

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Statistické metody a jejich využití pro popis stárnutí
elektroizolačních systémů**

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

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

Jméno a příjmení: **Václav CHURAVÝ**
Osobní číslo: **E13B0086K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Statistické metody a jejich využití pro popis stárnutí elektroizolačních systémů**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište degradační mechanismy elektroizolačních systémů točivých a netočivých elektrických strojů.
2. Prostudujte a uveďte statistické modely pro popis stárnutí elektroizolačních systémů.
3. Porovnejte jednotlivé modely a uveďte jejich výhody a nevýhody.
4. Zvolte jeden z modelů a zdůvodněte jeho výběr.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jakub Souček

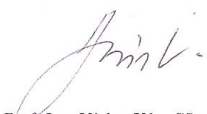
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá využitím statistických metod pro popis stárnutí elektroizolačních systémů v elektrických strojích. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. V první části se zabývá popisem elektrických strojů a degračních vlivů, v části druhé jsou uvedeny základy z teorie spolehlivostních úvah a výklad a porovnání vybraných statistických modelů používaných pro popis stárnutí elektroizolačních systémů.

Klíčová slova

Elektroizolační systém, statistické metody, spolehlivost, model stárnutí, vícefaktorový model, degrační mechanismus, deteriorace izolací, normální rozdělení, exponenciální rozdělení, Weibullovo rozdělení.

Abstract

The bachelor thesis presents using of statistic methods for description of electroinsulation systems and description of degradation mechanisms in electrical machines. Thesis is divided in two parts. In first part of this theses described electrical machines and degradation mechanisms in this machine. In second part described and compared multifactor aging models.

Key words

Electroinsulation systems, statistic methods, multifactor aging models, system reliability, normal distribution, exponenciál distribution, Weibull distribution, degradation mechanisms.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 9.6.2014

Václav Churavý

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubu Součkovi za cenné profesionální rady, poskytnuté informační zdroje, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 DEGRADAČNÍ PROCESY V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH.....	11
1.1 ELEKTRICKÉ STROJE	11
1.1.1 Točivé elektrické stroje.....	11
1.1.2 Netočivé elektrické stroje.....	15
1.2 DEGRADAČNÍ PROCESY	16
1.2.1 Tepelné namáhání	17
1.2.2 Mechanické namáhání.....	18
1.2.3 Elektrické namáhání.....	18
1.2.4 Vlivy prostředí.....	19
2 SPOLEHLIVOSTNÍ ÚVAHY.....	21
2.1 ZÁKLADNÍ ASPEKTY MATEMATICKÉ STATISTIKY	21
2.1.1 Charakteristiky polohy	22
2.1.2 Charakteristiky rozptýlení.....	23
3 STATISTICKÉ MODELY.....	24
3.1 STATISTICKÉ MODELY	24
3.1.1 Exponenciální rozdělení	24
3.1.2 Normální rozdělení.....	26
3.1.3 Erlangovo rozdělení	27
3.1.4 Weibullovo rozdělení.....	28
3.2 FYZIKÁLNĚ-STATISTICKÉ MODELY	31
3.2.1 Montanariho pravděpodobnostní model.....	31
3.2.2 Pravděpodobnostní model využívající tepelného stárnutí EIS	32
3.3 SHRNTÍ VÝHOD A NEVÝHOD UVEDENÝCH MODELŮ	33
4 ZÁVĚR.....	34
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	35

Seznam symbolů a zkratk

EIS	Elektroizolační systém
s	Skluž
n	Otáčky rotoru
n_s	Synchronní otáčky
VPI	Vacuum pressure impregnation
τ [h]	Životnost izolace
T [°C]	Teplota
σ	Mechanické napětí
E[kV·mm ⁻¹]	Intenzita elektrického pole
$f(t)$	Hustota pravděpodobnosti
$\lambda(t)$	Intenzita poruch
MTTF	Střední doba do poruchy
MTBF	Střední doba mezi poruchami
MCL	Střední akumulovaný život
p	Pravděpodobnostní funkce
$F(x)$	Distribuční funkce
$R(t)$	Pravděpodobnost bezporuchového stavu
σ^2	Rozptyl
σ	Směrodatná odchylka
β	Parametr ovlivňující tvar funkce hustoty pravděpodobnosti
n	Rozsah výběru
E_T	Mezní hodnota intenzity elektrického pole při teplotě T
N_c	Počáteční odolnostní koeficient
v	Parametr tvaru
E_a [J·mol ⁻¹]	Aktivační energie

Úvod

Elektroizolační systémy jsou důležitou částí točivých a netočivých elektrických strojů, proto je na ně kladen vysoký důraz s ohledem na jejich životnost a bezporuchovost. Aby mohla být zajištěna co nejlepší funkce těchto systémů, musí být k dispozici co nejvíce informací a to jak z hlediska vlastností použitých materiálů, tak i z hlediska degradačních činitelů působících na tyto systémy. Je-li k dispozici dostatek těchto informací, tak je možné využít znalosti z matematiky a statistiky a jejich aplikací předcházet nežádoucím jevům.

Předložená práce je zaměřená na popis degradačních procesů v elektrických strojích a na popis statistických metod a modelů využívaných pro popis stárnutí elektroizolačních systémů. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí.

V první části se zabývá stručným popisem točivých a netočivých elektrických strojů a studiem degradačních vlivů působících na elektroizolační systémy těchto strojů.

V druhé části se předložená práce zaměřuje na studium statistických modelů používaných pro popis stárnutí elektroizolačních systémů. Dále tato část obsahuje popis vybraných statistických modelů a jejich zhodnocení a porovnání.

1 Degradací procesy v elektrických strojích

V dnešní době se neustále zvyšují nároky ve všech oblastech a oblast elektrotechniky není výjimkou. Požadavky jsou zde kladeny hlavně na kvalitu, spolehlivost a přesnost za odpovídající cenu při minimálním dopadu na životní prostředí. Aby mohly být všechny tyto požadavky splněny, musí být k dispozici co největší množství dostupných informací, které se získají za pomoci diagnostiky. Díky získaným informacím se mohou v budoucnu snížit vynaložené náklady, počty revizních kontrol a zároveň se dá předcházet vzniklým poruchám včasným odstavením a opravou závady. Pokud však k poruše dojde, tak rozbořením získaných dat se získají informace, které se využijí třeba při výrobě zařízení a projeví se jako změna ve výrobním procesu a díky tomu se předejde opakování poruchy.

1.1 Elektrické stroje

Elektrický stroj je nutno brát jako spolehlivostní celek několika podsystémů, kde při výpadku jednoho podsystému dojde k ukončení provozuschopnosti celého stroje. Nejkritičtější částí elektrického stroje je izolační subsystém, tento podsystém je základní a klíčovou součástí všech elektrických točivých a netočivých strojů, proto jsou materiály izolačních podsystémů důkladně kontrolovány z hlediska degradace a degradačních vlivů. Na izolační systémy jsou kladeny náročné požadavky, které jsou nezbytné pro jejich následné použití. Proto se provádí řada diagnostických zkoušek a měření, které slouží jako výchozí informace pro rozdělení jednotlivých izolačních materiálů do daných tříd dle jejich vlastností.

1.1.1 Točivé elektrické stroje

Točivé elektrické stroje jsou zařízení, které jsou založena na principu elektromagnetické indukce a jsou určena pro elektromechanickou přeměnu energie. Skládají se ze dvou částí, z nepohyblivé části nazývané **stator** a pohyblivé části, která se nazývá **rotor**. V případě, že stroj přeměňuje elektrickou energii na mechanickou, hovoří se o motoru, pokud elektrický stroj přeměňuje mechanickou energii na elektrickou, tak je tento stroj označován jako generátor. Základní způsob rozdělení elektrických točivých strojů je dán napájecím napětím [5] [7]:

- **Stejnoseměrné stroje**
 - *S cizím buzením*
 - *S derivačním buzením*
 - *Se sériovým buzením*
 - *Se smíšeným buzením*
- **Střídavé stroje**
 - *Asynchronní stroje*
 - *S kotvou nakrátko*
 - *S vinutou kotvou*
 - *Synchronní stroje*
 - *S hladkým rotorem*
 - *S vyniklými póly na rotoru*
- **Zvláštní skupina**

Stejnoseměrné elektrické točivé stroje, jsou nejstarší točivé elektrické stroje, které mají výborné dynamické vlastnosti a snadnou regulaci otáček, ale jsou konstrukčně složité, protože obsahují složitější části, jako jsou například komutátory a kartáče. Stator se skládá z pólových nástavců s budícím vinutím, u strojů s vyšším výkonem obsahuje stator ještě kompenzační vinutí. Rotor tvoří drážková kotva s vinutím, které je přes komutátor elektricky spojeno s nepohyblivou částí [7].

Je-li do rotoru pomocí komutátoru přiváděn elektrický proud, komutátor jednotlivá připojená vinutí přepíná tak, aby došlo vzájemným působením magnetických toků statoru a rotoru ke vzniku mechanického momentu. V tomto případě stroj pracuje v motorickém režimu.

Je-li rotor s komutátorem otáčen nějakým vnějším pohonem, tak se vlivem změny magnetického toku na vinutí indukují napětí. Komutátor poté připojená vinutí přepíná tak, aby usměrňoval v nich indukovaný proud. Slouží-li stroj k přeměně mechanické energie na elektrickou, jedná se o generátor.

Konstrukce motoru i generátoru je totožná, to znamená, že pro obě funkce je možné použít jeden stroj a rozdíl je pouze ve směru toku energie.

Asynchronní elektrické točivé stroje, které jsou mechanicky nejjednodušší, s nenáročnou údržbou a dlouhou dobou životnosti. Základním prvkem asynchronního motoru je stator s vinutím a rotor tvořený buď klecovou kotvou nakrátko nebo vinutou (kroužkovou)

kotvou. Klecová kotva je tvořena hliníkovými tyčemi spojenými pomocí kruhů. Takto tvořený rotor není elektricky propojený se statorem. Vinutá kotva má vyvedené rotorové vinutí pomocí kluzných kroužků, přes které lze k vinutí v případě potřeby při rozběhu připojit činné odpory.

Princip činnosti asynchronního stroje spočívá ve vytvoření točivého magnetického pole vyvolaného průchodem proudu statorovým vinutím. Vlivem změny statorového magnetického toku dochází k indukci napětí v kotvě rotoru a vinutím kotvy prochází proud. Vzájemným působením statorového pole a proudu procházejícího kotvou dochází ke vzniku silového pole, které způsobí otáčení rotoru. Rychlost otáčení rotoru je $n < n_s$, poměrný rozdíl těchto otáček se nazývá skluz [5].

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (1.1)$$

kde n_s jsou synchronní otáčky,
 n jsou otáčky rotoru.

Pracuje-li asynchronní stroj v rozmezí skluzu 0-1, pracuje stroj v motorickém režimu, je-li skluz větší než 1, je ze stroje brzda a je-li skluz stroje menší než 0, stroj pracuje jako generátor.

Asynchronní stroj se používá jako generátor u malých zdrojů elektrické energie, otáčky rotoru budou v tomto případě vyšší než otáčky synchronní, ale musí být dodržena podmínka, že stroj bude stále připojený k síti, z které bude čerpat jalový výkon potřebný k magnetizaci magnetického obvodu motoru.

Synchronní elektrické točivé stroje jsou elektrické stroje používané především pro výrobu střídavého vícefázového proudu. Skládají se ze statoru, který je tvořen stejně jako u asynchronního stroje a z rotoru, který může být konstruován z permanentního magnetu nebo jako stejnosměrné elektrické vinutí.

Synchronní stroje se používají jako generátory pro výrobu elektrické energie. V automobilovém průmyslu se používají alternátory malých rozměrů, v tepelných elektrárnách se používají turboalternátory velkých rozměrů nebo ve vodních elektrárnách hydroalternátory.

Synchronní motory se používají tam, kde nejsou časté rozběhy, jelikož synchronní motor se sám nerozběhne, musí se rozbíhat pomocí frekvenčních měničů nebo pomocných asynchronních motorů.

Izolační systémy točivých elektrických strojů se dělí podle pracovního napětí na nízkonapěťové a vysokonapěťové [7].

Nízkonapěťové izolační systémy tvoří izolace vodičů, vyložení drážek a impregnant. Izolace vodičů je závislá na pracovním napětí a na své funkci ve stroji. Je tvořena lakem, opředěním, skelnými vlákny, dalšími materiály a kombinací pevné i nanášené izolace. Provedení izolace je následně zakódováno pomocí písmenných symbolů. Vyložení chránicí drážky se dělá pomocí drážkové lepenky, kombinované drážkové izolace nebo Nomexu. Impregnace se obvykle u nízkonapěťových systémů dělá zaplavováním, zakapáváním nebo máčením. Pro máčení se používají jednosložkové polyesterové pryskyřice, pro zalévání dvousložkové polyuretanové látky a pro zakapávání se používá roztok nenasycené polyesterimidové pryskyřice ve styrenu[2].

Vysokonapěťové izolační systémy v točivých elektrických strojích se provádějí dvojitými technologiemi. Tyto dvě technologie, jsou od sebe značně rozdílné a každá z nich má své výhody, specifika a omezení. Jedná se o technologie resin-rich a VPI (Vacuum Pressure Impregnation) [2].

Systém resin-rich je systém z tříložkového kompozitu s výchozím izolačním předimpregnovaným materiálem dodávaným ve formě polotovaru s obvykle 30 až 40 procenty pojiva. Nosná část je tvořena skleněnou tkaninou, izolační bariéru tvoří kalcinovaný slídový papír a jako pojivo slouží reaktoplastická bezrozpuštědlová novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Jeho zpracováním se vytvoří na připravené vodivé části požadovaná izolační trubka. Takto vytvořené části vinutí se poté vkládají přímo do drážek stroje, kde hned po pospojování mohou plnit svou funkci. Tento izolační systém se vyznačuje velmi dobrou elektrickou pevností a zcela vyhovuje kladeným požadavkům.

Systém VPI je technologie jejíž název je odvozen od průběhu výrobního procesu – vakuově tlaková impregnace a u které je jako základní materiál použita savá slídová páska, která se při impregnačním procesu prosytí impregnantem. Používá se v případech, kde je potřeba použít dokonalý impregnační systém zpevňující vinutí. Nosnou část tvoří skleněná tkanina, fólie nebo polyesterové rouno, impregnantem u této technologie jsou bezrozpuštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice a musí být použito pojivo kompatibilní s následně použitým impregnantem, aby nedošlo k vzájemnému narušení při finálním zpracování.

1.1.2 Netočivé elektrické stroje

Netočivé elektrické stroje jsou stroje, které neobsahují žádnou rotační část, nejznámějším netočivým elektrickým strojem je transformátor, dále mezi netočivé elektrické stroje patří například reproduktory.

Transformátor je zařízení používané pro přenos elektrické energie z jednoho obvodu do druhého pomocí elektromagnetické indukce. Transformátor se používá pro přeměnu střídavého napětí nebo pro galvanické oddělení elektrických obvodů. Skládá se ze tří částí: vinutí, magnetický obvod a izolační systém. Transformátory se dělí podle následujících parametrů [5]:

- **Podle počtu fází**
 - *Jednofázový*
 - *Trojfázový*
 - *Speciální*
- **Podle konstrukce magnetického jádra**
 - *Plášťový*
 - *Toroidní*
 - *Jádrový*
- **Podle použití**
 - *Energetické*
 - *Distribuční*
 - *Napájecí*
 - *Bezpečnostní*
 - *Rozptylové*
 - *Regulační*
 - *Měřicí*
- **Podle počtu vinutí**
 - *Dvojvinutový*
 - *Trojvinutový*
 - *Vícevinutový*

Jednou z důležitých částí transformátoru je jeho izolační systém a podle způsobu provedení izolačního systému se transformátory dělí do tří základních skupin [2]:

- *Suché*
- *Zalévané*
- *Spojení kapalných a tuhých izolantů.*

Suché transformátory jsou stroje, v kterých není použitý tekutý impregnant. Jako pracovní prostředí a hlavní chladivo u nich slouží plyn, ve většině případů se jedná o vzduch nebo fluorid sírový SF₆. V těchto strojích se jako izolanty používají izolační materiály, kterými jsou papír, lepenky a Nomex[®].

Zalévanými transformátory jsou stroje, které mají cívky zalité v pryskyřici. Příkladem použití může být zalévací pryskyřice na bázi alifatických glycidyleterů [2].

Ve strojích, v kterých se používají kapalně izolanty ve spojení s tuhými, se jako izolační kapalina používají minerální oleje nebo syntetické izolační kapaliny, tyto kapalně izolanty plní v transformátoru funkci izolačního i chladícího média. Izolační systém tvořený kombinací oleje a papíru se používá u transformátorů velkých výkonů. V momentě, kdy dojde ke zhoršení vlastností papírové izolace, musí se vyrobit nové vinutí, ale olej lze regenerovat nebo vyměnit.

1.2 Degradční procesy

Každý elektrický stroj stárne a přitom dochází k nevratným změnám vlastností použitých materiálů, které jsou způsobeny působením různých degradačních faktorů. Na sledovaný elektroizolační celek působí vlivy tepelné, elektrické, mechanické a vlivy okolního prostředí, které po určitém časovém úseku vedou k poruše provozuschopnosti elektrického zařízení. Při sledování stárnutí elektroizolačního systému se může sledovat působení jen jednoho faktoru, v tom případě se jedná o jednofaktorové stárnutí nebo pokud je stárnutí systému ovlivněno více faktory, jedná se o stárnutí s více faktory. Faktory působící na elektroizolační systém [3]:

- *Tepelné namáhání*
- *Elektrické namáhání*
- *Mechanické namáhání*
- *Vlivy prostředí*

V praxi jsou provozovaná zařízení namáhána všemi uvedenými faktory, některé faktory však zařízení ovlivňují více a některé méně.

U transformátorů jsou hlavními provozními vlivy, vlivy mechanického namáhání (vibrace, otřesy, mechanické rázy), chemické vlivy (oxidace, koroze), klimatické vlivy, záření, působení teploty a vlivy elektrického pole.

U točivých elektrických strojů způsobuje stárnutí několik vlivů, jedním z nich je mechanické namáhání (opotřebení), dále jde o chemické stárnutí (koroze) a o vlivy elektrického namáhání. Ve stroji se vyskytují i kombinace těchto jevů, koroze pod napětím nebo drážkové výboje, které vznikají při vibracích vinutí v drážkách.

1.2.1 Tepelné namáhání

Tepelné namáhání může mít dlouhodobý nebo krátkodobý charakter a může způsobit nevratné změny ve strukturách použitých izolačních materiálů. Teplo ve strojích vzniká přeměnou ztrát, takto přeměněné ztráty poté působí na izolační materiály. Rozdíl v tepelné odolnosti izolačních materiálů oproti kovům výrazně snižuje využití strojů. Proto je nutná dobrá znalost vlastností izolačních materiálů pro správný výběr při návrhu stroje. Vlivem tepelného namáhání dochází k fyzikálním a chemickým změnám, které jsou důsledkem chemických degradačních reakcí vyvolaných teplotou. Mezi chemické změny patří např. depolymerační reakce, oxidace, difuze. Mezi fyzikální změny patří třeba změna hmotnosti, pružnosti nebo pevnosti.

Souvislost mezi životností izolace τ [h] a teplotou T [°C], při které izolace stárne se určuje pomocí několik rovnic a pravidel, jedním z těchto pravidel je například Montsingerovo pravidlo [20]:

$$\tau = A \cdot e^{-BT}, \quad (1.2)$$

kde A a B jsou materiálové konstanty.

Z tohoto pravidla je zřejmé, že životnost materiálu je exponenciální funkcí teploty stárnutí. To znamená, že se zvýšením teploty se exponenciálně zkracuje délka životnosti. Dobu života můžeme určit také z několika dalších rovnic a to z Arrheniovy rovnice nebo z Büssingova teorému.

Izolační systémy se podle jejich vlastností s ohledem na tepelnou odolnost rozdělují do normou daných tříd tepelné odolnosti.

Tab. 1.1 Přehled tepelných tříd pro izolační materiály - současnost [4]

Třída	70	Y	A	E	B	F	H	N	R	250
Teplotní hranice	70°C	90°C	105°C	120°C	130°C	155°C	180°C	200°C	220°C	250°C

1.2.2 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání je jedním z druhu namáhání, které je také nutné sledovat z hlediska degradace elektroizolačního systému. Často bývá zdrojem mechanického namáhání vliv elektromagnetických, elektrodynamických nebo tepelných sil. Mechanickému namáhání jsou stroje vystaveny během výroby, manipulace, dopravy a jejich provozu. Během výroby se mechanické namáhání výrazně projevuje u vinutí strojů a přístrojů, při ručním i strojním vkládání. V provozu se jedná hlavně o působení vibrací a mechanických rázů, které mohou mít několik příčin, ať už od technologického procesu, poháněného zařízení nebo špatného mechanického spojení elektromotoru s poháněným zařízením.

Vlivem vibrací jsou namáhány především ložiska a hřídele, dále jsou také namáhány vinutí stroje a jejich izolační systémy.

Mechanické namáhání lze popsat mnoha modely, které jsou závislé na různých vlastnostech materiálů a různých druzích mechanického namáhání. Příkladem může být exponenciální model vycházející z teorie mechanismu růstu trhlin při tahovém napětí, tento model se nazývá Odingův [6].

$$\tau = \left(\frac{C}{A}\right)^{\frac{1}{m}} \cdot e^{-\left(\frac{\alpha+\beta}{m}\right)\sigma}, \quad (1.3)$$

kde τ je doba do lomu [h],
 σ je mechanické napětí [Pa],
 m je ukazatel charakterizující způsobilost hromadit vakance,
 C, A, β jsou konstanty,
 α je parametr.

Další známý model fyzikálního charakteru popisující mechanické namáhání vytvořili Decht'ar a Usipov.

1.2.3 Elektrické namáhání

Do elektrického namáhání se zahrnují všechny účinky působení elektrického a magnetického pole, částečných nábojů, plazivých proudů, elektrolýzy, účinku prostorových nábojů, elektrických stromečků apod. Jedná se tedy o různé těžko popsatelné procesy. Pro popis vlivu elektrického pole na dobu života materiálu se využívají modely empirického

charakteru.

Mocninný model:

$$\tau = k \cdot E^{-n} \quad (1.4)$$

Exponenciální model:

$$\tau = a \cdot e^{-bE}, \quad (1.5)$$

kde τ je doba života [h],
 E je intenzita elektrického pole [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$],
 a, k, n, b jsou konstanty.

Elektrické namáhání je závislé na přivedeném napětí, které může mít různý tvar, frekvenci, velikost. Pokud se napětí mění v čase, pak je nutné zohlednit i rychlost změn mezi jednotlivými velikostmi napětí.

Elektrické namáhání se nejčastěji dělí podle napětí na namáhání střídavým sinusovým napětím nebo stejnosměrným napětím. S namáháním těchto druhů napětí jsou již dlouholeté zkušenosti. Ve výkonové elektronice je však extrémním případem vysokofrekvenční pulzní namáhání, které je způsobeno například použitím frekvenčních měničů. Vlivem použité vyšší pracovní frekvence dochází v zařízení k dielektrickému ohřevu materiálu a ke zvýšené výbojové činnosti. Výboje se vyskytují již při nižších hodnotách, než tomu je u obvyklého střídavého napětí s frekvencí 50 Hz.

Vlivem rozvinuté výbojové činnosti může docházet k selhání dlouhodobě namáhaných izolací. V důsledku působení elektrického namáhání a elektrických výbojů mohou v izolačním materiálu a v jeho okolí vznikat plynné, kapalné a pevné produkty, které zhoršují izolační vlastnosti materiálu a vedou k poruše izolačního systému stroje.

1.2.4 Vlivy prostředí

Jedná se o faktory, které kromě již dříve zmíněných faktorů také ovlivňují stárnutí elektroizolačního systému elektrického zařízení. Mezi tyto vlivy patří zejména působení vlhkosti, teploty okolí, chemických činidel, biologických vlivů, záření, prachu a mnoha dalších vlivů.

Teplota je vliv, který ovlivňuje izolační systém daného zařízení ve všech etapách jeho života a izolační systém musí být schopný v těchto podmínkách plnit svou funkci. Teplota může na systém působit krátkodobě nebo dlouhodobě, při dlouhodobém namáhání však

dochází k nevratným změnám ve vlastnostech a strukturách materiálu, kdežto u krátkodobé působení se může jednat i o změny vratné. Teplo většinou působí ve spojení s kyslíkem a kvůli tomuto společnému působení se nejčastěji jedná o komplikované a agresivní termooxidační namáhání.

Záření je degrační vliv, u kterého je energie přímo úměrná frekvenci, tudíž nejhůře působí infračervené záření. Ještě horšími následky má vzájemné působení záření a teploty, protože vzájemné působení zvyšuje účinek jednotlivých vlivů.

Vlhkost je svou přítomností zdrojem volných nosičů elektrického náboje, které vznikají disociací molekul vody ze vzduchu. Voda může působit jak na povrchu izolantu, tak i uvnitř izolantu, voda se absorbuje do izolantu, říká se, že izolant navlhá. Působením vody se výrazně zhoršují elektrické a mechanické vlastnosti izolantů. V důsledku působení vlhkosti se zhoršuje vnitřní a povrchový odpor, narůstají dielektrické ztráty a permitivita materiálu a snižuje se mechanická pevnost materiálu.

Chemické vlivy mají za následek svého působení různé interaktivní reakce, při kterých dojde ke změně původních vlastností látek. Jednou z nejznámějších reakcí zapříčiněnou chemickými vlivy jsou korozní děje.

Prach je jednou ze složek ovzduší a rovněž ovlivňuje funkce jednotlivých zařízení. Svým usazením na povrchu zařízení neumožňuje dobrý odvod tepla a tím přispívá k urychlení tepelné degradace. Další možností působení je výskyt prachu v izolačním systému, což má za následek zhoršení izolačních vlastností.

Biologické vlivy mohou být způsobeny například vlivem hub, bakterií, plísní, hmyzu a zvířat. Houby a plísně svým působením narušují podklad, na kterém jsou usazeny a tím zhoršují jeho vlastnosti.

2 Spolehlivostní úvahy

Spolehlivostní teorie umožňuje kvantitativní vyjádření spolehlivosti ze získaných experimentálních dat a pomocí matematických modelů dává možnost předpovědi spolehlivosti. V teorii spolehlivosti se můžou sledovat buď stochastické nebo deterministické jevy.

Pravděpodobnost výskytu určitých skutečností se rozděluje na pravděpodobnost a priori, kde se jedná o vstupní pravděpodobnost nebo pravděpodobnost a posteriori, kde jde o pravděpodobnost vycházející z informací získaných provedením určitého šetření.

V teorii spolehlivostních úvah v elektrotechnologii se vyskytuje mnoho pojmů, definic a vlastností, některými z používaných pojmů jsou [1]:

Bezporuchovost – je schopnost po stanovenou dobu a za daných podmínek plnit bez poruchy svou funkci. Mezi ukazatele, podle kterých můžeme bezporuchovost posuzovat patří například hustota pravděpodobnosti poruchy $f(t)$, intenzita poruch $\lambda(t)$ a střední doba bezporuchového chodu T_s .

Životnost – je schopnost výrobku plnit požadovanou funkci do předepsaného mezního stavu daného technickými podmínkami. Jedním z ukazatelů pro hodnocení životnosti je například střední doba do poruchy $MTTF$, dalším ukazatelem je střední doba mezi poruchami $MTBF$ nebo střední akumulovaný život MCL .

Bezpečnost – znamená, že výrobek nebude při plnění předepsané funkce po danou dobu ohrožovat lidské zdraví, chod systému a životní prostředí.

Porucha – je stav znamenající ukončení provozuschopného stavu. Poruchy se dělí na poruchy náhlé a postupné nebo úplné a částečné [1].

2.1 Základní aspekty matematické statistiky

Matematickou statistiku lze chápat jako část matematiky, která se stala nástrojem pro popis spolehlivosti a která zahrnuje popis hromadných a náhodných jevů. Jedná se o činnost potřebnou pro získání statistických dat, která se zabývá následným zpracováním a vyhodnocením získaných informací. Pro každé statistické šetření se musí vymezit prostorové a časové oblasti, ve kterých se poté bude provádět šetření daných statistických jednotek.

Společnou vlastností prvků ve statistickém souboru je statistický znak, který se také jinak nazývá znak jakosti, obecně statistické znaky dělíme na kvantitativní a kvalitativní.

V matematické statistice mají význam pro chování náhodných veličin v řadě případů

číselné charakteristiky související s hodnotami parametrů vyskytujícími se v popisu pravděpodobnostní funkce. Tyto charakteristiky se dělí na charakteristiky polohy, variability (rozptylu), závislosti, centrální momenty a kombinované ukazatele [8].

2.1.1 Charakteristiky polohy

Mezi charakteristiky polohy patří například střední hodnota, aritmetický průměr, vážený aritmetický průměr, geometrický průměr, harmonický průměr a vážený harmonický průměr [1][8][9].

Střední hodnota je ve statistice jednou z nejnámějších charakteristik polohy. Je-li x náhodná veličina definovaná hustotou f nebo pravděpodobností funkcí p , tak se definuje následujícími vztahy:

$$E(x) = \int_A^B xf(x)dx \quad (2.1)$$

resp.

$$E(x) = \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (2.2)$$

Aritmetický průměr je nejrozšířenější charakteristika polohy u nepříliš statisticky znalé veřejnosti. Jedná se o poměr součtu hodnot všech statistických znaků a celkového počtu prvků v souboru.

$$\bar{x}_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.3)$$

Vážený aritmetický průměr je zobecněním aritmetického průměru, který zohledňuje důležitost jednotlivých hodnot ve statistickém souboru.

$$\bar{x}_{va} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad (2.4)$$

Geometrický průměr je charakteristika polohy, která udává určitý koeficient souboru koeficientů. Používá se například k popisu vývoje časových řad.

$$\bar{x}_g = \sqrt[n]{\left(\prod_{i=1}^n x_i\right)} \quad (2.5)$$

2.1.2 Charakteristiky rozptýlení

Další z používaných statistických charakteristik je charakteristika rozptýlení (variability), patří sem například rozptyl, směrodatná odchylka, rozpětí, modus, medián, variační koeficient a koeficienty šikmosti a špičatosti [1][8][9].

Rozpětí je definováno jako rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou statistického znaku ve statistickém souboru.

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (2.6)$$

Rozptyl je střední hodnotou druhých mocnin odchylek od střední hodnoty a charakterizuje šířku rozdělení.

Pro diskrétní náhodnou veličinu:

$$\sigma^2(x) = \sum_{i=1}^n [x_i - E(x)]^2 p_i \quad (2.7)$$

Pro spojitou náhodnou veličinu:

$$\sigma^2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(x)]^2 f(x) dx \quad (2.8)$$

Směrodatná odchylka je definovaná jako odmocnina z rozptylu.

$$\sigma(x) = \sqrt{\sigma^2(x)} \quad (2.9)$$

Medián je hodnota prostředního statistického znaku ve statistickém souboru.

Variační koeficient v je poměr směrodatné odchylky a absolutní hodnoty střední hodnoty.

$$v = \frac{\sigma}{|E(x)|} \quad (2.10)$$

3 Statistické modely

Zařízení všech různých zaměření a funkcí jsou v každé fázi svého života vystaveny působení jistých degradačních vlivů a není tomu jinak ani u elektrických zařízení, proto je při návrhu, výrobě a provozu těchto zařízení důležité znát degradační principy z fyzikálně chemického hlediska a vlastnosti jednotlivých použitých prvků. Čím lepší jsou znalosti o těchto vlastnostech a principech, tím lepší a přesnější model stárnutí poté může být sestaven. Důležitou podmínkou bezchybné funkce elektrického zařízení je bezporuchový chod všech jeho částí. Největší důraz je kladen na správnou funkci izolačního systému.

Další nedílnou součástí návrhu zařízení je postup pro výpočet životnosti využívající pravděpodobnostního vyjádření a statistického chování jeho parametrů. Využitím teorie spolehlivostních úvah je možné předpovědět spolehlivost pomocí matematických modelů a odhalit tak nejkritičtější místa celého systému. Spolehlivost je definována jako: „*obecná vlastnost spočívající ve schopnosti výrobku plnit po stanovenou dobu požadované funkce v míře pravděpodobnosti, $\langle 0,1 \rangle$ resp. $\langle 0 \div 100\% \rangle$, při zachování provozních parametrů daných technickými podmínkami*“ [1]. Cílem spolehlivosti je předpovídání skutečností s určitou pravděpodobností, při potřebě zpětné vazby, která je nutná pro ověření a zpřesnění předpovědí. K analýze bezporuchovosti se v současnosti využívají matematické a statistické modely, které jsou založené na použití vhodných statistických rozdělení. V elektrotechnice se k tomu účelu využívá normální, exponenciální a Weibullovo rozdělení.

Rozdělení pravděpodobností je pravidlo, které každé hodnotě přiřadí pravděpodobnost, že nabude právě této hodnoty na jejím definičním oboru. Rozdělení pravděpodobností se nejčastěji popisuje použitím distribuční funkce nebo hustoty pravděpodobnosti. Distribuční funkce $F(x)$ přiřadí každému reálnému číslu pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude hodnoty menší než toto reálné číslo [9].

$$F(x) = P\{X \in (-\infty, t)\} = P(X < t) \quad (3.1)$$

3.1 Statistické modely

3.1.1 Exponenciální rozdělení

Jedná se o velmi často využívané statistické rozdělení. Předpokladem pro využití tohoto rozdělení je, že se bude využívat pro sledování objektů vyskytujících se z hlediska poruch ve

střední části vanové křivky, to znamená, že zkoumaný objekt má konstantní intenzitu poruch $\lambda(t) = \lambda = \text{konst.}$, kde $\lambda > 0$, což je vidět v následujícím vzorci [1][10]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}, \text{ pro } t \geq 0, \quad (3.2)$$

kde $F(t)$ je distribuční funkce,
 $R(t)$ je pravděpodobnost bezporuchového stavu,
 $f(t)$ je hustota pravděpodobnosti.

Exponenciální rozdělení bývá někdy přezdíváno rozdělením bez paměti, což znamená, že pravděpodobnost vzniku poruchy nezávisí na době, po kterou je zařízení v provozu [9].

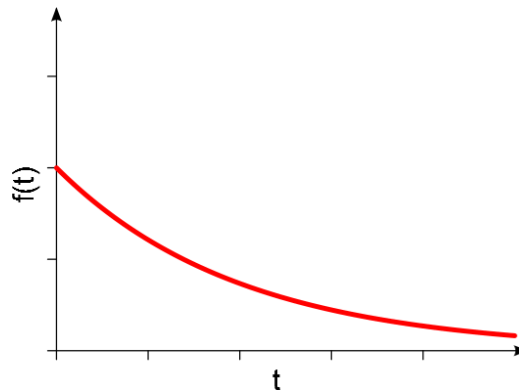
Pravděpodobnost poruchy (distribuční funkce) se vypočte z následujícího vzorce:

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(u) du}, \text{ pro } t \geq 0 \quad (3.3)$$

Hustotu pravděpodobnosti se určí podle následujícího vztahu [1][12]:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}, \text{ pro } t \geq 0, \quad (3.4)$$

A grafické zobrazení může vypadat například takto:



Obr. 1 Příklad hustoty pravděpodobnosti pro různé hodnoty parametru λ , převzato z [10].

Poté se určí funkce bezporuchovosti [12]:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = e^{-\lambda t}, \quad (3.5)$$

Střední doba do poruchy *MTTF*:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3.6)$$

Exponenciální rozdělení se používá pro popis doby do výskytu první události nebo doby mezi událostmi. Toto rozdělení dobře popisuje doby života na zařízeních, u kterých se

porucha vyskytne ze zcela náhodných příčin. Nevýhodou toho rozdělení však je, že nezohledňuje poruchy způsobené v důsledku opotřebení a nezahrnuje ani délku předchozího provozu zařízení.

3.1.2 Normální rozdělení

Normální rozdělení je jedno z nejpoužívanějších a nejdůležitějších rozdělení pro spojité náhodné veličiny, využívané pro popis velkého množství náhodných jevů nejen v technice. Jinak se také nazývá Gaussovo rozdělení nebo v anglické literatuře se označuje bell curve a to z důvodu zvonovitého tvaru křivky. Normální rozdělení se využívá v případech, kdy na kolísání náhodné veličiny působí velký počet neznámých a vzájemně nezávislých jevů. Důležitou vlastností tohoto rozdělení je, že za určitých podmínek se jím dá nahradit řada jiných rozdělení [1][13].

Normální rozdělení má dva parametry [9]:

σ^2 – rozptyl náhodné veličiny, parametr σ nám určuje šířku pásma, kde je výskyt pravděpodobnosti náhodné veličiny 68,268%.

μ – střední hodnota, parametr charakterizující polohu rozdělení

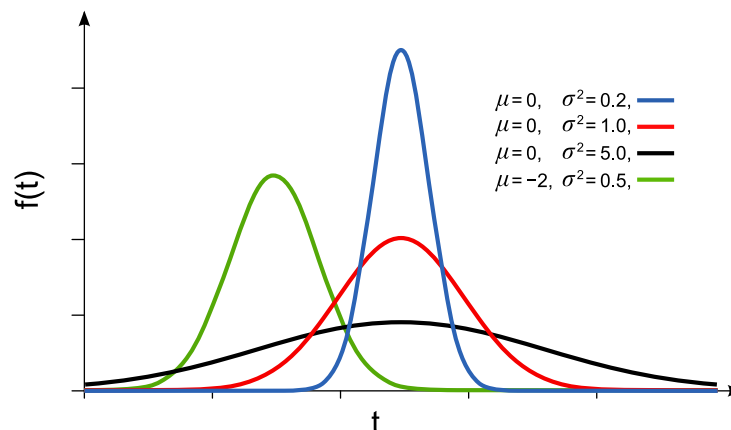
Distribuční funkce je dána následujícím vztahem [13]:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (3.7)$$

Hustota pravděpodobnosti je dána následujícím vztahem [13]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.8)$$

Grafické zobrazení hustoty pravděpodobnosti tzv. Gaussova křivka:



Obr. 2 Funkce hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení pro různé parametry, převzato z [10].

Funkce bezporuchovosti je dána následujícím vztahem [12]:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = 1 - \int_0^t \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - \mu}{\sigma} \right)^2} d\tau \quad (3.9)$$

Střední doba do poruchy *MTTF* je dána následujícím vztahem [12]:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \mu \quad (3.10)$$

Jelikož je analyticky nemožné vypočítat distribuční funkci, zavádí se normované normální rozdělení s parametry $\mu = 0$ a $\sigma^2 = 1$. Z parametrů je zřejmé, že normované normální rozdělení má nulovou střední hodnotu a jednotkový rozptyl.

Hustota pravděpodobnosti normovaného normálního rozdělení je dána následujícím vztahem [1]:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (3.11)$$

a distribuční funkce je dána [10]:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3.12)$$

S využitím tohoto rozdělení se můžeme setkat například při hodnocení elektrické pevnosti elektroizolačních materiálů, jako příklad můžeme uvést stanovení průrazného napětí elektroizolačních kapalin při síťovém kmitočtu, které je popsáno v normě ČSN EN 60156 [14]. V praxi se toto rozdělení uplatňuje ve výpočtech doby do poruchy izolačních prvků elektrických zařízení opotřebovaných vlivem stárnutí. Za pomoci tohoto rozdělení se může modelovat třetí část vanové křivky poruch, v tomto případě se ke konstantní intenzitě poruch přidává ještě působení stárnutí.

3.1.3 Erlangovo rozdělení

Erlangovo rozdělení je rozdělení vyvinuté A. K. Erlangem, jedná se o speciální typ Gamma rozdělení pro k z množiny celých čísel. Toto rozdělení v Poissonově procesu popisuje dobu do výskytu k -té události [15].

Erlangovo rozdělení má dva parametry [9]:

λ – rychlost výskytu událostí (parametr měřítka)

k – počet událostí, ke kterým má dojít (parametr tvaru)

Hustota pravděpodobnosti je dána následujícím vztahem:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \cdot \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!}, t > 0 \quad (3.13)$$

Distribuční funkce je definována následujícím vztahem:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \cdot \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^j}{j!} \quad (3.14)$$

Intenzita poruch:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda}{(k-1)! \sum_{j=0}^{k-1} \frac{1}{(k-1-j)! (\lambda t)^j}} \quad (3.15)$$

Střední hodnota:

$$EX_k = \frac{k}{\lambda} \quad (3.16)$$

Rozptyl:

$$DX_k = \frac{k}{\lambda^2} \quad (3.17)$$

S ohledem na intenzitu poruch, která je v případě tohoto rozdělení rostoucí funkcí, je toto rozdělení vhodné například pro modelování procesů stárnutí a určování doby do poruchy. Nevýhodou však může být, že je toto rozdělení pro k (počet událostí) omezeno pouze na kladná celá čísla.

3.1.4 Weibullovo rozdělení

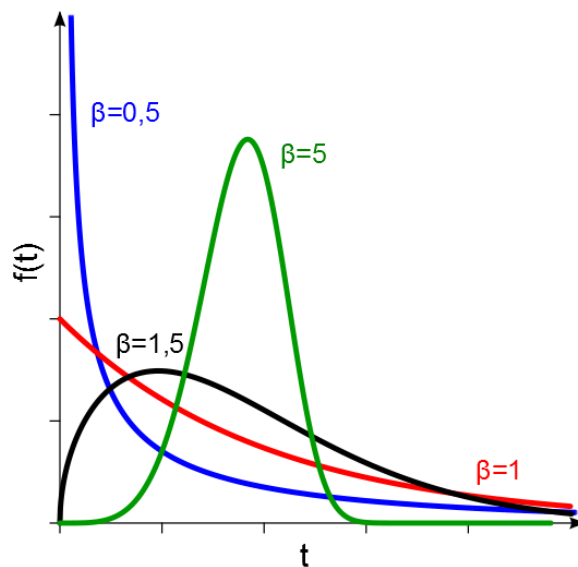
Weibullovo rozdělení se hojně používá jako model pro statistické modelování bezporuchovosti v oblasti elektroniky a elektrotechniky. Využívá se za té podmínky, že u zkoumaného prvku nelze předem určit předpoklad o konstantní intenzitě poruch. Toto rozdělení se používá v případech, kdy je bezporuchovost závislá na stáří, odpracovaných hodinách a počtu vykonaných provozních cyklů [9][11][17].

U Weibullova rozdělení se rozlišují tři typy a to rozdělení tříparametrové, dvouparametrové a jednoparametrové. Tříparametrové rozdělení se ve většině případů zobecňuje na dvouparametrové rozdělení a to tím, že se parametr posunu rovná nule. Poté je hustota pravděpodobnosti dvouparametrového Weibullova rozdělení dána následujícím vzorcem:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \text{ pro } t \geq 0, \quad (3.18)$$

kde β je parametr ovlivňující tvar funkce hustoty pravděpodobnosti,
 η je parametr, který mění měřítko na časové ose.

Parametr β ovlivňuje tvar výsledného rozdělení. Pokud $\beta = 1$, jedná se o zvláštní případ, kde má Weibullovo rozdělení stejný charakter jako rozdělení exponenciální a intenzita poruch se stává konstantou. Pokud $\beta < 1$, snižuje se okamžitá intenzita poruch a pokud $\beta > 1$, okamžitá intenzita poruch se zvyšuje. Těchto mezních hodnot se využívá při konstrukci vanové křivky [11].



Obr.3 Funkce hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro různé parametry, převzato z [10].

Pro další výpočty se ve Weibullově rozdělení zavádí funkce bezporuchovosti. Funkce bezporuchovosti říká jaká je pravděpodobnost, že sledovaný prvek bude pracovat až do doby t bez poruchy a je dána následujícím vztahem:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad (3.19)$$

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

Další statistickou veličinou, která se dá z Weibullova rozdělení vyjádřit, je doba do poruchy. Jedná se o statickou veličinu, která slouží jako ukazatel spolehlivosti elektrického

zařízení a je dána vztahem:

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right), \quad (3.20)$$

kde $\Gamma(z)$ spočítáme ze vztahu (3.21).

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt, \quad (3.21)$$

Jednotlivé hodnoty funkce $\Gamma(z)$ jsou uvedeny v normě ČSN EN 61649 [16].

Aby bylo Weibullovo rozdělení správně použito je nutné provést odhad jednotlivých parametrů. Odhad parametrů má několik možností provedení pomocí různých teoretických metod, v současnosti se k odhadu nejčastěji využívá metoda maximální věrohodnosti. Dalším způsobem využívaným k odvození parametrů je použití Weibullova pravděpodobnostního grafu [11][16].

Z Weibullova pravděpodobnostního grafu po zanesení empirických dat vyplývá, zda lze Weibullovo rozdělení na daný soubor dat aplikovat. Osy Weibullova pravděpodobnostního grafu mají speciální měřítka transformovaná pomocí přirozených logaritmů, na osu x se vynáší v logaritmickém měřítku doba do poruchy a na osu y ve dvojitým logaritmickém měřítku kumulativní pravděpodobnost viz (3.22). Nelineární kumulativní distribuční funkce poté transformuje ve funkci lineární [11][16].

$$\ln(-\ln(1 - F(t))), \quad (3.22)$$

kde $F(t)$ je dána vztahem (3.23).

$$F_i(t) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}, \quad (3.23)$$

kde n je rozsah výběru,

i je pořadová pozice datové složky.

Pokud empirická data vynesena v grafu jsou v jedné přímce, tak je možné použít Weibullovo rozdělení a z grafu se určí parametry rozdělení. Parametr β je poté určen směrnici přímky a parametr η je určen jako absolutní člen přímky [16].

Weibullovo rozdělení lze uplatnit v mnoha otázkách a ohledech, například ve vyčíslení bezporuchovosti výrobku nebo v souvislosti s předpovědí počtu poruch za určitých podmínek. Je-li známý čas do poruchy, poté se dá popsat rozdělení některým z výše uvedených způsobů, pokud se alespoň jeden ze způsobů povede určit, tak ostatní funkce už se ze známého způsobu odvodí. Výhodou tohoto rozdělení je schopnost nahradit jiná rozdělení a schopnost určit vhodný tvar pro modelování doby poruchy i z malého vzorku dat.

3.2 Fyzikálně-statistické modely

3.2.1 Montanariho pravděpodobnostní model

Tento pravděpodobnostní model, je statistický model založený na základě Weibullova rozdělení, u kterého lze pro určení dob do poruchy použít kumulativní distribuční funkci Weibullova rozdělení (3.18.) a to za předpokladu, že elektroizolační systém bude namáhán kombinací tepelného a elektrického namáhání [10].

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad (3.24)$$

kde η a β jsou funkcí elektrického a tepelného namáhání.

Parametr η popisuje dobu do poruchy při pravděpodobnosti 63,2% a lze ho tak využít pro popis stárnutí u elektroizolačního systému, při splnění tohoto předpokladu, lze parametr $\eta(E, T)$ formulovat jako životnostní model $\tau(E, T)$.

Z upraveného mocninného modelu elektrického stárnutí uvažujícího mezní hodnotu intenzity elektrického pole se vychází při popisu parametru $\eta(E, T)$. Po úpravě je možno model zapsat tímto způsobem [10]:

$$\eta(E, T) = \tau = t_s \cdot \left(\frac{E}{E_s}\right)^{-N}, \quad (3.25)$$

kde τ je životnost izolačního systému,

N je koeficient odolnosti,

t_s je doba do poruchy při intenzitě elektrického pole E_s a teplotě T ,

E_s je referenční intenzita elektrického pole, která je definovaná jako nejvyšší hodnota této intenzity elektrického pole při teplotě T .

Koeficient odolnosti je dán následujícím vztahem:

$$N = \frac{N_c}{\left(1 - \frac{E_s - E}{E_s - E_T}\right)^v}, \quad (3.26)$$

kde E_T je mezní hodnota intenzity elektrického pole při teplotě T ,

N_c je počáteční odolnostní koeficient,

v je parametr tvaru.

Pravděpodobnostní model se získá dosazením parametru $\eta(E,T)$ do rovnice (3.24), po dosazení bude model vypadat následovně:

$$F(t, E, T) = 1 - e^{-\left[\frac{t}{t_s} \cdot \left(\frac{E}{E_s}\right)\right]^{\beta(E,T)}} \quad (3.27)$$

Montanriho pravděpodobnostní model lze zapsat pomocí percentilů:

$$t_{Fp} = t_s \cdot \left[\frac{E}{E_s}\right]^{-N} \cdot [-\ln(1-p)]^{\frac{1}{\beta(E,T)}}, \quad (3.28)$$

kde p je pravděpodobnost selhání elektroizolačního systému.

Montariho pravděpodobnostní model se zakládá na Weibullově rozdělení s využitím mocninného modelu elektrického stárnutí. Mezi výhody tohoto modelu patří, že do svého popisu elektroizolačního systému zahrnuje mezní intenzity elektrického pole pro různé teploty stárnutí. Jeho nevýhodou je ovšem základ na empirickém vztahu elektrického stárnutí a absence popisu degračních procesů elektroizolačního systému z fyzikálního hlediska.

3.2.2 Pravděpodobnostní model využívající tepelného stárnutí EIS

Tento statistický model se zakládá také na Weibullově rozdělení a vychází z myšlenky Montanariho pravděpodobnostního modelu uvedeného výše. Jedná se o model popisující stárnutí elektroizolačních systémů. Doba do poruchy se určí pomocí kumulativní distribuční funkce Weibullova rozdělení a to za předpokladu, že na elektroizolační systém působí vlivy tepelného namáhání. Po splnění předpokladu je možné parametr $\eta = \eta(T)$ popsat modelem tepelného stárnutí [18][19].

$$\eta(T) = \tau = a \cdot e^{\frac{E_a}{RT}}, \quad (3.29)$$

kde E_a je aktivační energie [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$],
 R je univerzální plynová konstanta,
 a je materiálová konstanta.

Pravděpodobnostní model využívající tepelné stárnutí je pak dán následujícím vztahem:

$$F(t, T) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a} \cdot e^{\frac{E_a}{RT}}\right)^{\beta(T)}} \quad (3.30)$$

Model lze vyjádřit pomocí percentilů:

$$t_{Fp} = a \cdot e^{\frac{E_a}{RT}} \cdot [-\ln(1-p)]^{\frac{1}{B(T)}} \quad (3.31)$$

Výhodou tohoto modelu je, že se zakládá na fyzikálně odvozeném modelu tepelného stárnutí. Naopak jeho nevýhodou je zahrnutí pouze jednoho degradačního faktoru a neuvažování mezní hodnoty tepelného stárnutí.

3.3 Shrnutí výhod a nevýhod uvedených modelů

Exponenciální rozdělení:

Výhody: Dobře popisuje doby života u zařízení s náhodným výskytem poruchy.

Nevýhody: Nezohledňuje poruchy způsobené opotřebením a nezahrnuje předchozí dobu provozu.

Normální rozdělení:

Výhody: Umožňuje popis prvků opotřebovaných vlivem stárnutí a popis třetí části vanové křivky. Za určitých podmínek může nahradit jiná rozdělení.

Nevýhody: Nevýhodou při výpočtu spolehlivosti je, že začíná na minus nekonečno.

Erlangovo rozdělení:

Výhody: Hodí se pro modelování procesů stárnutí a určování doby do poruchy.

Nevýhody: Nevýhodné může být, je toto rozdělení omezeno u parametru k pouze na kladná čísla.

Weibullovo rozdělení:

Výhody: Schopnost nahradit jiná rozdělení. Určení vhodného tvaru rozdělení z malého vzorku dat. Je-li u něj známý čas do poruchy a alespoň jeden ze způsobů, kterými je popsán, můžeme určit i ostatní způsoby. S jeho využitím lze modelovat celou vanovou křivku.

Nevýhody: Nevýhodou je poměrně komplikovaný odhad parametrů, který se v dnešní době řeší použitím početních programů.

Montanariho pravděpodobnostní model:

Výhody: Zahrnutí mezní intenzity elektrického pole pro různé teploty stárnutí v popisu elektroizolačního systému.

Nevýhody: Zakládá se na empirickém vztahu elektrického stárnutí a nepopisuje degradační procesy elektroizolačních systémů z fyzikálního hlediska.

Pravděpodobnostní model využívající tepelného stárnutí elektroizolačního systému:

Výhody: Zakládá se na fyzikálním odvození modelu tepelného stárnutí.

Nevýhody: Zahrnuje pouze jeden degradační faktor a neuvažuje mezní hodnoty tepelného stárnutí.

4 Závěr

Oblast statistiky a statistických metod využívaných v praxi je velice široká. Oblast elektrotechniky a elektrotechnologických procesů není výjimkou. Za pomoci diagnostiky získáme mnoho důležitých informací. Využitím statistických metod můžeme ze získaných informací spočítat a určit mnoho parametrů popisujících elektroizolační systém. Může to být třeba doba do poruchy, doba mezi poruchami nebo pravděpodobnost výskytu četnosti chyby.

Nejlepší vlastnosti z prostudovaných modelů má Weibullovo rozložení, jeho pomocí se může nejen modelovat celá vanová křivka spolehlivosti, což s jiným prostudovaným modelem nelze. Dále toto rozdělení oproti jiným modelům zohledňuje případy, kdy je bezporuchovost závislá na stáří, odpracovaných hodinách a počtu vykonaných provozních cyklů. Další jeho výhodou je, že pokud je známý čas do poruchy a nějaký ze způsobů, kterým je model popsán, tak se dají dopočítat i zbývající způsoby popisující daný prvek.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2011, 118 s. ISBN 978-80-7300-412-5.
- [2] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [3] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [4] ČSN EN 60085 ed. 2. *Elektrické izolace - Tepelné hodnocení a značení*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [5] SKALA, Bohumil. Přednášky z předmětu elektrické stroje. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2010.
- [6] KOUTSKÝ, Jaroslav. Degradací procesy a predikce životnosti. vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995, 167 s. ISBN 80-708-2177-9.
- [7] STONE, Greg C. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair. Vyd. 1. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2004, xviii, 371 p. ISBN 0-471-44506-1.
- [8] *Matematická statistika* [online]. Praha: ČVÚT, 2004 [cit. 2014-06-06]. Dostupné z: <http://math.feld.cvut.cz/prucha/mstp/1pu.pdf>
- [9] BRIŠ, Radim. Statistika I. pro kombinované a distanční studium. Ostrava, 2004 Dostupné z: http://home1.vsb.cz/~dom033/predmety/statistika/ucebni_text/
- [10] SOUČEK, Jakub. Popis stárnutí elektroizolačních systémů. Plzeň, 2013. Teze disertační práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická.
- [11] *Weibullovo rozdělení při analýzách bezporuchovosti*. NOVOTNÝ, Radovan, Elektrověue [online]. Brno, [cit.2014-06-06]. Dostupné z: <http://www.elektrověue.cz/clanky/02017/index.html>
- [12] VDOLEČEK, František. *SPOLEHLIVOST A TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA*. Brno: FSI VUT v Brně, 2002

- [13] Základní typy rozdělení pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny. [online]. [cit. 2014-06-08]. Dostupné z:
<http://homen.vsb.cz/~oti73/cdpast1/KAP05/PRAV5.HTM>
- [14] ČSN EN 60156. *Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [15] Erlang distribution. [online]. [cit. 2014-06-08]. Dostupné z:
http://www.vosesoftware.com/ModelRiskHelp/index.htm#Distributions/Continuous_distributions/Erlang_distribution.htm
- [16] ČSN EN 61649. Weibullova analýza. Praha: úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [17] SOUČEK, Jakub. Elektrotechnika a informatika 2012. 2012, Využití Weibullova rozdělení a aktivační energie pro popis chování izolačních systémů.
ISBN 978-80-261-0120-8.
- [18] SOUČEK, Jakub. Elektrotechnika a informatika 2013. 2013, Pravděpodobnostní model využívající tepelného stárnutí elektroizolačních systémů.
ISBN 978-80-261-0233-5.
- [19] SOUČEK, Jakub a Pavel TRNKA. Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Brno: VUT v Brně, 2014, A New Statistical-Physical Model to the Description of aging of electroinsulating systems.
ISBN 978-1-4799-3806-3.
- [20] KUDLÁČEK, Ivan. Degradáční procesy I. Praha: ČVUT, 1994.