

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

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

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**
Zadávající 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. Proveďte vyhodnocení dob do průrazu pomocí statistických rozdělení
4. Vypracujte návrh postupu pro vyhodnocování naměřených dat
5. Zhodnoťte vhodnost jednotlivých přístupů pro analýzu degradačních mechanismů

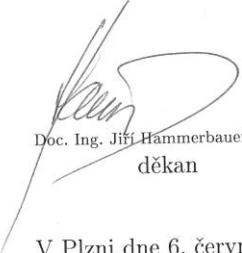


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


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: **6. června 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **25. srpna 2014**


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




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. června 2014

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 25.8.2014

Jméno a příjmení

.....

Poděkování

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

Obsah

Seznam symbolů a značek.....	12
1 Degradací mechanismy u elektroizolačních materiálů	13
1.1 Elektrická pevnost	13
1.2 EIS a EIM.....	14
1.3 Degradací mechanismy u EIS	15
1.4 Tepelné stárnutí	16
1.5 Tepelný průraz.....	17
1.6 Elektrický průraz	17
1.7 Metoda zrychleného stárnutí	19
2 Statistické metody pro vyhodnocování degradačních vlivů	22
2.1 Charakteristiky polohy a rozptýlení	23
2.1.1 Aritmetický průměr	23
2.1.2 Střední hodnota	24
2.1.3 Rozptyl	24
2.1.4 Směrodatná odchylka	25
2.1.5 Variační koeficient	25
2.1.6 Medián.....	25
2.2 Normální rozdělení.....	27
2.3 Lognormální rozdělení	28
2.4 Weibullovo rozdělení	30
2.5 Dvouparametrické Weibullovo rozdělení	31
2.6 Odhad parametrů Weibullova rozdělení.....	33
2.6.1 Weibullův pravděpodobnostní graf.....	33
2.6.2 Metoda maximální věrohodnosti.....	34
3 Návrh postupu pro vyhodnocení naměřených dat.....	36
3.1 Příprava vzorků	36
3.2 Měření vzorků	37
3.3 Statistická charakteristika naměřených dat	41
4 Vyhodnocení naměřených dat.....	43
4.1 Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce normálního rozdělení pro naměřená data 44	
4.2 Distribuční funkce lognormálního rozdělení pro naměřená data	47
4.3 Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce Weibullova rozdělení pro naměřená data 49	
5 Závěr	52
Seznam literatury.....	55
Přílohy	58

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.

Obsahem druhé kapitoly je teoretický popis statistických charakteristik. Tyto charakteristiky jsou hlavními ukazateli při klasifikaci souborů sledovaných dat. Dále jsou zde uvedena statistická rozdělení, která jsou následně využita k modelování naměřených dat.

Ve třetí kapitole je popsán postup při přípravě, měření a statistické klasifikaci testovaných vzorků. Jsou zde uvedeny druhy zkoušek, jež byly využity k získání požadovaných dat.

Obsahem poslední kapitoly je statistické vyhodnocení naměřených dat. Je zde uveden odhad parametrů Weibullova rozdělení pomocí metody MLE a Weibullova pravděpodobnostního grafu. Dále jsou zde naměřená data vyhodnocena pomocí několika statistických rozdělení.

V závěru je poté zhodnocena vhodnost přístupu při experimentálním ověřování vlastností elektroizolačního systému.

Seznam symbolů a značek

E_p	<i>Elektrická pevnost</i>	<i>Electric density</i>
U_p	<i>Průrazné napětí</i>	<i>Breakdown voltage</i>
d	<i>Tloušťka dielektrika</i>	<i>Thickness of the dielectric</i>
EIS	<i>Elektroizolační systém</i>	<i>Electrical Insulating System</i>
EIM	<i>Elektroizolační materiál</i>	<i>Electrical Insulating Material</i>
E	<i>Intenzita elektrického pole</i>	<i>Electric field intensity</i>
τ	<i>Doba života materiálu</i>	<i>Material lifetime</i>
A	<i>Předexponenciální faktor</i>	<i>Preexponential factor</i>
E_a	<i>Aktivační energie</i>	<i>Activation energy</i>
R	<i>Univerzální plynová konstanta</i>	<i>Universal gas constant</i>
T	<i>Teplota</i>	<i>Temperature</i>
k	<i>Rychlostní konstanta</i>	<i>Rate constant</i>
TI	<i>Index teploty</i>	<i>Temperature index</i>
HIC	<i>Půlící faktor</i>	<i>Halving interval</i>
$tg\delta$	<i>Ztrátový činitel</i>	<i>Dissipation factor</i>
η	<i>Parametr měřítka</i>	<i>Scale parameter</i>
RTE	<i>Index teplotní odolnosti</i>	<i>Index of temperature resistance</i>
β	<i>Parametr tvaru</i>	<i>Shape parameter</i>
λ	<i>Parametr polohy</i>	<i>Position parameter</i>
$h(t)$	<i>Hazardní funkce</i>	<i>Hazard function</i>
$R(t)$	<i>Funkce bezporuchovosti</i>	<i>Reliability function</i>
n	<i>Celkový rozsah výběru</i>	<i>Total sample size</i>
i	<i>Pořadová hodnota vybrané pozice</i>	<i>Setpoint position</i>
R^2	<i>Korelační koeficient</i>	<i>Cerrelation coefficient</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 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]

Materiál	Elektrická pevnost [kV/mm]
Vzduch	20 – 30
Pryskyřičný olej	200
Silikonový olej	150
Sklo	500
Parafín	250
Porcelán	340 – 380
Slída - flogopit	600
Přírodní asfalt	300
Kaučuk	150
Tvrdá pryž	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 Degradální mechanismy u EIS

Elektroizolační systém se obvykle skládá z několika komponent vybraných tak, aby odolaly různému druhu namáhání v různých částech konstrukce zařízení. Životnost takového zařízení závisí na uspořádání jednotlivých komponent a na jejich vzájemné interakci. V kontrastu s dřívějším důrazem na teplotní odolnost izolace, je dnes potřeba uvažovat vzájemné degradační vlivy na vlastnosti jednotlivých součástí zařízení. [16]

Mechanické namáhání může být způsobeno spínáním zařízení, např. motoru či transformátoru. Spínací proudy v tomto okamžiku mohou dosahovat několikanásobku proudu jmenovitého. To způsobí nárůst elektromagnetické indukce a s tím spojený nárůst mechanické síly na jednotlivé části zařízení. Pokud dochází ke spínacím dějům s vysokou četností, může to vést až k mechanickému poškození zařízení. [16]

Podobným případem mohou být u transformátoru poruchové proudy, které jsou způsobeny mechanickým poškozením závitů. V případě nárůstu proudu dochází ke zvýšení teploty v exponovaném místě a ke snížení teplotní odolnosti izolace. K tomu dochází v místech, kde elektroizolační materiál není schopen odvádět tolik tepla kolik je ho generováno. V tomto místě dochází k postupnému ohřevu až do kritické teploty izolace. Po překročení této hodnoty dochází k průrazu. [8] [16]

Dalším faktorem ovlivňujícím vlastnosti elektroizolace je vlhkost. Ve chvíli, kdy je elektroizolační materiál vystaven prostředí se zvýšenou vlhkostí, dochází k absorpci vlhkosti ve struktuře materiálu. Tím se snižuje izolační odpor materiálu. Vlhkost vniká do trhlin a póru izolace, vytváří vodivé cesty pro povrchové proudy a tím zkracuje životnost izolace. Stejně tak chemické výpary kyselin či louhů mohou trvale snížit elektrickou odolnost materiálu. [16]

V případě přepětí a vzniku koróny se vzduch rozkládá na ozon, který urychluje oxidaci organických částí izolace a na oxidy dusíku, jež v kombinaci s vlhkostí produkují kyseliny, jež po kontaktu s materiálem zhoršují jeho vlastnosti a výrazně zkracují jeho životnost. [16]

K dalším strukturálním změnám v materiálu dochází působením dalších faktorů, jako je přítomnost prachu, znečišťujících látek, radiace apod. 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 kapalně těkavé produkty. Při výbojích vzniká světelné a ultrafialové záření, které má vyšší energii na vyvolání chemických degradačních reakcí. O tom, do jaké míry se účinek výbojové činnosti uplatní, rozhoduje struktura daného izolantu, chemické složení, intenzita a délka působení výbojové činnosti. [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

1.4 Tepelné stárnutí

Teplotní odolnost materiálů je ovlivněna opakujícím se působením zvýšené teploty. Tímto dochází k mechanickému poškození izolace, mechanická odolnost organických materiálů klesá a může dojít k elektrické poruše zařízení v důsledku fyzického rozpadu izolačních materiálů. Teplotní odolnost 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. Teplotní třídy jsou určeny normou ČSN EN 60085 „Elektrická izolace – Teplotní klasifikace“. Teplotní třídou je označení EIM/EIS, které je číselně rovno maximální teplotě ve °C, pro kterou je EIS/EIM vhodný. Dalším parametrem je tzv. relativní index teplotní 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.

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]

1.5 Tepelný průraz

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 (depolymerizační reakce, difúze atd.), tím ke zvýšení jeho elektrické vodivosti a následnému k průrazu. [2] [8]

1.6 Elektrický průraz

Na rozdíl od plyných či kapalných izolantů, u nichž po přeskoce 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. [8][2]

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 :

$$\tau = k \cdot E^{-n} . \quad (1.1)$$

Exponenciální model :

$$\tau = a \cdot b^{-bE} , \quad (1.2)$$

kde τ 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]

1.7 Metoda zrychleného stárnutí

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 (1.3)[11]:

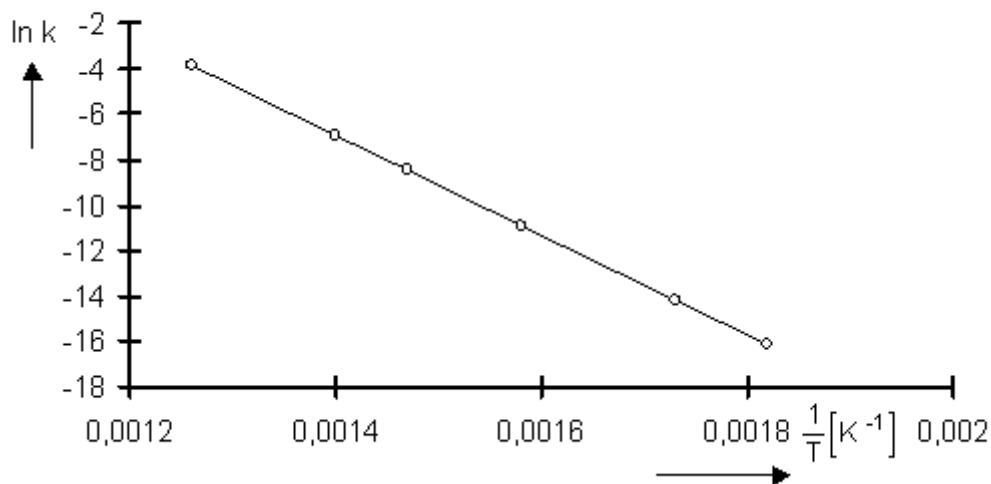
$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1.3)$$

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 (1.3) 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 zdvojnásobí až zčtyřnásobí při zvýšení teploty o 10K. Aktivační energii reakce lze zjistit z experimentálních výsledků na základě zlogaritmované formy Arrheniovy rovnice (1.4)[11]:

$$\ln k = -\frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln A \quad (1.4)$$

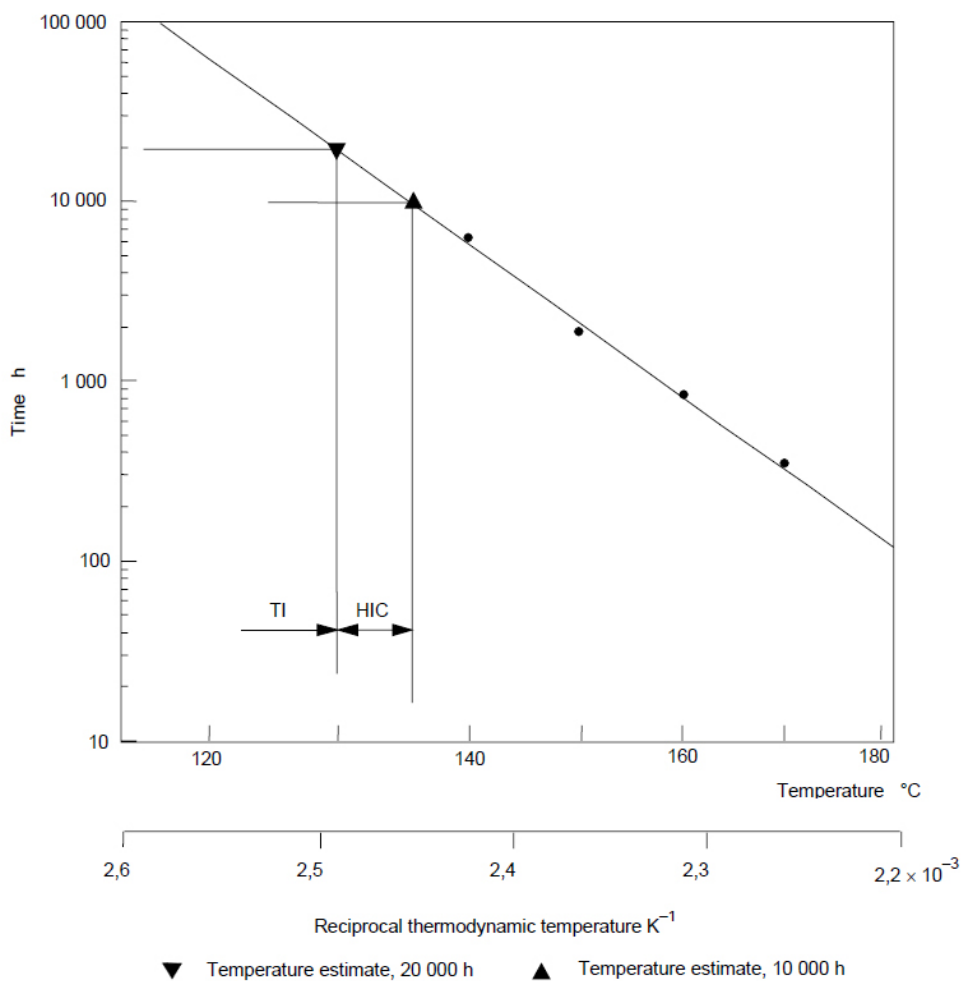
Grafem závislosti $\ln k$ na $1/T$ je přímka, její směrnice je rovna $-E_a/R$ (obr 1.1). Po dosazení do rovnice (1.4) získáme předexponenciální faktor. [11]



Obrázek 1.1 -Závislost hodnoty logaritmu rychlostního koeficientu na $1/T$ – převzato z [11]

- 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 půlicího intervalu HIC. [11]

Graf životnostní křivky v závislosti na teplotě stárnutí je uveden na obr. 1.2., kde TI je numerická hodnota teploty odvozená z vytrvalostních vztahů, při níž se dosáhne požadovaného koncového bodu 20 000h a hodnota HIC, vyjadřující polovinu hodnoty teploty TI. [11]



Obrázek 1.2 - Závislost hodnoty logaritmu rychlostního koeficientu na $1/T$ – převzato z [11]

Zrychlené stárnutí se využívá především z hlediska ekonomického a časového. Nejedná se pouze o stárnutí zvýšenou teplotou, ale také např. zvýšenou hodnotou napětí, proudu apod. Pro účely této práce bylo na testovaných vzorkách provedeno zrychlené stárnutí pomocí zvýšeného napětí. [14]

2 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]

2.1 Charakteristiky polohy a rozptýlení

Nejprve je nutné si uvědomit, jakého charakteru jsou data, jež chceme z hlediska spolehlivosti statisticky vyhodnotit. Existují dvě hlediska, jak na danou problematiku pohlížet – pravděpodobnostní počet a matematická statistika. Sledujeme tak buď deterministické nebo náhodné stochastické jevy. Dále je potřebné vymezit zda námi požadovaná statistická data získáme úplným nebo výběrovým přístupem. Neboli musíme určit, zda budeme na působení určitého faktoru testovat celý soubor vzorků nebo stačí-li provést měření pouze na náhodně vybrané skupině vzorků ze souboru a následně výsledky testu extrapolovat. [13]

Tak, aby bylo možné rozhodnout, který z přístupů bude vhodnější, je nutné mít představu o dějích probíhajících v testovaném materiálu a zda se dají tyto vlivy zobecnit pro celou skupinu vzorků. Je také nutné zohlednit ekonomické hledisko, obzvláště u zkoušek destruktivních. [14]

Pro tyto úvahy je vhodné si určit tzv. statistické charakteristiky. Jejich pomocí se dají popsat změny sledovaného statistického znaku. Dále slouží k porovnání různých statistických souborů. Matematická statistika využívá charakteristiky polohy, variability, centrální momenty a kombinované ukazatele. [13]

Na datový soubor naměřených dat byly v této práci použity statistické charakteristiky, které budou vysvětleny dále.

2.1.1 Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je statistickou veličinou popisující charakteristickou hodnotu v souboru mnoha dat. Je velmi často využíván chybně. Je například nevhodné, využívat při nerovnoměrném rozložení hodnot znaku kolem jeho hodnoty. Jedná se o to, že jedna extrémní hodnota z datového souboru, může ovlivnit průměrnou hodnotu zcela nevhodným způsobem. Rovnice pro výpočet aritmetického průměru je uvedena pod textem (2.1) [13].

$$\bar{x}_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

2.1.2 Střední hodnota

Dalším statistickým ukazatelem je střední hodnota. Jedná se o nejznámější charakteristiku polohy ve statistice. Je definována jako vážený průměr daného rozdělení (2.2) [13]

$$E(x) = \bar{x} = \int_A^B x dP(x) \quad (2.2)$$

kde P je pravděpodobnostní míra určující rozdělení náhodné veličiny x . Pokud výraz na pravé straně nekonverguje absolutně, pak říkáme, že střední hodnota neexistuje.

2.1.3 Rozptyl

Rozptyl vyjadřuje variabilitu rozdělení souboru hodnot kolem její střední hodnoty. Je definován jako střední hodnota druhých mocnin odchylek od střední hodnoty. [13]

Pro diskrétní náhodnou veličinu je rozptyl určen následovně

$$\sigma^2(x) = \sum_{i=1}^n [x_i - E(x)]^2 p_i \quad (2.3)$$

kde p_i je pravděpodobnost nabytí x_i .

Pro spojitou náhodnou veličinu je poté rozptyl definován dle následujícího vztahu

$$\sigma^2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(x)]^2 f(x) dx \quad (2.4)$$

Dalšími termíny, které je vhodné zavést, jsou směrodatná odchylka a variační koeficient.

2.1.4 Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka nám podobně jako rozptyl určuje, jak moc jsou hodnoty rozptýleny či odchýleny od průměru hodnot. Pokud je hodnota směrodatné odchylky malá, znamená to, že prvky v souboru dat jsou si navzájem podobné. Vypočítá se jako druhá odmocnina z rozptylu.

2.1.5 Variační koeficient

Variační koeficient má velký význam ve statistice, udává poměr směrodatné odchylky a absolutní hodnoty ze střední hodnoty. Čím menší je variační koeficient, tím lepší je kvalita souboru dat. [13]

$$v = \frac{\sigma}{|E(x)|} \quad (\text{příp. } 100\%) \quad (2.5)$$

2.1.6 Medián

Medián Me je prostřední hodnotou statistického znaku v souboru, pokud jsou data řazena dle velikosti. Jeho výhodou je, že není ovlivněn extrémními hodnotami. Hodnota mediánu rozděluje soubor dat na dvě poloviny, přičemž nejméně 50% je menších nebo rovno této hodnotě a nejméně 50% je větších nebo rovno. Využívá se tam, kde aritmetický průměr vrací nevhodné hodnoty. Teoreticky lze medián vyjádřit následovně.[13]

$$P(x \leq Me) \geq 0,5 \quad \text{a zároveň} \quad P(X \geq Me) \geq 0,5 \quad (2.6)$$

Uvedené statistické charakteristiky polohy a rozptýlení byly využity při zpracování souboru naměřených dat viz. kapitola 3 a příloha tab.2. Na základě těchto vypočtených hodnot je následně možné určit, které ze statistických rozdělení bude nejvhodnější k vyjádření naměřených dob do průrazu. Různá statistická rozdělení, jež byla v této práci využita

k interpretaci dat a porovnání vhodnosti jednotlivých přístupů, budou teoreticky vysvětlena dále.

2.2 Normální rozdělení

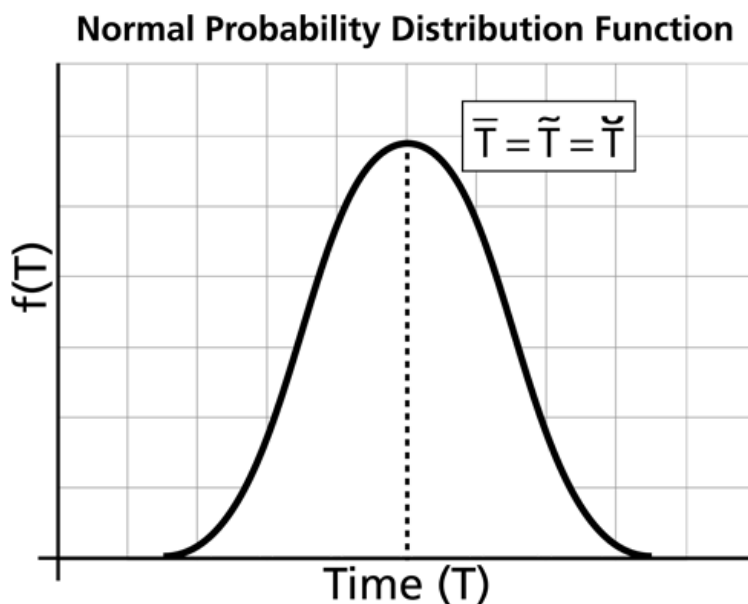
Normální rozdělení nebo Gaussovo rozdělení je nejpoužívanější a nejdůležitější rozdělení pro spojité náhodné veličiny. Dají se jím modelovat náhodné jevy přírodní, technické či sociální. Toto rozdělení vyjadřuje rozdělení hodnot kolem střední hodnoty. V praxi se toto rozdělení používá ke statistické interpretaci dob do poruchy stárnoucích prvků, prvků, které se opotřebovávají a za určitých podmínek dobře aproximuje jiná rozdělení. [13]

Normální rozdělení je jedno-vrcholové rozdělení okolo střední hodnoty viz obr. 2.1. Značí se $N(\mu, \sigma^2)$, z čehož vyplývá, že funkce má dva parametry. Parametr μ je střední hodnotou vyhodnocovaných dat. Parametr σ^2 je rozptyl náhodné veličiny a σ určuje šířku pásma, kde se náhodné veličiny X vyskytují s pravděpodobností $P = 68,268 \%$. Hustota pravděpodobnosti náhodného rozdělení má zvonovitý tvar – maxima dosahuje ve střední hodnotě. Vztah pro výpočet hustoty pravděpodobnosti je uveden pod textem (2.7). [13]

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.7)$$

Distribuční funkce normálního rozdělení má tvar (2.8) . [13]

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (2.8)$$

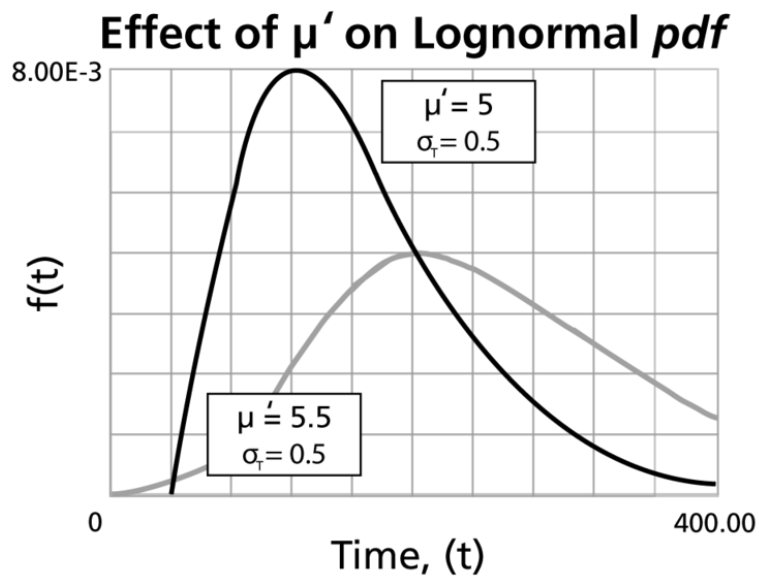


Obrázek 2.1 - Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení - převzato z [15]

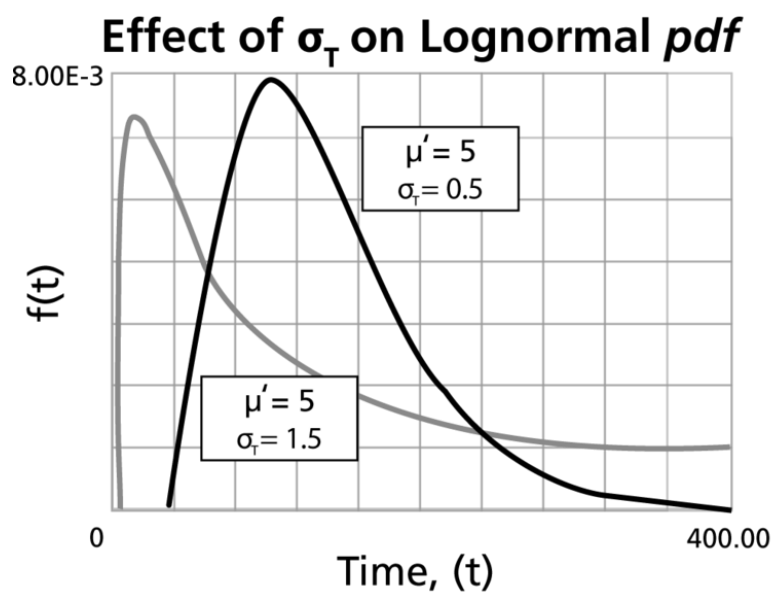
2.3 Lognormální rozdělení

Lognormální nebo také logaritmicke-normální rozdělení je nejrozšířenější alternativou rozdělení normálního pro jednostranně ohraničená data. Náhodná proměnná je lognormálně rozdělená v případě, že logaritmus náhodné proměnné je normálně distribuovaný. Logaritmicke-normálního rozdělení se obvykle využívá k modelování životnosti součástek, jejichž poruchovost je ovlivněna únavou materiálu. Vzhledem k tomu, že zahrnuje většinu, ne-li všechny mechanické systémy, má logaritmicke-normálního rozdělení široké uplatnění. Využívá se např. při modelování dob do opravy u udržovatelných systémů. Vliv změny parametrů μ a σ na tvar rozdělení je uveden na obr. 3.2. [15]

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.9)$$



Obrázek 2.2 - Vliv parametru μ na tvar křivky hustoty pravděpodobnosti lognormálního rozdělení - převzato z [15]



Obrázek 2.3 - Vliv parametru σ na tvar křivky hustoty pravděpodobnosti lognormálního rozdělení - převzato z [15]

2.4 Weibullovo 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. Dále byla na toto téma zpracována publikace „*The New Weibull Handbook*“ doktorem Robertem Abernethym, kde je tato problematika rozšířena a vysvětlena na příkladech. [9] [14]

Weibullovo rozdělení se používá v případech, kdy bezporuchovost závisí na stáří, počtu odpracovaných hodin nebo vykonaných provozních cyklů, např. vyhodnocování životnosti součástí 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 $W(\eta; \beta; \lambda)$, jestliže její distribuční funkce má tvar rovnice

$$F(t; \eta, \beta, \lambda) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t - \lambda}{\eta} \right)^\beta \right\} \quad \text{pro } t > \lambda, \quad (2.10)$$

$$F(t; \eta, \beta, \lambda) = 0 \quad \text{pro } t \leq \lambda \quad (2.11)$$

přičemž $\eta > 0$ je parametr měřítka, $\beta > 0$ parametr tvaru a λ 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]

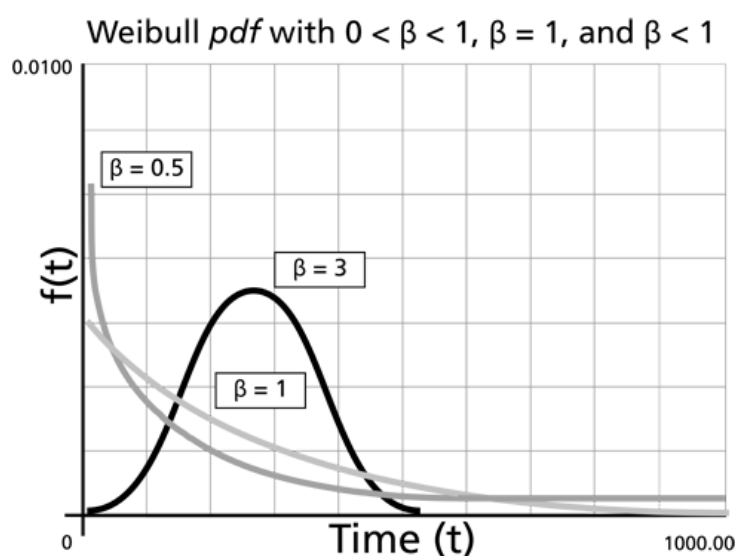
Při hodnocení bezporuchovosti uvažujeme zpravidla parametr polohy roven nule. Dále tedy budeme uvažovat dvouparametrické rozdělení.

2.5 Dvouparametrické Weibullovo rozdělení

Hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny s dvouparametrickým Weibullovo rozdělením má tvar

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}, \quad (2.12)$$

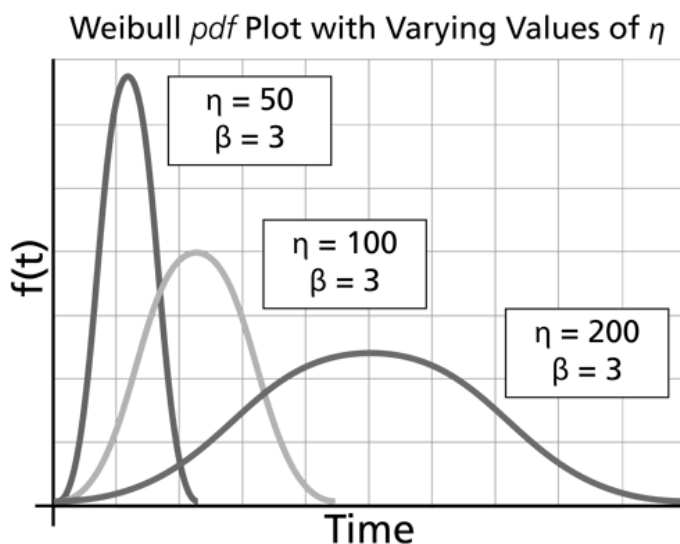
Kde hodnota t vyjadřuje dobu, vzdálenost, počet cyklů apod., η je parametr měřítka vyjadřující charakteristickou dobu života a β je parametr tvaru určující tvar výsledné křivky. Mezní hodnotou pro parametr β je hodnota 1, kdy je Weibullovo rozdělení shodné s rozdělením exponenciálním a okamžitá intenzita poruch se stává konstantou. Pro $\beta < 1$ se okamžitá intenzita snižuje a pro $\beta > 1$ se naopak zvyšuje. Grafické znázornění křivek hustoty pravděpodobnosti s různým parametrem β se nachází na obr. 2.4 pod textem. [10]



Obrázek 2.4 - Funkce hustoty pravděpodobnosti pro různé hodnoty β – převzato z [15]

Parametr měřítka η neboli charakteristická doba života, je hodnota, u níž očekáváme, že 63,2 % objektů bude mít poruchu. Platí bez ohledu na hodnotu parametru β . Pokud dochází k výměně objektů, očekává se, že 63,2 % dob do poruchy bude kratších nebo se bude rovnat hodnotě η . V případě, že parametr β bude konstantní a parametr η bude nabývat různých

hodnot, nebude se měnit tvar aktuálního rozdělení, ale změní se měřítko časové osy. Grafické znázornění křivek hustoty pravděpodobnosti s různým parametrem η se nachází na obr. 2.4. [9]



Obrázek 2.5 - Funkce hustoty pravděpodobnosti pro různé hodnoty η – převzato z [15]

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

$$x(t) = h(t) = \beta \cdot \frac{t^{\beta-1}}{\eta^\beta} . \quad (2.14)$$

Kumulativní distribuční funkce pro dvouparametrické Weibullovo rozdělení má tvar

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta} . \quad (2.15)$$

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,

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.16)$$

2.6 Odhad parametrů Weibullova rozdělení

Pro správné použití Weibullova rozdělení je nutné provést odhad jednotlivých parametrů. Existuje mnoho metod k odhadu parametrů – např. 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]

2.6.1 Weibullův pravděpodobnostní graf

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 měřítka 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 vynášejí 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 logaritmickém měřítku dle vzorce

$$\ln(-\ln(1 - F(t))), \quad (2.17)$$

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

$$F(t_i) = \left(\frac{i - 0,3}{n + 0,4} \right), \quad (2.18)$$

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 β a měřítka η se následně určí z regresní rovnice proložené přímkou, kde β je převrácenou hodnotou směrnice přímky a η je exponenciální hodnotou jejího absolutního členu. [9]

2.6.2 Metoda maximální věrohodnosti

Další metodou je metoda maximální věrohodnosti MLE (maximum likelihood estimation). Statistici preferují tuto metodu odhadu parametrů, protože MLE obecně vrací nejpresnější hodnoty parametrů. Jedná se o komplikovanou iterační metodu, kdy pro dvouparametrické rozdělení dostáváme tříparametrické kopcovité znázornění dat, kdy hodnoty odhadu leží v jeho vrcholu. [14]

V případě, že u všech testovaných vzorků v souboru došlo k poruše, lze metodu MLE obecně vyjádřit následujícími vztahy. [14]

$$L = \prod_{i=1}^n f(t_i) = f(t_1)f(t_2)\dots f(t_n) \quad (2.19)$$

kde n značí velikost souboru.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.20)$$

kde pro $F(t)$ platí vztah (2.15).

Na základě znalosti vztahu pro hustotu pravděpodobnosti (2.12) je možné definovat Weibullovu pravděpodobnostní funkci ve vztahu (2.21) [14].

$$L = \prod_{i=1}^n \left(\frac{\beta}{\eta} \right) \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.21)$$

Metoda maximální věrohodnosti odhadne hodnoty parametrů β a η maximalizací pravděpodobnostní funkce. V případě kompletního souboru vzorků, u nichž došlo k poruše, se odhad parametru β vyjádří z následující rovnice (2.22) [14].

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\beta}} \ln t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\beta}}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i - \frac{1}{\hat{\beta}} = 0 \quad (2.22)$$

kde symbol „ $\hat{\cdot}$ “ u parametru β vyjadřuje maximálně věrohodný odhad.

Parametr η se poté odhadne následovně (2.23) [14],

$$\hat{\eta} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\beta}}}{n} \right)^{\frac{1}{\hat{\beta}}} \quad (2.23)$$

kde opět symbol „ $\hat{\cdot}$ “ u parametru β a η vyjadřuje maximálně věrohodný odhad.

3 Návrh postupu pro vyhodnocení naměřených dat

V případě této diplomové práce byla k získání dat využita metoda měření dob do průrazu u transformátorové lepenky. Popis jak postupovat při experimentu využívající metodu zrychleného stárnutí pomocí zvýšeného napětí je uveden dále.

3.1 Příprava vzorků

Jednotlivé vzorky je důležité před samotným měřením připravit vhodným způsobem. Kromě prvotního rozstříhání vzorků na požadované rozměry je nutné změřit tloušťku každého vzorku. Tloušťku proměříme u každého vzorku na několika místech. Jelikož jednotlivé měřené hodnoty vykazovaly mírné odchylky, byly pro potřeby této práce zprůměrovány tyto hodnoty tak, aby bylo dosaženo univerzální tloušťky všech vzorků. Tento přístup zvolíme, chceme-li obecně proměřit a vyhodnotit vlastnosti určitého typu produktu. Pro přesnější vyhodnocení by bylo vhodné uvažovat u každého vzorku jeho skutečnou tloušťku či pro maximální zpřesnění rozdělit vzorek na kvadranty, změřit tloušťku v jednotlivých částech a sledovat, v jakých místech dochází k průrazu. Protože však pro statistické zpracování naměřených dat pro tuto práci byly relevantní především doby do průrazu, byl zvolený přístup pro tyto potřeby dostačující.

Před dalším krokem, je nutné si uvědomit, pro jaké prostředí je daný produkt určen. Tak aby bylo možné experimentální výsledky extrapolovat k použití produktu v reálném provozu, je potřeba zkoumaný vzorek podrobit specifickým podmínkám určeným ze znalosti daného provozu. Tím je myšleno vlhkost, tlak, teplota, prach, cizí příměsi apod. Ne všechny podmínky jsme schopni přesně nasimulovat v laboratorních podmínkách. Každý provoz má svá specifika a s tím související aspekty náhodných vlivů, jež nelze vždy zcela předpokládat.

Při experimentu, jímž se zabývá tato práce, byly vzorky vystaveny běžné pokojové teplotě a odpovídající vlhkosti po dobu několika týdnů. Pro porovnání, jak vlhkost ovlivňuje výsledné elektroizolační vlastnosti, byl jeden ze vzorků (vzorek č. 14) podroben tepelné úpravě, kdy byl 1 hodinu vysoušen teplotou 100°C. V příloze (tab. 1) je uvedeno, nakolik

dokáže kondicionování vzorku ovlivnit výsledné hodnoty doby do průrazu, v porovnání s ostatními vzorky.

3.2 Měření vzorků

Přípravené vzorky je nyní nutné adekvátním způsobem proměřit. Podle toho, na jakém základě máme v úmyslu daný produkt hodnotit, je nutné vybrat vhodnou metodu, jejíž pomocí jsme schopni požadovaný negativní vliv sledovat, změřit, zaznamenat a vyhodnotit. V závislosti na měřené veličině existuje mnoho metod, které mnoho být zvoleny. Pro účely této práce byla zvolena metoda měření dob 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

Pro tuto práci byla zvolena postupná degradační metoda pomocí sinusového napětí o frekvenci 50Hz. Pro ilustraci je měřené zařízení uvedeno na obr. 3.2. Připravené vzorky se vkládají mezi zem a měřící elektrodu. Před vložením vzorku je bezpodmínečně nutné se ujistit, zda je zkušební obvod měřícího zařízení bez napětí a uzemněn. Po umístění měřených vzorků se odpojí zemnicí tyč a nastaví se požadovaná hodnota zkoušecího napětí. V případě této práce byly zvoleny hodnoty napětí 4,5 kV, 5 kV a 5,5 kV. Pro každou hladinu bylo proměřeno 5 až 6 vzorků. Ve chvíli, kdy je na elektrody přivedeno napětí, spustí se zároveň i čítač provozních hodin.



Obrázek 3.1 - Zařízení pro řízenou degradaci sinusovým napětím

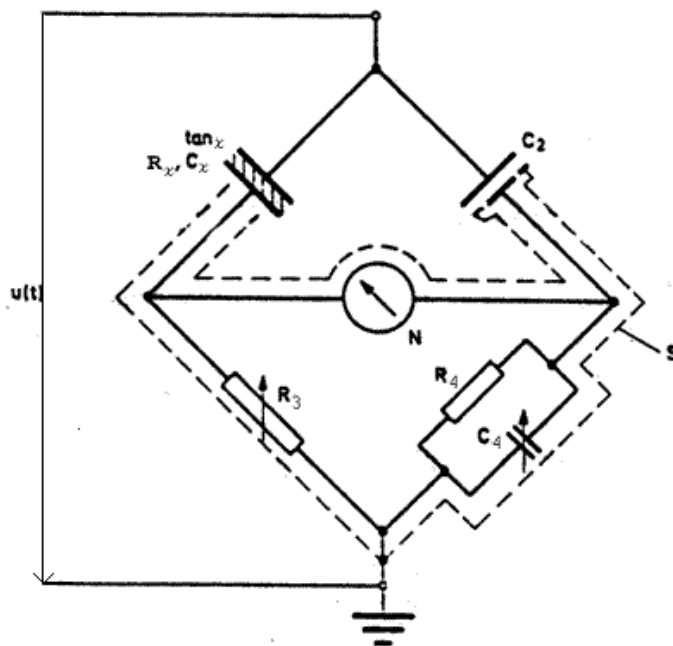
Pokud dojde k průrazu jednoho ze vzorků, stroj automaticky odpojí zdroj napětí a čítač se zastaví na času, kdy k průrazu došlo. V tomto okamžiku je potřeba tuto hodnotu, kdy došlo k průrazu zaznamenat a vhodným způsobem určit, který ze vzorků byl proražen. Pokud nejsme schopni vizuální kontrolou zjistit, který ze vzorků byl proražen je potřeba zvolit následující metodu. Nejprve vypneme měřicí zařízení, sepneme nadproudovou ochranu, připojíme zemní tyč a odpojíme jednu z měřících elektrod. Nyní je jeden ze zkušebních vzorků odpojen a my opět zapneme měřicí zařízení dle postupu uvedeném v předchozím odstavci. Pokud se nám podaří postupným zvyšováním hodnoty napětí dosáhnout námi zvolené zkušební napěťové hladiny, odpojený vzorek je skutečně proražen. V opačném případě musíme tento způsob zopakovat pro každý vzorek, dokud nebude proražený vzorek lokalizován. Ve chvíli, kdy tento vzorek nalezneme, vezmeme jej z měřícího zařízení a zařízení opět sepneme. Tento způsob opakujeme, dokud nejsou všechny vzorky proraženy.

V případě, že není možné z nějakého hlediska provést zkoušku destruktivní, je možné využít např. metodu měření ztrátového činitele a výsledné naměřené hodnoty statisticky vyhodnotit aproximací postupu uvedeného v kapitole 4.3. Pro úplnost byl jeden ze vzorků proměřen na Scheringově můstku (viz. příloha graf. 4). Dále je tato metoda měření popsána.

Ztrátový činitel je frekvenčně, napěťově 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]



Obrázek 3.2 - Scheringův vysokonapěťový můstek – převzato z [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 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 :

$$C_S = C_X = C_2 \frac{R_4}{R_3} \quad (4.1)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_S \cdot R_S = \omega \cdot R_4 \cdot C_4 \quad (4.2)$$

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

$$\operatorname{tg} \delta = 0,1 \cdot C_4 \quad (4.3)$$

3.3 Statistická charakteristika naměřených dat

Zaznamenané výsledky měření, je následně vhodné klasifikovat odpovídajícím způsobem. Pro tuto činnost využijeme charakteristiky polohy a rozptýlení, které byly vysvětleny v kapitole 3.1.

Z tabulky (viz. příloha tab.1) je patrné, že aritmetický průměr se u hodnot dob do průrazu na napěťových hladinách 5 a 5,5 kV příliš neliší od hodnoty mediánu. Je to způsobeno blízkostí samotných hodnot. Naopak u hladiny 4,5 kV je již aritmetický průměr ovlivněn extrémními hodnotami v souboru a tudíž, je pro charakteristiku daného souboru nevhodný.

Následně byl pro naměřená data vypočítán rozptyl a směrodatná odchylka. Z tabulky lze zpozorovat, že pro hodnoty 5 a 5,5 kV je rozptyl hodnot kolem jejich střední hodnoty relativně malý z důvodu nižší variability sousedních hodnot. U hodnoty 4,5 kV je rozptyl i směrodatná odchylka vyšší. Tento fakt způsobuje hodnota naměřené doby do průrazu u vzorku č. 14. Odchylka této hodnoty od ostatních v této napěťové hladině je způsobena vysušením vzorku č. 14 před samotným měřením.

Pokud následně porovnáme hodnotu variačního koeficientu pro jednotlivé napěťové hladiny, je vidět, že nejnižší mírou variability se vyznačuje soubor dat měřených na napěťové hladině 5 kV. Naopak pro hladinu 4,5 kV je míra variability hodnot nejvyšší. Vysoká míra variability v souborech dat je způsobena nehomogenní tloušťkou dielektrika.

Na základě těchto dat jsme schopni vybrat vhodné statistické rozdělení, určit jeho parametry a naměřené hodnoty vyhodnotit.

4 Vyhodnocení naměřených dat

V této části práce jsou interpretovány výsledky měření pomocí statistických rozdělení. Pro statistické vyjádření naměřených hodnot jsou zde využita rozdělení normální, lognormální a Weibullovo. U každého souboru dat je uveden tvar hustoty pravděpodobnosti a distribuční funkce.

V případě Weibullova rozdělení je zde uvedena tabulka (tab. 4.1), kde jsou uvedeny odhady parametrů pomocí metody MLE a Weibullova pravděpodobnostního grafu. Z tabulky je patrné, že se odhady parametrů s využitím různých metod liší. Pro potřeby této práce byly hodnoty Weibullova rozdělení vyhodnocovány pomocí parametrů odhadnutých metodou maximální věrohodnosti, protože vykazují statisticky větší přesnost než odhad pomocí Weibullova pravděpodobnostního grafu.[14]

Tabulka 4.1- Odhady parametrů Weibullova rozdělení

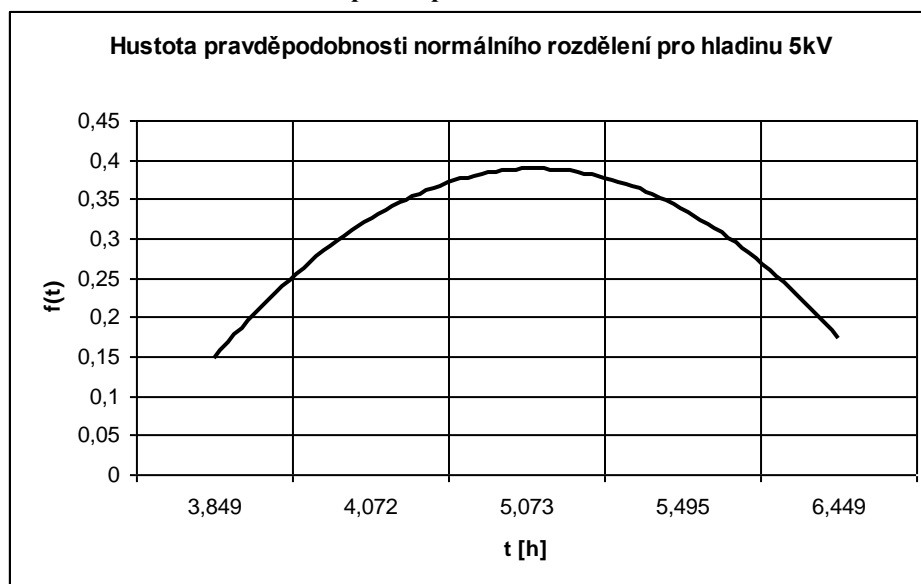
Metoda odhadu	Metoda MLE		Metoda Weibullova pravděpodobnostního grafu		
	Odhad parametru β	Odhad parametru μ	Odhad parametru β	Odhad parametru μ	Korelační koeficient R^2
U[kV]					
4,5	2,8229	17,8316	3,619	25,171	0,7627
5	5,3556	5,0043	5,122951	7,173545	0,8796
5,5	3,6296	4,6403	2,761	8,94	0,9916

Na základě hodnot korelačního koeficientu je možné očekávat, že pro hladinu 4,5 kV nebude interpretace Weibullovým rozdělením přesná. Je to způsobeno vysokou hodnotou doby do průrazu u vzorku č. 14. viz příloha.

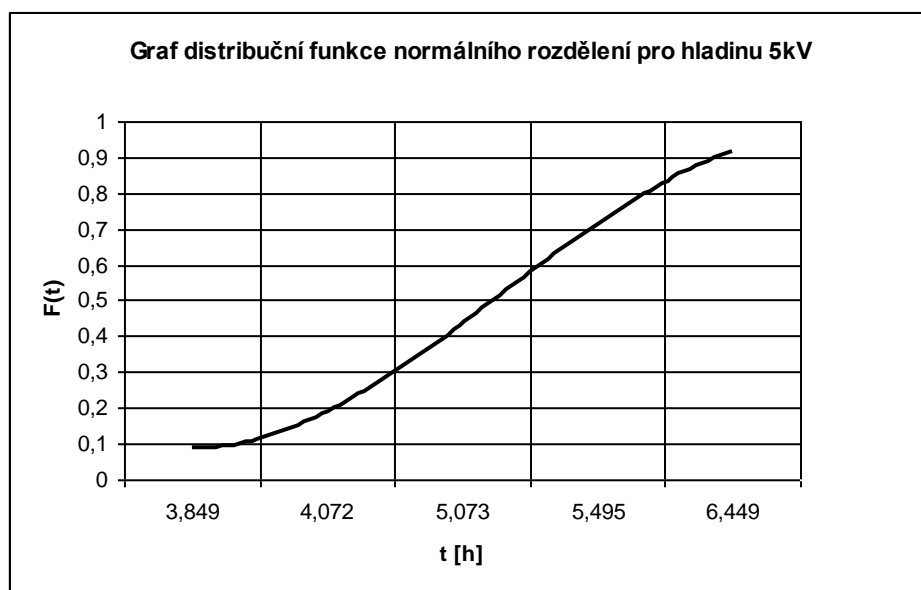
4.1 Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce normálního rozdělení pro naměřená data

Z následujících grafů je možné určit, kolem jaké hodnoty a s jakou pravděpodobností se budou doby do průrazu kolem střední hodnoty pohybovat. Jako střední hodnotu byla v tomto případě využita hodnota mediánu. Avšak s ohledem na velikost souboru vzorků, není zcela vhodné globálně aproximovat dané výsledky.

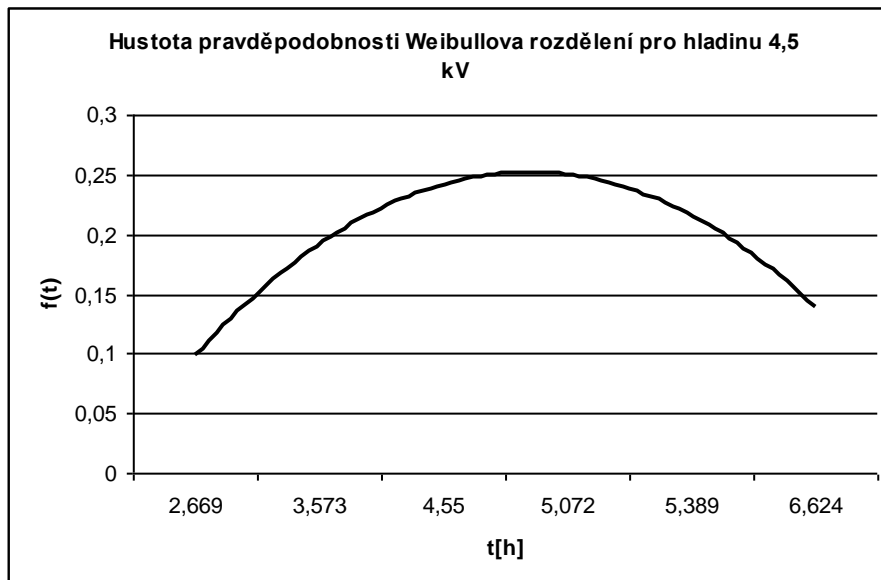
Graf 4.1 - Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení



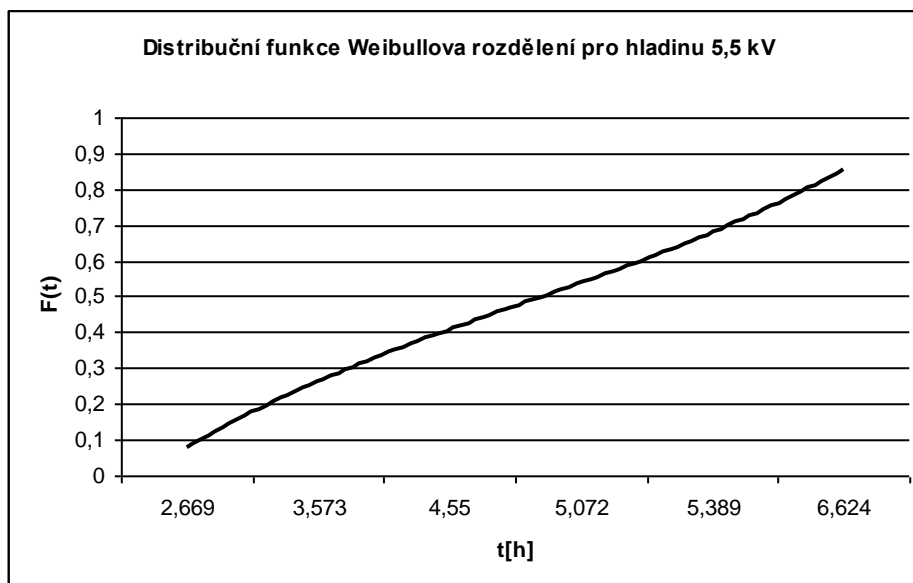
Graf 4.2 - Distribuční funkce normálního rozdělení



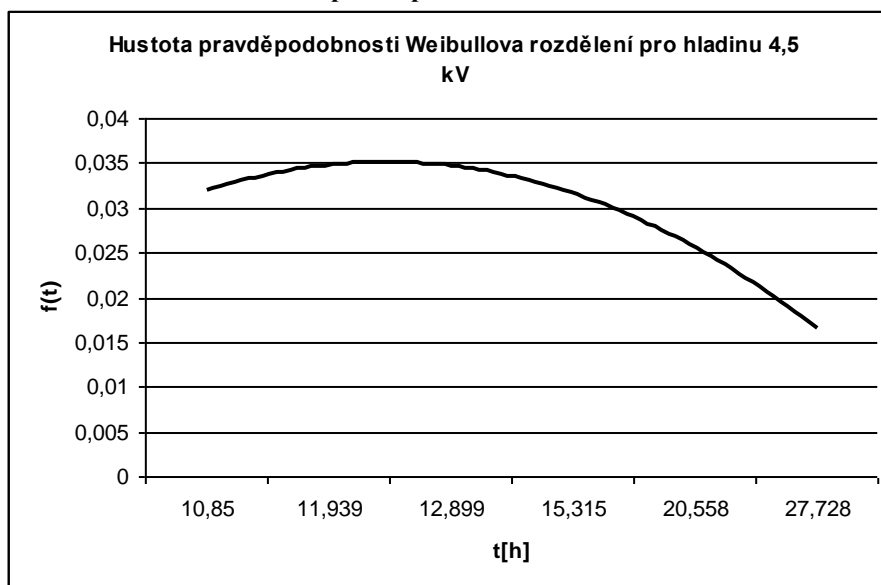
Graf 4.3 - Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení



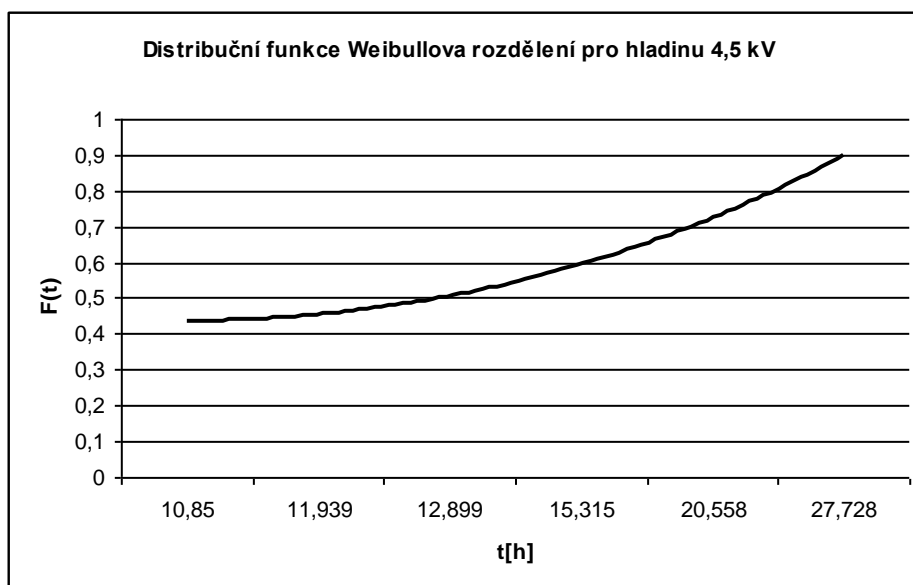
Graf 4.4 - Distribuční funkce normálního rozdělení



Graf 4.5 - Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení

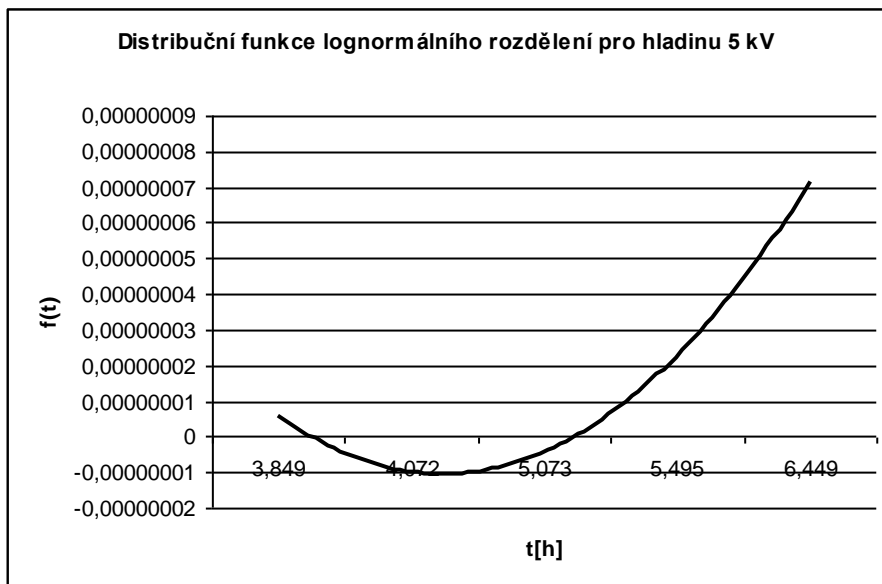


Graf 4.6 - Distribuční funkce normálního rozdělení

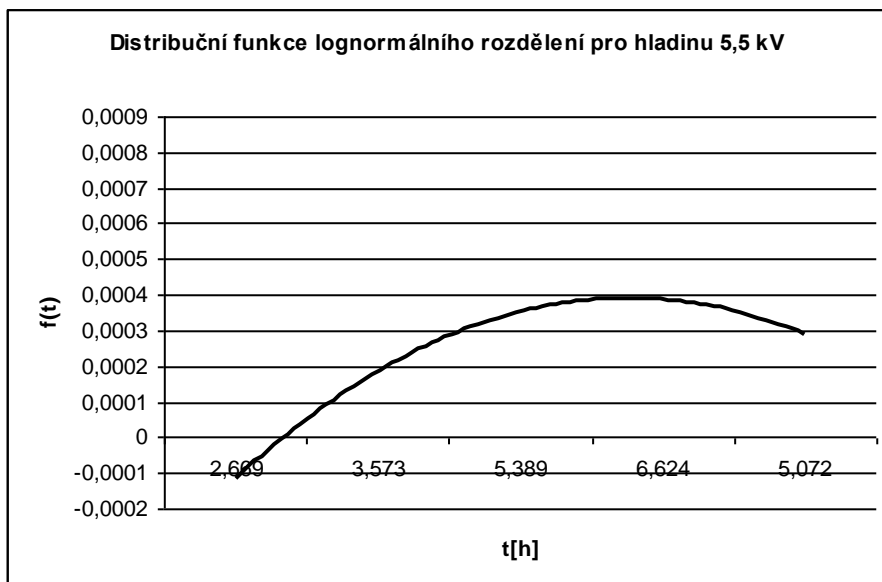


4.2 Distribuční funkce lognormálního rozdělení pro naměřená data

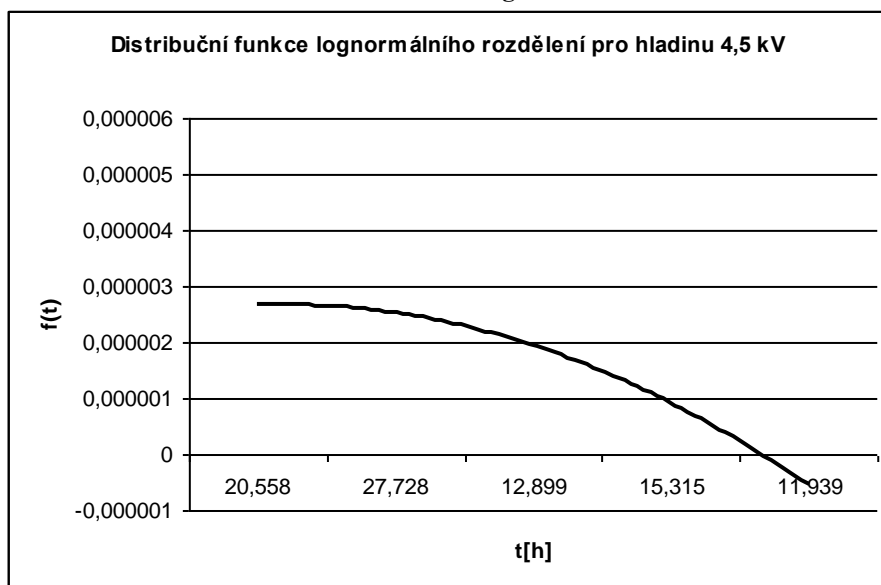
Graf 4.7 - Distribuční funkce lognormálního rozdělení



Graf 4.8 - Distribuční funkce lognormálního rozdělení

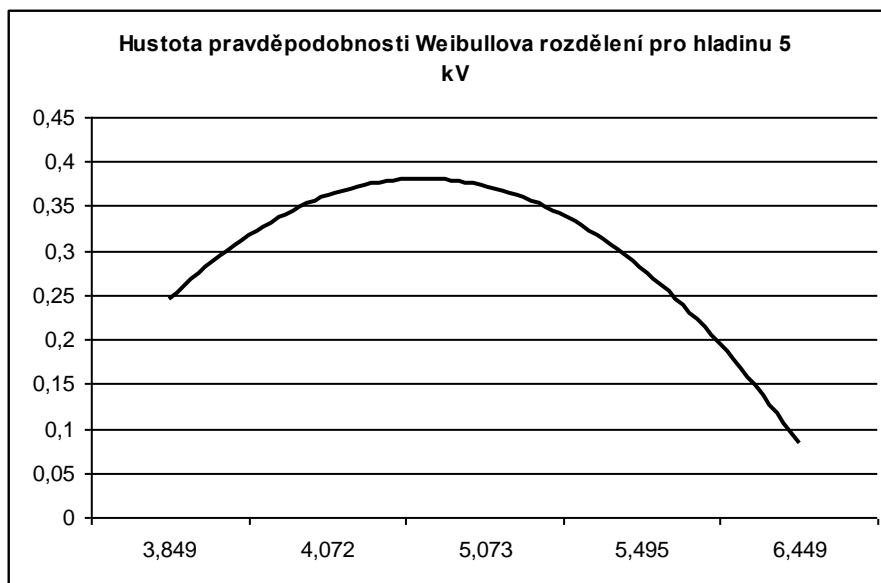


Graf 4.9 - Distribuční funkce lognormálního rozdělení

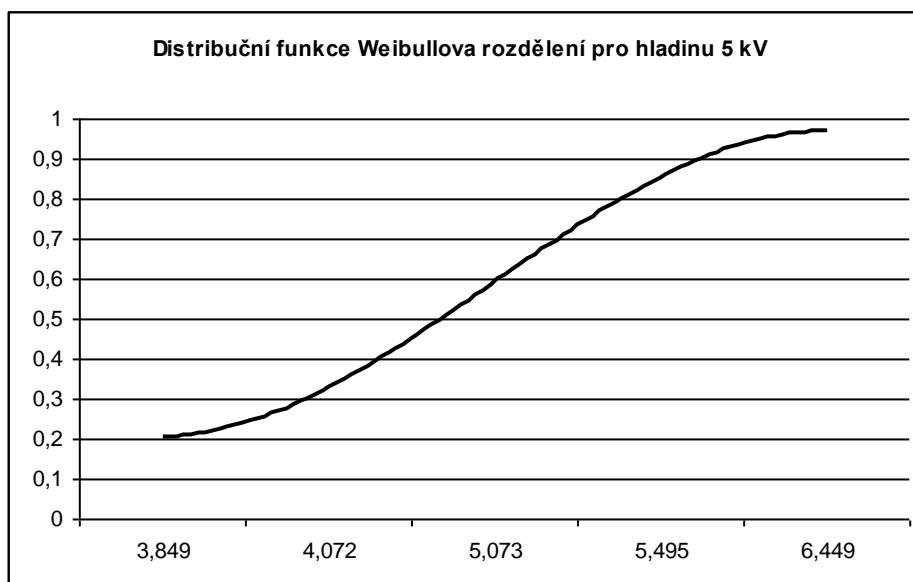


4.3 Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce Weibullova rozdělení pro naměřená data

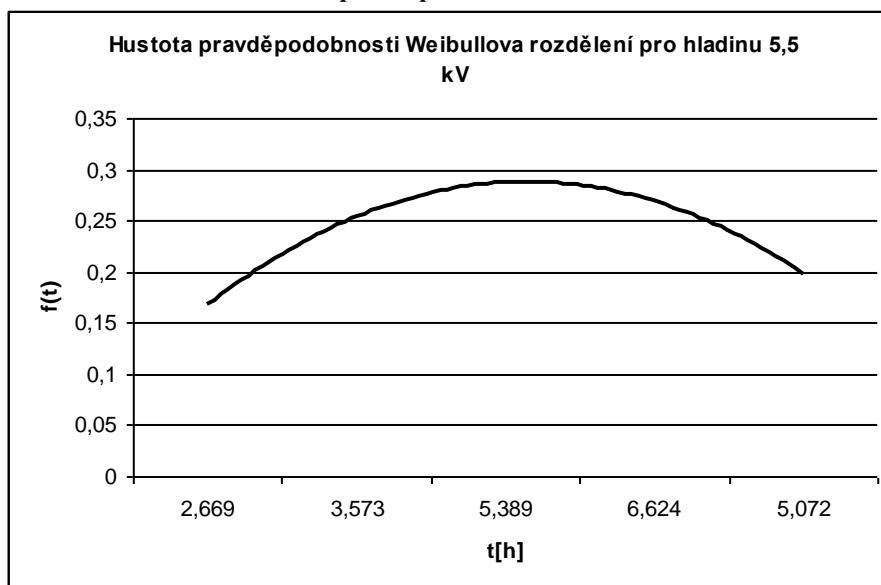
Graf 4.10 - Hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení



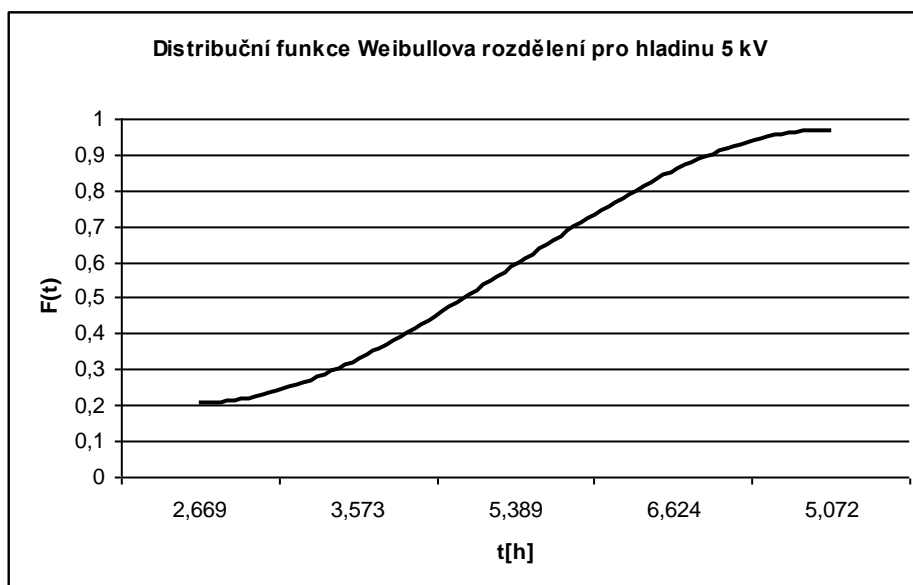
Graf 4.11 - Distribuční funkce Weibullova rozdělení



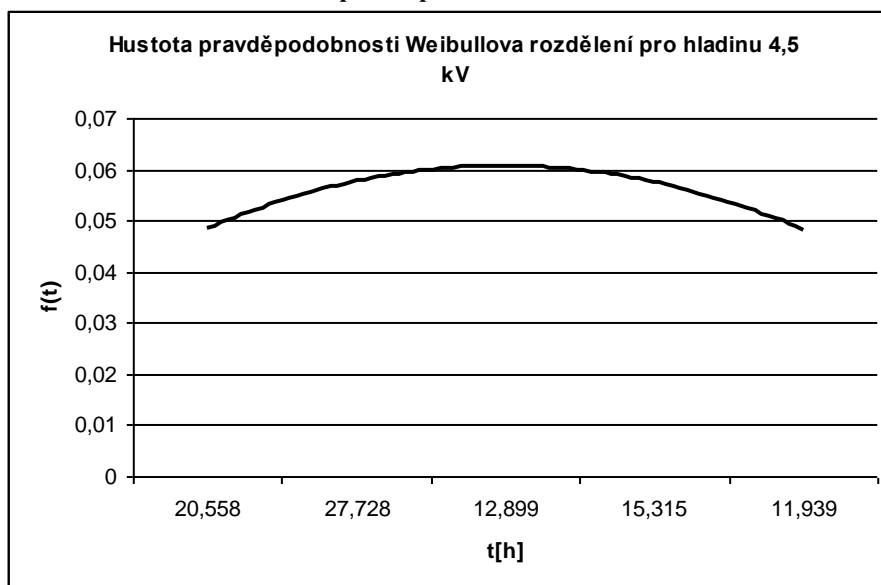
Graf 4.12 - Hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení



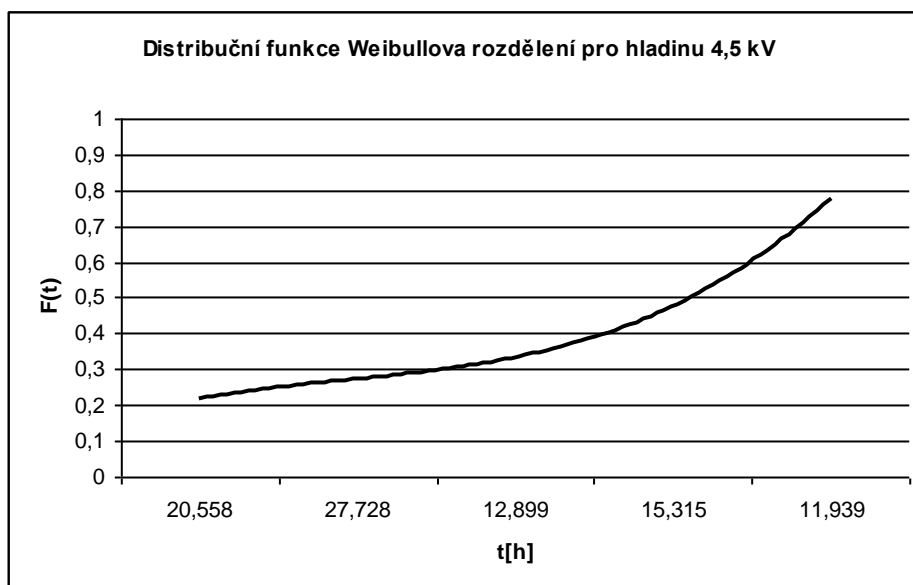
Graf 4.13 - Distribuční funkce Weibullova rozdělení



Graf 4.14 - Hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení



Graf 4.15 - Distribuční funkce Weibullova rozdělení



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 jsou teoreticky popsány degradační vlivy působící na elektroizolační materiály. Jsou zde definovány degradační vlivy, jejich vzájemný vliv na komponenty zařízení a vysvětleny způsoby průrazu elektrického a tepelného charakteru. Dále kapitola obsahuje popis metody zrychleného stárnutí teplotou s využitím Arrheniovy rovnice. Je zde popsán výpočet rychlostní konstanty a její grafické znázornění v závislosti na teplotě. Dalším grafem je ukázáno, jak teplota stárnutí ovlivňuje dobu životnosti materiálu a jak se pro daný koncový bod určí vhodná teplota stárnutí.

Obsahem druhé kapitoly je teoretické vysvětlení pojmů statistické charakteristiky. Jsou zde popsány charakteristiky polohy a rozptýlení, jež byly využity při zpracování naměřených dat. Následně jsou zde popsána statistická rozdělení, jež byla aplikována na naměřená data. Jedná se o rozdělení Gaussovo, lognormální a rozdělení Weibullovo. 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 a metoda maximální věrohodnosti.

Třetí kapitola obsahuje návrh postupu pro vyhodnocování měřených dat. Je zde popsán postup přípravy vzorků, jejich následné měření a klasifikace naměřených dat pomocí statistických charakteristik polohy a rozptýlení.

Poslední kapitola interpretuje naměřená data pomocí statistických rozdělení. Pro toto zpracování byla využita rozdělení normální, lognormální a Weibullovo. U každé zkušební napěťové hladiny je zde uveden graf hustoty pravděpodobnosti daného rozdělení a jeho distribuční funkce. V případě Weibullova rozdělení jsou zde uvedeny odhady parametrů β a μ pomocí metody maximální věrohodnosti a Weibullova pravděpodobnostního grafu

využívající Benardovu aproximaci. Grafy jednotlivých vypočtených dat proložených lineárně regresními přímkami jsou uvedeny v příloze (graf 1, 2 a 3). Z uvedených regresních rovnic přímek je a jejich korelačních koeficientů je vidět, že pro hladiny 5 a 5,5 kV lze použít k interpretaci dat Weibullovo rozdělení. U hladiny 4,5 kV je již hodnota korelačního koeficientu nižší, tudíž není interpretace dat tímto rozdělením zcela přesná.

V případě normálního rozdělení je možné určit, kolem jaké hodnoty se budou doby do poruchy vyskytovat s maximální pravděpodobností. Modelovat data do poruchy pomocí normálního rozdělení nám tedy udává celkový obraz o technickém stavu zařízení, produktu nebo skupině zkušebních vzorků. Je však závislé na extrémních hodnotách, jež deformují dané rozdělení hustoty pravděpodobnosti. Rozdělení lognormální nevracelo vhodné výsledky, jak lze vysledovat z grafů v kap. 4. Na základě těchto výsledků usuzuji, že se pro danou interpretaci výsledků nehodí. Avšak rozdělení Weibullovo nám kromě již jmenovaných vlastností udává, kde se nachází nejslabší článek řetězu a proto, i po krátké konzultaci s Dr. Robertem Abernethym jenž mi tento názor potvrdil, označuji použití Weibullova rozdělení na data doby do průrazu za nejvhodnější v porovnání s ostatními použitými rozděleními.

Seznam literatury

- [1] Hassdenteufel J., Kv_t 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] <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. TÁBORŤÍK. 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]. Elektrevue, 2002 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.elektrevue.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.
- [13] MENTLÍK, Václav. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2011, 118 s. ISBN 978-80-7300-412-5.

[14] ABERNETHY, By Dr. Robert B. *The new Weibull handbook: reliability*. 4th ed. Praha:
Distributed by Gulf Pub. Co, 2000, 118 s. ISBN 09-653-0621-6.

[15] *Life Data Analysis Reference Book*. [online]. [cit. 2014-08-24]. Dostupné z:
http://reliawiki.org/index.php/Life_Data_Analysis_Reference_Book

[16] Causes of insulation degradation and failure modes. [online]. [cit. 2014-08-24]. Dostupné
z: <http://www.modulesdirect.com/blog/causes-of-insulation-degradation-and-failure-modes/>

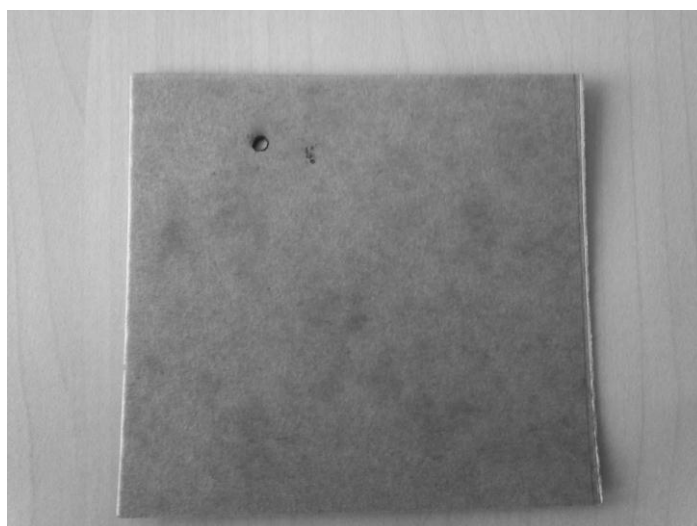
Seznam grafů, tabulek a obrázků

Tabulka 1.1 - Hodnoty elektrické pevnosti izolačních materiálů [7].....	14
Tabulka 4.1- Odhady parametrů Weibullova rozdělení	43
Obrázek 1.1 -Závislost hodnoty logaritmu rychlostního koeficientu na $1/T$ – převzato z [11]20	
Obrázek 2.1 - Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení - převzato z [15]	28
Obrázek 2.2 - Vliv parametru μ na tvar křivky hustoty pravděpodobnosti lognormálního rozdělení - převzato z [15].....	29
Obrázek 3.1 - Zařízení pro řízenou degradaci sinusovým napětím.....	38
Graf 4.1 - Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení.....	44
Graf 4.2 - Distribuční funkce normálního rozdělení	44
Graf 4.3 - Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení.....	45
Graf 4.4 - Distribuční funkce normálního rozdělení	45
Graf 4.5 - Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení.....	46
Graf 4.6 - Distribuční funkce normálního rozdělení	46
Graf 4.7 - Distribuční funkce lognormálního rozdělení	47
Graf 4.8 - Distribuční funkce lognormálního rozdělení	47
Graf 4.9 - Distribuční funkce lognormálního rozdělení	48
Graf 4.10 - Hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení.....	49
Graf 4.11 - Distribuční funkce Weibullova rozdělení.....	49
Graf 4.12 - Hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení.....	50
Graf 4.13 - Distribuční funkce Weibullova rozdělení.....	50
Graf 4.14 - Hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení.....	51
Graf 4.15 - Distribuční funkce Weibullova rozdělení.....	51
Graf 0.1 - Odhad parametrů Weibullova rozdělení.....	59
Graf 0.2 - Odhad parametrů Weibullova rozdělení.....	60
Graf 0.3 - Odhad parametrů Weibullova rozdělení.....	60
Graf 0.4 - Měření hodnot ztrátového činitele	60

Přílohy

Tabulka 1 - Naměřené hodnoty dob do průrazu a vypočtené statistické charakteristiky

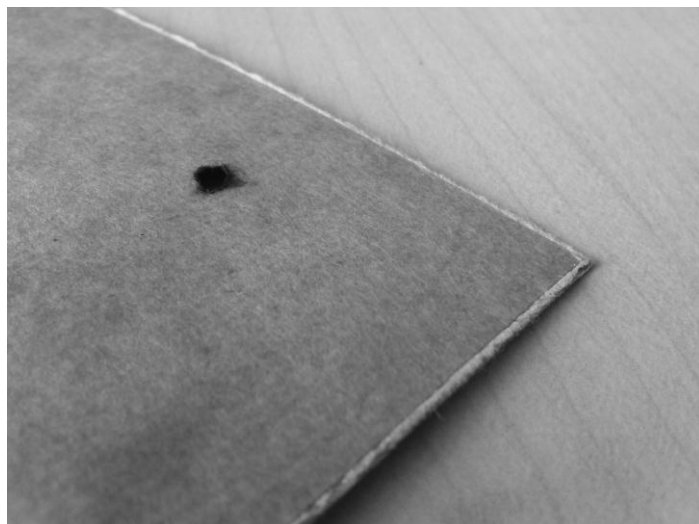
Vzorek	t(h)	U(kV)	Aritmetický průměr	Rozptyl	Průměrná odchylka	Medián	ln(t)	Variační koeficient	Směrodatná odchylka
1	3,849	5	4,988	0,907	0,821	5,073	1,348	0,191	0,952
2	4,072	5					1,404		
3	5,073	5					1,624		
4	5,495	5					1,704		
5	6,449	5					1,864		
6	2,669	5,5	4,646	1,619	1,049	4,811	0,982	0,274	1,272
7	3,573	5,5					1,273		
8	5,389	5,5					1,684		
9	6,624	5,5					1,891		
10	5,072	5,5					1,624		
11	4,55	5,5					1,515		
12	20,558	4,5	16,548	34,936	5,063	14,107	3,023	0,357	5,911
13	27,728	4,5					3,322		
14	12,899	4,5					2,557		
15	15,315	4,5					2,729		
16	11,939	4,5					2,480		
17	10,85	4,5					2,384		



Obrázek 1 - Průraz testovaného vzorku

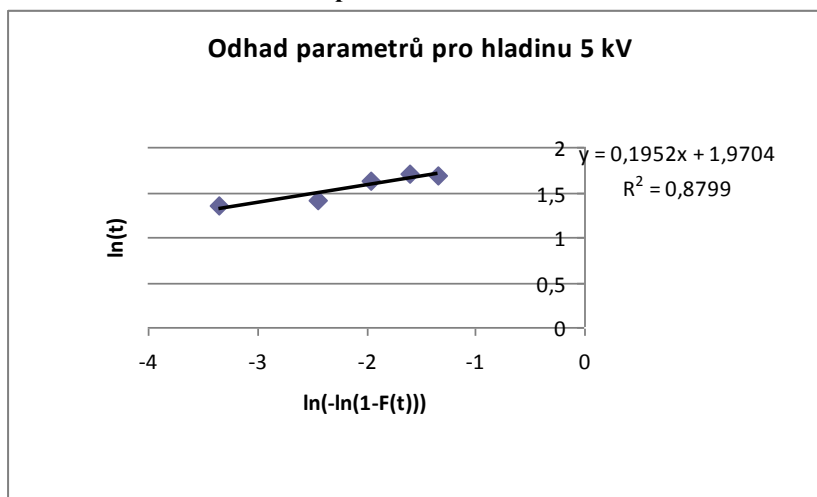


Obrázek 2- Průraz testovaného vzorku

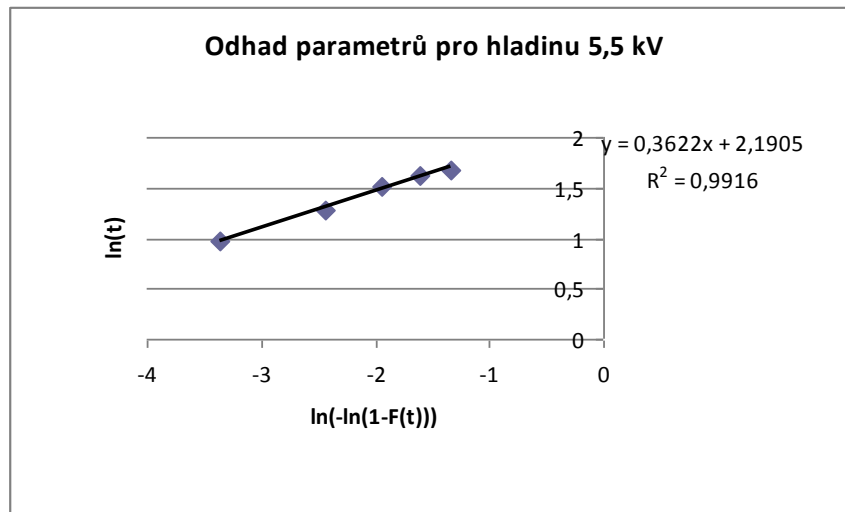


Obrázek 3 - Průraz testovaného vzorku

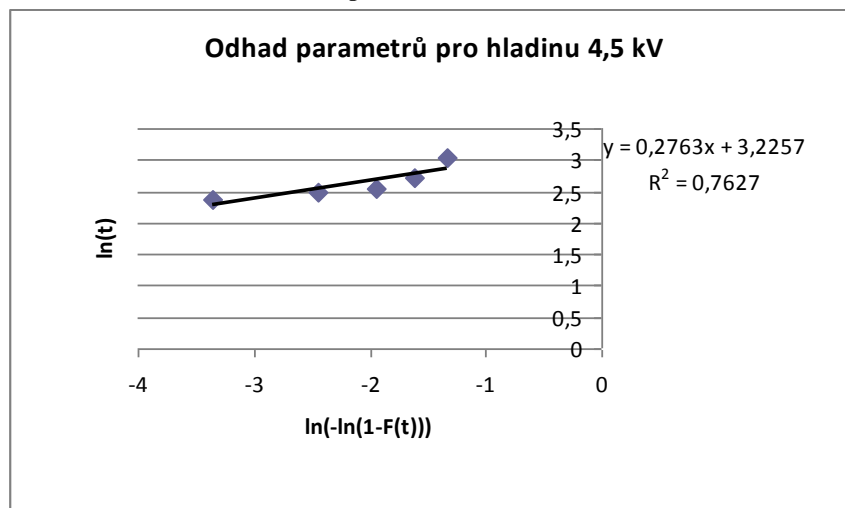
Graf 0.1 - Odhad parametrů Weibullova rozdělení



Graf 0.2 - Odhad parametrů Weibullova rozdělení



Graf 0.3 - Odhad parametrů Weibullova rozdělení



Graf 0.4 - Měření hodnot ztrátového činitele

