

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

**Katedra technologií a měření**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Využití statistických nástrojů při analýze  
degradačních mechanismů elektroizolačních  
materiálů

vedoucí: Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.

autor: Bc. Tomáš Jehlička

2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš JEHLIČKA**  
Osobní číslo: **E11N0116P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Využití statistických nástrojů při analýze degradačních mechanismů elektroizolačních materiálů**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište fyzikální principy degradace elektroizolačních materiálů
2. Popište využití statistických nástrojů pro práci s naměřenými daty
3. Provedte vyhodnocení dob do průrazu pomocí statistických rozdělání
4. Vypracujte návrh postupu pro vyhodnocování naměřených dat
5. Zhodnoťte vhodnost jednotlivých přístupů pro analýzu degradačních mechanismů

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


1. Mentlík V., Trnka P., Trnková M., Šašek L., Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN, 2011, 120 s., ISBN 978-80-7300-412-5.
2. Internetové zdroje, IEEE
3. Mentlík, V., Polanský, R., Pihera, J., Prosr, P., Trnka, P.: Diagnostika elektrických zařízení, ISBN 978-80-7300-232-9, BEN technická literatura Praha 2008.

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

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Anotace**

Tato práce pojednává o degradačních vlivech na elektroizolační materiály. Je zde uveden jejich teoretický rozbor a popsán mechanismus, jenž negativně ovlivňuje jejich vlastnosti. Dále jsou zde uvedeny postupy zkoušení elektroizolačních vlastností těchto materiálů a je zde vysvětlen princip zrychleného teplotního stárnutí s využitím Arrheniovy rovnice. Statistická metoda Weibullova rozdělení, která je použita při vyhodnocování výsledků zkoušek těchto materiálů je zde popsána teoreticky a následně použita na konkrétních datech. V závěru je zhodnocena vhodnost použití této metody v porovnání s jinými statistickými metodami.

## **Klíčová slova**

Elektroizolační systém, elektroizolační materiály, degradační vlivy, elektrická pevnost, elektrické stárnutí, elektrický průraz, tepelné stárnutí, tepelný průraz, mechanické stárnutí, ztrátový činitel, doba do průrazu, zrychlené stárnutí, Weibullovo rozdělení

## **Abstract**

This thesis deals with the effects of degradation on electrical insulating materials. There is mentioned a theoretical analysis and described a mechanism negatively affects their qualities. Furthermore, there are described procedures for testing the electrical insulation and there is explained a principle of accelerated aging using the Arrhenius equation. Weibull distribution which is used in evaluating the results of tests of these materials is described theoretically and then applied to specific data. The suitability of this method is valorized and compared with other statistical methods in the conclusion.

## **Key words**

Electrical insulating system, electrical insulation, degradation effects, dielectric strength, electrical aging, dielectric breakdown, thermal aging, thermal breakdown, mechanical aging, dissipation factor, the time to breakdown, accelerated aging, Weibull distribution

## **Prohlášení**

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

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

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

V Plzni dne 12.5.2014

Jméno a příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za poskytnuté informace a možnost věnovat se této problematice.

---

## Obsah

Seznam použitých symbolů a značek .....	9
1 Degradací mechanismy u elektroizolačních materiálů .....	11
1.1 Elektrická pevnost.....	11
1.2 EIS a EIM .....	12
1.3 Tepelné stárnutí a tepelný průraz.....	13
1.4 Elektrické stárnutí a elektrický průraz .....	14
1.5 Mechanické stárnutí .....	16
1.6 Ostatní degradační vlivy .....	16
2 Zrychlené stárnutí zvýšenou teplotou a zkoušení vzorků.....	18
2.1 Metoda zrychleného stárnutí.....	18
2.2 Měření doby do průrazu.....	23
2.3 Měření ztrátového činitele .....	25
3 Statistické metody pro vyhodnocování degradačních vlivů .....	29
3.1 Statistické zpracování pomocí Weibullova rozdělení.....	30
3.2 Dvouparametrické Weibullovo rozdělení.....	31
3.3 Odhad parametrů Weibullova rozdělení .....	32
4 Vyhodnocení naměřených dat .....	34
5 Závěr.....	39
Seznam literatury .....	41
Seznam grafů, tabulek a obrázků.....	42
Seznam příloh.....	43
Přílohy .....	44



---

## Úvod

Elektroizolační materiály tvoří nedílnou součást všech elektrických zařízení. Na jejich vlastnosti jsou kladeny vysoké nároky. Tyto vlastnosti s přihlédnutím k provozním podmínkám budoucího elektrického zařízení jsou hlavním kritériem při výběru typu elektroizolačního materiálu.

V první kapitole této práce jsou obecně představeny degradační vlivy na dielektrické materiály. Jaké strukturální změny v materiálu působí teplotní, mechanické, elektrické a další provozní vlivy. Při návrhu elektrického zařízení je nutné si uvědomit pro jaké prostředí je dané zařízení konstruováno a jaké nežádoucí vlivy budou ovlivňovat vlastnosti elektroizolačního systému.

Tak, aby bylo možné zkonstruovat elektrické zařízení vyhovující parametrům daného provozního prostředí, je nejprve nutné vhodným postupem navrhnout a odzkoušet každý jednotlivý prvek systému. To je obsahem druhé kapitoly této práce. Zde je uveden teoretický rozbor přípravy zkušebních vzorků pomocí zrychleného stárnutí zvýšenou teplotou a objasněny principy destruktivních a nedestruktivních zkoušek elektroizolačních materiálů.

Ve třetí kapitole je popsáno Weibullovo rozdělení, jako statistická metoda využívaná pro hodnocení spolehlivosti a bezporuchovosti jednotlivých komponent. Je zde objasněn princip odhadu parametrů daného rozdělení a jejich vliv na výslednou interpretaci požadovaných závěrů.

Obsahem poslední klíčové kapitoly je statistické vyhodnocení naměřených dat. Je zde uveden odhad parametrů Weibullova rozdělení pro konkrétní hodnoty a jejich grafické znázornění. Pro toto zpracování budou použita data ze souboru náhodně vygenerovaných dat reprezentujících doby do průrazu při různých úrovních zatížení zkušebním. V závěru je poté zhodnocena vhodnost přístupu při experimentálním ověřování vlastností elektroizolačního systému.

---

## Seznam použitých symbolů a značek

$E_p$	<i>Elektrická pevnost</i>
$U_p$	<i>Průrazné napětí</i>
$d$	<i>Tloušťka dielektrika</i>
$EIS$	<i>Elektroizolační systém</i>
$EIM$	<i>Elektroizolační materiál</i>
$E$	<i>Intenzita elektrického pole</i>
$\tau$	<i>Doba života materiálu</i>
$A$	<i>Předexponenciální faktor</i>
$E_a$	<i>Aktivační energie</i>
$R$	<i>Univerzální plynová konstanta</i>
$T$	<i>Teplota</i>
$TI$	<i>Index teploty</i>
$HIC$	<i>Půlící faktor</i>
$tg\delta$	<i>Ztrátový činitel</i>
$\eta$	<i>Parametr měřítka</i>
$RTE$	<i>Index teplotní odolnosti</i>
$\beta$	<i>Parametr tvaru</i>
$\lambda$	<i>Parametr polohy</i>
$h(t)$	<i>Hazardní funkce</i>
$R(t)$	<i>Funkce bezporuchovosti</i>
$n$	<i>Celkový rozsah výběru</i>

$i$	<i>Pořadová hodnota vybrané pozice</i>
$R^2$	<i>Korelační koeficient</i>
$k$	<i>Rychlostní konstanta</i>
$MLE$	<i>Metoda maximální věrohodnosti</i>

## 1 Degradací mechanismy u elektroizolačních materiálů

Degradací mechanismy, které negativně ovlivňují elektrickou pevnost izolačních materiálů můžeme rozdělit do dílčích podskupin, které mezi sebou vzájemně reagují. Jsou to vlivy elektrického pole na chemickou strukturu materiálu, teplotní vlivy provozního prostředí jež zkracují životnost izolantu nebo vlivy výbojové činnosti. Vložíme-li dielektrikum do elektrického pole, probíhají v tomto materiálu děje, které jsou závislé na reálných parametrech izolantu a jeho pracovním prostředí a označují se jako dielektrické ztráty. Jejich velikost je dána několika faktory:

- vnitřní a povrchovou vodivostí, kde je pro velikost ztrát rozhodující obsah příměsí (vlhkost, cizí materiály, nečistoty), stav povrchu a vlhkost okolního prostředí
- přítomností částečných výbojů, které se objevují při vysokých intenzitách el. pole
- polarizací dielektrika, která závisí na typu konkrétního izolantu

### 1.1 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost  $E_p$  vyjadřuje odolnost izolačního materiálu vůči elektrickému poli. Elektrické pole způsobuje polarizaci dielektrika. Při zvětšení intenzity elektrického pole se zvětšuje koncentrace volných nábojů a jejich pohyblivost. V případě zvyšování intenzity elektrického pole, dojde k tzv. průrazu dielektrika. Dielektrikum přestane oddělovat místa s různým potenciálem a vytvoří se vodivý kanálek. Tím pak mohou procházet značné proudy. V pevných materiálech způsobí průraz nevratné změny struktury. U plynů a kapalin mluvíme o přeskoku. Elektrická pevnost je vyjádřena podílem průrazného napětí  $U_p$ , které nám určuje při jaké intenzitě elektrického pole dochází v materiálu k průrazu a tloušťky dielektrika  $d$  v místě průrazu.

Teoreticky je tedy elektrická pevnost dána vztahem (1.1) :

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad [\text{kv/cm}]. \quad (1.1)$$

Jak bylo uvedeno výše, elektrická pevnost má rozdílný charakter u pevných, kapalných a plyných izolantů. U pevných izolantů nám v případě průrazu nastanou nevratné změny v materiálu a dojde k částečné či celkové ztrátě izolačních vlastností. Níže jsou uvedeny hodnoty elektrické pevnosti pro vybrané izolační materiály (viz. tab. 1.1).[12]

**Tabulka 1. 1 - Hodnoty elektrické pevnosti izolačních materiálů [7]**

<b>Materiál</b>	<b>Elektrická pevnost [kV/cm]</b>
<b>Vzduch</b>	20 – 30
<b>Pryskyřičný olej</b>	200
<b>Silikonový olej</b>	150
<b>Sklo</b>	500
<b>Parafín</b>	250
<b>Porcelán</b>	340 – 380
<b>Slída - flogopit</b>	600
<b>Přírodní asfalt</b>	300
<b>Kaučuk</b>	150
<b>Tvrdá pryž</b>	250

## **1.2 EIS a EIM**

EIS je zkratkou pro elektroizolační systém. Normou IEC je definován jako izolační struktura obsahující jeden nebo více elektroizolačních materiálů (EIM), které jsou společně s přidruženými vodivými částmi součástí elektrotechnického zařízení. [1]

Izolační systém jako takový musí splňovat celou řadu náročných kritérií. V praxi je jeho životnost ovlivňována mnoha faktory - elektrickými, tepelnými, mechanickými včetně vlivů provozního prostředí, jež ovlivňuje vlastnosti systému. Tento proces negativně ovlivňující jeho životnost označujeme jako stárnutí materiálu. [1]

### 1.3 Tepelné stárnutí a tepelný průraz

Tepelná odolnost materiálů tvoří zpravidla nejslabší článek elektroizolačního systému a je jedním z kritérií, podle nichž se hodnotí a třídí izolanty. Materiály se shodnými tepelnými vlastnostmi se řadí do tzv. tepelných tříd, pro které je určena maximální teplota, při níž ještě nedochází k destruktivním změnám ve struktuře materiálu. Tepelné třídy jsou určeny normou ČSN EN 60085 „Elektrická izolace – Tepelná klasifikace“. Tepelnou třídu je označení EIM/EIS, které je číselně rovno maximální teplotě ve °C, pro kterou je EIS/EIM vhodný. Dalším parametrem je tzv. relativní index tepelné odolnosti (RTE). Tato hodnota vyjadřuje hodnotu teploty ve °C, při níž má materiál po předpokládanou dobu svého života uspokojivé vlastnosti v porovnání se standardním materiálem. Tabulka tepelné klasifikace izolantů (tab. 1.2) je uvedena níže :

**Tabulka 1.1 - Tepelná klasifikace izolantů [8]**

Relativní index tepelné odolnosti RTE	Tepelná třída	Předchozí značení	Používané materiály
< 90	70		Papír, dřevo, bavlna, hedvábí bez další úpravy a impregnace
> 90 - 105	90	Y	Šelak, asfalty, bitumeny, oleje, PVC
> 105 - 120	105	A	PET fólie, kaučuk, akrylát v kombinaci s papírem, lepenky
> 120 - 130	120	E	Fenolformaldehydová a fenolická pryskyřice, tvrzený papír, fenol-melaminový laminát
> 130 - 155	130	B	Skleněná vlákna, asbest, sulfátový papír, polyesterová pryskyřice a fólie, PETP fólie
> 155 - 180	155	F	Slídový papír, skleněná vlákna, PET a PEN fólie, epoxidové a novolakové pryskyřice
> 180 - 200	180	H	Silikonová a epoxidová pryskyřice, aramidy, polyimidy, polyester, slída, slídový papír

---

> 200 - 220	200		Sklo, asbest, aramidové papíry
> 220 - 250	220		Sklo ve formě vláken, asbest, aramidové papíry, silikonová pojiva
> 250	250		Polyimidy, aramidy, PTFE polytetrafluoretylen

V případě vysokoteplotních materiálů mimo teplotní třídy se používají keramické izolanty, polyimidy (krátkodobá teplotní odolnost až 450 °C) nebo např. fólie kombinace sklo – hliník (pro teplotu až 500 °C). [8]

Při tepelném průrazu se uplatňují Joulovy ztráty a ohřev způsobený dielektrickými ztrátami. Toto ohřívání je lokálního charakteru a neprobíhá stejnoměrně v celém izolantu. V těchto místech pak dochází ke zvýšení elektrické vodivosti a tím i k dalšímu zvýšení teploty. Pokud se množství dodávaného tepla zvýší nad množství tepla odváděného dochází k chemickým a fyzikálním změnám ve struktuře izolantu (depolymerační reakce, difúze atd.), tím ke zvýšení jeho elektrické vodivosti a následnému k průrazu. [2] [8]

## **1.4 Elektrické stárnutí a elektrický průraz**

Na rozdíl od plynných či kapalných izolantů, u nichž po přeskočení dochází k regeneraci, je průraz u pevných izolantů trvalého charakteru. Při průrazu dochází k nevratným změnám ve struktuře materiálu, vzniká trvalá vodivá cesta, která má negativní vliv na izolační vlastnosti materiálu jak z praktického, tak z experimentálního pohledu. [8]

K čistě elektrickému průrazu dochází v případě, že nedojde k postupnému ohřevu izolantu. Na základě experimentálních výsledků je možno uvažovat, že při elektrickém průrazu jsou rozhodující volné elektrony. Vysvětlení vzniku čistě elektrického průrazu lze rozdělit do dvou skupin. [8]

Tou první je teorie založena na principu malé hustoty volných elektronů. Vzájemné srážky volných elektronů probíhají s mnohem menší četností, než srážky elektronů se strukturou izolantu. K průrazu pak dojde ve chvíli, kdy intenzita elektrického pole dosáhne úrovně elektrické pevnosti a tím se zvýší počet volných elektronů. S tím také souvisí nárůst proudu tekoucího izolantem, zvýšení jeho teploty a porušením struktury.

U druhé teorie se předpokládá naopak vysoká hustota volných elektronů. V tomto případě mluvíme o tzv. teorii kolektivního průrazu. Volné elektrony jsou urychlovány elektrickým polem a tím se sráží s jinými elektrony. Elektrony si vzájemně předávají část své rychlosti a energie. Vlivem častých srážek se energie rozdělí mezi všechny volné elektrony tak, že jsou v tepelné rovnováze. Převládá-li četnost výměny energie mezi volnými elektrony nad výměnou energie se strukturou izolantu, dochází ke zvyšování elektronové teploty nad teplotu struktury izolantu. Po překročení mezní elektronové teploty nastává její nekontrolovatelný růst a tím dochází k prudkému ohřátí izolantu a následnému průrazu.[8]

Pro modelování vlivu elektrického pole na dobu životnosti materiálu jsou používány následující modely :

Mocninný model :

$$\tau = k \cdot E^{-n} . \quad (1.2)$$

Exponenciální model :

$$\tau = a \cdot b^{-bE} , \quad (1.3)$$

kde  $\tau$  je doba života [h],

$E$  je intenzita elektrického pole [ $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ]

$a, k, n, b$  jsou konstanty, které je potřeba určit empiricky.

Oba modely popisují stárnutí materiálu, který je vystaven působení elektrického pole. Elektrické stárnutí mimo jiné zahrnuje účinky částečných výbojů, plazivých proudů, elektrických stromečků (elektrických trsů), elektrolýzy, účinky prostorových nábojů apod. [2]



## **1.5 Mechanické stárnutí**

Modely mechanického stárnutí jsou založeny na různých vlastnostech materiálů a různých druzích mechanického namáhání. Zahrnují vlivy účinků elektrodynamických, elektromagnetických nebo tepelných sil, které jsou příčinou degradace a změn vlastností elektroizolačního systému.[2]

## **1.6 Ostatní degradační vlivy**

K dalším strukturálním změnám v materiálu dochází působením dalších faktorů jako je vlhkost, oxidace, znečišťující látky, radiace apod. Pokud na izolant působí elektrické pole po dlouhou dobu, mohou v něm být spouštěny elektrochemické procesy postupně zhoršující jeho vlastnosti. Ty pak způsobují chemické a fyzikální změny ve struktuře materiálu, snižují jeho elektrickou pevnost a v konečném důsledku vedou k průrazu. [8]

Na degradaci izolantu se mohou podílet následující procesy :

- přímé účinky bombardování izolantu ionty a elektrony
- účinky záření vznikajícího při výbojích
- chemické působení produktů vznikajících při výboji v plynu
- tepelné účinky
- účinky lokálního zvýšení gradientu na konci výbojového kanálu

Při bombardování materiálu ionty a elektrony dochází k jeho erozi, k zeslabení tloušťky izolační vrstvy. Úbytek materiálu je způsoben chemickou přeměnou izolantu na nízkomolekulární plynné nebo kapalné těkavé produkty. Při výbojích vzniká světelné a ultrafialové záření, které má vyšší energii na vyvolání chemických degradačních reakcí.

Výboje v plynných izolantech mění chemickou strukturu izolantu, která může vést ke vzniku ozónu, který má výrazné oxidační účinky, ke vzniku tzv. aktivního dusíku, jež je

mnohem reaktivnější než dusík normální nebo za přítomnosti vody k tvorbě dusíkatých kyselin. O tom, do jaké míry se účinek výbojové činnosti uplatní, rozhoduje struktura daného izolantu, chemické složení, intenzita a délka působení výbojové činnosti. [8]

---

## 2 Zrychlené stárnutí zvýšenou teplotou a zkoušení vzorků

Při přípravě vzorků na samotné měření konkrétních veličin negativních účinků, se musí uvažovat, v jakých provozních podmínkách se budou v praxi nacházet. Z tohoto důvodu musí být předem známa teplotní třída daného izolačního materiálu a požadovaná provozní teplota. Z hlediska technického a ekonomického je poté nutné uvažovat, jaký druh zkoušky pro měření veličin použít. Zda zkoušku destruktivní či nedestruktivní. Oba principy budou popsány dále.

### 2.1 Metoda zrychleného stárnutí

Dříve než přejdeme k metodě zrychleného stárnutí zvýšenou teplotou a následného měření ztrátového činitele či doby do průrazu, musíme si uvědomit v jakých podmínkách se námi zkoumaný vzorek nacházel před a po zkoušce. Je to z toho důvodu, že vlastnosti izolantů mohou být do jisté míry ovlivněny prostředím, v němž se nacházejí. Je tedy nutné provést před samotným měřením tzv. předkondicionování a posléze kondicionování. Je to z důvodu lepší reprodukovatelnosti výsledku měření s ohledem na zachování stálých podmínek během měření a s tím související eliminací nežádoucí variability vlastností testovaného izolantu. [8] [12]

Během předkondicionování dochází k neutralizaci vlivů prostředí v němž se materiál nacházel před zkouškou – teplota, vlhkost. Během kondicionování se materiál vystavuje prostředí o určité teplotě a vlhkosti po stanovenou dobu. Podmínky předkondicionování a kondicionování jsou zpracovány v normě ČSN IEC 212. [8]

Vlastní měření je pak ovlivňováno vlastnostmi okolního prostředí – teplota, vlhkost a atmosférický tlak. Standardním referenčním prostředím je stanoveno prostředí o teplotě 20°C, relativní vlhkosti 65 % a tlaku 1013 mbar (760 mm Hg). [8]

Tak aby bylo možné zanalyzovat, jak se zkoumaný materiál bude chovat za určitých provozních podmínek, je nutné vzorek podrobit odpovídajícímu teplotnímu stárnutí. Tím se posouváme na životnostní křivce materiálu do okamžiku, kdy jsme schopni nasimulovat přibližné změny v jeho vnitřní struktuře v důsledku namáhání. Rychlosti reakcí v naprosté většině rostou se zvyšující se teplotou. Empirické zkoumání ukázalo, že mnoho reakcí má rychlostní konstanty, jež splňují tzv. Arrheniovu rovnici (2.1)[11]:

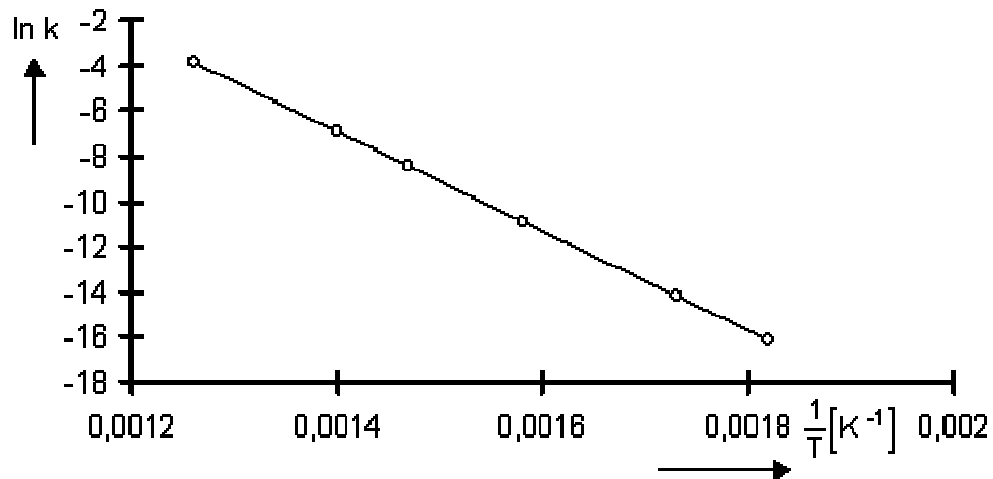
$$k = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.1)$$

kde A je tzv. předexponenciální neboli frekvenční faktor,  $E_a$  je aktivační energie, která je charakteristická pro každou reakci a je na teplotě prakticky nezávislá pro malé rozmezí teplot. R je univerzální plynová konstanta a T je teplota. [11]

Předexponenciální faktor a aktivační energie jsou tak zvané Arrheniovy parametry reakce. Z rovnice (9.1) vyplývá, že stoupá-li teplota, roste hodnota rychlostní konstanty dané reakce. Vzhledem k exponenciálnímu charakteru této závislosti lze již poměrně malým zvýšením teploty dosáhnout značného zvýšení rychlosti reakce. U většiny reakcí se pro hrubý odhad může vycházet z Van't Hoffova pravidla, totiž že rychlost reakce se zdvoj- až zčtyřnásobí při zvýšení teploty o 10K. Aktivační energii reakce lze zjistit z experimentálních výsledků na základě zlogaritmované formy Arrheniovy rovnice (2.2)[11]:

$$\ln k = -\frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln A \quad (2.2)$$

Grafem závislosti  $\ln k$  na  $1/T$  je přímka, její směrnice je rovna  $-E_a/R$  (obr 2.1). Po dosazení do rovnice (2.2) získáme předexponenciální faktor. [11]



Obr. 2. 1- Závislost zlogaritmovaného rychlostního koeficientu na  $1/T$  [11]

Během metody zrychleného stárnutí, se zkušební vzorky podrobují třem různým zvýšeným teplotám. Nejnižší teplota musí být stanovena tak, abychom dosáhli bodu selhání při alespoň 5 % očekávané životnosti izolačního systému. Ostatní dvě teploty jsou následně voleny v intervalu 20K. V případě, že je požadováno více zkušebních hodnot teplotního namáhání, volí se hodnoty v intervalu 10K. Standardní postup při hodnocení tepelných vlastností může být rozdělen do několika kroků:

- Příprava vlastních vzorků vhodných pro měření
- Vystavení skupiny vzorků stárnutí na několika úrovních zvýšené teploty buď kontinuálně, nebo cyklicky. V případě cyklického stárnutí je měření rozděleno na několik period, mezi nimiž se vzorky vrací na teplotu místnosti nebo jinou referenční teplotu.
- Vystavení skupiny vzorků diagnostickému postupu tak, aby bylo možné odhalit míru stárnutí. Diagnostické postupy mohou být jak destruktivního tak nedestruktivního charakteru.
- Kontinuálním nebo cyklickým působením tepla se dosáhne žádaného koncového bodu. V tomto bodě dochází k poruše či změně měřených vlastností.

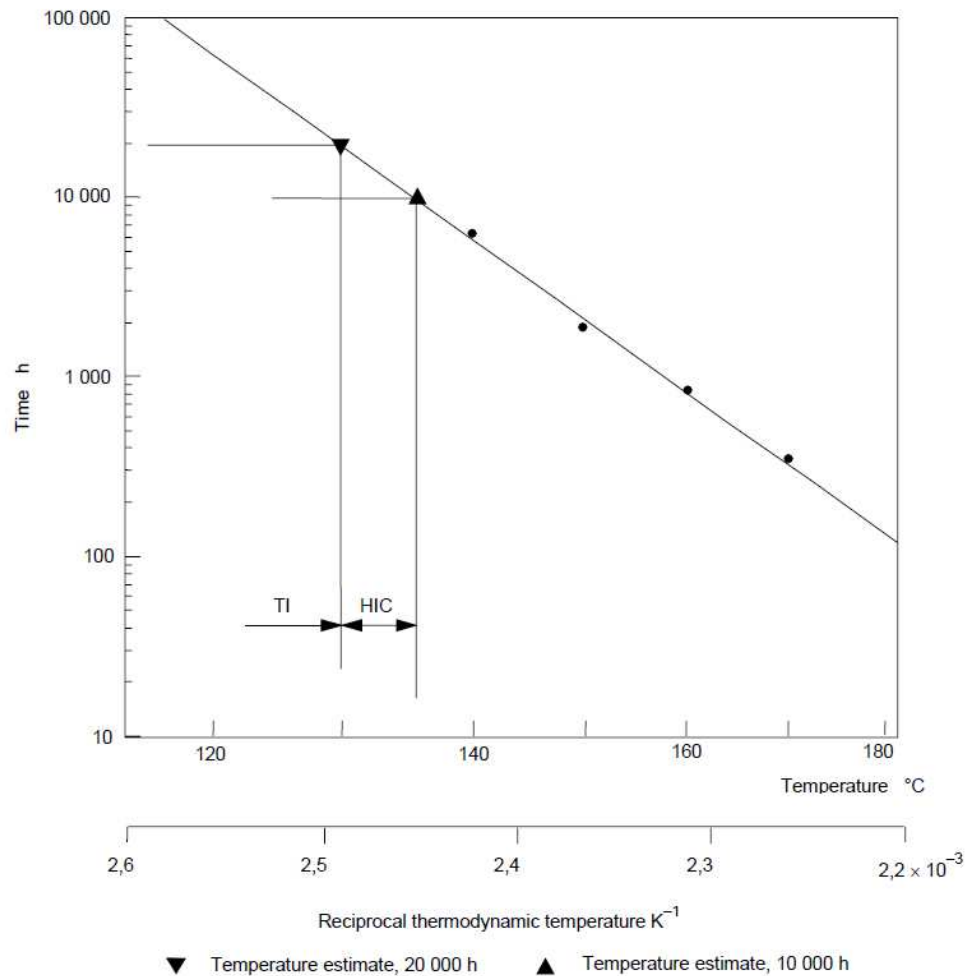
- Zaznamenání výsledků zkoušek v závislosti na druhu procesu stárnutí (kontinuální nebo cyklické) a na diagnostickém postupu (čas či počet cyklů potřebný k dosažení koncového bodu pro každý vzorek).
- Číselné vyhodnocení těchto údajů a jejich grafické znázornění.
- Vyhodnocení metody pomocí indexu teploty TI nebo půlčího intervalu HIC. [11]

Preferované teploty stárnutí v závislosti na teplotních třídách jsou uvedeny v tabulce 2.1.

**Tabulka 2. 1- Preferované teploty v závislosti na tepelných třídách[11]**

Provozní teplota [°C]	55	75	90	105	120	130	155	180	200	220	250
Teplotní třída	(55)	(75)	Y	A	E	B	F	H	N	R	(250)
Teploty stárnutí [°C]	135	155	170	185	200	210	235	260	280	300	330
	125	145	160	175	190	200	225	250	270	290	320
	115	135	150	165	180	190	215	240	260	280	310
	105	125	140	155	170	180	205	230	250	270	300
	95	115	130	145	160	170	195	220	240	260	290
	85	105	120	135	150	160	185	210	230	250	280
	75	95	110	125	140	150	175	200	220	240	270

Graf životnostní křivky v závislosti na teplotě stárnutí je uveden na obr. 2.2., kde TI je numerická hodnota teploty odvozená z vytrvalostních vztahů, při níž se dosáhne požadovaného koncového bodu TI pro životnost 20 000h a hodnoty HIC, vyjadřující polovinu teploty TI. [11]



Obr. 2. 2– Závislost životnosti materiálu na teplotě stárnutí [11]

Jak již bylo uvedeno výše, míra zrychlení se volí vzhledem k úrovni provozního namáhání faktorem stárnutí. Rozlišují se dva postupy namáhání. Postup může být cyklický nebo kontinuální v závislosti na požadavcích diagnostiky zkoušek a komplexnosti stárnutí. Průběhy stárnutí v závislosti na působení jednoho nebo více faktorů jsou uvedeny v tab. 2.2 pod textem. [11]

Tabulka 2. 2 - Průběhy stárnutí materiálu v závislosti na působících faktorech [11]

Číslo přístupu	1	2	3	4	5	6
Postup	Cyklický				Kontinuální	
Stárnutí jedním faktorem	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne

<b>Multifaktorové současné stárnutí</b>	Ne	Ano	Ne	Ne	Ne	Ano
<b>Multifaktorové postupné stárnutí</b>	Ne	Ne	Ano	Ano	Ne	Ne
<b>Diagnostické zkoušky</b>	Ano	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne

Postupy 1 – 4 jsou vhodné pro předpoklad, že příčiny poruchy budou jiné než namáhání způsobující stárnutí nebo, když jsou namáhání způsobující stárnutí aplikována postupně. Sestávají zpravidla z několika zkušebních cyklů, přičemž každý cyklus se skládá ze subcyklů.[11]

Subcykly stárnutí se provádějí při zvyšující se úrovni namáhání sloužící ke stárnutí izolace na zrychlené bázi. Míra zrychlení se volí vzhledem k úrovni provozního namáhání faktorem stárnutí. Po každém subcyklu stárnutí jsou zkušební vzorky podrobeny subcyklu diagnostických zkoušek (tj. napěťové zkoušky, zkoušky částečných výbojů, zkoušky mechanického namáhání apod.) [11]

Kontinuální postupy jsou vhodné tam, kde se předpokládá, že faktor stárnutí nebo kombinace několika faktorů budou zároveň nejdůležitějším faktorem způsobujícím poruchu.

## **2.2 Měření doby do průrazu**

Měření doby do průrazu je zkouškou destruktivní a v závislosti na přiloženém napětí se provádí mnoha způsoby. Záleží na druhu měřeného izolačního materiálu a na charakteru zkoušky. Vlastní test provádíme pro nízké hodnoty elektrické pevnosti na vzduchu. Častější je ovšem použití transformátorového oleje nebo silikonového oleje ve speciálních případech a to z důvodu zabránění přeskoků. Vždy je nutné se přesvědčit, zda skutečně došlo k průrazu zkoušeného vzorku a nikoli k přeskoku po jeho povrchu. [8]



---

Vlastní zkoušky se rozlišují dle charakteru přiloženého napětí. Při zkouškách stejnosměrným napětím musí být regulace plynulá od nejnižší nulové po maximální hodnotu. Omezovací odpor musí být zapojen v sérii se vzorkem a průraz zjišťujeme dle rychlého vzrůstu proudu nebo proudu přesahující stanovenou hodnotu. [8]

V případě zkoušek rázovým napětím musí použitý generátor umožňovat volbu polarity. Velikost napětí a energie generátoru impulzů musí být taková, aby se dosáhlo správného tvaru impulzu pro jakékoli vzorky až k dosažení průrazného napětí. Během zkoušky jsou přikládány napěťové impulzy v rostoucí řadě ve skupinách po třech impulzech o stejné vrcholové hodnotě napětí. Napěťová odolnost se poté určí jako jmenovitá vrcholová hodnota napětí série tří impulzů, při nichž nedošlo k průrazu. [8]

Zkoušení střídavým napětím probíhá pomocí vysokonapěťového transformátoru napájeným proměnlivým sinusovým napětím z nízkonapěťového zdroje. Při vloženém vzorku do obvodu, musí pro všechna napětí až do napětí průrazného platit, že poměr maximální a efektivní hodnoty musí být  $\sqrt{2} \pm 5 \%$ . Při této zkoušce mohou být použity různé varianty přikládání zkušebního napětí, tak jak je uvedeno níže.[8]

- Krátkodobá zkouška s rychlým nárůstem napětí
- Zkouška se stupňovitým zvyšováním napětí s dvacetisekundovými stupni

Při krátkodobé zkoušce je nárůst napětí rovnoměrný od nuly až do průrazu. Míra nárůstu se volí tak, aby došlo k průrazu mezi 10. a 20. sekundou od přiložení napětí. Tomu musí odpovídat i rychlost nárůstu napětí, jež se volí z řady 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000  $V \cdot s^{-1}$ . [8]

Při zkoušce se stupňovitým zvyšováním napětí se navazuje na zkoušku krátkodobou. Napětí na prvním stupni se volí dle tabulky 2.3 tak, aby byla hodnota nejbližší ke 40 % průrazného napětí při krátkodobé zkoušce. [8]

Měření doby do průrazu je zkouškou destruktivní a v závislosti na přiloženém napětí se provádí mnoha způsoby. Záleží na druhu měřeného izolačního materiálu a na charakteru zkoušky. Vlastní test provádíme pro nízké hodnoty elektrické pevnosti na vzduchu. Častější je ovšem použití transformátorového oleje nebo silikonového oleje ve speciálních případech a to z důvodu zabránění přeskoků. [8]

Vlastní zkoušky se rozlišují dle charakteru přiloženého napětí. Při zkouškách stejnosměrným napětím musí být regulace plynulá od nejnižší nulové po maximální hodnotu. Omezovací odpor musí být zapojen v sérii se vzorkem a průraz zjišťujeme dle rychlého vzrůstu proudu nebo proudu přesahující stanovenou hodnotu. [8]

**Tabulka 2.3- Hodnoty přírůstků napětí při zkoušce stupňovitým zvyšováním [8]**

Počáteční napětí [kV]	Přírůstek [kV]
≤ 1,0	10 % z počátečního napětí
nad 1,0 do 2,0	0,1
nad 2,0 do 5,0	0,2
nad 5,0 do 10,0	0,5
nad 10 do 20	1,0
nad 20 do 50	2,0
nad 50 do 100	5,0
nad 100 do 200	10,0
nad 200	20,0

### **2.3 Měření ztrátového činitele**

Při konstrukci izolačního systému a volbě izolantu je nezbytné zařadit do zkoušek zařízení také měření dielektrických ztrát. Izolační materiál může obsahovat různé příměsi, mechanické nečistoty, stopy vody a jiných polárních látek. Elektrické pole potom umožní vzniknout polarizačním mechanismům, které dielektrické ztráty způsobují. Kvantitativní hodnocení dielektrických ztrát se provádí měřením ztrátového činitele  $tg\delta$  Ten udává obraz

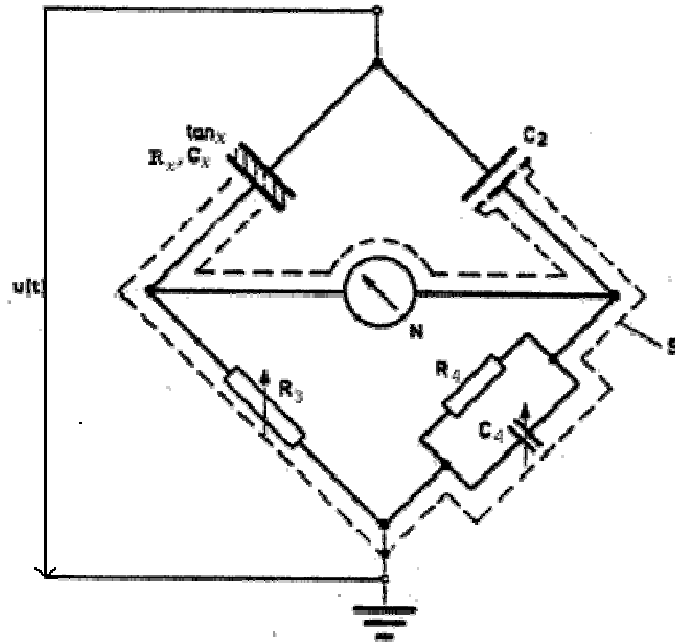
---

celkového stavu izolace daného elektrického zařízení. Jeho velikost je ovlivněna strukturou dielektrika, v omezené míře i vlivem částečných výbojů.

Ztrátový činitel je frekvenčně, napětově a teplotně závislý. Se zvyšující se frekvencí stoupá a dosahuje maxima, za kterým následuje pokles ztrát. To je dáno tím, že od určité frekvence nejsou dipóly schopny sledovat úplně změnu polarity pole a ztráty tak klesají. S rostoucí teplotou se toto maximum posouvá do vyšších frekvencí. [2] [8]

Principem nedestruktivních měřících metod v této oblasti je určení prvků náhradního schématu dielektrika. Měření se provádí pomocí různých variant můstků, které jsou v současné době automatické a umožňují měřit ztrátový činitel i kapacity objektu v řadě variant. Měřením permitivity a ztrátového činitele se zabývá norma ČSN IEC 250 „Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek“. [2]

Z hlediska frekvenční závislosti velikosti ztrátového činitele používáme pro praktická měření v oblasti průmyslové můstkové metody. Nejpoužívanějším principem je měření pomocí Scheringova můstku, který poprvé v roce 1920 představil německý fyzik Harald Schering. Metoda pracuje dle zapojení na obr. 3.1. [8]



Obr. 2. 3 - Scheringův vysokonapěťový můstek [5]

Můstek se skládá ze dvou hlavních částí. V první části jsou prvky umístěny ve vysokonapěťovém prostoru zkušebny. V části druhé potom prvky sloužící k vyvažování mimo prostor zkušebny. Galvanické oddělení obou částí tvoří vzorek v příslušném elektrodovém systému a kapacitní normál. Ten je ve vysokonapěťové části můstku proveden jako vysokonapěťový kondenzátor většinou o kapacitě cca 100 pF se ztrátami  $\text{tg } \delta < 10^{-5}$  a plynným dielektrikem (stlačený  $\text{CO}_2$ ). [2]

Napěťový zdroj je zdrojem střídavého napětí o dostatečném výkonu. Nesmí být zdrojem výbojové činnosti v oblasti používaného zkušebního napětí. Nízkonapěťová část je stíněna proti vlivu parazitních elektromagnetických polí, tak aby nedocházelo k nepřesnosti při měření a slouží k vyvážení můstku odporovou a kapacitní dekádou  $R_3$  a  $C_4$ . Dekádou  $R_3$  se vyrovnává kapacitní složka náhradního sériového obvodu. Dekáda  $C_4$  slouží k vyrovnání odporové složky. Vyrovnání indikuje nulový indikátor N. [8]

Pro usnadnění výpočtu výpočtu ztrátového činitele se volí  $R_4 = 1000/\pi$  při frekvenci  $f = 50$  Hz a výpočet se provádí při uvažování sériového náhradního schématu.

Pro vyrovnaný můstek platí :

$$C_s = C_x = C_2 \frac{R_4}{R_3} \quad (2.3)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_s \cdot R_s = \omega \cdot R_4 \cdot C_4 \quad (2.4)$$

kde  $C_s$  a  $R_s$  jsou prvky náhradního obvodu dielektrika a pro  $R_4 = 1000/\pi$  a  $C_4$  v pF

$$\operatorname{tg} \delta = 0,1 \cdot C_4 \quad (2.5)$$

Ztrátový činitel se musí měřit na vzorcích při teplotě místnosti v závislosti na přiloženém napětí od hodnot  $0,2 U_n$  do  $1,0 U_n$  v intervalech  $0,2 U_n$ . Počáteční hodnota  $\operatorname{tg} \delta_{0,2}$ , přírůstek  $1/2 (\operatorname{tg} \delta_{0,6} - \operatorname{tg} \delta_{0,2})$  a přírůstek  $\operatorname{tg} \delta$  na jeden krok, nesmí pro jmenovité napětí do 11 kV překročit hodnoty v tab. 3.1. Pro vyšší hodnoty jmenovitého napětí se mezní hodnoty určují dohodou.

**Tabulka 2. 3- Mezní hodnoty ztrátového činitele**

1	2	3	4	5
$\operatorname{Tg} \delta_{0,2}$	$\frac{1}{2} (\operatorname{tg} \delta_{0,6} - \operatorname{tg} \delta_{0,2})$		$\Delta \operatorname{tg} \delta$ na jeden krok po $0,2 U_n$	
Všechny vzorky	95 %	Zbývajících 5 %	95 %	Zbývajících 5%
$30 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$

### 3 Statistické metody pro vyhodnocování degradačních vlivů

Jevy technických, přírodních a dalších věd, které jsou časově proměnné, nazýváme procesy náhodnými. Tyto procesy jsou charakterizovány souborem náhodných funkcí, kde se jednotlivé funkce nazývají realizací náhodného procesu. Vlastnosti náhodných veličin těchto funkcí jsou určeny pravděpodobnostmi, s jakými se vyskytují různé hodnoty. Je nutné zjistit rozmezí hodnot, kterých náhodná veličina může nabývat a stanovit pravděpodobnost výskytu určitých hodnot. [3]

Pravděpodobnost, že činnost určitého systému bude v daném časovém intervalu přiměřena svému účelu, se nazývá pojmem spolehlivost. Spolehlivost každého prvku systému se skládá ze dvou základních složek

- vlastní spolehlivosti, která respektuje všechny vlastnosti, které má výrobek v okamžiku kdy opustí výrobu. Tato spolehlivost je funkcí konstrukčního návrhu a úrovně výroby. [3]
- spolehlivosti ve funkci, která respektuje faktory působící na výrobek v provozu. Tato spolehlivost je funkcí skutečných provozních podmínek. [3]

S tímto souvisí další termín, jímž je bezporuchovost. Bezporuchovost je definována jako schopnost objektu plnit požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém intervalu. Doba do poruchy (tj. bezporuchovost) se hodnotí u různých komponent technických systémů za určitých definovaných podmínek (při změně těchto podmínek se doba do poruchy s vysokou pravděpodobností změní). Doba do poruchy může být měřena v různých jednotkách, například hodinách, dnech nebo cyklech. Udává pravděpodobnost výskytu poruchy v určitém okamžiku  $t$ . Tento parametr je jedním z možných způsobů popisu doby do poruchy. Za účelem stanovení tohoto parametru je zapotřebí znát vhodné modelové teoretické rozdělení. Teoretické rozdělení může být popsáno (za předpokladu spojitosti sledované veličiny) funkcí hustoty pravděpodobnosti nebo distribuční funkcí. [4]

### 3.1 Statistické zpracování pomocí Weibullova rozdělení

První zmínku o Weibullovo rozdělení najdeme v článku "Statistická rozdělovací funkce široké platnosti - *A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*" z roku 1951. Autorem publikace byl švédský matematik Waloddi Weibull. Od tohoto roku se využití Weibullova rozdělení při analýzách životnosti a bezporuchovosti výrobků rozšířilo do různých průmyslových odvětví. [9] [10]

Weibullovo rozdělení se používá v případech, kdy bezporuchovost závisí na stáří, počtu odpracovaných hodin nebo vykonaných provozních cyklů, např. vyhodnocování životnosti součástek nebo za předpokladu, že u zkoumaného objektu nelze přijmout předpoklad o konstantní intenzitě poruch. Je vhodné pro vyjádření mechanického opotřebení a únavu materiálu. Obecně lze říci, že Weibullovo rozdělení je rozdělením extrémních hodnot, mezi které patří kritické úrovně vlastností, při jejichž překročení dochází k destrukci, tudíž že ke zničení výrobku dochází v jeho nejslabším místě. Toto rozdělení lze aplikovat pro takové datové soubory, jejichž hodnoty jsou větší než nula. [3]

Náhodná veličina  $X$  má Weibullovo rozdělení  $W(a; b; c)$ , jestliže její distribuční funkce má tvar rovnice

$$F(x; \eta, \beta, \lambda) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x - \lambda}{\eta}\right)^\beta\right\} \quad \text{pro } x > \lambda, \quad (3.1)$$

$$F(x; \eta, \beta, \lambda) = 0 \quad \text{pro } x \leq \lambda, \quad (3.2)$$

přičemž  $\eta > 0$  je parametr měřítka,  $\beta > 0$  parametr tvaru a  $\lambda$  je parametr polohy. V případě, že  $\lambda = 0$ , jedná se o dvouparametrické Weibullovo rozdělení.

Pro  $\beta = 1$  se jedná o exponenciální rozdělení. Pro  $\beta = 2$  přechází Weibullovo rozdělení v rozdělení Rayleighovo. [3]

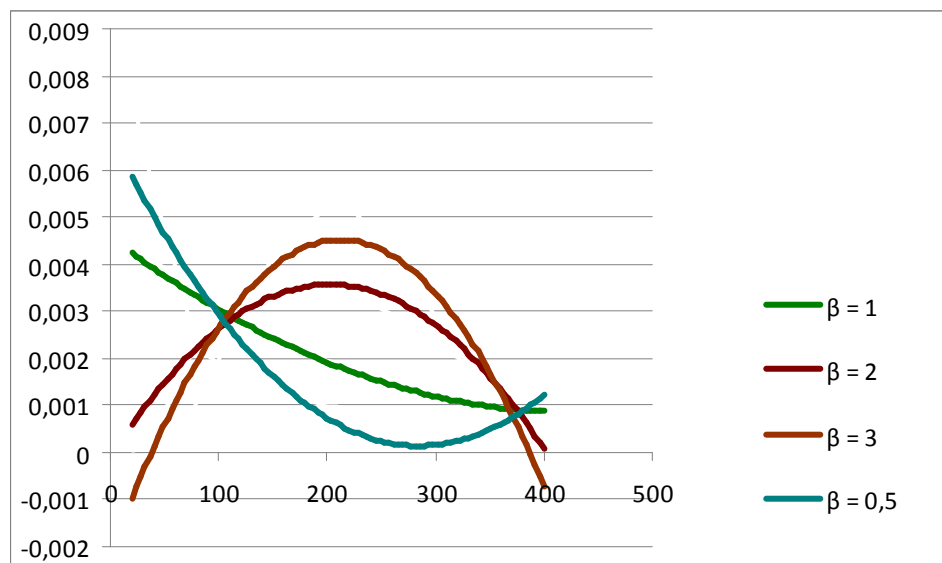
Při hodnocení bezporuchovosti uvažujeme zpravidla parametr polohy roven nule. Dále tedy budeme uvažovat dvouparametrické rozdělení.

### 3.2 Dvouparametrické Weibullovo rozdělení

Hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny s dvouparametrickým Weibullovo rozdělením má tvar

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}, \quad (3.3)$$

Kde hodnota  $t$  vyjadřuje dobu, vzdálenost, počet cyklů apod.,  $\eta$  je parametr měřítka vyjadřující charakteristickou dobu života a  $\beta$  je parametr tvaru určující tvar výsledné křivky. Mezní hodnotou pro parametr  $\beta$  je hodnota 1, kdy je Weibullovo rozdělení shodné s rozdělením exponenciálním a okamžitá intenzita poruch se stává konstantou. Pro  $\beta < 1$  se okamžitá intenzita snižuje a pro  $\beta > 1$  se naopak zvyšuje. Grafické znázornění křivek s různým parametrem  $\beta$  se nachází na obr. 1 pod textem. [10]



Graf 3. 1 - Funkce hustoty pravděpodobnosti pro různé hodnoty  $\beta$

Parametr měřítka  $\eta$  neboli charakteristická doba života, je hodnota, u níž očekáváme, že 63,2 % objektů bude mít poruchu. Platí bez ohledu na hodnotu parametru  $\beta$ . Pokud dochází k výměně objektů, očekává se, že 63,2 % dob do poruchy bude kratších nebo se bude rovnat



hodnotě  $\eta$ . V případě, že parametr  $\beta$  bude konstantní a parametr  $\eta$  bude nabývat různých hodnot, nebude se měnit tvar aktuálního rozdělení, ale změní se měřítko časové osy. [9]

Tvar hazardní funkce  $h(t)$  je shodný s okamžitou intenzitou poruch a má tvar

$$x(t) = h(t) = \beta \cdot \frac{t^{\beta-1}}{\eta^\beta}. \quad (3.4)$$

Kumulativní distribuční funkce pro dvouparametrické Weibullovo rozdělení má tvar

$$f(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}. \quad (3.5)$$

Dalším termínem, který je nutné zavést, je funkce bezporuchovosti. Pro číselné vyjádření je definována jako doplněk distribuční funkce a vyjadřuje pravděpodobnost, že u daného prvku nenastane do doby  $t$  porucha

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.6)$$

### 3.3 Odhad parametrů Weibullova rozdělení

Pro správné použití Weibullova rozdělení je nutné provést odhad jednotlivých parametrů. Existuje mnoho metod k odhadu parametrů – např. metoda nejmenších čtverců, metoda maximální věrohodnosti (MLE) či grafická metoda využívající Weibullova pravděpodobnostního grafu. Dále bude uveden rozbor metody odhadu parametrů pomocí Weibullova pravděpodobnostního grafu, z něhož se dá vizuální kontrolou určit, zda je pro danou problematiku možné použít Weibullova rozdělení. [10]

Dříve než jsou data zakreslena do pravděpodobnostního grafu, musí dojít k jejich uspořádání dle časového sledu. Hodnoty měřených veličin si rozdělíme do skupin dle úrovně namáhání. Osy Weibullova pravděpodobnostního grafu mají měřítko transformovaná pomocí přirozeného logaritmu. Tak docílíme toho, že nelineární kumulativní distribuční funkce přechází v lineární. Data o dobách do poruchy se vynášejí na osu X. Na osu Y se vynáší prostřední hodnota (median rank). U výběru nad 30 subjektů je prakticky shodná s procentem poruch. V případě, že není k dispozici tabulka prostředních hodnot, je na osu y vynášena kumulativní pravděpodobnost ve dvojitým logaritmicím měřítku dle vzorce

$$\ln(-\ln(1-F(t))), \quad (3.7)$$

kde pro  $F(t)$  je použita tzv. Benardova aproximace

$$F(t)_i = \left( \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \right), \quad (3.8)$$

kde  $n$  je celkový rozsah výběru a  $i$  je pořadová hodnota vybrané pozice. [9]

Ve výsledném grafu se data proloží lineární spojnicí trendu. Pokud hodnoty leží v jedné přímce se spojnicí, lze říci, že jejich rozdělení je možné modelovat pomocí Weibullova rozdělení. Parametry tvaru  $\beta$  a měřítko  $\eta$  se následně určí z regresní rovnice proložené přímkou, kde  $\beta$  je převrácenou hodnotou směrnice přímky a  $\eta$  je exponenciální hodnotou jejího absolutního členu. [9]

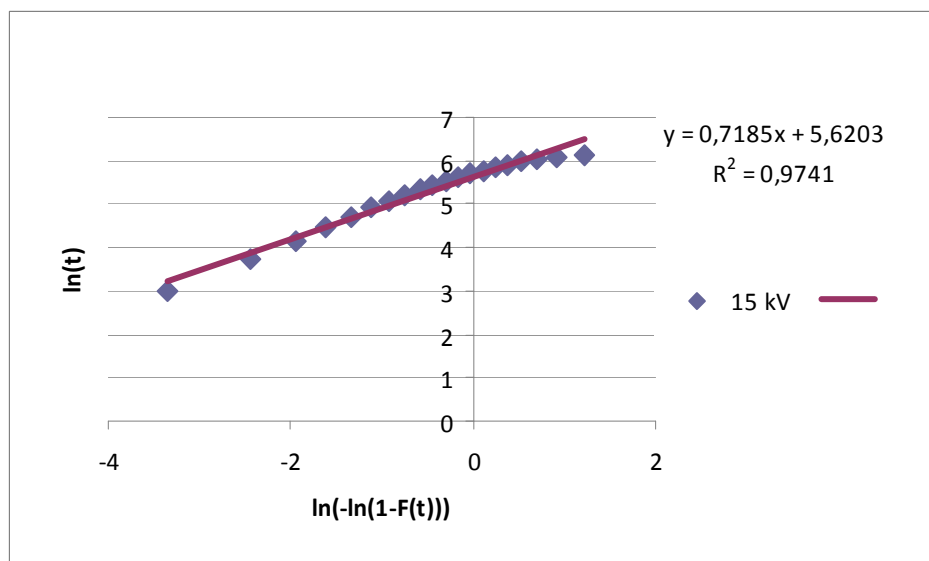
## 4 Vyhodnocení naměřených dat

Jak již bylo uvedeno v úvodu, budou v této práci vyhodnocovány soubory s náhodnými hodnotami reprezentující dobu do průrazu v závislosti na zatížení. Tabulky obsahující seřazená data o dobách do průrazu, vypočtené hodnoty Benardovy aproximace a kumulativní pravděpodobnosti jsou uvedeny v příloze.

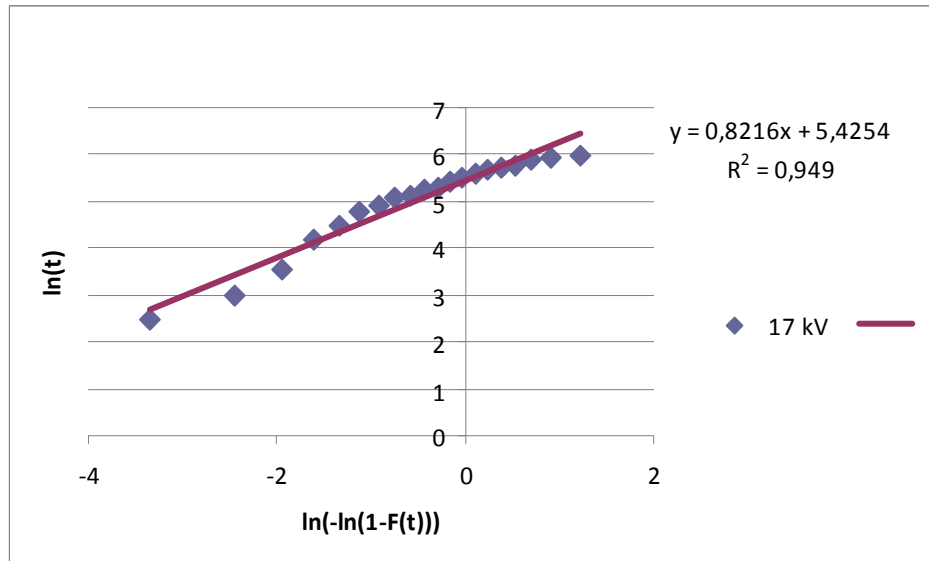
V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty odhadnutých parametrů  $\beta$  a  $\eta$ , velikost korelačního koeficientu  $R^2$  v závislosti na úrovních zkušebních napětí 15 kV, 17 kV a 18 kV.

**Tabulka 4.1 - Odhady parametrů v závislosti na zatížení**

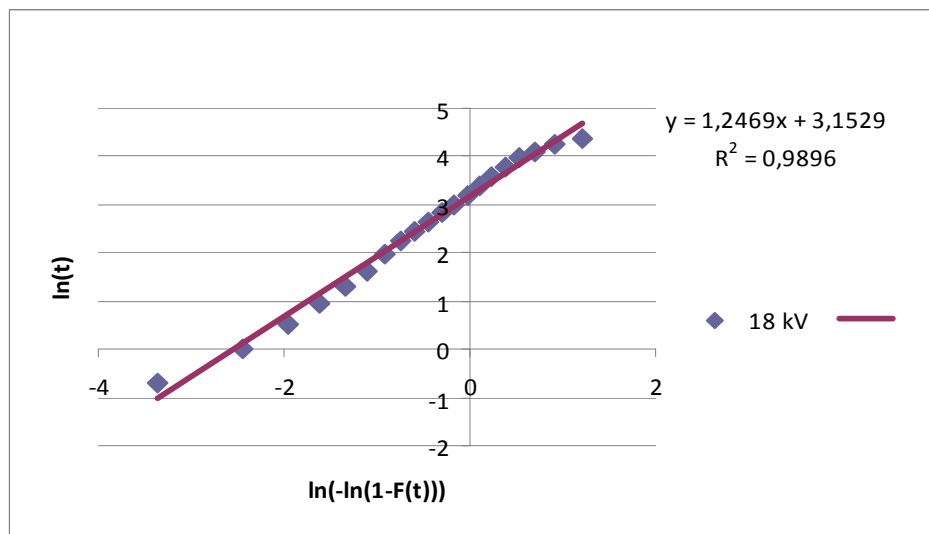
Úroveň zatížení	Odhadnutý parametr $\beta$	Odhadnutý parametr $\eta$	Korelační koeficient $R^2$
15 kV	1,3917	275,9722	0,9741
17 kV	1,2171	227,1022	0,9490
18 kV	0,8019	23,427	0,9896



**Graf 4.1 - Pravděpodobnostní graf pro hodnotu zatížení 15 kV**

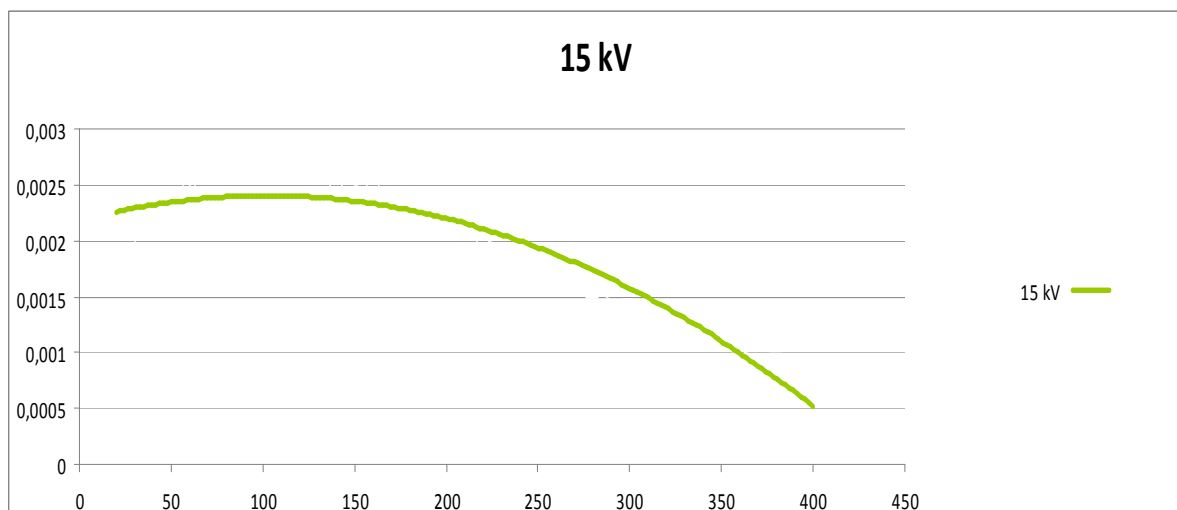


Graf 4. 2 - Pravděpodobnostní graf pro hodnotu zatížení 17 kV

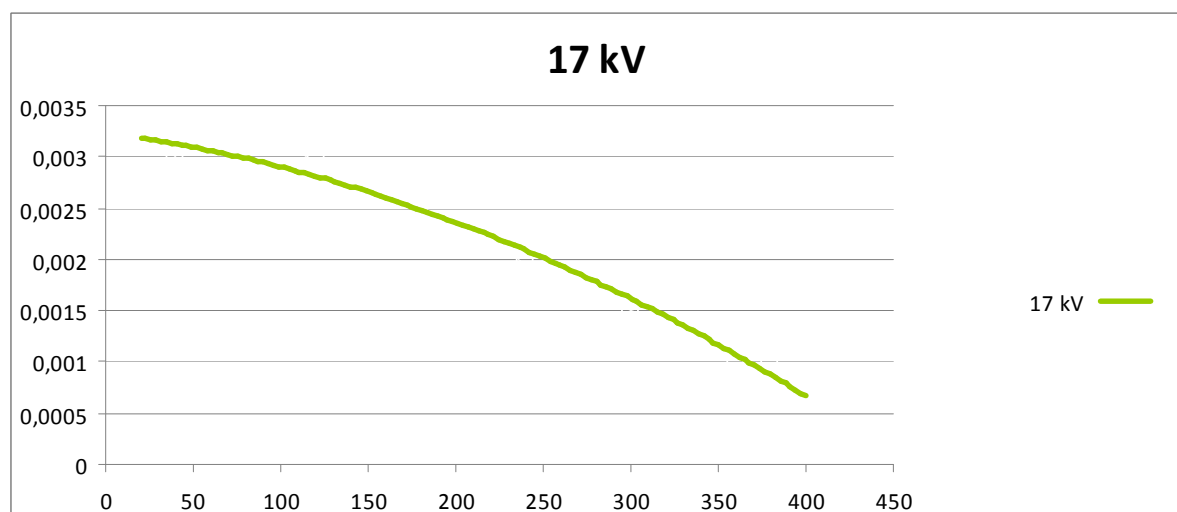


Graf 4. 3 - Pravděpodobnostní graf pro hodnotu zatížení 18 kV

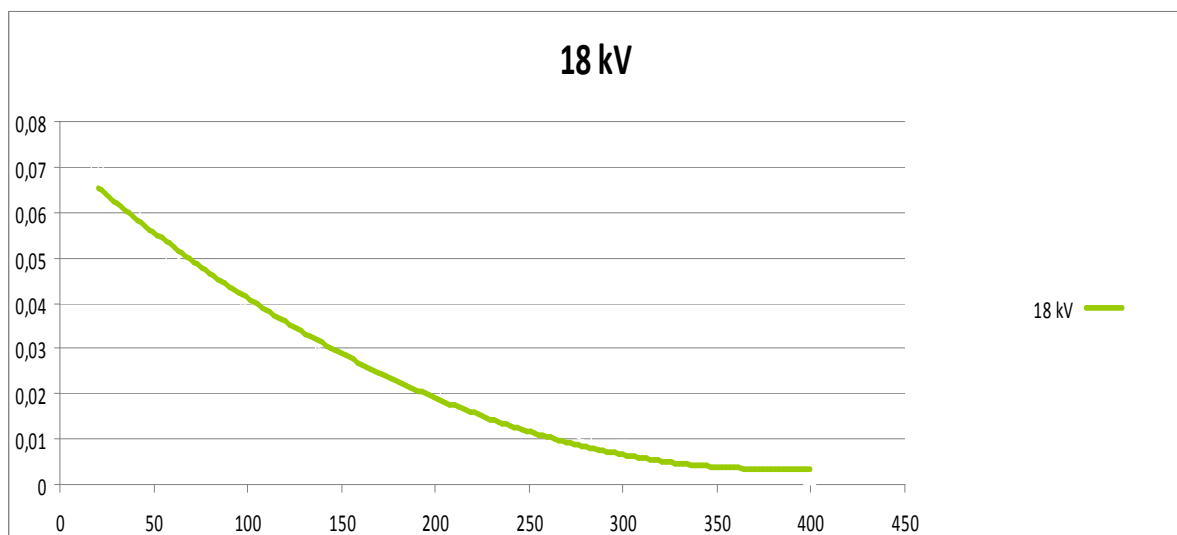
Z tabulky 4.1 a z grafů 4.1, 4.2 a 4.3 je patrné, že data aproximovaná lineární funkcí leží v jedné přímce, tudíž lze na danou problematiku použít Weibullova rozdělení. Z odhadu parametrů vypývá, že pro úroveň zatížení 15 a 17 kV je okamžitá intenzita poruch mírně větší než jedna, tudíž její charakter je zvyšující se. Naopak pro úroveň zatížení 18 kV je hodnota okamžité intenzity poruch menší než jedna a má tak klesající charakter. [9]



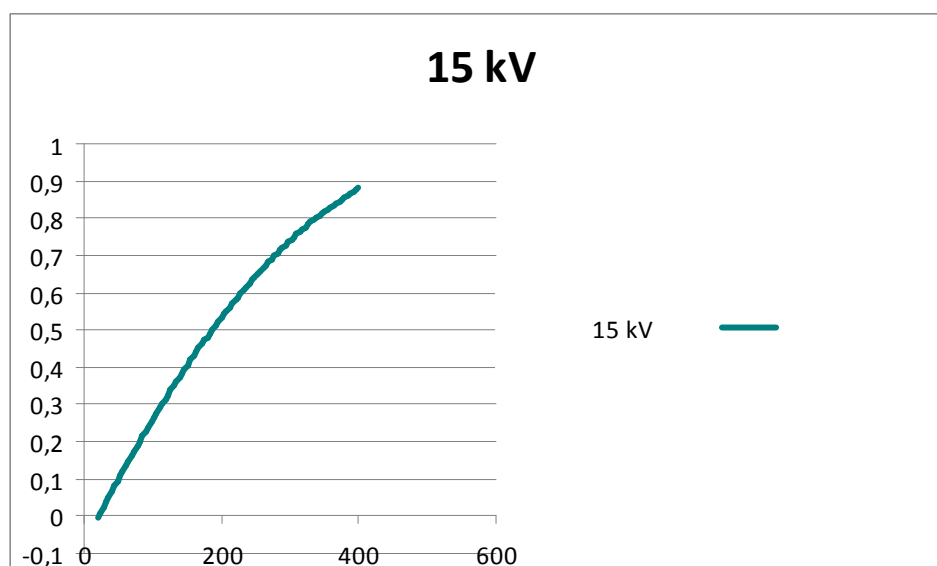
**Graf 4. 4 - Funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro hodnotu zatížení 15 kV**



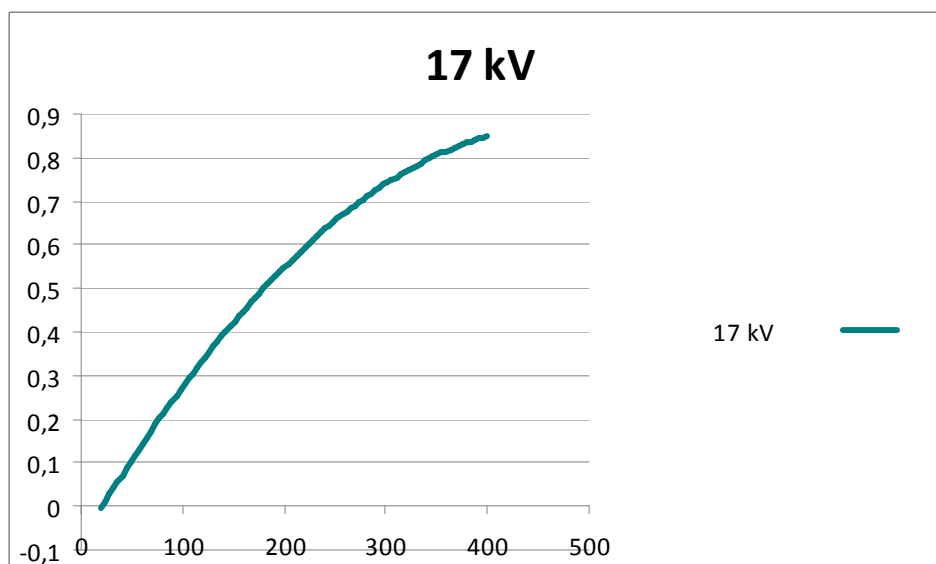
**Graf 4. 5 - Funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro hodnotu zatížení 17 kV**



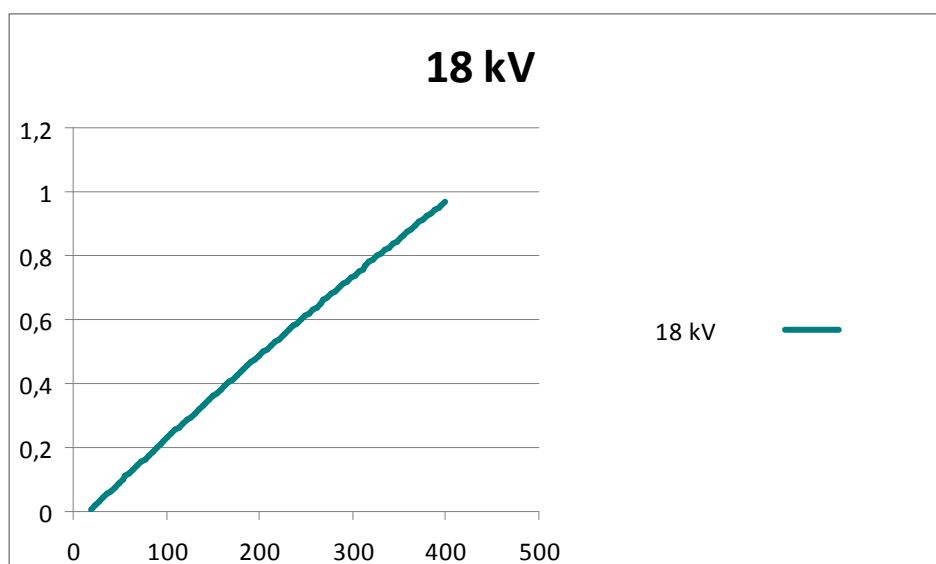
**Graf 4. 6 - Funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro hodnotu zatížení 18 kV**



**Graf 4. 7 - Kumulativní distribuční funkce pro hodnotu zatížení 15 kV**



Graf 4. 8 - Kumulativní distribuční funkce pro hodnotu zatížení 17 kV



Graf 4. 9 - Kumulativní distribuční funkce pro hodnotu zatížení 18 kV

---

## 5 Závěr

Tato diplomová práce pojednává o problematice negativních vlivů na elektroizolační systém a o způsobech vyhodnocení účinků uvedených degradačních mechanismů.

V první části předkládané diplomové práce byly teoreticky popsány degradační vlivy působící na elektroizolační materiály. Byly zde definovány modely elektrického, tepelného a mechanického stárnutí a vysvětleny způsoby průrazu elektrického, tepelného a elektrochemického charakteru. Uvedené rozdělení teplotní klasifikace izolantů bylo využito v další kapitole při popisu různých teplot zrychleného stárnutí v závislosti na provozní teplotě.

Druhá kapitola obsahovala popis metody zrychleného stárnutí teplotou s využitím Arrheniovy rovnice. Byl zde popsán výpočet rychlostní konstanty a její grafické znázornění v závislosti na teplotě. Dalším grafem bylo ukázáno, jak teplota stárnutí ovlivňuje dobu životnosti materiálu a jak se pro daný koncový bod určí vhodná teplota stárnutí.

V případě měření veličin negativně ovlivňující vlastnosti elektroizolačního materiálu byly v této kapitole představeny dva příklady destruktivního a nedestruktivního způsobu měření. U destruktivního přístupu byla popsána metoda měření průrazného napětí a doby do průrazu v závislosti na charakteru přiloženého napětí. Z ekonomického hlediska jsou takové zkoušky náročné, proto pro druhý způsob nedestruktivního testování bylo zvoleno měření ztrátového činitele.

Ve třetí kapitole pojednávající o statistickém vyhodnocení degradačních vlivů byla popsána metoda, která se pro danou problematiku nejčastěji využívá – Weibullovo rozdělení. Zpracování tohoto tématu si kladlo důraz na komplexnost popisu celé metody tak, aby jednotlivé kroky, používané při následném vyhodnocování konkrétních dat, byly srozumitelně a jednoznačně vysvětleny. Pro odhad parametrů Weibullova rozdělení byla použita metoda Weibullova pravděpodobnostního grafu. Tato metoda nám poskytuje přehledný popis celé problematiky a poskytuje věrohodný odhad daných parametrů.



Čtvrtá kapitola obsahuje statistické zhodnocení konkrétních dat. Jednotlivé skupiny vzorků jsou rozděleny dle úrovně zatížení zkušebního napětí. Pro tato data jsou zde uvedeny a graficky znázorněny pravděpodobnostní průběhy zkoumaných veličin pro hodnoty zatížení 15, 17 a 18 kV. Z dat vyplývá, že pro úrovně zatížení 15 a 17 kV se okamžitá intenzita poruch v čase zvyšuje. Pro hodnotu 18 kV je její charakter naopak klesající.

---

## Seznam literatury

- [1] Hassdenteufel J., Květ K.: Elektrotechnické materiály. SNTL, 1967
- [2] MENTLÍK, Václav, Pavel TRNKA, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ a Pavel PROSR. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] TŮMOVÁ, Olga. *Metrologie a hodnocení procesů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 231 s. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [4] MAREK, Vlastimil. <http://www.vscht.cz/uchi/ped/bi/09.pdf>. [online]. [cit. 2013-11-08]. DOI: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/bi/09.pdf>.
- [5] [online]. [cit. 2014-01-10]. Dostupné z: <http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/HighVoltageEngg/lecture26/slide3.htm>
- [6] MENTLÍK, V., P. TRNKA, J. PIHERA a O. TÁBOŘÍK. Strukturální změna izolačního kompozitu.[online].[cit.2014-01-0].Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/83890/AEEE-2008-7-3-432-mentlik.pdf?sequence=1>
- [7] MARTIN, Tomáš. Veličiny a vztahy v nauce o dielektrikách. [online]. 2009 [cit. 2014-01-10]. Dostupné z: <http://dielektrika.kvalitne.cz/zaklad.html>
- [8] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [9] ČSN EN 61649. *Weibullova analýza*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [10] NOVOTNÝ, Radovan. Weibullovo rozdělení při analýzách bezporuchovosti. In: [online]. *Elektrorevue*, 2002 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02017/index.html>
- [11] ČSN EN 60216. *Elektroizolační materiály: Vlastnosti tepelné odolnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [12] ČSN EN 60505. *Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

---

## Seznam grafů, tabulek a obrázků

Tabulka 1.1 - Hodnoty elektrické pevnosti izolačních materiálů [7].....	12
Tabulka 1.2 - Teplotní klasifikace izolačních materiálů [8].....	13
Tabulka 2. 1- Preferované teploty v závislosti na tepelných třídách[11].....	21
Tabulka 2. 2 - Průběhy stárnutí materiálu v závislosti na působících faktorech [11].....	22
Tabulka 2. 3- Mezní hodnoty ztrátového činitele.....	28
Tabulka 4.1 - Odhady parametrů v závislosti na zatížení 34	
Graf 3. 1 - Funkce hustoty pravděpodobnosti pro různé hodnoty $\beta$ .....	31
Graf 4. 1 - Pravděpodobnostní graf pro hodnotu zatížení 15 kV.....	34
Graf 4. 2 - Pravděpodobnostní graf pro hodnotu zatížení 17 kV.....	35
Graf 4. 3 - Pravděpodobnostní graf pro hodnotu zatížení 18 kV.....	35
Graf 4. 4 - Funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro hodnotu zatížení 15 kV.....	36
Graf 4. 5 - Funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro hodnotu zatížení 17 kV.....	36
Graf 4. 6 - Funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro hodnotu zatížení 18 kV.....	37
Graf 4. 7 - Kumulativní distribuční funkce pro hodnotu zatížení 15 kV.....	37
Graf 4. 8 - Kumulativní distribuční funkce pro hodnotu zatížení 17 kV.....	38
Graf 4. 9 - Kumulativní distribuční funkce pro hodnotu zatížení 18 kV.....	38

## Seznam příloh

Příloha 1- Hodnoty pro zatížení 15 kV .....	44
Příloha 2- Hodnoty pro zatížení 17 kV .....	45
Příloha 3- Hodnoty pro zatížení 18 kV .....	46

## Přílohy

### Příloha 1- Hodnoty pro zatížení 15 kV

Pořadí vzorku	Doba do průrazu	Benardova aproximace F(t)	$\ln(-\ln(1/F(t)))$	$\ln(t)$
1	20	0,034313725	-3,354802509	2,995732274
2	41	0,083333333	-2,441716399	3,713572067
3	64	0,132352941	-1,952137671	4,158883083
4	88	0,181372549	-1,608807204	4,477336814
5	108	0,230392157	-1,339891087	4,682131227
6	136	0,279411765	-1,115695152	4,912654886
7	160	0,328431373	-0,920953918	5,075173815
8	183	0,37745098	-0,746689513	5,209486153
9	205	0,426470588	-0,587084006	5,323009979
10	228	0,475490196	-0,438053654	5,429345629
11	250	0,524509804	-0,296508894	5,521460918
12	278	0,573529412	-0,159920103	5,627621114
13	300	0,62254902	-0,026021058	5,703782475
14	322	0,671568627	0,107442983	5,774551546
15	346	0,720588235	0,24300008	5,846438775
16	369	0,769607843	0,383882124	5,910796644
17	390	0,818627451	0,534855821	5,966146739
18	414	0,867647059	0,704227134	6,025865974
19	438	0,916666667	0,910235093	6,08221891
20	467	0,965686275	1,21556827	6,146329258

**Příloha 2- Hodnoty pro zatížení 17 kV**

Pořadí vzorku	Doba do průrazu	Benardova aproximace F(t)	$\ln(-\ln(1-F(t)))$	$\ln(t)$
1	12	0,034313725	-3,354802509	2,48490665
2	20	0,083333333	-2,441716399	2,995732274
3	34	0,132352941	-1,952137671	3,526360525
4	65	0,181372549	-1,608807204	4,17438727
5	90	0,230392157	-1,339891087	4,49980967
6	121	0,279411765	-1,115695152	4,795790546
7	135	0,328431373	-0,920953918	4,905274778
8	159	0,37745098	-0,746689513	5,068904202
9	168	0,426470588	-0,587084006	5,123963979
10	187	0,475490196	-0,438053654	5,231108617
11	201	0,524509804	-0,296508894	5,303304908
12	230	0,573529412	-0,159920103	5,438079309
13	248	0,62254902	-0,026021058	5,513428746
14	267	0,671568627	0,107442983	5,587248658
15	286	0,720588235	0,24300008	5,655991811
16	301	0,769607843	0,383882124	5,707110265
17	320	0,818627451	0,534855821	5,768320996
18	358	0,867647059	0,704227134	5,880532986
19	378	0,916666667	0,910235093	5,934894196
20	390	0,965686275	1,21556827	5,966146739

**Příloha 3- Hodnoty pro zatížení 18 kV**

Pořadí vzorku	Doba do průrazu	Benardova aproximace		
		F(t)	$\ln(-\ln(1/F(t)))$	$\ln(t)$
1	0,5	0,034313725	-3,354802509	-0,69314718
2	1	0,083333333	-2,441716399	0
3	1,7	0,132352941	-1,952137671	0,530628251
4	2,6	0,181372549	-1,608807204	0,955511445
5	3,7	0,230392157	-1,339891087	1,30833282
6	5	0,279411765	-1,115695152	1,609437912
7	7,1	0,328431373	-0,920953918	1,960094784
8	9,5	0,37745098	-0,746689513	2,251291799
9	11,7	0,426470588	-0,587084006	2,459588842
10	14	0,475490196	-0,438053654	2,63905733
11	16,9	0,524509804	-0,296508894	2,827313622
12	20	0,573529412	-0,159920103	2,995732274
13	24,5	0,62254902	-0,026021058	3,198673118
14	29,6	0,671568627	0,107442983	3,387774361
15	36	0,720588235	0,24300008	3,583518938
16	44,5	0,769607843	0,383882124	3,795489189
17	52,4	0,818627451	0,534855821	3,958906591
18	60	0,867647059	0,704227134	4,094344562
19	69,1	0,916666667	0,910235093	4,235554731
20	80	0,965686275	1,21556827	4,382026635