdot mol^{-1}]$ .

Energii pak lze jednoduše určit pomocí rovnice (1.17). Pokud je tato rovnice zlogaritmována přirozeným logaritmem, je získána lineární životnostní závislost na reciproké teplotě, jak popisuje rovnice (6.1). Je tedy zřejmé, že sklon této závislosti je dán podílem  $\frac{E_{a1}}{R}$ . V praxi se často tato závislost vykresluje v měřítku  $\frac{1000}{T}$ , čímž je získána aktivační energie v jednotkách  $[kJ \cdot mol^{-1}]$ , někdy se také uvádí jednotky  $[eV]$ .

$$\ln[\tau(T)] = \frac{E_{a1}}{RT} + \ln(a),$$

$$\ln[\tau(T)] = \frac{E_{a1}}{k_B T} + \ln(a).$$
(6.1)

Aktivační energie degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$  je tedy získána z naměřené křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru v logaritmickeém měřítku, která je aproximována lineární funkcí, kde sklon této křivky je úměrný první derivaci logaritmované funkce podle reciproké teploty  $T$ , viz (6.2).

$$E_a = \frac{\partial[\ln[\tau(T)]]}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} = \frac{\partial\left[\ln\left(\frac{E_{a1}}{RT} + \ln(a)\right)\right]}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \cdot R \quad [J \cdot mol^{-1}],$$

$$E_a = \frac{\partial[\ln[\tau(T)]]}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} = \frac{\partial\left[\ln\left(\frac{E_{a1}}{k_B T} + \ln(a)\right)\right]}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \cdot k_B \quad [eV],$$
(6.2)

kde  $E_{a1}$  [ $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$  nebo  $\text{eV}$ ] je aktivační energie degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{Tl}$  [K],  $\tau(T)$  je životnost daného materiálu [h],  $T$  je teplota [K],  $R$  je univerzální plynová konstanta [ $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ ] a  $k_B$  [ $\text{eV}\cdot\text{K}^{-1}$ ] je Boltzmannova konstanta, která má hodnotu  $8,6173\cdot 10^{-5} \text{ eV}\cdot\text{K}^{-1}$ .

## 6.2 Experiment

Experiment byl proveden na osmi vybraných vzorcích elektroizolačních kapalin. Bližší popis zkoumaných elektroizolačních kapalin a jejich získávání je popsán v literatuře [44]. Jako referenční elektroizolační kapalina byl vybrán minerální olej **Shell DIALA DX** [58]. Dále byl v experimentu zvolen syntetický olej na bázi organických esterů **MIDEL 7131** [43]. Od stejné společnosti byl použit rostlinný inhibovaný olej **MIDEL EN** [59]. Z řady rostlinných olejů byl využit běžně dostupný **řepkový a slunečnicový olej**, který byl následně upraven příměsí inhibitoru. Jako poslední elektroizolační kapalina byla zvolena elektroizolační kapalinová směs **syntetického a minerálního oleje** [44].

Jednotlivé vzorky elektroizolačních kapalin byly uchovávány v tmavých skleněných laboratorních lahvích se zabroušeným hrdlem, kde tmavé sklo bylo použito z důvodu snížení přístupu světelné radiace a tím snížení vedlejších degradačních vlivů na celý experiment. Skladování elektroizolačních kapalin v těchto sklenicích zobrazuje Obr. 6.2.



**Obr. 6.2** Skladování vzorků elektroizolačních kapalin

Vzorky byly podrobeny zrychlenému tepelnému stárnutí v horkovzdušných pecích při teplotách **110°C**, **140°C**, **160°C** a **180°C**. Degradační teploty 140°C, 160°C a 180°C byly

vybrány na základě normy **ČSN 60216-1** "Elektroizolační materiály - Vlastnosti tepelné odolnosti" [47]. Teplota 110°C byla vybrána jako teplota referenční. V průběhu stárnutí byly jednotlivé laboratorní lahvičky uzavřeny pro zneprístupnění vzduchu k elektroizolačním kapalinám, čímž byla snaha simulovat skutečné provozní podmínky.

Ztrátový činitel  $tg \delta$  byl vybrán jako stěžejní parametr pro vyhodnocení elektroizolačních kapalin a sestavení křivky odolnosti vůči působícímu faktoru, z které se následně vypočítá hodnota aktivační energie, viz (6.2). Dále v průběhu experimentu byly měřeny elektrické parametry jako vnitřní rezistivita, relativní permitivita a přeskokové napětí.

Vzorky byly vystaveny zrychlenému tepelnému stárnutí s maximální dobou stárnutí 9500 hodin (396 dní), kde po určených intervalech byl měřen ztrátový činitel a další elektrické parametry. Jednotlivé měřicí intervaly při různých expozičních teplotách byly vybrány s ohledem na normu ČSN 60216-1 [47] a popisuje je Tab. 6.1.

**Tab. 6.1** Měřicí intervaly při různých expozičních teplotách pro testované elektroizolační kapaliny

	Časy stárnutí [h]			
	Expoziční teplota 110°C	Expoziční teplota 140°C	Expoziční teplota 160°C	Expoziční teplota 180°C
<b>MIDEL 7131</b>	5808, 9672	336, 576, 1056	336, 672, 840	168, 336
<b>MIDEL EN</b>	4800	336, 912, 1248	336, 672, 840	168, 336
<b>Shell DIALA DX</b>	5808, 9504	336, 576, 1056	336, 672, 840	168, 336
<b>Elektroizolační kapalinová směs</b>	5808, 9552	336, 576, 1056, 1632	336, 672, 840	168, 336
<b>Řepkový olej čistý</b>	2280, 6864	336, 576, 1056, 1632	336, 672, 840	168, 336
<b>Řepkový olej + inhibitor</b>	2280, 6864	336, 576, 1056, 1632	336, 672, 840	168, 336
<b>Slunečnicový olej čistý</b>	2280, 6864	336, 576, 1056, 1632	336, 672, 840	168, 336
<b>Slunečnicový olej + inhibitor</b>	2280, 6864	336, 576, 1056, 1632	336, 672, 840	168, 336

Před každým jednotlivým měřením byly vzorky vysušeny po dobu 2 hodin při teplotě 110°C. Měřicí napětí bylo stanoveno na 500 V při frekvenci 50 Hz. Celé měření ztrátového činitele bylo následně provedeno dle normy ČSN EN 60247 [48].

Pro měření ztrátového činitele byl použit přístroj od firmy Tettex AG Zurich pracující na principu Sheringova můstku.

Počáteční měření všech elektroizolačních kapalin bylo provedeno na dodaném stavu všech olejů. Tento stav byl pro celý experiment referenční a označen jako 0 hodin stránutí. Měření ztrátového činitele pomocí Sheringova můstku bylo prováděno v předem daných intervalech, kde naměřené hodnoty ztrátového činitele byly získány pro teploty od 25°C do 90°C s krokem 10°C. Po každém odečtení hodnoty ztrátového činitele na požadovaných teplotách byl obvod přepojen na paralelně běžící měření vnitřní rezistivity při stejnosměrném napětí 500 V, kde hodnota jednotlivých absorpčních proudů byla zaznamenávána po 1 minutovém ustálení.

Dále bylo nutné pro správné vyhodnocení ztrátového činitele a sestavení křivek odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru určit limitní hodnotu ztrátového činitele, která bude signalizovat poruchu daného systému.

Volba limitní hodnoty ztrátového činitele byla provedena dle normy ČSN EN 61099 „*Izolační kapaliny - Specifikace nepoužitých syntetických organických esterů pro elektrotechnické účely*“ [49]. Tato norma stanovuje limitní hodnotu ztrátového činitele pro nepoužité estery měřené při 90°C na hodnotu  $tg \delta \leq 0,03$ . Nově se limitní hodnotou ztrátového činitele pro přírodní estery zabývá norma ČSN EN 62770 „*Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení*“ [57]. Tato norma stanovuje limitní hodnotu ztrátového činitele pro nepoužité přírodní estery měřené při 90°C na hodnotu  $tg \delta \leq 0,05$ . Tato norma **vznikala v průběhu vyhodnocování dat**, proto byla zvolena přísnější limitní hodnota ztrátového činitele  $tg \delta \leq 0,03$ .

Volbou limitní hodnoty ztrátového činitele se dále zabývají normy ASTM D924 [50], ČSN EN 61203 [51] a pro alternativní elektroizolační kapaliny použité v transformátorech disertační práce [52].

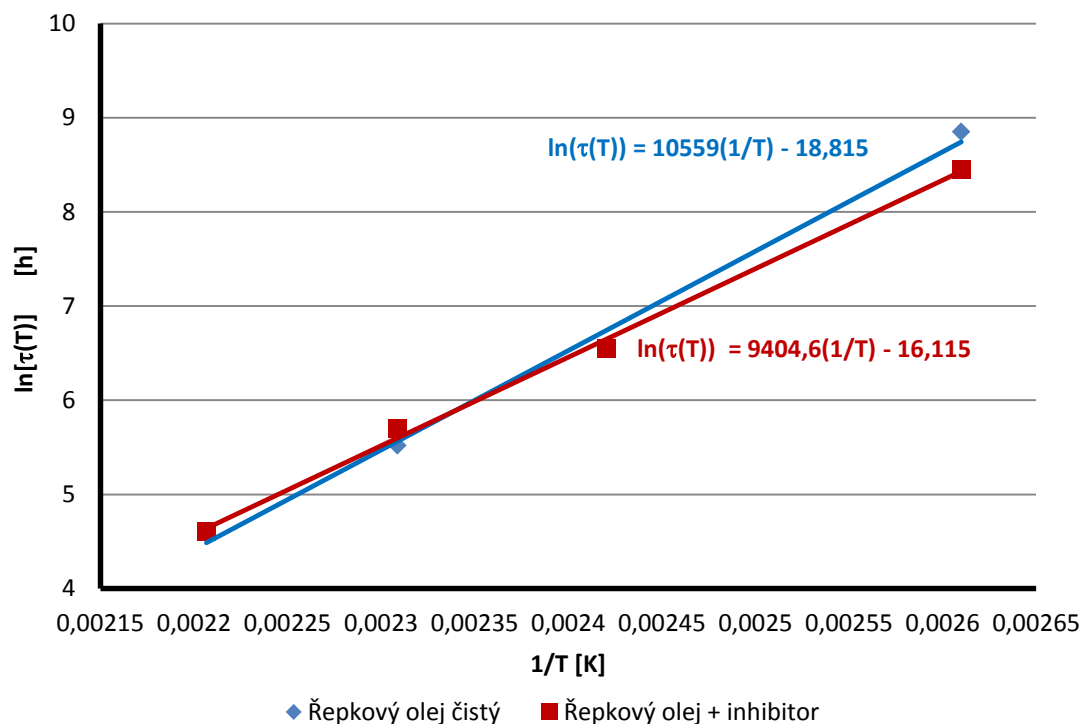


### 6.2.1 Křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru

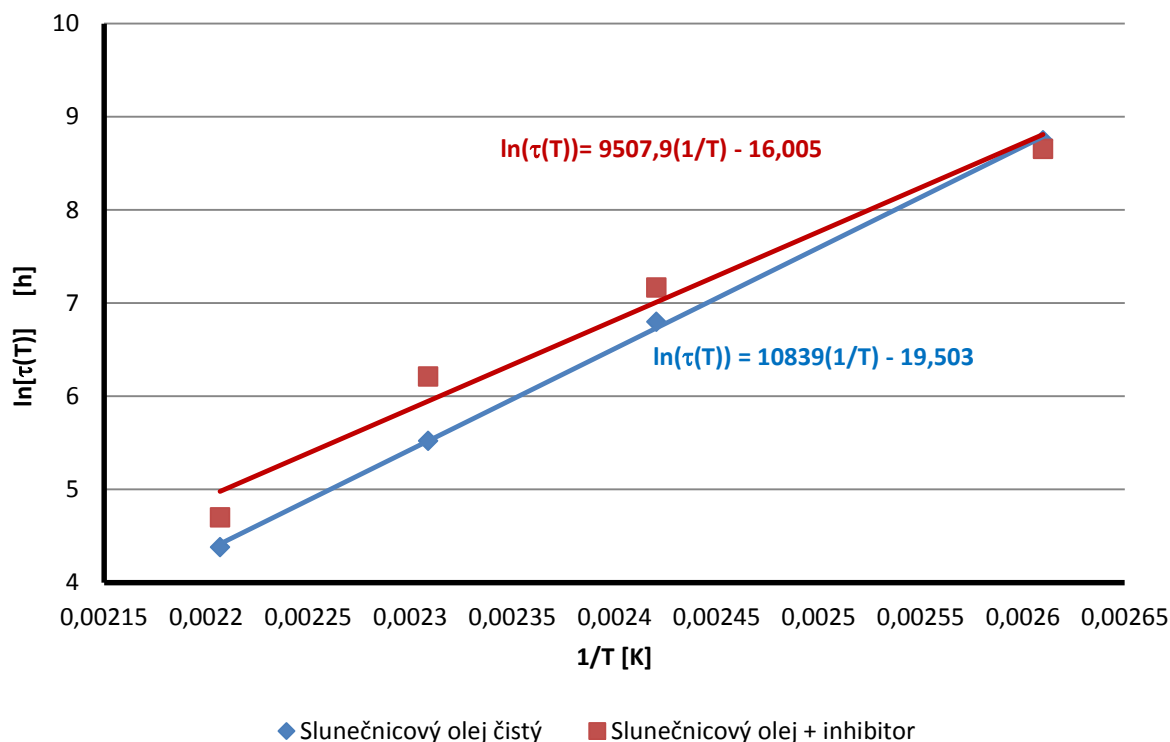
Křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru byly sestaveny pro všechny typy experimentálních olejů z průběhů ztrátového činitele měřeného při teplotě 90°C. Z těchto průběhů byly pomocí kritériální hodnoty  $tg \delta \leq 0,03$  odečtené jednotlivé doby do překročení této meze. Tyto hodnoty následně posloužily pro sestavení křivek odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru a výpočtu aktivační energie jednotlivých elektroizolačních kapalin. Průběhy ztrátového činitele experimentálních elektroizolačních kapalin měřeného při 90°C na expozičních teplotách 110°C, 140°C, 160°C a 180°C jsou přiloženy v příloze 3, viz Obr. P.3.1 až Obr. P.3.8.

Prvními z testovaných elektroizolačních kapalin byl běžně dostupný **řepkový** a **slunečnicový olej** vyrobený v České republice. Tyto oleje byly testovány jak v čistém stavu, tak ve stavu s přidaným inhibítorem fenolického typu v poměru **0,4 % hmotnosti inhibítoru** na celý olej.

Křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru pro slunečnicový a řepkový olej včetně inhibítoru jsou zobrazeny na Obr. 6.3. a 6.4.



**Obr. 6.3** Křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru pro řepkový olej včetně inhibítoru



**Obr. 6.4** Křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru pro slunečnicový olej včetně inhibitoru

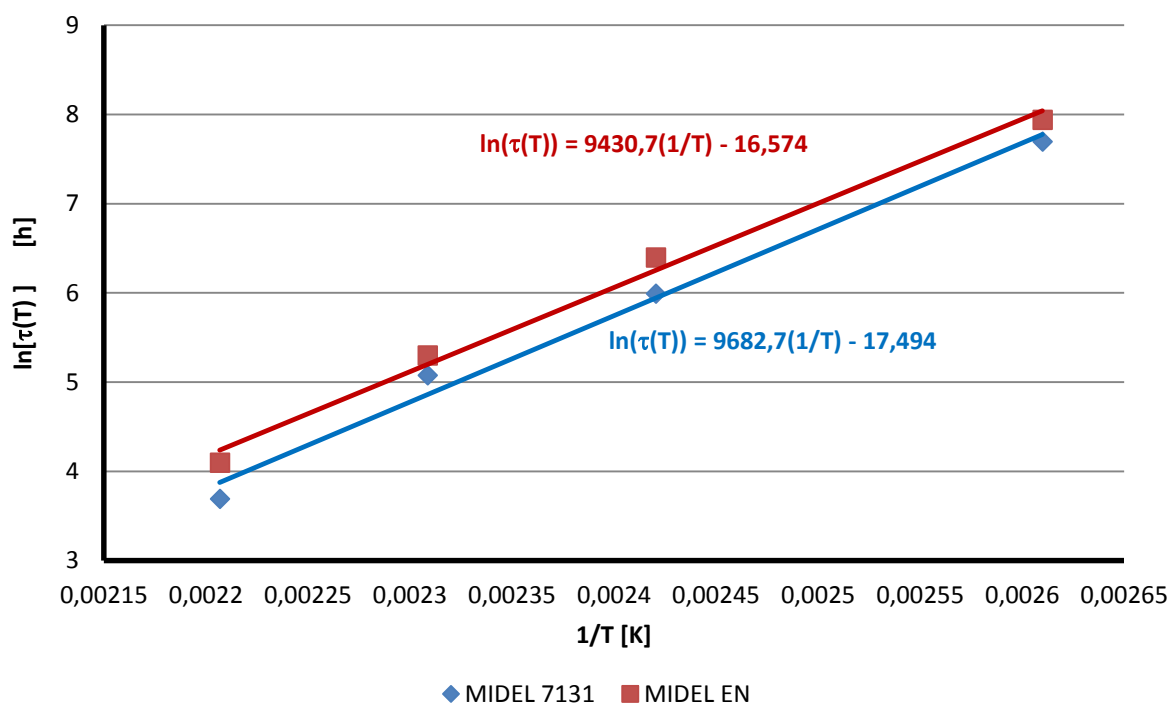
Ze sklonu těchto křivek lze následně určit aktivační energie, viz (6.2). Konečné hodnoty aktivačních energií a získaných modelů tepelného stárnutí, viz (1.17), slunečnicového a řepkového oleje včetně inhibitoru popisuje Tab. 6.2.

**Tab. 6.2** Hodnoty aktivačních energií a získaných modelů tepelného stárnutí pro slunečnicový a řepkový olej včetně inhibitoru

	$\frac{\partial[\ln(\tau(T))]}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)}$	$E_{a1}[\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}]$	$E_{a1}[\text{eV}]$	Parametr a [h]	Získaný model tepelného stárnutí
Řepkový olej čistý	10559	87792,38	0,91	$6,74\cdot 10^{-9}$	$\tau(T) = 6,74\cdot 10^{-9} \cdot e^{\frac{10559}{T}}$
Řepkový olej + inhibitor	9404,6	78194,17	0,81	$10^{-7}$	$\tau(T) = 10^{-7} \cdot e^{\frac{94066}{T}}$
Slunečnicový olej čistý	10839	90120,43	0,94	$3,39\cdot 10^{-9}$	$\tau(T) = 3,39\cdot 10^{-9} \cdot e^{\frac{10839}{T}}$
Slunečnicový olej + inhibitor	9507,9	79053,05	0,82	$1,12\cdot 10^{-7}$	$\tau(T) = 1,12\cdot 10^{-7} \cdot e^{\frac{95079}{T}}$

Dalšími z testovaných elektroizolačních kapalin byla skupina olejů od společnosti MIDEL. Jedná se o syntetické organické estery **MIDEL 7131** a rostlinný olej s příměsí inhibitorů **MIDEL EN**.

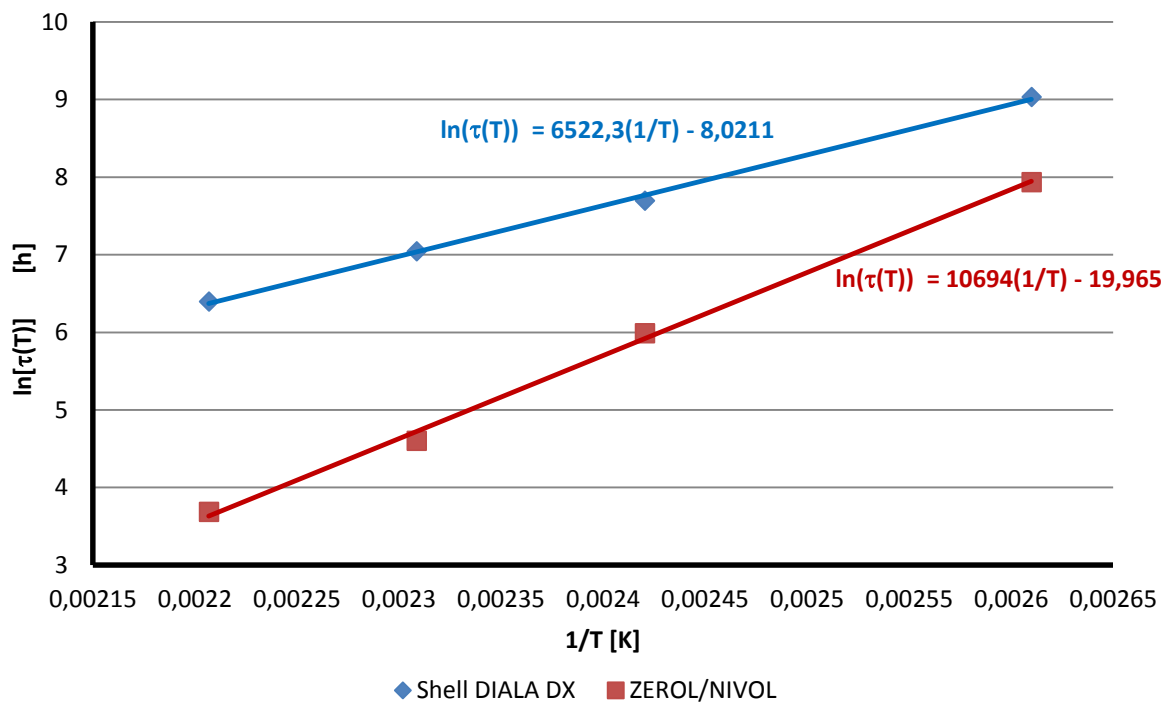
Křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru pro syntetické organické estery MIDEL 7131 a rostlinný olej MIDEL EN jsou zobrazeny na Obr. 6.5.



**Obr. 6.5** Křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru pro syntetické organické estery MIDEL 7131 a rostlinný olej MIDEL EN

Poslední skupinou elektroizolačních kapalin je minerální olej **Shell DIALA DX** a elektroizolační kapalinová směs syntetického a minerálního oleje, kde syntetická elektroizolační kapalina je na bázi alkylbenzenů [53].

Křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru pro minerální olej Shell DIALA DX a elektroizolační kapalinovou směs jsou zobrazeny na Obr. 6.6.



**Obr. 6.6** Křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru pro minerální olej Shell DIALA DX a elektroizolační kapalinovou směs

Hodnoty aktivačních energií a získaných modelů tepelného stárnutí, viz (1.17), syntetických organických esterů MIDEL 7131, rostlinného oleje MIDEL EN, minerálního oleje Shell DIALA DX a elektroizolační kapalinové směsi popisuje Tab. 6.3.

**Tab. 6.3** Hodnoty aktivačních energií a získaných modelů tepelného stárnutí pro vybrané elektroizolační kapaliny

	$\frac{\partial[\ln(\tau(T))]}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)}$	$E_{a1}[\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}]$	$E_{a1} [\text{eV}]$	Parametr a [h]	Získaný model tepelného stárnutí
<b>MIDEL 7131</b>	9682,7	80506,42	0,84	$2,53\cdot 10^{-8}$	$\tau(T) = 2,53\cdot 10^{-8} \cdot e^{\frac{96827}{T}}$
<b>MIDEL EN</b>	9430,7	78411,18	0,82	$6,34\cdot 10^{-8}$	$\tau(T) = 6,34\cdot 10^{-8} \cdot e^{\frac{94307}{T}}$
<b>Shell DIALA DX</b>	6522,3	54229,40	0,56	$3,28\cdot 10^{-4}$	$\tau(T) = 3,28\cdot 10^{-4} \cdot e^{\frac{65223}{T}}$
<b>Elektroizolační kapalinová směs</b>	10694	88914,83	0,92	$2,13\cdot 10^{-9}$	$\tau(T) = 2,13\cdot 10^{-9} \cdot e^{\frac{10694}{T}}$

Číselné hodnoty ztrátového činitele měřeného při 90°C testovaných vzorků při různých expozičních teplotách a hodnoty aktivačních energií shrnuje Tab. 6.4. Ostatní elektrické parametry zkoumaných elektroizolačních kapalin jsou uvedeny v příloze 3, viz Tab. P.3.1 až Tab. P.3.8.

**Tab. 6.4** Hodnoty ztrátového činitele měřeného při 90°C a hodnoty aktivačních energií testovaných elektroizolačních kapalin

	$E_{a1}[\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}]$	$E_{a1} [\text{eV}]$	Teplota měření 90°C				
			tg $\delta$ [-], dodaný stav	tg $\delta$ [-], expoziční teplota 110°C	tg $\delta$ [-], expoziční teplota 140°C	tg $\delta$ [-], expoziční teplota 160°C	tg $\delta$ [-], expoziční teplota 180°C
<b>MIDEL 7131</b>	80506,42	0,84	0,00597	0,10707; 9672 hodin stárnutí	0,11135; 1056 hodin stárnutí	0,09657; 840 hodin stárnutí	0,20725; 336 hodin stárnutí
<b>MIDEL EN</b>	78411,18	0,82	0,00686	0,04051; 4080 hodin stárnutí	0,0605; 1248 hodin stárnutí	0,05965; 840 hodin stárnutí	0,10246; 336 hodin stárnutí
<b>Shell DIALA DX</b>	54229,40	0,56	0,00298	0,04089; 9504 hodin stárnutí	0,0152; 1056 hodin stárnutí	0,01925; 840 hodin stárnutí	0,02; 336 hodin stárnutí
<b>Elektroizolační kapalinová směs</b>	88914,83	0,92	0,015	0,05; 9552 hodin stárnutí	0,04881; 1632 hodin stárnutí	0,1364; 840 hodin stárnutí	0,95; 336 hodin stárnutí
<b>Řepkový olej čistý</b>	87792,38	0,91	0,01667	0,02713; 6432 hodin stárnutí	0,0411; 1632 hodin stárnutí	0,14749; 840 hodin stárnutí	0,13882; 336 hodin stárnutí
<b>Řepkový olej + inhibitor</b>	78194,17	0,81	0,01437	0,03211; 6672 hodin stárnutí	0,05095; 1632 hodin stárnutí	0,08234; 840 hodin stárnutí	0,10358; 336 hodin stárnutí
<b>Slunečnicový olej čistý</b>	90120,43	0,94	0,02343	0,0326; 6312 hodin stárnutí	0,0304; 1056 hodin stárnutí	0,04749; 840 hodin stárnutí	0,0636; 336 hodin stárnutí
<b>Slunečnicový olej + inhibitor</b>	79053,05	0,82	0,01423	0,03295; 6552 hodin stárnutí	0,0279; 1056 hodin stárnutí	0,03613; 840 hodin stárnutí	0,1053; 336 hodin stárnutí

## 6.2.2 Vyhodnocení

Naměřená data ukazují, že nejnižší aktivační energii degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru má minerální olej Shell DIALA DX. Naopak nejvyšší aktivační energii má čistý slunečnicový olej. Výsledky dále ukazují, že slunečnicový a řepkový olej s příměsí inhibitoru mají téměř totožnou aktivační energii s rostlinným olejem MIDEL EN. Je tedy zřejmé, že rostlinný olej MIDEL EN je v tomto ohledu srovnatelný s modifikovanými rostlinnými jak z hlediska aktivační energie, tak z hlediska ztrátového činitele.

Řepkový a slunečnicový olej v čistém stavu má sice aktivační energii větší ve srovnání s modifikovanými oleji, ale jejich ztrátový činitel je horší. Je tedy zřejmé, že přidáním zmíněných inhibitorů do rostlinných olejů se zhorší tepelná stabilita, ale zlepší se elektrické parametry. Dále pro oleje MIDEL 7131 a elektroizolační kapalinovou směs vyšly vyšší hodnoty aktivační energie ve srovnání s ostatními oleji.

Jde tedy o energii degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru, která určuje směrnici přímky odolnosti vůči působícímu degradačnímu mechanismu v logaritmickém měřítku. Tato energie tedy neurčuje posunutí v ose y, které je charakterizováno životností daného elektroizolačního systému. Je tedy zřejmé, že aktivační energie degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru dává informaci pouze o tepelné stabilitě, tedy o rychlosti poklesu životnosti při zvýšené teplotě. Naopak, tato energie nedává žádnou informaci o celkové životnosti elektroizolačních systémů.

Výhodou výpočtu této energie je, že popisuje konkrétní elektroizolační materiál z fyzikálního hlediska a nejedná se o empirickou konstantu. Tato energie se dá následně využít v příslušných modelech stárnutí, kterých lze využít pro on-line výpočet životnosti elektroizolačních systémů.

## 7 Přínosy disertační práce

Jedním z cílů disertační práce bylo navržení nového modelu stárnutí, který bude založen na matematicko-fyzikální podstatě a co nejlépe korespondovat se skutečným stavem elektroizolačních materiálů. U tohoto modelu následně určit **mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru**.

Ze získaných zkušeností a poznatků byl navržen model, který vychází z předpokladu, že při nízkých úrovních vlivu degradačních mechanismů, stárnutí elektroizolačních systémů téměř neprobíhá a u těchto systémů probíhá odlišný degradační mechanismus, než popisují stávající modely, např. [32]. Tento předpoklad je nastíněn teoretickým rozбором kinetické teorie látek při velmi nízkých termodynamických teplotách. Naopak, při vyšších hodnotách, stárnutí probíhá výrazně rychleji. **Navržený model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu** je založen na klasickém modelu tepelného stárnutí a snaží se tuto mezní hodnotu degradačního faktoru zahrnout pomocí matematicko-fyzikálních předpokladů. Model vychází z předpokladu **nekonečného množství mezních stavů**, při jejímž překročení probíhají odlišné degradační mechanismy a popisuje ho vztah (3.8).

Výhodou tohoto modelu je tedy fakt, že zahrnuje mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru, je založen na fyzikálním principu a lépe koresponduje se skutečným stavem elektroizolačních systémů.

Nevýhodou je složité a zdlouhavé experimentální určování mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$  a díky vysoké časové náročnosti příslušných experimentů nemožnost experimentálním způsobem určit konstantu  $D$  definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů před dosažením mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$ . Z těchto důvodů je tato konstanta pouze odhadována zavedením empirického pravidla, viz (5.10).

Pro ověření zmíněných předpokladů byl proveden experiment na čtyřech sadách testovacích vzorků, které se skládaly z transformátorové lepenky. Výsledné rovnice modelu pro jednotlivé odhady popisují vztahy (5.13), (5.14) a (5.15).

Dalším z cílů disertační práce byla implementace modelů stárnutí, které jsou založeny na fyzikálním principu do modelů statistických. Výhodou aplikace statistického modelu jsou údaje distribuční funkce, které odhadují pravděpodobnost doby do poruchy pro konkrétní hodnotu intenzity působícího degradačního faktoru. Tak lze získat důležité předpoklady o chování systému. Nevýhodou je, že pro variabilní intenzitu vlivu degradačního faktoru je odhadovaná pravděpodobnost a doba do poruchy elektroizolačního systému vůči studovanému mechanismu nepředvídatelná. **Z tohoto důvodu byl navržen pravděpodobnostní model s využitím modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru, který se snaží tuto nevýhodu odstranit.**

Navržený model je založen na fyzikálně odvozeném modelu tepelného stárnutí a dokáže informovat o pravděpodobnosti poruchy elektroizolačního systému při variabilní intenzitě degradačního faktoru. Další jeho výhodou je fakt, že **aproximací** funkce parametru tvaru  $\beta(T)$  Weibullova rozdělení v závislosti na teplotě  $T$ , lze **získat** mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$ , která může být použita v modelech jiných. Naopak nevýhodou je, že model uvažuje pouze jediný degradační faktor a pro jeho určení musí být použito mnoha vzorků pro co nevěrohodnější statistický odhad. **Pravděpodobnostní model s využitím modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru byl následně ověřen experimentálním měřením** na čtyřech sadách testovacích vzorků transformátorové lepenky. Implementace modelu tepelného modelu stárnutí do Weibullova rozdělení s odstraněním nevýhody nepředvídatelnosti pravděpodobnosti doby do poruchy pro variabilní intenzitu vlivu degradačního faktoru je vidět ve výstupu navrženého modelu pomocí rovnice pro distribuční funkci (5.5) a hustotu pravděpodobnosti (5.6) Weibullovo rozdělení.

Jak bylo zmíněno výše, pro odhad mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$ , může být využit navržený **pravděpodobnostní model s využitím modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru**. Odhad mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru vychází z interpretace Weibullova pravděpodobnostního grafu, kde hodnota vlivu degradačního faktoru nastává při přechodu vanové křivky z *období II* do *období III*. Tento předpoklad je znázorněn na Obr. 4.1 a Obr. 4.2. Výsledný výpočet odhadu mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$  popisuje rovnice (4.8).



**Výhodou této metody je, že pro určení mezní hodnoty není nutné této hodnoty při experimentálním měření dosáhnout.** Lze jen z příslušného trendu parametru tvaru  $\beta(T)$  tuto hodnotu odhadnout. Nevýhodou je fakt, že pro určení této hodnoty musí být pro experimentální měření připraveno mnoha vzorků pro co nevěrohodnější statistický odhad.

Posledním cílem disertační práce byl popis degradace elektroizolačních systémů. Pro popis chování elektroizolačních systémů byl zvolen parametr **aktivační energie degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$  jako ukazatel tepelné odolnosti.** Tato energie byla získávána při experimentu na elektroizolačních kapalinách pomocí sledování ztrátového činitele při zrychleném stárnutí. Sledováním ztrátového činitele měřeného při 90°C při různých expozičních teplotách, byly sestaveny křivky odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru pro všechny experimentální oleje. Z těchto průběhů byly pomocí kritériální hodnoty  **$\text{tg } \delta \leq 0,03$**  odečteny jednotlivé doby do překročení této meze. Tyto hodnoty následně posloužily pro sestavení křivek odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru a výpočtu **aktivační energie degradačního mechanismu po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru jednotlivých elektroizolačních kapalin.** Hodnoty ztrátového činitele měřeného při 90°C a hodnoty těchto energií testovaných elektroizolačních kapalin jsou shrnuty v Tab. 6.4. Přínos získaných výsledků spočívá ve stanovení konkrétních křivek odolnosti vůči působení degradačnímu faktoru, kde získané rovnice modelů stárnutí lze využít pro on-line výpočet životnosti testovaných typů elektroizolačních kapalin. Přínos dále spočívá v určení konkrétních hodnot aktivačních energií degradačních mechanismů po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru a srovnání s ostatními elektroizolačními kapalinami se závěrem pochopení interpretace této energie jako ukazatele tepelné odolnosti.

**Za původní a jako přínos práce lze považovat:**

- návrh fyzikálního modelu **tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru**, kde model vychází z předpokladu, že při nízkých úrovních vlivu degradačního faktoru stárnutí téměř neprobíhá a uvnitř elektroizolačních systémů probíhá odlišný degradační mechanismus, než popisují současné modely. **Výhodou** celého modelu je, že zahrnuje **mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru** a je založen na **fyzikálním principu**,

- návrh **pravděpodobnostního modelu s využitím modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degradačního faktoru** implementací fyzikálního modelu tepelného stárnutí do Weibullova rozdělení,
- odstranění **nevýhody** výpočtu pravděpodobnosti doby do poruchy pro **proměnnou** intenzitu vlivu degradačního faktoru,
- **návrh metody pro odhad mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru** pomocí pravděpodobnostního modelu. Výhodou této metody je, že pro určení mezní hodnoty **není nutné této hodnoty při experimentálním měření dosáhnout**,
- stanovení **konkrétních křivek odolnosti vůči působení degradačního faktoru**, kde získané rovnice modelů stárnutí lze využít pro on-line výpočet životnosti testovaných typů elektroizolačních kapalin,
- určení **konkrétních hodnot aktivačních energií degradačních mechanismů po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru  $T_{TI}$**  a srovnání s ostatními elektroizolačními kapalinami.

## 8 Závěr

Na elektroizolační systémy během jejich technického života působí mnoho degračních faktorů. Pro sestavení modelů stárnutí je téměř nemožné všechny tyto degrační mechanismy deterministicky popsat a zavést je do jednoho univerzálního modelu stárnutí. Je tedy nutné vybrat takové degrační mechanismy, které nejvíce přispívají k snižování celkové životnosti elektroizolačních systémů. Nejdůležitějšími degračními faktory přispívající k výraznému stárnutí hermetizovaných elektroizolačních systémů jsou teplota a intenzita elektrického pole, kde pro další návrh modelů stárnutí byla využita teplota.

Úvod práce se zabývá teoretickým popisem již existujících modelů stárnutí, které jsou děleny na modely fyzikální, statistické a fyzikálně-statistické. Následuje samotný návrh nových modelů stárnutí, jak na fyzikálním, tak fyzikálně-statistickém přístupu.

Prvním navrženým modelem byl fyzikální model tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu, který vychází z předpokladu, že při nízkých úrovních intenzity tepelného stárnutí probíhá stárnutí elektroizolačních systémů výrazně pomaleji. Výhodou tohoto modelu je, že zahrnuje mezní hodnotu vlivu degračního faktoru. Tato hodnota naznačuje, že při jejím překročení dochází v elektroizolačních systémech odlišný degrační mechanismus, který je v tomto modelu popsán konstantou  $D$  definující synergický účinek dílčích degračních mechanismů před dosažením mezní hodnoty vlivu degračního faktoru  $T_{TI}$ .

Dalším navrženým modelem byl pravděpodobnostní model s využitím modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu vlivu degračního faktoru. Tento model byl následně ověřen experimentem na lesklé transformátorové lepence. Pro co největší věrohodnost tohoto experimentu bylo použito 50 vzorků. Přínosem tohoto modelu je, že odstraňuje nevýhodu výpočtu pravděpodobnosti doby do poruchy pro variabilní intenzitu vlivu degračního faktoru.

V rámci modelu tepelného stárnutí respektující mezní hodnotu byl dále navržen postup pro odhad mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru pomocí navrženého pravděpodobnostního modelu. Výhodou této metody je, že pro určení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru není nutné této hodnoty při experimentálním měření dosáhnout. Celý model byl následně ověřen provedeným experimentálním měřením na transformátorové lepence.

Poslední částí disertační práce byl postup získávání aktivační energie, která popisuje elektroizolační systémy po dosažení mezní hodnoty vlivu degradačního faktoru. Tento postup byl ověřen pomocí experimentálního měření na elektroizolačních kapalinách pomocí sledování ztrátového činitele. Aktivační energie byla následně získána z křivek odolnosti vůči působícímu degradačnímu faktoru. Výsledky získaných aktivačních energií a ztrátového činitele ukazují, že aktivační energie dává informaci o tepelné stabilitě, nedává informaci o životnosti elektroizolačních systémů, kde výhodou výpočtu této energie je, že popisuje konkrétní elektroizolační materiál z fyzikálního hlediska a nejedná se o empirickou konstantu. Tato energie se dá následně využít v příslušných modelech stárnutí, kterých lze využít pro on-line výpočet životnosti elektroizolačních systémů.

## 9 Reference

- [1] MENTLÍK, Václav, Pavel TRNKA, Magdaléna TRNKOVÁ a Lumír ŠAŠEK. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. Praha: BEN, 2011. ISBN 978-80-7300-412-5.
- [2] NOVOTNÝ, Radovan. Weibullovo rozdělení při analýzách bezporuchovosti. *Elektrorevue*. 2002, č. 17. ISSN 1213-1539.
- [3] KAHOUNOVÁ, Jana. Odhad funkce přežití. *Acta Oeconomica Pragensia*. 2007, roč. 15, č. 1.
- [4] ČSN EN 61649. Weibullova analýza. Praha: úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [5] POLSTEROVÁ, Helena. Spolehlivost v elektrotechnice. Brno, 2005. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.
- [6] WEIBULL PLOT. Weibull Reliability Engineering [online]. Nederland, 2008 [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: <http://www.weibull.nl/frameset.htm>
- [7] MELOUN, Milan. *Statistické zpracování experimentálních dat*. Praha: PLUS, 1994. ISBN 80-85297-56-6.
- [8] NAGY, Ivan a Jitka KRATOCHVÍLOVÁ. *Matematická Statistika*. Praha: Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, 2004.
- [9] GROEBEL, David J. a Feng-Bin SUN, Determination and Interpretation of Activation 'Energy Using Accelerated-Test Data. 2001 PROCEEDINGS Annual RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium. 2001, DOI: 10.1109/RAMS.2001.902442.
- [10] SOUČEK, Jakub, Pavel TRNKA a Martin ŠIRŮČEK. Sledování stavu elektroizolačních systémů pomocí Weibullova rozdělení. *14<sup>th</sup> International Scientific Conference Electric Power Engineering 2013*. 2013, ISBN 978-80-248-2988-3

- [11] Cygan, P.; Laghari, J.R., "A review of electrical and thermal multistress aging models," *Electrical Insulation, 1990., Conference Record of the 1990 IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.15,20, 3-6 Jun 1990  
doi: 10.1109/ELINSL.1990.109698
- [12] Montanari, G.C.; Pattini, G., "Thermal Endurance Evaluation of Insulating Materials: A Theoretical and Experimental Analysis," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on* , vol.EI-21, no.1, pp.69,77, Feb. 1986  
doi: 10.1109/TEI.1986.349045
- [13] IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Voltage Endurance Data," *ANSI/IEEE Std 930-1987*, 1987  
doi: 10.1109/IEEESTD.1987.86250
- [14] Gjerde, A.C., "Multifactor ageing models - origin and similarities," *Electrical Insulation Magazine, IEEE* , vol.13, no.1, pp.6,13, Jan.-Feb. 1997  
doi: 10.1109/57.567392
- [15] L. Simoni, "A General Approach to Endurance of Electrical Insulation Under Temperature and Voltage", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 16, pp. 277- 289, 1981.
- [16] L. Simoni, "General Equation of the Decline in the Electric Strength for Combined Thermal and Electrical Stresses", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 19, pp. 45-52, 1984.
- [17] T. W. Dakin and S. A. Studniarz, "The Voltage Endurance of Cast Epoxy Resins", *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Philadelphia Pa, 1978.
- [18] Koutský J., Degradační procesy a predikce životnosti., FST, ZČU, Plzeň Praha, 1995, ISBN 80-7082-177-9, 166s.
- [19] STONE, Greg. *ELECTRICAL INSULATION FOR ROTATING MACHINES*. Piscataway, USA: Wiley, 2004. ISBN 0-471-44506-1.
- [20] Ramu, T. S., "On the Estimation of Life of Power Apparatus Insulation Under Combined Electrical and Thermal Stress," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on* , vol.EI-20, no.1, pp.70,78, Feb. 1985, doi: 10.1109/TEI.1985.348759

- [21] B. Fallou, C. Burguiere and J. F. Morel, "First Approach on Multiple Stress Accelerated Life Testing of Electrical Insulation", *NRC Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Pocono Pa, pp. 621-628, October 1979.
- [22] J.-P. Crine, J.-L. Parpal and G. Lessard, "The Compensation Law and Polymer Aging and Relaxations", *Proc. 3rd Int. Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, Trondheim, Norway, 1989. 25.
- [23] J.-P. Crine, E. David. "Influence of Mechanical Stresses on Some Electrical Properties of Polymers," in *Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 71-74, 2005.
- [24] J.-P. Crine, J.-L. Parpal, C. Dang, "A new approach to the electric aging of dielectrics," in *Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 161-167, Oct-Nov 1989.
- [25] Dissado, L.A.; Mazzanti, G.; Montanari, G.C., "The role of trapped space charges in the electrical aging of insulating materials," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on* , vol.4, no.5, pp.496,506, Oct 1997  
doi: 10.1109/94.625642
- [26] Dissado, L.A.; Mazzanti, G.; Montanari, G.C., "Proposal of a space-charge life model for electrical polymeric insulation aged under AC voltage," *Electrical Insulation, 1998. Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on* , vol.2, no., pp.595,598 vol.2, 7-10 Jun 1998 doi: 10.1109/ELINSL.1998.694863
- [27] Grzybowski, S.; Kota, N., "Lifetime characteristics of magnet wires under multistress conditions," *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on* , vol., no., pp.605,608, 16-19 Oct. 2005 doi: 10.1109/CEIDP.2005.1560755
- [28] Activation energy. In: Chemical Education Division Groups [online]. Indiana, USA: Purdue university, 2010 [cit. 2012-03-11]. Dostupné z:  
<http://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch22/activate.html>


- [29] Montanari, G.C.; Cacciari, M., "A probabilistic life model for insulating materials showing electrical thresholds," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol.24, no.1, pp.127,134, Feb 1989  
doi: 10.1109/14.19877
- [30] ČSN EN 60085 ed. 2. *Elektrické izolace - Tepelné hodnocení a značení*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [31] V. M. Montsinger, "Loading Transformers by Temperature", *AIEE Transactions*, Vol. 49, pp. 776-792, 1930.
- [32] T. W. Dakin, "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon", *AIEE Trans.* Vol. 67, pp. 113-122, 1948.
- [33] Badicu, L.V.; Dumitran, L.M.; Notingher, P.V.; Setnescu, R.; Setnescu, T., "Mineral oil lifetime estimation using activation energy" *Dielectric Liquids (ICDL)*., pp.1-4, 2011
- [34] Chao-Rui Li and Tong B. Tang, "Isoconversion method for kinetic analysis of solid-state reactions from dynamic thermoanalytical data " *Journal of Materials*
- [35] P. Paloniemi, "Theory of Equalization of Thermal Aging", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 16, pp. 1- 30, 1981.
- [36] ČSN EN 60641-3-1 ed. 2 (346564). Lesklá lepenka a obyčejná lepenka pro elektrotechnické účely: Část 3: Specifikace jednotlivých materiálů - List 1: Požadavky Zlepšování parametrů výkonových transformátorů na lesklou lepenku, typy B.0.1, B.0.3, B.2.1, B.2.3, B.3.1, B.3.3, B.4.1, B.4.3, B.5.1, B.5.3. a B.6.1. Praha: Český normalizační institut.
- [37] ČSN EN 60243-1 (346463). Elektrická pevnost izolačních materiálů - Zkušební metody - Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [38] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. ZÁKLADNÍ POZNATKY MOLEKULOVÉ FYZIKY A TERMODYNAMIKY: Kinetická teorie stavby látek. In: *Fyzika* [online]. 2008 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com>
- [39] KREMPASKÝ, Július a František SCHAUER. *Fyzika I a II*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2004, 611 s.



- [40] Bartovská Lidmila, Šišková Marie: *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. 5th ed. Praha : VŠCHT Praha, 2005. ISBN 80-7080-579-X
- [41] Envirotemp FR3 Vegetable Oil-Based Insulating Dielectric Fluid. *California Environmental Protection Agency, Department of Toxic Substances Control*. 2003, s. 1-8.
- [42] BIOTEMP Insulating Dielectric Fluid. *ETV Joint Verification Statement*. 2002, s. 1 -8.
- [43] MIDEL 7131. In *MIDEL 7131 Complete Binder of Data Sheets* [online]. Manchester UK : M&I Materials, 2011 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z WWW: <[http://www.midel.com/uploads/midel/documents/technical/MIDEL\\_7131\\_Complete\\_Binder\\_of\\_Data\\_Sheets.pdf](http://www.midel.com/uploads/midel/documents/technical/MIDEL_7131_Complete_Binder_of_Data_Sheets.pdf)>.
- [44] SOUČEK, J., Refinement and regeneration process for electro-insulating fluids, future horizons. Plzeň, 2011. pp. 12-56, FEL ZČU, In Czech.
- [45] OKÉNKOVÁ, Eva. *Vliv rafinace na kvalitativní parametry a stabilitu rostlinných olejů lisovaných za studena*. Zlín, 2006. 82 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [46] Oleje. Mjauto.cz [online]. 2001, č.1, [cit. 2015-03-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mjauto.cz/newdocs/oleje.htm>>.
- [47] ČSN EN 60216-1. *Elektroizolační materiály - Vlastnosti tepelné odolnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [48] ČSN EN 60247. *Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity*. Praha: UNMZ, 2005.
- [49] ČSN EN 61099 ed. 2. *Izolační kapaliny - Specifikace nepoužitých syntetických organických esterů pro elektrotechnické účely*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [50] ASTM D924. *Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids*. West Conshohocken: ASTM International, 2008.

- [51] ČSN EN 61203. Syntetické organické estery pro elektrotechnické účely - Návod na úpravu transformátorových esterů v zařízení. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 1998.
- [52] ŠIRŮČEK, Martin. *Zlepšování parametrů výkonových transformátorů*. Plzeň, 2013. Dostupné z: [http://www.fel.zcu.cz/uredni-desky/UD\\_PhD/Probihajici\\_SDZ\\_a\\_obhajoby/Autoreferaty/131218\\_autoreferat\\_Sirucek\\_Martin.pdf](http://www.fel.zcu.cz/uredni-desky/UD_PhD/Probihajici_SDZ_a_obhajoby/Autoreferaty/131218_autoreferat_Sirucek_Martin.pdf). Disertační práce. ZČU Plzeň, FEL, Katedra technologií a měření.
- [53] Aromatické uhlovodíky. *Petroleum.cz* [online]. 2007, (5) [cit. 2015-08-24]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/ropa/aromaty.aspx>
- [54] HÁJEK, Jaroslav, Vladimír MACHOVIČ, Olga KŘÍŽOVÁ, Vladimíra SEDLÁČKOVÁ a Miroslava Novotná. Využití infračervené spektrofotometrie pro sledování změn při oxidaci řepkového oleje. *Chem. Listy* 92. Praha: Asociace českých chemických společností, 1998, (5), 434-440. ISSN 1213-7103, 0009-2770.
- [55] Envirotemp FR3 Vegetable Oil-Based Insulating Dielectric Fluid. California Environmental Protection Agency Department of Toxic Substances Control. 2003, s.1-8.
- [56] Biotemp Insulating Dielectric Fluid. ETV Joint Verification Statement. 2002, s. 1-8.
- [57] ČSN EN 62770 ed. 1. *Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [58] Shell Diala Oil DX: Very High performance insulating oil. In: Technical Data Sheet [online]. Shell Lubricants, 2008, [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: [http://www3.ikaros.net/datablad/pblad/smorjmedel%20\(Univar\)/550012592%20Shell%20Diala%20Oil%20DX%20Dried%20PBLAD.pdf](http://www3.ikaros.net/datablad/pblad/smorjmedel%20(Univar)/550012592%20Shell%20Diala%20Oil%20DX%20Dried%20PBLAD.pdf)
- [59] MIDEL eN 1215: Natural ester transformer fluid. In: Technical Information Pack [online]. M&I Materials, 2016, s. 1-12 [cit. 2015-06-15]. Dostupné z: [http://static.mimaterials.com/midel/documents/technical/MIDEL\\_eN\\_1215\\_Technical\\_Information\\_Pack\\_A4.pdf](http://static.mimaterials.com/midel/documents/technical/MIDEL_eN_1215_Technical_Information_Pack_A4.pdf)

## Publikační činnost autora

- 
- [I] SOUČEK, J., SVOBODA, M., TRNKA, P. Relation of electro insulating fluids to the environment. In Diagnostika `11. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 181-184. ISBN: 978-80-261-0020-1
- [II] SOUČEK, J., TRNKA, P. Udržitelný rozvoj i ve vysokonapěťové technice?. A-Z ELEKTRO, specializovaný odborný časopis, 2012, č. 2, s. 38-41. ISSN: 1805-1073
- [III] TRNKA, P., SVOBODA, M., SOUČEK, J. Diagnostika elektroizolačních systémů pro zjišťování aktuální zbytkové životnosti. In Proceedings of the 13th international scientific conference electric power engineering 2012. Brno: Brno University of Technology, 2012. s. 775-779. ISBN: 978-80-214-4514-7
- [IV] SOUČEK, J., TRNKA, P., SVOBODA, M. Určování aktivační energie elektroizolačních systémů. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, 2012. s. 781-784. ISBN: 978-80-214-4514-7
- [V] SVOBODA, M., TRNKA, P., SOUČEK, J. Electrical Material Model Aging for Online Diagnostic Systems. In Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Red Hook: Curran Associates, Inc., 2012. s. 987-990. ISBN: 978-1-4673-1020-8
- [VI] SOUČEK, J. Využití Weibullova rozdělení a aktivační energie pro popis chování izolačních systémů. In Elektrotechnika a informatika 2012 - část první. Plzeň: 2012. ISBN: 978-80-261-0120-8
- [VII] SOUČEK, J. Vliv vlhkosti na elektrickou pevnost elektroizolačních kapalin a vztah elektroizolačních kapalin k životnímu prostředí. In Elektrotechnika a informatika 2011, část první - Elektrotechnika. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 119-122. ISBN: 978-80-261-0016-4

- [VIII] TRNKA, P., SVOBODA, M., SOUČEK, J. Condition Based Management of Electrical Appliances. In Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Red Hook: IEEE, 2012. s.846-849. ISBN: 978-1-4673-1020-8,
- [IX] SOUČEK, J. Způsoby rafinace a regenerace elektroizolačních kapalin, výhledy do budoucnosti. Plzeň, 2011. 68 s. Diplomová práce. FEL ZČU.
- [X] SVOBODA, Michal, Pavel TRNKA a Jakub SOUČEK. Program for prediction of the rest lifetime of rotary machine insulating system. In: Diagnostika '11. Plzeň: University of West Bohemia, 2011, s. 48-52. ISBN 978-80-261-0020-1.
- [XI] MENTLÍK, Václav, Pavel TRNKA, Eva KUČEROVÁ, Jakub SOUČEK, Jan DONČUK a Petr MRÁZ. Diagnostika částečných výbojů transformátorů ČEPS. Plzeň, 2012. [nepublikováno]
- [XII] TRNKA, P., ŠIRŮČEK, M., SVOBODA, M., SOUČEK, J. Condition-based maintenance of high-voltage machines-a practical application to electrical insulation. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2014, roč. 30, č. 1, s. 32-38. ISSN: 0883-7554, **IF 1,61 [2014]**
- [XIII] TRNKA, P., PIHERA, J., SVOBODA, M., SOUČEK, J. New challenges in partial discharge measurements. In 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Piscataway: IEEE, 2013. s. 75-78. ISBN: 978-1-4673-4459-3
- [XIV] SOUČEK, J., ŠIRŮČEK, M., TRNKA, P. Diagnostics of Alternative Insulating Liquids Using Monitoring the Thermal Characteristics. In Diagnostika '13. Pilsen: University of West Bohemia in Pilsen, 2013. s. 74-77. ISBN: 978-80-261-0210-6
- [XV] MENTLÍK, V., TRNKA, P., DONČUK, J., SVOBODA, M., SOUČEK, J., TOMÁŠKOVÁ, T. Diagnostika a Life-Cycle Management transformátorů 2013 - 2014. ČEPS, a.s., 2013.
- [XVI] SOUČEK, J., TRNKA, P. A New Statistical-Physical Model to the Description of Aging of Electroinsulating Systems. In Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Brno: Brno University of Technology Faculty of Electrical Engineering and Communication Department of Electrical Power Engineering, 2014. s. 263-266. ISBN: 978-1-4799-3806-3

- [XVII] SOUČEK, J. Pravděpodobnostní model využívající tepelného stárnutí elektroizolačních systémů. In Elektrotechnika a informatika 2013 část první- Elektrotechnika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 131-135. ISBN: 978-80-261-0233-5
- [XVIII] MENTLÍK, V., TRNKA, P., DONČUK, J., SVOBODA, M., SOUČEK, J., TOMÁŠKOVÁ, T. Analýza vlivů chodu transformátorů ČEPS. ČEPS a. s., 2013.
- [XIX] TRNKA, P., SVOBODA, M., SOUČEK, J., PIHERA, J., KRPAL, O. Měření částečných výbojů statorového vinutí a motorů Škoda Electric. Škoda Electric, a.s., 2014.
- [XX] SOUČEK, J., ŠIRŮČEK, M., TRNKA, P. Sledování stavu elektroizolačních systémů pomocí Weibullova rozdělení. In Proceedings of the 14 th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2013. Ostrava: VSB- Technical University, 2013. s. 291-295. ISBN: 978-80-248-2988-3
- [XXI] SOUČEK, J., TRNKA, P., GUTTEN, M., JURČÍK, J. Possibility of using of natural ester in distribution transformer. In Diagnostic of Electrical machines and Materials DESAM 2014. University of Zilina: EDIS-Žilina University publisher, 2014. s. 62-65. ISBN: 978-80-554-0888-0
- [XXII] SOUČEK, Jakub. Diagnostika alternativních elektroizolačních kapalin používaných v elektrotechnice. Elektrotechnika a informatika 2014- část první. Str. 115-118., ISBN 978-80- 261-0367-7, Západočeská univerzita v Plzni, říjen 2014
- [XXIII] Jakub SOUČEK, Michal SVOBODA, Jaroslav HORNAK, Tomasz KOLTUNOWICZ a Miroslav GUTTEN. 2015. Comparison of the Electrical Properties of Canola Oil with Commercially Available Mineral Oil. 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE 2015).
- [XXIV] Jakub SOUČEK, Michal SVOBODA, Jaroslav HORNAK, Tomasz KOLTUNOWICZ a Miroslav GUTTEN. 2015. Comparison of the Electrical Properties of Canola Oil with Commercially Available Mineral Oil. 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE 2015).

- [XXV] Jakub SOUČEK, Michal SVOBODA, Jaroslav HORNAK, Pavel TRNKA a Václav MENTLÍK. 2015. Diagnosis of Dissipation Factor and Breakdown Voltage of Alternative Insulating Liquids. 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015).
- [XXVI] Pavel TRNKA, Václav MENTLÍK, Jakub SOUČEK, Michal SVOBODA a Jaroslav HORNAK, 2015. Biodegradable Esters – Aspects of Applicability Criteria Determination. 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015).
- [XXVII] Václav MENTLÍK, Pavel TRNKA, Jakub SOUČEK, Michal SVOBODA a Jaroslav HORNAK, 2015. Environmentally Friendly Electroinsulating Fluids – Perspective Ways. 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015).
- [XXVIII] Haller, R., Pihera, J., Řeřicha, T., Benešová, Z., Jiříčková, J., Kotlan, V., Kropík, P., Martínek, P., Muhr, M., Müllerová, E., Peroutka, Z., Polanský, R., Prosr, P., Souček, J., Šroubová, L., Trnka, P., Tupa, J. 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015). Plzeň, Česká republika, 23.08.2015 - 28.08.2015.

## Přílohy

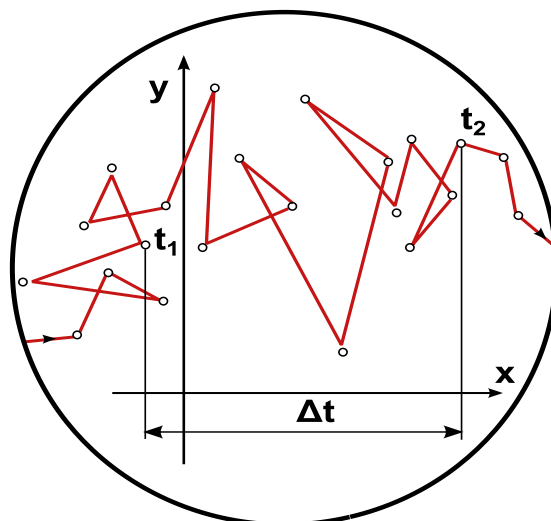


### Příloha 1 - Kinetická teorie látek

Každá látka jakéhokoliv skupenství se skládá z částic, které se v látce neustále a neuspořádaně (chaoticky) pohybují. Částice na sebe navzájem působí silami, které jsou v malých vzdálenostech odpudivé a při větších vzdálenostech přitažlivé. Neustálý a neuspořádaný pohyb částic (tepelná pohyb) je složen z posuvného pohybu (plyny), otáčivého pohybu (víceatomové molekuly v plynu) a kmitavého pohybu (pevné látky a kapaliny). Tento pohyb nelze bezprostředně pozorovat ani nejdokonalejšími přístroji. Pozorovat lze jen makroskopické jevy jako souhrn těchto mikroskopických pohybů (ohřívání, roztažnost látek atd.). Nejznámějším případem tepelného pohybu částic v látkách je např. difúze. Zvýšením teploty, probíhá difúze rychleji, což koresponduje s rychlejším pohybem částic [38], [39].

Důkazem tepelného pohybu částic v kapalinách je Brownův pohyb. Částice o rozměrech řádově  $\mu\text{m}$  vykonávají nepravidelný pohyb, který je způsoben působením molekul kapaliny. Charakter pohybu nezávisí na chemickém složení a na vnějších podmínkách. Intenzita pohybu je tím větší, čím menší jsou rozměry částic a čím větší je **teplota** prostředí. Pohyb částic je způsoben, tím že v okolí částic jedné látky je několik molekul kapaliny. V některém okamžiku převáží nárazy z jedné strany a výsledná síla posune částice látky určitým směrem. V dalším okamžiku však převáží nárazy z jiné strany a výsledná síla posune částice jinam. Skutečnou délku dráhy, kterou částice urazí, nelze určit díky velmi častým změnám rychlosti i směru (např. za 1 s může být počet změn větší než  $10^{20}$ ) [2].

Pohyb částice je následně zobrazen na Obr. P.1.1, kde pohyb po přímkové trajektorii je pouze smluvní, ve skutečnosti jde o složitou trajektorii.



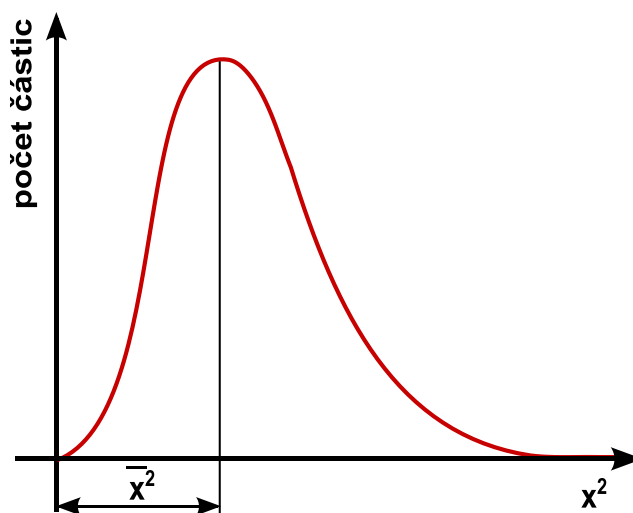
**Obr. P.1.1** Dráha částice a střední posuv [40]

Jestliže je částice pozorována ve směru osy  $x$ , pak střední hodnota kvadrátu posunutí do této osy je dána Einstein–Smoluchowského vztahem (P.1.1) [40].

$$\overline{x^2} = \frac{RT\Delta t}{3\pi\eta_D a N_A}, \quad (\text{P.1.1})$$

kde  $R$  je univerzální plynová konstanta, která má hodnotu  $8,314\,47215\,J\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}$ ,  $T$  [K] je teplota,  $\Delta t$  [s] je čas,  $a$  [m] je poloměr koule, která nahrazuje částici,  $\eta_D$  [ $N\cdot s\cdot m^{-2}$ ] je dynamická viskozita a  $N_A$  [ $mol^{-1}$ ] je Avogadrova konstanta.

Význam střední hodnoty kvadrátu posunutí je patrný z Obr. P.1.2



**Obr. P.1.2** Význam střední hodnoty kvadrátu posunutí [40]



Stěžejní hodnotou tepelného stárnutí je absolutní nula. Absolutní nula je hypotetický stav látky, ve které se zastaví veškerý tepelný pohyb částic ( $T=0$  K, tj.  $-273,15$  °C). Chování částic v blízkosti této teploty se zabývá třetí termodynamický zákon (P.1.2). V podstatě tvrdí, že není možno dosáhnout absolutní nuly teploty. Tento závěr však vyplývá z pozorování prostřednictvím entropie (P.1.3), která má v teorii tepelných jevů velký význam [39], [40].

$$\lim_{T \rightarrow 0} dS = 0, \quad (\text{P.1.2})$$

$$dS = \frac{dQ}{T}, \quad (\text{P.1.3})$$

kde  $S$  je entropie [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $Q$  je teplo [ $\text{J}$ ] a  $T$  je teplota [ $\text{K}$ ].

## Příloha 2 - Experiment na transformátorové lepence

Detailnější průběhy a hodnoty elektrické pevnosti transformátorové lepenky pro různé úrovně tepelného zatížení jsou zobrazeny na Obr. P.2.8 až Obr. P.2.13 a vyčísleny v Tab. P.2.1 až Tab. P.2.3. Doby do poruchy pro transformátorovou lepenku při různých expozičních teplotách jsou vyčísleny v Tab. P.2.4.

Na Obr. P.2.1 až Obr. P.2.7, jsou dále vykresleny histogramy elektrické pevnosti při různých expozičních teplotách a měřicím čase.

**Tab. P.2.1** Hodnoty elektrické pevnosti transformátorové lepenky pro zatížení 160°C

	Číslo vzorku	Expoziční doba [h]		
		0	120	240
Ep [kV·mm <sup>-1</sup> ]	1	12,4	12,2	11,38
	2	13,048	12,558	11,44
	3	13,074	12,7	11,7
	4	13,312	12,8	12
	5	13,324	13	12,16
	6	13,538	13,35	12,3
	7	13,542	13,406	12,5
	8	13,612	13,452	12,6
	9	13,66	13,498	12,884
	10	13,778	13,554	12,926
	11	13,86	13,598	13,02
	12	13,874	13,722	13,026
	13	13,89	13,748	13,152
	14	13,976	13,75	13,156
	15	13,984	13,784	13,194
	16	13,988	13,798	13,486
	17	14,018	13,828	13,502
	18	14,068	13,902	13,622
	19	14,162	13,958	13,652
	20	14,17	14,02	13,662
	21	14,182	14,022	13,684
	22	14,186	14,024	13,886
	23	14,224	14,032	13,934
	24	14,238	14,064	13,98
	25	14,27	14,098	14
	26	14,424	14,104	14,126

	27	14,498	14,126	14,22
	28	14,58	14,134	14,222
	29	14,594	14,152	14,226
	30	14,646	14,17	14,246
	31	14,65	14,192	14,256
	32	14,682	14,224	14,268
	33	14,762	14,336	14,332
	34	14,952	14,358	14,356
	35	15,03	14,412	14,398
	36	15,05	14,428	14,406
	37	15,11	14,488	14,43
	38	15,11	14,492	14,436
	39	15,11	14,52	14,472
	40	15,156	14,548	14,478
	41	15,29	14,58	14,576
	42	15,3	14,59	14,636
	43	15,336	14,65	14,776
	44	15,41	14,724	14,784
	45	15,462	15,076	14,92
	46	15,642	15,076	14,942
	47	15,642	15,096	14,946
	48	15,642	15,1	15,03
	49	15,884	15,23	15,062
	50	16,028	15,568	15,142

**Tab. P.2.2** Hodnoty elektrické pevnosti transformátorové lepenky pro zatížení 170°C

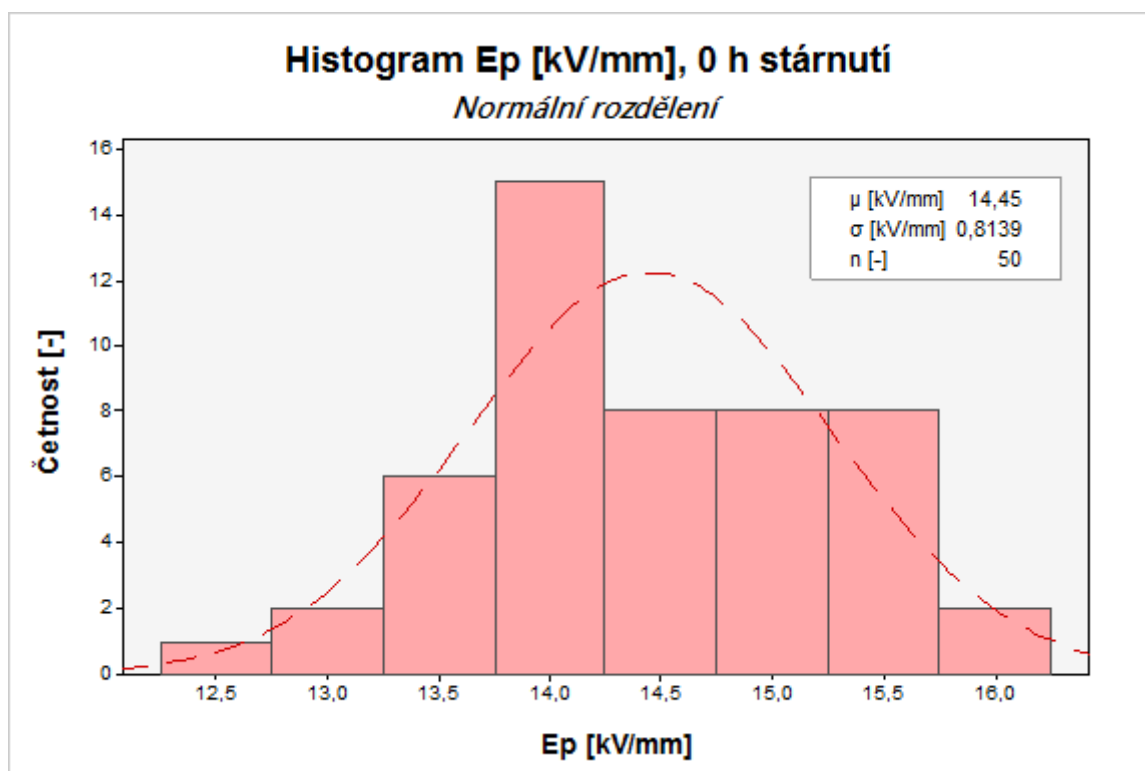
	Číslo vzorku	Expoziční doba [h]		
		0	120	240
Ep [kV·mm <sup>-1</sup> ]	1	12,4	12,228	11,42
	2	13,048	12,4	11,44
	3	13,074	12,474	11,46
	4	13,312	12,52	11,5
	5	13,324	12,926	11,504
	6	13,538	12,986	11,542
	7	13,542	13,04	11,584
	8	13,612	13,05	11,7
	9	13,66	13,086	11,71
	10	13,778	13,108	11,736
	11	13,86	13,116	11,85
	12	13,874	13,234	11,89

13	13,89	13,278	11,98
14	13,976	13,368	11,994
15	13,984	13,42	12,106
16	13,988	13,444	12,15
17	14,018	13,494	12,202
18	14,068	13,502	12,218
19	14,162	13,508	12,226
20	14,17	13,526	12,234
21	14,182	13,608	12,262
22	14,186	13,61	12,264
23	14,224	13,61	12,268
24	14,238	13,716	12,342
25	14,27	13,796	12,364
26	14,424	13,816	12,372
27	14,498	13,846	12,416
28	14,58	13,848	12,424
29	14,594	13,862	12,438
30	14,646	13,902	12,464
31	14,65	13,932	12,482
32	14,682	13,936	12,494
33	14,762	13,95	12,518
34	14,952	14,008	12,548
35	15,03	14,092	12,55
36	15,05	14,176	12,584
37	15,11	14,244	12,698
38	15,11	14,25	12,7
39	15,11	14,254	12,792
40	15,156	14,286	12,864
41	15,29	14,337	12,924
42	15,3	14,3508	12,924
43	15,336	14,446	12,996
44	15,41	14,526	13,014
45	15,462	14,66	13,1
46	15,642	14,664	13,168
47	15,642	14,752	13,202
48	15,642	14,776	13,21
49	15,884	14,9	13,376
50	16,028	15,174	13,42

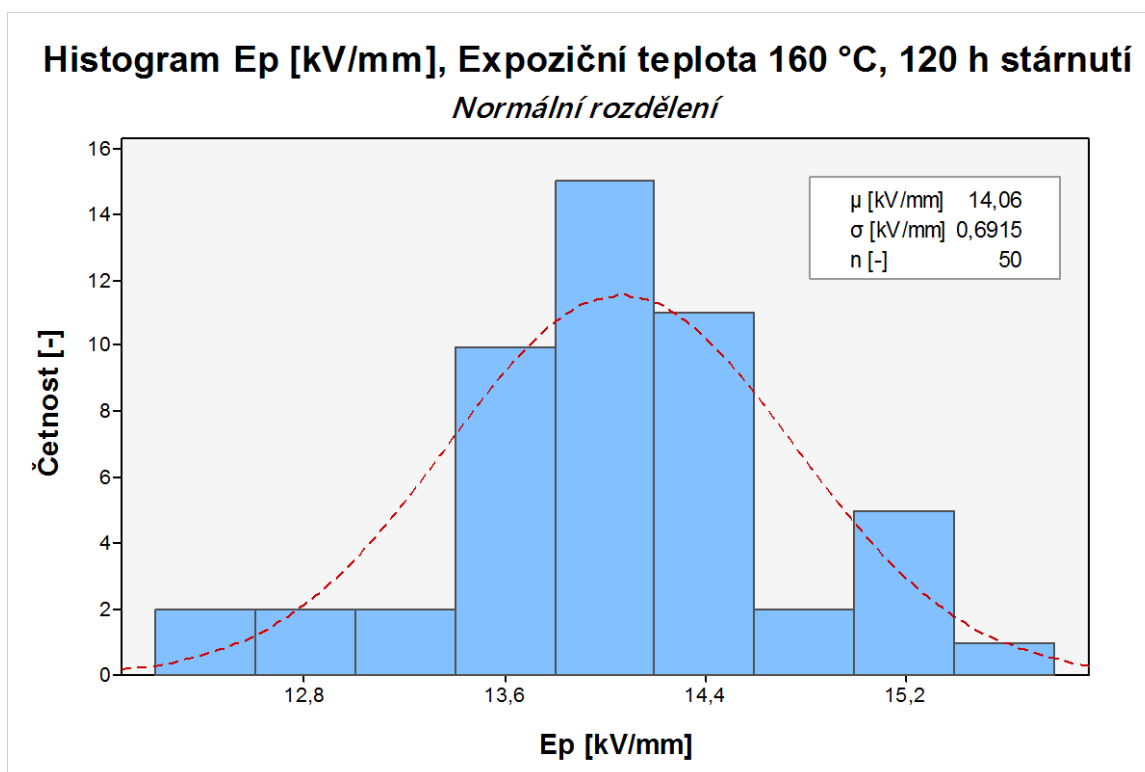
**Tab. P.2.3** Hodnoty elektrické pevnosti transformátorové lepenky pro zatížení 180°C

	Číslo vzorku	Expoziční doba [h]		
		0	120	240
Ep [kV·mm <sup>-1</sup> ]	1	12,4	11,112	8,4
	2	13,048	11,119	8,45
	3	13,074	11,225	8,496
	4	13,312	11,302	8,514
	5	13,324	11,405	8,558
	6	13,538	11,593	8,563
	7	13,542	11,608	8,654
	8	13,612	11,701	8,702
	9	13,66	11,728	8,732
	10	13,778	11,748	8,838
	11	13,86	11,85	8,852
	12	13,874	11,852	8,908
	13	13,89	11,854	8,936
	14	13,976	11,952	9,04
	15	13,984	11,956	9,05
	16	13,988	12,092	9,066
	17	14,018	12,14	9,066
	18	14,068	12,188	9,125
	19	14,162	12,22	9,154
	20	14,17	12,356	9,236
	21	14,182	12,386	9,253
	22	14,186	12,392	9,254
	23	14,224	12,4	9,314
	24	14,238	12,452	9,362
	25	14,27	12,456	9,388
	26	14,424	12,49	9,392
	27	14,498	12,492	9,398
	28	14,58	12,604	9,418
	29	14,594	12,7	9,468
	30	14,646	12,71	9,474
	31	14,65	12,714	9,506
	32	14,682	12,868	9,518
	33	14,762	12,934	9,56
	34	14,952	12,996	9,566
	35	15,03	13	9,572
	36	15,05	13,084	9,574
	37	15,11	13,084	9,602

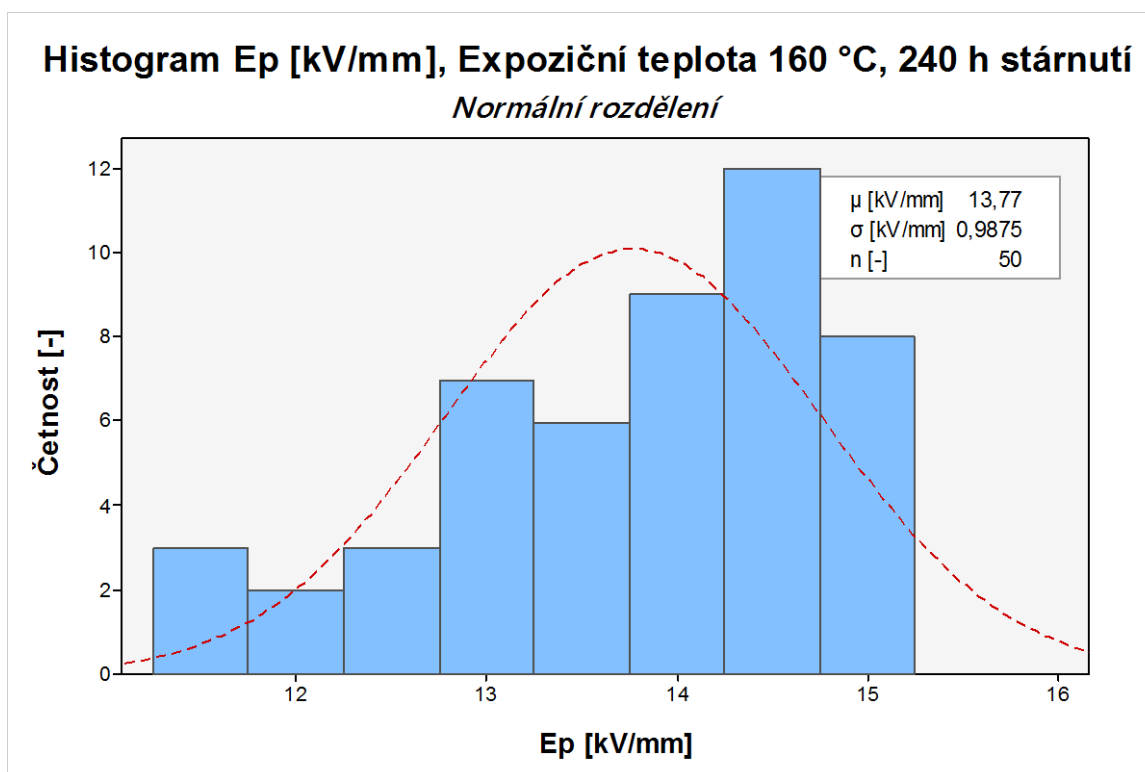
38	15,11	13,092	9,676
39	15,11	13,172	9,684
40	15,156	13,276	9,768
41	15,29	13,436	9,786
42	15,3	13,442	9,806
43	15,336	13,454	9,824
44	15,41	13,468	9,848
45	15,462	13,566	9,978
46	15,642	13,788	9,988
47	15,642	13,908	10,014
48	15,642	13,966	10,09
49	15,884	14,176	10,258
50	16,028	14,286	10,442



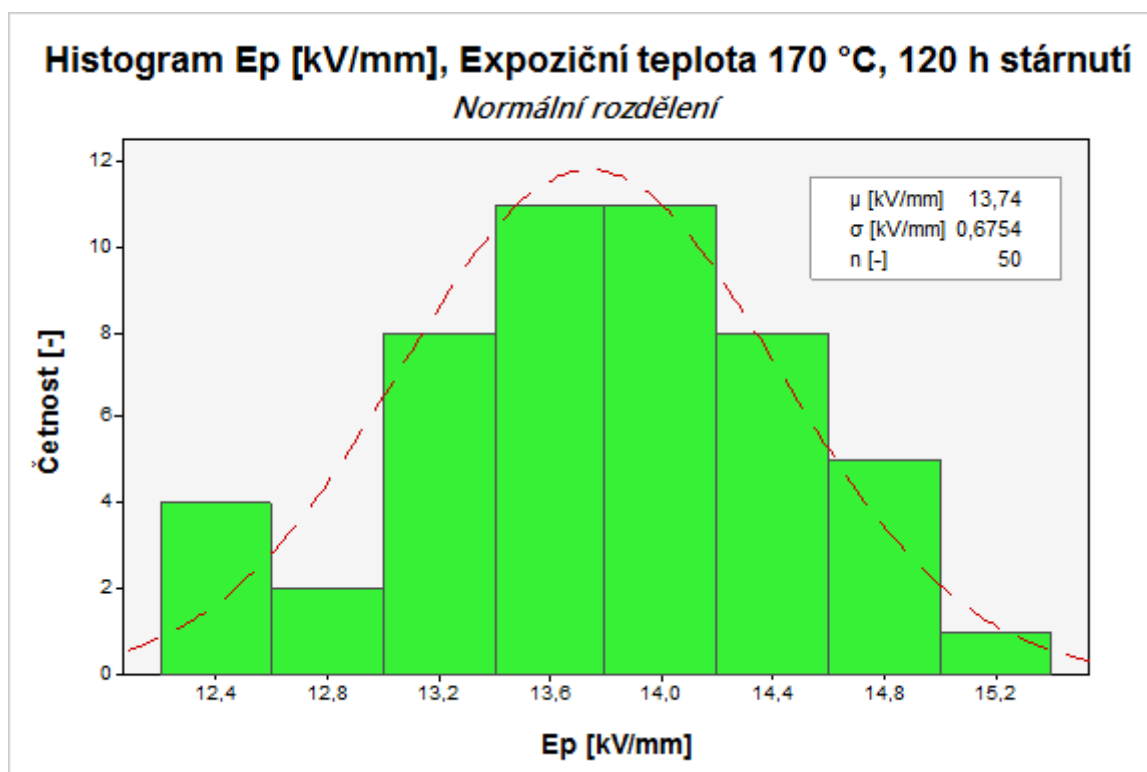
**Obr. P.2.1** Histogram elektrické pevnosti transformátorové lepenky v dodaném stavu



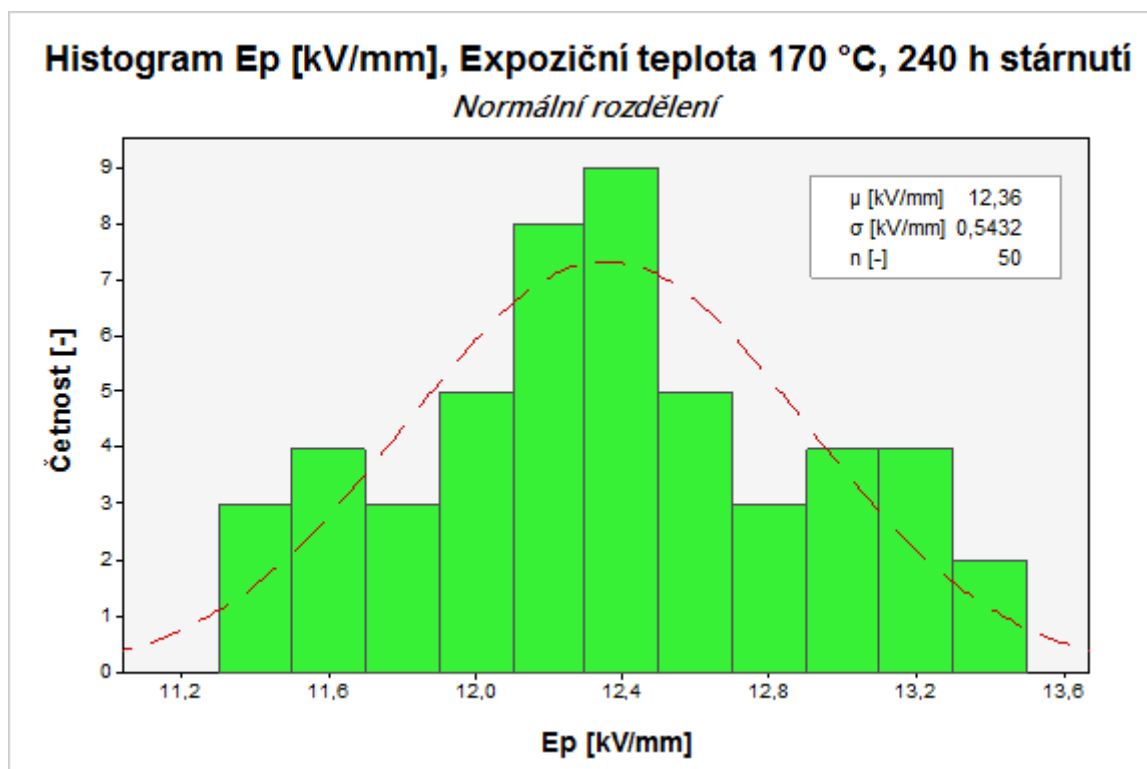
**Obr. P.2.2** Histogram elektrické pevnosti transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 160 °C a 120 hodin stárnutí



**Obr. P.2.3** Histogram elektrické pevnosti transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 160 °C a 240 hodin stárnutí

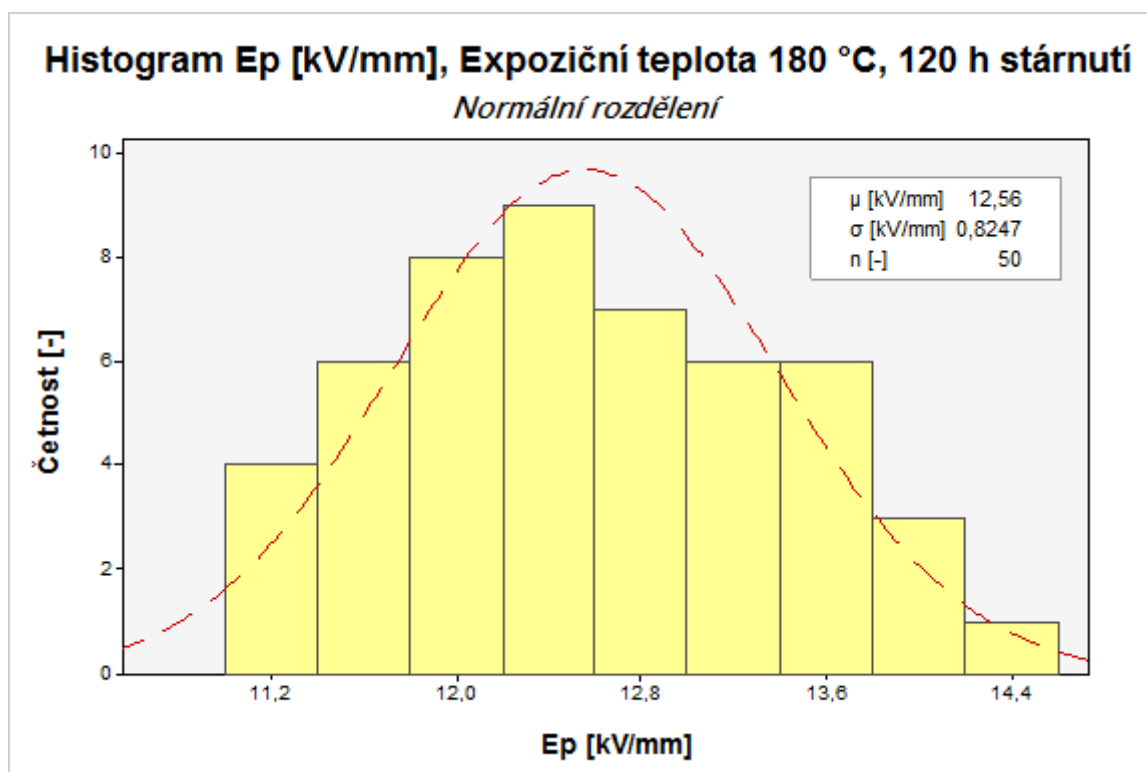


**Obr. P.2.4** Histogram elektrické pevnosti transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 170 °C a 120 hodin stárnutí

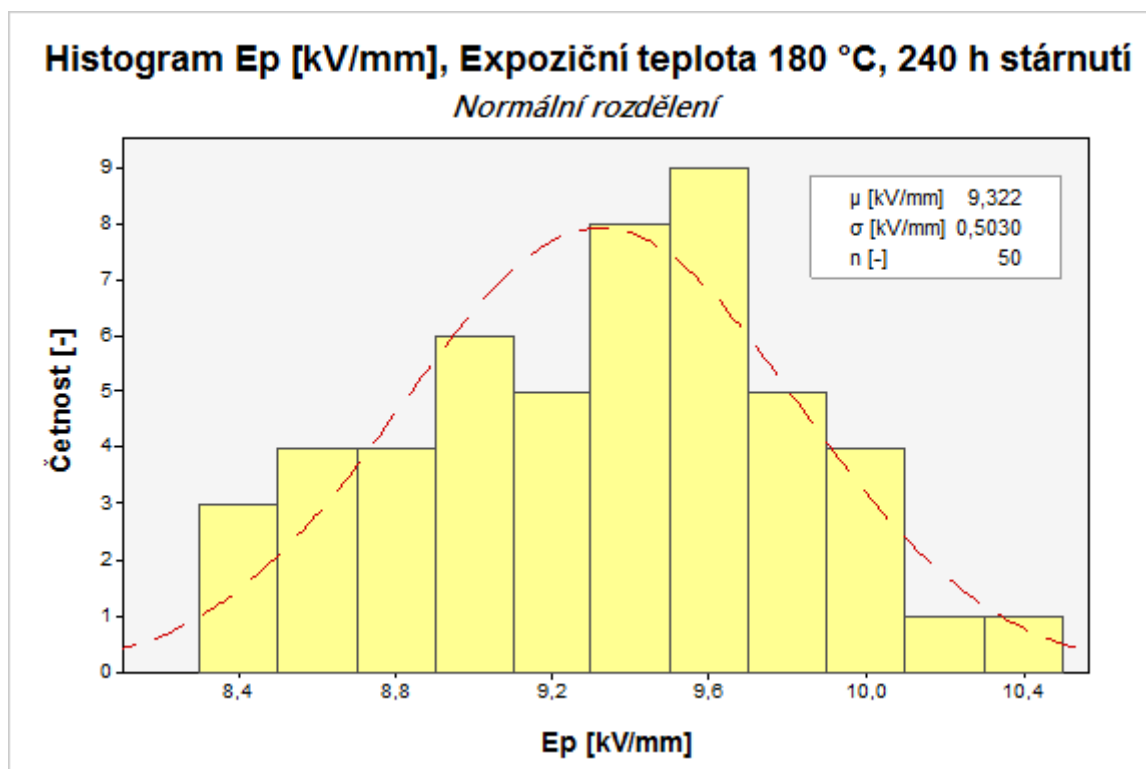


**Obr. P.2.5** Histogram elektrické pevnosti transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 170 °C a 240 hodin stárnutí

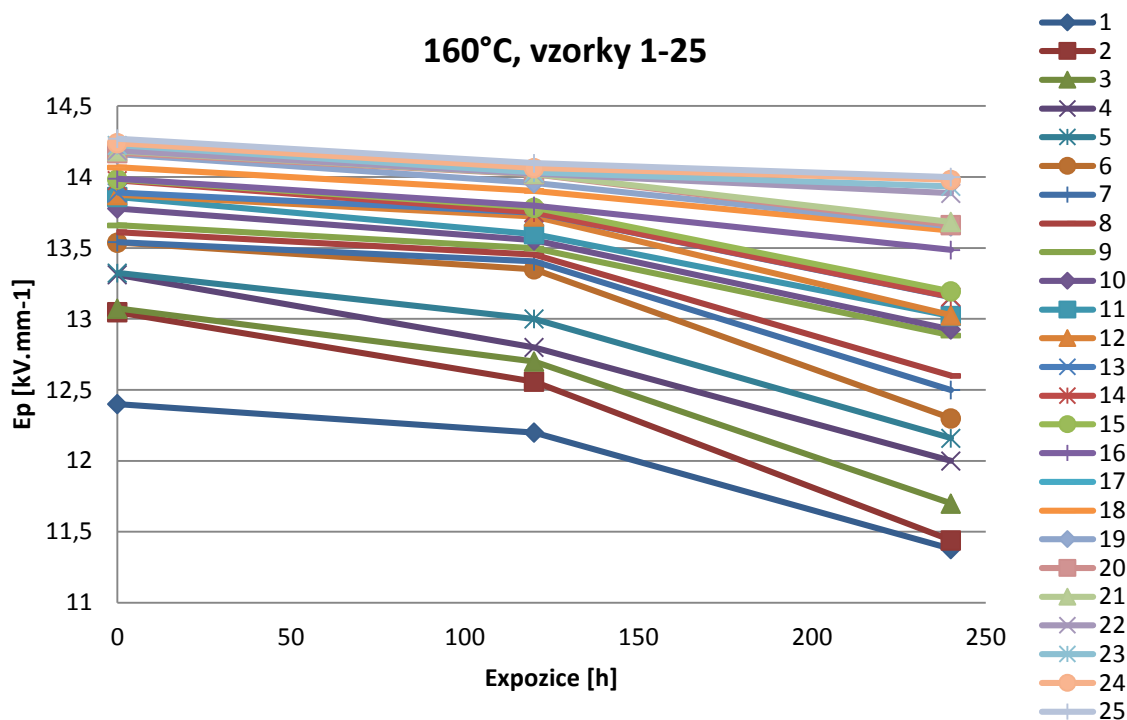




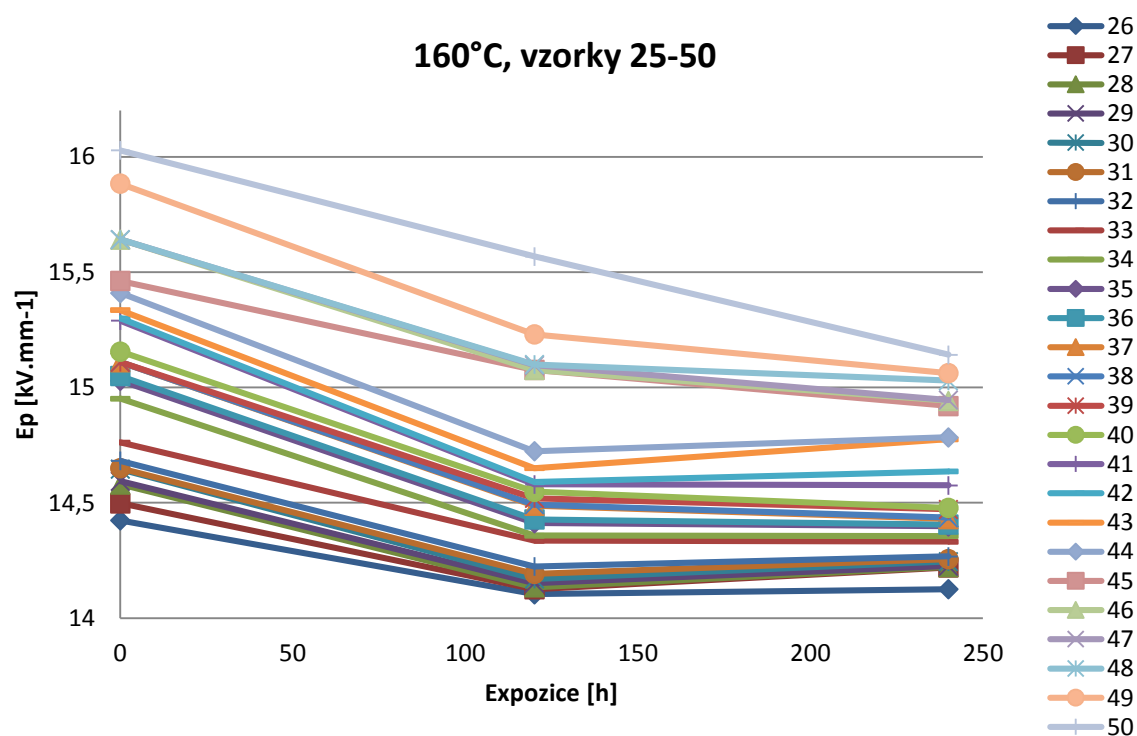
**Obr. P.2.6** Histogram elektrické pevnosti transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 180 °C a 120 hodin stárnutí



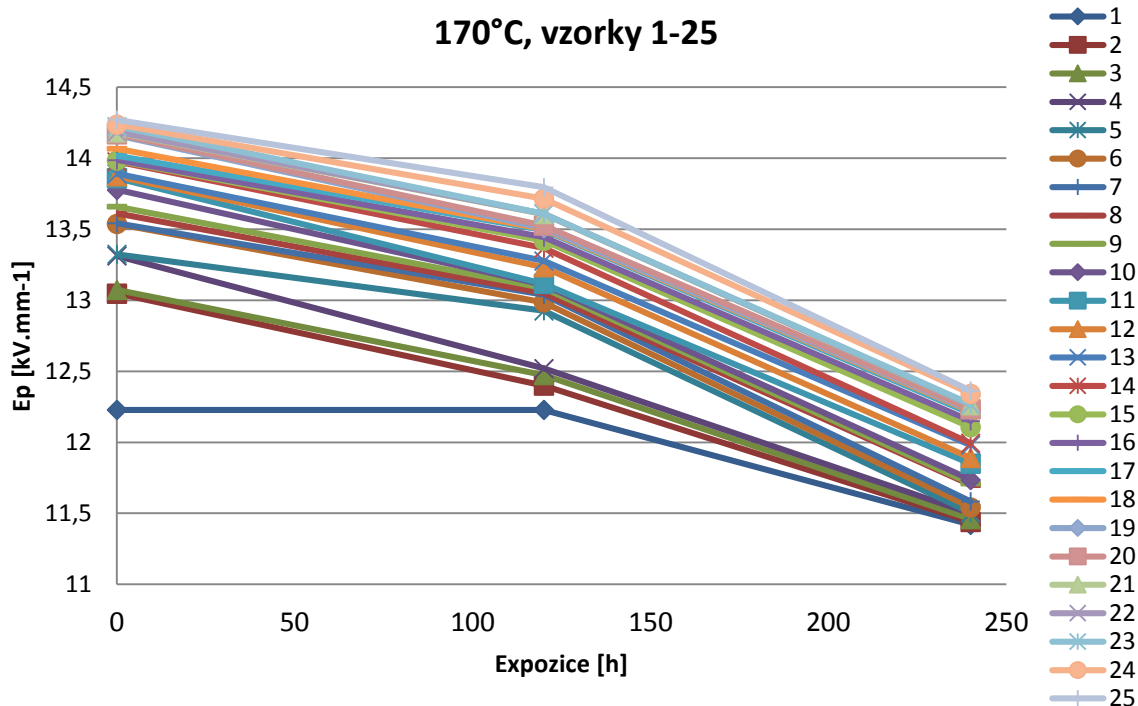
**Obr. P.2.7** Histogram elektrické pevnosti transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 180 °C a 240 hodin stárnutí



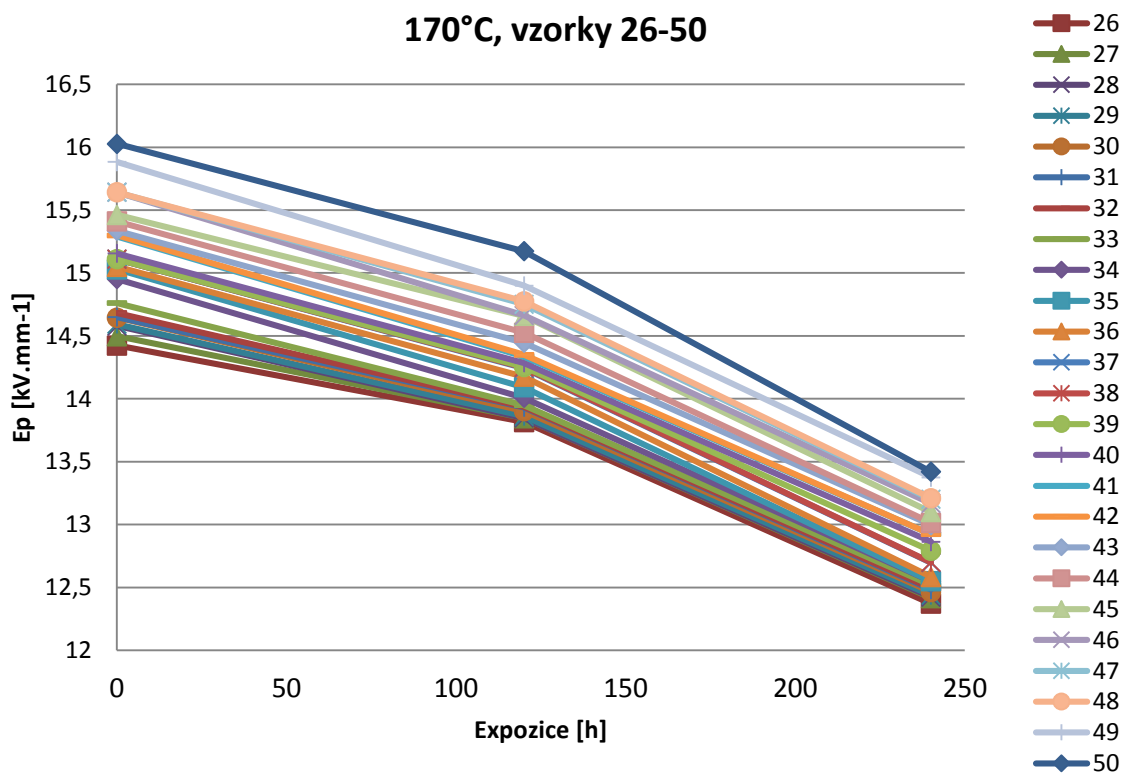
**Obr. P.2.8** Průběh elektrické pevnosti při tepelné expozici 160°C pro vzorky 1-25



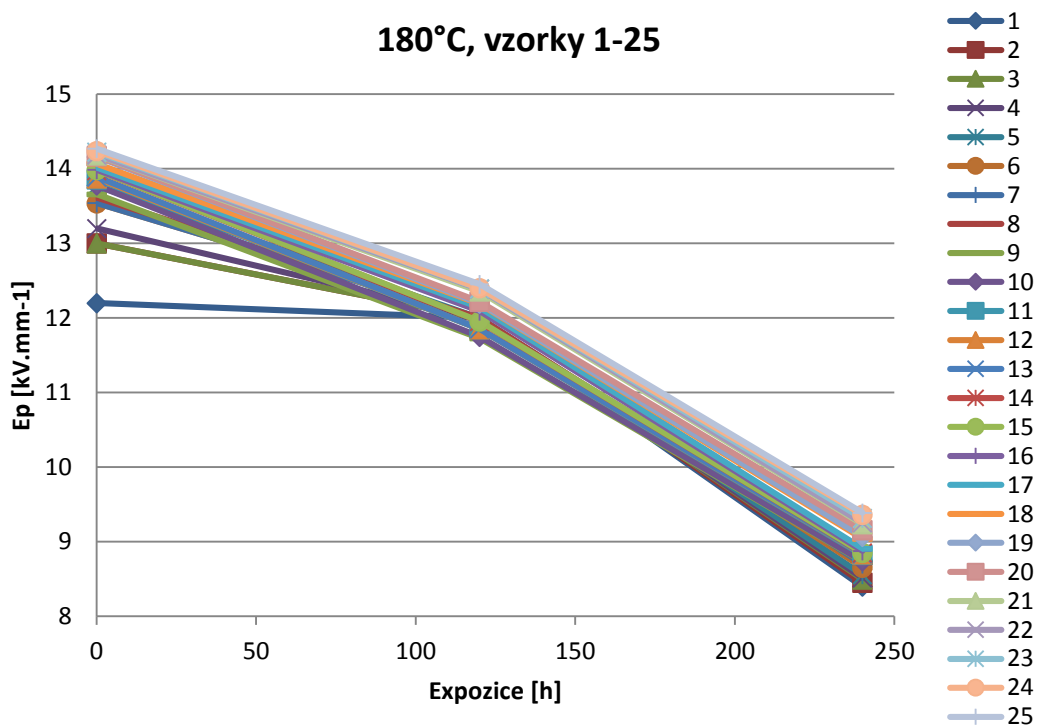
**Obr. P.2.9** Průběh elektrické pevnosti při tepelné expozici 160°C pro vzorky 26-50



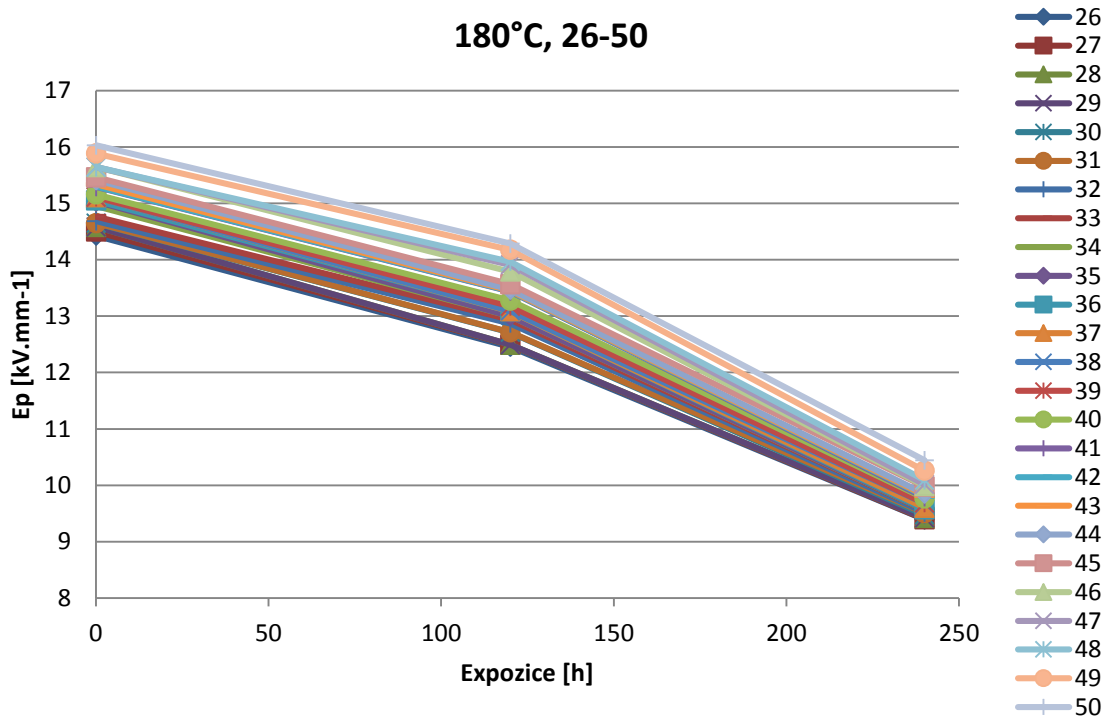
**Obr. P.2.10** Průběh elektrické pevnosti při tepelné expozici 170°C pro vzorky 1-25



**Obr. P.2.11** Průběh elektrické pevnosti při tepelné expozici 170°C pro vzorky 26-50



Obr. P.2.12 Průběh elektrické pevnosti při tepelné expozici 180°C pro vzorky 1-25



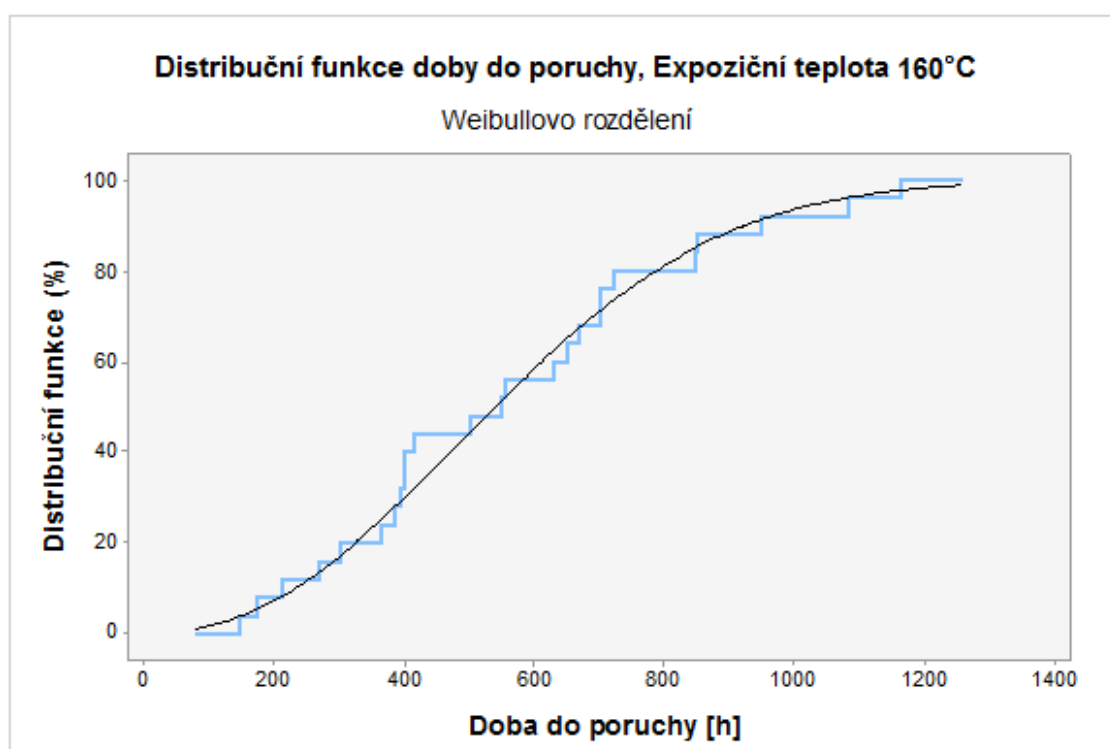
Obr. P.2.13 Průběh elektrické pevnosti při tepelné expozici 180°C pro vzorky 26-50

**Tab. P.2.4** Doby do poruchy pro transformátorovou lepenku při různých expozičních teplotách

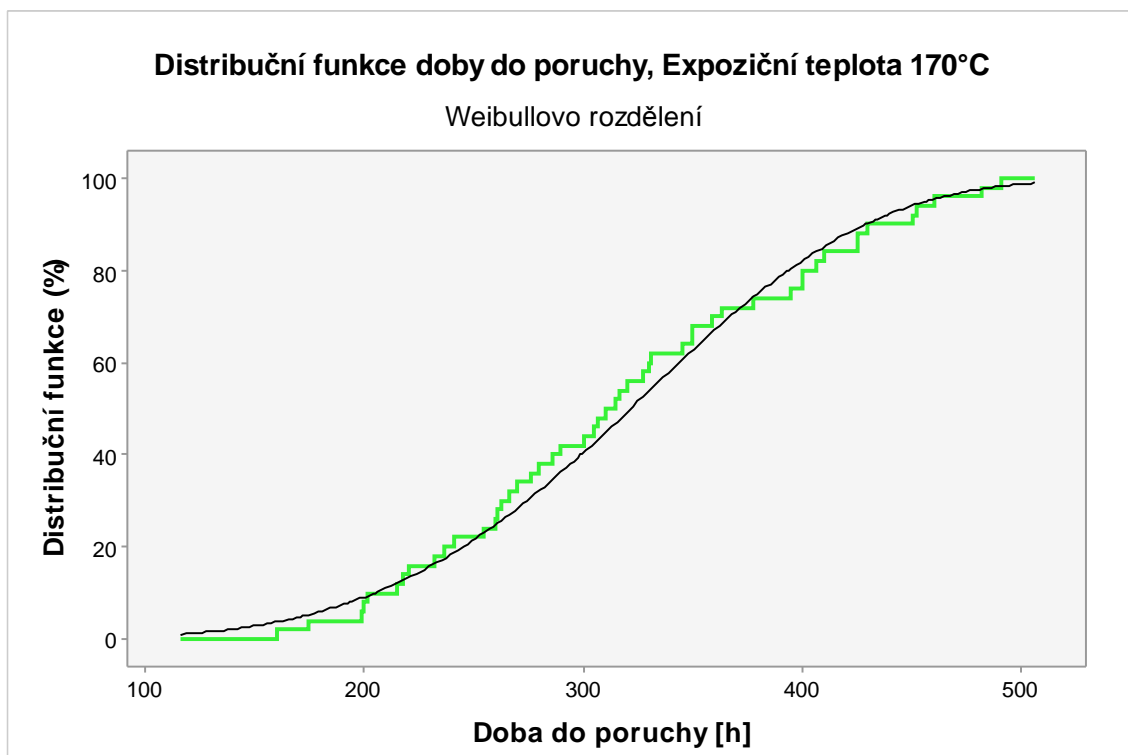
	Číslo poruchy	160°C	170°C	180°C
Doba do poruchy [h]	1	150	160	90
	2	175	175	101
	3	215	199	105
	4	270	200	111
	5	302	202	113
	6	365	215	114
	7	387	218	116
	8	396	221	117
	9	400	232	120
	10	401	237	121
	11	415	241	123
	12	502	255	124
	13	550	260	125
	14	556	261	125
	15	630	263	127
	16	650	266	128
	17	670	270	128
	18	700	276	128
	19	702	280	134
	20	723	286	135
	21	846	290	138
	22	850	300	139
	23	949	305	140
	24	1083	307	140
	25	1161	310	141
	26	-	315	144
	27	-	317	145
	28	-	320	146
	29	-	327	147
	30	-	330	147
	31	-	331	150
	32	-	345	152
	33	-	350	153
	34	-	350	154
	35	-	359	155
	36	-	363	157
	37	-	378	158
	38	-	395	161

	39	-	400	163
	40	-	400	164
	41	-	406	164
	42	-	410	165
	43	-	425	167
	44	-	425	168
	45	-	430	169
	46	-	450	174
	47	-	452	180
	48	-	460	183
	49	-	482	184
	50	-	491	185

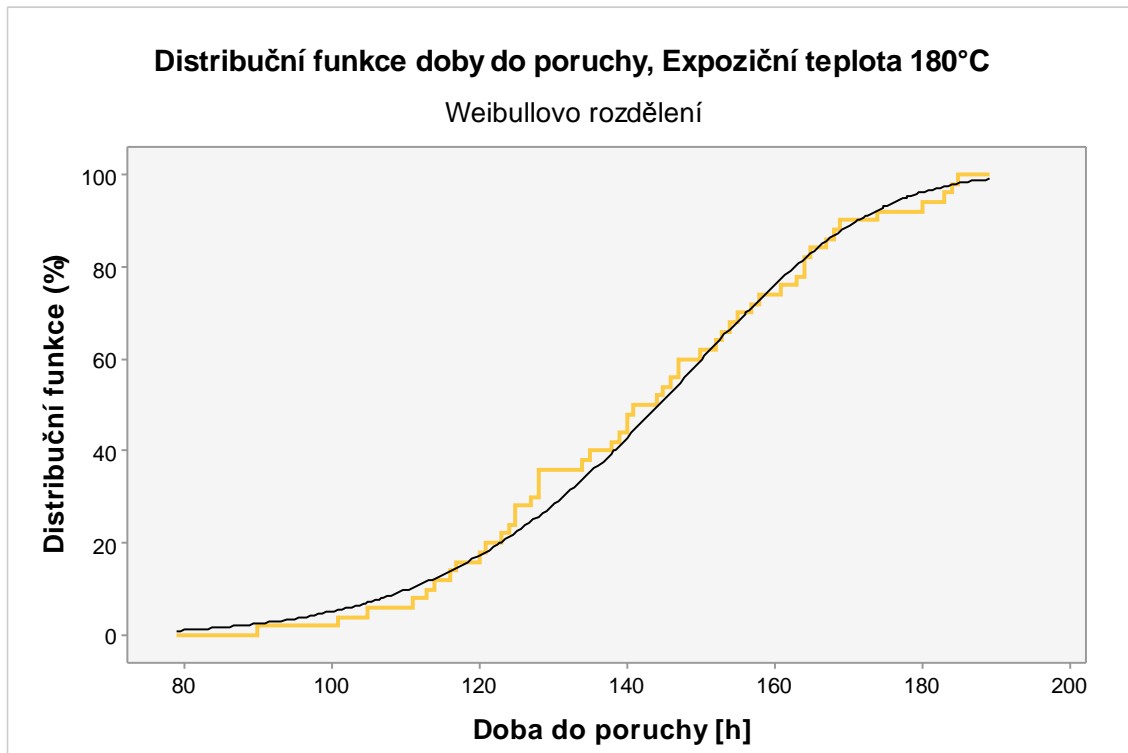
Na obrázcích Obr. P.2.14 až Obr. P.2.16 jsou zobrazeny distribuční funkce Weibullova rozdělení dob do poruchy transformátorové lepenky pro různé úrovně tepelného zatížení.



**Obr. P.2.14** Distribuční funkce Weibullova rozdělení dob do poruchy transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 160 °C



**Obr. P.2.15** *Distribuční funkce Weibullova rozdělení dob do poruchy transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 170 °C*



**Obr. P.2.16** *Distribuční funkce Weibullova rozdělení dob do poruchy transformátorové lepenky pro expoziční teplotu 180 °C*

## Odvození výsledné rovnice pro odhad konstanty $D$ definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů

Následující rovnice (P.2.1) až (P.2.10) popisují detailnější odvození výsledné rovnice pro odhad konstanty  $D$  definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů.

První část modelu pro  $T \in \langle T_{T1}, \infty \rangle$ :

$$\tau(T) = \tau_1 = K_1 \cdot a \cdot \tau_{T1} = K_1 \cdot a \cdot e^{\frac{E_{a1}}{RT}} = a \cdot e^{\frac{E_{a1}}{RT}} \quad (\text{P.2.1})$$

Druhá část modelu pro  $T \in (0, T_{T1})$ :

$$\tau_M(T) = K_M \cdot a \cdot \tau_{TM} = K_M \cdot a \cdot e^{\left(\frac{D}{T}\right)} = a \cdot e^{\left[\left(\frac{E_{a1}}{RT_{T1}}\right) - e^{\left(\frac{D}{T_{T1}}\right)}\right]} e^{\left(\frac{D}{T}\right)} \quad (\text{P.2.2})$$

Zavedení empirického pravidla:

$$M_K \cdot \tau_1(T_{T1} - T_K) = \tau_M(T_{T1} - T_K) \quad (\text{P.2.3})$$

Dosazení rovnic (P.1) a (P.2) do rovnice (P.3):

$$M_K \cdot a \cdot e^{\frac{E_{a1}}{R(T_{T1} - T_K)}} = a \cdot e^{\left[\left(\frac{E_{a1}}{RT_{T1}}\right) - e^{\left(\frac{\hat{D}}{T_{T1}}\right)}\right]} e^{\left(\frac{\hat{D}}{T}\right)} \quad (\text{P.2.4})$$

ř

$$M_K \cdot e^{\frac{E_{a1}}{R(T_{T1} - T_K)}} \cdot e^{-\left(\frac{E_{a1}}{RT_{T1}}\right)} \cdot e^{\left(\frac{\hat{D}}{T_{T1}}\right)} \cdot e^{-e^{\left(\frac{\hat{D}}{(T_{T1} - T_K)}\right)}} = 1 \quad (\text{P.2.5})$$

Zavedení substituce  $S_K$ :

$$S_K = M_K \cdot e^{\frac{E_{a1}}{R(T_{T1} - T_K)}} \cdot e^{-\left(\frac{E_{a1}}{RT_{T1}}\right)} = M_K \cdot e^{\left[\frac{T_{T1} \cdot E_{a1}}{R(T_{T1} - T_K) \cdot T_{T1}} - \frac{(T_{T1} - T_K) \cdot E_{a1}}{R(T_{T1} - T_K) \cdot T_{T1}}\right]} =$$

$$M_K \cdot e^{\left[\frac{E_{a1} \cdot T_K}{R \cdot T_{T1} \cdot (T_{T1} - T_K)}\right]} \quad (\text{P.2.6})$$



Řešení rovnice (P.5) se zavedenou substitucí (P.6):

$$S_K \cdot e^{e^{\left(\frac{\hat{D}}{T_{T1}}\right)}} \cdot e^{-e^{\left(\frac{\hat{D}}{(T_{T1}-T_K)}\right)}} = 1 \quad (\text{P.2.7})$$

$$e^{\left(\frac{\hat{D}}{T_{T1}}\right)} - e^{\left(\frac{\hat{D}}{(T_{T1}-T_K)}\right)} + \ln(S_K) = 0 \quad (\text{P.2.8})$$

$$\sqrt[T_{T1}]{e^{\hat{D}}} - \sqrt[(T_{T1}-T_K)]{e^{\hat{D}}} + \ln(S_K) = 0 \quad (\text{P.2.9})$$

Zpětné dosazení substituce  $S_K$  (P.6) a výsledný tvar rovnice pro výpočet odhadu konstanty  $\hat{D}$  definující synergický účinek dílčích degradačních mechanismů:

$$\sqrt[T_{T1}]{e^{\hat{D}}} - \sqrt[(T_{T1}-T_K)]{e^{\hat{D}}} + \ln\left(M_K \cdot e^{\left[\frac{E_{a1} \cdot T_K}{R \cdot T_{T1} \cdot (T_{T1}-T_K)}\right]}\right) = 0 \quad (\text{P.2.10})$$

### Příloha 3 - Experiment na elektroizolačních kapalinách

Číselné hodnoty elektrických parametrů zkoumaných elektroizolačních kapalin měřených při 90°C při různých expozičních teplotách shrnují tabulky Tab. P.3.1 až Tab. P.3.8.

V příloze 3 jsou dále zobrazeny průběhy ztrátového činitele experimentálních elektroizolačních kapalin měřených při 90°C na expozičních teplotách 110°C, 140°C, 160°C a 180°C, viz Obr. P.3.1 až Obr. P.3.8.

**Tab. P.3.1** Hodnoty elektrických parametrů pro různé úrovně tepelného zatížení pro olej MIDEL 7131

MIDEL 7131				
		tg $\delta$ [-], měřeno při 90°C	$\rho_v$ [ $\Omega\text{cm}$ ], měřeno při 90°C	$\epsilon_r$ [-], měřeno při 90°C
Expozice [°C]	Dodaný stav	0,00597	$5,68 \cdot 10^{12}$	3,015
	110°C	0,10707, 9672 hodin stárnutí	$1,44 \cdot 10^{11}$ , 9672 hodin stárnutí	3,005, 9672 hodin stárnutí
	140°C	0,11135, 1056 hodin stárnutí	$1,25 \cdot 10^{11}$ , 1056 hodin stárnutí	2,946, 1056 hodin stárnutí
	160°C	0,09657, 840 hodin stárnutí	$1,52 \cdot 10^{11}$ , 840 hodin stárnutí	2,981, 840 hodin stárnutí
	180°C	0,20725, 336 hodin stárnutí	$6,48 \cdot 10^{10}$ , 336 hodin stárnutí	3,0572, 336 hodin stárnutí

**Tab. P.3.2** Hodnoty elektrických parametrů pro různé úrovně tepelného zatížení pro olej MIDELE EN

MIDEL EN				
		tg δ [-], měřeno při 90°C	$\rho_v$ [ $\Omega\cdot\text{cm}$ ], měřeno při 90°C	$\epsilon_r$ [-], měřeno při 90°C
Expozice [°C]	Dodaný stav	0,006865	$1,95\cdot 10^{12}$	2,868
	110°C	0,04851, 4080 hodin stárnutí	$3,07\cdot 10^{11}$ , 4080 hodin stárnutí	2,940, 4080 hodin stárnutí
	140°C	0,0605, 1248 hodin stárnutí	$2,56\cdot 10^{11}$ , 1248 hodin stárnutí	2,867, 1248 hodin stárnutí
	160°C	0,05965, 840 hodin stárnutí	$2,35\cdot 10^{11}$ , 840 hodin stárnutí	2,850, 840 hodin stárnutí
	180°C	0,10246, 336 hodin stárnutí	$1,14\cdot 10^{11}$ , 336 hodin stárnutí	3,278, 336 hodin stárnutí

**Tab. P.3.3** Hodnoty elektrických parametrů pro různé úrovně tepelného zatížení pro olej ZEROL/NIVOL

ZEROL/NIVOL				
		tg δ [-], měřeno při 90°C	$\rho_v$ [ $\Omega\cdot\text{cm}$ ], měřeno při 90°C	$\epsilon_r$ [-], měřeno při 90°C
Expozice [°C]	Dodaný stav	0,02065	$1,02\cdot 10^{12}$	2,946
	110°C	0,04581, 9552 hodin stárnutí	$5,46\cdot 10^{11}$ , 9552 hodin stárnutí	2,836, 9552 hodin stárnutí
	140°C	0,04881, 1632 hodin stárnutí	$4,02\cdot 10^{11}$ , 1632 hodin stárnutí	2,879, 1632 hodin stárnutí
	160°C	0,13640, 840 hodin stárnutí	$1,31\cdot 10^{11}$ , 840 hodin stárnutí	2,802, 840 hodin stárnutí
	180°C	0,95, 336 hodin stárnutí	$1,41\cdot 10^{10}$ , 336 hodin stárnutí	3,100, 336 hodin stárnutí

**Tab. P.3.4** Hodnoty elektrických parametrů pro různé úrovně tepelného zatížení pro olej Shell DIALA DX

Shell DIALA DX				
		tg $\delta$ [-], měřeno při 90°C	$\rho_v$ [ $\Omega\cdot\text{cm}$ ], měřeno při 90°C	$\epsilon_r$ [-], měřeno při 90°C
Expozice [°C]	Dodaný stav	0,00298	$2,68 \cdot 10^{13}$	2,115
	110°C	0,04089, 9504 hodin stárnutí	$4,48 \cdot 10^{11}$ , 9504 hodin stárnutí	2,140, 9504 hodin stárnutí
	140°C	0,0152, 1056 hodin stárnutí	$1,58 \cdot 10^{11}$ , 1056 hodin stárnutí	2,109, 1056 hodin stárnutí
	160°C	0,01552, 840 hodin stárnutí	$1,65 \cdot 10^{12}$ , 840 hodin stárnutí	2,134, 840 hodin stárnutí
	180°C	0,15183, 336 hodin stárnutí	$1,75 \cdot 10^{11}$ , 336 hodin stárnutí	2,469, 336 hodin stárnutí

**Tab. P.3.5** Hodnoty elektrických parametrů pro různé úrovně tepelného zatížení pro čistý řepkový olej

Řepkový olej čistý				
		tg $\delta$ [-], měřeno při 90°C	$\rho_v$ [ $\Omega\cdot\text{cm}$ ], měřeno při 90°C	$\epsilon_r$ [-], měřeno při 90°C
Expozice [°C]	Dodaný stav	0,01667	$7,65 \cdot 10^{11}$	3,095
	110°C	0,02713, 6432 hodin stárnutí	$6,52 \cdot 10^{11}$ , 6432 hodin stárnutí	2,864, 6432 hodin stárnutí
	140°C	0,0411, 1632 hodin stárnutí	$3,32 \cdot 10^{11}$ , 1632 hodin stárnutí	2,790, 1632 hodin stárnutí
	160°C	0,14749, 840 hodin stárnutí	$7,21 \cdot 10^{10}$ , 840 hodin stárnutí	3,488, 840 hodin stárnutí
	180°C	0,13882, 336 hodin stárnutí	$7,57 \cdot 10^{10}$ , 336 hodin stárnutí	3,568, 336 hodin stárnutí

**Tab. P.3.6** Hodnoty elektrických parametrů pro různé úrovně tepelného zatížení pro inhibovaný řepkový olej

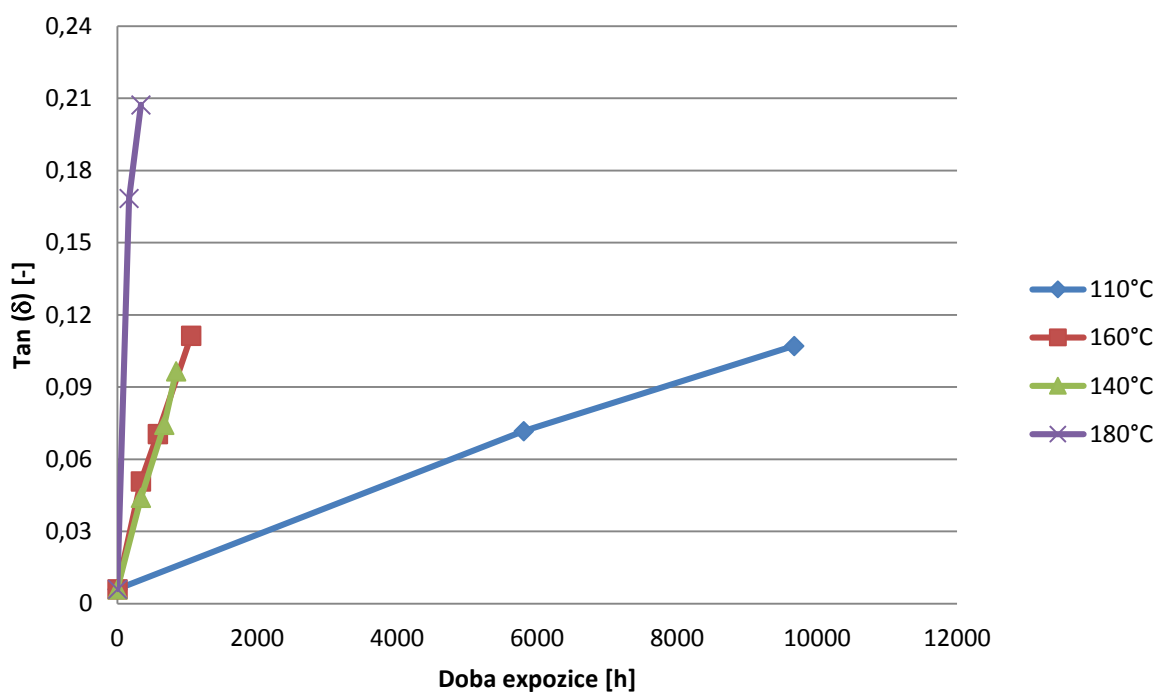
Řepkový olej + inhibitor				
		tg $\delta$ [-], měřeno při 90°C	$\rho_v$ [ $\Omega\cdot\text{cm}$ ], měřeno při 90°C	$\epsilon_r$ [-], měřeno při 90°C
Expozice [°C]	Dodaný stav	0,01437	$9,45 \cdot 10^{11}$	2,891
	110°C	0,03811, 6672 hodin stárnutí	$3,55 \cdot 10^{11}$ , 6672 hodin stárnutí	2,864, 6672 hodin stárnutí
	140°C	0,05095, 1632 hodin stárnutí	$2,66 \cdot 10^{11}$ , 1632 hodin stárnutí	2,807, 1632 hodin stárnutí
	160°C	0,08234, 840 hodin stárnutí	$1,5 \cdot 10^{11}$ , 840 hodin stárnutí	2,974, 840 hodin stárnutí
	180°C	0,10358, 336 hodin stárnutí	$1,06 \cdot 10^{11}$ , 336 hodin stárnutí	3,393, 336 hodin stárnutí

**Tab. P.3.7** Hodnoty elektrických parametrů pro různé úrovně tepelného zatížení pro čistý slunečnicový olej

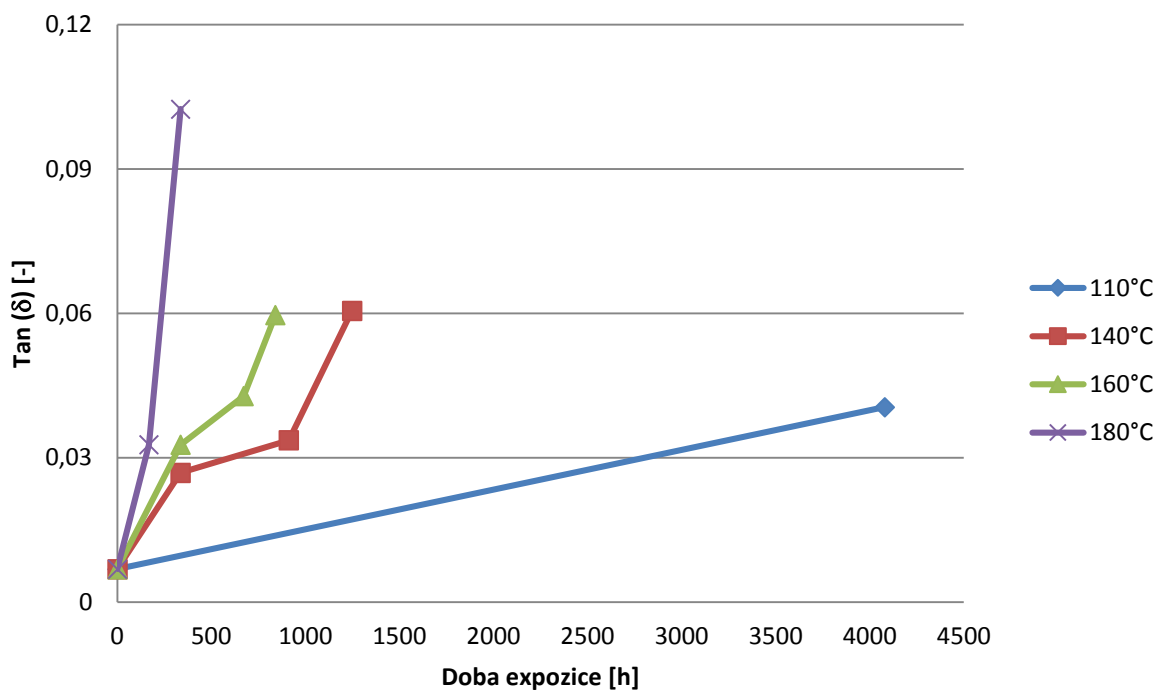
Slunečnicový olej čistý				
		tg $\delta$ [-], měřeno při 90°C	$\rho_v$ [ $\Omega\cdot\text{cm}$ ], měřeno při 90°C	$\epsilon_r$ [-], měřeno při 90°C
Expozice [°C]	Dodaný stav	0,02343	$5,10 \cdot 10^{11}$	3,482
	110°C	0,03172, 6312 hodin stárnutí	$6,43 \cdot 10^{11}$ , 6312 hodin stárnutí	2,899, 6312 hodin stárnutí
	140°C	0,01599, 1632 hodin stárnutí	$1,00 \cdot 10^{12}$ , 1632 hodin stárnutí	3,015, 1632 hodin stárnutí
	160°C	0,04749, 840 hodin stárnutí	$2,40 \cdot 10^{11}$ , 840 hodin stárnutí	3,294, 840 hodin stárnutí
	180°C	0,06360, 336 hodin stárnutí	$1,75 \cdot 10^{11}$ , 336 hodin stárnutí	3,402, 336 hodin stárnutí

**Tab. P.3.8** Hodnoty elektrických parametrů pro různé úrovně tepelného zatížení pro inhibovaný slunečnicový olej

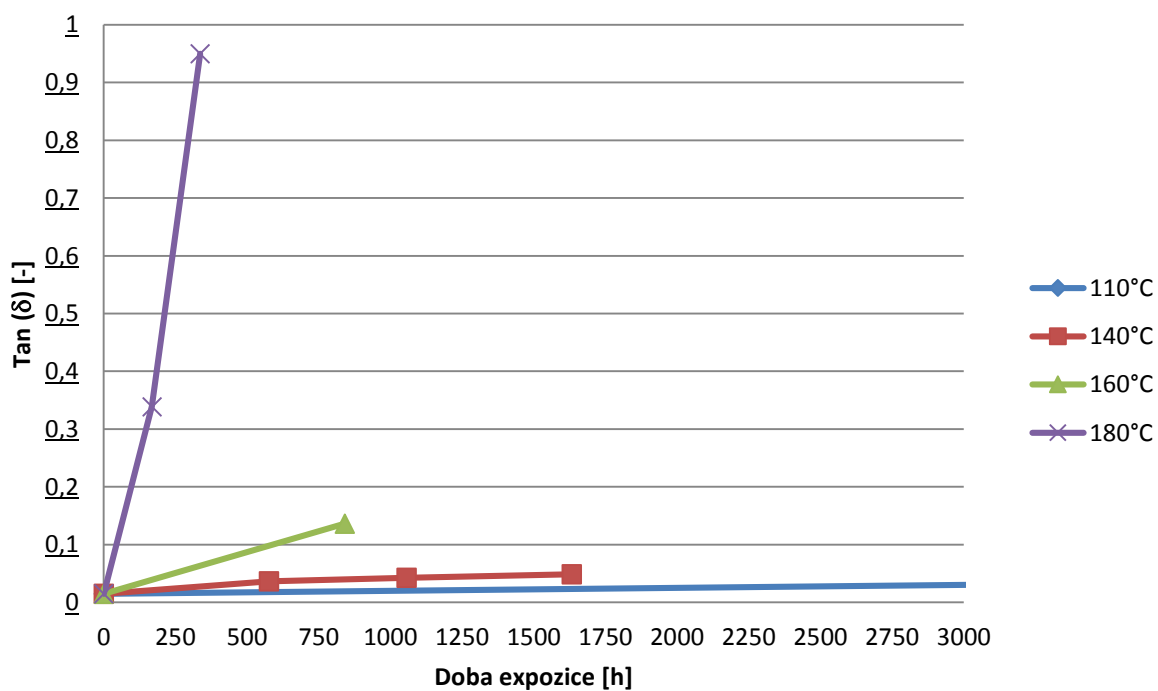
Slunečnicový olej + inhibitor				
		tg δ [-], měřeno při 90°C	$\rho_v$ [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ], měřeno při 90°C	$\epsilon_r$ [-], měřeno při 90°C
Expozice [°C]	Dodaný stav	0,01423	$1,03 \cdot 10^{12}$	2,862
	110°C	0,03295, 6552 hodin stárnutí	$4,67 \cdot 10^{11}$ , 6552 hodin stárnutí	2,874, 6552 hodin stárnutí
	140°C	0,03213, 1632 hodin stárnutí	$4,31 \cdot 10^{11}$ , 1632 hodin stárnutí	2,901, 1632 hodin stárnutí
	160°C	0,03613, 840 hodin stárnutí	$3,22 \cdot 10^{11}$ , 840 hodin stárnutí	$3,23210^{11}$ , 840 hodin stárnutí
	180°C	0,1053, 336 hodin stárnutí	$1,01 \cdot 10^{11}$ , 336 hodin stárnutí	$3,527^1$ , 336 hodin stárnutí



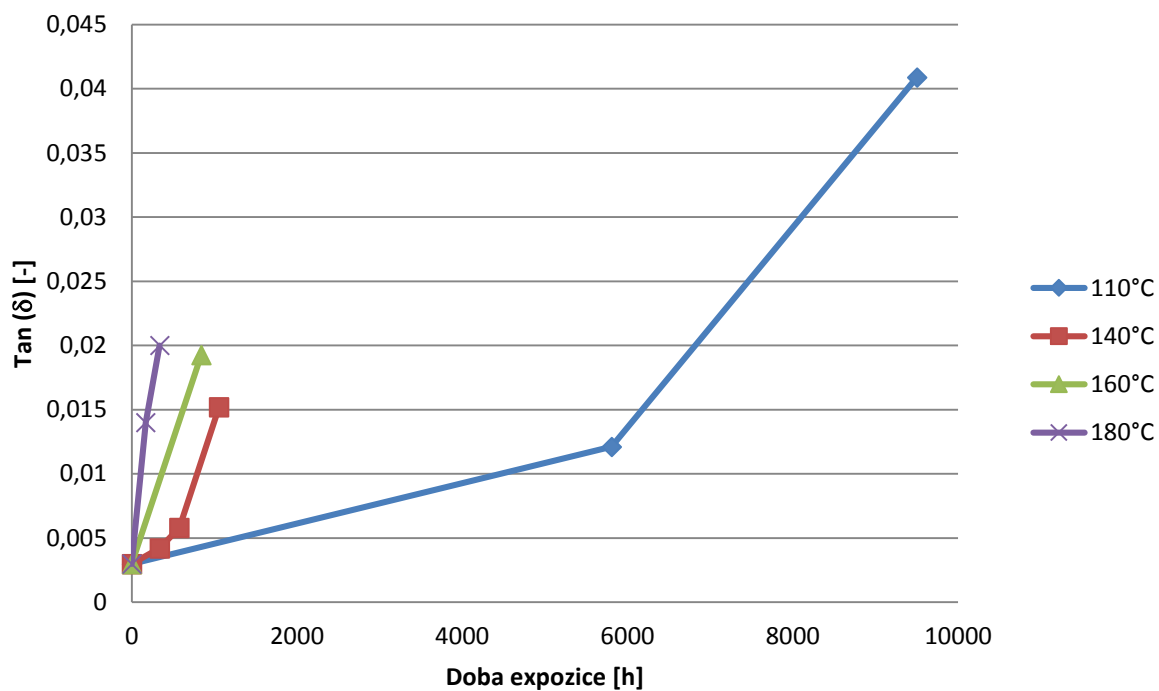
**Obr. P.3.1** Průběh ztrátového činitele měřeného při 90°C pro různé úrovně tepelného zatížení pro olej MIDEL 7131



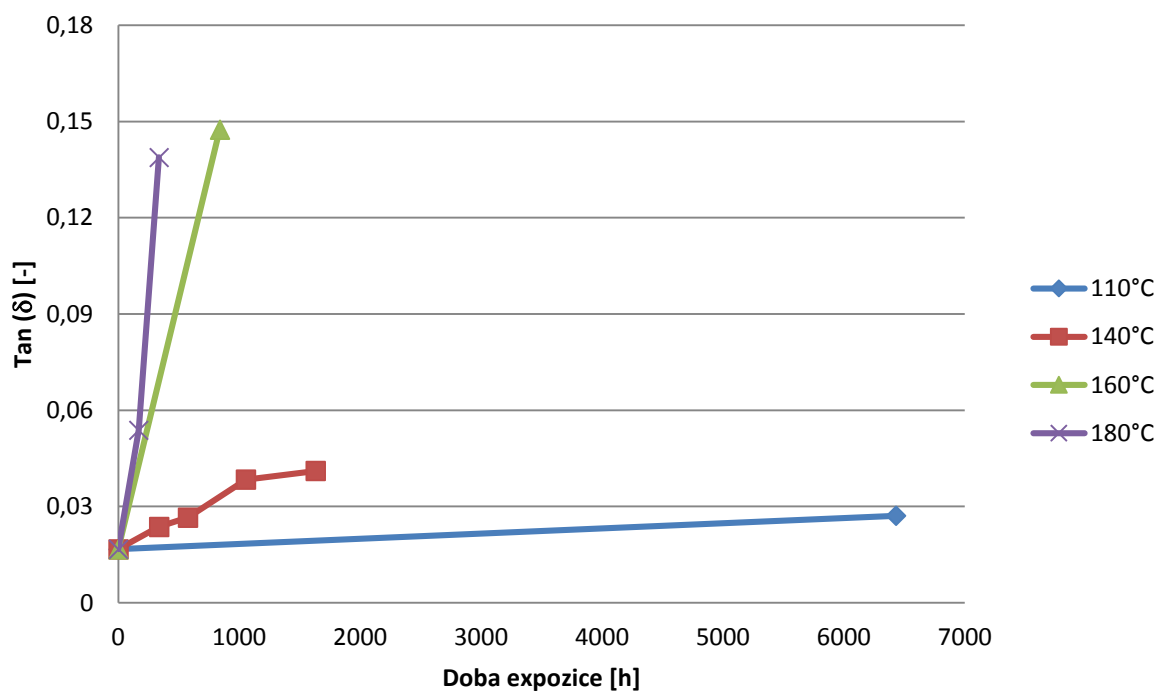
**Obr. P.3.2** Průběh ztrátového činitele měřeného při 90°C pro různé úrovně tepelného zatížení pro olej MDEL EN



**Obr. P.3.3** Průběh ztrátového činitele měřeného při 90°C pro různé úrovně tepelného zatížení pro olej ZEROL/NIVOL

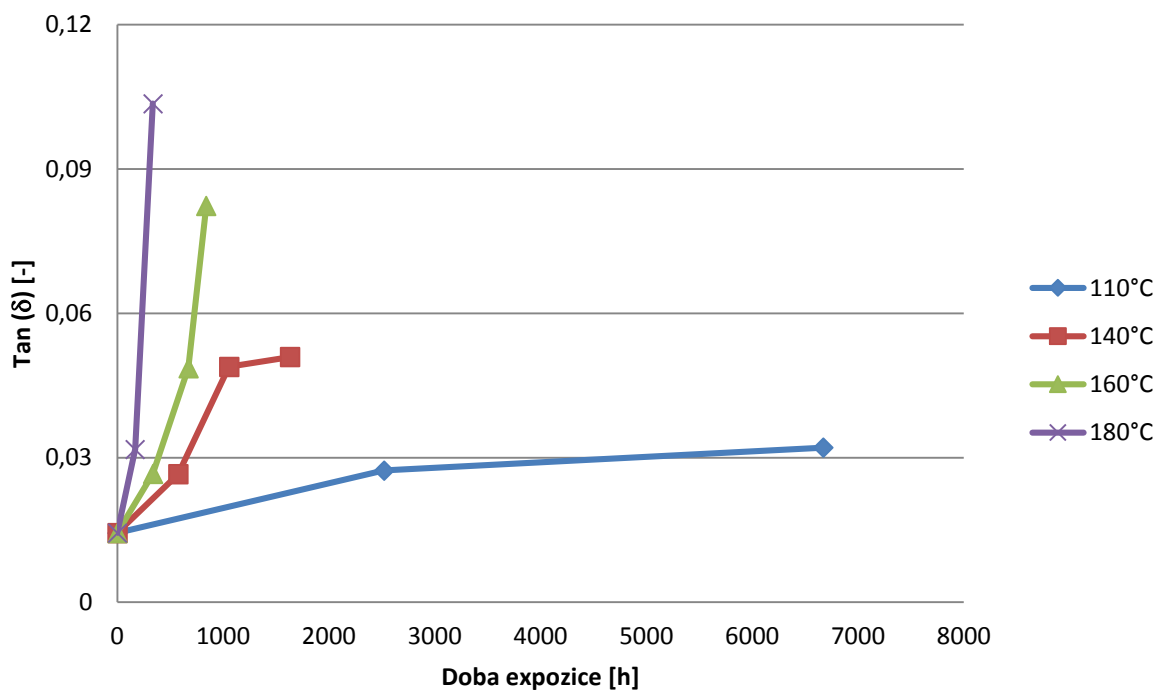


**Obr. P.3.4** Průběh ztrátového činitele měřeného při 90°C pro různé úrovně tepelného zatížení pro olej Shell DIALA DX

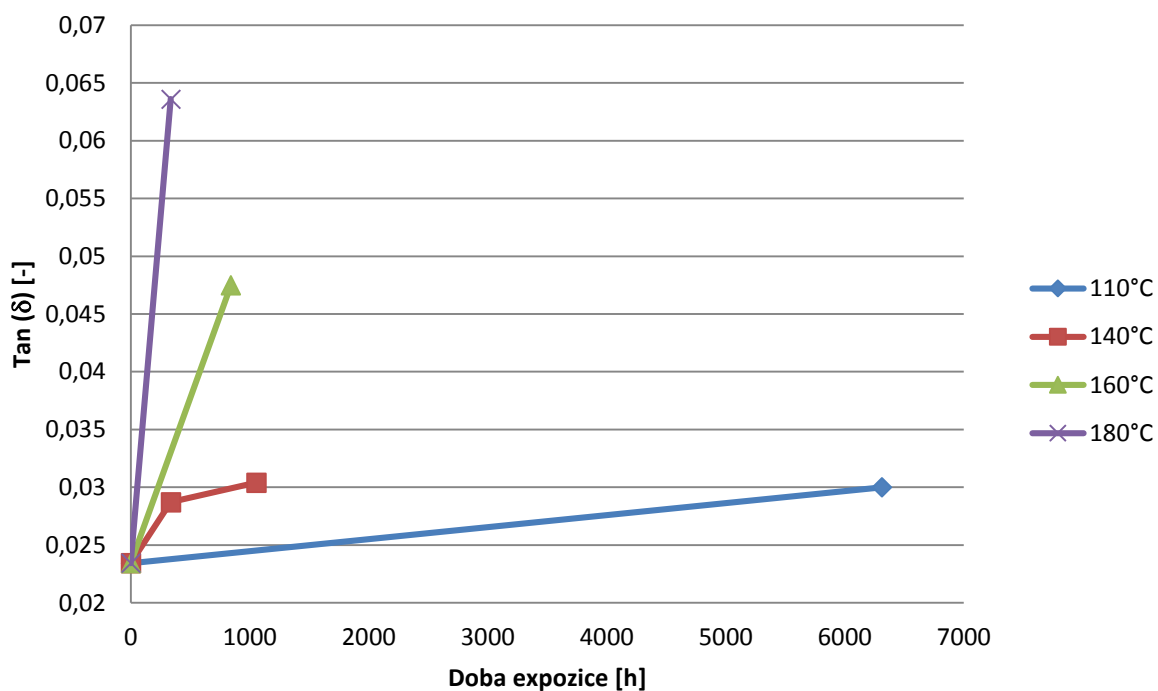


**Obr. P.3.5** Průběh ztrátového činitele měřeného při 90°C pro různé úrovně tepelného zatížení pro čistý řepkový olej

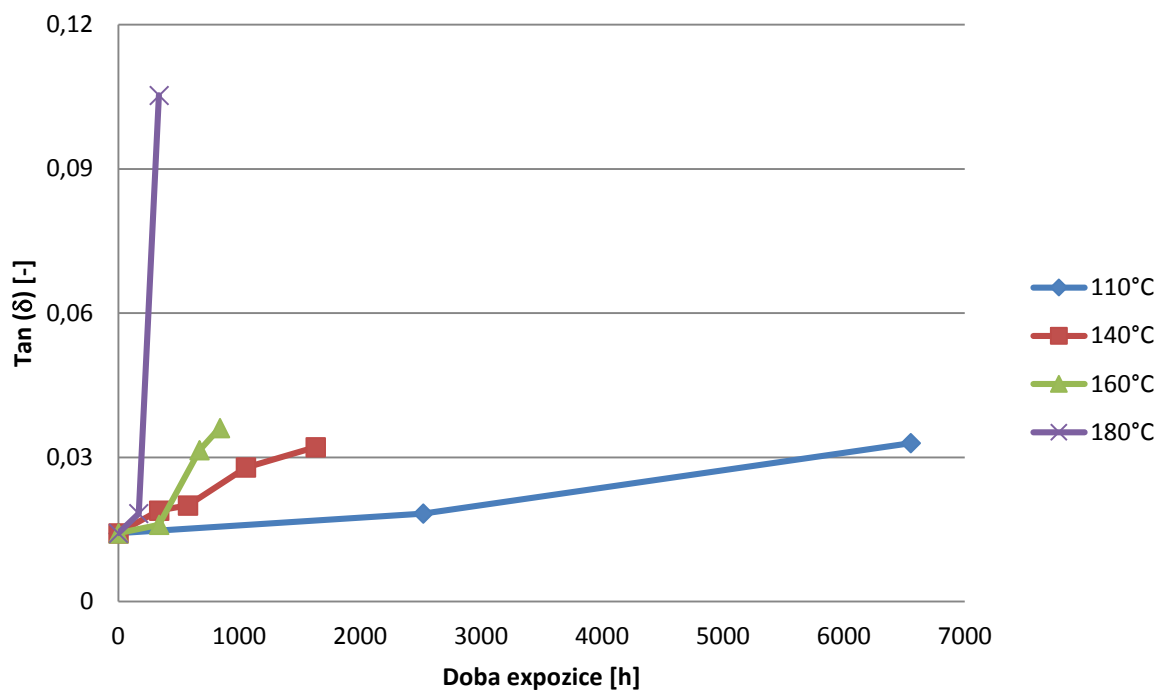




**Obr. P.3.6** Průběh ztrátového činitele měřeného při 90°C pro různé úrovně tepelného zatížení pro inhibovaný řepkový olej



**Obr. P.3.7** Průběh ztrátového činitele měřeného při 90°C pro různé úrovně tepelného zatížení pro čistý slunečnicový olej



**Obr. P.3.8** Průběh ztrátového činitele měřeného při 90°C pro různé úrovně tepelného zatížení pro inhibovaný slunečnicový olej