

ZBYTKOVÁ ŽIVOTNOST ELEKTROIZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ

doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.

Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni

Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Email: pavel@ket.zcu.cz

Diagnostika elektrických zařízení, potažmo elektroizolačních systémů, je často vyzdvihována z hlediska důležitosti zejména pro zajištění maximální spolehlivosti daného sledovaného zařízení. Publikovány byly jednotlivé diagnostické systémy, off-line nebo on-line, které sledují a vyhodnocují dané zařízení. Téměř vždy diagnostický systém odhaluje poruchový či havarijný stav, stále však zůstává důležitý problém stanovení zbytkové životnosti zařízení.

1. ÚVOD

Dnes existuje velké množství možností jak koncipovat diagnostický systém, který má zjišťovat stav elektrického zařízení. Ve výkonové elektrotechnice se rozlišují jednotlivé diagnostické metody pro dané druhy strojů, tzn. pro stroje točivé a netočivé; vysokonapěťové a nízkonapěťové; pracující při napětí střídavém; stejnosměrném či pulzním atd. Samotná koncepce diagnostického systému pak je buď pro diagnostiku off-line nebo on-line, přičemž celý diagnostický systém může být navržen jako expertní systém. Navíc ve svém rozhodovacím systému může používat dvou, nebo více hodnotovou logiku. Diagnostický systém může být samostatný, jako například diagnostický systém výkonového transformátoru. Může využívat výpočetní jednotku, která je již v zařízení je instalována z jiných důvodů – řízený pohon. Všechny diagnostické systémy umí sledovat dané veličiny (např. stanovené elektrické parametry), porovnávat jejich hodnotu s hodnotou zvolenou, a při jejím překročení vyslat signál o poruše, případně havárii. Během bezporuchového provozu zařízení však vyvstává otázka **zbytkové životnosti** zařízení, či určení doby do poruchy. Životnost, definovaná jako: „*způsobilost výrobku nebo zařízení plnit požadované funkce do mezního stavu stanoveného technickými podmínkami*“, je důležitým pojmem teorie spolehlivosti. Ta se definuje jako: „*obecná vlastnost spočívající ve schopnosti výrobku nebo zařízení plnit po stanovenou dobu požadované funkce při zachování provozních parametrů daných technickými podmínkami*“. Určit např. zbytkovou životnost izolačního systému je poměrně složité, žádný diagnostický systém proto neumí tuto dobu spolehlivě stanovit. V dalším textu se blíže zaměříme na možnosti určení zbytkové životnosti elektroizolačních systémů.

1.1. DEGRADACE ELEKTROIZOLAČNÍHO SYSTÉMU

Pro určení zbytkové životnosti elektroizolačního systému je nutno znát množství důležitých parametrů. V první řadě je nutno znát pracovní podmínky, ve kterých bude zařízení pracovat. Pro elektroizolační systémy, kterými se

zde zabýváme, jsou rozhodující jednak podmínky okolí, tzn. teplota, vlhkost, přítomnost plynů či roztoků, dopadající záření, přítomnost mikro- či makro organizmů a vliv vibrací. U zařízení, ve kterých není hlavním degradačním činitelem elektrické napětí nebo ztrátové teplo, se tyto degradační činitele stávají dominantními a závisí na nich přímo životnost daného zařízení. Zkouškami izolačních materiálů s ohledem na vnější degradační činitele se zabývá klimatotechnologie. U zařízení velkých výkonů se samozřejmě tyto degradační činitele uplatňují také, ale problematika je zde mnohem složitější. Je nutno si uvědomit jak působení vnějších faktorů ovlivní zbytkovou životnost zařízení v provozu. Pro představu můžeme popisovat problém na příkladu. U výkonového transformátoru přichází v úvahu degradace elektroizolačního systému zářením (světelným, UV) v podstatě jen při skladování. Toto riziko je ovšem při dodržení správných skladovacích podmínek odstraněno. Stejně tomu je i v případě napadení materiálů biologickou korozi. V těchto, nebo podobných případech se uplatňují zkoušky odolnosti použitého elektroizolačního materiálu před nasazením v dané aplikaci. Porovnávají se různé materiály a vybere se ten s největší odolností. V mnoha případech již v provozu není nutno brát parametry elektroizolačního materiálu ve vztahu k okolnímu prostředí v úvahu. Tedy v případech, kdy je zabezpečeno například trvalé zatěžování v uzavřeném prostoru s řízeným klimatem, a kde současně platí podmínka, že provozní zatěžovací faktor – např. elektrické pole způsobuje mnohem větší degradaci sledovaného materiálu/zařízení než vliv okolí. Naopak jinde se jedná o jeden z hlavních degradačních činitelů, např. u vysokonapěťových prvků venkovní rozvodné soustavy.

Problematické je v řadě případů i pronikání vlhkosti do elektroizolačního systému. Dochází zde k disociacím molekul a tím ke vzniku nosičů elektrického náboje, vlastnosti izolačního systému jsou ovlivněny vysokou permitivitou vody, což má vliv na výsledné ztráty.

Další sledované degradační činitele mohou být mechanické vlivy působící na elektroizolační materiál. Těchto vlivů se snažíme jednak vyvarovat v maximální možné míře, jednak vybírat izolační materiály s dobrými mechanickými vlastnostmi. To bylo např. u točivých strojů v minulosti problematické. U izolačních systémů založených na bavlňném nosiči, asfaltovém/šelakovém pojivu a micafolii nebylo dosaženo dobrých

mechanických vlastností při vyšších teplotách. U současných elektroizolačních kompozitů, se kterými se dnes pracuje je situace jiná. Jedná se o speciálně vytvrzované vícesložkové kompozitní materiály, které využívají různých nosných složek (fólie, sklená tkanina, aramidová vlákna atd.), které zabezpečují vysokou mechanickou odolnost. Tato odolnost může být měněna strukturou a prostorovou orientací nosné složky tak, že může dosahovat v určitých směrech vyšší pevnosti než mají kovy. Z tohoto důvodu často mechanické namáhání izolačního systému může ovlivnit zbytkovou životnost hlavně při výrobním procesu, kdy může dojít k překročení některých mechanických parametrů při nedodržení výrobních postupů nebo technologie. Z hlediska dynamických dějů se může na životnosti izolačního systému projevit také negativní vliv otěru nebo vibrací.

V izolačních systémech vysokonapěťových zařízení velkého výkonu jsou vesměs hlavními degradačními činiteli provozní teplota a elektrické pole.

1.1.1. TEPLOTA

Klasifikace odolnosti většiny elektrických zařízení závisí na tepelné odolnosti izolačního systému, který většinou tvoří nejslabší článek z hlediska spolehlivosti celého zařízení. Na elektrická zařízení obecně, je nutno pohlížet z hlediska spolehlivosti jako na sériový spolehlivostní řetězec. Proto je nutno zajistit dostatečnou spolehlivost každého článku řetězce k dosažení požadované celkové spolehlivosti.

Zařazení izolačního systému do určité třídy tepelné odolnosti může být provedeno jen podle výsledků zkoušek zrychleného stárnutí.

Souvislost mezi délkou experimentu, tj. životností izolace τ (h) a teplotou T (°C), při které izolace stárne, vychází z empirického Montsingerova pravidla:

$$\tau = A \cdot e^{-BT}, \quad (1)$$

kde A a B jsou materiálové konstanty, které musí být určeny experimentálně. Dobu života lze určit také z Arrheniovy rovnice (2).

$$\tau = a \cdot e^{\frac{W_a}{RT}}, \quad (2)$$

kde W_a je aktivační energie procesu (eV),

R je univerzální plynová konstanta,

a je konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul,

T je absolutní teplota (T).

Životnost materiálu je tedy exponenciální funkcí teploty stárnutí, tj. **se zvýšením teploty se exponenciálně zkracuje délka životnosti!**

Další práce W. Büssinga dává do souvislosti změny chemické stavby izolantů vyvolané působením teploty se

zhoršováním jejich fyzikálních vlastností. Rychlost chemické reakce lze považovat za rychlost stárnutí. Vynesením logaritmu času na jednu osu a na druhou reciproční hodnotu absolutní teploty ($1/T$) získáme přímku odpovídající životnosti materiálu (Arrheniův graf). Rovnice (3) je obecně nazývána Büssingovým teorémem.

$$\tau = C \cdot e^{\frac{b}{T}}, \quad (3)$$

kde τ je životnost izolace (h),

b, C jsou materiálové konstanty,

T je absolutní teplota (T).

1.1.2. ELEKTRICKÉ POLE

Pojem elektrické namáhání zahrnuje všechny druhy namáhání, které jsou způsobené vlivem elektrického napětí. Elektrické namáhání může být klasifikováno dle tvaru, frekvence, hladiny, spojitosti nebo determinovanosti napětí. Pokud se elektrické napětí mění v čase je nutno vzít do úvahy také rychlosti změn mezi jednotlivými hladinami.

Nejčastější rozdělení elektrického namáhání spočívá v dělení na namáhání střídavým napětím sinusového průběhu a napětím stejnosměrným (ss). Namáhání střídavým napětím 50 Hz je v současné době nejčastější namáhání ve výkonových aplikacích. Stejnosměrné napětí se ve výkonové technice v minulých letech používalo především na vysokonapěťová vedení a kabely se stejnosměrným proudem (sloužící jako spojení mezi jednotlivými rozvodnými sítěmi rozlehlých států). V současnosti se tento obor rozvíjí zejména v Číně, kde je budováno vysokonapěťové dálkové vedení stejnosměrného napětí o napětí 1 a 1,2 MV. Dále se užívalo zejména v řízených pohonech se stejnosměrnými motory.

V rozvodných soustavách se často setkáváme s elektrickým namáháním způsobeným vlivy atmosférických výbojů (blesků), které jsou modelovány rázovou vlnou 1,2/50 μ s, a s vlivy spínacích impulzů modelované spínacím impulsem 250/5000 μ s. Vliv impulzu opačné polarity se projevuje v obvodech se stejnosměrným napětím. Vysokofrekvenční namáhání nízkým napětím se objevuje v digitálních datových kanálech, výpočetní technice atd.

Existují dlouholeté zkušenosti s namáháním elektroizolačních systémů střídavým napětím 50 resp. 60 Hz. Během let byla vypracována řada metodik zkoušek pro toto napětí a známy jsou časové závislosti elektrických parametrů (klesající vnitřní rezistivita izolačního materiálu během stárnutí nebo pozvolný nárůst ztrátového činitele). Svým charakterem se jedná o stárnutí zejména maximální hodnotou přiváděného napětí. Změna napětí z jedné polarity na druhou trvá poměrně dlouhou dobu – 10 ms (8 ms).

Při namáhání stejnosměrným napětím dochází především k problémům vytvářením prostorového náboje, jinak se při návrhu izolačních systémů bere v úvahu vodivostní proud a napěťová odolnost. Procházející vodivostní proud zde může způsobovat problémy vznikem elektrolýzy apod.

Atmosférický výboj se ve vysokonapěťových obvodech modeluje rázovou vlnou. Zde se sleduje zejména schopnost izolačního systému odolat určité hladině maximálního napětí rázové vlny. Normované zkoušky se provádí tak, že se testuje odolnost třem po sobě jdoucím impulsům. Ty mají stejnou polaritu, a pokud se mezi jednotlivými impulsy neodvede elektrický náboj, následující impuls pak interaguje s prostorovým polem uvnitř a na povrchu izolačního materiálu. Spínací impulsy působí problémy v rozvodných systémech.

V oblasti výkonové elektroniky je extrémním případem **vysokofrekvenční pulzní namáhání** způsobované např. měniči kmitočtu nebo napětí v obvodech řízených pohonů. Pulzní namáhání je namáhání způsobené pulzním napětím (napětím obdélníkového tvaru o strmosti napěťové hrany větší než $500 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ a opakovací frekvenci větší než 1 kHz. Toto namáhání můžeme označit jako extrémní díky několika skutečnostem. Vysokofrekvenční pulzní namáhání ve výkonových aplikacích je poměrně nová záležitost. Vzhledem k tomu, že způsobuje zvýšenou degradaci izolačních systémů je třeba mu věnovat zvýšenou pozornost. V případě pulzního napětí nastává degradace izolačních materiálů nejen hodnotou napětí, ale i vlivem strmých nárůstů napětí na izolaci ($\text{kV} \cdot \mu\text{s}^{-1}$). Vlivem vysoké frekvence se strmý nárůst napětí na izolačním systému periodicky opakuje (v řádu jednotek až desítek kHz). Vysoká frekvence zde také způsobuje dielektrický ohřev materiálu. Dalším jevem spojeným s pulzním namáháním je zvýšená aktivita výbojové činnosti. „Vysokofrekvenční koróna“ se začíná objevovat při nižších hladinách napětí než při napětí střídavém 50 Hz.

2. ZBYTKOVÁ ŽIVOTNOST

2.1. URČOVÁNÍ TEPLOTNÍ ODOLNOSTI

Odolnost izolačního materiálu vůči teplotě je jedním z kritérií podle nichž se hodnotí a třídí izolanty. Materiály s přibližně shodnými tepelnými vlastnostmi se řadí na základě dlouholetých zkušeností do tzv. tepelných tříd. Každé třídě je přiřazena maximální teplota, do níž jsou použitelné. Toto rozdělení je hrubé, protože je obtížné najít takovou zkoušku, která by izolanty objektivně rozřadila do jednotlivých tříd. Nejpřesnější by byly ověřovací zkoušky při maximální provozní teplotě v podmínkách odpovídajících skutečnému provozu. To je však obtížné, zdlouhavé a nákladné.

Třída	70	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
-------	----	---	---	---	---	---	---	-----	-----	-----

Teplotní hranice	70 °C	90 °C	105 °C	120 °C	130 °C	155 °C	180 °C	200 °C	220 °C	250 °C
------------------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Tab. č. 1: Přehled tepelných tříd pro izolační materiály – současnost

ATE nebo RTE °C		Tepelná třída °C	Písmenné označení ^a
≥ 90	<105	90	Y
≥ 105	<120	105	A
≥ 120	<130	120	E
≥ 130	<155	130	B
≥ 155	<180	155	F
≥ 180	<200	180	H
≥ 200	<220	200	N
≥ 220	<250	220	R
$\geq 250^b$	<275	250	-

^a Je-li požadováno, může být písmenné označení přidáno v závorce např. třída 180 (H). V případě omezeného prostoru, např. na štítku, mohou výrobní technické komise zvolit použití pouze písmenného označení.

^b Označení tepelných tříd nad 250 se musí zvyšovat o přírůstky 25 a musí být podle toho označeny.

Tab. č. 2: Přehled tepelných tříd pro izolační materiály – návrh dle [1], (ATE – index tepelné odolnosti a RTE – relativní index teplotní odolnosti)

Zkoušky, které se pro hodnocení materiálů vzhledem k určení jejich tepelné odolnosti používají napodobují provozní podmínky ve zjednodušeném uspořádání. Patří sem **urychlené tepelné stárnutí** umožňující určení křivek odolnosti tepelnému namáhání a z nich vyhodnocených teplotních indexů (TI) a dalších parametrů (TEP, RTE, RTI, HIC), [2] a technické normy.

Z experimentálně zjištěných křivek pak lze vytvářet modely stárnutí teplotou a z nich počítat i zbytkovou životnost konkrétního materiálu v konkrétní aplikaci.

2.2. URČOVÁNÍ ODOLNOSTI PŘI KOMBINOVANÉM NAMÁHÁNÍ

V předchozím byla sledována problematika tepelného stárnutí a určování tepelné odolnosti elektroizolačních materiálů. Důležité je zabývat se i dalšími působícími faktory a jejich vzájemnými interakcemi.

Aby bylo možné navrhovat izolační systémy s definovanou mírou spolehlivosti vzhledem k namáhání, jakému bude v čase požadované provozuschopnosti

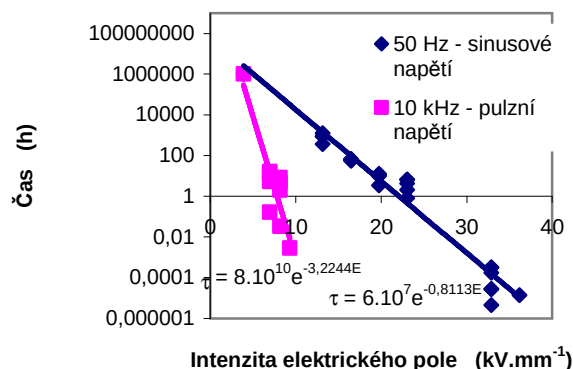
odolávat, je třeba co nejlepšího pochopení dějů, k jakým bude během jeho deteriorace docházet. Pro lepší popis stárnutí materiálu je výhodné použití modelů stárnutí, které budou popisovat životnost daného materiálu. Samotný model napomáhá k pochopení dějů probíhajících v materiálu. Čím lepší máme znalosti o fyzikálně chemických vlastnostech zkoumaného materiálu (např. hodnoty aktivační energie, teploty skelného přechodu, rychlosti koagulace, informace o injektaci náboje, rychlosti pohybu náboje, vznik prostorového náboje atd.) a o vnějších měřitelných fenomenologických projevech (např. doby do průrazu, průrazná napětí, resorpční charakteristiky, izolační odpor atd.), tím konkrétnější model stárnutí lze sestavit. Z opačného hlediska matematický popis stárnutí izolačního materiálu nám umožňuje předpovědět fyzikální procesy, ke kterým v izolačním materiálu dochází. Zde se tedy nabízí možnost využití křivky odolnosti pro určité namáhání, sestavené dle určeného modelu stárnutí, pro extrapolaci zbytkové životnosti v čase, který přesahuje možnosti laboratorních experimentů.

Zahrnout do modelu stárnutí všechny deteriorační faktory působící na izolační systém nebude asi nikdy možné. Mezi působící faktory můžeme kromě elektrického namáhání, které je pro nás klíčové, také zahrnout mechanické, tepelné a biologické faktory, účinky chemikálií, záření atd.

Stejně tak většina modelů stárnutí se omezuje na běžné druhy elektrického nebo tepelného namáhání, které způsobuje kontinuální degradaci materiálu. Modelů, zabývajících se stárnutím izolačních materiálů při vysokofrekvenčním pulzním namáhání, nebylo dosud publikováno mnoho.

Statistické vyhodnocení výsledků je závislé i na počtu testovaných vzorků. Počty vzorků vycházejí z počtů vzorků ve zkušební skupině, vystavených stejnému působení při jedné teplotě a vyřazených po určení vlastnosti. Dále z počtu působení tzn. počtu expozičních teplot při jedné době. Počtu úrovní doby stárnutí a počtu vzorků ve skupině použitých pro stanovení počáteční hodnoty vlastnosti. Je vhodné si předem vytvořit rezervu pro případné doplnění fondu vzorků a zabránit tak vstupu systematických rozdílů v mezi testovanými sériemi vzorků.

Elektrické stárnutí izolace je jedním z dominantních faktorů ovlivňujících stárnutí izolačního systému. Bohužel o přesném mechanismu působení elektrického pole na stárnutí materiálu je v současnosti známo jen velmi málo a většina poznatků je spíše empirického charakteru. Pro modelování vlivu elektrického pole na dobu života materiálu jsou používány exponenciální a mocninný model, např. [2], obr. 1. Jedná se o empirické modely při působení jediného degradačního faktoru.



Obr. č. 1: Porovnání životnosti izolačního materiálu při střídavém napětí 50 Hz a 10 kHz pulzním napětím dle exponenciálního modelu

Jestliže je izolační materiál vystaven současně vlivu elektrického pole a zvýšené teplotě, ve výsledku většinou k selhání materiálu dochází dříve, než kdyby byl materiál vystaven působení obou faktorů zvlášť. Výsledné stárnutí totiž nutně nemusí být prostým algebraickým součtem účinků. To nastává v případě interakce dvou nebo více mechanismů stárnutí. V zásadě rozlišujeme dva druhy interakce – přímou a nepřímou.

Přímou interakci lze popsat jako stav, kdy se jednotlivé působící faktory navzájem ovlivňují do takové míry, že jejich působení je diametrálně odlišné od stavu, kdy se uplatňují tyto vlivy jednotlivě. Typickým příkladem takového působení je oxidace za zvýšené teploty. Samotná zvýšená teplota nijak radikálně materiál neovlivňuje, ovšem za přítomnosti kyslíku velmi výrazně urychluje oxidační reakce. Stejně tak jako oxidace při pokojové teplotě nijak významně materiál nedegraduje.

Nepřímou interakci můžeme definovat jako situaci, kdy několik faktorů působí současně na materiál, jednotlivé působící vlivy zůstávají nezměněny, jako by působily samostatně, ale k ovlivnění dochází prostřednictvím jejich účinků. Jako nepřímou interakci můžeme označit například současné působení mechanického namáhání a elektrického pole. Mechanické namáhání může rozrušit materiál a tím dojde k nárůstu částečných výbojů, které způsobí rychlejší zestárnutí materiálu.

Fakt, že dochází k interakcím mezi jednotlivými faktory ovlivňujícími stárnutí je třeba zahrnout do matematických modelů, popisujících tyto děje. V současné době existuje několik modelů, které popisují chování materiálů při současném působení elektrického pole a zvýšené teploty. Dnes nejčastěji používané modely jsou: Simoniho model, Ramuův model, Fallouův model a model podle Crinea. Tyto modely ukazují rozdílné přístupy k této problematice. Simoniho, Ramuův a Fallouův model jsou více méně empirickými vztahy, kde je třeba některé konstanty získat experimentálně v modelových podmínkách.

Příkladem plnohodnotného fyzikálního modelu může být Crineův model. Zde všechny parametry mají svůj fyzikální význam. Crine vysvětluje proces stárnutí pomocí představy dvojité potenciálové jámy ([4]). Energetická bariéra odděluje provozuschopný stav od stavu selhání. Aby se systém dostal z provozuschopného stavu do stavu selhání, potřebuje dostatečnou energii potřebnou k překonání energetické bariéry. Pravděpodobnost získání dostatečné energie k přechodu bariéry, tj. pravděpodobnost selhání systému, je dána Boltzmanovou statistikou. Tomuto procesu významně napomáhá elektrické pole tím, že deformuje energetickou bariéru.

Výška energetické bariéry se na straně provozuschopného stavu snižuje a o stejnou hodnotu se na straně poruchového stavu zvyšuje. Tím se významně zvyšuje pravděpodobnost přechodu z jedné polohy do druhé. Čas potřebný k přechodu energetické bariéry do stavu selhání je podle Crinea [6] doba života izolačního systému. Crine uvádí, že střední doba života materiálu je střední doba přechodu energetické bariéry, kterou lze vyjádřit pomocí Boltzmanovy statistiky a pomocí zákonů termodynamiky.

$$\tau = \left(\frac{h}{k_B T} \right) e^{\frac{\Delta W}{k_B T}} \cosh \left(\frac{e_p \lambda E}{k_B T} \right), \quad (3)$$

kde h je Planckova konstanta,

k_B je Boltzmanova konstanta,

ΔW je volná aktivační energie (kJ.mol⁻¹),

λ je vzdálenost mezi oběma stavy – pro daný fyzikální děj,

e_p je elektrický náboj částic ovlivňujících proces stárnutí.

2.3. ZJIŠŤOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI

Při hodnocení a třídění EIS (elektroizolační systém) je nutno uvážit jednotlivé metodické prvky. EIS nebo elektrické zařízení je v praxi namáháno v určitém pracovním prostředí. Naopak při testech jsou většinou vzorky (modelový EIS) vystaveny laboratorně simulovaným provozním podmínkám.

Zkoušený předmět (EIS) je již v provozu ověřený systém, nebo se jedná o zcela nové zařízení nebo EIS. Potom hovoříme o kandidátském EIS. Testovat se může jen část zařízení, součástka nebo model původního zařízení, EIS, prototyp nebo kompletní zařízení. Simulované provozní podmínky se stanovují na základě např. provozních měření a záznamů, námahových charakteristik, známých skutečností nebo na základě oprávněných předpokladů. Hodnoty životnosti se vztahují k provozním podmínkám. Sleduje se zejména doba do poruchy EIS. Tedy do konce technického života. Dále pak provozní doba bez poruchy případně doba života do dosažení kritéria koncového bodu (překročení hodnoty daného sledovaného parametru přes stanovenou mez, obr. 2).

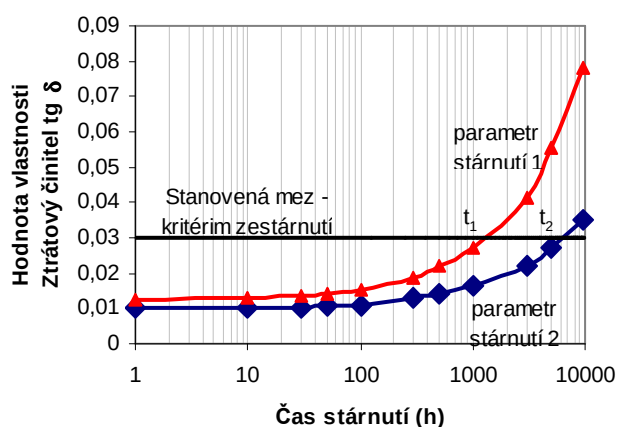
Pokud hodnota parametru klesne pod (překročí) stanovenou mez – kritérium koncového bodu [3]), pak může být stanovena doba životnosti.

Koncové body jsou voleny dvěma alternativními způsoby. První spočívá ve sledování procentuálního zvýšení nebo snížení hodnoty vlastnosti od původní úrovně. Je to vhodný způsob porovnání rozdílných materiálů. Nevýhodou je horší vazba k hodnotám vlastnosti požadovaných v normálním provozu. Druhý postup spočívá v pevně stanovené hodnotě vlastnosti. Tato hodnota je zvolena s ohledem na obvyklé provozní požadavky.

Stanovení výchozí hodnoty vlastnosti – pokud není stanoveno jinak (např. dle požadovaného předpisu nebo postupu dle IEC 60216-2), pro náhodně vybranou podskupinu vzorků se provede expozice vzorků při nejnižší teplotě stárnutí po dobu 48 h. Je změřena a zjištěna průměrná hodnota vlastnosti, která je stanovena jako výchozí hodnota.

V každé skupině vzorků se získá hodnota vlastnosti pro každý vzorek po každém časovém intervalu stárnutí. Z těchto hodnot, je-li to nutné interpolací (viz. obr. 2), se získá doba pro dosažení koncového bodu [3].

Elektrické parametry vhodné pro použití metody koncového bodu jsou předmětem intenzivního výzkumu po řadu let. Značné zkušenosti jsou s vývojem elektrických parametrů ve vztahu k tepelnému stárnutí a ve vztahu stárnutí elektrickým napětím střídavým 50 Hz. Méně zkušeností je s vývojem elektrických parametrů při pulzním namáhání.



Obr. č. 2: Kritérium koncového bodu

Příkladem parametrů, které se používají pro sledování degradace izolačních materiálů, a tedy i k predikci zbytkové životnosti je izolační odpor. Pokud se izolační odpor snižuje, může diagnostický systém vyhodnotit tuto veličinu a dát podnět k dalším krokům. Podobná je situace např. u ztrátového činitele. Například je známo, že se ztrátový čísel postupně zvyšuje při namáhání elektrickým napětím sinového tvaru 50 Hz. Při pulzním

vysokofrekvenčním napětí se na začátku stárnutí mírně snižuje, posléze začíná strmě stoupat.

Při monitoringu dalších veličin, jako jsou např. částečné výboje je situace složitější. Obecná pravidla je těžké vypořádat. Určit kritéria pro zjištění okamžitého stavu izolačního systému je problematické. Stejně tak určit zbytkovou životnost.

Schematické znázornění vnitřní struktury diagnostického systému, který zároveň s použitím modelů stárnutí počítá *zbytkovou dobu života* elektroizolačního systému, je představen na příkladu elektrického pohonu, obr. 3. Jedná se o možné uspořádání pro on-line diagnostiku pohonu se středně velkým asynchronním motorem. Diagnostický systém obsahuje řídicí jednotku, která dostává data o pohonu, požadovaných otáčkách a momentu. K tomu jsou využívány vhodné měřicí převodníky – vazební člen. Naměřená data potřebná pro modely stárnutí jsou směřována do fyzikálních modelů, kde je dle jednotlivých modelů počítána zbytková doba životnosti pohonu. Vyhodnocovací blok má k dispozici informace o stavu pohonu a sleduje překročení maximálních provozních veličin. Všechny informace jsou zpracovány a významné hodnoty jsou ukládány do paměti. Výsledky rozhodovacích procesů jsou vyhodnocovány, porovnávány s databází uložených hodnot. Data jsou předávána řídicímu bloku, který tak má zpětnou vazbu. Získané výsledky mohou být použity k upřesnění báze dat, kde jsou uloženy konstanty modelů, mezní dovolené hodnoty parametrů pohonu apod. Výsledek diagnózy je poskytnut řídicí jednotce pohonu, která může v případě potřeby upravit výkon pohonu, nebo ho odstavit. Výsledky diagnózy jsou odesílány na dispečerské pracoviště (bezdrátově, internet, atd.).

Výhody koncepce tohoto diagnostického systému spočívají ve využití standardně měřených dat pro diagnostický systém. Tato koncepce vznikla na základě požadavku sledovat stav malých točivých strojů, které slouží jako pohony výrobních linek. Svou podstatou se jedná o poměrně levná zařízení, kde se běžně o diagnostickém systému neuvažuje. Ovšem vzhledem k nákladům a ztrátám, které vznikají výrobním podnikům při odstávce výrobní linky je snaha tyto pohony sledovat. Na obr. 3 uvedený koncept je principiálně funkční. Pro jeho realizaci jsou však nutné delší provozní zkoušky, ověřování fyzikálních modelů a hledání chyb v softwaru. Vzhledem ke zkušenostem s on-line diagnostickými systémy je známo, že za určitých podmínek model např. model oteplení vypočítá jinou hodnotu než je skutečná teplota stroje. Tyto problémy vznikají při zavádění on-line monitoringu vždy, a je poměrně složité a zdoluhavé všechny nepřesnosti odstranit. vždy je nutná spolupráce s výrobcem pohonu i samotného točivého stroje. Systém je principiálně snadno přenosný z pohonu na pohon, ovšem reálně se jedná o poměrně složitý proces.

3. ZÁVĚR

Z uvedených skutečností vyplývá, že existuje mnoho metod jak se pokusit stanovit zbytkovou životnost elektroizolačního systému. Dospět k relativně přesnému výsledku je ovšem velice složité. Pro jednotlivá namáhání je možné použít model stárnutí, který může být více či méně založen na skutečném degradačním procesu v materiálu. Např. pomocí dvojité potenciálové jámy a Boltzmanovy statistiky lze zohlednit např. rozklad molekul materiálu. K tomu je nutno znát aktivací energie procesů, které vedou např. vlivem působení elektrického pole k nevratným změnám ve struktuře materiálu. Existují i modely zohledňující více degradačních faktorů současně. Deterministicky popsat všechny děje, ke kterým z hlediska působení fyzikálních a elektrochemických procesů dochází nebude asi nikdy možné.

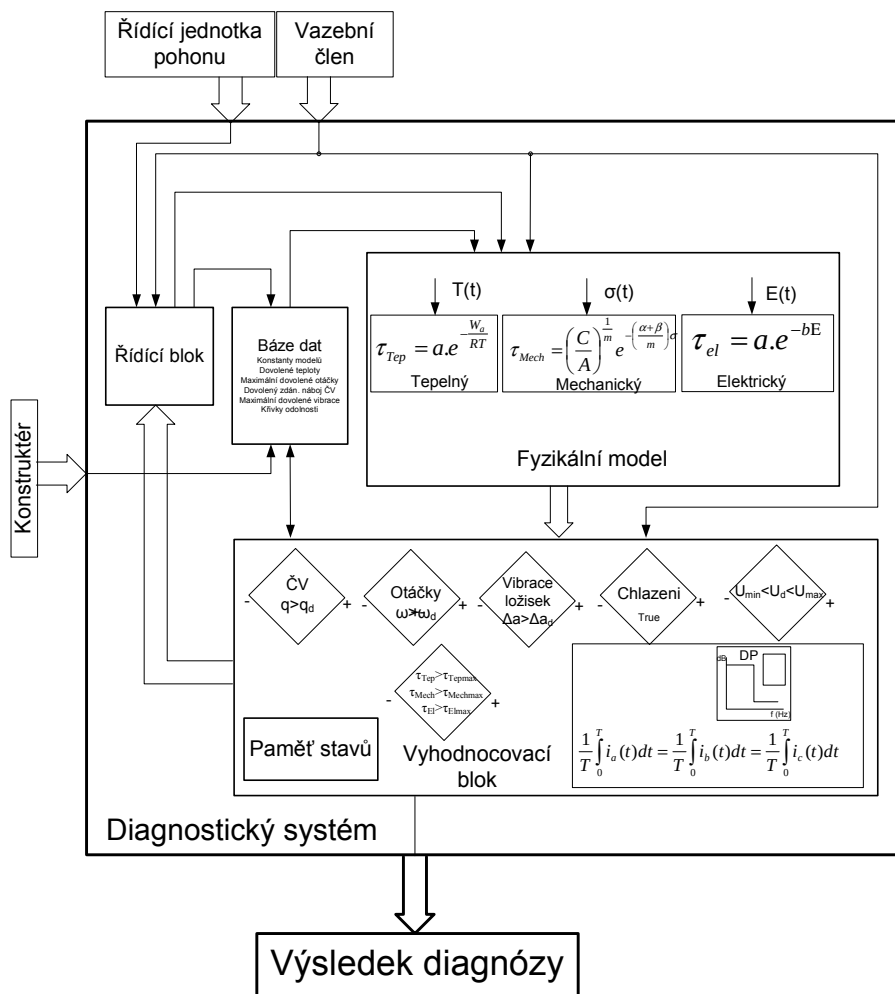
Současné metody, které jsou často založeny na důkladném zkoumání různých vlastností izolačních systémů při zrychleném stárnutí dávají dobře vypovídající výsledky hlavně při porovnávání zkouškách. Zbytkovou životnost zde je možné určit interpolací z empiricky získaných závislostí. Výhodou je fakt, že matematický model může být implementován do diagnostického systému. Z on-line naměřených dat jsou pak hodnoty přímo dosazovány do diagnostického modelu, kde se pak přímo vypočítá odhadovaná zbytková životnost.

PODĚKOVÁNÍ

Práce vznikla v rámci řešení výzkumného záměru MSM 4977751310 - Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice - řešeného na pracovišti autora.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 60085 Elektrická izolace – Tepelné hodnocení a značení. Idt IEC 60085:2007 [v recenzním řízení, 2008].
- [2] MENTLÍK, V. - PIHERA, J. - POLANSKÝ, R. - PROSR, P. - TRNKA, P. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha. BEN - technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] ČSN EN 6216-1 Elektroizolační materiály – Vlastnosti tepelné odolnosti. Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky, 2002..
- [4] MENTLÍK, V. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha. BEN - technická literatura. 2006. 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [5] MENTLÍK, V. Diagnostika izolačních. VSŠE. Plzeň. 1986. 62 s.
- [6] CRINE, J. P. Maxwell Stress and Some Electrical Properties of Polymers. In CEIDP 2005. Nashville, USA. ISBN – 0-7803-9257-4. 2005. pp. 641-644.
- [6] TRNKA, Pavel. Životnost izolačních systémů. [Habilitation práce]. ŽU v Žilině. SK. 2007.



Obr. č. 3: Příklad diagnostického systému pro pohon s asynchronním motorem