

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor

v oboru

Elektrotechnika

Ing. Michal Svoboda

**Implementace Condition Based Managementu
elektroizolačních systémů**

školitel: doc. Ing. Pavel Trnka Ph.D.

datum státní doktorské zkoušky: 10.1.2014

datum odevzdání práce: 24.4.2017

V Plzni, 2017

Prohlášení o duševním vlastnictví

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě dizertační práci na téma „Implementace Condition Based Managementu elektrických elektroizolačních systémů“ zpracovanou během doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni pod vedením doc. Ing. Pavla Trnky, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu na konci této práce.

V Plzni, 24.4. 2017

.....
Michal Svoboda

Implementace Condition Based Managementu elektroizolačních systémů

Rostoucí nároky na hospodárnost provozu elektrizačních soustav nutí provozovatele elektrických strojů a zařízení efektivně investovat prostředky do údržby a obnovy. Provozovatelé potřebují pro správná a ekonomicky efektivní rozhodnutí detailní technické podklady, aby byly jejich prostředky vynakládány účelně. Předložená práce popisuje metodiku získávání a vyhodnocování informací o elektrických strojích, respektive jejich elektroizolačních systémech za provozu.

První kapitola je zaměřena na ekonomické aspekty provozu elektrických strojů se zaměřením na výkonové transformátory. Jsou zde diskutovány jednotlivé části asset managementu, z nichž je dále věnována pozornost střednědobému horizontu. Provoz transformátorů má oproti jiným zařízením určitá specifika, která jsou zde též popsána.

Druhá kapitola práce popisuje obecně životnost elektroizolačních systémů. Degradací mechanismy, které tyto systémy ovlivňují, jsou v této kapitole kvalitativně i kvantitativně hodnoceny. Dále je popisována metodika sestavení modelů odolnosti elektroizolačních systémů vycházející z degračních činitelů, včetně základního statistického zpracování. Důraz je kladen zejména na modely odolnosti, které jsou využitelné v systémech prediktivní údržby.

Obecná metodika je dále konkrétně aplikována na elektroizolační systém výkonových transformátorů. Na základě konstrukčního uspořádání jsou určena citlivá místa a hodnocena jejich odolnost vůči nejvýznamnějším degračním vlivům. Tato metodika je popsána obecně a následně doložena praktickými experimenty, jejichž závěrem jsou komplexní modely odolnosti využitelné v systémech prediktivní údržby.

Tyto modely jsou následně využívány v programu pro výpočet zbytkové životnosti elektroizolačního systému. Je zde popsán postup získávání dat, matematického zpracování a zobrazení výsledků. Správnost metodiky výpočtu i sestavení modelů je prokázána ověřovacími experimenty.

**Implementation of Condition Based Management of electrical insulation
systems**

Growing demand on efficient operation of the electrical grids is driving the operators of electrical machinery and equipment to efficiently invest into maintenance and renewal of operated assets. For accurate and cost-effective decisions operators need detailed technical backgrounds to effectively spent their funds. The presented thesis describe the methodology of data acquisition and evaluation of information on electrical machines or their electrical insulation systems in operation respectively.

The first chapter focuses on the economic aspects of the operation of electrical equipment with focus on power transformers. Different parts of asset management is discussed, a particular attention is paid on medium-term asset management. The operation of power transformers has specific issues among other devices. Those specific issues are also addressed.

The second chapter describes the endurance of electrical insulation systems in general. The degradation phenomena which affect those systems are qualitatively and quantitatively evaluated in this chapter. Than a methodology of building endurance models of electrical insulating systems which are based on the physical degradation factors. A special attention is paid to models which are usable for predictive maintenance systems.

The general methodology is further specifically applied to the electrical insulation system of power transformers. Based on the structural arrangement and real geometry, the sensitive places are evaluated. Derived endurance models are further applied on real experiments and complex endurance models for predictive maintenance aplications are obtained.

These models are used in the programs for calculating the residual life of electrical insulating system. The procedure of data acquisition, mathematical processing and displaying is also described. Verification of the methodology is proved by validation experiments.

116 pages

84 pictures

12 tables

17 pages of appendices

La mise en œuvre de la Condition Based Management des systèmes d'isolation électrique

La demande croissante sur le fonctionnement efficace des réseaux électriques permet aux opérateurs de machines et équipements électriques d'investir efficacement dans la maintenance et le renouvellement des actifs exploités. Pour des décisions précises et rentables, les opérateurs ont besoin de connaissances techniques détaillées pour dépenser efficacement leurs fonds. La thèse présentée décrit la méthodologie d'acquisition de données et d'évaluation de l'information sur les machines électriques ou leurs systèmes d'isolation électrique en fonctionnement respectivement.

Le premier chapitre se concentre sur les aspects économiques du fonctionnement du matériel électrique en mettant l'accent sur les transformateurs de puissance. Différentes parties de la gestion d'actifs sont discutées, une attention particulière est accordée sur la gestion d'actifs à moyen terme. Le fonctionnement des transformateurs de puissance a des problèmes spécifiques entre autres appareils. Ces problèmes spécifiques sont également abordés.

Le deuxième chapitre décrit l'endurance des systèmes d'isolation électrique en général. Les phénomènes de dégradation qui affectent ces systèmes sont évalués qualitativement et quantitativement dans ce chapitre. Que la méthodologie de construction de modèles d'endurance de systèmes d'isolation électrique basés sur les facteurs de dégradation physique. Une attention particulière est accordée aux modèles utilisables pour les systèmes de maintenance prédictive.

La méthodologie générale est spécifiquement appliquée au système d'isolation électrique des transformateurs de puissance. Sur la base de l'arrangement structurel et de la géométrie réelle, les lieux sensibles sont évalués. Les modèles d'endurance dérivés sont encore appliqués sur des expériences réelles et des modèles complexes d'endurance pour les applications de maintenance prédictive sont obtenus.

Ces modèles sont utilisés dans les programmes de calcul de la durée de vie résiduelle du système d'isolation électrique. La procédure d'acquisition de données, de traitement mathématique et d'affichage est également décrite. La vérification de la méthodologie est prouvée par des expériences de validation.

116 pages

84 depictions

12 tableaux

17 pages d'appendices

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svojí ženě Martině za podporu a pomoc po celou dobu mého studia na FEL ZČU. Dále bych rád poděkoval školiteli, doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Děkuji všem, kteří napomáhali vzniku této práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
0 ÚVOD	11
1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	12
2 EKONOMICKÉ ASPEKTY PROVOZU ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ	13
2.1 PROVOZ ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ - ASSET MANAGEMENT	13
2.1.1 Krátkodobá správa aktiv.....	14
2.1.2 Střednědobá správa aktiv.....	15
2.1.3 Dlouhodobá správa aktiv.....	16
2.2 STRATEGIE ÚDRŽBY ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ	17
2.2.1 Údržba po poruše.....	18
2.2.2 Údržba dle časového plánu.....	18
2.2.3 Údržba dle aktuálního stavu	19
2.2.4 Prognostika.....	20
2.2.5 Proaktivní údržba.....	21
2.3 SMART GRID A PRŮMYSL 4.0.....	21
2.4 SPECIFIKA PROVOZOVÁNÍ TRANSFORMÁTORŮ	22
3 ŽIVOTNOST ELEKTROIZOLAČNÍHO SYSTÉMU	23
3.1 DEGRADACE ELEKTROIZOLAČNÍHO SYSTÉMU A POPIS ODOLNOSTI	23
3.2 SESTAVENÍ MODELŮ ODOLNOSTI NA ZÁKLADĚ ZRYCHLENÉHO LABORATORNÍHO STÁRNUTÍ	24
3.3 OBOR PLATNOSTI MODELŮ ODOLNOSTI	26
3.4 KOMBINACE DEGRADAČNÍCH VLVIVŮ	28
3.5 KUMULATIVNÍ MODEL	28
4 VÝKONOVÉ TRANSFORMÁTORY A JEJICH PROVOZ	30
4.1 VINUTÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	30
4.1.1 Šroubovicové vinutí.....	30
4.1.2 Vícechodé šroubovicové vinutí.....	31
4.1.3 Vrstvové vinutí	32
4.1.4 Plynulé vinutí	33
4.1.5 Prokládané vinutí.....	34
4.1.6 Stíněné vinutí.....	35
4.2 IZOLAČNÍ SYSTÉM TRANSFORMÁTORŮ.....	35
4.3 VLIV VLHKOSTI NA IZOLAČNÍ SYSTÉM TRANSFORMÁTORU	37

4.3.1	<i>Měření vlhkosti olejové náplně transformátorů</i>	39
4.3.2	<i>Porovnání minerálních a alternativních elektroizolačních kapalin z hlediska vlhkosti</i>	40
4.4	ELEKTRICKÉ NAMÁHÁNÍ IZOLAČNÍHO SYSTÉMU TRANSFORMÁTORU	43
4.5	TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ IZOLAČNÍHO SYSTÉMU TRANSFORMÁTORU	47
4.5.1	<i>Vnitřní systém chlazení olejových transformátorů</i>	48
4.5.2	<i>Modelování teplotní odolnosti</i>	49
4.5.3	<i>Hot-spot teplota</i>	51
4.5.4	<i>Statický výpočet hot-spot teploty</i>	53
4.5.5	<i>Dynamický výpočet hot-spot teploty</i>	54
4.5.6	<i>Praktické komplikace určování hot-spot teploty</i>	58
4.6	MATEMATICKÝ POPIS STÁRNUTÍ ELEKTROIZOLAČNÍHO SYSTÉMU TRANSFORMÁTORŮ	59
4.6.1	<i>Jednofaktorové teplotní stárnutí</i>	60
4.6.2	<i>Jednofaktorové stárnutí elektrickým polem</i>	60
4.6.3	<i>Dvoufaktorové stárnutí teplotou a elektrickým polem</i>	61
4.6.4	<i>Třífaktorový model</i>	62
4.7	DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ	62
4.7.1	<i>Výběr diagnostických parametrů</i>	63
4.7.2	<i>Měření teplot</i>	64
4.7.3	<i>Diagnostika částečných výbojů</i>	67
4.7.4	<i>Olejové analýzy</i>	68
4.7.5	<i>Furany</i>	69
4.7.6	<i>Průměrný polymerační stupeň DP</i>	70
4.7.7	<i>Hlukové analýzy</i>	71
4.7.8	<i>DGA</i>	72
4.7.9	<i>Korozivní síra</i>	74
4.8	CELKOVÉ POSOUZENÍ STAVU IZOLAČNÍHO SYSTÉMU	75
4.9	ÚDRŽBA TRANSFORMÁTORŮ	77
5	EXPERIMENTÁLNĚ URČENÉ MODELY ODOLNOSTI IZOLAČNÍHO SYSTÉMU OLEJ-PAPÍR PRO SYSTÉMY PREDIKTIVNÍ ÚDRŽBY	80
5.1	POPIS ODOLNOSTI IZOLAČNÍHO SYSTÉMU TRANSFORMÁTORŮ NA ZÁKLADĚ VLASTNÍCH EXPERIMENTŮ	80
5.1.1	<i>Jednofaktorové napěťové stárnutí suché transformátorové lepenky</i>	81
5.1.2	<i>Jednofaktorové napěťové stárnutí transformátorové lepenky v řepkovém oleji</i>	82
5.1.3	<i>Jednofaktorové napěťové stárnutí transformátorové lepenky ve slunečnicovém oleji</i>	83
5.1.4	<i>Dvoufaktorové stárnutí transformátorové lepenky ve slunečnicovém oleji</i>	85
5.1.5	<i>Závislost průrazného napětí na vlhkosti obsažené v elektroizolační kapalině</i>	85
5.2	OFF-LINE KOREKCE	87
6	NÁVRH PROGRAMU PRO VÝPOČET ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI IZOLAČNÍHO	

SYSTÉMU	89
6.1 PROGRAM ELMON I	89
6.2 PROGRAM ELMON II – SPECIFIKACE A OBLAST POUŽITÍ	90
6.3 STRUKTURA PROGRAMU ELMON II	94
6.3.1 Získání a zpracování dat	94
6.3.2 Vyhodnocovací jednotka	96
6.3.3 Zobrazovací vrstva	97
6.4 OVĚŘENÍ VÝPOČTU NA ZJEDNODUŠENÉM MODELU	97
6.5 APLIKOVATELNOST NA JINÉ IZOLAČNÍ SYSTÉMY	102
6.6 SROVNÁNÍ S KOMERČNĚ DOSTUPNÝMI CBM SYSTÉMY	103
7 SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A PŘÍNOSY PRÁCE.....	104
8 ZÁVĚR	106
POUŽITÁ LITERATURA.....	107
VLASTNÍ PUBLIKACE	113
A. STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT A VOLBA KRITERIÁLNÍCH HODNOT	1
CHARAKTER EXPERIMENTU A VOLBA KRITERIÁLNÍCH HODNOT.....	1
<i>Stárnutí s postupným sledováním diagnostického parametru</i>	<i>1</i>
<i>Stárnutí do poruchy</i>	<i>3</i>
ZÁKLADNÍ STATISTICKÉ NÁSTROJE VYUŽÍVANÉ PŘI MODELOVÁNÍ ODOLNOSTI IZOLAČNÍCH SYSTÉMU	5
<i>Vyloučení odlehlých hodnot.....</i>	<i>5</i>
<i>Statistická jistota a konfidenční meze</i>	<i>7</i>
B. PROGRAM ELMON I PRO VÝPOČET ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI JEDNOFAKTOROVÉHO STÁRNUTÍ IZOLAČNÍHO SYSTÉMU	9
C. DOPLNĚNÍ PROGRAMU ELMON II O VÝPOČETNÍ MODUL PRO STATICKÝ VÝPOČET HOT-SPOT TEPLoty	12
D. PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ POUŽITÉ MONITORING VYBRANÝCH PARAMETRŮ V PROGRAMECH ELMON.....	13
E. POROVNÁNÍ MONITOROVACÍCH SYSTÉMŮ DOSTUPNÝCH NA TRHU	15

Seznam symbolů a zkratk

R [-]	pravděpodobnost bezporuchového chodu
F [-]	pravděpodobnost poruchy
Q [h]	doba života, funkce odolnosti izolačního systému
k [-]	relativní rychlost stárnutí
w [%]	hmotnostní poměr vlhkosti v izolačním systému
T, Θ [°C]	teplota
ε [F.m ⁻¹]	permitivita
φ [V]	elektrický potenciál
ρ [C. m ⁻³]	objemová hustota elektrického náboje
E [kV/cm]	intenzita elektrického pole
DP [-]	stupeň polymerizace
$\Delta\Theta$ [K]	oteplení
Θ_a [K]	teplota okolí
Θ_o [K]	teplota oleje
Θ_{om} [K]	teplota střední vrstvy oleje
Θ_b [K]	teplota spodní vrstvy oleje
Θ_w [K]	teplota vinutí
Θ_h [K]	teplota hot spot
$\Delta\Theta_{of}$ [K]	pokles teploty v horní vrstvě oleje po snížení proudu na jmenovitou hodnotu během oteplovací zkoušky
Θ_{tw} [K]	teplota horní vrstvy vinutí
K [-]	činitel zatížení – poměr jmenovitého a zatěžovacího proudu
g [K]	teplotní gradient mezi teplotou vinutí a oleje při jmenovitém zatížení
H [-]	činitel hot spot
$\Delta\Theta$ [K]	oteplení
R [Ω]	elektrický odpor
Q [-]	činitel navýšení ztrát vlivem radiální složky rozptylového pole
P [W]	elektrický výkon
μ [Nsm ⁻²]	dynamická viskozita

Θ_{AVR} [K]	průměrný nárůst teploty
τ_0 [min]	časová konstanta teploty oleje
τ_w [min]	časová konstanta teploty vinutí
R_{iz} [Ω]	izolační odpor
U [V]	elektrické napětí
I [A]	elektrický proud
ϵ_r [-]	relativní permitivita
$\tan \delta$ [-]	ztrátový činitel
MQ_v, W_{abs} [ppm]	obsah vody rozpuštěné v transformátorovém oleji
MQ_p [ppm]	obsah rozpuštěných plynů v transformátorovém oleji
MQ_i [ppm]	obsah inhibitorů v transformátorovém oleji
t [hod]	čas
n	četnost
rh [-]	korekční koeficient snížení průrazného napětí vlivem vlhkosti
p [-]	pravděpodobnost
\bar{x}	střední hodnota veličiny
s	směrodatná odchylka
α [-]	hladina významnosti, tj. pravděpodobnost chyby 1. druhu
ON	přirozené chlazení vinutí transformátoru
OF	nucené chlazení vinutí transformátoru
OD	usměrněné chlazení vinutí transformátoru
DP	stupeň polymerizace transformátorového papíru
DGA	Dissolved gas analysis – analýza plynů rozpuštěných v transformátorovém oleji
HI	health index
$TDMS$	Technical data management streaming – datový formát

0 Úvod

Ve výrobě a distribuci elektrické energie slouží řada strojů, přístrojů a dalších zařízení, jejichž spolehlivý provoz je zcela zásadní pro chod elektrizačních soustav. Tato zařízení jsou v provozu vystavena degračním mechanismům, které způsobují postupné ireverzibilní změny v jejich struktuře, v důsledku vedoucí k poruše zařízení. K popisu spolehlivosti slouží řada nástrojů matematické statistiky. Na základě spolehlivostních úvah je následně možné sestavovat programy pro údržbu a maximalizovat tak využití při současném zajištění nízkých ekonomických nákladů. Tyto spolehlivostní úvahy je nutno sestavovat se současnou znalostí konstrukce a provozních zatížení. K tomu slouží nástroje technické diagnostiky, zejména v současné době hojně nasazované online monitorovací systémy.

1 Cíle dizertační práce

Základním úkolem je nalezení metodiky pro hodnocení stavu izolačního systému elektrických strojů na základě online diagnostických metod – tedy s využitím dat, které jsou dostupné za provozu, bez nutnosti odstávky. Problematika odolnosti izolačních systémů je velmi obsáhlá a komplexní, proto musí být řešena s využitím informačních technologií. Úkolem je vytvoření softwaru, který umožní integrovat online diagnostické signály a správně je vyhodnocovat. Celá problematika má několik rovin, ve kterých musí být řešena:

1. podrobný popis izolačního systému a určení degradačních mechanismů, které na něj působí,
2. výběr vhodných diagnostických parametrů a diagnostických signálů, určení lokalit pro měření a sestavení měřicího řetězce,
3. určení matematických modelů pro vybrané degradační mechanismy se zaměřením na dostupné diagnostické signály,
4. online měření, úprava diagnostických signálů pro přenos, samotný přenos, zpracování dat a jejich archivace,
5. porovnání online měřených dat s modely odolnosti izolačního systému, vyhodnocení, výpočet rychlosti stárnutí a zbytkové životnosti,
6. celkové vyhodnocení stavu izolačního systému na základě dat z online monitoringu, korekce se závěry profylaktických zkoušek,
7. eventuální odhad konce života při známém (předpokládaném) zatížení na základě aktuálního stavu pomocí extrapolace vývoje zbytkové životnosti v čase.

Cílem dizertační práce je rozpracovat výše zmíněné body a na jejich základě sestavit funkční prototyp zařízení pro online vyhodnocení diagnostických signálů a výpočet zbytkové životnosti izolačního systému. Celkový objem představených prací je velmi obsáhlý. Jednotlivé dílčí body budou řešeny postupně ve všech naznačených rovinách iterativním způsobem. Postup prací bude následující:

1. návrh metodiky výpočtu zbytkové životnosti z online monitoringu pro podporu manažerských rozhodnutí v oblasti prediktivní údržby,
2. zpřesňování matematických modelů odolnosti izolačního systému olej papír
3. sestavení diagnostického systému pro online monitoring vybraných parametrů,
4. návrh softwaru pro výpočet zbytkové životnosti izolačního systému na základě dat z online monitoringu,
5. integrace předchozích bodů a sestavení funkčního prototypu zařízení, které bude možno s mírnými modifikacemi pro konkrétní aplikaci použít v praxi,
6. ověření správnosti navržené metodiky, výpočetního algoritmu a vlastních modelů odolnosti izolačního systému olej-papír v laboratorních podmínkách.

Systém bude navržen modulárně, aby bylo možné jej snadno rozšířit, případně modifikovat. Jednotlivé dílčí součásti systému je nutné neustále zpřesňovat, aby bylo určování aktuálního stavu a prognóza vývoje co nejpřesnější. S ohledem na ekonomickou náročnost je ovšem nutné najít kompromis, kdy je přesnost odhadu již dostatečná a přizpůsobení pro danou aplikaci je relativně jednoduché a rychle řešitelné.

2 Ekonomické aspekty provozu elektrických zařízení

Z legislativního pohledu je provoz energetiky v České republice zabezpečen činností Energetického regulačního úřadu, který byl zřízen zákonem č. 458/2000 Sb. a který kromě jiného podporuje hospodářskou soutěž a zajišťuje dohled nad trhy v energetických odvětvích. ERÚ chrání zájmy spotřebitelů a zákazníků, reguluje ceny energií a podporuje hospodářskou soutěž v energetice. Úřad dále dohlíží na provoz přenosové soustavy a distribučních soustav, které spojují lokality výroby a spotřeby elektrické energie a zabezpečují tok energie směrem, který je určen nerovnoměrným rozdělením zdrojů a spotřebičů, jejichž výkony jsou v čase proměnné.

V minulosti, nejen v České Republice byla energetika ovládaná výhradně státním monopolem. V dnešní době jsou distribuční sítě vlastněny, případně spoluvlastněny též soukromými subjekty, což v důsledku vede k efektivní optimalizaci nákladů na provoz těchto sítí. Konkurence nutí energetické společnosti snižovat cenu produktů a služeb při zachování kvality. Tyto společnosti musí následně omezit vlastní fixní náklady a investice do stávajících aktiv, aby si minimálně zachovaly současný tržní podíl. Omezení investic do asset managementu může mít v případě poruchy dalekosáhlé důsledky, proto jim musí předcházet podrobná analýza.

Různí provozovatelé elektrických strojů a zařízení používají vlastní metody a postupy asset managementu. V následujících odstavcích bude uveden příklad kategorizace a příslušných činností. Tento výčet není úplný, jedná se o nástin problematiky nutný pro pochopení souvislostí a cílů práce.

2.1 Provoz elektrických zařízení - asset management

V anglické literatuře se často používá pojem asset management (v překladu správa aktiv), jakožto obecné označení hospodaření s majetkem s maximální efektivitou, aby jejich provoz generoval přidanou hodnotu. Aktivy se v tomto případě rozumí zařízení hospodářské prostředky, které vlastníkově generují ekonomický zisk (sítě, rozvodny, strojní zařízení, přístroje). Z hlediska spolehlivosti se věnuje patřičná péče zejména elektrickým strojům (transformátorům a generátorům). V oblasti energetiky jsou aktiva zpravidla dlouhodobá, hmotná s nízkou likviditou [1], [3], [5], [7], [8]. Správa aktiv je opakovaný cyklus čtyř činností, jak je naznačeno na obr. 1.



obr. 1: cyklus správy aktiv

Z časového hlediska se asset management dělí na [2]:

- **krátkodobý** (řádově dny, týdny): zabezpečení spolehlivého a bezpečného provozu zařízení, monitorování a vyhodnocování stavu zařízení, obnovení funkce a návrat do provozu po poruše,
- **střednědobý** (řádově měsíce): plánování údržbových činností a systému odstávek,
- **dlouhodobý** (řádově roky): strategické plánování rozvoje a likvidace provozovaných zařízení.

2.1.1 Krátkodobá správa aktiv

Provozovatelé distribučních a přenosových sítí jsou povinni zabezpečit mj. bezpečný, spolehlivý a efektivní provoz sítí. Tyto vlastnosti je možné parametrizovat a kvantifikovat. Kromě snadno měřitelných fyzikálních veličin (stabilita napětí, frekvence, apod.) se jedná zejména o spolehlivostní ukazatele, jež jsou každoročně vyhodnocovány v ČR energetickým regulačním úřadem. Spolehlivost dodávky elektrické energie je vyhodnocována pomocí tří hlavních ukazatelů [4], [61]:

- průměrný počet přerušení dodávky elektřiny u zákazníků v hodnoceném období (SAIFI),
- průměrná souhrnná doba trvání přerušení dodávky elektřiny u zákazníků v hodnoceném období (SAIDI),
- průměrná doba trvání jednoho přerušení dodávky elektřiny u zákazníků v hodnoceném období (CAIDI).

Proto, aby byla zachována nepřetržitost dodávky, musí distributoři spravovat aktiva tak, aby byla spolehlivost jejich zařízení s ohledem na ekonomické aspekty co nejvyšší. Využívají tak řadu nástrojů, které umožňují kvantifikovat spolehlivost elektrických zařízení a operativně s těmito výsledky pracují.

Nejvýznamnějšími úkoly krátkodobé správy aktiv jsou monitorování parametrů provozovaných zařízení, online diagnostika a řešení náhlých závad, poruch a výpadků.

Nadřazené kontrolní systémy (SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition) monitorují parametry provozovaných zařízení a umožňují operátorům vzdálené ovládání za provozu [10], [11]. Tyto systémy měří základní provozní parametry (například napětí, proudy, frekvenci, účinník a další) a ukládají je do souhrnných databází v reálném čase. Často jsou dále vybaveny on-line diagnostikou, která umožňuje monitorovat i další doplňující parametry, které jsou využívány k hodnocení stavu a predikci poruch sledovaných zařízení. Pomocí těchto dat je možné nalézt aktuální poruchu a provádět rozhodnutí o nápravě (například automatika opětovného zapnutí, nebo vyslání čety na opravu).

Pro lepší orientaci jsou SCADA systémy doplněny o geografické informační systémy (GIS - Geographic Information Systems) [2], [8], [14]. Tyto umožňují uživateli pohyb po mapě, ve které jsou vyznačena provozovaná vedení, stroje a přístroje. Jednotlivé objekty jsou dále navázány na související databáze, z nichž je možné získat informace o parametrech, komponentách, výrobní dokumentaci apod.

Součástí SCADA systémů mohou být systémy pro monitoring klimatických podmínek a počasí. Tyto systémy lze využít pro predikce možných zatížení (na základě teploty) nebo predikce očekávaných výkonů alternativních zdrojů energie [66]. Takto lze odhadovat například výkon větrných elektráren na základě předpovědi síly větru [12] nebo výkon solárních elektráren na základě předpovědi oblačnosti [13].

2.1.2 Střednědobá správa aktiv

Ve střednědobém horizontu asset management spočívá zejména v údržbě a plánování údržby. Opět je nezbytné vyvážit ekonomické náklady a přijatelnou míru rizika. Ekonomické náklady se v tomto případě posuzují ze dvou úhlů. Za prvé se jedná o náklady na samotný údržbový zásah (vč. projektového zpracování, repase, příp. dodávky nových dílů). Druhý aspekt je spojen s náklady za ušlý zisk v případě, kdy za předmětné zařízení není k dispozici náhrada.

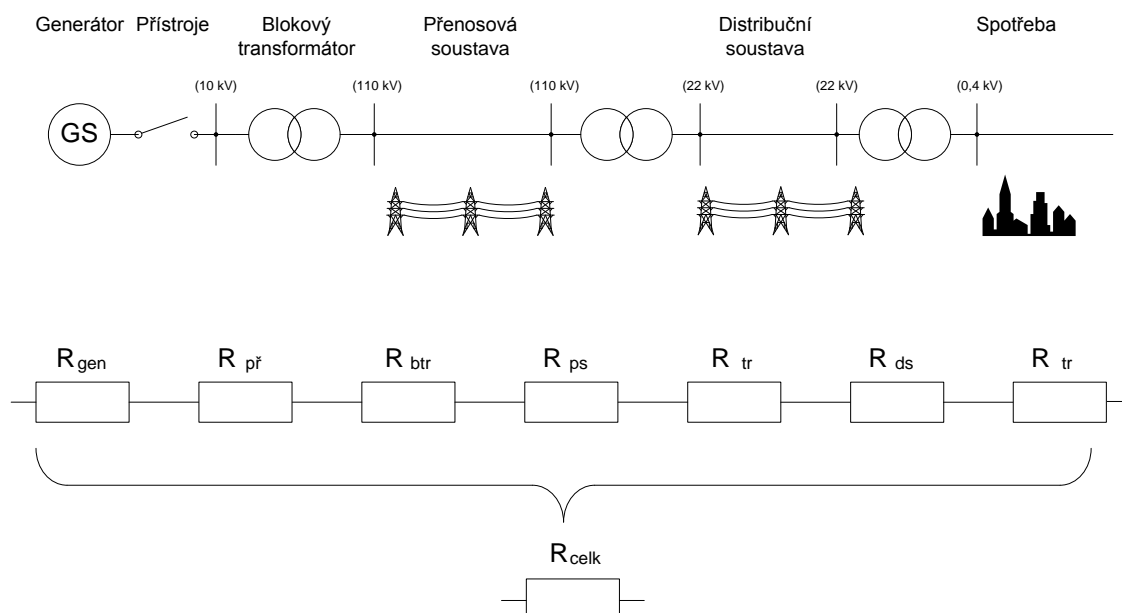
Údržbové činnosti jsou plánovány na základě doporučení (manuálů) výrobců daných zařízení a na základě vývoje diagnostických šetření, která jsou na nich periodicky prováděna. Vzhledem ke komplexnosti této problematiky, kdy je v provozovaných sítích mnoho typů různých zařízení o různém stáří a různém provozním zatížení nelze najít jednoduché algoritmy pro obecné plánování tak, aby to bylo pro všechna provozovaná zařízení efektivní. Využívají se proto různé databáze, často s odlišnou strukturou a bez patřičných propojení. Důsledkem je, že předmětná zařízení jsou diagnostikována, či udržována v nepravidelných intervalech, což dále komplikuje manažerská rozhodnutí.

V praxi se tak často využívají podpůrné IT nástroje, které shromažďují a vyhodnocují tato data. Příkladem je nástroj LTO Suite od OT Energy services. Tyto nástroje jsou zpravidla modulární, obsahují databázi, analytické nástroje na zpracování dat, různé aplikační vrstvy a grafický interface, který slouží ke komunikaci s uživatelem. Zásadním problémem takovýchto nástrojů je omezená databáze, široký rozsah sledovaných zařízení a nekonzistentní data. Dále je nutné vyřešit konektivitu a sjednotit různé komunikační standardy, aby bylo možné využívat signály ze všech dostupných informačních kanálů.

2.1.3 Dlouhodobá správa aktiv

V dlouhodobém časovém horizontu se asset management zabývá zejména strategickým plánováním rozvoje a investic. Investicím předchází důkladná analýza sítě, kdy jsou detailně zkoumány jednotlivé lokality výroby a spotřeby spolu s analýzou rizik při různých variantách poruchy. Účelem je vyhodnotit změny, které v sítích probíhají a reagovat na ně tak, aby nedošlo k ohrožení spolehlivosti dodávky v některých lokalitách, anebo naopak k předimenzování jiných [2], [6].

Charakter elektrické sítě je radiální. Centrem je místo výroby elektrické energie, která je dále paprscitě dodávána jednotlivým odběratelům. Tedy spolehlivost sítě lze vyjádřit jako sériový spolehlivostní řetězec od výrobce po odběratele (obr. 2). Ve skutečnosti jsou sítě často provozovány jako zkrhované tak, aby bylo možné případné poruchy překlenout a dodávat energii z jiné strany. Tím se spolehlivostní výpočet komplikuje, jelikož přibývají paralelní větve. Následující schéma je značně zjednodušený model přenosu elektrické energie od zdroje ke spotřebiči, nerespektuje transformaci na vyšší napěťové hladiny v přenosové síti, ani paralelní větve, resp. komplexnost zejm. distribučních soustav – jedná se o zjednodušený příklad pro ilustraci spolehlivostních úvah.



obr. 2: zjednodušené spolehlivostní schéma toku elektrické energie v soustavě

Celková spolehlivost R_{celk} sériového spojení prvků je dána součinem spolehlivostí dílčích částí (1).

$$R_{\text{celk}}(t) = \prod_n R_i(t), \quad (1)$$

kde $R_i(t)$ je pravděpodobnost bezporuchového provozu podsystému v čase $t < \tau$.

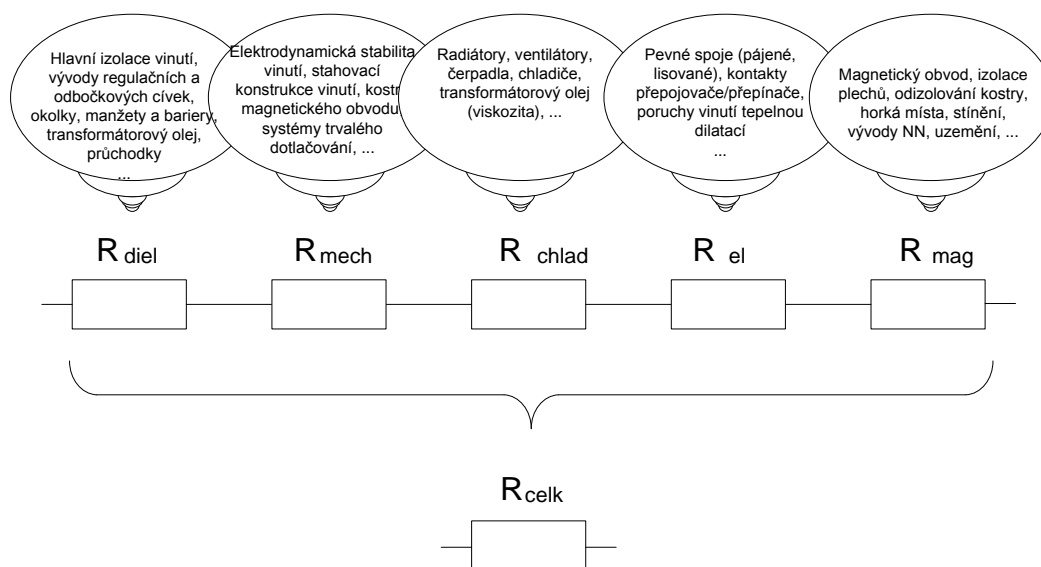
Pravděpodobnost bezporuchového provozu R_i je komplementem pravděpodobnosti poruchy Q_i , z čehož vyplývá:

$$R_i(t) = 1 - F_i(t), \quad (2)$$

kde $F_i(t)$ je pravděpodobnost poruchy podsystému v čase $t < \tau$.

Spolehlivostní schémata skutečných sítí a zařízení jsou samozřejmě značně složitější, avšak základní princip lze demonstrovat i na těchto jednoduchých schématech. Z výše uvedených vztahů (1) a (2) plyne potřeba se v rámci dlouhodobé strategie zaměřit na obnovu, nebo zálohování nejslabších částí. Podporu takových rozhodnutí umožňují statistické softwarové nástroje, které vycházejí z diagnostických signálů.

Podobným způsobem lze přistupovat k určení spolehlivosti elektrických strojů. Taktéž je nutné zaměřit pozornost na nejslabší článek, kterým je dielektrický podsystém [43]. Celková spolehlivost stroje se určí obdobně jako v případě elektrických sítí, z dílčích spolehlivostí jednotlivých subsystémů (viz obr. 3). Opět se jedná o sériový spolehlivostní řetězec.



obr. 3: zjednodušené spolehlivostní schéma transformátoru

Složitější systémy lze jen obtížně modelovat analyticky. V takových případech se využívá stochastický přístup a různých metod – např. Markovovy řetězce, metoda Monte Carlo a další.

2.2 Strategie údržby elektrických zařízení

S rostoucím významem asset managementu dochází v praxi k diverzifikaci tradičního přístupu k údržbě elektrických zařízení. V současné době dochází k prudkému rozvoji diagnostiky (zejména online) a k jejímu masivnímu nasazování v průmyslu. Tím je možné zavádět stále složitější systémy údržby elektrických zařízení tak, aby tyto statky poskytovaly provozovateli vysoký hospodářský výnos. Tím, jak překotně vznikají nové údržbové modely, dochází ke vzniku nejednotné terminologie. V literatuře lze nalézt různá dělení a také různé pojmenování těchto mechanismů a systémů. Nejčastěji jsou uváděny tyto systémy:

- údržba po poruše (IBM - incident based maintenance)
- údržba dle časového plánu (TBM - time based maintenance)
- údržba dle aktuálního stavu zařízení (CBM - condition based maintenance)
- prediktivní údržba (FBM - forecast based maintenance)

- údržba soustředěná na spolehlivost (RCM - reliability centered maintenance)
- údržba soustředěná na minimalizaci rizik (RBM - risk based maintenance)
- Některé zdroje zahrnují poslední čtyři kategorie (CBM, FBM, RCM, RBM) do jedné a souhrnně ji nazývají condition based maintenance. Jejich společným vstupem je aktuální stav sledovaného zařízení, který je možné získat pomocí online diagnostiky.
- proaktivní údržba (PRM – proactive maintenance)

Jednotlivé společnosti používají různé systémy údržby, často jejich vzájemné kombinace, případně variace. Strategie údržby v praxi nejsou takto striktně ohraničené. Častá je zejména v energetice kombinace údržby dle časového plánu a aktuálního stavu, kdy jsou pravidelně prováděna diagnostická šetření a na jejich základě jsou aplikovány korekční mechanismy dle aktuální potřeby.

Dnešní technický svět by se nemohl rozvíjet současným tempem bez technické normalizace, která pomáhá zajišťovat kompatibilitu výrobků a služeb. Úkolem standardizace je stanovení jednotných postupů a metodik, přičemž zároveň nesmí být omezen technický pokrok, v této oblasti zejména postupný transfer z plánované údržby na režimy CBM. Některé tyto změny jsou zakotveny již v současných normách.

Za nejvýznamnější dokumenty dotýkající se této oblasti lze považovat ČSN EN 61703 Matematické výrazy pro ukazatele bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a zajištěnosti údržby (Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms), ČSN EN 60300 Management spolehlivosti (Dependability management) a ČSN EN 60706 Udržitelnost zařízení (Maintainability of equipment). Obdobné dokumenty jsou k nalezení též v databázi standardů IEEE.

Zmíněné dokumenty popisují nástroje pro hodnocení spolehlivosti a postupy k jejímu zajištění.

2.2.1 Údržba po poruše

Údržba po poruše se v literatuře též označuje jako korektivní údržba [24], breakdown maintenance [25], corrective maintenance [16], [17], incident based maintenance (management) [19], fire-fighting maintenance [25], failure-based maintenance [25], případně run to failure.

Tento způsob údržby zařízení je vhodný pro oblasti, kde není nezbytný trvalý provoz a kde výpadek zařízení nemá dalekosáhlé důsledky. Dále se údržba po poruše využívá v elektronice a telekomunikacích, kdy jednotlivé komponenty jsou bezúdržbové. Požadovaná spolehlivost je zajištěna zdvojením zařízení, případně automatickými zálohovacími systémy. V energetice se tento způsob údržby zpravidla nepoužívá, jelikož eventuelní havárie elektrických strojů s sebou nese vysoké riziko poškození dalšího majetku, osob, případně negativní dopad na životní prostředí.

2.2.2 Údržba dle časového plánu

V literatuře je údržba dle časového plánu též pod označením preventivní údržba [23], [24], preventive maintenance [16], time based maintenance (management) [3], [17], planned maintenance [22] nebo scheduled maintenance [15].

Tento způsob údržby se v současnosti běžně používá v energetice. Dle druhu a významu předmětného zařízení jsou definovány intervaly údržby, zpravidla bez ohledu na aktuální provozní zatížení a v těchto intervalech je prováděna údržba. Plánovaná údržba je výhodná z hlediska střednědobého asset managementu, jelikož náklady a rozsah prováděných činností jsou dopředu plánované a je možné s nimi počítat při sestavování rozpočtů. Údržba elektrických zařízení dle předem stanoveného časového plánu zpravidla začíná vizuální prohlídkou, kontrolou funkce všech komponent a očištěním povrchů. Dále je prováděna diagnostika dostupných parametrů a ze získaných dat jsou vyvozovány závěry. Součástí je též eventuální oprava, či výměna opotřebovaných prvků a příslušenství.

Rozsah údržbových činností závisí na významu provozovaného zařízení a na jeho zatěžování.

2.2.3 Údržba dle aktuálního stavu

Údržba dle aktuálního stavu je též uváděna jako prediktivní údržba [23], predictive maintenance [15], condition based maintenance (management) [2], [3], [17] nebo prognostic health management [18]. Mezi těmito pojmy mohou být více, či méně významné nuance, v závislosti na konkrétním pojetí.

Prediktivní údržba (FBM - forecast based maintenance) vychází z předpovědi budoucího stavu, která vzniká na základě vývoje diagnostických parametrů v čase. Zároveň je hodnoceno dosavadní zatěžování transformátoru a též předpokládané zatížení v budoucnu (např. výstavba nových linek v případě přenosových transformátorů, navyšování výkonu elektráren v případě blokových transformátorů, atp.).

Údržba soustředěná na spolehlivost (RCM - reliability centered maintenance) [3], [15] je založená na výpočtech, či odhadech spolehlivosti dílčích celků sledovaného zařízení. V případě přenosových sítí se vypočítává spolehlivost transformátorů, izolátorů a úseků vedení z hlediska různých poruchových mechanismů. Metoda vychází ze stanovení spolehlivosti jednotlivých zařízení a výpočtu celkové spolehlivosti dílčích celků. Predikce spolehlivosti zahrnuje předpoklad zatížení jednotlivých částí (například odhad přenášených výkonů dílčích částí přenosové sítě).

Údržba soustředěná na minimalizaci rizik (RBM - risk based maintenance) [19] současně se stavem zařízení hodnotí míru rizika při eventuálním výpadku. Přednostně je údržba prováděna na zařízeních, kde jejich výpadek má vážné důsledky v ohrožení života nebo majetku. Příkladem může být hutní průmysl. Rizika jsou počítána jako součin pravděpodobnosti poruchy a nákladů nutných k vynaložení na kompenzaci jejích následků.

Obecně údržba dle aktuálního stavu zařízení vychází z dnešních možností diagnostiky online, která v reálném čase vyhodnocuje stav sledovaného zařízení za provozu. Princip údržby dle aktuálního stavu spočívá v přizpůsobení intervalu, nebo rozsahu údržbových činností aktuálnímu stavu zařízení.

Některé zdroje popisují condition based maintenance jako údržbu závislou na výsledku profylaktických zkoušek, což je způsobeno odlišným chápáním funkce diagnostiky [25], [27], [28]. Tyto zdroje oddělují prognostiku od diagnostiky, a tak popisují údržbu dle aktuálního stavu jako korektivní údržbu prováděnou při odstávkách. Systém údržby popisovaný v této práci jako prediktivní údržba (condition based management) nazývají pojmem inteligentní systém údržby (intelligent maintenance system). Tato interpretace však není příliš rozšířená, a tak bude další text vycházet z tradičního pojetí diagnostiky. Prognostika je chápána jako součást diagnostiky a prediktivní údržba je založena na prognóze vývoje parametrů zařízení.

Myšlenka údržby dle potřeby konkrétního provozovaného zařízení se poprvé objevila v 70. letech [17], [25], první snahy o implementaci v energetice lze nalézt na přelomu 80. a 90. let v Japonsku, avšak k širšímu rozšíření dochází až v posledních letech.

Výhodou prediktivní údržby je optimalizace údržbových činností na základě aktuální potřeby zařízení. Prvním nezbytným krokem je osazení sledovaného zařízení senzory, které umožní monitorování diagnostických parametrů v reálném čase. Význam volby umístění čidel je podrobněji vysvětlen v kapitolách 4.3, 4.4, 4.5 a 4.7. Naměřená data jsou vstupem pro online diagnostiku, která vyhodnotí aktuální stav zařízení a na základě časového vývoje měřených parametrů provede prognózu budoucího vývoje. Prognostika je nedílnou součástí diagnostiky, která umožňuje zmíněnou predikci vývoje sledovaného objektu na základě postupných poruch způsobených degradačními procesy [26]. Prognóza budoucího vývoje zařízení umožňuje operátorovi sestavit a korigovat rozvrh údržbových činností. Rozvrhování využívá též ekonomické analýzy pro optimalizaci nákladů na údržbu a ušlého zisku způsobeného odstávkou.

2.2.4 Prognostika

Na základě znalosti degradačních procesů působících na stroje je možné predikovat eventuální poruchy, ke kterým může dojít. V zásadě je nezbytné určit místo poruchy, čas poruchy a příčinu poruchy. Ke stanovení těchto údajů je nezbytná komplexní znalost konstrukce předmětného zařízení a též znalost provozních a okolních vlivů, které na něj působí. Velmi užitečné jsou záznamy a historie údržbových činností, oprav a časový vývoj diagnostických parametrů.

Obecně lze definovat tři metody predikce poruch: predikce založená na zkušenosti, predikce z naměřených dat a predikce založená na modelu.

Predikce založená na zkušenosti je jediná možná, pokud není k dispozici model, ani dostatek měřených dat. Vychází ze statistických dat poruch podobných zařízení, které jsou provozovány podobným způsobem. Takový odhad je velmi nepřesný a ne vždy aplikovatelný. Přesnost předpovědi závisí na zkušenostech experta, který predikci provádí.

Prognóza na základě naměřených dat vychází ze znalosti vztahu mezi naměřenými daty a poruchovým mechanismem. Tato metoda je v současnosti nejpoužívanější. Výhodou je stávající infrastruktura, kdy ve většině elektráren, které jsou vybaveny nadřazeným kontrolním systémem, jsou provozní parametry strojů k dispozici i zpětně, jelikož jsou ukládány do databází.

Prognóza na základě modelu předpokládá existenci exaktního matematického modelu pro příslušné zařízení. Takový model musí být velmi komplexní a složitý, aby popsal vývoj stavu zařízení s uvažováním všech působících vlivů. Podobné modely se využívají v konstrukci transformátorů, čili lze očekávat, že budou v budoucnu nasazeny pro potřeby údržby.

2.2.5 Proaktivní údržba

Proaktivní údržba je nadstavbou údržby dle aktuálního stavu, jelikož nejen sleduje a vyhodnocuje stav provozovaných zařízení, ale především provádí takové zásahy, které oddálí příčiny poruchy nebo jim zcela zabrání [20], [21]. V energetice se tento systém neuzivá. Okolní podmínky zpravidla není možné zásadním způsobem ovlivňovat, veškeré možné opatření pro minimalizaci okolního působení jsou provedeny při montáži.

2.3 Smart grid a průmysl 4.0

Inteligentní sítě (v anglické literatuře označovány jako smart grid) jsou silové a komunikační sítě, které umožňují regulovat výrobu a spotřebu elektrické energie v reálném čase. Výroba i spotřeba elektrické energie je monitorována a plně automatizována. K dispozici jsou údaje o aktuálním zatížení, poruchách, odstávkách a případně i další informace. Tyto sítě využívají inteligentní elektroměry, které pomocí obousměrné komunikace se sítí v reálném čase umožňují tvorbu cenových tarifů podle aktuální výroby a spotřeby. Součástí těchto sítí jsou i decentralizované lokální zdroje energie, které mohou pružně měnit výkon a tím podpořit stabilitu sítě [29].

V těchto sítích vzrůstá potřeba monitoringu a diagnostiky provozních stavů a jejich vývoje. Životnostní analýzy jsou tak často snadno implementovatelné, jelikož pro ně potřebná infrastruktura je již vybudována.

V případě přebytku energie v síti jsou spouštěny dobíjecí stanice pro nabití akumulátorů elektromobilů, případně jiných energeticky náročných spotřebičů. Elektromobily mají kromě transportu osob a zboží též úlohu mobilních akumulčních zařízení. Pro akumulaci energie je možné dále využít palivových článků, velkokapacitních kondenzátorů, případně akumulátorů.

Silná informační infrastruktura inteligentních sítí umožní snazší nasazení nástrojů pro samosprávu. Důsledkem velkého množství decentralizovaných zdrojů a celkové složitosti těchto sítí se stane asset management systém nutným pro spolehlivý provoz sítí [8], [29]. Nelze však předpokládat plně autonomní provoz řídicích systémů, dohled zkušených operátorů zůstane nevyhnutelný [4].

Projekty inteligentních sítí jsou v současné době provozovány pouze ve zkušebním režimu v malém rozsahu. V budoucnu však jejich význam i rozsah poroste [29].

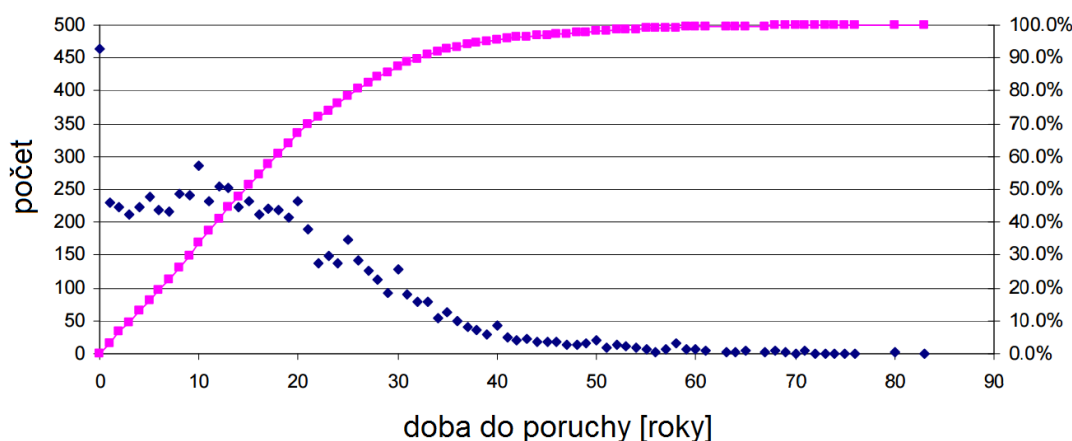
Stejný trend jako v energetice se nyní objevuje ve zpracovatelském průmyslu. Automatizace a digitalizace výrobních procesů se v poslední době značně rozvíjí a taktéž využívá možnosti diagnostiky, spolehlivostních a životnostních analýz.

2.4 Specifika provozování transformátorů

Každé technické zařízení stárne a postupem času spěje ke konci svého technického, či ekonomického života. Výkonové transformátory jsou navrhovány a vyráběny s určitou předpokládanou životností, ovšem v důsledku závisí zcela na provozovateli, zda toto doporučení výrobce respektuje, případně kdy provede generální opravu, či výměnu. Ve střední Evropě je provozování strojů za hranicí technické životnosti závislé na významu stroje, resp. na provozovateli. Je možné sledovat určitý trend, kdy provozovatelé přenosových sítí udržují svoje transformátory v intervalu jejich životnosti, případně je vyměňují před dosažením deklarované životnosti. Provozovatelé distribučních sítí tento interval obvykle překračují a nejhorší situace je v obecně v průmyslu, kde jsou často provozovány stroje i po dvojnásobný, či trojnásobný čas, než který jim byl určen.

Transformátory jsou v zásadě velmi spolehlivá zařízení, která za běžných provozních podmínek vyžadují minimum údržby. Vždy tedy záleží na konkrétním provozovateli, jakým způsobem do svých aktiv investuje, či jak eliminuje případná rizika poruchy.

Na obr. 4 je graf znázorňující počty havarovaných transformátorů v závislosti na jejich věku. Podobné zkušenosti jsou známy i z provozů v ČR. Ačkoliv je běžná inherentní životnost izolačního systému transformátorů 30 let, z grafu je zřejmé, že pouze 15% z celkového počtu havarovaných strojů tuto hranici překročí.



obr. 4: doba do poruchy cca 7000 ks dvojvinutových transformátorů, analýza Doble Engineering, převzato z [4]. Fialová křivka – frekvenční funkce doby do poruchy, modrá křivka – distribuční funkce

Provozovatelé rozvodných sítí a transformátorů obvykle udržují určité množství strojů často téhož typu, či konstrukce. Pro zajištění spolehlivosti se sleduje, kdy se určitý typ stroje blíží ke své určené době životnosti, je sešrotován a nahrazen novým strojem. Zodpovědní provozovatelé vyhodnocují průběh zatěžování a odebírají vzorky izolačního systému při šrotování, aby mohli určit např. stupeň polymerizace. Následně je možné přesněji odhadnout stav ostatních strojů téže série (typu) a tedy rozhodnout o jejich dalším provozování.

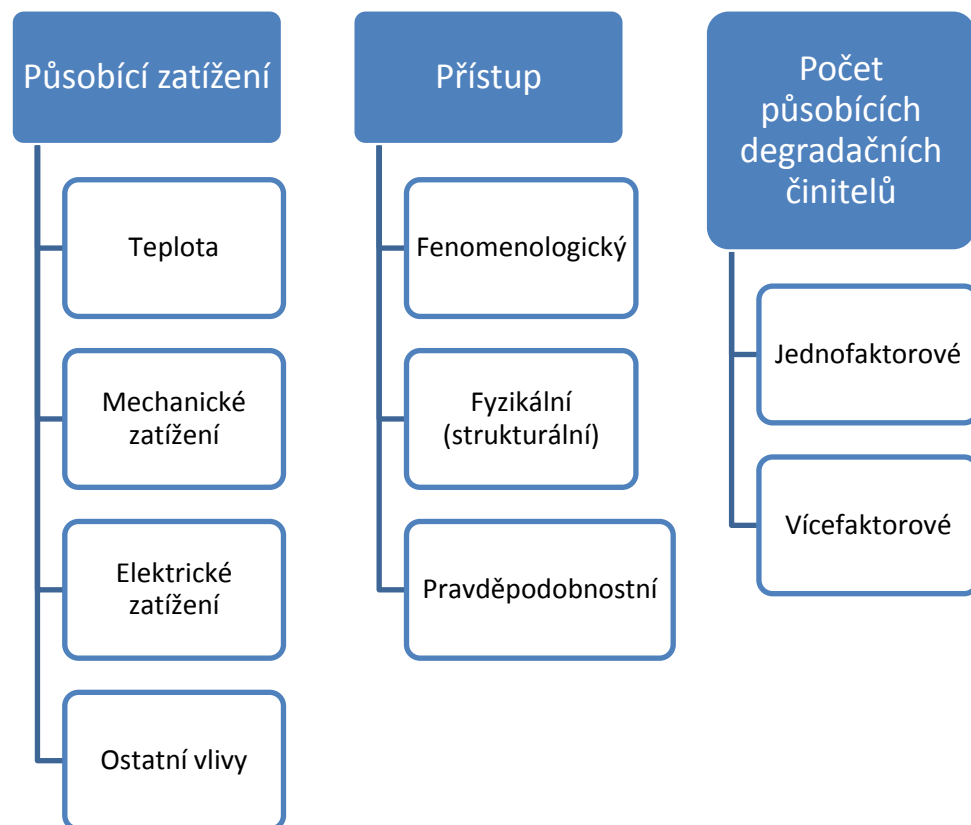
Moderní správa aktiv využívá online monitorovací systémy a vyhodnocuje stav provozovaných strojů online. Tento způsob dává přesnější odhad zbytkové životnosti, než post-mortem analýzy. Online monitoring je možné využít k výpočtům relativního stárnutí, případně k výpočtům zbytkové životnosti.

3 Životnost elektroizolačního systému

Z hlediska provozu elektrických strojů, mj. transformátorů rozlišujeme životnost na technickou, ekonomickou, případně morální. Tato kapitola se dále zabývá pouze životností technickou. Elektroizolační systémy jsou v provozu ovlivňovány vnějšími faktory, které postupně působí nevratné změny v jejich struktuře, což v důsledku vede k částečnému – či plnému omezení jejich funkce. Tyto faktory označujeme jako degradační mechanismy.

3.1 Degradace elektroizolačního systému a popis odolnosti

Výše zmíněných degradačních mechanismů v provozu působí celá řada, z nichž některé jsou dominantní a mají na celkový stav zařízení výraznější vliv, než jiné. Mezi nejvýznamnější patří vlivy tepelné, elektrické, mechanické a vlivy prostředí. Ve snaze určit míru degradace systému vznikla řada modelů, které popisují efekt zmíněných degradačních mechanismů [26], [34], [35], [41], [42]. Některé z možných rozdělení jsou uvedeny na obr. 5.



obr. 5: rozdělení modelů odolnosti podle různých kritérií

Fenomenologický přístup popisuje příznaky degradačních procesů z makroskopického hlediska, zatímco fyzikální modely studují příčiny degradačních mechanismů, obvykle na mikroskopické úrovni [26] a snaží se nalézt obecnější vztahy platné pro daný materiál. Matematický zápis fenomenologických a fyzikálních modelů je často podobný, avšak veličiny fyzikálních modelů mají reálný význam. Zcela odlišný je přístup pravděpodobnostní. Pro modelování spolehlivosti se v elektrotechnice využívá exponenciální rozdělení [43]. Pro vyhodnocování kvality výroby se často využívá tříparametrové Weibullovo rozdělení [32], [33], které umožňuje velmi blízkou aproximaci naměřených dat. Weibullovo rozdělení lze chápat jako zobecněné exponenciální rozdělení [44].

Čím více dat o působících degradačních jevech je k dispozici, tím přesněji lze míru degradace izolačního systému popsat. Ovšem daní za přesnost je složitost a pracnost výpočtu. Proto je vhodné se zaměřit na ty degradační procesy, které jsou nejvýznamnější. Obvykle se jedná o kombinaci dvou až tří mechanismů, jejichž popis postačuje k popisu odolnosti izolačního systému s dostatečnou přesností.

3.2 Sestavení modelů odolnosti na základě zrychleného laboratorního stárnutí

Projektovaná životnost elektrických strojů, zejména velkých výkonů se pohybuje v řádu desítek let. Například pro transformátory se uvádí počáteční životnost daná teplotním namáháním papírové izolace vinutí 30 let. Z praxe jsou známy stroje, které jsou starší více než dvojnásobně a stále slouží, zatímco jsou též známy případy havárií či fatálních poruch u strojů výrazně mladších [4].

Pro kvantitativní určení životnosti izolačního systému se využívají zkoušky zrychleného laboratorního stárnutí. Princip spočívá v nastavení pokud možno identických degradačních mechanismů ovšem s vyšší úrovní namáhání, než je v provozu. Důsledkem je rychlejší degradace materiálu a dosažení informace o životnosti ve výrazně kratší době.

Prvním krokem pro zkoušky zrychleného laboratorního stárnutí je volba diagnostické metody a kritéria koncového bodu. Diagnostické zkoušky mohou být destruktivní (např. určování průrazného napětí) a nedestruktivní (např. měření ztrátového činitele $\tan \delta$). Norma ČSN EN 60216-1 [46] uvádí dvě možnosti volby koncového bodu pro tepelné stárnutí:

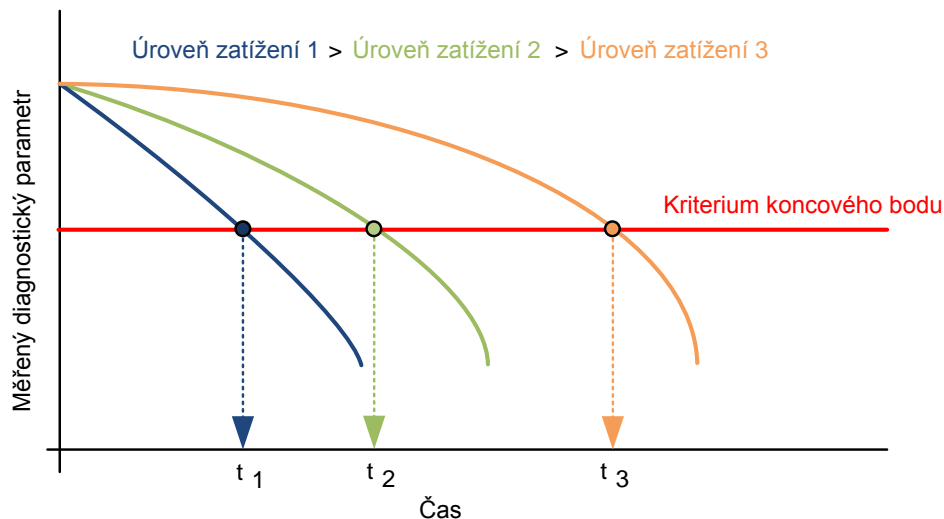
- procentuální nárůst nebo pokles hodnoty vlastnosti proti původní hodnotě,
- pevnou hodnotu vlastnosti.

Jedná se tedy o určení kritériální hodnoty, jejíž dosažení znamená ukončení schopnosti materiálu plnit požadovanou funkci. Při překročení této kritériální hodnoty nemusí nutně dojít k havárii izolačního systému, ovšem je nutno nadále považovat tento systém za nespolehlivý.

Z vybraného elektroizolačního materiálu se připraví sady vzorků, které jsou následně podrobeny definovanému namáhání zvoleným degradačním mechanismem na několika úrovních. Pro zajištění správnosti experimentu je nutné vyrobit vzorky s vysokou přesností technologického zpracování i konečných rozměrů. Dále je nutné provádět stárnutí v přesně definovaných a regulovaných podmínkách.

Při destruktivních zkouškách není nutné stanovovat kritérium koncového bodu a stárnutí tak probíhá do doby porušení vzorku (např. elektrický průraz). Doby porušení jsou následně vyneseny v závislosti na úrovni degračního mechanismu a aproximovány matematickým modelem v obecném tvaru. Takto je získána křivka odolnosti působícímu namáhání.

V případě nedestruktivních metod jsou vzorky stárnutý na definovaných úrovních degračního mechanismu a v průběhu stárnutí postupně proměřovány jejich parametry. Hodnoty parametru se s časem vyvíjejí, jak je naznačeno na obr. 6.



obr. 6: vývoj parametru izolčního systému v průběhu stárnutí pro tři úrovně degračního mechanismu

Doby dosažení koncového bodu jednotlivých sad vzorků jsou následně zobrazeny v závislosti na úrovni působícího degračního zatížení. Proložení těchto dat vhodnou rovnicí je získán model odolnosti (např. obr. 7). Jak již bylo zmíněno výše, stárnutí izolčních systémů má zpravidla exponenciální rozdělení, čili modely odolnosti vycházejí z exponenciální funkce v obecném tvaru:

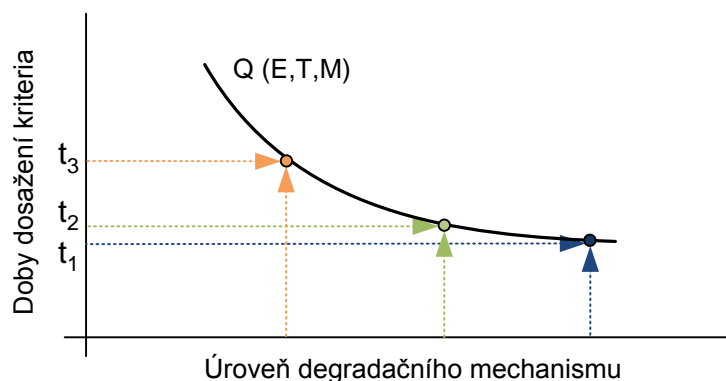
$$Q(x) = a \cdot e^{-bx}, \quad (3)$$

kde:

$Q(x)$ je obecná funkce odolnosti,

x je proměnná

a, b jsou parametry.



obr. 7: obecný matematický model stárnutí izolčního systému získaný měřením vývoje parametru

a aproximací změřených dat. Funkce odolnosti je obecně funkcí elektrického pole E , teploty T a mechanického namáhání M .

Regresní křivku je možné získat dvěma způsoby. První spočívá v nelineární transformaci časové souřadnice (logaritmické v případě exponenciální funkce) a následném řešení lineární L-2 aproximace. Výsledná regresní přímka v semilogaritmických souřadnicích se po zpětné transformaci do lineárního prostoru zobrazí jako exponenciální funkce.

Druhou možností je nelineární L-2 aproximace měřených dob dosažení kritéria [51]. Metoda spočívá v numerické minimalizaci kritériální funkce. Příkladem kritériální funkce pro exponenciální model je rovnice (4):

$$S(a,b) = \sum_{i=1}^n \left(Y_i - a \cdot e^{-bx_i} \right)^2, \quad (4)$$

kde:

$S(a,b)$ je kritériální funkce (suma čtverců residuí),

a, b jsou parametry exponenciálního modelu,

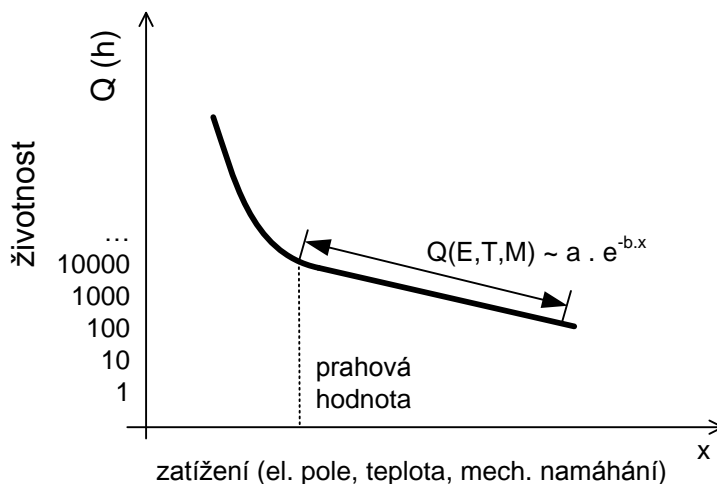
Y_i jsou doby dosažení kritéria.

Výsledkem po n krocích numerické minimalizace je dostatečně přesný odhad koeficientů modelu. K řešení této úlohy je vhodné užít software pro statistickou analýzu dat.

3.3 Obor platnosti modelů odolnosti

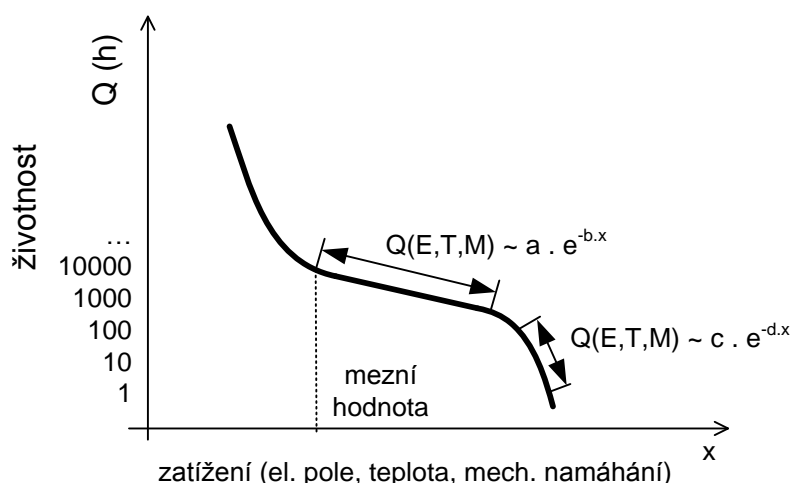
Modelování odolnosti izolačních systémů je vždy určité přiblížení a zjednodušení skutečných podmínek. V praxi jsou vlivy působící na elektrická zařízení velmi rozmanité. Proto je nezbytné definovat podmínky, za kterých je možné tyto zkoušky provádět. Tyto požadavky specifikují blíže předmětné normy. Souhrnná metodika pro zajištění standardních podmínek a tím zajištění správnosti provedení zkoušek je předmětem normy ČSN EN 60212 [47].

Nezbytnou podmínkou pro zajištění výpovědischopnosti těchto testů je působení stejných fyzikálních mechanismů degradace jako v provozu. Při extrémním zatížení by mohly materiály degradovat jinými fyzikálními mechanismy a tím by došlo ke zkreslení výsledků. Například norma ČSN EN 60216 doporučuje odhad životnosti materiálu pro zatížení nižší o max. 30°C, než při kterém byly zkoušky prováděny. Tento fakt koresponduje s modely s prahovou hodnotou [48], [34], kdy bylo dokázáno, že pod určitou úrovní namáhání materiál nestárne, nebo stárne velice pomalu (obr. 8).



obr. 8: model s prahovou hodnotou zatížení, pod kterou již neplatí exponenciální závislost životnosti na zatížení.

Dále je nutno sledovat, zda ve sledovaném rozsahu zatížení nedochází ke kombinaci více degradačních mechanismů. V tomto případě by v grafu byly zřejmé dvě (či více) přímky s různou směrnici.



obr. 9: model s dvěma degradačními mechanismy ve sledovaném intervalu zatížení

Dále je nutné respektovat fyzikální podstatu modelu a používat vhodné modely pro příslušnou aplikaci. Například v případě elektrického namáhání není možné nalézt jediný model, který by dokázal popsat odolnost vůči stejnosměrnému, střídavému a pulznímu namáhání. Jednotlivé charaktery napětí mají odlišné modely odolnosti [50], [67], [68].

Stejně je nutné postupovat v případě modelů teplotní odolnosti. Standardními exponenciálními modely tepelné odolnosti nelze odhadovat životnost materiálů pracujících například v cyklických režimech. Odolnost vůči cyklickému teplotnímu namáhání je též možné určit, ale je nutné použít jiný model [49].

Dále nutno poznamenat, že některé vlivy degradují izolační materiály, ale jejich účinek je obtížně kvantifikovatelný. Příkladem může být degradace částečnými výboji. Existují modely, které respektují mnoho zdrojů výbojové činnosti a snaží se tak popsat odolnost vůči částečným výbojům pomocí statistických modelů [41]. Tento přístup je ovšem diskutabilní s ohledem na stochastický charakter výbojové činnosti.

3.4 Kombinace degradačních vlivů

Ve skutečném provozu jsou materiály namáhány několika degradačními vlivy současně. Stárnutí elektroizolačního systému tedy nelze modelovat pomocí jediného degradačního faktoru. V některých případech je vliv jednoho faktoru dominantní, a tak model s uvažováním pouze tohoto faktoru je dostatečně přesný. Může jít například o stroje na nízké napětí, kde je obvykle nejvýznamnější teplotní degradace.

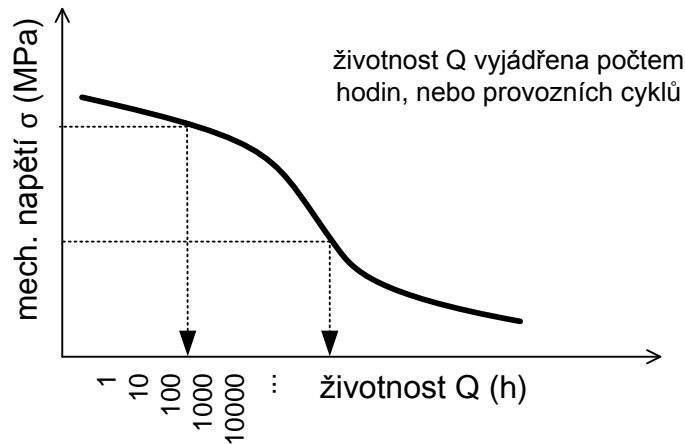
V ostatních případech je nutné respektovat všechny vlivy. Situace je o to složitější, že se jednotlivé degradační mechanismy navzájem ovlivňují a působí synergickým efektem. K selhání objektu tak dojde ve výrazně kratším čase, než kdyby působily jednotlivé vlivy postupně jeden po druhém. Literatura rozlišuje přímou a nepřímou interakci dílčích vlivů [26], [52], [56]. Přímá interakce je takový vliv faktorů, kdy je zřejmý rozdílný efekt, pokud působí najednou, nebo postupně. Faktory přímé interakce nemusí být nutně faktory stárnutí. Jako příklad lze uvést oxidaci a teplotu [26]. Jednotlivé faktory nemají významný vliv, avšak zvýšená teplota umocňuje oxidační reakci a materiál je degradován velmi rychle.

Nepřímá interakce je taková interakce, kdy se jednotlivé vlivy navzájem neovlivňují, mají tedy stejnou podobu, ať působí najednou, nebo postupně. Jejich vliv na materiál je však rozdílný pokud působí dohromady, než když působí jednotlivě postupně. Nepřímé interakce působí pouze mezi faktory stárnutí. Příkladem může být současný vliv teploty a elektrického pole, nebo teploty a vibrací. V obou případech je při kombinaci faktorů materiál degradován rychleji, než pokud jednotlivé faktory působí postupně.

Modelování vícefaktorového stárnutí je velmi obtížné. Běžně lze v literatuře dohledat modely dvoufaktorové (obvykle teplota a elektrické pole), ale byly zpracovány i třífaktorové modely zahrnující navíc vliv vibrací [53], [54], nebo záření [55]. Nejjednodušší empirické modely jsou založeny na exponenciálním modelu pro každý degradační mechanismus a vliv interakcí je respektován váhovými koeficienty.

3.5 Kumulativní model

Kumulativní model je výhodný zejména pro online výpočet zbytkové životnosti. Na základě dat z online monitoringu je možné programově vypočítat namáhání izolačního systému a následně vypočítat zbytkovou životnost. Princip metody lze popsat například na Wöhlerově únavové křivce (též S-N křivka) [39], která popisuje odolnost vůči mechanickému namáhání pro vysokocyklovou únavu (obr. 10). Pro nízkocyklovou únavu se využívá Manson-Coffinův model [38].



obr. 10: Wöhlerova únavová křivka pro mechanické namáhání

Aplikovatelnost kumulativních modelů pro modelování odolnosti elektroizolačních systémů popisuje např. Kimura a kol. [36], [37]. Tyto modely jsou empirického charakteru a tak postrádají fyzikální význam. Na základě zkoušek zrychleného laboratorního stárnutí je však možné přesně aproximovat naměřená data vybraným modelem a tím nedostatek fyzikální podstaty potlačit.

V praxi je často právě mechanické namáhání nejvýznamnějším degradačním faktorem. Příklad může být nalezen v izolačním systému olejových transformátorů, kdy trvalým mechanickým zatěžováním papírové izolace vodičů dochází ke snížení mechanické pevnosti papíru a v důsledku též ke snížení pevnosti elektrické a následné poruše.

4 Výkonové transformátory a jejich provoz

Z hlediska spolehlivosti jsou transformátory velmi důležitou částí elektrizační soustavy. Je jim proto věnována značná pozornost a stav jejich izolačního systému je v průběhu technického života transformátorů v periodických intervalech zkoumán. V provozu lze nalézt řadu typů a konstrukcí s různým uspořádáním. Společný pro všechny výkonové transformátory je izolační systém olej-papír, který je možno dimenzovat na velmi vysoká napětí a výkony.

Pro hodnocení životnosti transformátorů (resp. jejich izolačních systémů) nelze využívat matematické modely uvedené v kapitole 3 bez detailní znalosti konstrukce izolačního systému. Tento úzce souvisí s typem vinutí, z hlediska tepelného i elektrického namáhání. Bez detailní znalosti konstrukce, resp. typu vinutí a skladby izolačního systému nelze vytipovat a modelovat nejslabší místo a tedy určovat zbytkovou životnost izolačního systému.

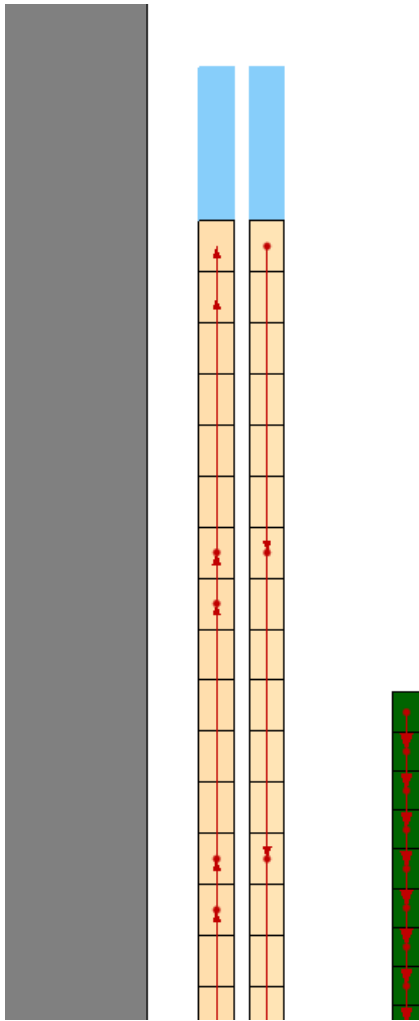
4.1 Vinutí transformátorů

Veškeré úvahy zaměřené na elektrické, tepelné a mechanické namáhání izolačního systému je nutné provádět na základě znalosti druhu a geometrického uspořádání izolačního systému. Toto uspořádání je dáno způsobem navíjení cívek. Existuje několik typů vinutí transformátorů, z nichž každý typ má svá specifika – pozitiva i negativa. S ohledem na ekonomické aspekty je cílem konstruktérů transformátorů navrhnout nejmenší možné vinutí při současném zachování požadovaných parametrů (rozměry okna magnetického obvodu, ztráty, impedance nakrátko) a životnosti. Životnost pevné izolace vodičů je omezená elektrickým a tepelným namáháním, které je determinováno návrhem.

4.1.1 Šroubovicové vinutí

Jednotlivé závity šroubovicového vinutí jsou navíjeny v axiálním směru. Vinutí nemusí být vinuto vždy pouze jedním vodičem. Je možné použít více paralelních vodičů ať už v axiálním, či radiálním směru. Šroubovicová vinutí mohou být jedno – či vícevrstvá. Mezi závity je možné vkládat radiální vložky, které umožňují obtékání jednotlivých vodičů (či závitů) olejem a tím zajišťují funkci chlazení. Z praktického hlediska se často využívá dvouvrstvé šroubovicové vinutí, kdy jsou začátky i konce vinutí nahoře a lze tak snadno propojovat vývody na průchodky. Šroubovicová vinutí jsou charakteristická tzv. stoupáním (v angl. literatuře označováno jako „pitch“). Vodič není navíjen v kruhových trajektoriích – v půdorysu sice trajektorii opisuje, ale v nárysu je zřejmá rozdílná vertikální pozice začátku a konce závitu. Toto stoupání v praxi způsobuje řadu obtíží, například nárůst přídavných ztrát, komplikace v mechanickém namáhání a další. Z hlediska technologie výroby je však toto vinutí nejsnazší.

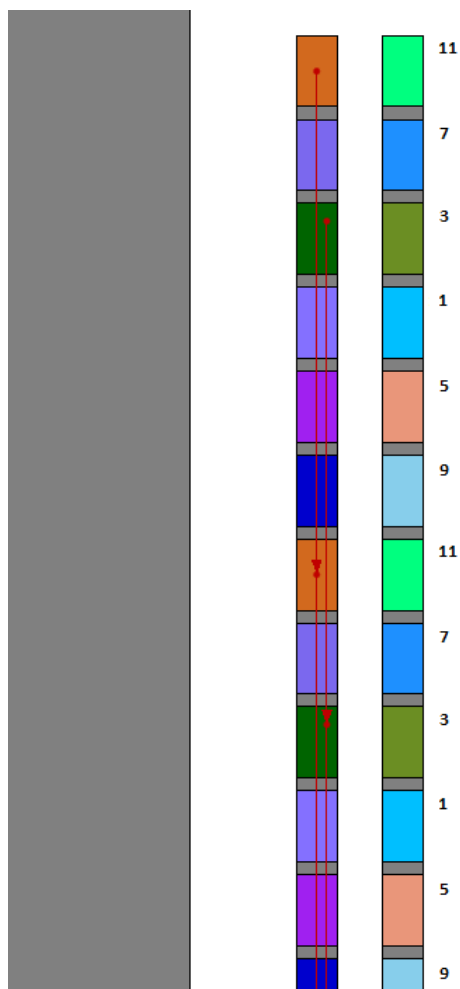
Napětíové poměry jsou zřejmé. Mezi jednotlivými závity je pouze závitové napětí. Pokud se jedná o vícevrstvou šroubovici, pak se nejčastěji vkládá izolační válec mezi jednotlivé vrstvy, jelikož mezi začátkem a koncem vinutí je velmi malá vzdálenost, ale plné fázové napětí.



obr. 11: šroubovicové vinutí – vpravo obyčejné, vlevo dvouvrstvé, vinuté šesti paralelními vodiči v axiálním směru

4.1.2 Vícechodé šroubovicové vinutí

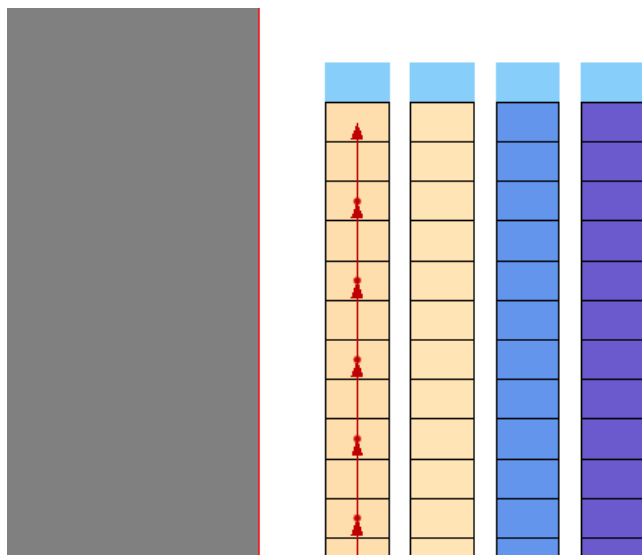
Tento typ se používá zejména pro regulační cívky vyššího napětí. U běžných výkonových transformátorů v sítích 110 kV je regulace napětí zajištěna separátním vinutím umístěným na vnějším průměru složené fáze. Vinutí obsahuje tolik chodů, kolik je regulačních kroků. Jednotlivé chody se zavíjejí na připravené pevné lepené válce a oddělují se vložkami. Mezi každým chodem vícechodé šroubovice je napětí regulačního stupně a to podél celé výšky vinutí. V praxi se takto navinuté vinutí na vstupu zapojuje takovým způsobem, aby nedošlo ke styku krajních odboček regulace mezi sousedními závitů. Tato situace je znázorněna na obr. 12.



obr. 12: dvouvrstvá dvanáctichodá šroubovice s vyznačením sledu jednotlivých chodů

4.1.3 Vrstvové vinutí

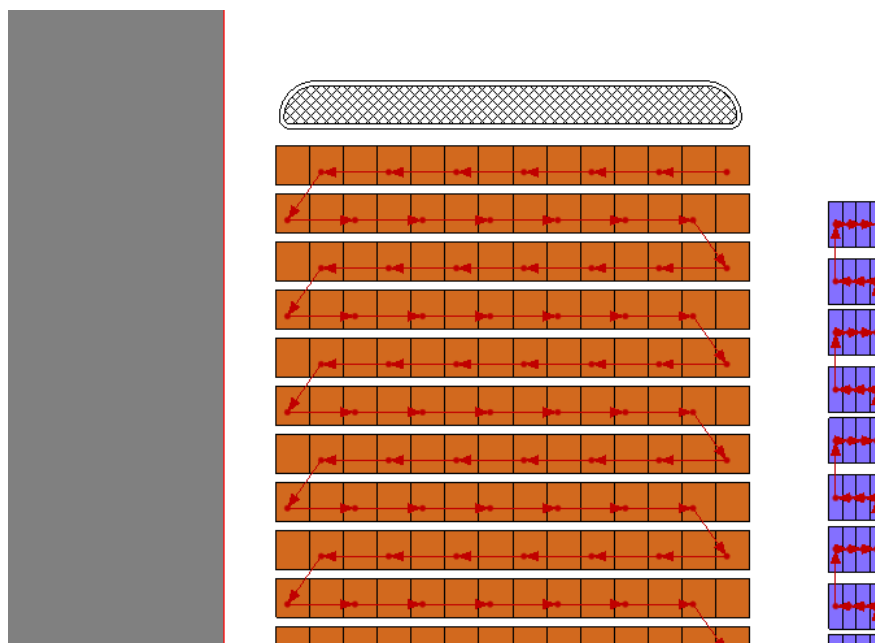
Speciálním druhem šroubovicových vinutí jsou vinutí vrstevová, která jsou obvykle vinuta bez radiálních kanálů (tj. bez vložek). Závity jsou kladeny za sebou v axiálním směru, následně dojde k přechodu do další vrstvy a pokračuje se vinutím opačným směrem. S výhodou se využívá sudého počtu vrstev tak, aby byly začátky a konce cívek ve stejné výšce (obvykle nahoře). Vrstvová vinutí jsou obvykle navrhována na nižší proudové hustoty (kvůli chlazení) a jsou využívána zejména v provozech, které disponují stabilizační vinutí. Jelikož zde nejsou radiální vložky, nesmí dojít k tomu, že hotové vinutí bude vyšší, než je navrhovaný rozměr (vlivem difuze vzdušné vlhkosti do izolačního papíru vodičů). V takovém případě by vyvstaly potíže se zalistováním horní spojky magnetické obvodu.



obr. 13: čtyřvrstvé vinutí vinuté dvěma paralelními vodiči v axiálním směru

4.1.4 Plynulé vinutí

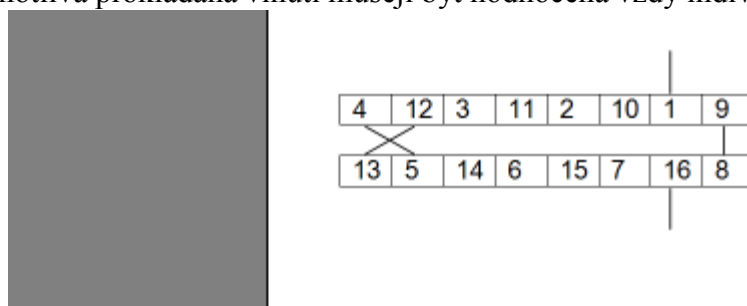
V některé literatuře též označované jako vinutí deskové. Jednotlivé vodiče jsou navíjeny v radiálním směru. Po určitém počtu závitů dojde k vyhnutí přechodu a pokračuje se navíjením další desky. Z technologického hlediska je obtížné zavíjet vodič z většího průměru na menší – tj. dovnitř cívky. Proto se v praxi první deska z dvojdesky označuje jako „navíjená“ a druhá jako „skládána“. První deska se navíjí běžným způsobem, následně se vyhne přechod a pokračuje se v navíjení na vnějším průměru cívky. Po navinutí patřičného počtu závitů jsou tyto z vnějšího průměru postupně seskládány o polohu výše a vznikne tak „skládána“ deska. Tato se následně dotáhne tak, aby byly všechny desky vinutí utaženy stejnou silou. Mezi jednotlivými závity desky je pouze závitové napětí. Ovšem mezi prvním závitem „navíjené“ desky a posledním závitem „skládané“ je napětí dvojdesky. Podobná situace nastává na vnějším průměru cívky mezi „skládanou“ a „navíjenou“ deskou. Důsledkem je periodické střídání dvojic vodičů s dvojdeskovým napětím na vnitřním a vnějším průměru vinutí. Na rozdíl od vícevrstevných šroubovicových vinutí je zde ovšem pouze jeden konec s vysokým potenciálem.



obr. 14: plynulé vinutí – vlevo vinuté dvěma paralelními vodiči v radiálním směru, vpravo obyčejné

4.1.5 Prokládané vinutí

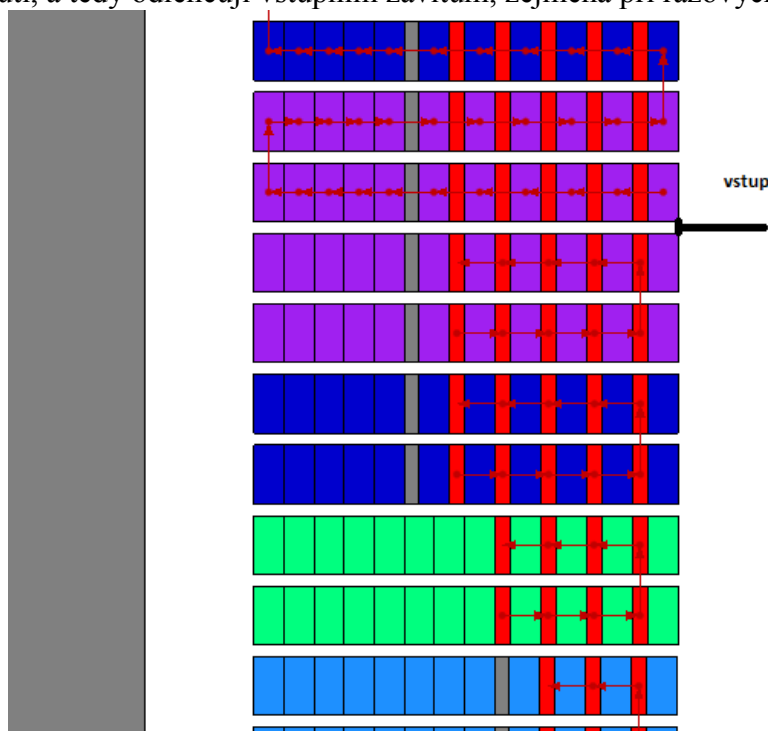
Jedná se o speciální typ plynulého vinutí, kdy je cívka navíjena dvěma vodiči, které jsou následně na vnějším průměru svařeny. Uvnitř desky nejsou jednotlivé závitě lineárně rozloženy, ale dochází k proložení jedné desky druhou tak, aby se zvýšila kapacita vinutí a došlo tak k příznivějšímu rozložení napětí podél vinutí. Zároveň dojde ke snížení napětí mezi krajními pozicemi dvojdesky. Nesetkávají se zde první a poslední závit dvojdesky, ale celkový napěťový gradient je nižší – v závislosti na konkrétních počtech závitů v desce. Prokládaných vinutí existuje mnoho typů. Jednotlivá prokládaná vinutí musejí být hodnocena vždy individuálně.



obr. 15: prokládané plynulé vinutí

4.1.6 Stíněné vinutí

Opět se jedná o speciální typ vinutí plynulého. Kromě pracovních vodičů jsou do cívky zavíjeny závity tzv. stínícího vodiče, které nejsou nikam připojeny. Slouží pouze k zrovnoměnění rozložení potenciálu na vstupu cívky. Používají se jednoduché vodiče o stejné, nebo mírně nižší výšce, než jsou pracovní vodiče avšak s minimální šířkou. Ve vstupních deskách je nejvyšší počet stínících vodičů, směrem od vstupu dále tento počet klesá. Obvykle se používá 30 – 50 % stínících závitů vzhledem k pracovním závitům v první desce. Desky se stínícími závity obsahují méně závitů pracovních. Volné mezery v radiálním směru jsou vyplňovány lepenkou. Z hlediska ideálního rozložení napětí je vhodné volit lepenkové výložky s menším radiálním rozměrem, než je šířka pracovního vodiče. Stíněná vinutí umožňují rozložit vstupní napěťový impuls dále do vinutí, a tedy odlehčují vstupním závitům, zejména při rázových zkouškách.

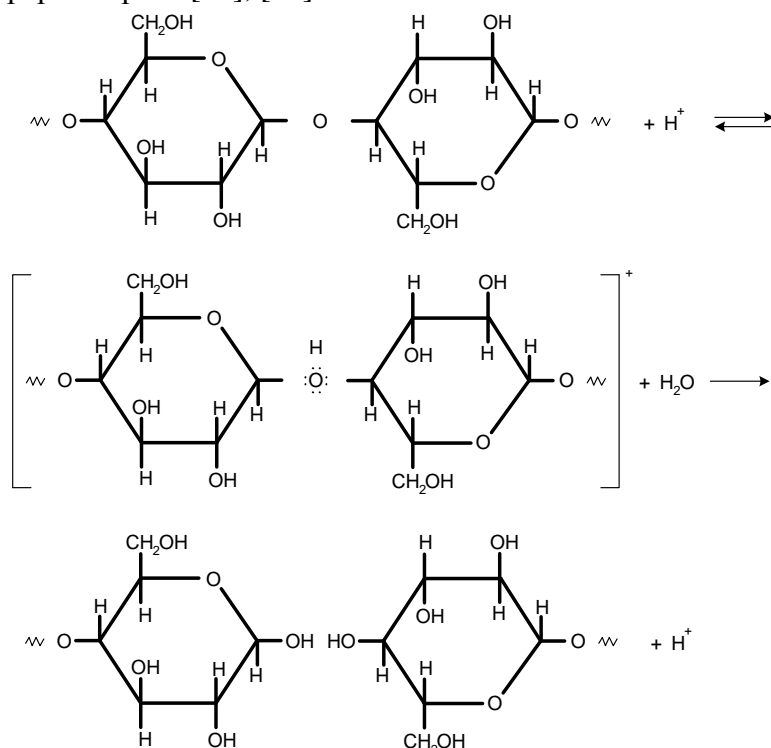


obr. 16: stíněné plynulé vinutí se vstupem uprostřed, stínící závity jsou zobrazeny červeně, lepenková výplň šedou barvou

4.2 Izolační systém transformátorů

Izolační systém výkonových transformátorů je tvořen kombinací pevné (transformátorový papír) a kapalné složky (transformátorový olej).

Účel pevné složky je zvýšení elektrické pevnosti a snížení izolačních vzdáleností. Tvoří ji řada různých materiálů na bázi celulózy. Celulóza je směs polysacharidů, kde dominantním monomerem jsou glukózy. Degradací faktory (zejména teplota [69] a kyselé prostředí [63]) způsobují štěpení dlouhých polysacharidových řetězců na menší jednotky. Nejčastěji se jedná o hydrolytický rozpad glykosidických vazeb. Reakční schéma je na obr. 17. Působením vlhkosti a kyselého prostředí, které je zajištěno degradačními reakcemi transformátorového oleje, dochází k štěpení řetězců a ztrátě mechanické pevnosti papíru. Pokud je porušeno přibližně 0,5-1 % glykosidických vazeb, nebo pokud je průměrný polymerační stupeň (PPS [64]) papíru menší než 200, tak se papír rozpadá [62], [65].



obr. 17: hydrolýza transformátorového papíru

Hydrolýza však není jedinou reakcí ovlivňující celulózu. Transformátorový papír je dále podroben oxidacím, případně síťovacím reakcím, kdy vznikají příčné vazby, avšak opět klesá mechanická pevnost jednotlivých vláken. Papír tak křehne a vlivem mechanického namáhání (dynamické účinky proudu, vibrace) se rozpadá. Právě mechanická pevnost papíru je rozhodující pro životnost celého izolačního systému. Zatímco transformátorový olej je možné v průběhu provozu regenerovat, sušit, nebo měnit, tak papírová složka definuje životnost izolačního systému. V praxi je možno vinutí transformátoru převinout a životnost stroje tak prodloužit. Ovšem tato varianta je v některých případech neekonomická, dochází proto k výměně celého stroje.

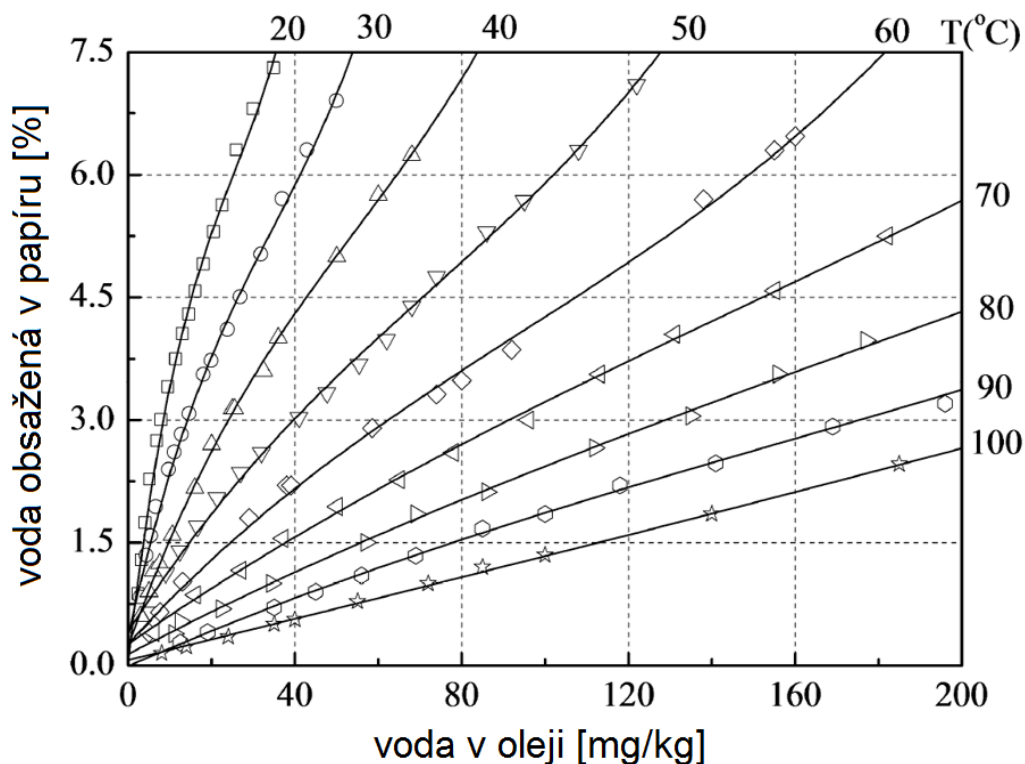
Diagnostika transformátorového papíru v provozu je velmi obtížná. Od okamžiku, kdy výrobce napustí transformátor olejem, už prakticky není možné papír vyjmout. V takovém případě by bylo nutné demontovat dilatační nádobu, přístroje a průchodky, otevřít nádobu a vyjmout magnetický obvod s vinutím. Kromě technických potíží by došlo k navlhnutí izolačního systému a bylo by nutné jej sušit. V některých případech se využívá tzv. svědečných vzorků, což jsou identické struktury jako ve vinutí, vložené do horních vrstev transformátorové nádoby (např. na horní spojku magnetického obvodu). Tyto vzorky jsou podrobeny podobnému teplotnímu namáhání jako papír horních vrstev vinutí, a jsou vystaveny stejnému chemismu oleje. Z průběhu stárnutí těchto vzorků lze proto usuzovat na stárnutí izolace vodičů ve vinutí. Svědečné vzorky zpravidla nerespektují stárnutí elektrickým polem. Tuto skutečnost je nutné zohlednit v následných analýzách.

Značné množství informací o stavu papírové složky je možné získat diagnostikou transformátorového oleje. Výhodou je možnost diagnostiky online, tedy za provozu stroje.

4.3 Vliv vlhkosti na izolační systém transformátoru

Ze zkušeností je známo, že již malé množství vody silně ovlivňuje parametry izolačních kapalin, zejména na ropné bázi. V transformátorech se vlhkost objevuje ve třech podobách, a sice jako voda volná, emulgovaná, či vázaná.

V reálných provezech v transformátorech vždy nějaká vlhkost obsažena je. Pokud je jí minimální množství, jedná se o vodu vázanou. Tato vlhkost se v závislosti na teplotě neustále přesouvá mezi pevnou a kapalnou složkou izolačního systému. S rostoucí teplotou se vlhkost přesouvá do kapaliny. Tento jev je ilustrován na obr. 18



obr. 18: poměr vlhkosti v pevné a kapalně složce izolačního systému olej-papír v závislosti na teplotě [102]

V tradičně používaných elektroizolačních kapalinách na minerální bázi se jedná o maximálně desítky ppm. Pokud je těchto molekul příliš velké množství, dochází k vyloučení vlhkosti v objemu elektroizolační kapaliny, která je již nasycená a není schopna větší množství vody přijmout. Jednotlivé molekuly vody se shlukují a vytváří tzv. vodu emulgovanou, kdy se v objemu elektroizolační kapaliny pohybují mikroskopické vodní kapky. Tato vlhkost je zejména nebezpečná z hlediska elektrického průrazu, jelikož vlivem polárního charakteru vytváří vodivé můstky v nepolárním oleji a dává vzniknout výbojovým kanálům. Volná voda je termín, který popisuje molekuly vody, které se shlukují do formy makroskopických kapek na dně transformátorové nádoby, nebo na rozhraní oleje a vzduchu v dilatační nádobě. Tato vlhkost se přímo degradačních procesů neúčastní.

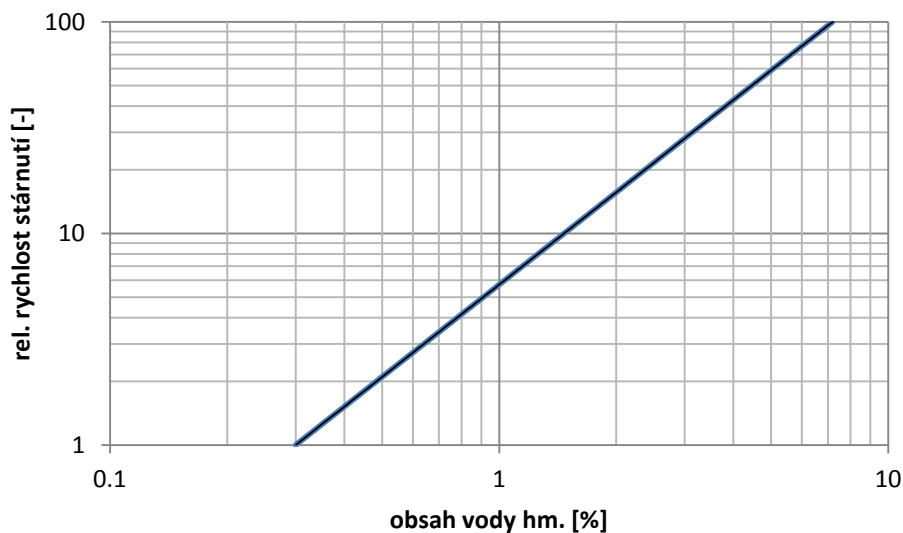
Emulgovaná, či volná voda v transformátorech je zcela nežádoucí a u zodpovědně provozovaných transformátorů se prakticky nevyskytuje. Přítomnost emulgované, či volné vody za provozu transformátoru je akceptovatelná pouze ve zvláštních aplikacích, jako jsou např. velmi staré, nízkonapěťové transformátory.

Vlhkost negativně ovlivňuje řadu diagnostických parametrů měřených na výkonových transformátorech – typicky průrazné napětí a ztrátový činitel oleje. Dále snižuje zapalovací napětí částečných výbojů a v důsledku zvyšuje relativní rychlost stárnutí izolačního systému. Tuto relativní rychlost stárnutí lze pro systém olej-papír vypočítat pomocí vztahu (5), [108]:

$$k = 5,72 \cdot w^{1,45}, \quad (5)$$

Kde: k [-] je relativní rychlost stárnutí

w [%] je hmotnostní poměr vlhkosti v izolačním systému



obr. 19: vliv obsahu vody v papíru na relativní rychlost stárnutí elektroizolačního systému olej-papír [108]

S přítomností vlhkosti v izolačním systému olej-papír roste riziko geneze plynových bublin při vysokých hodnotách celkového obsahu rozpuštěných plynů. Při významném obsahu vlhkosti operátoři často omezují povolené zatížení transformátorů za účelem snížení teplotních spádů ve vinutí. Zejména v poslední době je vliv vlhkosti na životnost izolačního systému transformátorů studován [81]. Působením vlhkosti dochází též k degradaci pevné složky izolačního systému, příkladem může být hydrolýza celulózových molekul – viz obr. 17. Degradační reakce pevné složky izolačního systému transformátoru jsou obvykle doprovázeny tvorbou molekul vody, která působí katalyticky pro další degradační mechanismy a dochází tak k uzavření kladné zpětné vazby.

Kromě degradačních reakcí se vlhkost do transformátorů dostává přes těsnění na armaturách a též přes vysoušeče, přes které se kompenzují objemové změny vlivem teplotní roztažnosti oleje.

Při výrobě transformátoru jsou všechny izolační prvky a součásti pečlivě sušeny, včetně olejové náplně. Nejčastěji jsou aktivní části před finální montáží sušeny v kerosinových parách. Jedná se o složitý technologický proces, kdy za zvýšení teploty a sníženého tlaku jsou do sušící komory vstříkovány kerosinové páry, na které se váže odpařená vlhkost obsažená v celulózových izolačních prvcích. Technologie sušení jsou zpravidla součástí know-how transformátorových výrobců a tak bližší podrobnosti nebývají veřejně publikované. Po vysušení se aktivní část transformátoru ukládá do nádoby, která se následně vakuuje a plní vysušeným olejem.

4.3.1 Měření vlhkosti olejové náplně transformátorů

Vlhkost v transformátorech je měřena několika způsoby. Nejčastěji užívaný způsob je titrace dle Karl-Fischer [82]. Je to laboratorní metoda používaná off-line, která spočívá v analýze vzorků odebraných definovaným způsobem (ČSN EN 60567) z transformátorů za provozu. Jedná se o reakci vody s titračním činidlem obsahujícím jód a oxid siřičitý. Reakce probíhá v roztoku methanolu a báze (RN-pyridin, imidazol, ad.). Tato metoda je coulometrická a výsledek je uváděn v hmotnostních jednotkách mg vody na litr transformátorového oleje.

Dále je možné měřit vlhkost on-line pomocí senzorů umístěných v armaturách chladičského systému. Nevýhodou je závislost na proudění oleje. Tato metoda je vhodná pro transformátory s nuceným chlazením (např. OFAF), kdy čerpadla zajišťují stálou cirkulaci oleje a tato následně neovlivňuje přesnost měření. V případě málo zatěžovaných transformátorů s přirozeným chlazením (např. ONAN), nebo v případě nevhodného umístění senzorů vlhkosti je tato informace zkreslená, případně přichází s výrazným zpožděním. Dále je nutno podotknout, že monitorováním vlhkosti oleje v nádobě transformátoru nezískáváme informaci o vlastnostech oleje v přepínacím zařízení (pokud je jím transformátor vybaven). Právě poruchy přepínače odboček jsou častou příčinou havárie transformátorů – viz závěry průzkumu spolehlivosti transformátorů, pracovní skupina CIGRÉ WG A2.37 [83]

Senzory pro měření vlhkosti on-line vyrábí například Finský výrobce Vaisala – on-line monitorovací systém MMT 330 [84]. Podobné řešení – monitoring vlhkosti Hydran M2 nabízí firma GE [85]. Tyto produkty jsou instalovány na výkonových transformátorech v ČR i v zahraničí.

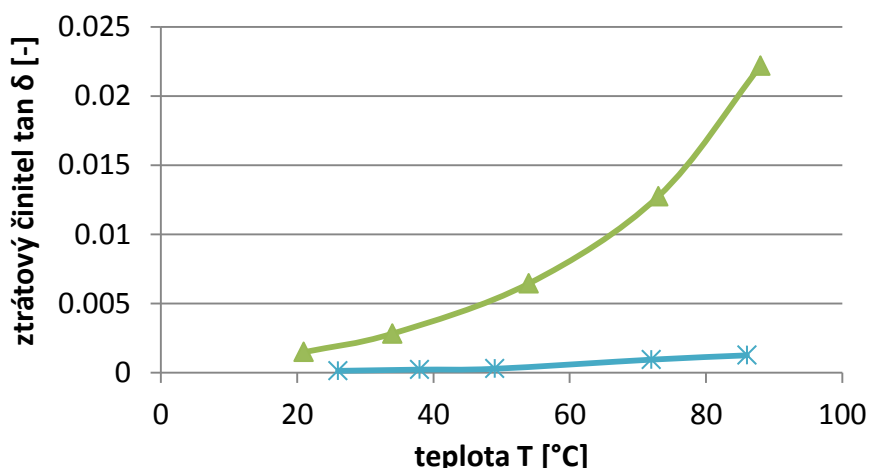
Pro off-line měření vlhkosti transformátoru na stanovišti – bez nutnosti odběru vzorků oleje je možné využít přenosné diagnostické analyzátoři izolačního systému. Tyto jsou často označovány zkratkou FDS (Frequency Domain Spectroscopy). Příkladem může být produkt IDAX 300 výrobce Megger [86]. Tyto analyzátoři se připojují přímo na průchodky zkoušeného objektu (transformátoru) a měří ztrátový činitel izolačního systému v daném zapojení v závislosti na frekvenci. Následně z tvaru a umístění křivky ztrátového činitele se určuje míra vlhkosti obsažené v papírové izolaci.

Představené metody určování vlhkosti (titrace dle Karl-Fischera, online senzorické měření a určování vlhkosti z frekvenční závislosti ztrátového činitele) samozřejmě dávají značně rozdílné výsledky [87]. Z praktického hlediska mají ovšem všechny tyto metody určité výhody a nevýhody a při dostatečné erudici experta provádějícího diagnostické šetření mají opodstatnění. Titrace dle Karl-Fischera je v dnešní době jediná standardizovaná metoda, která umožňuje přesné porovnání hodnot bez ohledu na techniku provádějícího odběr vzorků a vyhodnocení, pokud jsou dodrženy náležité postupy dané normou [82]. Tato metoda ovšem nereaguje na náhlé zvýšení vlhkosti v systému způsobeným vnějším vlivem, či degradací izolačního systému. Okamžitou reakci má naopak senzorické měření, které je v dnešní době součástí téměř všech monitorovacích systémů transformátorů. Tato měření nejsou přesná, absolutní hodnota vlhkosti není porovnatelná mezi přístroji různých výrobců ani ve srovnání s titrací dle Karl-Fischera. Ovšem lze takto získat okamžitou informaci v případě, kdy dojde k náhlému nárůstu vlhkosti a lze takto sledovat trendy díky vysoké frekvenci měření.

Poslední zmíněná metoda – FDS je relativně mladá. Využívají ji zejména provozovatelé distribučních sítí, kteří vlastní tato přenosná zařízení a provádějí diagnostická šetření na svých transformátorech během odstávek. Informaci o navlhnutí izolačního systému získají bez nutnosti vybavit každý transformátor nákladným monitoringem a zároveň tak mohou dosáhnout ekonomických úspor při omezení analýz oleje v akreditovaných laboratořích. V současné době je metoda FDS využívána paralelně s tradičními metodami za účelem vybudování znalostní databáze.

4.3.2 Porovnání minerálních a alternativních elektroizolačních kapalin z hlediska vlhkosti

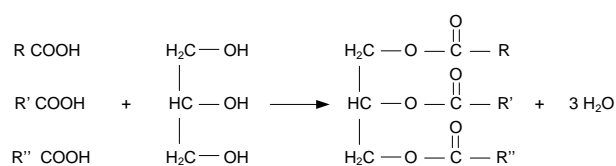
Tradičně používané minerální oleje jsou nepolární, nebo velmi slabě polární látky, vysoce hydrofobní, kde dominantním mechanismem dielektrických polarizací je elektronová polarizace. Ztrátový činitel minerálních olejů při 50 Hz je dán vodivostí a mírně roste s teplotou. V současné době jsou nasazovány alternativní elektroizolační kapaliny, zejména na přírodní bázi (rostlinné oleje), jakožto ekologicky přijatelná alternativa k minerálním olejům. Přírodní estery, na rozdíl od minerálních olejů, jsou silně polární látky, kde dominantním původcem dielektrických ztrát je dipólová polarizace. Dipólové ztráty jsou závislé na frekvenci a viskozitě kapaliny. Na rozdíl od minerálních olejů, je teplotní závislost ztrát přírodních esterů výrazně strmější.



obr. 20: teplotní závislost ztrátového činitele přírodního esteru (zeleně) a minerálního oleje (modře) ve vysušeném stavu

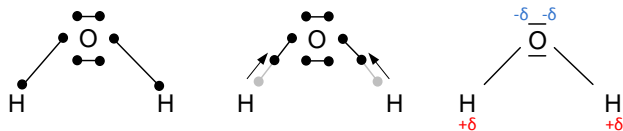
V reálných aplikacích je často mnohem důležitější hodnota permitivity, než dielektrické ztráty. Relativní permitivita přírodních esterů je zpravidla vyšší, než u minerálních olejů. Typická hodnota relativní permitivity minerálních olejů je 2,1 až 2,3, zatímco u přírodních esterů se jedná o hodnoty v rozmezí 2,5 – 3, v závislosti na složení, resp. typu původní plodiny. Permitivita přírodních esterů je bližší permitivitě celulóзовých izolačních prvků, čili elektrické pole mezi jednotlivými vinutími vychází více homogenní. Z hlediska elektrického dimenzování izolačních prvků je tento důsledek příznivější, jelikož je možné při shodných intenzitách elektrického pole využívat širší kanály, zejména přímo u vinutí.

Při hodnocení parametrů, případně souhrnného chování materiálu je vhodné vycházet z jeho struktury, která poskytuje cenné informace. Přírodní estery v transformátorových aplikacích jsou zpravidla glykolipidy vyšších mastných kyselin, jak je znázorněno na

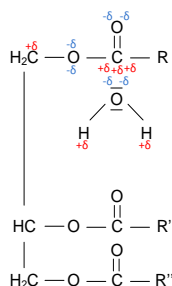


obr. 21: rovnice pro vznik triglyceridu z glycerolu a tří molekul vyšších mastných kyselin [102]

Z obr. 21 je zřejmé, že přírodní estery jsou polární molekuly. Vysoký dipólový moment má zejména vazba C-O (elektronegativita kyslíkového atomu je 3,44, zatímco elektronegativita uhlíku je 2,55). Tento dipólový moment interaguje s molekulami vody a vznikají mezi nimi přitažlivé síly, které brání snadnému vysoušení přírodních esterů. Tyto přitažlivé síly jsou znázorněny na obr. 22:

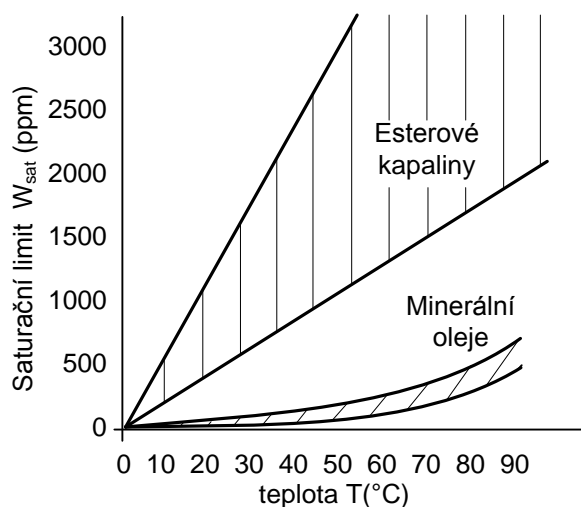


obr. 22: dipólový moment molekuly vody způsobený rozdílnou elektronegativitou kyslíku (3,4) a vodíku (2,2).



obr. 23: navázání molekul vody na molekulu triglyceridu pomocí vodíkových můstků

Vyšší absorpční schopnost přírodních esterů vede v důsledku k nižším koncentracím vlhkosti v pevné složce izolačního systému a tím zpomaluje hydrolyzu a fakticky prodlužuje životnost pevné složky. Porovnání limitů rozpustnosti vody v esterových kapalinách oproti minerálním olejům je znázorněna na obr. 24.



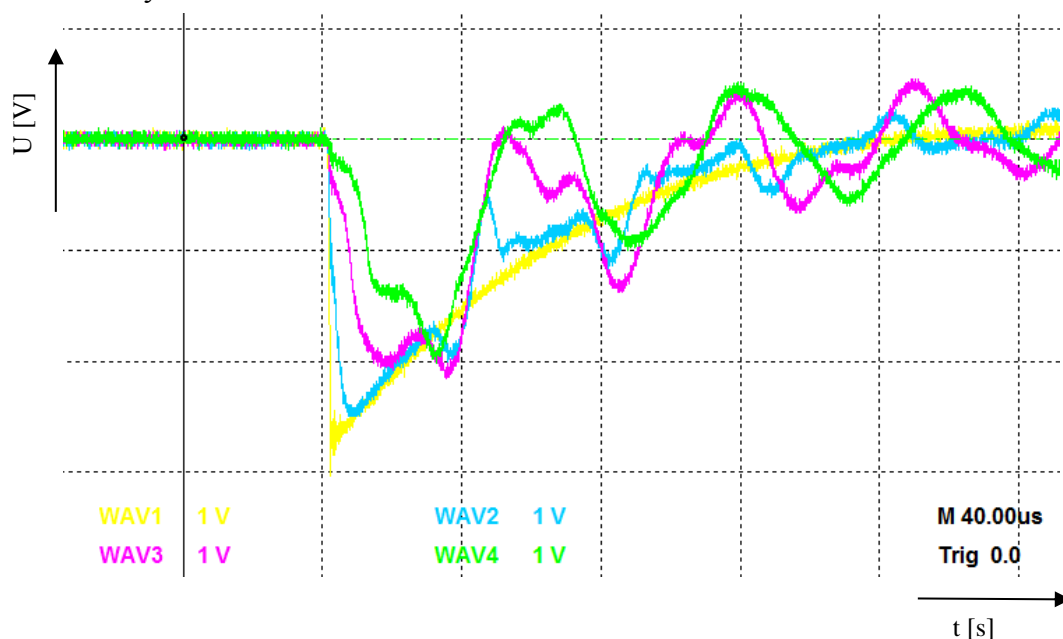
obr. 24: limity rozpustnosti vod v esterových kapalinách a minerálních olejích

4.4 Elektrické namáhání izolačního systému transformátoru

Transformátory s izolačním systémem olej-papír mohou být navrhovány a vyráběny v libovolných napěťových hladinách až po nejvyšší dosud používaná napětí. Podle napěťové hladiny je volen vhodný typ vinutí. Například pro vinutí nízkého napětí se nejčastěji využívá šroubovicový typ, kdy jsou vodiče navíjeny axiálně. Naopak vinutí vysokého napětí jsou nejčastěji deskového typu, kdy se jednotlivé vodiče navíjí radiálně a po patřičném počtu závitů se přechází do další polohy. Z hlediska elektrického namáhání je mezi typy vinutí značný rozdíl. Zatímco šroubovicové vinutí má mezi závity vždy pouze závitové napětí, u plynulých vinutí je na krajích dvojdesky plné napětí dvojdesky mezi sousedními závity.

Při analýze napěťového namáhání vinutí je nutno vycházet z napěťové hladiny a z typu vinutí. Následně lze vyhledat nejvíce namáhané místo ve vinutí a učít namáhání papíru mezi dvěma sousedními závity (resp. mezi dvěma živými částmi). Obvykle stačí analyzovat začátky a konce jednotlivých vinutí. V případě běžných provozních namáhání není předpoklad, že by na některém místě uvnitř vinutí mohlo být vyšší namáhání izolace. V případě rázových zkoušek, zejména v případě tzv. kusé vlny je ovšem nutno analyzovat celou fázi, jelikož zde dochází k oscilacím napětí, které nejsou analyticky predikovatelné. Nejvyšší namáhání je tak paradoxně v místech, která jsou za běžného provozu transformátoru nejméně citlivá.

Příklad rázového rozložení plynulého vinutí je na obr. 25. Obrázek znázorňuje osciloskopické měření - deformaci křivky napětí podél vinutí vlivem kapacitních vazeb mezi závity a deskami.



obr. 25: rázové rozložení napětí na vinutí 132 kV při aplikaci zkušební vlny LI (1,2/50 μs), žlutá křivka – zkušební impuls, modrá křivka – napětí prvního závitu desáté desky od vstupu, růžová křivka – napětí prvního závitu třicáté desky od vstupu, zelená křivka – napětí prvního závitu padesáté desky od vstupu.

Pro dimenzování izolačního systému je nutné vycházet nejen z provozního namáhání, ale též z hladin zkušebních napětí, jelikož tyto mohou zásadním způsobem omezit životnost izolačního systému. Při návrhu jsou dle dielektrických zkoušek předepsaných v příslušné normě (např. ČSN EN 60076-3) určeny napěťové poměry v jednotlivých vodičích a tyto situace případně modelovány pomocí MKP. Mezi dielektrické zkoušky patří zkouška přiloženým napětím, indukovaným napětím, zkouška fázových svorek, zkouška plnou a kusou vlnou a případně spínací vlnou. Napěťové hladiny jednotlivých testů vycházejí z nejvyššího provozního napětí daného zařízení – tj. z izolační hladiny.

Výpočet elektrického namáhání pomocí metody konečných prvků spočívá v numerickém řešení rovnice (6).

$$-\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad} \varphi) = \rho, \quad (6)$$

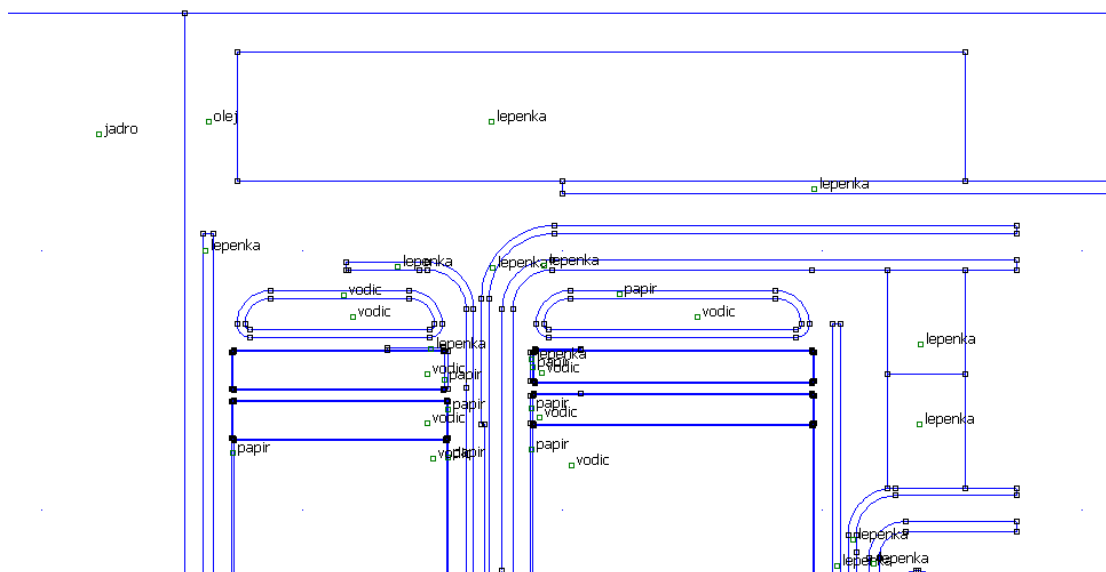
kde:

ε [F.m⁻¹] je permitivita materiálu,
 φ [V] je elektrický potenciál,
 ρ [C. m⁻³] je objemová hustota náboje.

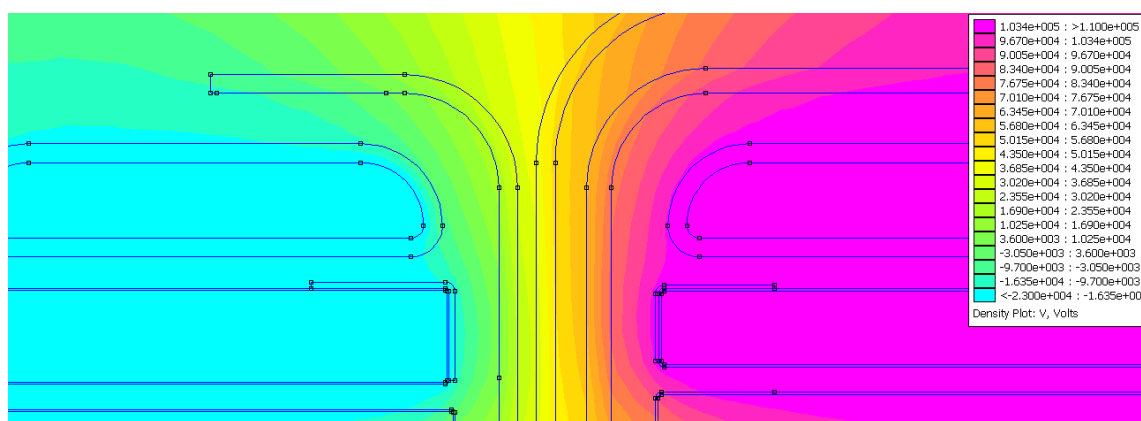
Příklad této úlohy je na obr. 26 a obr. 27. Jedná se o osově symetrické elektrostatické pole hlavního kanálu transformátoru 20 MVA, 110/23 kV v ustáleném stavu. Parametry simulace a materiálové konstanty jsou uvedeny v tab. 1.

tab. 1: parametry simulace a materiálové konstanty

Parametr	Hodnota
Potenciál prvního závitu vinutí VN	$\varphi = 110\,000$ V
Potenciál kapacitního kruhu VN	$\varphi = 110\,000$ V
Potenciál prvního závitu vinutí NN	$\varphi = 23\,000$ V
Potenciál kapacitního kruhu NN	$\varphi = 23\,000$ V
Potenciál na stěně nádoby, na kostře	$\varphi = 0$ V
Tloušťka izolačních barier, manžet a válců	$d = 4\text{mm}, d = 5\text{mm}$
Relativní permitivita transformátorového oleje	$\varepsilon_r = 2,2$
Relativní permitivita transformátorové lepenky a dřevěných izolačních struktur	$\varepsilon_r = 4$
Relativní permitivita izolace vodičů	$\varepsilon_r = 3,8$



obr. 26: výřez modelu drážního transformátoru 20 MVA, 110 kV



obr. 27: výřez modelu drážního transformátoru 20 MVA, 110 kV – rozložení napětí v hlavním kanálu

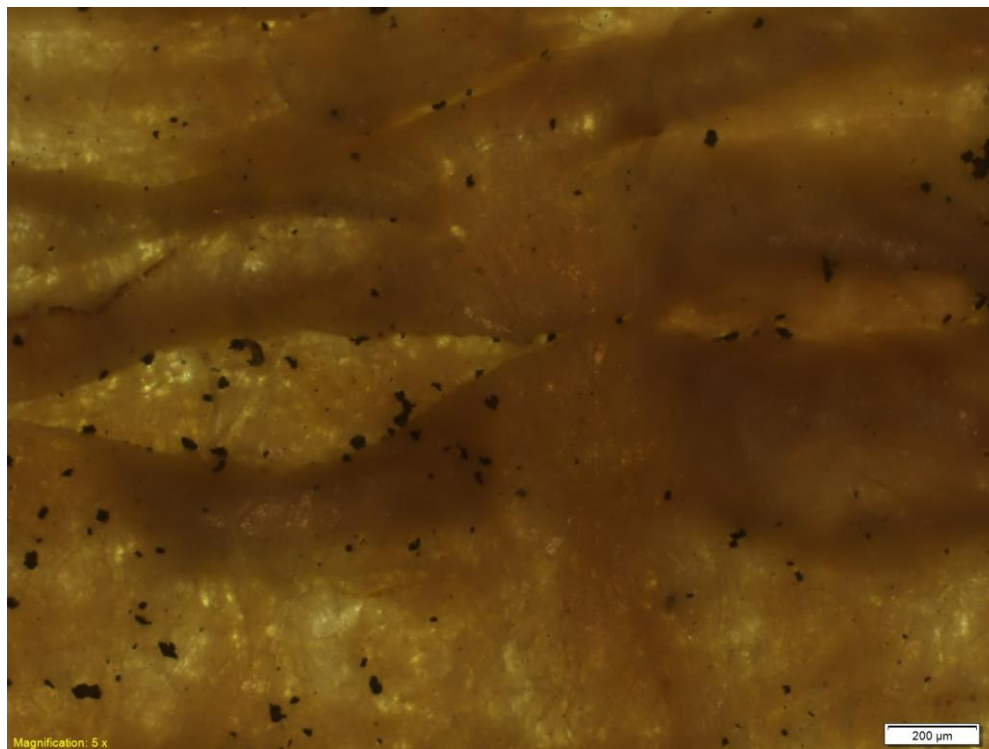
Z vypočteného modelu jsou následně určovány intenzity elektrického pole v jednotlivých izolačních prvcích – v izolaci vodičů, ve vložkách, klínech, manžetách, válcích a barierách. Tyto intenzity jsou porovnávány s povolenými hodnotami pro daný element a umístění. V tab. 2 jsou uvedeny povolené hodnoty elektrického namáhání v oleji v kanálu mezi vinutími.

Při vyšším namáhání oleje, než jsou hodnoty uvedené v tab. 2 dochází k inicializaci částečných výbojů a k tvorbě řetízků polárních částic mezi elektrodami, což následně vede k zrychlenému stárnutí, případně k poruše. Z hlediska modelování odolnosti lze tyto hodnoty chápat jako prahové (viz obr. 8). Pokud jsou v provozu překročeny tyto prahové hodnoty elektrického namáhání, dochází lokálně uvnitř dielektrika k elektro-tepelnému průrazu lokálních mikroskopických oblastí. Tyto oblasti jsou následně vyplněny degradačními produkty (vodivými) a dále snižují elektrickou pevnost materiálu.

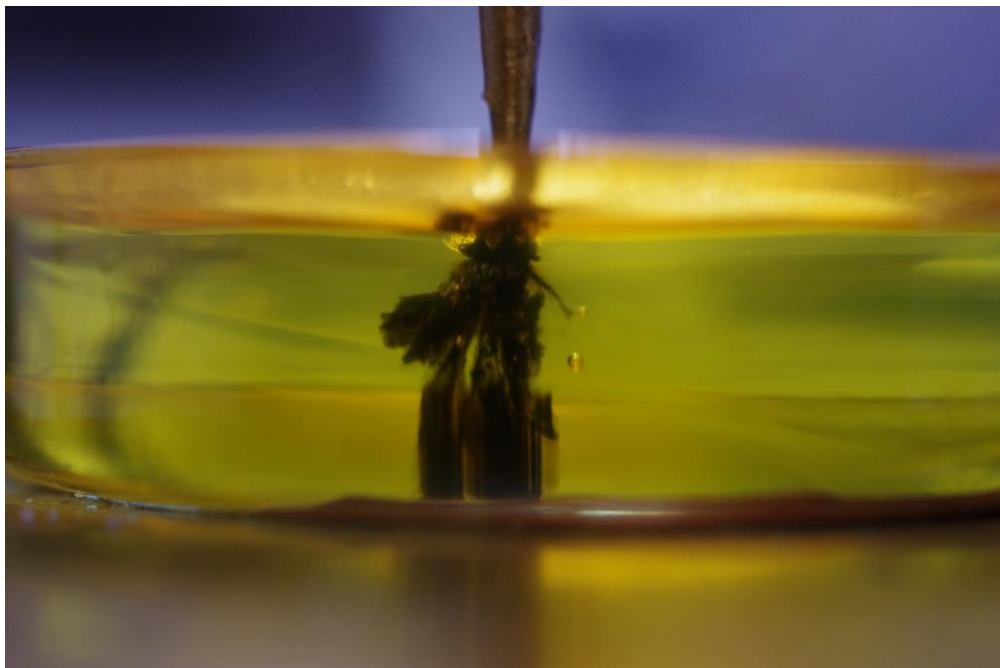
tab. 2: Povolené hodnoty intenzity elektrického pole v kanálu mezi vinutími dle metodiky Weidmann [108]

Maximální povolená intenzita el. pole E [kV/cm]				
šířka kanálu [mm]	kanál mezi vinutím a válcem		kanál mezi válci	
	čistý olej	zaplyněný olej	čistý olej	zaplyněný olej
4	105	86	129,8	110,3
5	96	80	119,6	101,5
6	91,5	75	111,9	94,8
7	86,5	70	105,8	89,4
8	82,4	67	100,7	85,1
9	79	64	96,5	81,4
10	77	61	92,8	78,3
11	74	59	89,7	75,5
12	72	57	86,8	73,1
13	70	56	84,3	70,9

Lokální průrazy (černá místa) je možné vidět na obr. 28. V průběhu stárnutí vznikají v materiálu další takto porušené lokality, případně se ty stávající zvětšují. V důsledku tento děj vede k přemostění celého průřezu izolačního systému v daném místě a tedy k průrazu mezi živými částmi.



obr. 28: expozice transformátorové lepenky intenzitě elektrického pole nad prahovou hodnotou



obr. 29: konečná fáze napěťové expozice transformátorového oleje elektrickému poli - elektrický přeskok (resp. průraz)

4.5 Teplotní namáhání izolačního systému transformátoru

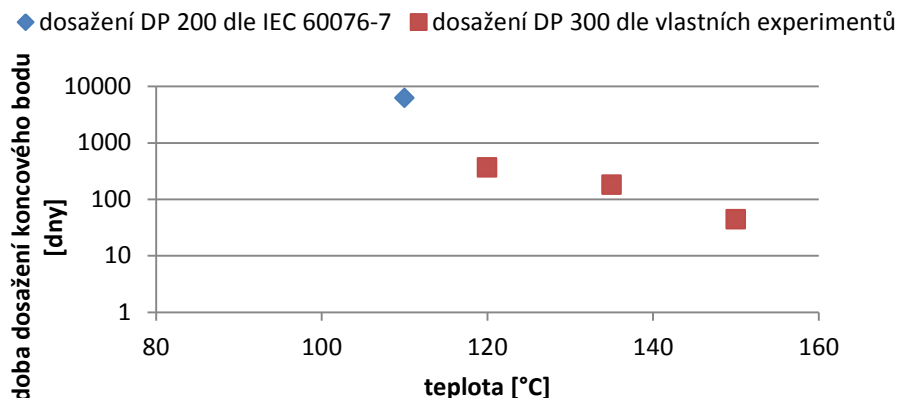
Teplota je nejvýznamnějším degradačním faktorem elektroizolačních systémů. Samotná teplota snižuje potenciálovou bariéru a dodává tak aktivační energii degradačním mechanismům. Zvýšená teplota dále působí jako katalyzátor degradačních reakcí, které působí trvalé ireversibilní změny ve struktuře izolačních materiálů. Spolu s vlhkostí a oxidací tvoří hlavní mechanismus stárnutí transformátorového papíru.

Působení teploty je na rozdíl od ostatních degradačních mechanismů neodstranitelné. Elektrické namáhání izolačního systému vychází z napěťových poměrů, které je snadné analyzovat a lze tak konstruovat zařízení s dostatečnou a predikovatelnou rezervou. Vlhkost a oxidace působící na izolační systém jsou odstranitelné pomocí vhodné diagnostiky a údržby. Ovšem teplota je úměrná zatěžování transformátoru a tedy nepřímo úměrná dimenzování materiálové náročnosti. Při zachování ekonomické udržitelnosti je proto při návrhu nutné vyšší teploty připustit. Kromě toho dochází v provozu z různých příčin ke zhoršení funkce chladicího systému, což degradační mechanismy urychluje.

Izolační systém olej-papír má zpravidla teplotní třídu Y (90°C), respektive A (105°C) v případě tepelně upraveného papíru. Při použití speciálních materiálů (např. aramidový papír + silikonové oleje) může být teplotní třída výrazně vyšší. Povolené oteplení a doby působení zvýšené teploty při přetěžování udává norma IEC 60076-2.

Pro olejové transformátory plněné minerálním olejem při ustáleném stavu a trvalém jmenovitém výkonu je povoleno oteplení horní vrstvy oleje 60 K, střední oteplení vinutí 65 K (pro transformátory s chlazením typu ON, nebo OF), respektive 70 K (pro transformátory s chlazením typu OD).

Při oteplení vyšším než je jmenovité, dochází k degradaci transformátorového papíru ve výrazně kratším čase. Například pokud zvolíme za sledovaný parametr stupeň polymerizace a jako koncový bod $DP = 300$, pak pro $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ dojde k dosažení koncového bodu přibližně za rok, pro $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ přibližně za jeden a půl měsíce.



obr. 30: teplotní závislost doby degradace transformátorového papíru pro parametr DP

4.5.1 Vnitřní systém chlazení olejových transformátorů

Izolační kapalina v transformátoru zajišťuje kromě elektroizolační též chladicí funkci. Ztráty, které vznikají zejména ve vinutí a v jádře transformátoru ohřívají olej v bezprostřední blízkosti, který vzlakovou silou stoupá vzhůru. Naopak na vnějším povrchu transformátorové nádoby (zpravidla vybavené radiátory, či chladiči) dochází k opačnému jevu, kdy olej předává teplo vnějšímu prostředí, roste jeho hustota a klesá. Tento jev se v literatuře označuje pojmem termosifonový efekt. Chladicí systém má dvě součásti – vnitřní chlazení a vnější chlazení. Mezi nimi platí energetická rovnováha. Teplo, které vzniká ve vnitřním chladicím systému, je přenášeno armaturami do vnějšího systému a tam předáváno do okolí.

Způsoby chlazení a dimenzování jsou mimo rozsah této práce. Z hlediska životnosti elektroizolačních struktur je však nezbytné chápat základní principy a respektovat materiálové vlastnosti. Pokud jsou využity alternativní kapaliny (např. přírodní estery), je nutné vnitřní chladicí systém podrobněji analyzovat. Obvykle nejsou zásadní rozdíly mezi minerálními oleji a přírodními estery v tepelné kapacitě a koeficientu přestupu tepla. Ovšem zásadní je rozdílná viskozita těchto kapalin, zejména při nízkých teplotách, kdy je chladicí funkce přírodních esterů silně omezena. Kromě toho se s rostoucí viskozitou mění charakter proudění z turbulentního spíše k laminárnímu, čili dále se zhoršuje chladicí schopnost. Problematické je zejména spínání studených transformátorů, než se olej ohřeje a jeho viskozita klesne. Při extrémně nízkých teplotách dochází k tuhnutí přírodních esterů, a tak tyto stavy musí být pečlivě sledovány, aby nedošlo k havárii stroje. V závislosti na složení dochází k tuhnutí přírodních olejů při teplotách okolo -10°C u slunečnicového oleje a -20°C u oleje řepkového [IX], [XXVII], [XLI], jakožto základních sloučenin ekologických izolačních kapalin. Samozřejmě použitím příměsí (aditiva, depressanty, ...) dochází ke změnám teploty tuhnutí, čili konkrétní rozsah použitelnosti musí být hodnocen pro konkrétní kapalinu.

Zejména vlivem rozdílné viskozity alternativních izolačních kapalin dochází k rozdílným teplotním poměrům ve vnitřním chladicím systému transformátorů. Proto je nezbytné adaptovat výpočetní modely na tyto parametry a případně modelovat teplotní pole s ohledem na reálné uspořádání a vlastnosti.

4.5.2 Modelování teplotní odolnosti

Modelování teplotní odolnosti je nejdéle známe a používané ze všech modelů odolnosti izolačních systémů. Teplotní modely lze použít pro první (nejjednodušší) přiblížení při odhadech odolnosti izolačního systému olej-papír. Prvním takovým popisem je Arrheniův zákon (7) z roku 1889.

$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{E_A}{R \cdot T}}, \quad (7)$$

kde:

$k(T)$ [s^{-1}]	je rychlost reakce,
A [s^{-1}]	je předexponenciální faktor,
E_A [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]	je aktivační energie reakce,
R [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	je univerzální plynová konstanta,
T [$^{\circ}\text{C}$]	je teplota.

V přímé souvislosti s životností transformátorů aplikoval Arrheniův zákon Montsinger - tzv. Montsingerovo pravidlo z roku 1930, které říká, že zvýšením teploty o každých osm stupňů Celsia klesá životnost transformátorového papíru na polovinu. Jedné se taktéž o exponenciální model:

$$Q = A \cdot e^{-B \cdot T}, \quad (8)$$

kde:

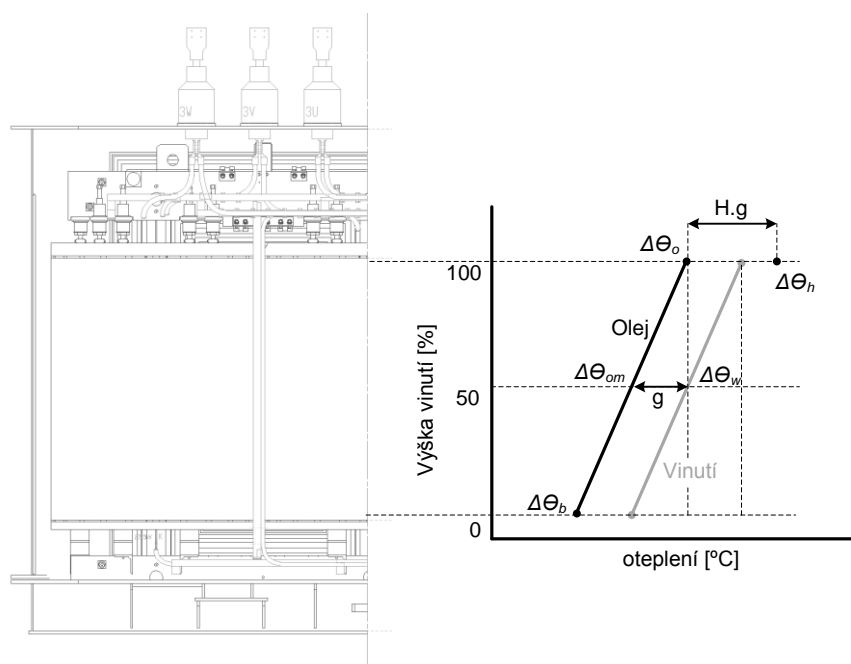
A, B	jsou experimentální konstanty,
T	je teplota.

Existuje ovšem celá řada dalších modelů pro popis odolnosti izolačních materiálů. Modely jsou vždy určitým zjednodušením skutečných podmínek, například zpravidla nerespektují nehomogenní strukturu materiálu.

Charakter degračních procesů má exponenciální rozdělení. Proto jsou modely odolnosti též exponenciální funkcí, jejichž parametry jsou těmito modely blíže určeny. Pro popis odolnosti konkrétních materiálů se využívají zkoušky zrychleného laboratorního stárnutí. V případě teplotní degradace je vhodné stárnutí s postupným proměřováním parametrů a volbou kritéria koncového bodu.

Při určování odolnosti izolačního systému je nutno vycházet z nejvíce namáhaného místa, v případě modelování teplotní odolnosti se jedná o lokalitu tzv. hot-spot teploty (viz kapitola 4.5.3). Výkonové transformátory jsou rozměrově velká zařízení. Výška olejového sloupce v nádobě může být i přes 4 metry. Při zatížení transformátoru vznikají v magnetickém obvodu a ve vinutí ztráty, které ohřívají olej a teplo jimi generované se dále šíří. Je tedy zřejmé, že se olej dle teploty vrství. Obecně lze říci, že nejteplejší olej je v horní vrstvě – tedy pod víkem transformátorové nádoby. V praxi je situace mírně komplikovanější. Vlivem různého uspořádání chladících kanálů v jednotlivých cívkách a vlivem jejich různých tepelných ztrát se při návrhu transformátoru určují teplotní spády na každém vinutí odděleně a z průtoků oleje těmito chladícími kanály se dále určuje teplota oleje, který vstupuje do chladičů. Nejteplejší místo v transformátoru je zpravidla na povrchu vodiče vinutí s nejvyšším teplotním spádem v prvních závitěch (shora). Toto nejteplejší místo se označuje termínem hot-spot a je dále používáno pro popis odolnosti izolačního systému.

Rozložení teploty v transformátorové nádobě je zobrazeno na obr. 31.



obr. 31: rozložení teplot v transformátorové nádobě, Δ značí oteplení, Θ_o [°C] je teplota oleje v horní vrstvě, Θ_w [°C] je teplota vinutí ve střední vrstvě, Θ_h [°C] je hot spot teplota, H [-] je koeficient nejteplejšího místa a g [°C] je teplotní gradient mezi teplotou vinutí a oleje při jmenovitém zatížení [59].

4.5.3 Hot-spot teplota

Teplota roste s výškou, tedy nejteplejší olej je těsně pod víkem. Nejteplejší místo v transformátoru, označované hot-spot je ovšem jinde, obvykle přímo na vodičích vinutí, protože papír působí též jako tepelný izolant a omezuje odvod tepla z vinutí. Obecně se předpokládá, že hot-spot lokalita je v horní části vinutí, avšak nemusí to tak být vždy. Výrazný vliv na umístění hot-spot lokalit má konstrukce vinutí, cirkulace izolační kapaliny a ztráty vlivem rozptylového toku. V případě deskového vinutí lze předpokládat umístění nejteplejšího místa v oblasti druhé desky odshora. K určení této tzv. hot-spot teploty je možné přistupovat v základě dvěma způsoby - měřením, nebo výpočtem.

Hot-spot teplota může být určena měřením, nebo výpočtem. Dále rozlišujeme statický a dynamický výpočet. Statický výpočet využívá jednoduché vztahy a umožňuje určit teplotu nejteplejšího místa pro konstantní zatížení. Naproti tomu dynamický výpočet se zpravidla používá pro určování hot-spot při přetěžování transformátoru, respektive pro povolené limity přetížení s ohledem na zachování spolehlivosti stroje v havarijních situacích. Oba dva způsoby výpočtu jsou standardizovány, a sice v normách IEC 60076-7, případně IEEE C57.91-2011.

Přímé měření je vždy přesnější, než výpočet, při kterém je vždy nutno zavést určitá zjednodušení. Ovšem pro přímé měření je nutno transformátor vybavit sadou čidel, která musí být konstrukčně navržena a založena do vinutí při výrobě transformátoru. Podrobnosti jsou uvedeny v kapitole 4.7.2. Naproti tomu výpočetní metody umožňují určení hot-spot teploty na všech strojích, například již dlouhodobě provozovaných.

Základem pro výpočet hot-spot teploty jsou data z oteplovacích zkoušek.

Oteplovací zkouška patří mezi standardní typové zkoušky výkonových transformátorů. Provádí se podle doporučení normy ČSN EN 60076-2. Z praktického hlediska se ve výrobním závodě provádí zkouška při zapojení vinutí nakrátko. Jinou možností je připojení vhodné zátěže k transformátoru a napájení s přibližně jmenovitým napětím a proudem. Tento postup se používá zejména u transformátorů malých výkonů. Další alternativou je vzájemné zatěžování transformátorů, které spočívá v paralelním spojení dvou transformátorů napájených jmenovitým napětím zkoušence. Jmenovitý proud zkoušence je dosažen rozdílným převodem transformátorů.

Zkouška metodou ustáleného stavu nakrátko vychází z celkových ztrát, které se vypočítají jako součet ztrát naprázdno a nakrátko. Účelem této zkoušky je zjistit:

- Oteplení horní vrstvy kapaliny a střední oteplení kapaliny v podmínkách ustáleného stavu s přihlédnutím k celkovým ztrátám.
- Střední oteplení vinutí při jmenovitém proudu střední oteplení kapaliny v podmínkách ustáleného stavu s přihlédnutím k celkovým ztrátám.
- Oteplení hot-spot vinutí při jmenovitém proudu a při oteplení horní vrstvy kapaliny v podmínkách ustáleného stavu s přihlédnutím k celkovým ztrátám.

Oteplovací zkouška se provádí dvěma metodami:

1) Pomocí celkových ztrát

Na transformátor je přivedeno jmenovité napětí a prochází jím zkušební proud o velikosti vyšší než jmenovitý. Tak je zajištěna velikost ztrát, která odpovídá celkovým ztrátám transformátoru. Provádí se kontrola teploty kapaliny a teploty chladicího média. Zkoušku je možné ukončit v případě, že rychlost změny oteplení v horní vrstvě klesne pod 1 K/h a zůstane na této hodnotě po dobu 3 hodin. Odečítají-li se diskrétní hodnoty v pravidelných intervalech pak výsledkem je střední hodnota údajů odečtených v poslední hodině. Při použití automatického spojitého záznamu se jako výsledek používá střední hodnota z poslední hodiny měření.

2) Pomocí jmenovitého proudu

Zkouška dále pokračuje s proudem sníženým na jmenovitou hodnotu při kombinaci spojených vinutí. Tato podmínka se dodržuje po dobu 1 hodiny s průběžným záznamem teploty v horní vrstvě kapaliny, teploty hot-spot vinutí (je-li měřena) a teploty vnějšího chladicího média (minimální časový interval měření je 5 min.). Po jedné hodině se změří odpory vinutí po rychlém odpojení napájecího zdroje. V případě neodpojení zdroje je výsledek možné rovněž odečíst prostřednictvím superpozice stejnosměrného měřicího proudu nízké hodnoty na zatěžovací proud vinutím.

Během oteplovacích zkoušek je měřena teplota horní vrstvy oleje $\Delta\theta_o$ pomocí senzorů umístěných v jímkách na víku transformátoru. Počet senzorů je doporučen normou dle jmenovitého výkonu transformátoru. Oteplení v horní, střední a dolní vrstvě kapaliny jsou vypočtena pomocí vztahů (1) z teplot v jednotlivých lokalitách a teploty vnějšího chladicího média na konci zkušební periody.

$$\begin{aligned}\Delta\theta_o &= \theta_o - \theta_a, \\ \Delta\theta_{om} &= \theta_{om} - \theta_a, \\ \Delta\theta_b &= \theta_b - \theta_a,\end{aligned}\tag{9}$$

Dále jsou změřeny odpory vinutí před oteplovací zkouškou (index 1) a na jejím konci (index 2). Z těchto hodnot je následně pomocí vztahu (10) vypočítána střední teplota vinutí v okamžiku vypnutí.

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1}(235 + \theta_1) - 235,\tag{10}$$

Hot-spot teplota může být během oteplovacích zkoušek měřena přímo, nebo dopočítána vztahem (11):

$$\Delta\theta_h = \theta_h + \Delta\theta_{of} - \theta_a,\tag{11}$$

kde θ_h je údaj teploty odečtený v okamžiku vypnutí, $\Delta\theta_{of}$ je pokles teploty v horní vrstvě kapaliny v průběhu 1 hodinové zkoušky při jmenovitém proudu a θ_a je teplota okolí na konci periody zkoušky s celkovými ztrátami.

4.5.4 Statický výpočet hot-spot teploty

Statický výpočet hot-spot teploty je založen na výsledcích oteplovacích zkoušek, při kterých je pro jmenovité zatížení transformátoru měřen teplotní spád oleje na chladicím zařízení. Postup výpočtu hot-spot teploty je uveden v normě ČSN IEC 60076 [59]. Vstupními parametry jsou teplota oleje v horní vrstvě a proud, kterým je transformátor v daném okamžiku zatěžován. Hot-spot teplota je pak počítána pomocí vztahů:

$$\theta_h = \theta_o + H \cdot g \cdot K^y \quad (12)$$

$$\theta_h = \theta_o + (\theta_{tw} - \theta_o) \cdot (H - 1) \quad (13)$$

kde θ_h je hot-spot teplota [$^{\circ}\text{C}$], θ_o je teplota oleje v horní části transformátoru [$^{\circ}\text{C}$], θ_{tw} je teplota horní části vinutí [$^{\circ}\text{C}$], g je rozdíl teploty vinutí a oleje při jmenovitých podmínkách [$^{\circ}\text{C}$], H je činitel nejteplejšího místa [-], y je exponent proudu v závislosti teploty na přírůstku [-], K je poměr jmenovitého a zatěžovacího proudu (činitel zatížení) [-].

Exponent y se používá v případě, že se v průběhu oteplovací zkoušky nedosáhne předepsaných hodnot výkonů nebo proudů. Norma ČSN EN 60076-2 [96] rozlišuje tři takovéto exponenty x , y , z . Kde koeficient y se přidává k poměru K , kterým se násobí střední oteplení vinutí nad střední teplotu kapaliny (obě změřené při vypnutí).

tab. 3: exponenty x , y , z pro korekci výsledků oteplovacích zkoušek, pokud nejsou dosaženy jmenovité hodnoty proudů nebo výkonů [96].

	Distribuční transformátory do 2500 kVA		Střední a velké výkonové transformátory		
	ONAN	ONAN	ONAF	OF..	OD..
Exponenty x pro střed vinutí	0,8	0,9	0,9	1	1
Exponenty y pro střed vinutí	1,6	1,6	1,6	1,6	2,0
Exponenty z pro střed vinutí	-	1,6	1,6	1,6	2,0

Činitel Hot-spot H lze určit ze vztahu (14). Pro velké transformátory je v případě běžných distribučních transformátoru 1,1 a pro velké a střední 1,3.

$$H = Q \cdot S \quad (14)$$

kde Q [-] je činitel, který souvisí s dodatečnými ztrátami a závisí na poměru mezi specifickou ztrátou v oblasti koncentrace rozptylového toku (vrchol vinutí) a střední specifickou ztrátou vinutí a S [-] je činitel respektující zvýšení gradientu středu vinutí v důsledku změny průtoku kapaliny.

Činitel Q je možno určit na základě výšky vodiče vinutí a jmenovitého výkonu pomocí exponenciálního modelu (15):

$$Q = a.e^{b.W}, \quad (15)$$

kde W [mm] je výška vodiče vinutí a koeficienty a a b jsou v následující tabulce:

tab. 4: koeficienty a a b v závislosti na výkonu transformátoru

P [MW]	a [-]	b [-]
50	0,8643	0,0298
100	0,8411	0,0376
150	0,8105	0,0476

Další možností výpočtu H v případě přímého měření hot-spot teploty několika senzory přímo ve vinutí je jako poměr gradientů dle (16):

$$H = \frac{\Delta\theta_h - \Delta\theta_{to2}}{g}, \quad (16)$$

kde $\Delta\theta_h$ je nejvyšší hodnota oteplení hot-spot změřená senzory [K], g gradient z oteplovací zkoušky rozdíl mezi střední vrstvou vinutí a oleje [°C] a $\Delta\theta_{to2}$ je oteplení v horní vrstvě oleje změřené na konci zkoušky [K].

4.5.5 Dynamický výpočet hot-spot teploty

Dynamický výpočet je založen na řešení diferenčních rovnic. Princip výpočtu je podobný jako v předchozím případě. Vstupním parametrem je kromě proudu a teploty horní vrstvy oleje také teplota okolí. Výhodou je zejména vyšší přesnost v oblasti přechodných dějů. Tento postup je doporučován současnou verzí normy ČSN IEC 60076-7 z dubna 2007.

Následující metodika je platná pro transformátory s řízeným průtokem chladicího média (OD). Pro jiné druhy chlazení (OF, ON) závisí rychlost průtoku chladicího média na teplotě a rovnice je tedy nutné řešit jako nelineární. S ohledem na zachování únosné složitosti řešení se provádí aproximace časové funkce teploty na exponenciální, jako v případě nuceného chlazení OD. Složitost řešení vyplývá ze setrvačnosti chladicí kapaliny (mechanické a zároveň tepelné). Nelineární průběh ovlivňuje pouze koncovou teplotu pro libovolnou změnu zatížení. Přesnost takovéto lineární náhrady je dle doporučení normy [93] dostatečná.

Pro teplotu horní vrstvy oleje platí:

$$\left[\frac{1+K^2R}{1+R} \right]^x \times \Delta\theta_{or} = k_{11}\tau_0 \times \frac{d\theta_o}{dt} + [\theta_o - \theta_a], \quad (17)$$

kde $\Delta\theta_{or}$ [°C] je oteplení horní vrstvy kapaliny při jmenovitých podmínkách, K [-] je činitel zatížení, R [Ω] je odpor vinutí, k_{11} je tabelovaná konstanta a τ_0 je časová konstanta oleje.

Tato diferenciální rovnice se pro snazší řešitelnost převádí na součet dvou diferenciálních rovnic ve tvaru:

$$\begin{aligned} k_{21} \times K^y \times (\Delta\theta_{hr}) &= k_{22} \times \tau_w \times \frac{d\Delta\theta_{h1}}{dt} + \Delta\theta_{h1}, \\ (k_{21} - 1) \times K^y \times (\Delta\theta_{hr}) &= (\tau_0 / k_{22}) \times \frac{d\Delta\theta_{h2}}{dt} + \Delta\theta_{h2}, \end{aligned} \quad (18)$$

kde $\Delta\theta_{hr}$ [°C] je oteplení hot-spot při jmenovitých podmínkách, k_{21} a k_{22} jsou tabelované konstanty, τ_w je časová konstanta vinutí.

Dále platí:

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_{h1} - \Delta\theta_{h2}, \quad (19)$$

Výsledná rovnice pro výpočet hot-spot teploty je:

$$\theta_h = \theta_o + \Delta\theta_h, \quad (20)$$

Analytické řešení rovnic (17), resp. (18) - (20) je možné, avšak pouze pro jednoduché případy (např. stupňovité zatížení). Jedná-li se o složitější případy, je vhodné transformovat diferenciální rovnice (17) - (20) na rovnice diferenční (21) - (24) a řešit je následně numericky. S ohledem na ustálené používání symbolu Δ pro oteplení bude v následujícím textu diferenční tvar rovnice značen symbolem D .

$$d\theta = \frac{Dt}{k_{11}\tau_0} \left[\left[\frac{1+K^2R}{1+R} \right]^x \times \Delta\theta_{or} - [\theta_o - \theta_a] \right], \quad (21)$$

$$D\Delta\theta_{h1} = \frac{Dt}{k_{22} \times \tau_w} \times [k_{21} \times K^y \times (\Delta\theta_{hr}) - \Delta\theta_{h1}], \quad (22)$$

$$D\Delta\theta_{h2} = \frac{Dt}{(\tau_0 / k_{22})} \times [(k_{21} - 1) \times K^y \times (\Delta\theta_{hr}) - \Delta\theta_{h2}],$$

$$\Delta\theta_{h(n)} = \Delta\theta_{h1(n)} - \Delta\theta_{h2(n)}, \quad (23)$$

$$\theta_{h(n)} = \theta_{o(n)} + \Delta\theta_{h(n)}, \quad (24)$$

Tento model je dále modifikován tak, aby respektoval vliv viskozity na chladicí schopnost izolační kapaliny. Viskozita olejů je při nízkých teplotách vysoká a naopak s rostoucí teplotou klesá, což umožňuje snadnější přenos tepla. Viskozita transformátorového oleje se v závislosti na teplotě mění podle vztahu (25) [99]:

$$\mu = (1,36 \times 10^{-6}) \times e^{\left[\frac{27973}{\theta_{\mu} + 273} \right]}, \quad (25)$$

kde θ_{μ} je teplota pro účel výpočtu viskozity.

Pro výpočet hot-spot teploty je za θ_{μ} dosazena hodnota θ_h .

S tím jak roste zatížení, rostou i ztráty ve vinutích, které přímo zvyšují hot-spot teplotu. Tato závislost se řídí vztahem (26) [100]:

$$P_{W,pu}(\theta_h) = P_{DC,pu} \times \left(\frac{\theta_h + \theta_k}{\theta_{hr} + \theta_k} \right) + P_{E,pu} \times \left(\frac{\theta_{hr} + \theta_k}{\theta_h + \theta_k} \right), \quad (26)$$

Kde: $P_{W,pu}$ je závislost ztrát ve vinutí na hot-spot teplotě v poměrných jednotkách,

$P_{DC,pu}$ je závislost stejnosměrné složky ztrát na teplotě v poměrných jednotkách,

$P_{E,pu}$ je závislost ztrát vířivými proudy na teplotě v poměrných jednotkách,

θ_{hr} je jmenovitá teplota hot-spot,

θ_k je korekční faktor materiál vinutí ($\theta_k = 235$ pro měď a $\theta_k = 225$ pro hliník [99]).

Na základě vztahů (25) a (26) je možné nahradit konstanty k_{21} a k_{22} (viz (22)) pomocí parametrů, které respekují viskozitu transformátorového oleje a závislost ztrát ve vinutí na teplotě.

tab. 5: modifikace vztahů (27)

Modifikace	A	B
První modifikace	θ_{hr}	θ_{or}
Druhá modifikace	$\theta_{w,AVR}$	$\theta_{o,AVR}$

kde: $\theta_{w,AVR}$ je průměrný nárůst teploty vinutí, $\theta_{o,AVR}$ je průměrný nárůst teploty oleje.

Tyto modifikace teplotního modelu jsou použity s ohledem na následující dva předpoklady. První předpoklad vychází z faktu, že senzor hot-spot teploty je umístěn v nejteplejším místě. Pak tato první modifikace používá parametry oteplení hot-spot nad úroveň teploty horních vrstev oleje při jmenovitém zatížení a oteplení horních vrstev oleje nad úroveň teploty okolí v souladu s normou. Druhá modifikace předpokládá, že čidlo hot-spot není umístěno ve skutečné nejteplejší lokalitě. Proto používá parametr průměrné oteplení vinutí a průměrné oteplení oleje.

Pro dynamický výpočet hot-spot teploty vycházejí upravené rovnice (20), resp. (24) ve tvaru:

$$D\Delta\theta_{h1} = \frac{Dt}{\tau_w} \times \left[(K^2 \times (A - \Delta\theta_{h,i}) \times P_{W,pu} \times \theta_{\mu}^v \times \Delta\theta_{h,i}) - \Delta\theta_{h1} \right], \quad (27)$$

$$D\Delta\theta_{h2} = \frac{Dt}{(\tau_0 \times \theta_{\mu}^v)} \times \left[(K^{1,3} \times (B) \times \theta_{\mu}^v) - \Delta\theta_{h2} \right],$$

$$\Delta\theta_{h(n)} = \Delta\theta_{h1(n)} - \Delta\theta_{h2(n)}, \quad (28)$$

$$\theta_{h(n)} = \theta_{o(n)} + \Delta\theta_{h(n)}, \quad (29)$$

Porovnání výše uvedených modifikací na transformátoru 40 MVA je uvedeno v [101].

Bez ohledu na volbu modelu pro výpočet hot-spot teploty je nezbytné znát některé konstanty, které je možno určit z konstrukce a výsledků oteplovacích zkoušek transformátoru. Tyto parametry (viz tab. 6) jsou nezbytné pro dynamický výpočet hot-spot teploty, tj. pro řešení rovnic (18)-(20), respektive (27)-(29).

tab. 6: nezbytné parametry pro dynamický výpočet hot-spot teploty

Parametr	Jednotka	Popis	Poznámka
x	[-]	Exponent oleje	Lze najít v normách ČSN 60076-7
y	[-]	Exponent vinutí	[96], případně IEEE C57.91-2011
k ₁₁	[-]	Konstanta	[98]
k ₂₁	[-]	Konstanta	
k ₂₂	[-]	Konstanta	
τ ₀	[min]	Časová konstanta oleje	Lze získat z oteplovacích zkoušek,
τ _w	[min]	Časová konstanta vinutí	případně v normách [96], [98]
Δθ _{hr}	[°C]	Oteplení hot-spot vinutí při jmenovitých podmínkách (ustálený stav)	Nutno získat z oteplovacích zkoušek ¹
Δθ _{or}	[°C]	Oteplení horní vrstvy oleje při jmenovitých podmínkách (ustálený stav)	
		Materiál vinutí (měď/hliník)	Nutno získat od výrobce
		Případné omezení cirkulace oleje vlivem radiálních vložek ve vinutí	transformátoru ²

¹ Tyto údaje jsou pro výpočet nezbytné. Přesné hodnoty je možné je získat pouze z kusových oteplovacích zkoušek. S omezením přesnosti výpočtu je možné využít typové oteplovací zkoušky. je nezbytné získat z oteplovacích zkoušek, případně z technické specifikace transformátoru. Pokud tyto údaje nejsou k dispozici, lze použít tabelované hodnoty, avšak přesnost výpočtu je značně omezena.

² Údaj lze získat z technické specifikace transformátoru, případně z průvodní dokumentace transformátoru. Eventuální omezení cirkulace oleje v případě promývaných plynulých vinutí je respektování zvýšením konstanty k₂₁ [96].

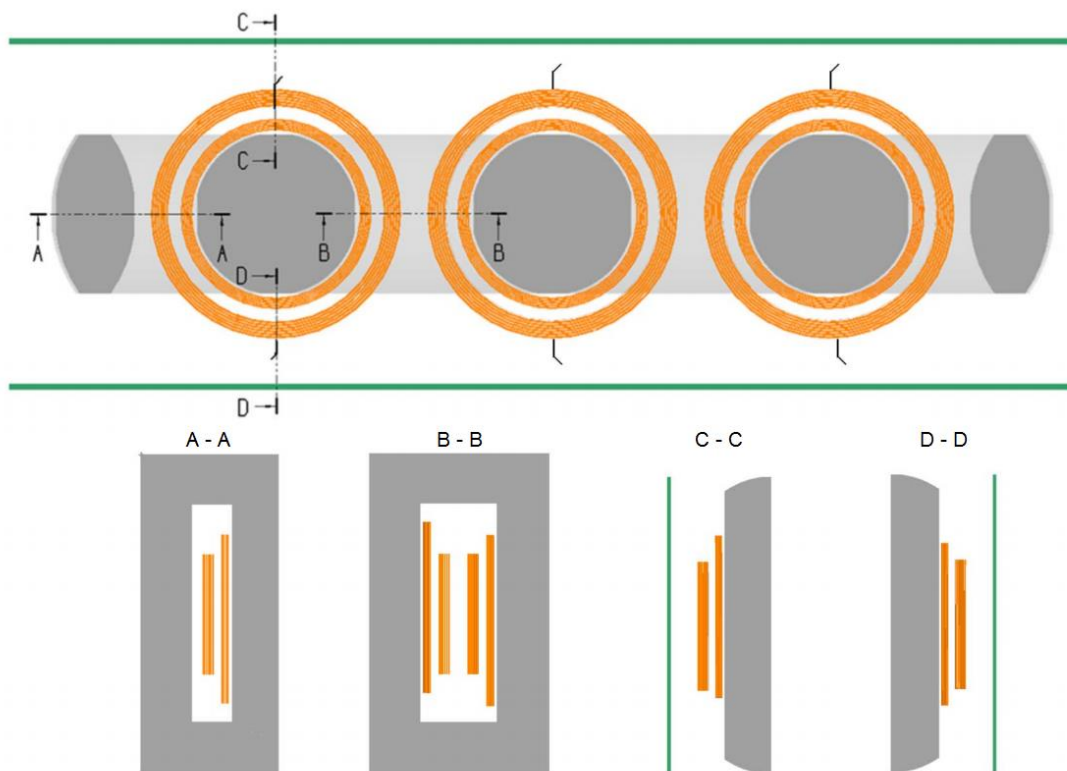
4.5.6 Praktické komplikace určování hot-spot teploty

Praktické určování hot-spot teploty je značně komplikovanější oproti výše uvedeným teoretickým postupům. U moderních transformátorových vinutí značně klesá vliv přídavných ztrát vlivem radiální složky magnetického pole. Dnešní transponované vodiče jsou oproti minulosti ztelně drobnější. Jednotlivé vodiče mají průřez i méně než 3 mm^2 . Přídavné ztráty ve vodiči, zejména na horním okraji cívky proto nejsou dramaticky vyšší, než v ostatních částech.

Zároveň jsou kontinuálně zlepšovány technologie výroby transformátorů a snižují se tak výrobní tolerance. Problémy s ucpáváním dílčích hydraulických kanálů v horní části vinutí vlivem výrobních tolerancí by se v moderních závodech v dnešní době objevit neměly.

Z tohoto důvodu jsou koeficienty hot-spot 1,3 navrženy v normě IEC 60076-2 v dnešní době přežitkem. Pro výkonové transformátory moderní konstrukce dosahuje koeficient hot-spot maximálně hodnoty 1,1.

Druhá zásadní nesrovnalost v praktickém určování hot-spot teploty je nerespektování skutečné geometrie transformátoru. Z obr. 32 je zřejmé různé geometrické uspořádání vinutí v jednotlivých řezech půdorysem aktivní části. V každém z těchto řezů jsou zcela odlišné vzdálenosti jednotlivých cívek, jádra a nádoby. V každém řezu je zcela jiné magnetické pole a tedy i přídavné ztráty vychází značně rozdílně. Mezi režimy A až D může být rozdíl přídavných ztrát vlivem radiálního magnetického pole až 40%.



obr. 32: řezy půdorysu aktivní části transformátoru – různé uspořádání vinutí, jádra a nádoby [121]

Veškeré vztahy a reference pro výpočet hot-spot teploty a oteplení uvedené dříve jsou obecně platné pro všechna vinutí. V praxi však nejsou jednotlivé cívky transformátoru zatěžovány shodně. Nejen, že se mění proudová hustota v jednotlivých režimech zatěžování transformátoru, ale mění se též v závislosti na zařazené odbočce. Navíc má zpravidla každé vinutí odlišné povrchové zatížení, a tedy i olej protékající jednotlivými vinutími má rozdílný teplotní spád. Nelze tedy mluvit o jednom „středním oleji“, který je ve výpočtu (ale i při oteplovací zkoušce) používán. V praxi je teplota horní vrstvy oleje ve vinutí mezi jednotlivými cívkami odlišná o max. 5 K. Ovšem i tento rozdíl může znamenat značnou chybu při výpočtech zbytkové životnosti.

Posledním, avšak neméně významným faktorem jsou výrobní tolerance a nedokonalosti. Ačkoliv výrobní výkresy předpokládají určité rozměry dílčích prvků, používané materiály jsou organické, a tedy i při dokonalém zpracování mají jisté proměnné vlastnosti a parametry. V praxi se jedná o velmi malé detaily, které zcela zásadně mění charakter sledovaných procesů. Například pokud vezmeme v úvahu plynulé vinutí, viz 4.1.4 a vložíme-li na horní konec vinutí izolační manžetu k vnějšímu okraji cívky (což je z hlediska elektrického dimenzování zcela běžné), dojde k redukci efektivního průřezu chladicího kanálu, jehož hydraulický odpor značně naroste a toto místo se následně hůře chladí. Tento jev ve výpočtech často není respektován.

4.6 Matematický popis stárnutí elektroizolačního systému transformátorů

Pro izolační systém olej-papír platí veškeré obecné úvahy popsané v kapitole 3. Z hlediska následné zpracovatelnosti je vhodné používat maximálně tři degradační faktory, a to teplotu, elektrické pole a vlhkost.

V případě extrémně mechanicky namáhaných transformátorů je vhodné přidat i tento degradační faktor. Jedná se například o usměrňovačové transformátory, kde jsou vysoké amplitudy vyšších harmonických složek proudu. Tyto vedou v důsledku elektromagnetických sil k vibracím vinutí, které postupně snižují mechanickou pevnost celulózových izolačních prvků.

Dalším případem, kdy je nutné respektovat vliv mechanického namáhání, jsou transformátory, které jsou vystaveny častým zkratům z principu funkce. Jedná se zejména o pecní transformátory, jejichž sekundární vinutí vedou vysoké proudy (řádově desítky kA). Zatímco životnost běžných výkonových transformátorů se pohybuje okolo 30 let, životnost velmi kvalitních pecních transformátorů bývá okolo 7 let, v závislosti na podmínkách.

Mechanické namáhání je nutné respektovat i u transformátorů, které jsou vystaveny častým zkratům, ačkoliv na ně nejsou konstruovány. Jedná se o přenosové transformátory v oblastech s náročnými přírodními podmínkami, například v jihovýchodní Asii, či jižní Americe. V těchto zemích jsou provozovány transformátory, které zaznamenají až stovky zkratů ročně. Ve střední Evropě jsou blízké zkraty na transformátorech relativně ojedinělé, jedná se o maximálně jednotky událostí za rok.

Omezíme-li model odolnosti na výše zmíněné tři faktory, lze vyjít ze základního konceptu dvoufaktorového modelu respektujícího teplotu a elektrické pole a tento následně doplnit o vliv vlhkosti.

Odolnost elektroizolačního systému je dána součinem relativní rychlosti stárnutí a doby, po kterou je izolační systém tomuto stárnutí vystaven:

$$Q = k \cdot t, \quad (30)$$

Kde: Q [r] je odolnost elektroizolačního systému

k [-] je relativní rychlost stárnutí

t [r] je doba provozu při dané rychlosti stárnutí

V praxi je zatěžování transformátorů proměnné, stejně jako okolní podmínky (teplota prostředí např.) a je tedy nutné výše uvedený vztah řešit diferenciálně:

$$\Delta Q = k \cdot \Delta t, \quad (31)$$

Následuje určení relativní rychlosti stárnutí, které bude popsáno na konkrétních modelech níže.

Jednofaktorové modely jsou samozřejmě nejjednodušší, avšak v případě transformátorů jsou často aplikovatelné. Nízkonapěťové výkonové transformátory, které jsou vyráběny v hermetizovaném provedení, mají často tak nízké elektrické namáhání, že jej není třeba uvažovat a z konstrukčního hlediska lze zanedbat i vliv vlhkosti. Zpravidla se v těchto případech používají pro určení životnosti pouze teplotní modely.

4.6.1 Jednofaktorové teplotní stárnutí

Je-li teplotní stárnutí natolik dominantní, že není nutné uvažovat ostatní vlivy, lze využít například Montsingerův model teplotní odolnosti (8) [26]:

$$Q = A \cdot e^{-B \cdot \Theta}, \quad (32)$$

kde: A , B jsou konstanty, které je nutno určit empiricky.

Ze vztahu (32) lze určit rychlost stárnutí časovou derivací:

$$k_{tep} = \frac{d(A \cdot e^{-B \cdot \Theta})}{dt}, \quad (33)$$

4.6.2 Jednofaktorové stárnutí elektrickým polem

V případě, kdy je dominantní vliv elektrického pole, například u nezátížených transformátorů (tzv. teplé zálohy), lze využít exponenciální, nebo mocninný model [26].

$$Q = a \cdot e^{-b \cdot E}, \quad (34)$$

kde: a , b jsou empirické konstanty,

$$Q = c \cdot E^{-d}, \quad (35)$$

kde: c , d jsou opět konstanty, které je nutno určit empiricky

Charakter degradace elektroizolačních materiálů elektrickým polem má exponenciální rozdělení pravděpodobnosti, tedy obecně je vhodnější volit exponenciální model. V některých případech poskytuje užší korelaci s naměřenými hodnotami model mocninný, proto je uveden též. Jedná se zejména o prvky namáhané neharmonickým elektrickým polem.

Následně lze určit relativní rychlost stárnutí opět časovou derivací. Vyjdeme-li z exponenciálního modelu, pak je vztah pro relativní rychlost stárnutí ve tvaru:

$$k_{el} = \frac{d(a \cdot e^{-b \cdot E})}{dt}, \quad (36)$$

4.6.3 Dvufaktorové stárnutí teplotou a elektrickým polem

Je-li nutné uvažovat vliv teplotního namáhání a současně vliv elektrického pole, jedná se o degrační faktory s přímou interakcí, tedy na výsledné rychlosti stárnutí se projevují oba určitou měrou separátně a zároveň v kombinaci. Obecně lze toto zapsat pomocí součtu jednotlivých relativních rychlostí stárnutí separátně a jejich kombinace, kdy každý člen je váhován ve tvaru:

$$k = \alpha_1 \cdot k_{tep} + \alpha_2 \cdot k_{el} + \beta \cdot \sqrt{k_{tep} \cdot k_{el}}, \quad (37)$$

Kde: α_1 , α_2 , β jsou váhové koeficienty

Váhové koeficienty se v těchto případech zpravidla určují empiricky, jelikož fyzikální rozbor je značně komplikovaný, zejména s přihlédnutím k nehomogenní mikrostruktuře celulósových izolačních prvků.

Případně lze využít již popsanych modelů odolnosti – např. dvufaktorový model dle Falloua (38):

$$Q_{(\theta, E)} = A_1 \cdot e^{\frac{B_1}{T}} \cdot e^{-(A_2 + \frac{B_2}{T})E}, \quad (38)$$

Kde: A_1 , A_2 , B_1 , B_2 jsou materiálové konstanty,

Podobné dvufaktorové poloempirické modely sestavilo více vědců. Modely jsou obvykle podobné, je tedy vhodné při regresních analýzách využít více modelů a vybrat ten, který nejlépe koreluje s naměřenými daty. Příkladem dalších dvufaktorových modelů jsou Simonioho model (39) a Ramuův model(40):

$$Q_{(\theta, E)} = \frac{1}{A} \cdot e^{\frac{B}{T}} \cdot e^{-(a + \frac{B}{T})(E - E_0)}, \quad (39)$$

Kde:

a , A , B jsou materiálové konstanty,

E_0 je prahová intenzita elektrického pole, pod kterou již stárnutí neprobíhá

$$Q_{(\theta, E)} = c \cdot E^{-\left(n_1 - n_2 \Delta \left(\frac{1}{T}\right)\right)} \cdot e^{-B \Delta \left(\frac{1}{T}\right)} \quad (40)$$

kde:

c, n_1, n_2, B jsou konstanty, které je nutno určit empiricky.

Tyto výše uvedené modely mají poloempirický charakter. Je zde určitý pokus o kvantifikaci fyzikálních dějů odehrávajících se ve struktuře izolačních materiálů během stárnutí, avšak konstanty modelů je nutné určit na základě experimentů - zejména zkoušek zrychleného laboratorního stárnutí.

4.6.4 Třífaktorový model

V ideálním případě jsou transformátory provozovány takovým způsobem, aby byla jejich olejová náplň suchá. V reálných aplikacích se ovšem určitá vlhkost do transformátoru dostává, případně v něm přímo vzniká vlivem rozkladných chemických reakcí. Pokud je obsah vlhkosti v transformátoru významný, je vhodné tento faktor do modelu začlenit. Zatímco jednofaktorové a dvoufaktorové modely jsou v literatuře hojně popisovány, třífaktorové modely lze nalézt pouze obtížně. Dostatečně přesný popis odolnosti je možné sestavit například pomocí Fallouova modelu, pokud jej rozšíříme o korekční faktor popsany dále, v kapitole 5.1.5.

$$Q_{(\theta, E)} = A_1 \cdot e^{\frac{B_1}{T}} \cdot e^{-\left(A_2 + \frac{B_2}{T}\right) \cdot E \cdot \frac{k_{r1} \cdot \text{tgh}(k_{r3}) + (k_{r4})}{k_{r1} \cdot \text{tgh}\left(k_{r2} \cdot \frac{W_{abs}}{a_{WT} \cdot e^{b_{WT} T} + k_{r3}}\right) + k_{r4}}}, \quad (41)$$

Kde: A_1, A_2, B_1, B_2 , jsou experimentální konstanty Fallouova modelu,

E je intenzita elektrického pole,

T je teplota,

W_{abs} je celkový obsah rozpuštěné vody,

a_{WT} a b_{WT} jsou konstanty teplotního modelu rozpustnosti vody v oleji,

konstanty k_r jsou regresní koeficienty, které budou určeny v kapitole 5.1.5.

Vlhkost obsažená v transformátorovém papíru je teplotně závislá. Ovšem vlhkost s teplotou přímo ani nepřímo neinteragují z hlediska degradačního působení.

Vzájemný vztah vlhkosti a elektrického pole je opačný. Vlhkost na elektrickém poli nijak závislá není a elektrické pole není závislé na vlhkosti. Z hlediska degradačního působení spolu tyto dva mechanismy úzce přímo interagují. Tento charakter musí být v modelu zachován.

4.7 Diagnostika transformátorů

Diagnostika transformátorů má v asset managementu nezastupitelnou roli. Poskytuje informace o stavu provozovaných strojů a o trendech vývoje jednotlivých parametrů. Tyto informace jsou nezbytné pro správné rozhodování o způsobu jak s danými zařízeními dále nakládat.

V provozu se používá mnoho různých diagnostických metod. Jejich výčet a popis je mimo rozsah této práce. Následující odstavce budou zaměřeny pouze na ty metody, které je možné používat on-line, případně na ty metody, které se provádějí off-line a jsou využitelné pro korekce životnostních výpočtů.

Následující podkapitoly nejsou kompletním a vyčerpávajícím přehledem diagnostických metod používaných pro hodnocení stavu výkonových transformátorů. Jedná se pouze o stručný výčet nejvýznamnějších metod z hlediska určování zbytkové životnosti pomocí online monitorovacích systémů.

4.7.1 Výběr diagnostických parametrů

Jednotlivé diagnostické parametry jsou na stárnutí různě citlivé. Pro praktické hodnocení zestárnutí izolačního systému je nutno vybrat a sledovat ty parametry, které se stárnutím úzce korelují a zároveň pro ně lze nalézt meze – tzv. kritériální hodnoty. Například je známo, že absorpční a resorpční proudy vlivem stárnutí rostou [26], [43], [I], [II], ale kritériální hodnoty se u nich v praxi nestanovují.

Navíc z hlediska online měření jsou možnosti dále omezené. Některé parametry jsou nedostupné z principu měřící metody (např. permitivita, ztrátový činitel, odpor vinutí, kapacita, polarizační index, ...) a některé z důvodu nepřístupu k vzorkům (strukturální metody). Naopak některé metody je možné sledovat pouze za provozu stroje (přepětí, hot-spot). V současné době se online diagnostika velmi rozvíjí a vznikají i nové přístroje a metody měření a zpracování diagnostických signálů získaných za provozu stroje.

V principu je nutné monitorovat všechny veličiny, které odpovídají degradačním mechanismům. Základní degradační mechanismy jsou teplota, elektrické pole a mechanické namáhání (vibrace). V případě transformátorů přibývá nezanedbatelný vliv vlhkosti.

Je ovšem možné z těchto charakteristik počítat izolační odpor v minutě a deseti minutách (42), případně polarizační indexy (43), u kterých se kritéria již stanovují. Tato kritéria jsou definována v doporučeních výrobců transformátorů, případně v podnikových normách provozovatelů.

$$R_{iz60} = \frac{U}{i_{60}},$$

$$R_{iz600} = \frac{U}{i_{600}},$$
(42)

kde:

R_{iz60} [Ω]	je izolační odpor po jedné minutě,
R_{iz600} [Ω]	je izolační odpor po deseti minutách,
U [V]	je přiložené napětí,
i_{60} [A]	je proud měřený po jedné minutě,
i_{600} [A]	je proud měřený po deseti minutách.

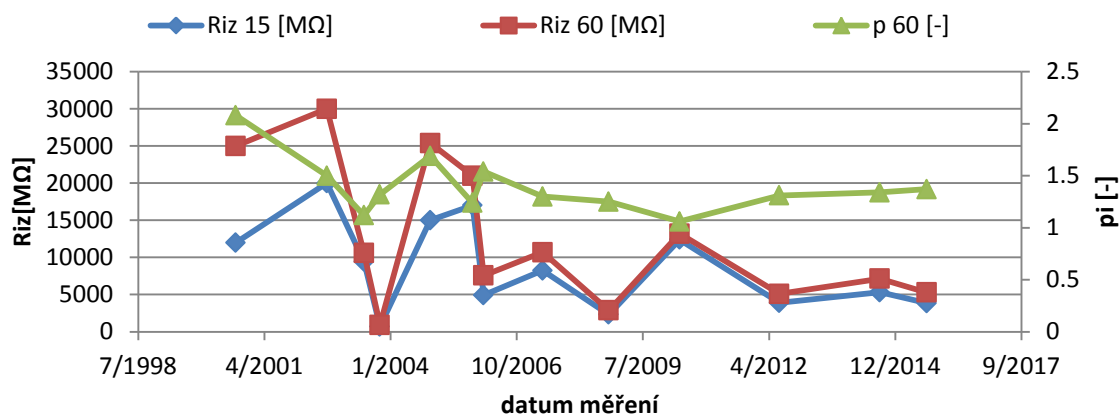
$$p_{i60} = \frac{i_{15}}{i_{60}},$$

$$p_{i600} = \frac{i_{60}}{i_{600}},$$
(43)

kde:

p_{i60} [-] je minutový polarizační index, značený též p_{i1} ,
 p_{i600} [-] je desetiminutový polarizační index, značený též p_{i10} ,
 i_{15} [A] je proud měřený v patnácti vteřinách.

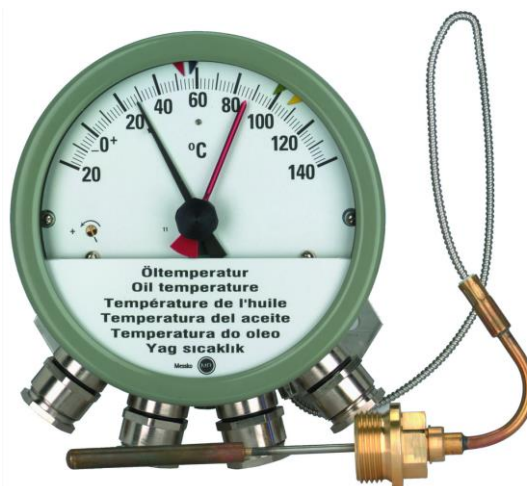
Příklad vývoje izolačního odporu a polarizačního indexu výkonového transformátoru je na obr. 33.



obr. 33: časový vývoj izolačního odporu a polarizačního indexu jednofázového blokového transformátoru 190 MVA.

4.7.2 Měření teplot

Monitoring provozních teplot je základním diagnostickým systémem výkonových transformátorů. Počet senzorů je úměrný velikosti a významu stroje. Nejčastěji jsou měřeny teploty oleje a vinutí. Teplota oleje se měří pomocí odporových teploměrů, které se umisťují do jímek na vrchu transformátorové nádoby. Součástí jímkových teploměrů jsou převodníky pro změnu odporu na proudový signál 4 – 20 mA, nebo na datový signál pro průmyslové sběrnice (RS-232, RS-485). Je-li transformátor vybaven nuceným chlazením (např. ventilátory, nebo čerpadla), obvykle se využívá teplota oleje pro spínání chlazení. Zejména pokud je transformátor osazen čerpadly, vybavuje se párem čidel na armatury chladičů (před a za chladičem) pro kontrolu správné funkce chladičového systému.

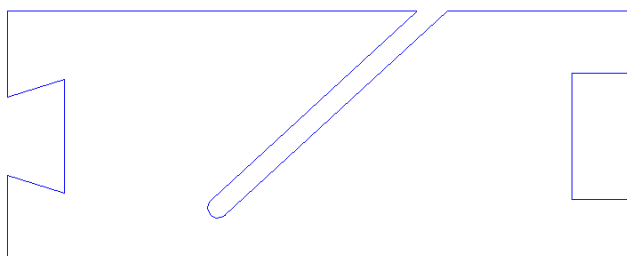


obr. 34: jímkový teploměr s indikátorem pro měření teploty oleje, převzato z [92]

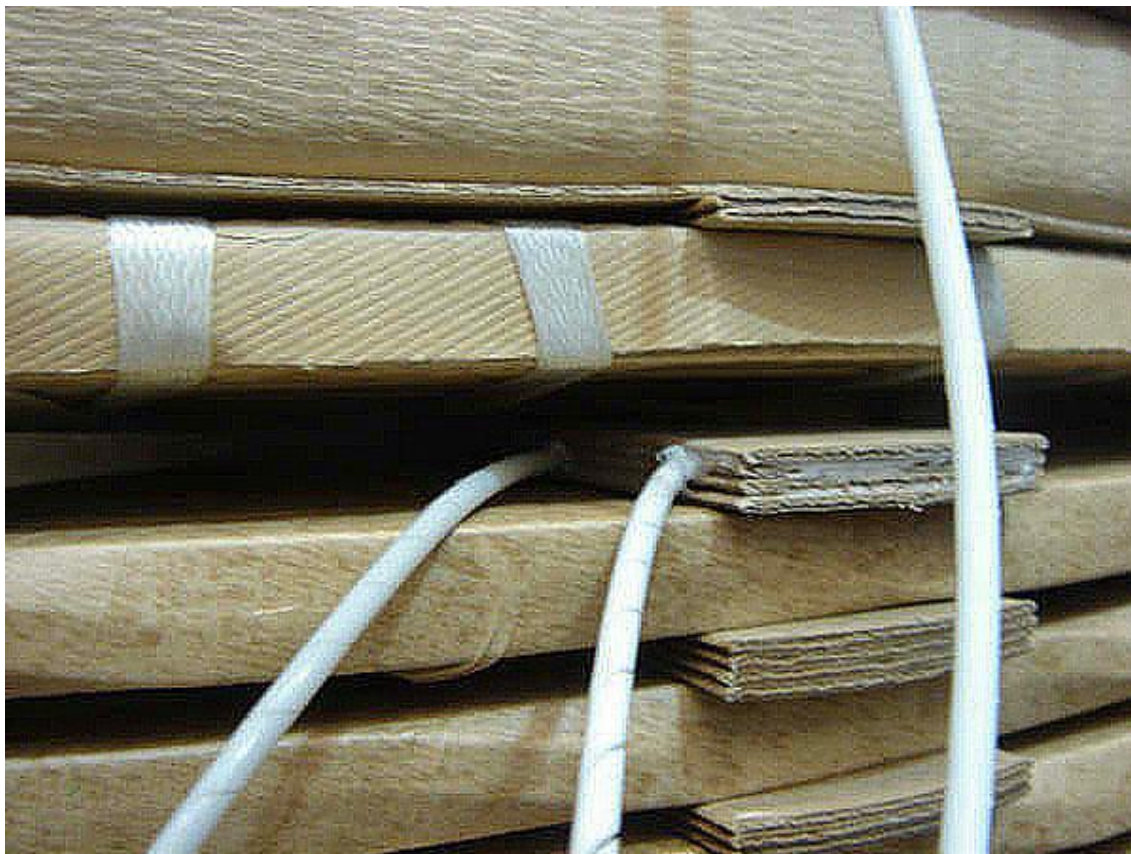
Teplota vinutí je odlišná od teploty oleje vlivem teplotního spádu na izolaci vodičů vinutí. Tato skutečnost je zřejmá z grafu na obr. 31. Teplota vinutí se v současné době nejčastěji dopočítává z teploty horní vrstvy oleje a aktuálního zatížení. Taktéž je možno teplotu vinutí dopočítat pomocí koeficientu g , který se určí při oteplovací zkoušce transformátoru ve výrobním závodě. Pomocí přepočetniho koeficientu jsou kalibrovány analogové, či digitální ukazatele teploty umístěné na nádobě transformátoru a též signály vstupující do nadřazených řídicích systémů [76], [77].

Teplota vinutí může být měřena i přímou metodou. Teplotní čidla s metalickým vedením jsou pro tuto aplikaci s ohledem vysoké intenzity elektrického pole nepřijatelná. Proto se využívají senzory, které mohou přenášet informaci o teplotě pomocí optických vláken. Přímé měření teploty vinutí optickými vlákny se používá zejména u strategicky významných transformátorů, například v jaderných elektrárnách.

Teplotní čidla jsou připojena ke konci optického vlákna (nebo vlákna sama o sobě mohou fungovat jako teplotní senzor [72], [73]) a umístěna mezi izolované vodiče a vložky vinutí. Nejčastěji se konec optického vlákna vkládá do předem vyfrézované drážky ve vložce z transformátorové lepenky (obr. 35). Zakončení optických vláken je nutné fixovat pro zabránění pohybu. Konec optického vlákna by měl být umístěn na středním průměru sledovaného vinutí. Optické signály jsou přenášeny na svorkovnici zpravidla umístěnou na víko transformátoru. Zde jsou spojky pro optická vlákna, která jsou následně vedena do ovládací skříně transformátoru a připojena k příslušným opticko/elektrickým převodníkům.



obr. 35: vložka s výběrem pro optické vlákno



obr. 36: umístění optických zakončení mezi první a druhou deskou plynulého vinutí

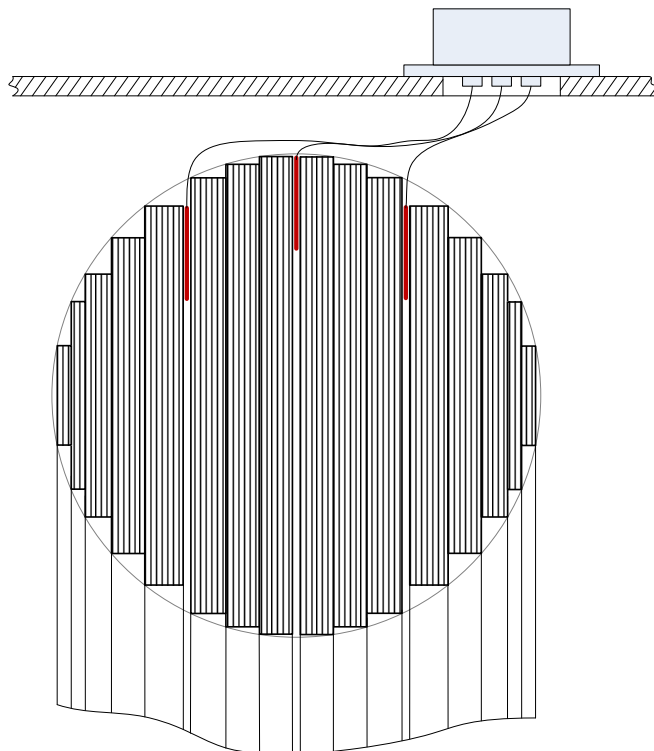
Při výrobě transformátoru se obvykle zavádí několik optických vláken mezi vinutím a svorkovnicí, avšak pro měření se využívá obvykle jen jedno vlákno na každou fázi. Během následujících prací může dojít k porušení vláken, která jsou velmi křehká, a tak ostatní vlákna slouží jako záloha.

Největší nevýhodou tohoto způsobu je nebezpečí přeskoku výboje po trase optického vlákna. Materiál optického vlákna (případně též jeho podpurné konstrukce) má jinou permitivitu než transformátorový olej a způsobuje tak lokální nehomogenity elektrického pole. Nebezpečí spočívá v hromadění náboje a riziku přeskoku podél trasy optického vlákna při vysokých rychlostech proudění transformátorového oleje. Toto musí být řešeno v rámci konstrukčního návrhu transformátoru.

Z principu je nutné umístění senzoru v horní části transformátoru, tedy blízko průchodkám. Z tohoto hlediska je vhodná konstrukce štěpeného vinutí, kdy vstup do vinutí je vyveden ve středu výšky cívky a na vrchních závitech je tak nízký potenciál [74]. Tento typ konstrukce se používá ve vinutích vyššího napětí v transformátorech na velmi vysoká napětí (220 a 420 kV v české síti). Ostatní cívky (cívka NN, případně regulační vinutí) je nutné izolovat proti optickému vláknu, aby nedošlo k přeskoku.

Ze zkušeností je známo, že v horních vrstvách vinutí může být rozdíl teplot i větší než 10°C. Měření pomocí např. 1-3 senzorů nemusí být dostatečně přesné pro určení teploty hot-spot. Je proto nezbytné najít kompromis mezi počtem čidel a ekonomicko-technologickou náročností instalace senzorů. Doporučuje se, aby byly senzory nainstalovány v každém vinutí, pro které je požadováno přímé měření hot-spot.

Kromě oleje a vinutí je zpravidla měřena i teplota magnetického obvodu. K tomuto účelu se využívají odporové platinové senzory PT 100, které se umísťují do chladicích kanálů v horní spojce magnetického obvodu, viz. obr. 37. Počet chladicích kanálů je úměrný výkonu stroje a jmenovitému sycení (obvykle 1-5 ks). Čidla se umísťují do ochranných lepenkových vložek a zasouvají do chladicího kanálu. Pro případ porušení čidla při výrobě nebo za provozu se v některých případech zdvojují.



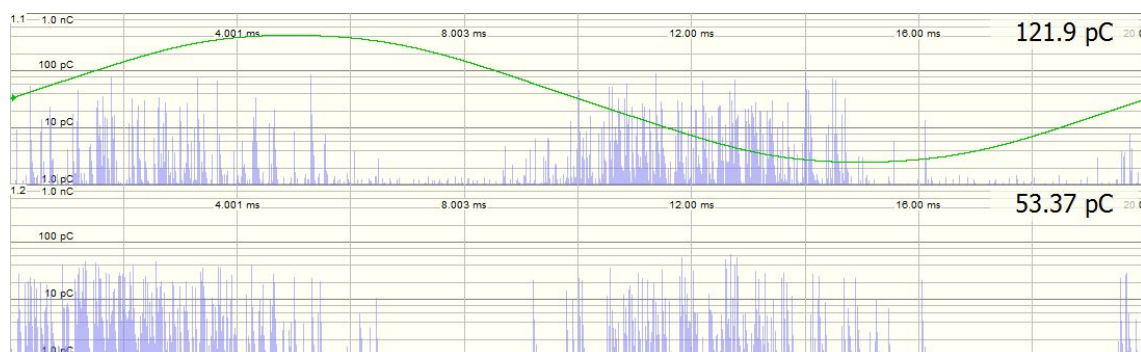
obr. 37: umístění odporových čidel pro měření teploty magnetického obvodu v chladicím kanálu

Jelikož je technicko-ekonomická životnost transformátoru v dnešní době cca 30 let a více, je rozumné při návrhu nového transformátoru využít dostupné lokality a osadit transformátor větším množstvím teplotních čidel. Během přepravy, dalších manipulací, či vlivem stárnutí dochází k poruše některých a tento diagnostický signál může být po zbylou dobu životnosti transformátoru nedostupný. Zatímco přístroje a indikátory instalované na vnější nádobu transformátoru mohou být v případě potřeby snadno demontovány a instalovány nové, výměna čidel v magnetickém obvodu vyžaduje vyjmutí aktivních částí, což je v terénu problematické.

4.7.3 Diagnostika částečných výbojů

Částečné výboje jsou důležitým diagnostickým parametrem, kterému je v provozu věnována značná pozornost. Kromě standardního testování off-line se stále více uplatňuje i online měření částečných výbojů. Izolační systém transformátorů je vystaven velmi silnému elektrickému poli. Jakékoliv drobné nehomogenity v takto silném poli způsobí významné deformace, a tím vznikají ložiska výbojové činnosti (viz např. obr. 38). V důsledku se výbojová činnost může rozvinout v trvalý průraz izolačního prvku.

Pro měření částečných výbojů v transformátorech se využívají normy IEC 60076-3, příloha A [103] a IEC 60270 [104], respektive IEEE ekvivalent [105].



obr. 38: měření částečných výbojů na transformátoru 27MVA, 66kV na hladině 104 kV. Částečné výboje byly způsobeny nehomogenitou v izolaci regulačního vývodu.

Online a off-line diagnostika částečných výbojů má zcela odlišné úlohy. Při měření částečných výbojů ve výrobním závodě během přijímacích zkoušek je nutné ověřit, zda v transformátoru žádná ložiska výbojové činnosti nejsou. Dle aktuální normy ČSN 60076-3 se stanovuje jako mezní hodnota velikost zdánlivého náboje částečných výbojů 250 pC během hodinové zkoušky. Zpravidla jsou hodnoty zdánlivého náboje částečných výbojů u nových transformátorů zanedbatelně nízké i při vyšších, než jmenovitých hladinách napětí. Pakliže jsou nějaká ložiska detekována, je nutné určit lokalitu a závažnost výbojové činnosti.

4.7.4 Olejové analýzy

Transformátorový olej je nositelem diagnostické informace o stavu transformátoru. Jelikož není možné odebírat za provozu vzorky pevné izolace, musí diagnostika získat maximum dostupných informací o pevné složce právě analýzou složky kapalné. Diagnostika olejů se provádí přibližně 1x za rok, v závislosti na významu stroje. Celá tato oblast je velmi obsáhlá, je zde proto uveden jen krátký rozbor základních úvah.

Diagnostika oleje má dva základní cíle:

- Detekovat snížení elektroizolačních schopností oleje
- Detekovat pokles kvalitativních vlastností oleje, které souvisí se zrychleným stárnutím a v důsledku při tzv. vypadnutí kalů vedou k omezení chladicí funkce transformátoru.

Základní sledované parametry při každém odběru oleje jsou uvedeny v tab. 7.

tab. 7: základní diagnostické parametry olejů

Parametr	Popis a poznámky
U_p	Průrazné napětí je základním diagnostickým parametrem elektroizolačních kapalin. Je silně závislé na teplotě, musí proto být v protokolech uváděno spolu s teplotou [109].
Množství pevných částic	Pevné, polární, nerozpustné částice se v silných elektrických polích shlukují a tvoří řetězce v místech vysokých gradientů. Jsou proto sledovány a vztahovány k hodnotě U_p
MQ_v	Obsah rozpuštěné vody je taktéž silně teplotně závislý. U studených transformátorů je většina rozpuštěné vody obsažena v papírové izolaci. Se vzrůstající teplotou postupně přechází do oleje. Pro hodnocení se využívá vlhkost vztahovaná k referenční teplotě.
MQ_p	Vysoký obsah plynů (např. vlivem výbojové činnosti) způsobuje značný

	pokles průrazného napětí.
ČK	Číslo kyselosti je základní informací o stupni zestárnutí transformátorového oleje. Rychlost růstu čísla kyselosti odpovídá rychlosti stárnutí oleje. Číslo kyselosti zpravidla rozhoduje o nutnosti regenerace olejové náplně transformátoru [113].
σ	Mezipovrchové napětí na rozhraní voda-olej je druhým zásadním parametrem zestárnutí transformátorového oleje [111].
tg δ	Ztrátový činitel zpravidla úzce koreluje s obsahem vody, pevných látek a příměsí. Zhoršování ztrátového činitele souvisí s degradací olejové náplně transformátoru. Ztrátový činitel se zvyšující teplotou roste.
ρ_{20}	Vnitřní rezistivita je závislá na vlhkosti, obsahu nečistot a stupni oxidace oleje. S rostoucí teplotou klesá.
ϵ_r	Relativní permitivita je úměrná nárůstu polárních molekul vlivem degradace transformátorového oleje. Relativní permitivita mírně klesá s rostoucí teplotou, naopak mírně roste se stárnutím oleje [112].
MQ_i	Obsah inhibitorů rozpuštěných v transformátorovém oleji. Tyto inhibitory se přidávají pro zvýšení oxidační stability, případně jako pasivátory pro omezení vlivu koroze síry. Tyto inhibitory se v průběhu času spotřebovávají a jsou při regeneraci doplněny.

Při provádění olejových analýz je zásadní správné odebrání vzorků oleje. Existuje několik možností, které jsou blíže popsány např. v [114]. Olej se odebírá do skleněných vzorkovnic (tzv. myší), nebo do injekčních stříkaček. Při odběru je důležité odpustit část oleje, který zůstává uzavřen v kapsách vzorkovacích trub uvnitř transformátoru.

Odběr vzorků se provádí za provozu transformátoru a v ideálním případě při rovnovážném termohydraulickém stavu, kvůli migraci vody mezi pevnou a kapalnou složkou. Zpravidla se současně s odběrem vzorků oleje provádí elektrická měření izolačních stavů transformátoru. Pokud jsou detekovány dramatické změny izolačních, či kvalitativních parametrů transformátorového oleje, zpravidla se provádí opětovný odběr pro omezení vlivu chybného odběru. Až při potvrzení negativních výsledků jsou prováděny další, korekční zásahy.

Vzorky oleje by měly být analyzovány co nejdříve, zejména obsah rozpuštěné vody a plynů. Při analýzách je hodnocen trend vývoje parametrů, který by měl být pozvolný, pakliže v intervalu mezi měřeními nedošlo k úpravě transformátorového oleje. Jakmile se parametry přiblíží k limitním hodnotám, příp. je překročí, je nutné olej filtrovat, či regenerovat pomocí Fullerovy hlínky.

4.7.5 Furany

Analýza furanů patří mezi off-line diagnostické metody. Během provozu transformátorů nelze odebírat pevné vzorky papíru přímo z vinutí a zkoumat stupeň jejich degradace. Je možné zkoumat pouze druhotné projevy degradace, tj. projevy, a informace, které nese olej. Furany obsažené v transformátorovém oleji jsou produktem degradačních reakcí celulózy. Jsou to chemicky stálé látky, rozpustné v izolačním oleji. Izolační prvky z celulózy se v průběhu stárnutí postupně rozpadají. Z makromolekuly molekuly celulózy se odštěpují jednotlivé glukózoové molekuly, které se případně dále štěpí na furany, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a vodu. Pravidelnými analýzami obsahu furanů v oleji lze sledovat míru degradace papírové složky izolačního systému, jelikož je mezi obsahem furanů a mírou zestárnutí úzká korelace.

Furanové analýzy je nutné provádět s jistou obezřetností. Pakliže je prováděna filtrace, či regenerace oleje, je celá furanová stopa smazaná. Druhým aspektem je globální charakter parametru. Obsah furanů dává pouze informaci o celkovém (průměrném) zestárnutí celulózy, nikoliv o míře zestárnutí nejvíce namáhaného místa.

Furany se stanovují kapalinovou chromatografií. Bližší popis je uveden například v ČSN EN 61198. V této normě jsou uvedeny následující nejvýznamnější furanické sloučeniny, které jsou kapalinovou chromatografií stanovovány: 5-hydroxymethyl-2-furfural, 2-furfurylalkohol, 2-furfural, 2-acetylfuran a 5-methyl-2-furfural. Při degradačních reakcích celulózy je nejčastějším furanickým produktem 2-furfural.

4.7.6 Průměrný polymerační stupeň DP

Jedná se o off-line diagnostickou metodu. Průměrný polymerační stupeň je fyzikálně měřitelná vlastnost papírové izolace. Vlivem degradace dochází k mechanickému rozrušování papírové izolace, což v důsledku vede k trvalému porušení a havárii izolačního systému. Průměrný polymerační stupeň vyjadřuje degradační změny v makromolekulách celulózy, ze kterých je mj. papír složen (kromě celulózy se jedná o další látky, např. hemicelulóza, lignin, ...). Obdobnou vypovídací schopnost mají jiné mechanické parametry, např. pevnost v tahu, která s průměrným polymeračním stupněm úzce koreluje. Z hlediska aplikace je však výhodnější použití DP.

Průměrný polymerační stupeň se měří a kontroluje v průběhu celého procesu výroby papíru, během výroby transformátoru a v provozu. V buničině dosahuje DP hodnot cca 1350 [88]. Vlivem mechanického rozrušování a technologických kroků při zpracování papíru dochází k výraznému snížení DP, přičemž obvyklá hodnota hotového papíru při expedici ze závodu je cca 900-1000. Nejvyšší výrobci dodávají materiál s DP až 1200.

Následně je izolační papír expedován, přičemž je vystaven degradačním vlivům (teplota, vlhkost, mechanické otřesy) a zpracováván při ovíjení vodičů, nebo v případě transformátorové lepenky až v závodě na výrobu transformátorů. Během výroby transformátorů opět dochází k degradaci, zejména vlivem teploty (sušení vinutí). Po navíjení cívek jsou ze zbytků vodičů odebrány svědečné vzorky papíru, které jsou umístěny do prodyšných sáčků a přivázány k jednotlivým cívkám tak, aby byly vystaveny stejnému degradačnímu namáhání, jako cívky samotné. Na konci výroby transformátorů jsou tyto vzorky změřeny a je určen výsledný DP při expedici transformátoru z výrobního závodu. V závislosti na mnoha dílčích faktorech (teplota, doba sušení, atmosférické podmínky, doba zpracování, ...) dojde v průběhu výroby transformátoru ke snížení DP cca o 50 – 200 jednotek.

Průměrný polymerační stupeň odebraných vzorků na konci výroby transformátoru je označen jako inherentní hodnota a následně v dalších analýzách používán pro odhad zbytkové životnosti izolačního systému, potažmo transformátoru jako celku.

Úbytek DP v čase lze popsat pomocí exponenciálního rozdělení pravděpodobnosti (viz (3) a obr. 7) vztahem:

$$DP_{(t)} = DP_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (44)$$

$DP_{(t)}$ – hodnota průměrného polymeračního stupně v čase v průběhu stárnutí

DP_0 – inherentní (počáteční) hodnota průměrného polymeračního stupně

τ – časová konstanta

Z jednotlivých měření průměrného polymeračního stupně papírové izolace lze kvantifikovat rychlost poklesu vztahem:

$$\tau = \frac{t_1}{\ln(DP_0 - DP(t_1))}, \quad (45)$$

Celá tato problematika se v praxi ještě mírně komplikuje faktem, že za provozu transformátoru není vhodné odebírat vzorky izolace přímo z vinutí (z důvodů snížení spolehlivosti). Proto se využívá tzv. svědečných, resp. integrálních vzorků, které jsou umístěny např. na nulovém vývodu. Tyto vzorky jsou degradovány pouze teplotou okolního oleje, ovšem nikoliv dielektrickými ztrátami vznikajícími za provozu stroje. Z tohoto důvodu se zavádí ještě tzv. relační koeficient, kterým se koriguje DP integrálního vzorku tak, aby výsledek byl co nejbližší stavu papíru na aktivním vinutí.

Relační koeficient je bezrozměrná veličina a jeho hodnota je obvykle v rozmezí 1 – 2. Jsou ale deklarovány případy, kdy byl určen relační koeficient menší než 1, nebo naopak výrazně vyšší. Jeho hodnota závisí na velikosti stroje (přenášený výkon), napětí, tloušťce izolace, teplotní třídě, a dalších parametrech. Určuje se empiricky na základě zkušeností expertních techniků s podobnými stroji. Blíže se této problematice věnuje Ing. Hruža a doc. Müllerová, kteří touto metodikou odhadují životnost izolačních systémů transformátorů mj. pro společnost ČEZ.

4.7.7 Hlukové analýzy.

Akustické projevy transformátoru jsou též nositeli diagnostických informací. Pokud je známa podrobná mapa akustické emise transformátoru při finálních zkouškách ve výrobním závodě, je možné tuto mapu kdykoliv následně porovnat s aktuálním provozním stavem. Pokud je mezi těmito dvěma mapami nalezen rozdíl, lze následně usuzovat na příčinu a lokalizaci eventuální progresivní poruchy. Zde lze rozlišit dvě základní kategorie hluku:

- Hluk naprázdno
- Hluk nakrátko

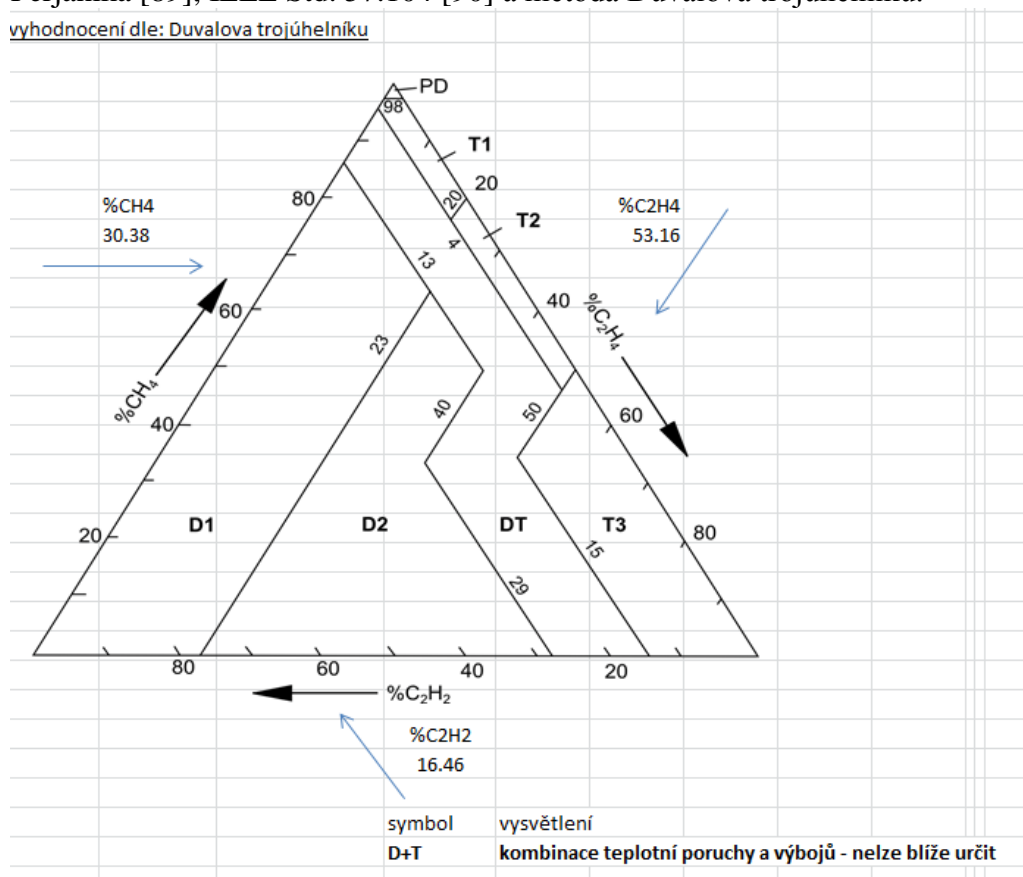
Hluk naprázdno je dán magnetostrickými plechů magnetického obvodu transformátoru. Hluk naprázdno se měří dle normy IEC 60076-10 ve vzdálenosti 30 cm od tělesa transformátoru v režimu bez chlazení a ve vzdálenosti 2m od tělesa transformátoru se zapnutými chladiči (ventilátory, resp. čerpadla – dle typu chlazení transformátoru). Pokud je znatelný rozdíl mezi hlukem naprázdno v závodě a za provozu v režimu bez chlazení, lze hledat poruchu v magnetickém obvodu (obvykle ztráta mechanické stability). Pokud je znatelný rozdíl mezi hlukem naprázdno v závodě a za provozu v režimu se zapnutými ventilátory, resp. čerpadly, lze hledat příčinu právě v chladicím systému (například opotřebením pohyblivých součástí – ložiska). Tyto dvě příčiny jsou zřetelné též ve frekvenčním pásmu, kdy porucha magnetického obvodu se projevuje zpravidla v nízkých frekvencích – základní harmonická a její násobky druhého a třetího řádu. Naopak opotřebením ložisek je obvykle charakterizováno zvýšením hluku na vysokých frekvencích bez tónové složky, nebo mimo násobky základní harmonické).

Hluk v režimu nakrátko je způsoben mechanickým chvěním vinutí, které je dále přenášeno pomocí konstrukčních částí na vnější obálku transformátoru. Současně s tím dochází též k magnetostrickci transformátorové nádoby vlivem rozptylového pole hlavního kanálu vinutí, které se přes nádobu uzavírá. Vibrace vinutí jsou ve frekvenční oblasti charakteristicky lokalizovány ve vyšších harmonických složkách. Na základě frekvenční analýzy lze proto už při orientačním měření určit pravděpodobný zdroj poruchy. Samozřejmě vyšší přesnost takovéto diagnostiky lze dosáhnout eliminací zdrojů (vhodným napájením – či buzením). V České republice se takovou provozní hlukovou diagnostikou transformátorů zabývá zejména firma Monhart Akustik [91].

4.7.8 DGA

Transformátorový olej je nositelem informace o stavu papírové izolace a o degradačních pochodech, které se v transformátoru vyskytují. Jedním z klíčových diagnostických postupů pro hodnocení stavu transformátoru je metoda DGA (Dissolved Gas Analysis), která spočívá v analýze plynů rozpuštěných v oleji. Pomocí celkové koncentrace a poměrů jednotlivých složek rozpuštěných plynů lze usuzovat na původ a význam poruchy. Nejvýznamnějšími plyny z tohoto hlediska jsou H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_3H_8 , CO_2 , CO , O_2 , N_2 . Hodnocení a kritérií je celá řada. V Evropě se nejčastěji používá metodika dle IEC 60599. Další často užívané metodiky jsou dle Rodgerse, dle Perjanika [89], IEEE Std. 57.104 [90] a metoda Duvalova trojúhelníku.

vyhodnocení dle: Duvalova trojúhelníku



obr. 39: Duvalův trojúhelník pro analýzu rozpuštěných plynů

Hodnotící metodiku je vhodné volit na základě podobné databáze strojů a poruch. Například ve společnosti ETD Transformátory a.s. byly tyto metodiky porovnány a na jejich základě byla vytvořena vlastní metodika pro hodnocení poruch, která je adaptovaná na výrobní program a konstrukční zvyklosti společnosti ETD. Vzhledem k množství provozovaných strojů a provedených rozborů lze pro dané konstrukční uspořádání vysledovat vlastní vzorce chování a provádět tak přesnější analýzy.

1) Určit zda se jedná o poruchu:			
metodika	výsledek		
BOR	ano, porucha	<input checked="" type="radio"/>	} 4 ano, porucha
D&S	ano, porucha	<input checked="" type="radio"/>	
IEEE(91)	ano, porucha	<input checked="" type="radio"/>	
ACTI	ano, porucha	<input checked="" type="radio"/>	
2) Určit typ poruchy:			
metodika	symbol	vysvětlení	
Rogers	PD2	částečné výboje, vysoká intenzita	
IEC 60599 zjednodušená	T	teplotní porucha	
IEC 60599 kompletní	PD, T1,	částečné výboje, teplotní porucha do 300°C,	
Duvalův trojúhelník	T1	teplotní porucha, lokální přehřátí o teplotě do 300 °C	
Nick Perjanik			
charakter	symbol	vysvětlení	
poruchy teplotní/výboj/částečné výboje	PD	částečné výboje	
pyrolýza nebo oblouk?	D	elektrický oblouk	
energie poruchy	E0	nízká energie	
vliv na papírovou izolaci	:-(pozor, pravděpodobné přehřívání papírové izolace	
empirická			
otázka	možnosti	výsledek	
je přítomen vodík?	<input checked="" type="radio"/> ano	Porucha pravděpodobně způsobena částečnými výboji v oleji	
je přítomen ethylén (ethen, C2H4)?	<input checked="" type="radio"/> ano	Pravděpodobně tepelná porucha v oleji, vysoké teploty	
je přítomen acetylén (ethin, C2H2)?	<input checked="" type="radio"/> ano	Pravděpodobnost jiskření a výbojů vysoké energie a teploty	
sou přítomny oxidy uhlíku (CO, CO2)?	<input checked="" type="radio"/> ano	Porucha papírové izolace	
3) Určit závažnost poruchy:			
musí být vyplněn celkový obsah rozpuštěných plynů			
metodika	výsledek		
Nick Perja	4 velmi špatný		
hodnocení 1-4: velmi dobrý, dobrý, špatný, velmi špatný			

obr. 40: vyhodnocení DGA dle orientační metodiky používané v ETD

Obecně lze říci, že všechny tyto metodiky mají shodnou základní strukturu. Nejprve se z množství rozpuštěného plynu a z denních přírůstků určí, zda se jedná o běžný provozní stav, či zda jde o poruchu. Následně se přistoupí k určení poruchy z poměrů určitých plynů. Obecně lze dedukovat z poměrů dílčích plynů některé závěry. Například přítomnost vodíku indikuje obecně degradaci izolačního systému olej-papír. Pokud je navíc přítomen metan a etan, ale eten a etin jsou v normě, lze předpokládat, že se v transformátoru objevují tzv. nízkonoenergetické částečné výboje. Typicky se může jednat o dutiny v lakem impregnovaných terciálních cívkách (nedokonalá impregnace), případně ve vzduchových kapsách v nedokonale splepených plochách. Pokud je vodík výrazně dominantní nad metanem a etanem, jedná se s nejvyšší pravděpodobností o průrazy, či obloukové výboje – tedy vysokoenergetické výboje. Pokud je energie výbojů ještě vyšší, obvykle je detekován acetylen. Podobné úvahy, včetně kvantifikace poměrů vedou poměrně spolehlivě k určení lokalizace a typu poruchy.

Po určení místa a typu poruchy následuje určení míry závažnosti poruchy. Vychází se z celkového množství rozpuštěného plynu ve vztahu k celkovému rozpustitelnému množství. V okamžiku, kdy je olej plynem plně saturován a vývin plynu pokračuje, dochází ke genezi bublin, které se vlivem elektrického pole a volného náboje na jejich povřích deformují a řetězí v místech lokální koncentrace pole. Důsledkem toho je obloukový výboj a trvalá porucha transformátoru. Obvykle je toto doprovázeno náhlým nárůstem tlaku, který pokud není zastaven vybavením Buchholzova relé, dochází k destrukci transformátoru s následným požárem. Proto, je v tomto kroku hodnoceno riziko a závažnost poruchy, obvykle s doporučením frekvence dalších odběrů

Analýza rozpuštěných plynů je velmi silnou diagnostickou metodou, ovšem vyžaduje značnou erudici hodnotícího experta. Základem je správné odebrání vzorků, používání téže metody extrakce (rack, head space, toplerova vývěva) a znalosti konstrukčního uspořádání transformátoru.

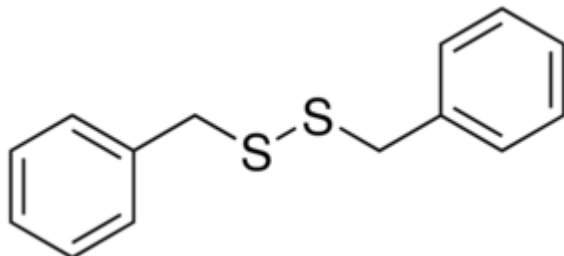
4.7.9 Korozivní síra

Jako korozivní síra se označují volné molekuly síry, nebo korozivní sloučeniny síry obsažené v transformátorovém oleji, které za běžných provozních podmínek reagují s mědí, nebo stříbrem za vzniku sulfidu mědi, resp. stříbra. Tato korozivní, či potenciálně korozivní síra se může vyskytovat v nových i provozovaných transformátorových olejích. Je proto nutné pravidelně odebírat vzorky transformátorového oleje (včetně rezervních jednotek) a provádět testy, aby byla zajištěna provozní technická bezpečnost.

Působením korozivní síry vzniká na povrchu vodičů sulfid měďnatý. Tato vodivá látka v krystalických strukturách proniká přes jednotlivé vrstvy papírové izolace vodičů a snižuje tak izolační odpor v daném souvrství. V důsledku mohou nánosy sulfidu měďnatého vést k mezizávitovému zkratu, potažmo havárii stroje.

Přepínače pod zatížením mají kvůli vyšší odolnosti postříbřené kontakty. V některých případech se využívají i stříbrné pájky pro nerozebíratelné spoje, např. spojení vývodů. Stříbro reaguje na sirné příměsi rychleji, než měď. Na povrchu postříbřených částí vznikají mechanické struktury, které se odlupují při přepínání, nebo odpadávají v důsledku vibrací a následně jsou roznášeny uvnitř transformátorové nádoby vlivem proudění oleje.

Elektroizolační kapaliny na ropné bázi tyto sírné sloučeniny často obsahují již v surovém stavu při těžbě. Síra se dále používá při zpracování ropy. Situace se navíc komplikuje, jelikož tyto korozivní sloučeniny síry mohou vznikat přeměnou původně nekorozivních v průběhu provozu transformátorů. Jednou z nejzásadnějších korozivních sloučenin síry je dibenzylsulfid, zkráceně označovaný DBDS.



obr. 41: dibenzylsulfid, jedna z nejvýznamnějších složek korozivní síry

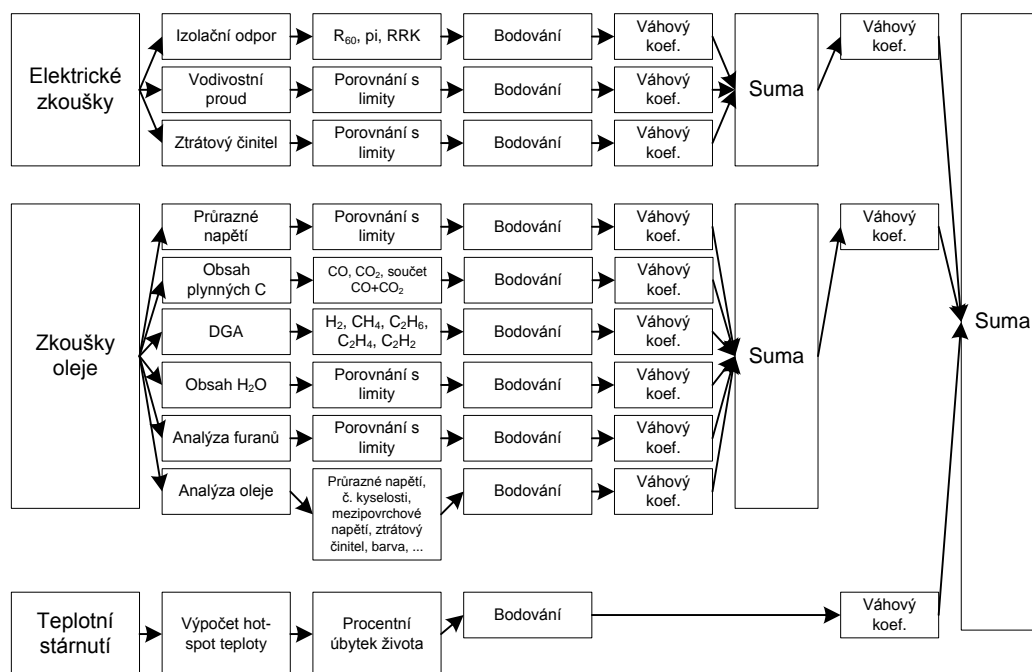
Problematika korozivní síry není zcela prozkoumána. Stále jsou vyvíjeny nové analytické metody, podle nichž je možné korozivní síru kvalitativně i kvantitativně popisovat. Zároveň s tím vznikají nové normy a předpisy v této oblasti [109].

Zásadní opatření v prevenci poruch způsobených korozivní sírou spočívá ve vyloučení DBDS. Nové minerální oleje by tuto sloučeninu neměly obsahovat. V případě, že je v oleji DBDS detekován, měl by tento olej být regenerován pomocí kolony s Fullerovou hlínkou. V některé literatuře se tento proces označuje termínem depolarizace. Po skončení regenerace oleje jsou přidávány inhibitory a pasivátory [110].

4.8 Celkové posouzení stavu izolačního systému

Abychom mohli posoudit stav izolačního systému z globálního hlediska, je nezbytné vytipovat všechny dílčí degradační mechanismy a kvantifikovat jejich působení na izolační systém. Pro dílčí prvky a materiály je možné použít vícefaktorové modely stárnutí a kvantifikovat proces stárnutí separátně prvek po prvku. Konstanty pro tyto modely lze získat buďto z fyzikálních modelů, což je přesné, avšak velmi obtížné, nebo z modelů empirických, které lze relativně snadno získat pomocí zkoušek zrychleného laboratorního stárnutí. Celkové zestárnutí může být vypočítáno použitím metodiky popsané v ČSN EN 60076-7 [59], která spočívá v určení relativní rychlosti stárnutí a následném výpočtu zbytkové životnosti.

Druhým způsobem je využití bodovacího systému, kdy jsou vytipovány základní diagnostické parametry a těmto je přiřazen určitý váhový koeficient pomocí předem dané matice. Tyto parametry jsou následně za provozu zařízení sledovány a vyhodnocovány a pomocí váhových koeficientů převáděny na sumární hodnotu a porovnávány s tabelovanými intervaly. Pro izolační systém olej-papír je příklad této metodiky uveden na obr. 42 [78].



obr. 42: celkové hodnocení izolačního systému použitím bodování nejvýznamnějších diagnostických parametrů

Jednotlivé diagnostické parametry jsou hodnoceny shodným rozpětím bodů (např. 0 až 100 bodů). Váhové koeficienty umožňují zdůraznit význam některých veličin ve výpočtu. Hodnoty váhových koeficientů jsou v intervalu (0;1) a jejich součet v příslušné skupině je 1. Tím je zajištěno, že výsledný počet bodů izolačního systému bude v témže intervalu, jako je rozpětí pro jednotlivé diagnostické parametry (pro výše uvedený příklad též 0 až 100 bodů). Tento postup umožňuje snadné porovnání jednotlivých strojů podle stavu izolačního systému přímo pomocí počtu bodů, případně stroje zařadit do definovaných kategorií [19], [78]. Příklad kategorizace je uveden v tab. 8.

tab. 8: kategorizace izolačního systému podle počtu bodů získaných metodikou na obr. 42

Stav izolačního systému	Bodové rozpětí
Velmi dobrý	75-100
Mírně zestárlý	50-75
Značně zestárlý	25-50
Kritický	0 - 25

Podobný způsob spočívá ve sledování vybraných indikátorů a jejich hodnocení. V literatuře je tato metodika označována jako health-index [118]. Indikátory mohou být jednak dílčí komponenty transformátoru, diagnostické veličin, ale například i způsob provozování. Každý sledovaný indikátor je následně násoben váhovým koeficientem podle jeho významnosti. Součet jednotlivých váhovaných hodnocení dělený maximálním bodovým rozsahem udává procentní vyjádření stavu sledovaného zařízení.

tab. 9: příklad hodnocení stavu transformátoru metodou health-index

parametr	váha 1-10	hodnocení 1-5	maximální skóre	udělené skóre
historie zatěžování	10	5	50	50
frekvence blízkých zkratů	10	4	50	40
depolymerační stupeň papírové izolace	9	5	45	45
DGA analýza oleje transformátoru	9	5	45	45
DGA analýza oleje přepínače	8	5	40	40
průrazné napětí oleje transformátoru	6	4	30	24
obsah furanů v oleji transformátoru	5	3	25	15
číslo kyselosti oleje transformátoru	4	4	20	16
mezipovrchové napětí voda-olej náplně transformátoru	4	5	20	20
kvalita oleje přepínače	4	5	20	20
stav průchodek	4	5	20	20
hladina oleje	2	5	10	10
uzemňovací soustava	2	5	10	10
koroze	2	5	10	10
stav chladicího systému	2	5	10	10
stav těsnění	1	3	5	3
suma			410	378

Health index se vypočítá podle vzorce:

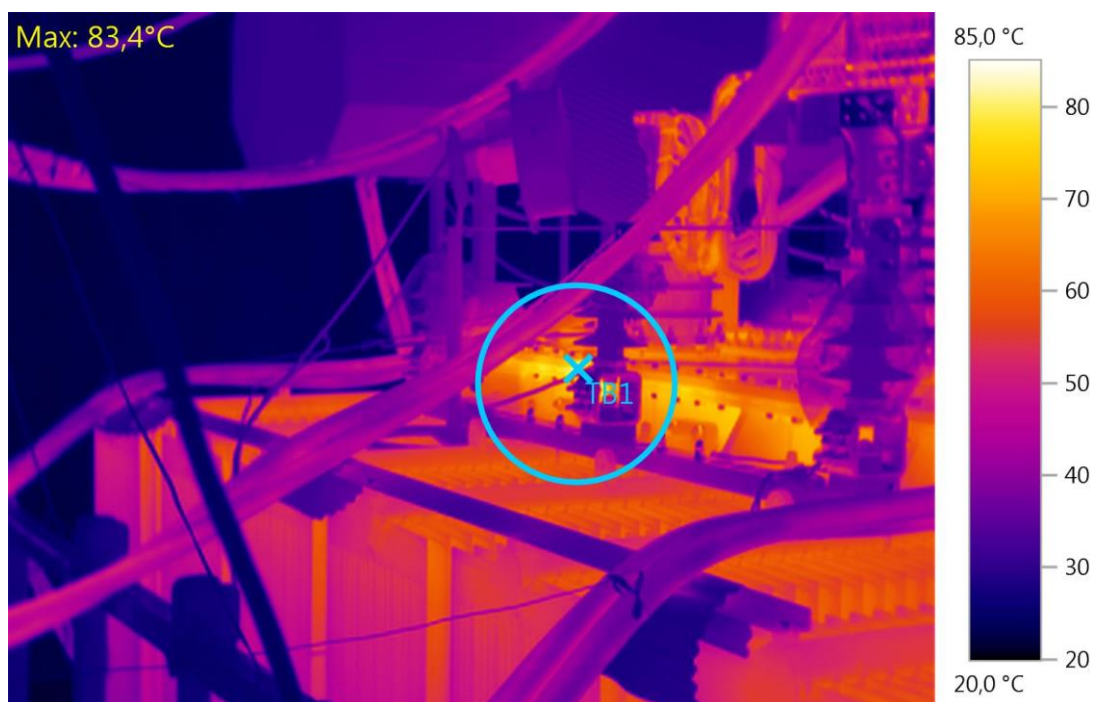
$$HI = \frac{\sum V \cdot s}{\sum V \cdot s_{max}} = \frac{378}{410} = 92,195\%, \quad (46)$$

Kde: v je váha indikátoru
 s udělené skóre,
 s_{max} je maximální skóre indikátoru

4.9 Údržba transformátorů

Každá profylaktická odstávka transformátoru začíná vizuální kontrolou. Sleduje se zejména stav a těsnost nádoby, dělicí roviny, armatur a dilatační nádoby, stav a těsnost ventilů a klapek, viditelné poruchy příslušenství – zejména vysoušečů, průchodek, bleskojistek, radiátorů, měření hladiny a teploty oleje (příp. teploty vinutí), funkce ventilátorů (pokud je jimi transformátor vybaven) a prohlídka přepínače odboček. Dále je kontrolována hladina oleje v konzervátoru, barva indikátoru ve vysoušečích a kompletnost příslušenství transformátoru.

Vizuální prohlídka může být doplněna snímáním pomocí infračervené (IR) kamery pro detekci lokálních horkých míst, nebo snímáním ultrafialovou (UV) kamerou pro detekci výbojové činnosti na viditelných částech (např. na průchodkách).



obr. 43: ukázka zobrazování pomocí infračervené kamery

Dále jsou kontrolována plynová relé. Jejich svorkovnice a termostat jsou vyčištěny od prachu a vodivých nečistot. Šroubové spoje jsou dotaženy a je překontrolována těsnost a funkčnost (termostatu i plynového relé). Následuje kontrola teploměrů a porovnání s kontrolním etalonem. Měřicí hlavice jsou očištěny, zkontrolovány kabelové průchodky a vše očištěno.

Součástí údržby je též kontrola funkce nádobové ochrany. Odizolování nádoby a podvozků musí být funkční, neznečištěné barvou ani jinými nečistotami. Šroubové spoje ochrany musí být dotaženy a ošetřeny proti korozi. Totéž platí i pro ovládací skříň transformátoru.

V závislosti na způsobu chlazení jsou předepisovány kontroly chodu čerpadel a ventilátorů, měření jejich izolačních stavů, kontrola šroubových spojů a pryžových těsnění. Ventilátory ani čerpadla musejí mít klidný chod, nesmějí vykazovat abnormální vibrace.

Základem elektrických měření je kontrola izolačního odporu transformátoru a průchodek. Každý provozovatel má svá interní kritéria. Jelikož je izolační odpor tepelně závislý, je při měření nutné zaznamenat teplotu oleje.

Dále jsou prováděna základní diagnostická měření. Mezi tyto patří měření izolačního odporu, měření poměru kapacit C2 a C50 [97], kapacity průchodek. Velkou vypovídací hodnotu mají měření odporů jednotlivých fází vinutí. Tyto odpory nesou souhrnnou informaci o stavu kontaktů a spojů (např. vývody na průchodky nebo kontakty na přepínači odboček). Dále kontrola převodu jednotlivých fází poskytuje informaci o případném mezizávitovém zkratu.

Vzhledem k teplotní závislosti výše uvedených diagnostických parametrů je nezbytné měření doplnit údajem o teplotě okolí a teplotě oleje v transformátoru v době měření a měřené diagnostické parametry přepočítat na teplotu referenční, obvykle 20°C, např. dle IEEE C 57.12.90-1980.

Podle významu stroje a finančních prostředků na diagnostiku je možné zařadit i nákladnější zkoušky, například FRA (frequency response analysis), měření částečných výbojů a další testy.

V každém případě jsou při profylaxi odebrány vzorky transformátorového oleje, které jsou následně dopraveny do laboratoře a vyhodnocovány. Na transformátorovém oleji je prováděn kompletní fyzikálně chemický rozbor dle metodik ČSN EN 60422 a ČSN EN 60599. Dále jsou zkoumány koncentrace rozpuštěných plynů v oleji a případná přítomnost furanových složek. Parametry izolačního oleje poskytují cenné informace o stavu pevné složky izolace, která je pro tyto zkoušky nedostupná.

Údržbové činnosti jsou prováděny na základě plánu a případně korigovány s výsledky diagnostických šetření. Prakticky se údržbové činnosti omezují pouze na čištění a kontrolu funkce jednotlivých komponent a měření. Čištění transformátoru je však nezbytné zejména v oblastech se silným atmosférickým znečištěním. Příkladem jsou transformátory v krytých stáních uhelných elektráren. Uhelný prach je vodivý a vlivem usazování na průchodkách hrozí riziko přeskočení. Dále podporuje ulpívání vlhkosti, dalších látek a mikroorganismů, které degradují povrch izolátoru a zvyšují tak jeho vodivost, což v může v důsledku vyústit k přeskočení na izolátoru a tím k havárii stroje.

Vnitřní části transformátoru jsou zpravidla nepřístupné. Na základně prováděných olejových analýz je vyhodnocen stav olejové náplně a případně je provedena filtrace a regenerace olejové náplně. Regenerace transformátorového oleje se provádí zpravidla přímo na místě v rozvodně pomocí mobilní regenerační stanice. Samotný proces regenerace sestává z ohřevu oleje, několikastupňové filtrace, perkolačního odstranění produktů stárnutí a vakuového sušení a odplynění. Ke zmíněnému perkolačnímu odstranění produktů stárnutí se používají vysoce porézní materiály, např. Fullerova hlinka, které na sebe váží nežádoucí látky [26]. Regenerovaný olej může být následně doplněn o inhibitory a antioxidanty, které zpomalují a potlačují oxidační a degradační procesy a tím prodlužují životnost oleje.

5 Experimentálně určené modely odolnosti izolačního systému olej-papír pro systémy prediktivní údržby

Teoretická odvození jednofaktorových a dvoufaktorových modelů odolnosti jsou v literatuře běžně k nalezení, jak bylo popsáno v kapitole 4.6. Ovšem literatura zpravidla neuvádí konkrétní hodnoty experimentálních konstant. Tyto lze získat od výrobců elektroizolačních materiálů, pokud je poskytují, případně je nutné provést vlastní experimenty.

5.1 Popis odolnosti izolačního systému transformátorů na základě vlastních experimentů

Pokud je izolační systém vystaven v provozu jednomu degračnímu mechanismu, který je trvale dominantní, často lze ostatní mechanismy zanedbat a modelovat pouze tento nejvýznamnější.

Ve výkonových transformátorech je zpravidla nutné uvažovat více degračních činitelů, zejména teplotu a elektrické pole. V případě zanedbané údržby, či u extrémně namáhaných strojů je nutné vzít v úvahu navíc vliv vlhkosti.

Níže uvedené experimenty byly prováděny v laboratořích FEL ZČU. Vzorky byly kondicionovány a následně stárnuty v horkovzdušných sušárnách (obr. 44) vybavených průchodkou pro přivedení stresovacího napětí.



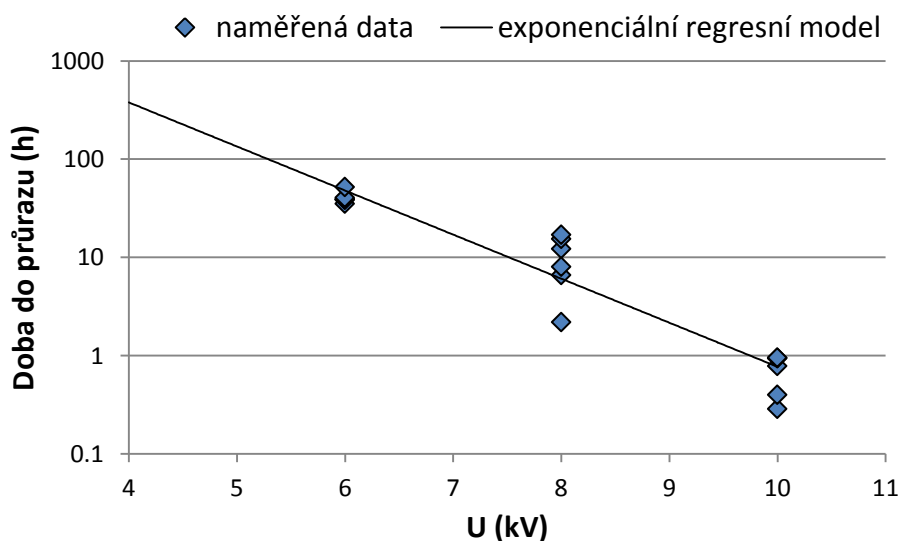
obr. 44: horkovzdušná sušárna Heraus

5.1.1 Jednofaktorové napět'ové stárnutí suché transformátorové lepenky

V případě napět'ového stárnutí je možné se vyhnout stanovování kritériálních hodnot, jelikož lze vzorky stárnout do průrazu. Takový experiment má zpravidla vyšší vypovídací schopnost, než stárnutí vzorků do dosažení kritéria, jelikož je často obtížné najít přímý důsledek volby kritéria na stav sledovaného objektu. Na obr. 46 jsou naměřené doby do průrazu suché transformátorové lepenky při teplotě okolí 25°C. Vzorky (obr. 45) byly umístěny mezi kruhové elektrody a stárnuty s četností $n = 6$ paralelně na téže napět'ové hladině.



obr. 45: vzorky transformátorové lepenky 100 x 100 x 1 mm



obr. 46: naměřené doby do průrazu, materiál transformátorová lepenka, vzorky 100 x 100 x 1 mm

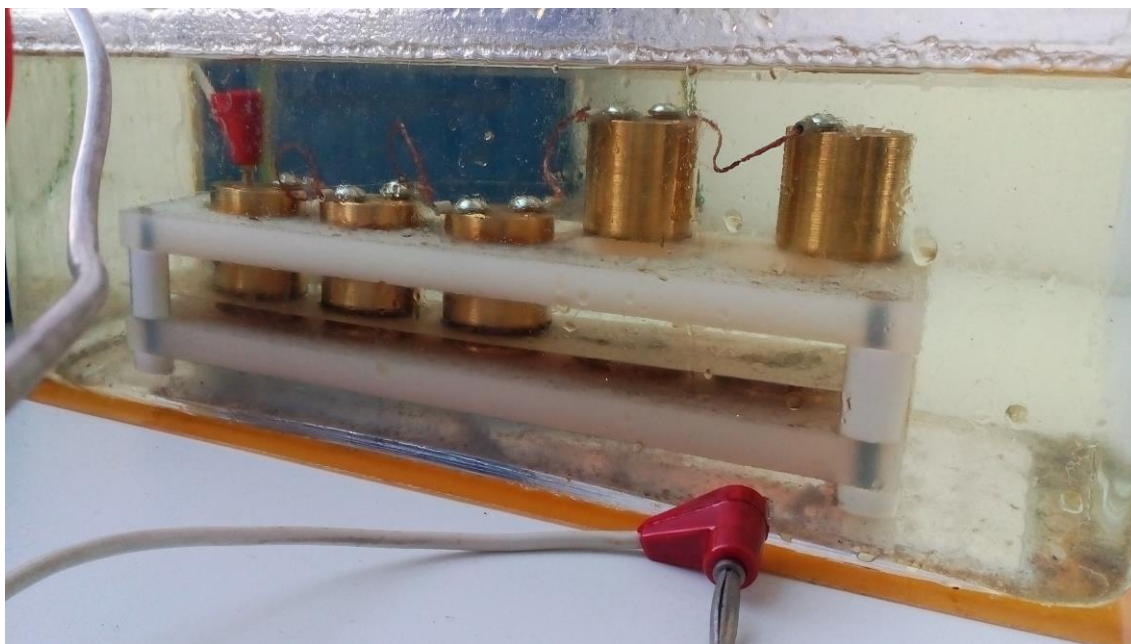
Pro vyhodnocení byla použita tatáž metodika, která je popsána výše (kapitola 0) - tj. vyloučení odlehlých hodnot, určení konfidenčních intervalů na požadované hladině významnosti a extrapolace pro nižší namáhání.

Regresní model pro toto uspořádání má tvar:

$$k = \frac{Q_i}{(22650 \cdot e^{-1.029 \cdot U})}, \quad (47)$$

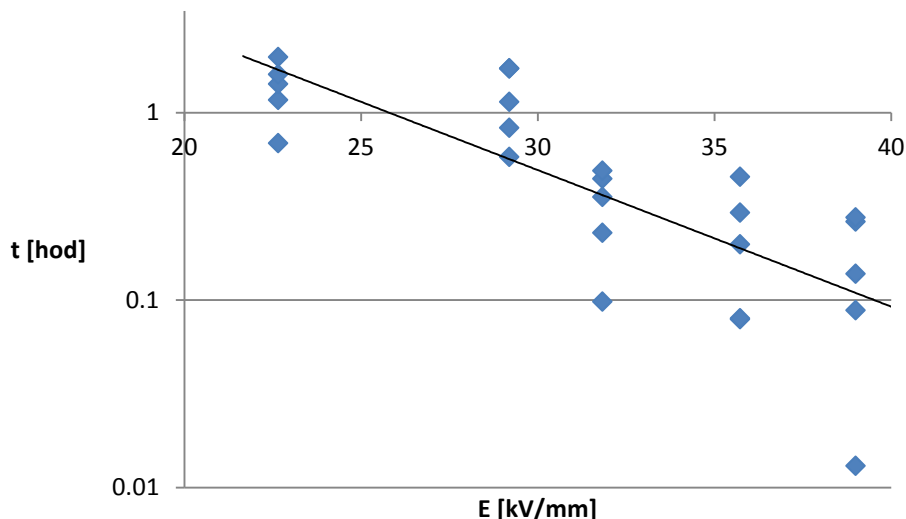
5.1.2 Jednofaktorové napěťové stárnutí transformátorové lepenky v řepkovém oleji

Pro určení odolnosti transformátorové lepenky impregnované řepkovým olejem byl proveden obdobný experiment. Bylo použito podobné elektrodové uspořádání, s válcovými elektrodami (obr. 47). Vzorky byly kondicionovány v olejové lázni a dokonale prosyceny olejem.



obr. 47: elektrodové uspořádání při měření doby do průrazu vzorků izolačního systému olej-papír

Stárnutí probíhalo s četností $n = 5$, v tomto experimentu při teplotě 25°C. Doby do průrazu jsou vyznačeny na obr. 48.



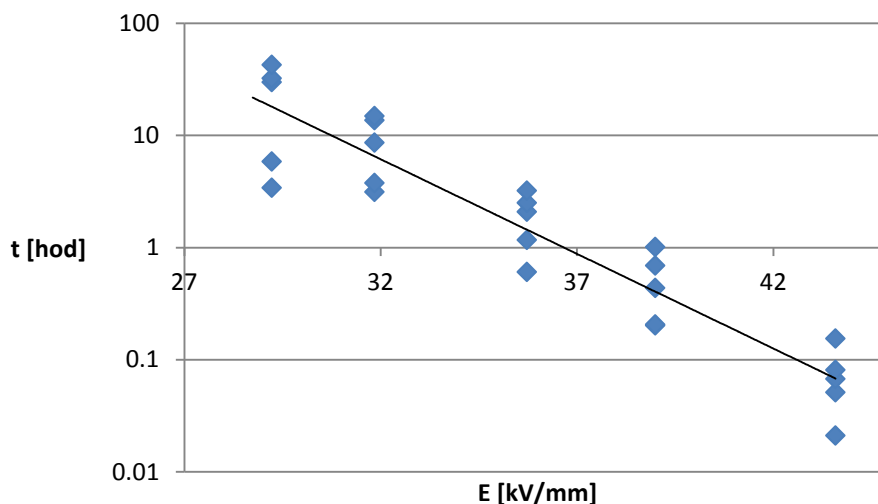
obr. 48: naměřené doby do průrazu, materiál transformátorová lepenka + řepkový olej, tloušťka lepenky 0,2 mm

Regresní model pro toto uspořádání má tvar:

$$k = \frac{Q_i}{(75,892 \cdot e^{-0,884 \cdot U})^2} \quad (48)$$

5.1.3 Jednofaktorové napěťové stárnutí transformátorové lepenky ve slunečnicovém oleji

V následujících grafech jsou modely odolnosti těžce transformátorové lepenky impregnované slunečnicovým olejem. Stárnutí probíhalo s četností $n = 5$ při teplotě okolo 25°C . Doby do průrazu nových kondicionovaných vzorků jsou na obr. 49.



obr. 49: naměřené doby do průrazu, materiál transformátorová lepenka + slunečnicový olej, tloušťka lepenky 0,2 mm

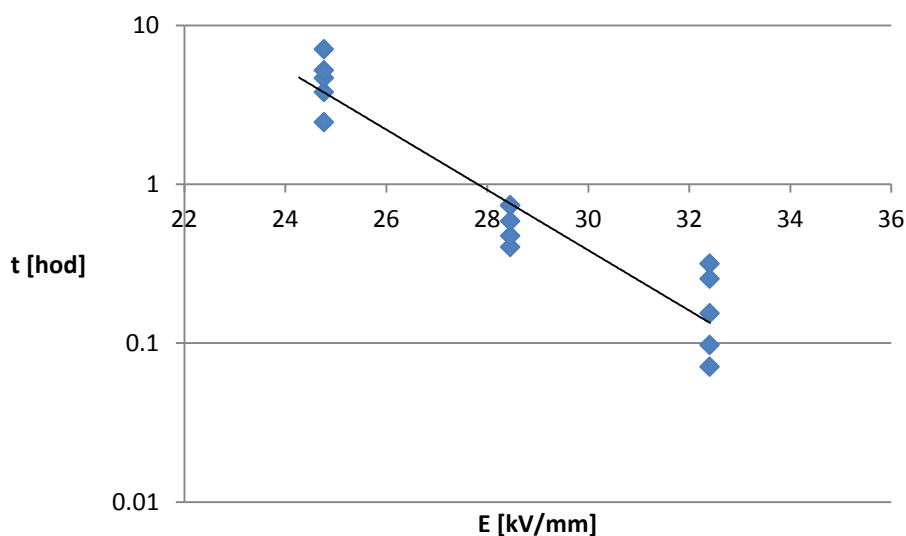
Regresní model pro toto uspořádání má tvar:

$$k = \frac{Q_i}{(1,548 \cdot 10^6 \cdot e^{-2.048 \cdot U})}, \quad (49)$$

Pro ověření správnosti metodiky výpočtu zbytkové životnosti byl proveden ještě jeden experiment zrychleného laboratorního stárnutí se slunečnicovým olejem a transformátorovou lepenkou. Tato lepenka byla umístěna v horkovzdušných pecích během jiných nesouvisejících experimentů a byla teplotně exponovaná neznámou dobu na teplotách nižších, než je její teplotní třída.

Slunečnicový olej byl taktéž používán k jiným experimentům, byly v něm prováděny průrazy celulózových materiálů a tyto v nich byly napětově stresovány nad hladinou zapalovacího napětí částečných výbojů. Olej tedy průběžně degradoval, navíc byl vystaven oxidaci a atmosférické vlhkosti. Stupeň zestárnutí předmětného oleje je neznámý, stejně jako stupeň zestárnutí použité transformátorové lepenky.

Takto byl získán izolační systém olej-papír v neznámém stavu, který byl dále vystaven napětové expozici, podobně jako v předchozích případech a získán model odolnosti elektrickému namáhání. Význam experimentu bude vysvětlen v kapitole 6.4. Doby do průrazu vzorků izolačního systému v neznámém stavu jsou zobrazeny na obr. 50.



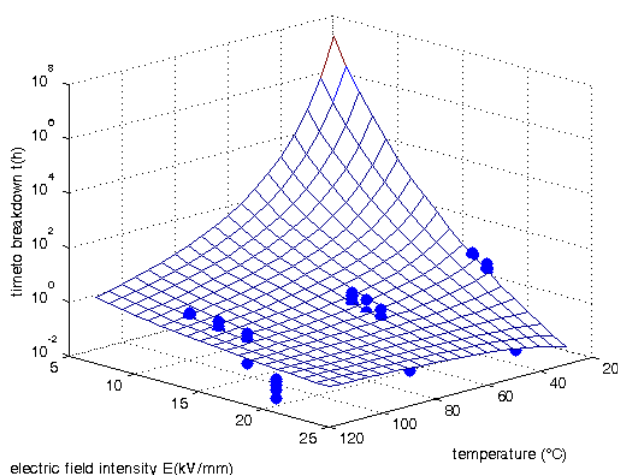
obr. 50: naměřené doby do průrazu, materiál zestárlý transformátorová lepenka + zestárlý slunečnicový olej, tloušťka lepenky 0,2 mm

Regresní model pro toto uspořádání má tvar:

$$k = \frac{Q_i}{(1,894 \cdot 10^5 \cdot e^{-2.303 \cdot U})}, \quad (50)$$

5.1.4 Dvoufaktorové stárnutí transformátorové lepenky ve slunečnicovém oleji

Shodné elektrodové uspořádání bylo využito i pro sestavení dvoufaktorového modelu odolnosti izolačního systému složeného z transformátorové lepenky tloušťky 0,2mm a slunečnicového oleje. Stárnutí probíhalo s četností $n = 5$ na každé úrovni zatížení. Regresní funkce je zobrazena na obr. 51.



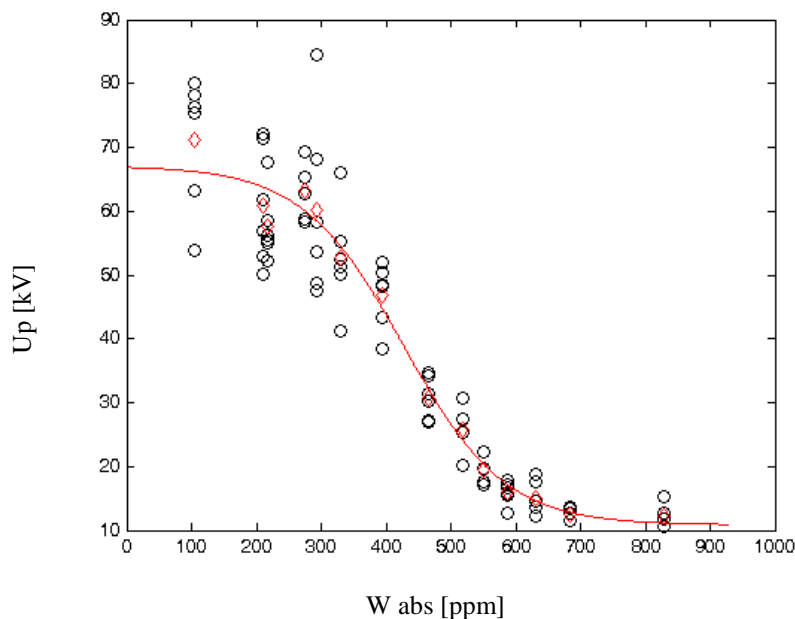
obr. 51: křivka dvoufaktorového stárnutí (současné působení teploty a elektrického pole, slunečnicový olej + transformátorová lepenka tloušťky 0,2 mm)

Regresní model pro toto uspořádání má tvar:

$$k = -10,81 \cdot E^{-\left(1819,93 - \frac{3,18}{\Theta}\right)} \cdot e^{-\left(\frac{589,31}{\Theta}\right)}, \quad (51)$$

5.1.5 Závislost průrazného napětí na vlhkosti obsažené v elektroizolační kapalině

Slunečnicový olej, používaný v předchozích experimentech byl použit též pro stanovení závislosti průrazného napětí na vlhkosti obsažené v oleji. Tato závislost je znázorněna na obr. 52.



obr. 52: naměřené doby do průrazu slunečnicového oleje v závislosti na vlhkosti obsažené v oleji

Závislost přeskovového napětí na relativní vlhkosti oleje je prostá, ryze monotónní, nelineární funkce. Vhodnou funkcí pro nelineární regresi je hyperbolický tangens, avšak tato úloha je špatně podmíněná, a tak je hledání regresních koeficientů pracné a vyžaduje jistou zkušenost a patřičné softwarové nástroje. Druhou možností je sudá Fourierova řada, která poskytuje vyšší přesnost aproximace, avšak s ohledem na množství regresních koeficientů je méně vhodná oproti hyperbolické tangentě.

Regresní model hledané křivky je tedy obecně vyjádřen ve tvaru:

$$U_{p,th} = f_{(W_{rel})} = k_{r1} \cdot tgh(k_{r2} \cdot W_{rel} + k_{r3}) + k_{r4}, \quad (52)$$

Kde $U_{p,th}$ je přeskové napětí jako funkce relativní vlhkosti, k_{r1} , k_{r2} , k_{r3} , k_{r4} jsou regresní koeficienty

Průrazné napětí absolutně suchého oleje je dle modelu (9) rovno:

$$U_{p,0} = k_{r1} \cdot tgh(k_{r3}) + k_{r4}, \quad (53)$$

Podobné vztahy je možné vyjádřit též pro intenzity elektrického pole, jelikož dle normy [107] je přeskové napětí oleje měřeno při vzdálenosti 2,5mm, stačí pouze přenásobit měřítko svislé osy koeficientem 0,4. Následně tedy zavedeme faktor respektující snížení přeskovového napětí pro vlhký olej:

$$rh = \frac{E_0}{E_{rh}} = \frac{U_{p,0}}{U_{p,rh}}, \quad (54)$$

Kde:

E je intenzita elektrického pole,

U je průrazné napětí

Vztah (54) Který lze s využitím vztahů (52) a (53) zapsat jako

$$rh = \frac{k_{r1} \cdot tgh(k_{r3}) + k_{r4}}{k_{r1} \cdot tgh(k_{r2} \cdot W_{rel} + k_{r3}) + k_{r4}}, \quad (55)$$

Jak již bylo zmíněno, relativní vlhkost oleje je veličina závislá na absolutní vlhkosti oleje a limitu saturace, který je funkcí teploty. Mez saturace minerálních olejů lze popsat vztahem:

$$W_{sat} = a_{WT} \cdot e^{b_{WT} \cdot T}, \quad (56)$$

Kde: T je teplota a a_{WT} a b_{WT} jsou experimentální konstanty platné pro konkrétní typ minerálního oleje jeho stupeň zestárnutí. Tyto parametry nejsou příliš citlivé, pokud pro libovolný minerální olej položíme $a_{WT} = 40$ a $b_{WT} = 0,01$, dojde k významnému zjednodušení vztahu a přesnost výpočtu nebude příliš ovlivněna. Přesnější stanovení koeficientů a_{WT} a b_{WT} je možné najít v literatuře, např. [120].

Vztah (55) je možné dále upravit do konečné podoby:

$$rh = \frac{k_{r1} \cdot tgh(k_{r3}) + k_{r4}}{k_{r1} \cdot tgh(k_{r2} \cdot \frac{W_{abs}}{a_{WT} \cdot e^{b_{WT} \cdot T}} + k_{r3}) + k_{r4}}, \quad (57)$$

Koeficient rh je následně možné použít v modelech elektrického a kombinovaného elektrického a tepelného stárnutí jako korekční faktor respektující vliv vlhkosti v transformátorovém oleji.

5.2 Off-line korekce

Výpočet zbytkové životnosti izolačního systému může probíhat zcela autonomně, bez vnějších korekcí. Ovšem za účelem zvýšení přesnosti výpočtu je vhodné jej periodicky kontrolovat, případně korigovat pomocí informací získaných z různých diagnostických metod. Mezi nejvýznamnější metody pro off-line korekci zbytkové životnosti výkonových transformátorů lze zařadit hlukové analýzy, měření průměrného polymeračního stupně a případně analýzu plynů rozpuštěných v transformátorovém oleji.

Přesnost výpočtu zbytkové životnosti je závislá na přesnosti určení všech měřených veličin. Je tedy zřejmé, že vlivem kumulace dílčích nepřesností při určení těchto vlivů dochází k ovlivnění výsledného odhadu. Některé off-line diagnostické metody umožňují stanovit zbytkovou životnost jiným způsobem. Je tedy vhodné tyto metody kombinovat a on-line výpočet korigovat dvěma způsoby:

- Skokově změnou zbytkové životnosti
- Plynule pomocí váhového koeficientu

Skoková změna spočívá v zastavení běhu programu a vložení nové inherentní hodnoty životnosti v daném okamžiku. Následně je program opětovně spuštěn a odpočítává spotřebovanou životnost od nově nastavené hodnoty. Tuto variantu je vhodné použít v případě, kdy je zjištěna jednorázová degradace vlivem okolností, které nejsou monitorovány online. Příkladem může být náhlý zkrat, zapínání transformátoru, nebo úder blesku. Tyto skutečnosti se v průběhu provozování transformátoru mohou objevit, avšak v programu s nimi není počítáno, jelikož působí jiným druhem namáhání, než provozní zatížení a platí pro ně i jiné modely. Skokovou korekci je vhodné využít, pokud jsou známy výsledky DP.

Plynulá korekce spočívá v nastavení váhového koeficientu, který modifikuje výpočet v každém kroku. Tato korekce je využitelná v případě, kdy je transformátor (izolační systém) vystaven tímž degradačním mechanismům, které jsou respektovány v matematickém modelu, avšak výpočet je zatěžován systematickou chybou. Pokud je za provozu trvale dosahována odchylka výsledků on-line výpočtu a off-line diagnostických metod, je vhodné tuto korekci využít. Příkladem může být nevhodně zvolené umístění senzorů, špatně nastavený převodní poměr, rušení signálu a další.

6 Návrh programu pro výpočet zbytkové životnosti izolačního systému

V dnešní době jsou široce nasazovány monitorovací systémy, které měří různé diagnostické parametry a ukládají je do databází pro pozdější zpracování. Často tato data nejsou v reálném čase využívána, či případně slouží pouze jako orientační přehled pro operátory sítí, či provozů. Tyto monitorovací, resp. expertní systémy jsou schopny hlídat diagnostické parametry a hlásit překročení nastavených limitů, či chyby funkce. V provozu je ovšem generováno značné množství falešných alarmů, kdy transformátor pracuje bezchybně, ale například vlivem poruchy čidla či zarušení dojde ke genezi falešného alarmu. Proto není možné signály z monitorovacího zařízení přímo zahrnovat do SCADA systémů, ale je zde nutný zásah operátora.

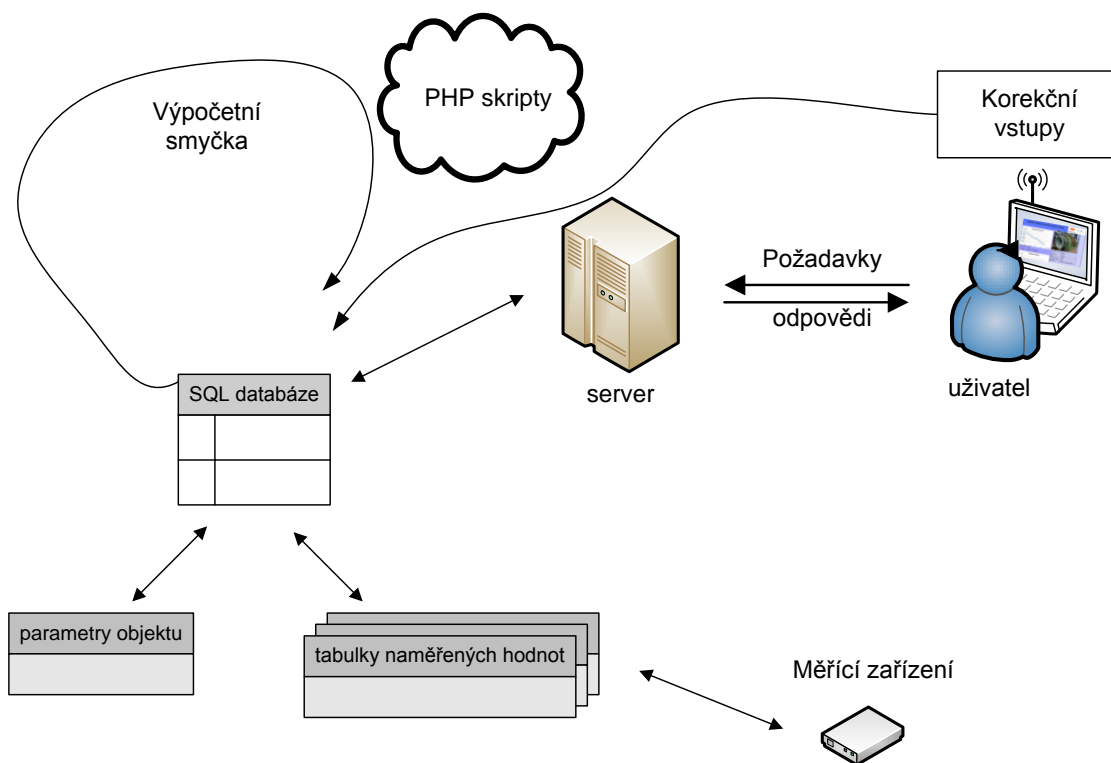
Online monitorovací systémy poskytují v reálném čase velká množství dat. Operátor nemůže všechna tato data v reálném čase vyhodnocovat, potřebuje proto jednoduchý indikátor stavu sledovaného zařízení a pouze za předpokladu, že se stav stroje rychle zhoršuje, bude operátor provádět podrobnější rozbor.

Proto byl vyvinut program Elmon, který umožňuje monitorovat základní diagnostické parametry elektrických strojů a hodnotit jejich stav. Součástí je vizualizace a simulace úbytku zbytkové životnosti izolačního systému z hlediska provozních a diagnostických veličin. Je možné integrovat více sledovaných zařízení do jednoho monitorovacího rozhraní.

6.1 Program Elmon I

Program umožňuje monitorovat integrované diagnostické signály on-line a vyhodnocovat je. Vstupem jsou základní diagnostické parametry transformátoru, které program zpracovává a ukládá je do databáze. Program je konfigurovatelný, čili je možné upravovat výpočetní model i přidávat další diagnostické parametry.

V průběhu vývoje programu vznikly dvě verze. První verze byla vytvořena v jazyce php, obsluhovala databázi mySQL s naměřenými hodnotami a zobrazovala výstupy formou www rozhraní. Schematické znázornění struktury programu Elmon I je na obr. 53. Bližší podrobnosti jsou uvedeny v příloze B.

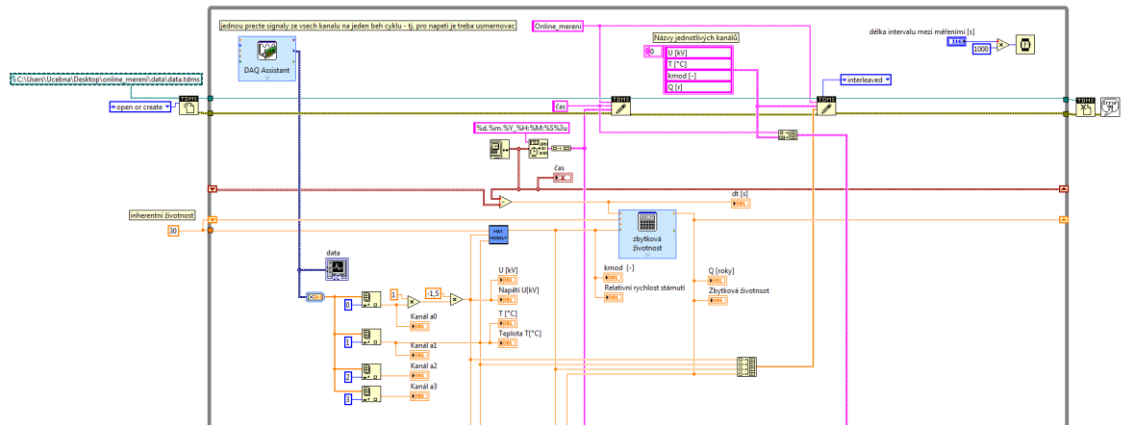


obr. 53: schéma programu Elmon I

Program Elmon I je plně funkční, avšak je vhodný pouze pro aplikace, kde jsou degradační procesy kvazistacionární. V praxi dosažitelná nejkratší možná perioda je přibližně 30 s. Tedy program je vhodný například pro měření teploty, ale nebude možné zpracovávat data například z měření částečných výbojů, nebo hluku. V praxi jsou obvykle voleny periody vzorkování větší než 60 s, pro většinu aplikací je tedy tento program použitelný. Zde je nutné podotknout, že s rostoucí vzorkovací frekvencí dramaticky narůstá objem ukládaných dat, které jsou následně obtížně zobrazitelné.

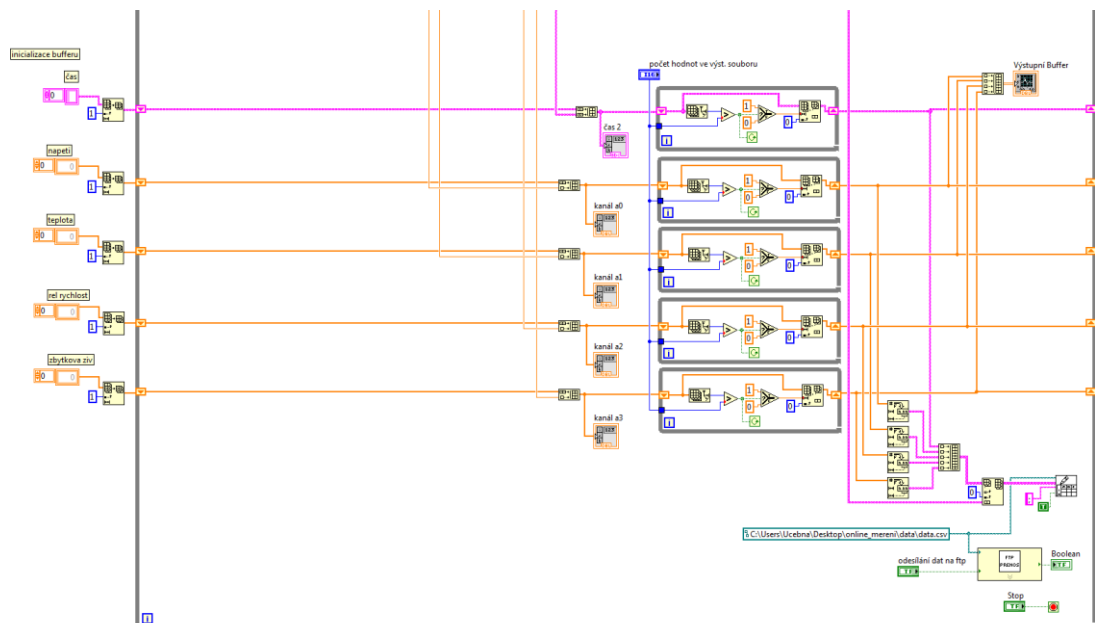
6.2 Program Elmon II – specifikace a oblast použití

Druhá verze programu – Elmon II - byla sestavena ve vývojovém prostředí LabView firmy National Instruments, které umožňuje zpracovávat rychle se měnící signály. Struktura je podobná jako v první verzi. Program má dvě části – výpočetní (obr. 54) a zobrazovací (obr. 55). Výpočetní část načítá online měřená data, vypočítává z nich relativní rychlost stárnutí a spotřebovanou životnost za dobu mezi dvěma měřeními. Tuto spotřebovanou životnost odečítá od životnosti uložené v předchozím záznamu.



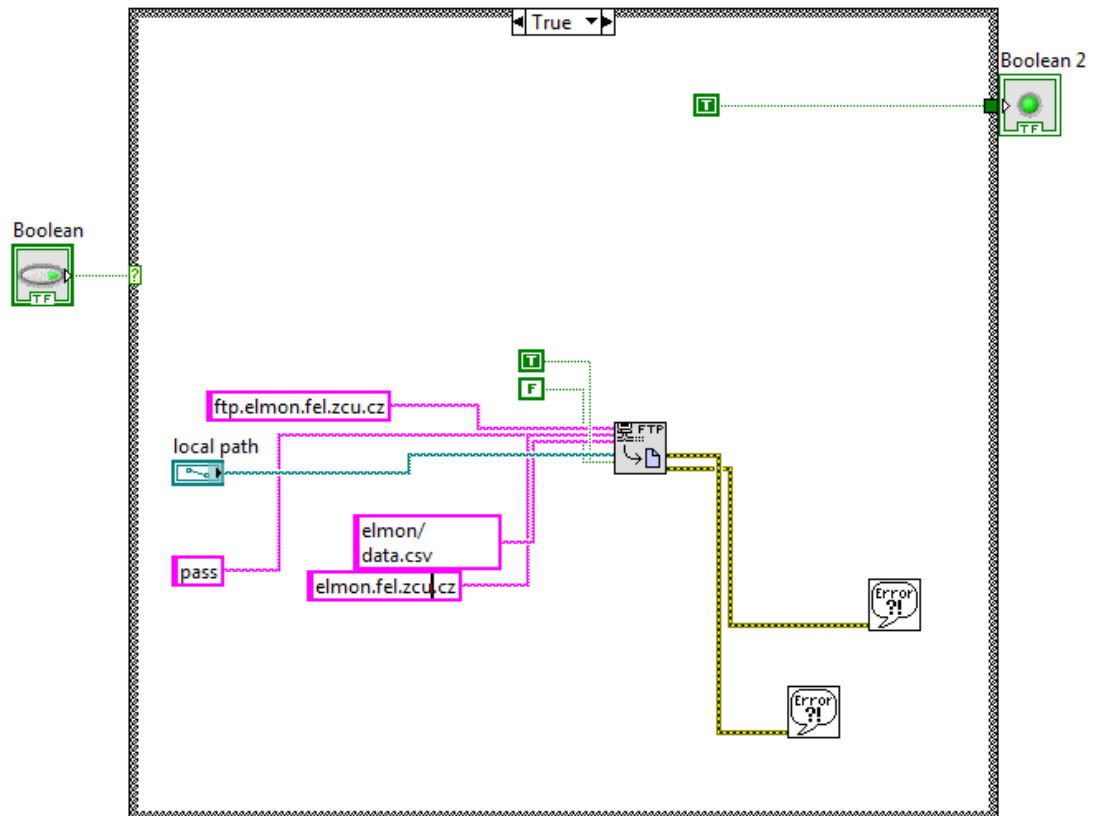
obr. 54: výpočetní část programu Elmon II

Druhá část programu slouží k zobrazování dat a k jejich ukládání. Obsahuje nastavitelný buffer s měřenými parametry i s dopočítávanými hodnotami. Uživatel může za běhu programu měnit požadovanou velikost výstupního souboru.



obr. 55: zobrazovací část programu Elmon II

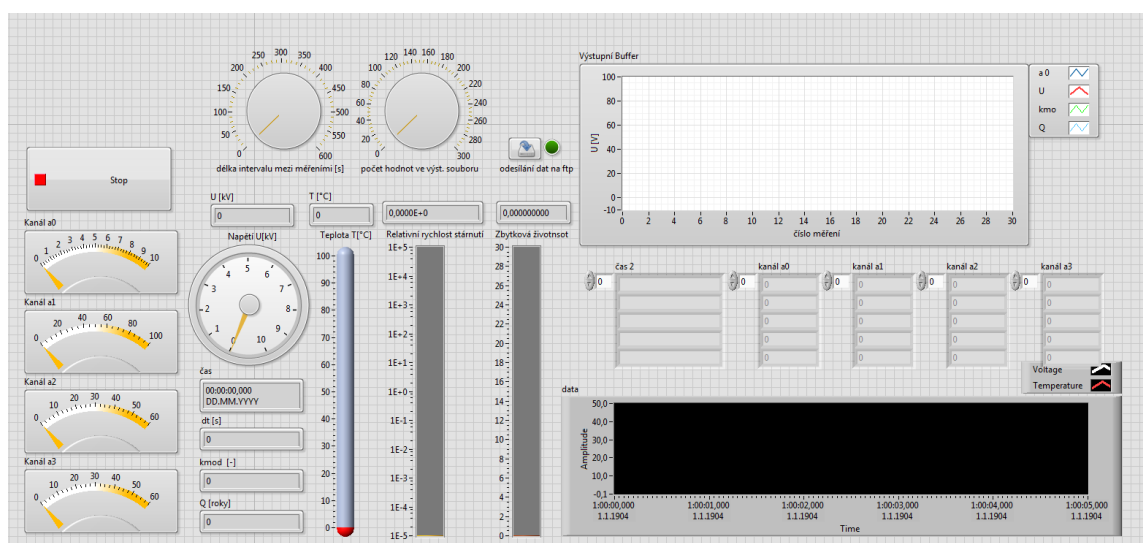
Program dále umožňuje průběžnou archivaci dat na vzdáleném serveru pomocí FTP přenosu. Na ovládacím panelu uživatel jednoduše zapne, či vypne přenos.



obr. 56: program Elmon II – odesílání dat na FTP server

Program dále umožňuje průběžnou archivaci dat na vzdáleném serveru pomocí FTP přenosu. Na ovládacím panelu uživatel jednoduše zapne, či vypne přenos.

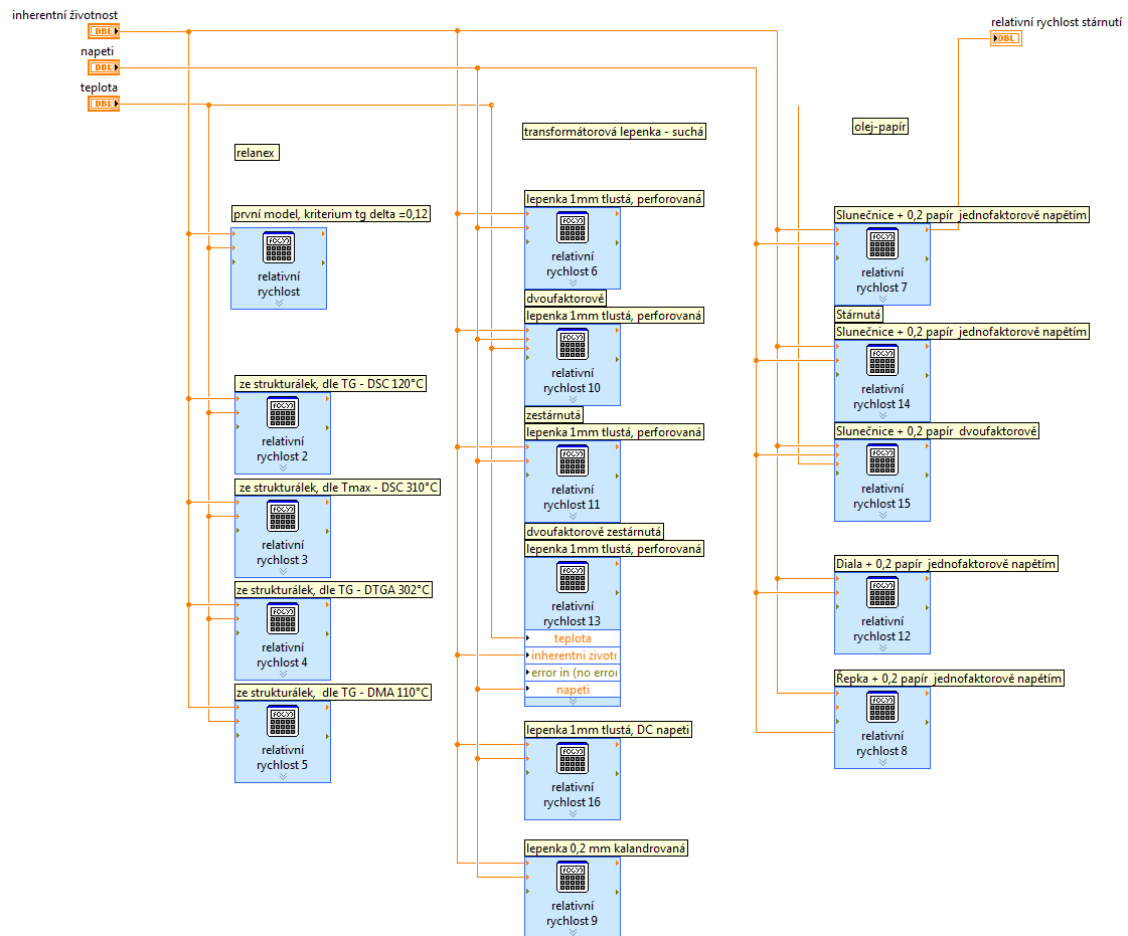
Ovládací panel programu je na obr. 57. Je zde graf s naměřenými a vypočítanými hodnotami, dále ukazatele zobrazující aktuální hodnotu měřených parametrů, ovládací prvek pro volbu intervalu mezi měřeními a ovládací prvek pro volbu velikosti výstupního bufferu. Ovládací panel dále obsahuje tlačítko pro přenos dat na FTP.



obr. 57: ovládací panel programu Elmon II

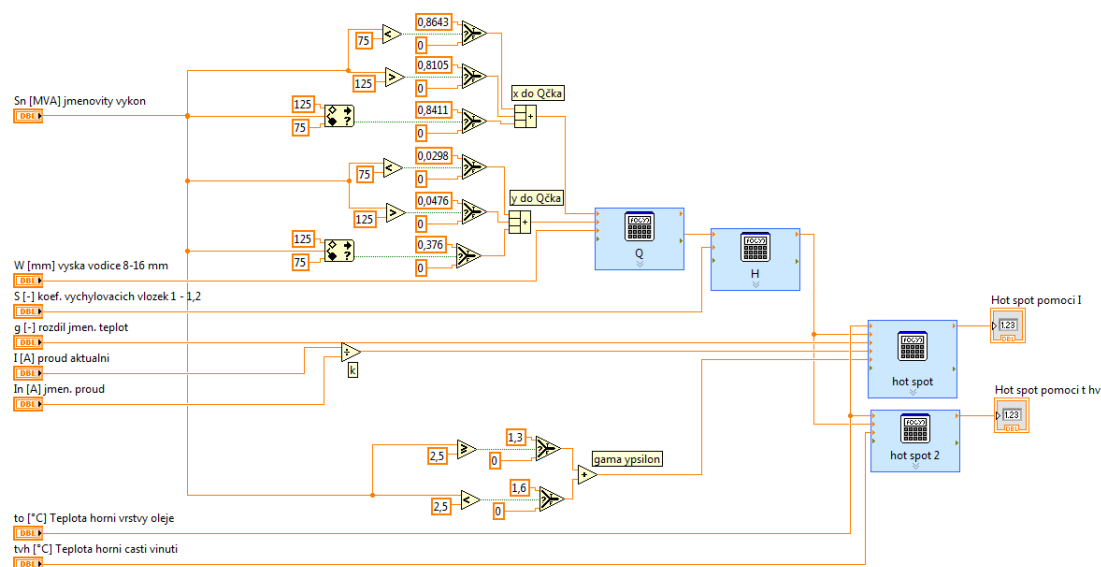
Program Elmon II je modulární a rozšiřitelný. Ve stávající podobě umožňuje měření dvou parametrů, avšak je možné jej rozšířit o libovolný počet dalších. Program je kompatibilní se všemi nejvýznamnějšími počítačovými a průmyslovými sběrnicemi, jako jsou RS 232, GPIB, Modbus, USB, PCI, PCI Express, PXI, PXI Express, bezdrátové sítě a síť Ethernet. Pokud nějaký typ komunikačního protokolu není přímo implementován v LabView, pak jej lze doprogramovat.

Základním prvkem programu je výpočetní modul, který obsahuje knihovnu matematických modelů odolnosti obr. 58. V této knihovně jsou mimo jiné modely odolnosti uvedené v kapitole 5.1.



obr. 58: knihovna modelů odolnosti programu Elmon II

Program obsahuje modul na statický výpočet hot-spot teploty transformátorů dle vztahů uvedených v kapitole 4.5.4. Tento modul ovšem zatím nebyl vyzkoušen v reálné aplikaci, jeho funkce byla ověřena pouze simulací. Bližší informace jsou uvedeny v příloze B.



obr. 59: modul pro výpočet teploty hot-spot transformátorů

6.3 Struktura programu Elmon II

Program je sestaven modulárně – skládá se z vyhodnocovací, datové a zobrazovací vrstvy, které jsou propojeny komunikačním rozhraním. Vývojové prostředí LabView umožňuje komunikaci pomocí mnoha různých datových sběrnic – OPC, Modbus, Canbus, Profibus, RS 232, RS 485, ethernet a dalších. Pomocí těchto rozhraní je možno připojovat další měřicí převodníky a rozšířit tak monitorované parametry pro získání přesnějšího přehledu o stavu sledovaného zařízení.

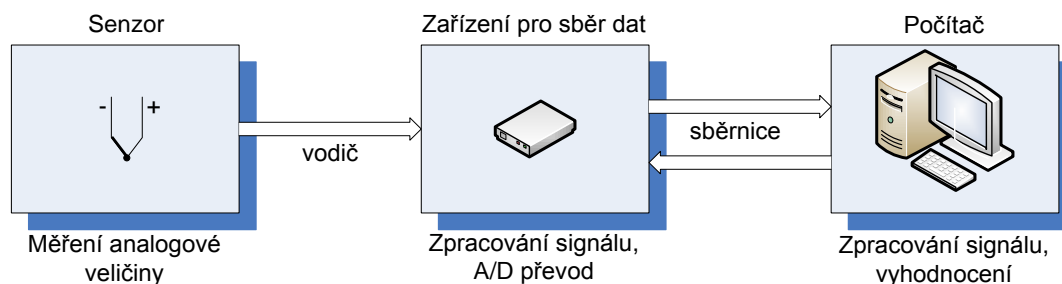
6.3.1 Získání a zpracování dat

Pro získávání dat je možné využít zařízení firmy National Instruments, na kterých bylo provedeno ověření metodiky výpočtu, avšak je též možné použít jakákoliv jiná zařízení pro sběr dat. Pro uvedené experimenty byl použit měřicí systém Compact DAQ. Tento systém se skládá z šasi a měřících modulů. Byla použita šasi cDAQ-9181, které má 1 slot pro měřicí modul a cDAQ-9184 se čtyřmi sloty. Obě šasi jsou vybavena ethernetovým výstupem, pomocí kterého je možné naměřená data odesílat po lokální síti, ale i přes internet. Měřicí modul NI9207 disponuje 24-bitovým převodníkem, 8 napěťovými a 8 proudovými vstupy a umožňuje měření s frekvencí 500 S/s. Modul zpracovává napětí v rozsahu ± 10 V a proudy v rozsahu $\pm 21,5$ mA.

Pro měření teploty byl použit čtyřkanálový modul NI 9211 s rozlišením 24 bit a termočlánek typu K. Teplotu lze měřit pomocí termočláneků i za použití modulu NI 9207, avšak jelikož je výstupní napětí termočláneků v jednotkách mV, bylo by pro přesnější měření nutné použít zesilovač.

Naměřené hodnoty byly ukládány do TDMS (Technical Data Management Streaming) databáze. Tento datový formát je vhodný pro zpracovávání velkých objemů dat. TDMS soubory lze otevřít i v tabulkovém procesoru MS Excel, čili práce s těmito soubory je pro uživatele komfortní.

Měřicí řetězec je sestaven z různých senzorů, které snímají elektrické i neelektrické veličiny. Signál je dále přiváděn do zařízení pro sběr dat, a to buď přímo, nebo přes oddělovací prvky. Následně se signál zpracovává v závislosti na charakteru dané veličiny. Jedná se především o zesílení, odfiltrování rušení, galvanické oddělení a převod na digitální signál. Zařízení pro sběr dat je spojeno některým typem sběrnice s počítačem, kde probíhá konečné zpracování signálu. Schéma měřicího řetězce je na obr. 60.



obr. 60: schéma měřicího řetězce

V případě snímání vysokého napětí hrozí riziko zavlečení VN potenciálu podél měřicí trasy do monitorovacího zařízení a dále po datových sběrnících. Z tohoto důvodu je vhodné monitorovací zařízení galvanicky oddělit. V rámci prováděných experimentů byly použity jednotky TP-link MC220L (obr. 61) pro převod elektrického signálu z metalického vedení na optické a naopak.

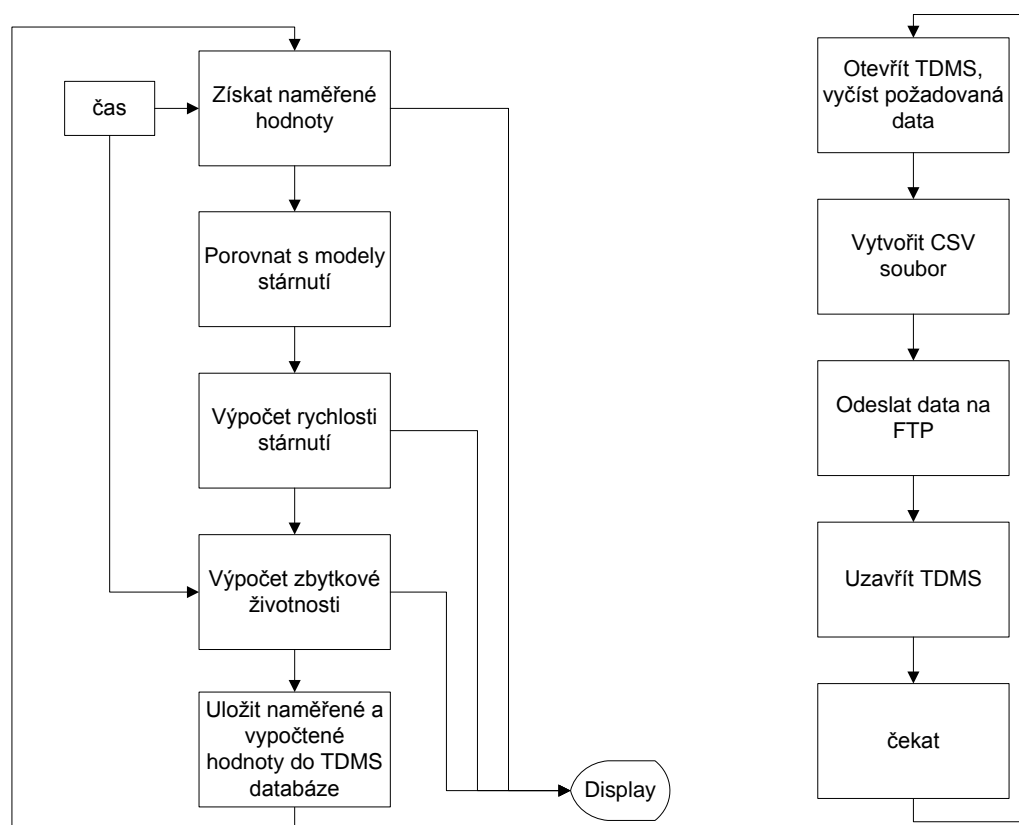


obr. 61: galvanické oddělení ethernetového přenosu pomocí optických převodníků

Toto oddělení neochrání měřicí zařízení, ale pouze datovou síť, do které je zařízení připojeno. Pro ochranu monitorovacího zařízení je nutné umístit převodníky mezi senzor a záznamové zařízení, což ovšem může negativně ovlivňovat měřený signál.

6.3.2 Vyhodnocovací jednotka

Vyhodnocovací jednotka v nekonečné smyčce opakuje dva cykly – výpočetní a zobrazovací. Výpočetní cyklus slouží k načtení vstupních dat a k samotnému výpočtu. Po té, co jsou načteny vstupní signály, jsou tyto hodnoty načteny do vstupních bufferrů vyhodnocovací jednotky. Tato následně dle předem daného modelu vypočítá relativní rychlost stárnutí a zbytkovou životnost. Vypočtené údaje jsou uloženy do databáze a zároveň do výstupního bufferu, který je uživatelsky nastavitelný za běhu programu. Uživatel tak může sledovat kromě aktuálního stavu též libovolně dlouhý interval předchozích záznamů. Tyto jsou zobrazovány v tabulce ale též graficky. Obojí se při načtení nové hodnoty vstupního parametru automaticky aktualizuje.



obr. 62: schéma vyhodnocovací jednotky programu Elmon II

Druhý cyklus načítá naměřené a vypočtené hodnoty z databáze, sestavuje z nich CSV soubor a odesílá je na vzdálený server. Takto je zabezpečen přenos dat na centrální úložiště, ale zároveň je možné takto poskytovat data např. externím expertům pro navazující analýzy.

Tyto dva cykly mohou být řešeny pomocí dvou nezávislých programů, což je vhodné zejména pokud jsou frekvence vykonávání obou cyklů velmi rozdílné. Je však nutné ošetřit situaci, kdy oba cykly potřebují pracovat s databází zároveň. Jelikož měřené parametry jsou jen pomalu proměnné, byly tyto cykly integrovány do jedné výpočetní smyčky, čímž se komplikace s dvojitým přístupem do téže databáze odstranila. Nevýhodou tohoto řešení je neoptimální využívání systémových prostředků.

6.3.3 Zobrazovací vrstva

Zobrazování měřených hodnot a dále dopočítávaných parametrů je možné jednak lokálně na zařízení, kde je program Elmon spuštěn, ale i vzdáleně. Lokální zobrazení je nutné nakonfigurovat při prvním spuštění. Některé parametry je možné měnit za běhu programu (například velikost zobrazované oblasti), některé jsou pevně stanovené. Lokálně zobrazovaný řídicí panel je na obr. 55. Tato verze obsahuje dva otočné voliče, kterými se nastavuje interval mezi měřeními a velikost výstupního bufferu. Dále je zde virtuální tlačítko na přenos datového souboru na externí FTP server.

Pro vzdálené zobrazení je využíváno shodné zobrazení, avšak bez ovládacích prvků. Toto zobrazení je však možné konfigurovat nezávisle na běhu programu a kdykoliv jej upravit dle aktuálních potřeb.

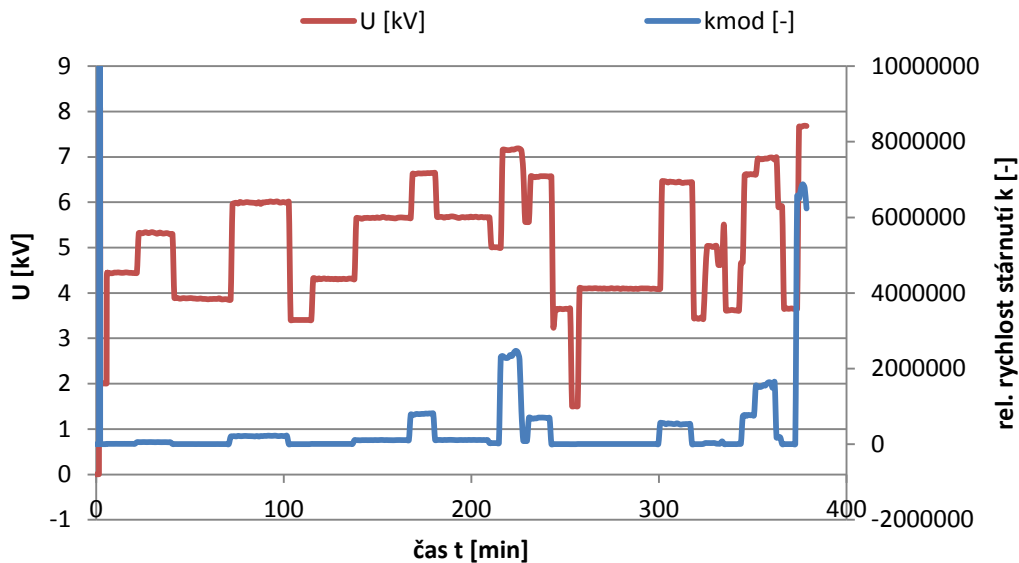
6.4 Ověření výpočtu na zjednodušeném modelu

Platnost navržené metodiky stanovení zbytkové životnosti, funkčnost měřícího řetězce a správnost následného zpracování byla ověřena experimentálně na zjednodušených modelech izolačních prvků.

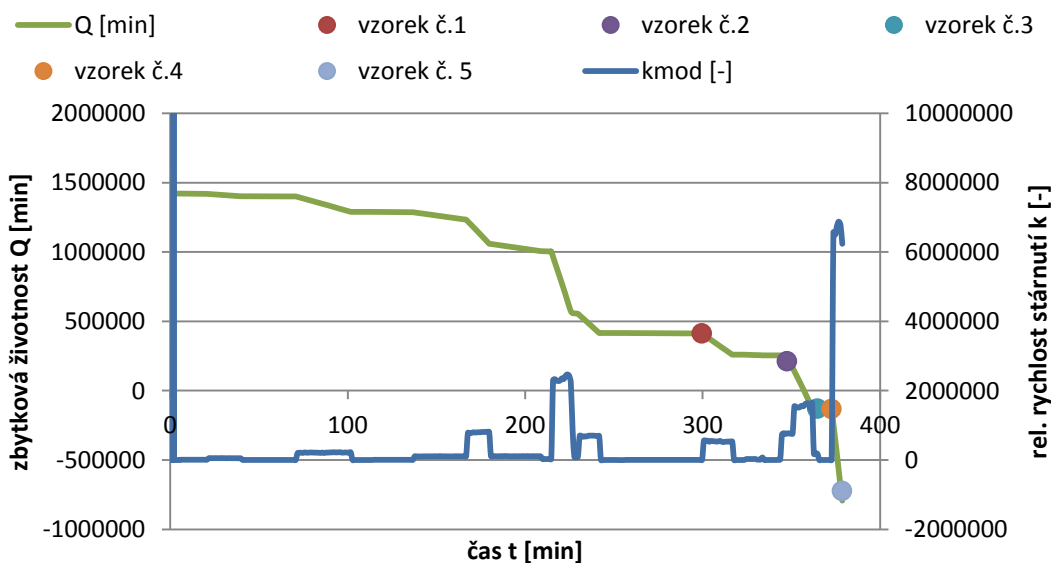
Pro ověření byly použity některé z naměřených modelů odolnosti z kapitoly 5.1. Pro jednofaktorové stárnutí elektrickým napětím byly zvoleny modely slunečnicový olej + transformátorová lepenka 0,2 mm, kapitola 5.1.3, obr. 49. Byly připraveny stejné vzorky jako pro sestavení modelu odolnosti a tyto vzorky byly umístěny do téhož zkušebního prostoru, kde na ně bylo přivedeno proměnné střídavé napětí. Amplituda napětí byla v náhodných časových intervalech zvyšována a snižována, což mělo simulovat proměnlivé zatížení materiálu v provozu. Bylo nutné volit intenzitu zatěžování s ohledem na sestavené modely odolnosti pro daný izolační systém. Příliš vysoké intenzity zatížení by vedly ke zkreslení výsledků vlivem odlišných fyzikálních dějů (resp. odlišných degradačních mechanismů). Příliš nízké hodnoty zatížení by přesnost výpočtu taktéž ovlivnily, avšak zejména v dlouhodobém sledování. Toto je způsobeno exponenciálním charakterem relativní rychlosti stárnutí.

Z měřeného napětí byly programem Elmon II vypočítány relativní rychlosti stárnutí a zbytková životnost, viz. obr. 63 až obr. 68. Hodnoty přiloženého napětí, relativní rychlosti stárnutí a zbytkové životnosti byly spolu s časovým razítkem ukládány do TDMS databáze. Tato byla následně otevřena v tabulkovém procesoru MS Excel a tyto údaje byly vyneseny do grafů.

Na obr. 63 jsou vyznačeny časové průběhy přiloženého střídavého napětí a tomu odpovídající relativní rychlosti stárnutí pro první sadu vzorků – izolační systém olej papír, kde pevná složka byla tvořena transformátorovou lepenkou tloušťky 0,2mm a kapalná čistým slunečnicovým olejem bez rafinace. Na obr. 64 je vypočtená relativní rychlosti stárnutí a zbytková životnost. V témže grafu jsou vyznačeny průřazy jednotlivých vzorků značených čísly 1 – 5.



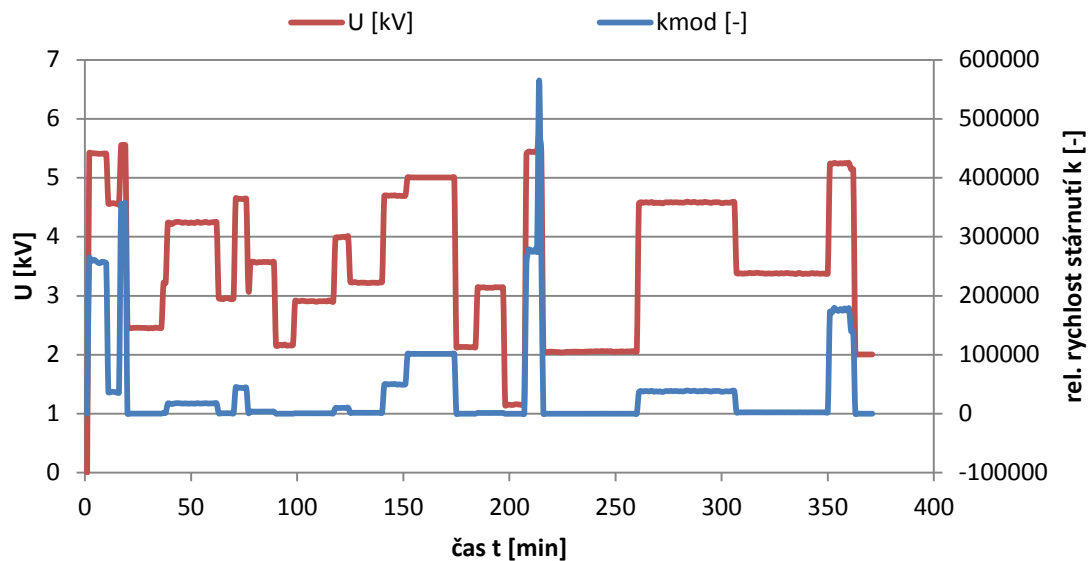
obr. 63: průběh napětí a relativní rychlosti stárnutí izolačního systému slunečnicový olej + transformátorová lepenka 0,2 mm v čase



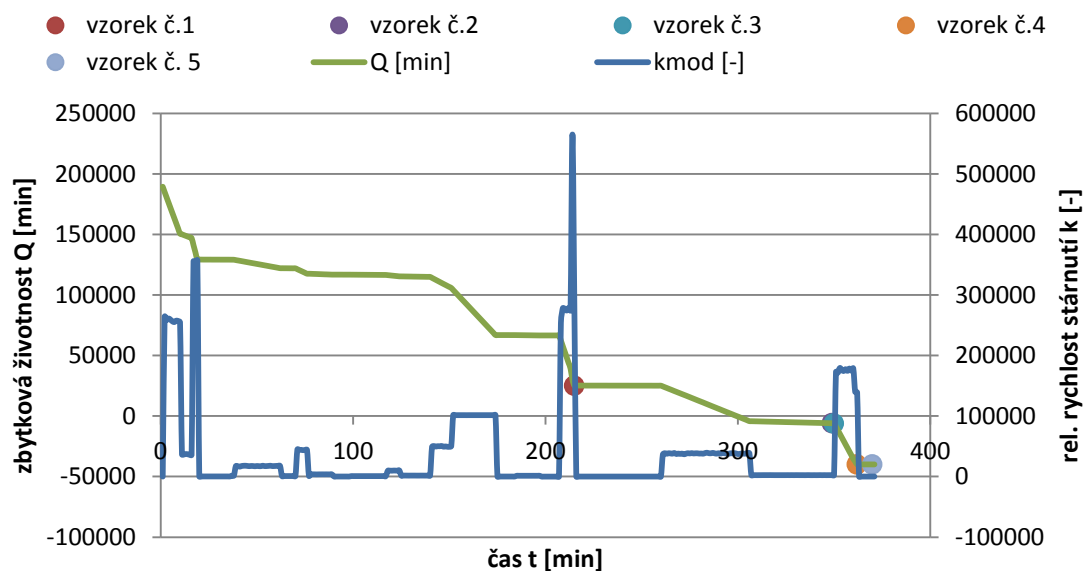
obr. 64: průběh relativní rychlosti stárnutí a zbytkové životnosti pěti vzorků izolačního systému slunečnicový olej + transformátorová lepenka 0,2 mm.

Jednotlivé vzorky byly proraženy v časech okolo předpokládané nulové životnosti. Je zde patrný značný rozptyl hodnot, který bude dále diskutován.

Dále byl proveden totožný experiment s již zestárnutým izolačním systémem, viz kapitola 5.1.3, obr. 50. Účelem bylo určit zbytkovou životnost izolačního systému v neznámém stavu (obdobně např. provozovaný transformátor) a dopočítat zbytkovou životnost pomocí téže metodiky.



obr. 65: průběh napětí a relativní rychlosti stárnutí izolačního systému slunečnicový olej + transformátorová lepenka 0,2 mm v neznámém vstupním stavu

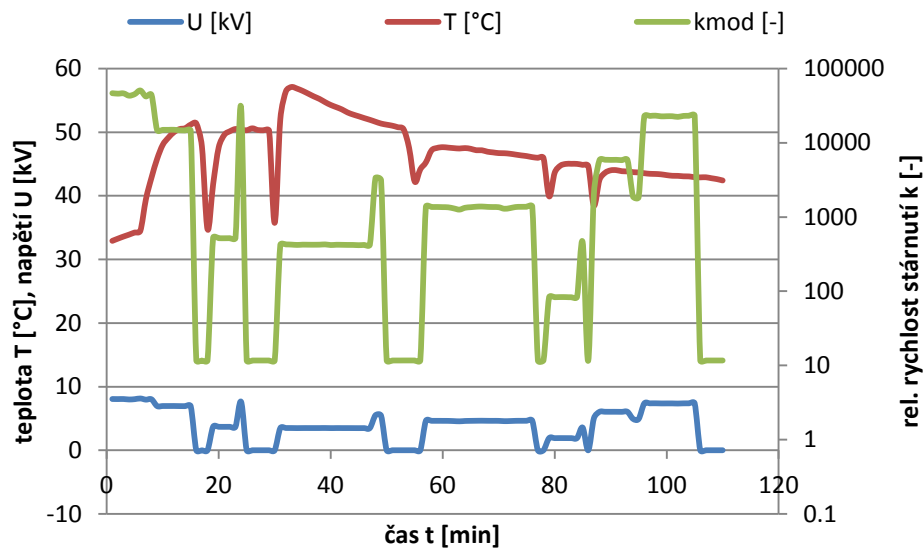


obr. 66: průběh relativní rychlosti stárnutí a zbytkové životnosti pěti vzorků izolačního systému slunečnicový olej + transformátorová lepenka 0,2 mm v neznámém vstupním stavu

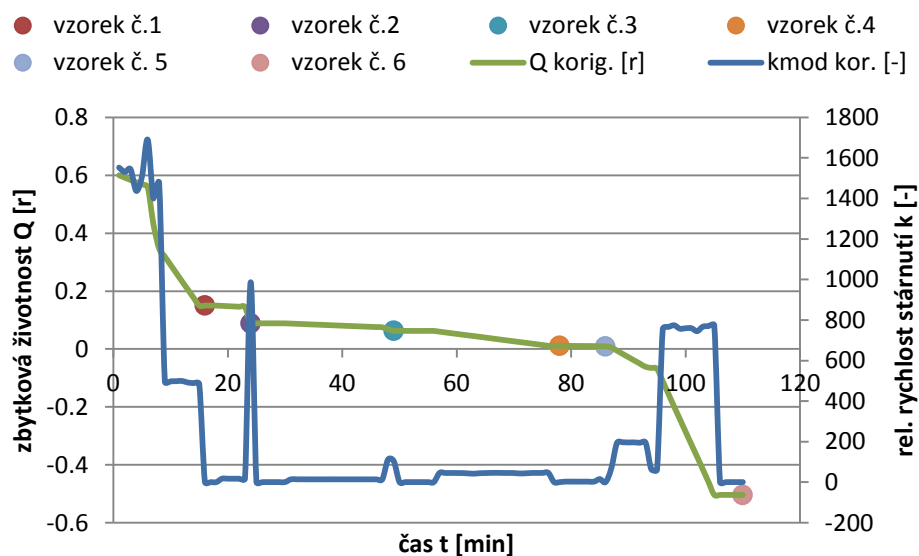
U obou ověřovacích experimentů byla určena inherentní životnost extrapolací křivky modelu odolnosti. V případě nových materiálů se jednalo o inherentní životnost 1 548 124 minut. V případě vzorků „neznámého stáří“ byla stanovena inherentní životnost na 189 442 minut. S ohledem na intenzitu namáhání (míru extrapolace použitého modelu) lze považovat rozptyl hodnot za uspokojivý.

Obdobným způsobem byl proveden ověřovací experiment s dvoufaktorovým modelem. Z bezpečnostního hlediska byly použity vzorky suché transformátorové lepenky tloušťky 1mm o rozměrech 100 x 100 mm, nikoliv systém olej-papír.

Pro předpokládaný teplotní profil byla korigována inherentní životnost na 0,65 roku. Aby bylo dosaženo koncového bodu v rozumně krátkém čase při zachování totožných degradačních mechanismů, byla průměrná rychlost stárnutí vzorku 250x. K dosažení koncového bodu došlo přibližně po 2 hodinách, viz obr. 68.



obr. 67: průběh degračních mechanismů a relativní rychlosti stárnutí v čase



obr. 68: průběh relativní rychlosti stárnutí a zbytkové životnosti šesti vzorků transformátorové lepenky dle předchozího průběhu zatěžování

Výše uvedené experimenty byly provedeny pro ověření výpočetní metodiky. Zároveň byla ověřena správnost setavení matematických modelů odolnosti daného izolačního systému pro vysoké intenzity zejména elektrického namáhání zkoumaných vzorků. Vzhledem k stochastickému charakteru degračních reakcí nelze očekávat, že dojde k poruše vzorku v přesně vypočteném okamžiku. Tato předpověď je vždy zatížena určitým rozptylem, který je úměrný rozsahu namáhání materiálu a nepřímo úměrný době trvání experimentu. Rozptyl hodnot v uvedených experimentech je způsoben zejména vysokou intenzitou namáhání vzorků, která byla takto volena z časových důvodů a strmými změnami degračního faktoru.

Shrnutí ověřovacích experimentů je provedeno v tab. 10. Inherentní životnost každé sady je 100%. V tabulce jsou doby do průrazu jednotlivých vzorků vztaženy k inherentní životnosti.

tab. 10: shrnutí ověřovacích experimentů

	nový izolační systém slunečnicový olej + transformátorová lepenka, jednofaktorový experiment	zestárý izolační systém slunečnicový olej + transformátorová lepenka, jednofaktorový experiment	transformátorová lepenka suchá - dvoufaktorový experiment	transformátorová lepenka suchá - dvoufaktorový experiment, vyloučen vzorek č. 6
Q1/Qi [%]	73,4	86,7	75,0	75,0
Q2/Qi [%]	86,3	103,1	85,2	85,2
Q3/Qi [%]	108,3	103,2	89,6	89,6
Q4/Qi [%]	108,4	121,1	98,2	98,2
Q5/Qi [%]	146,7	121,1	98,5	98,5
Q6/Qi [%]	-	-	184,0	x
aritmetický průměr	104,62	107,04	105,06	89,28
směrodatná odchylka	27,90	14,48	39,65	9,80
variační koeficient	26,67%	13,52%	37,74%	10,97%
standardní nejistota typu A	16,22	8,42	21,04	5,70

První vzorek izolačního systému s novým slunečnicovým olejem havaroval v 73,4 % predikované inherentní životnosti. Průměr celé sady je 104,62 %. Nejvyšší rozptyl vykazovaly vzorky suché transformátorové lepenky podrobené dvoufaktorovému stárnutí. Prvních pět vzorků bylo konzistentních, šestý vzorek havaroval po uplynutí doby ekvivalentní dvojnásobku inherentní životnosti. Vyhodnocení bylo provedeno i pro případ, kdy byl tento vzorek vyřazen, jako odlehlý.

Střední hodnota doby života každé sady vzorků odpovídá s rozdílem cca 10 % inherentní životnosti, což potvrzuje správnost matematického modelu i výpočtu.

6.5 Aplikovatelnost na jiné izolační systémy

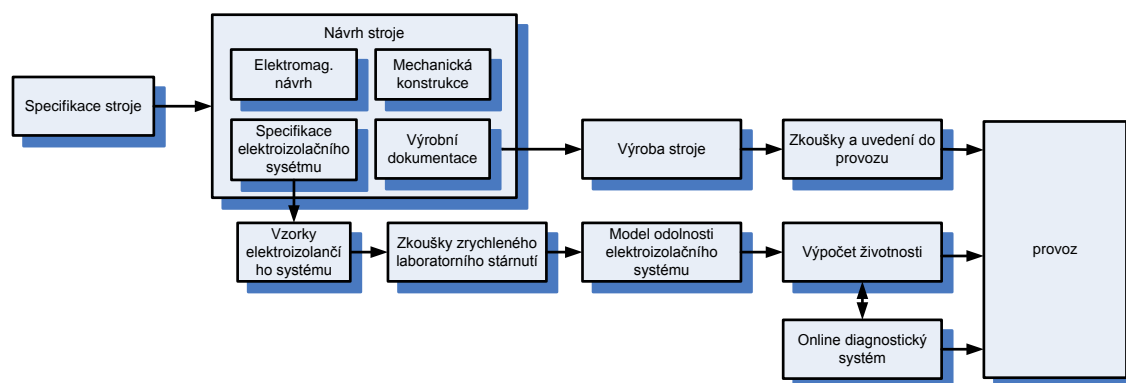
Postup popsany v předchozí kapitole je obecně platný i pro jiné elektroizolační systémy. Základem je vytipování nejslabšího místa izolačního systému a získání jeho modelu odolnosti. Následuje sestavení diagnostického řetězce, sběr dat a jejich analýza. Výpočetní algoritmus je univerzálně platný.

V případě transformátorů spočívá důkladný rozbor elektroizolačního systému v detailním studiu konstrukčních podkladů. Velmi vhodné je využití modelů konečných prvků, zejména pro řešení elektrických a teplotních polí. Kritická místa jsou zkoumána v různých provozních režimech s ohledem na reálné zatížení stroje. Stejným způsobem je nutné analyzovat lokality, ve kterých je možné on-line měření degradačních parametrů. Dále je nezbytné nalezení přepočetniho vztahu (korekčního koeficientu) mezi nejvíce namáhaným místem izolačního systému a mezi místem měření. Pro jednotlivé degradační mechanismy jsou zpravidla tato místa odlišná. Následně je možné určit, nebo použít již definované [108] modely odolnosti.

U nových transformátorů následuje sestavení měřících řetězců pro on-line měření. U již provozovaných transformátorů lze využít stávající monitorovací systémy, pokud jsou jimi vybaveny, případně je domontovat dodatečně. V tom případě je nutné definovat stupeň degradace izolačního systému v okamžiku spuštění výpočtu a zadat vstupní inherentní životnost.

Měřené signály zpravidla nejsou vhodné pro přímé zpracování a je tedy nutné použít převodníky, které umožní přenos signálů na větší vzdálenosti (zabránění elektromagnetickému rušení) a další zpracování. V případě výkonových transformátorů se často používají převodníky na proudový signál 4-20 mA, který je odolný vůči rušení, následně je nutné data digitalizovat a předat k následnému zpracování a archivaci.

Obdobným způsobem lze postupovat pro jiné elektroizolační systémy. Schematické znázornění postupu implementace výpočtu zbytkové životnosti do návrhu elektrického stroje je na obr. 69.



obr. 69: schéma postupu implementace výpočtu zbytkové životnosti do výroby elektrického stroje

6.6 Srovnání s komerčně dostupnými CBM systémy

V současné době je na trhu celá řada monitorovacích systémů pro transformátory, které jsou schopny měřit a zaznamenávat různé diagnostické parametry. Tyto systémy jsou v praxi nasazovány na významné autotransformátory v přenosové síti, případně na významné blokové transformátory v elektrárnách. Data jsou k dispozici operátorům v reálném čase a zároveň jsou ukládána do databází.

Úskalím těchto monitorovacích systémů v praxi je způsob vyhodnocení a zpracování dat. Tyto systémy generují velké množství informací, měřených hodnot, stavů, případně alarmů. Pro uživatele je následně obtížné všechna tato data zpracovávat. Některé z těchto systémů jsou schopny odhadovat zbytkovou životnost, na základě obecných modelů odolnosti - samozřejmě nejsou schopny identifikovat nejcitlivější místa sledovaného zařízení. Výpočty, resp. odhady zbývající životnosti proto nemohou být dostatečně přesné. Jedná se o seriové výrobky, které jsou obtížně přizpůsobitelné přímo na míru sledovanému zařízení.

Provozovatelé transformátorů jsou si vědomi úskalí, která monitorovací systémy přinášejí. Tyto otázky jsou řešeny v pracovní skupině CIGRÉ A2.23, jejímž výstupem je brožura č. 298 [119].

Porovnání monitorovacích přístrojů dostupných na trhu je uvedeno v příloze E.

7 Shrnutí dosažených výsledků a přínosy práce

Předložená dizertační práce řeší systematicky a komplexně stárnutí elektroizolačního systému olej-papír používaného ve výkonových transformátorech.

Nejvýznamnějším úkolem bylo nalezení metodiky pro hodnocení stavu izolačního systému elektrických strojů na základě online diagnostických metod. Zbytková životnost elektroizolačního systému byla zvolena jako komplexní ukazatel, který může být jednoduše porovnán a sloužit jako podpora manažerských rozhodnutí o údržbových činnostech. Problematika odolnosti izolačních systémů je velmi obsáhlá a komplexní, proto byla řešena s využitím informačních technologií. Byly vytvořeny výpočetní programy, které integrují diagnostické signály, zpracovávají naměřené hodnoty a vyhodnocují je. Celá problematika byla řešena v několika rovinách:

1. Elektroizolační systém byl podrobně popsán, dále byly určeny degradační mechanismy, které na něj za provozu působí.
2. Byly vybrány vhodné diagnostické parametry a signály, dále byly určeny lokality pro měření a bylo popsáno sestavení měřicího řetězce.
3. Následně byly určeny matematické modely pro vybrané degradační mechanismy se zaměřením na dostupné diagnostické signály.
4. Byly sestaveny experimentální měřicí řetězce, které online generovaly diagnostické signály. Tyto signály byly dále zpracovávány, případně upravovány pro přenos, následně přenášeny a archivovány v databázi.
5. Data změřená online byla porovnávána s modely odolnosti izolačního systému, vyhodnocena a byla vypočítána relativní rychlost stárnutí a zbývající životnost objektu.
6. Dále bylo popsáno celkové vyhodnocení stavu transformátoru, příp. izolačního systému na základě dat z online monitoringu, a toto korigováno se závěry profylaktických zkoušek.
7. Dále byl popsán odhad konce života při známém (předpokládaném) zatížení na základě aktuálního stavu pomocí extrapolace vývoje zbytkové životnosti v čase.

Cílem dizertační práce bylo rozpracovat výše zmíněné body a na jejich základě sestavit funkční prototyp zařízení pro online vyhodnocení diagnostických signálů a výpočet zbytkové životnosti izolačního systému. Celkový objem představených prací je velmi obsáhlý. Jednotlivé dílčí body byly řešeny postupně ve všech naznačených rovinách iterativním způsobem.

Byly navrženy a odzkoušeny programy pro výpočet zbytkové životnosti. Tyto programy jsou modulární, čili je možné je dále rozšířit, případně modifikovat. Jednotlivé dílčí součásti systému je možné nadále zpřesňovat, aby bylo určování aktuálního stavu a prognóza vývoje co nejpřesnější. S ohledem na ekonomickou náročnost je nutné najít kompromis, kdy je přesnost odhadu již dostatečná a přizpůsobení pro danou aplikaci je relativně jednoduché a rychle řešitelné.

Přínosy, které lze považovat za původní:

- Teoretický návrh metodiky výpočtu zbytkové životnosti elektrických strojů pro podporu manažerských rozhodnutí v oblasti prediktivní údržby

- Sestavení experimentálního diagnostického systému pro online monitoring vybraných parametrů
- Návrh a vývoj softwaru pro výpočet zbytkové životnosti izolačního systému
- Experimentální určení třífaktorového modelu odolnosti elektroizolačního systému olej-papír
- Ověřovací experimenty potvrzující správnost metodiky, modelů i výpočetního programu
- Celkové vyhodnocení stavu izolačního systému na základě dat z online monitoringu, možnost korekce se závěry profylaktických zkoušek

8 Závěr

Transformátory jsou z hlediska spolehlivosti klíčovými prvky elektrizačních soustav. Jejich spolehlivost je dána spolehlivostí jednotlivých podsystémů, z nichž nejcitlivější je zpravidla elektroizolační podsystém, který v důsledku limituje spolehlivost stroje.

V současné době celosvětově vzrůstá trend prodlužování životnosti transformátorů, což s sebou nese zvýšené nároky na diagnostiku, jakožto prostředek pro určování jejich stavu. Provozovatelé transformátorů potřebují pro svá strategická rozhodnutí přesné a srozumitelné podklady, na jejichž základě jsou schopni je efektivně spravovat. Jedná se například o plánování odstávek a údržby, povolené limity zatěžování, resp. přetěžování, či plánování generálních oprav nebo výměn. Tyto podklady může poskytnout pouze dlouhodobě a systematicky prováděná diagnostika. Současně se stárnutím transformátorové populace dochází ke zvyšování významu diagnostiky a ke hledání nových metod.

Velké výkonové transformátory a autotransformátory v přenosových sítích jsou již zpravidla vybaveny sofistikovanými monitorovacími systémy. Ty jsou však stále častěji nasazovány i na méně významné stroje. Připravují se standardy, dle kterých budou monitorovány i výkonové transformátory v distribučních sítích, minimálně základní diagnostické parametry.

Monitorované parametry jsou v reálném čase k dispozici na dispečerském stanovišti. Umožňují tedy hodnocení provozovaného transformátoru v reálném čase. V případě akutního prudkého zhoršení stavu sledovaného transformátoru jsou aktivovány alarmy, na které může dispečer ihned reagovat. Data jsou následně ukládána do databází pro následné zpracování. Kromě výše popsaného výpočtu zbytkové životnosti je možné například porovnávat mezi sebou totožné transformátory a identifikovat tak nesymetrie, či pomalu vznikající poruchy. Databáze mohou být dále sdíleny, případně do nich mohou mít přístup externí specialisté pro provádění periodických analýz.

Negativním aspektem, který ovlivňuje přesnost prováděných výpočtů a úvah je stochastický charakter degradačních procesů a tedy i parametrů, které jsou používány pro popis odolnosti izolačního systému. Je tedy nutné využívat statistické nástroje a chápat životnostní úvahy v pravděpodobnostním smyslu. Je nutné definovat přijatelnou míru rizika, že dojde k poruše izolačního systému dříve, než určí předpověď. Riziko lze minimalizovat zpřesňováním výpočetních modelů, častým prováděním periodických korekcí a zejména využitím více diagnostických metod v kombinaci.

Moderní monitorovací systémy umožňují provozovatelům přechod z tradičního pojetí asset managementu na moderní způsoby řízení. Využití pokročilých systémů údržby, jako je Condition Based Maintenance zvyšuje pohotovost a spolehlivost zařízení při současné úspoře finančních nákladů. Detailní znalost stavu elektroizolačního systému transformátorů umožňuje provozovatelům optimalizovat jejich využití, dává jim jistotu bezpečnosti při přetěžování a naopak umožňuje provozovat transformátory se sníženým výkonem na sklonku životnosti.

Použitá literatura

- [1] Fiala, P., „Systémy pro správu mobilních aktiv“. Automa. 2006. sv. 12, č. 12, s. 14-15. ISSN 1210-9592.
- [2] Tor, O.; Shahidehpour, M., "Power distribution asset management," *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006*.
- [3] Arshad, M.; Islam, S.M., "A Novel Fuzzy Logic Technique for Power Transformer Asset Management," *IEEE Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting*, vol.1, pp.276-286, Oct. 2006.
- [4] McGrail, A. J., "Asset management: Data and decisions," *Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT), 2011 IEEE PES* , pp.1-5, Nov. 2011.
- [5] Hakim, Y.; Sugiarto; Pharmatrisanti, A., "Transmission asset management in PLN P3B Jawa Bali," *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, pp.24-29, Sept. 2012
- [6] Mehairjan, R. P Y; Djairam, D.; Zhuang, Q.; Smit, J.J.; Van Voorden, A.M., "Statistical life data analysis for electricity distribution cable assets — An Asset Management approach," *Asset Management Conference 2011, IET and IAM* , pp.1-6, Dec. 2011.
- [7] Davidson, I.E., "Utility asset management in the electrical power distribution sector," *Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa*, pp.338-343, July 2005.
- [8] Meili Cheng; Yuan Zeng; Ruixin Niu; Yaoheng Chen, "Study on the model of advanced asset management in smart grid," *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th*, pp.781-785, July 2011.
- [9] Bastian, P., a kol.: *Praktická elektrotechnika*, 2. vyd., Praha: Europa Sobotáles, 2006, 303 s., ISBN 80-86706-15.
- [10] Higgs, M.A., "Electrical SCADA systems from the operators perspective," *IEE Seminar on Condition Monitoring for Rail Transport Systems (Ref. No. 1998/501)*, pp.3/1,3/4, 10 Nov 1998.
- [11] IEEE Standard for SCADA and Automation Systems," *IEEE Std C37.1-2007 (Revision of IEEE Std C37.1-1994)* , pp.1-143, May 2008.
- [12] Zápotocká, A.; Janeček, P., *Predikce vyrobené elektrické energie z větrných farem na základě dostupných meteorologických dat*, *ELECTRIC POWER ENGINEERING* 2013, 5.2013, Kouty nad Desnou
- [13] Detyniecki, M.; Marsala, C.; Krishnan, A.; Siegel, M., "2012 IEEE International Conference on Weather-based solar energy prediction," *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, pp.1-7, June 2012.
- [14] Wang Chao; Wang Qiang; Liu Yuanlong; Wang Su; Tian Lihui; Luo Ludong, "Applications of GIS to Power Distribution Dispatching and analysis of technical questions," *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, pp.1-5, Sept. 2010.
- [15] Endrenyi, J. at al, "The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability," *IEEE Transactions on Power Systems* , vol.16, no.4, pp.638-646, Nov 2001.
- [16] Yang, S. K., "A condition-based failure-prediction and processing-scheme for preventive maintenance," *IEEE Transactions on Reliability*, vol.52, no.3, pp.373-383, Sept. 2003.
- [17] Bi Pengxiang; Xue Jun; Ni Jianli; Zhang Hongyun; Feng Tao; Li Manyuan, "Practice And Strategy For Condition Based Maintenance of Power Supply Equipment," *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES* , pp1-5, 2005.

- [18] Maity, A.; Zaremby, D.; McMullen, D.; Gomez, J., "Automated scheduling using Condition Based Maintenance," IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM), 2011, pp.1-8, June 2011.
- [19] Kornhuber, S., Kouzmine, O., Schreiter S., „Transformer Fleet Management as Approach for Risk Based Asset Management“, Conference on Diagnostics in Electrical Engineering CDEE 2013, Plzeň.
- [20] SKF, „Proaktivní údržba zaměřená na spolehlivost“, URL: http://www.skf.com/portal/skf_cz/home/services?paf_dm=shared&paf_gear_id=19100403&contentId=261675&action=viewDetail&lang=cs, [cit. 1.6.2013].
- [21] Proactive Maintenance, URL: http://reliabilityweb.com/index.php/maintenance_tips/definition_proactive_maintenance/, [cit. 1.6.2013].
- [22] Elmakis, D.; Levy, P., "Reliability Calculation under Planned Maintenance," IEEE Transactions on Power Systems, vol.2, no.1, pp.1-7, Feb. 1987.
- [23] CMMS Condition Monitoring & Maintenance Systems, „Zavedení prediktivní údržby: výhody a nevýhody“, URL: <http://www.cmms.cz/řízení-udrzby/214-zavedeni-prediktivni-udrby-vyhody-a-nevyhody-.html>, [cit. 1.6.2013].
- [24] Kváč, J., „Inteligentní strategie údržby s řídicím systémem Simatic PCS 7“, Automa- časopis pro automatizační techniku, vol. 12, no. 12, 2006, ISSN 1210-9592.
- [25] Wang, Ling; Jian Chu; Weijie Mao; Yongfeng Fu, "Advanced Maintenance Strategy for Power Plants - Introducing Intelligent Maintenance System," The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, WCICA 2006., vol.2, pp.7444-7448, 2006.
- [26] Mentlík, V.; Pihera, J.; Polanský, R.; Prosr, P.; Trnka, P., „Diagnostika elektrických zařízení“, 1. vyd, Praha: BEN – technická literatura, 2008, 439 s., ISBN 978-80-7300-232-9.
- [27] Asmai, S.A.; Hussin, B.; Yusof, M.M., "A Framework of an Intelligent Maintenance Prognosis Tool," International Conference on Computer Research and Development, pp.241-245, May 2010.
- [28] Yang Yong; Wen Shan, "Distributed Intelligent Maintenance System for CNC Machine Tools Based on Kansei Engineering," International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009. AICI '09., vol.4, pp.467-471, Nov. 2009.
- [29] Ekanayake, J.; Liyanage, K.; Wu, J.; Yokoyama, A.; Jenkins, N., „Smart Grid technology and applications“, 3. vydání, John Wiley & Sons, 2012, ISBN: 978-0-470-97409-4.
- [30] Klempner, G.; Kerszenbaum, I., „Handbook of large turbo-generator operation and maintenance“, 2. vydání, John Wiley & Sons, 2008, ISBN: 978-0470-16767-0.
- [31] Kerszenbaum, I., „Inspection of Large Synchronous Machines, Checklists, Failure Identification and Troubleshooting“, IEEE Press Power Systems Engineering Series, 1996, ISBN: 0-7803-1148-5.
- [32] Bezděkovský J.; Stauber J.; Krupauer P., „Statistické metody pro posuzování kvality izolace statorového vinutí velkých točivých strojů“, Diagnostika 09, Plzeň, 2009, ISBN: 978-80-7043-793-3.
- [33] Bezděkovský J.; Krupauer P., „Statistical methods for appraisal of quality of stator winding insulation of big rotating machines“, Electroscop, No.1, 2009, URL: <http://www.cogebi.com/attachments/163/Article.pdf>, [cit. 10.6.2013].
- [34] Montanari, G.C.; „A comparative investigation of electrothermal endurance models for insulating materials and systems characterization," Electrical Insulation Magazine, IEEE , vol.13, no.3, pp.13-25, May-June 1997.
- [35] Mentlík, V., Dielektrické prvky a systémy, 1. vyd., Praha: BEN – technická literatura, 2006, 235 s., ISBN 80-7300-189-6.
- [36] Kimura, K., "Multistress aging of machine insulation systems," Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1995. pp.205-210, 22-25 Oct 1995.

- [37] Kimura, K.; Kaneda, Y.; Itoh, K., "A new approach to breakdown voltage and nondestructive parameters of micaceous insulation systems," *Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1991, pp.769-772 vol.2, 8-12 Jul 1991.
- [38] Gektin, V.; Bar-Cohen, A.; Witzman, S., "Coffin-Manson based fatigue analysis of underfilled DCAs," *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A*, vol.21, no.4, pp.577-584, Dec 1998.
- [39] Nicholas, T., „High Cycle Fatigue: Mechanics of Materials Perspective“, Elsevier, Oxford, 2006, ISBN: 978-0-08-044691-2.
- [40] Petrov, G. N., *Elektrické stroje 2*, Academia, 1. vydání, 732 s., Praha, 1982.
- [41] Van Brunt, R.J., "Stochastic properties of partial-discharge phenomena," *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, vol.26, no.5, pp.902-948, Oct 1991.
- [42] Crine, J.-P. ; Parpal, J.-L. ; Dang, C., "A new approach to the electric aging of dielectrics," *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1989. Annual Report., pp.161-167, Oct-Nov 1989.
- [43] Mentlík, V.; Trnka, P.; Trnková, M.; Šašek, L., „Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie“, 1. vyd., Praha: BEN – technická literatura, 2011, 118 s., ISBN 978-80-7300-4.
- [44] Novotný, R., „Weibullovo rozdělení při analýzách bezporuchovosti“, *Elektrorevue*, časopis pro elektrotechniku, březen 2002, ISSN 1213-1539.
- [45] Hongye, G.; Lin, R., "Design of wireless powered RF temperature monitoring system applied to the rotor of generators," *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp.1-4, Aug. 2011.
- [46] ČSN EN 60216-1, „Elektroizolační materiály – Vlastnosti tepelné odolnosti – Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky, ČNI, 2002.
- [47] ČSN EN 60212, „Standardní podmínky používané před zkoušením a během zkoušení pevných elektroizolačních materiálů“, ÚNMZ, 2011.
- [48] Parpal, J.-L.; Crine, J.-P.; Dang, C., "Electrical Aging of Extruded Dielectric Cables, A Physical Model", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 4, No. 3, pp. 197-209, April 1997.
- [49] Mazzanti, G. "The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage ac cables", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol.16, no.4, pp.1168-1179, August 2009.
- [50] Crine, J. -P, "AC and DC Electrical Aging of Polyethylene," *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP 2008.* , pp.60-62, Oct. 2008.
- [51] Kocour, S., „Nelineární regresní analýza a příklady použití“, bakalářská práce, vedoucí B. Šedivá, KMA FAV, Západočeská univerzita v Plzni, 2010.
- [52] Gjaerde, A.C., "Multi-factor ageing models-origin and similarities," *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1995, pp.199-204, Oct 1995.
- [53] Srinivas, M. B.; Ramu, T. S., "Multifactor aging of HV generator stator insulation including mechanical vibrations," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol.27, no.5, pp.1009-1021, Oct. 1992.
- [54] Ding Xiaoxia; Liu Xuezhong; Zhang Jianjun; Zhang Tianlong; Bai Yonggang; Ren Wene, "Study on multi-factor aging characteristics of stator insulation for wind turbine generator," *IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 2012, pp.1-4, July 2012.
- [55] Cygan, S.P.; Laghari, J.R., "Effects of multistress aging (radiation, thermal, electrical) on polypropylene," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, , vol.38, no.3, pp.906-912, Jun 1991.

- [56] Agarwal, V.K.; Banford, H. M.; Bernstein, B.S.; Brancato, E.L.; Fouracre, R.A.; Montanari, G. C.; Parpal, J. -L; Seguin, J.-N.; Ryder, D.M.; Tanaka, J., "The mysteries of multifactor ageing," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol.11, no.3, pp.37-43, May-June 1995.
- [57] Boček, V.; Matějka, F., „Možnosti stanovení korelačního koeficientu pro dvě měřené veličiny při teplotním stárnutí, Diagnostika '09, Západočeská univerzita v Plzni, s. 236-239, ISBN: 978-80-7043-793-3, 2009.
- [58] Frk, M., Vliv vícefaktorového namáhání na elektrické vlastnosti izolačních materiálů, Diagnostika '09, Západočeská univerzita v Plzni, s. 21-24, ISBN: 978-80-7043-793-3, 2009.
- [59] IEC 60076-7 "PowerTransformer -Part 7: Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers", Dec. 2005.
- [60] Farahani, M.; Gockenbach, E.; Borsi, H.; Schäfer, K.; Kaufhold, M., "Behavior of machine insulation systems subjected to accelerated thermal aging test," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.17, no.5, pp.1364-1372, October 2010.
- [61] Willis, H. L., „Power Distribution Planning Reference Book“, 2. vyd., Taylor & Francis, 1258 s., 2010, ISBN: 978-08-2474-875-3.
- [62] Ďurovič, M. a kol., „Restaurování a konzervování archiválií a knih“, Paseka, 517 s., 2002, ISBN 80-7185-383-6.
- [63] Clark, F. M., "Factors influencing the mechanical strength of cellulose insulation," Electrical Engineering , vol.60, no.7, pp.778,783, July 1941.
- [64] Hammer, M., Ertl, J., Barvenčík, O., Kutálek, D., „Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů, Elektrotechnika, časopis pro elektrotechniku, říjen 2011, ISSN 1213-1539.
- [65] Baburao, K.; Bhangre, N.M.; Wagle, A.M.; Venkatasami, A.; Chaudhari, S.E., "The experience of DP and furan in remnant life assessment of power transformer," International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. pp.555-558, April 2008.
- [66] 1547.3-2007 - IEEE Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected With Electric Power Systems.
- [67] Trnka, P., Pihera, J., Svoboda, M., Souček, J., „New challenges in PD measurement“, IEEE International Conference on Solid Dielectrics 2013.
- [68] Trnka, P., „Životnost izolačního systému VPI při pulzním namáhání“, Electroscopic, online časopis pro elektrotechniku, č. 0, r. 2007, ISSN: 1802-4564.
- [69] Trnka, P., Polanský, R., „Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír“, Electroscopic, online časopis pro elektrotechniku, č.1, r. 2007, ISSN: 1802-4564.
- [70] Van Breen, H.J.; Gulski, E.; Smit, J.J.; Verhaart, H. F A; Wout de Leeuw, "Experience with on-line PD measurements on generators in frequency and time domain," IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.31-35, Apr 2002.
- [71] Wan Yuan; Gong Chuangli; Wei Zhipeng; Deng Pengcheng; Li Yun, "High Reliable Partial Discharge Online Monitoring System of Hydro-generator," International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), vol.2, pp.320-323, Jan. 2011.
- [72] Du Yu; Liu Jing; Wu Shengbin; Zhang Aide; Zhu Hesun; Zhou Chao, "Study on On-line Monitoring of Temperature of Transformer Winding Based on Distributed Fiber Optical Temperature Sensing Technology," International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, pp.250-253, June 2006.
- [73] Ukil, A.; Braendle, H.; Krippner, P., "Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications," IEEE Sensors Journal, vol.12, no.5, pp.885-892, May 2012.
- [74] Kumbhar, G.B.; Kulkarni, S.V., "Analysis of Short-Circuit Performance of Split-Winding Transformer

- Using Coupled Field-Circuit Approach," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.22, no.2, pp.936-943, April 2007.
- [75] teNyenhuis, E.G.; Girgis, R.S.; Mechler, G.F.; Zhou, G., "Calculation of core hot-spot temperature in power and distribution transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.17, no.4, pp.991-995, Oct 2002.
- [76] Rele, A.; Palmer, Selwyn, "Determination of temperatures in transformer windings," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.94, no.5, pp.1763-1769, Sept. 1975.
- [77] Chu, D.; Lux, A., "On-line monitoring of power transformers and components: a review of key parameters," Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp.669-675, 1999.
- [78] Yuan Li; Ming-jie Tang; Jun-Bo Deng; Guan-Jun Zhang; Shu-hong Wang, "An approach to aging assessment of power transformer based on multi-parameters," International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis CMD2012, pp. 357-360, Sept. 2012.
- [79] Meloun, M.; Militký, M., „Kompendium statistického zpracování dat“, Univerzita Karlova, 3. vyd., 982s, Praha 2012, ISBN: 978-80-246-2196-8.
- [80] Zpráva o kvalitě 2015, Energetický regulační úřad, dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462796/Zprava_o_kvalite_2015.pdf/de14b8bc-ccf6-4ed5-9951-f0b943f91ec4, cit. 12.7.2016
- [81] Chong, Li, Kai. Wu, Baosheng. He.: Effect of moisture on the accuracy to predict failure probability of oil-paper insulation using multiple parameters, 19th international Symposium on High Voltage Engineering, Plzeň, 08/2015
- [82] ISO 760: Determination of water -- Karl Fischer method (General method), 1978, rev. 2016
- [83] WG A2.37, Transformer reliability survey, Electra, 2016
- [84] Vaisala MMT 330 – Moisture and Temperature Transmitter Series for Oil, webová prezentace, URL: <http://www.vaisala.com/en/products/moistureinoil/Pages/MMT330.aspx>, cit.: 5.8.2016
- [85] Hydran M2, GE, webová prezentace, URL: <https://www.gegridolutions.com/md/catalog/hydranm2.htm>, cit.: 5.8.2016
- [86] Megger IDAX 300, webová prezentace, URL: <http://www.megger.cz/wp-content/uploads/2013/06/Prospekt-IDAX-300-350.pdf>, cit.: 5.8.2016
- [87] Mentlík, V., Trnka, P., Dončuk, J., Svoboda, M., Souček, J.: Analýza vlivů chodu transformátorů ČEPS - II. Část, výzkumná zpráva, RICE ZČU, Plzeň 2014
- [88] Dreier, L.: Manufacturing and properties of transformerboard, Weidmann transformer seminar 2015, Pfaffikon, 23.-25.4.2015
- [89] Perjanik, N.: Insulating Fluid Assessment & Dissolved Gas Analysis (DGA), Weidmann transformer seminar 2015, Pfaffikon, 23.-25.4.2015
- [90] IEEE Std.57.104: IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE, NY 10016-5997, USA, 2009, ISBN 978-0-7381-5835-8
- [91] <http://www.monhart-akustik.cz/>
- [92] MESSKO, modulární teplotní měřicí systém, URL: http://www.reinhausen.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-283/122_read-70/, cit. 12.10.2016
- [93] ČSN IEC 60076-7 (351001). Výkonové transformátory : Směrnice pro zatěžování olejových výkonových transformátorů. Český normalizační institut : Praha, 2007. 52 s.
- [94] Winders, J. J. Power Transformers : Principles and Applications. New York: Marcel Dekker, 2002. 286 s. ISBN 0-8247-0766-4.
- [95] Heatcote, M. J. J&P Transformer book. Oxford : Elsevier, 2008. 969 s. ISBN 978-0-7506-8164-3

- [96] ČSN IEC 60076-2 (351001). Výkonové transformátory : Oteplení transformátorů ponořených do kapaliny. Český normalizační institut : Praha, prosinec 2011. 42 s.
- [97] Mentlík, V., a kol.: Diagnostika elektrických zařízení. Praha : BEN – technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [98] IEEE Guide for loading Mineral Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators
- [99] L. W. Pierce, "An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding," IEEE Transaction on Power Delivery., vol. 7, no. 3, pp. 1347–1358, Jul. 1992.
- [100] Susa, D.; Nordman, H., "A Simple Model for Calculating Transformer Hot-Spot Temperature," IEEE Transactions on Power Delivery, , vol.24, no.3, pp.1257-1265, July 2009
- [101] Josue, F.; Arifianto, I.; Saers, R.; Rosenlind, J.; Hilber, P.; Suwarno, "Transformer hot-spot temperature estimation for short-time dynamic loading," International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2012), pp.217-220, 23-27 Sept. 2012
- [102] Oommen, T. V.; Prevost, T.A., "Cellulose insulation in oil-filled power transformers: part II maintaining insulation integrity and life," Electrical Insulation Magazine, IEEE , vol.22, no.2, pp.5,14, March-April 2006
- [103] IEC 60076-3, Annex A „Application guide for partial discharge measurements during a.c.withstand voltage test on transformer
- [104] IEC 60270 (2000), Partial discharge measurements
- [105] IEEE C57.12.90 (1999)
- [106] Increasing Transformer Reliability by Proactive Bushing Fleet Management, INMR, Dec. 2016
- [107] ČSN EN 60156:1998
- [108] Moser, H.P.: Transformerboard, Rapperswil, Switzerland, Scientia Electica / H. Weidmann AG, 1979
- [109] ČSN EN 60296 ed.2 „Kapaliny pro elektrotechnické aplikace“, listopad 2012
- [110] ČSN EN 60666 „Zjištění a určení specifických přísad v minerálních izolačních olejích“, únor 2011
- [111] Metodika AZVN ZM-16/2012 „Stanovení mezipovrchového napětí olej – voda a stanovení hustoty hustoměrem“
- [112] ČSN EN 60247 „Izolační kapaliny – Měření reaktivní permitivity, dielektrického ztrátového činitele (tan delta) a rezistivity při stejnosměrném napětí“
- [113] ČSN EN 62021 „Izolační kapaliny – Stanovení čísla kyselosti“
- [114] ČSN EN 60422 ed.2 „Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních – Návod pro kontrolu a údržbu“,
- [115] Kocour, S. – Nelineární regresní analýza a příklady použití, bakalářská práce, vedoucí B. Šedivá, KMA FAV, Západočeská univerzita v Plzni, 2010
- [116] ČSN EN 61649 Weibullova analýza, červenec 2009
- [117] ČSN EN 61198
- [118] Pettersson, L., Fantana, N. L., Sundermann, U.: „Life Assessment: ranking of power transformers using condition-based evaluation, a new approach“, CIGRÉ konference Paříž, p. 12-204, 1998
- [119] CIGRÉ brožura č. 298 -- Guide on transformer lifetime data management, 2006
- [120] Lewand, L.: Understanding Water in Transformer Systems, Chemist’s perspective, 2002
- [121] CIGRÉ brožura č. 659 – Transformer thermal modelling, 2016

Vlastní publikace

- [I] SVOBODA, M. Čištění povrchu epoxidových izolátorů, bakalářská práce, FEL ZČU, Plzeň, 2010.
- [II] SVOBODA, M. Condition Based Management elektrických zařízení, diplomová práce, FEL ZČU, Plzeň, 2012.
- [III] SVOBODA, M. Životnost izolačních systémů pro podporu Condition Based Maintenance, teze dizertační práce, FEL ZČU, Plzeň, 2014.
- [IV] SOUCEK, J., SVOBODA, M., TRNKA, P.: Relation of electroinsulating fluids to the environment. In Diagnostika '11, Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s.181-184. ISBN: 978-80-261-0020-1
- [V] TRNKA, P., SVOBODA, M., SOUCEK, J.: Diagnostika elektroizolačních systémů pro zjišťování aktuální zbytkové životnosti. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) 2012. Brno: Brno University of Technology, 2012. s. 775-779. ISBN: 978-80-214-4514-7
- [VI] SOUCEK, J., TRNKA, P., SVOBODA, M.: Určování aktivační energie elektroizolačních systémů. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) 2012. Brno: Brno University of Technology, 2012. s. 781-84. ISBN: 978-80-214-4514-7
- [VII] SVOBODA, M., TRNKA, P. Online Hot Spot Calculation in Power Transformers. In Diagnostika '13 : Conference on Diagnostics in Electrical Engineering CDEE 2013. Pilsen: University of West Bohemia, 2013. s. 176-179. ISBN: 978-80-261-0210-6
- [VIII] **TRNKA, P., ŠIRŮČEK, M., SVOBODA, M., SOUČEK, J. Condition-based maintenance of high-voltage machines-a practical application to electrical insulation. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2014, roč. 30, č. 1, s. 32-38, IF: 1,322, ISSN: 0883-7554**
- [IX] MENTLÍK, V., TRNKA, P., SVOBODA, M., HORNAK, J., SOUČEK, J. Environmentally friendly electroinsulating fluids : perspective ways. In Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015). Plzeň: Západočeská univerzita, 2015. s. 1-4. ISBN: 978-80-261-0476-6
- [X] SOUČEK, J., HORNAK, J., MENTLÍK, V., TRNKA, P., SVOBODA, M. Diagnosis of dissipation factor and breakdown voltage of alternative insulating liquids. In Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015). Plzeň: Západočeská univerzita, 2015. s. 1-4. ISBN: 978-80-261-0476-6
- [XI] TRNKA, P., PIHERA, J., SVOBODA, M., : New challenges in partial discharge measurements. In 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Piscataway: IEEE, 2013. s. 75-78. ISBN: 978-1-4673-4459-3
- [XII] SVOBODA, M. Rostoucí význam diagnostiky v asset managementu elektrických strojů a zařízení. In Elektrotechnika a informatika 2013 část první - Elektrotechnika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 139-142. ISBN: 978-80-261-0233-5
- [XIII] TOMÁŠKOVÁ, T., SVOBODA, M., TRNKA, P. The influence of thermal properties of materials on electric insulating systems of electrical rotating machines. In DESAM 2014 : Diagnostic of Electrical Machines and Materials, 3rd International Conference : Proceedings. Žilina: University of Žilina, 2014. s. 82-87. ISBN: 978-80-554-0888-0

- [XIV] JANURA, R., JURČÍK, J., KORENČIAK, D., SVOBODA, M., TRNKA, P. Transformer insulation analysis using RVM. In DESAM 2014 : Diagnostic of Electrical Machines and Materials, 3rd International Conference : Proceedings. Žilina: University of Žilina, 2014. s. 21-25. ISBN: 978-80-554-0888-0
- [XV] SVOBODA, M. Dvoufaktorové modely odolnosti elektroizolačního systému výkonových transformátorů. In Elektrotechnika a informatika 2014. Část 1., Elektrotechnika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 127-130. ISBN: 978-80-261-0367-7
- [XVI] SVOBODA, M., TRNKA, P., MENTLÍK, V. Aplikace pro výpočet zbytkové životnosti elektroizolačního systému z hlediska elektrické degradace. 2014.
- [XVII] SVOBODA, M., TRNKA, P. Čtyřkanálový monitoring napětí s online zobrazováním. 2014.
- [XVIII] MENTLÍK, V., TRNKA, P., SVOBODA, M., HORNAK, J., SOUČEK, J., HARVÁNEK, L. Natural esters as a part of HV transformer insulation system. In Proceedings of the International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM 2015). Piscataway: IEEE, 2015. s. 148-151. ISBN: 978-1-4799-8903-4
- [XIX] HARVÁNEK, L., TOMÁŠKOVÁ, T., SVOBODA, M., MENTLÍK, V. Composites with nanosilica. In Proceedings of the International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM 2015). Piscataway: IEEE, 2015. s. 844-847. ISBN: 978-1-4799-8903-4
- [XX] SVOBODA, M., TRNKA, P., HARVÁNEK, L., HORNAK, J. Reliability of electrical insulating systems : statistical approach to empirical endurance models. In Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015). Plzeň: Západočeská univerzita, 2015. s. 1-5. ISBN: 978-80-261-0476-6
- [XXI] TUREČEK, O., SÝKORA, M., SCHLOSSER, M., KAREL, J., SVOBODA, M., KROFT, R. Metoda měření a lokalizace zdrojů hluku transformátoru. ETD Transformátory a.s., 2015.
- [XXII] TUREČEK, O., SÝKORA, M., KAREL, J., SCHLOSSER, M., SVOBODA, M. Lokalizace zdrojů hluku dílčích prvků transformátoru. ETD Transformátory a.s., 2015.
- [XXIII] TRNKA, P., SVOBODA, M., ŠIRŮČEK, M. Determination of criteria values for insulation systems based on natural esters. In International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2014). Piscataway: IEEE, 2014. s. 1-4. ISBN: 978-1-4799-6613-4
- [XXIV] TRNKA, P., SOUČEK, J., HORNAK, J., SVOBODA, M., KOLTUNOWICZ, T., GUTTEN, M. Statistical approach to endurance models : data processing using regression models. In Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2015. s. 238-241. ISBN: 978-1-4673-6788-2
- [XXV] SVOBODA, M., VALEČKA, M. Magnetic calculations using 3D FEM modeling for power transformers : handling specific issues. In Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2015. s. 631-633. ISBN: 978-1-4673-6788-2
- [XXVI] SVOBODA, M., HARVÁNEK, L. Online monitoring and lifetime estimations of materials for electrical insulation. In Proceedings of the International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM 2015). Piscataway: IEEE, 2015. s. 568 - 571. ISBN: 978-1-4799-8903-4
- [XXVII] MENTLÍK, V., TRNKA, P., SVOBODA, M., HORNAK, J., SOUČEK, J. Biodegradable esters : aspects of applicability criteria determination. In Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015). Plzeň: Západočeská univerzita, 2015. s. 1-

6. ISBN: 978-80-261-0476-6
- [XXVIII] MENTLÍK, V., TRNKA, P., DONČUK, J., SVOBODA, M., SOUČEK, J., TOMÁŠKOVÁ, T. Diagnostika a Life-Cycle Management transformátorů 2013 - 2014. ČEPS, a.s., 2013.
- [XXIX] SVOBODA, M., TRNKA, P., MENTLÍK, V., GUTTEN, M., JANURA, R. The influence of moisture on paper-oil insulation system aging. In DESAM 2014 : Diagnostic of Electrical Machines and Materials, 3rd International Conference : Proceedings. Žilina: University of Žilina, 2014. s. 77-81. ISBN: 978-80-554-0888-0
- [XXX] GUTTEN, M., BRANDT, M., JANURA, R., SVOBODA, M., TRNKA, P. Chromatography analysis of transformer in laboratory conditions. In DESAM 2014 : Diagnostic of Electrical Machines and Materials, 3rd International Conference : Proceedings. Žilina: University of Žilina, 2014. s. 16-20. ISBN: 978-80-554-0888-0
- [XXXI] SVOBODA, M. PARTIAL DISCHARGES IN ELECTRICAL MACHINES. In Sborník konference ELEN 2014. Praha: ČVUT, 2014.
- [XXXII] SVOBODA, M., TRNKA, P., SOUČEK, J. Electrical Material Model Aging for Online Diagnostic Systems. In Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Red Hook: Curran Associates, Inc., 2012. s. 987-990. ISBN: 978-1-4673-1020-8
- [XXXIII] TOMÁŠKOVÁ, T., SVOBODA, M., TRNKA, P. Vliv nano- a mikroplniv na šíření tepla elektroizolačními systémy. ElectroScope, 2013, roč. 2013, č. 2, s. 1-8. ISSN: 1802-4564
- [XXXIV] MENTLÍK, V., TRNKA, P., SVOBODA, M. Elektroizolační kapaliny akcentující životní prostředí. In Reotrib 2014 : kvalita paliv a maziv. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2014. s. 67-72. ISBN: 978-80-7080-885-6
- [XXXV] SVOBODA, M., TRNKA, P., KRPAĽ, O. PARTIAL DISCHARGES IN ELECTRICAL MACHINES. In Sborník konference ELEN 2014. Praha: ČVUT, 2014.
- [XXXVI] MENTLÍK, V., TRNKA, P., SVOBODA, M., HORNAK, J., TOTZAUER, P., HARVÁNEK, L. Aging phenomena of paper-oil insulating system under different voltage stress. In Proceedings of the International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM 2015). Piscataway: IEEE, 2015. s. 548-551. ISBN: 978-1-4799-8903-4
- [XXXVII] SVOBODA, M., TRNKA, P. Statistical Analysis of Data for Determining the Endurance of Electrical Insulation Systems. In Proceedings of the 14th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2013. Ostrava: VSB - Technical University, 2013. s. 281-284. ISBN: 978-80-248-2988-3
- [XXXVIII] TOMÁŠKOVÁ, T., SVOBODA, M., TRNKA, P. The influence of nano- and micro- fillers on heat transfer in electrical insulation system. In Diagnostika '13 : international conference. Pilsen: University of West Bohemia, 2013. s. 148-151. ISBN: 978-80-261-0210-6
- [XXXIX] TRNKA, P., SVOBODA, M., PIHERA, J. The specific aspects of degradation of electrical insulation under DC voltage. In 2013 Annual report Conference on electrical insulation and dielectric phenomena. Piscataway: IEEE Dielectrics and electrical insulation society, 2013. s. 112-115. ISBN: 978-1-4799-2596-4 , ISSN: 0084-9162
- [XL] SVOBODA, M., TRNKA, P. Visual effects of degradation processes on electrical insulation : electrical tree phenomena. In DESAM 2014 : Diagnostic of Electrical Machines and Materials, 3rd International Conference : Proceedings. Žilina: University of Žilina, 2014. s. 72-76. ISBN: 978-80-554-0888-0
- [XLI] SVOBODA, M., POLANSKÝ, R., ULRYCH, J., PIHERA, J. Dielectric analysis of vegetable and mineral oils. In Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Dielectric Liquids

- 2014(ICDL2014). Piscataway: IEEE, 2014. s. 1-4. ISBN: 978-1-4799-2063-1
- [XLII] TRNKA, P., PIHERA, J., SVOBODA, M., SOUČEK, J. New challenges in partial discharge measurements. In Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD 2013). Piscataway: IEEE, 2013. s. 75-78. ISBN: 978-1-4799-0807-3 , ISSN: 1553-5282
- [XLIII] SOUČEK, J., HORNAK, J., SVOBODA, M., GUTTEN, M., KOLTUNOWICZ, T. Comparison of the electrical properties of canola oil with commercially available mineral oil. In Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2015. s. 634-637. ISBN: 978-1-4673-6788-2
- [XLIV] TRNKA, P., SVOBODA, M., SOUČEK, J. Condition Based Management of Electrical Appliances. In Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Red Hook: IEEE, 2012. s. 846-849. ISBN: 978-1-4673-1020-8
- [XLV] SVOBODA, M. Aspekty využití modelů odolnosti pro potřeby online diagnostiky. In Elektrotechnika a informatika 2012, část první - elektrotechnika. Plzeň: 2012. s. 125-128. ISBN: 978-80-261-0120-8
- [XLVI] MENTLÍK, V., TRNKA, P., DONČUK, J., SVOBODA, M., SOUČEK, J., TOMÁŠKOVÁ, T. Analýza vlivů chodu transformátorů ČEPS. ČEPS a. s., 2013.
- [XLVII] SVOBODA, M., TRNKA, P. Alternative electrical insulating fluids in power transformers. In Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Neuveden: IEEE, 2014. s. 399-402. ISBN: 978-1-4799-3806-3
- [XLVIII] TRNKA, P., MENTLÍK, V., SVOBODA, M. The effect of moisture content on electrical insulating liquids. In Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Dielectric Liquids 2014. Piscataway: IEEE, 2014. s. 1-4. ISBN: 978-1-4799-2063-1
- [XLIX] TRNKA, P., SVOBODA, M., SOUČEK, J., PIHERA, J., KRPAĽ, O. Měření částečných výbojů statorového vinutí a motorů Škoda Electric. Škoda Electric, a.s., 2014.
- [L] TRNKA, P., SVOBODA, M., ŠIRŮČEK, M. New challenges in aging modeling – pulse stress. In International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2014). Piscataway: IEEE, 2014. s. 1-4. ISBN: 978-1-4799-6613-4
- [LI] MENTLÍK, V., TRNKA, P., DONČUK, J., SVOBODA, M., SOUČEK, J. Sledování stavu izolačních systémů transformátorů ČEPS. ČEPS a. s., Elektrárenská 774/2, 101 52 Praha, 2014.
- [LII] TOMÁŠKOVÁ, T., SVOBODA, M., SHLYKEVICH, A., TRNKA, P. Increase the thermal conductivity of high voltage electrical insulation systems. In Proceedings of the 17th European Conference on Power Electronics and Application (EPE ECCE Europe 2015). Piscataway, New Jersey: IEEE, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-90-75815-23-8
- [LIII] TRNKA, P., MENTLÍK, V., SVOBODA, M. Ecologically acceptable insulating liquids for electrical appliances. In Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Dielectric Liquids 2014. Piscataway: IEEE, 2014. s. 1-4. ISBN: 978-1-4799-2063-1
- [LIV] TRNKA, P., HORNAK, J., SVOBODA, M., PIHERA, J. Partial discharges under DC voltage in paper-oil insulating system. In Proceedings of the International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM 2015). Piscataway: IEEE, 2015. s. 436-439. ISBN: 978-1-4799-8903-4

A. Statistické zpracování experimentálních dat a volba kritériálních hodnot

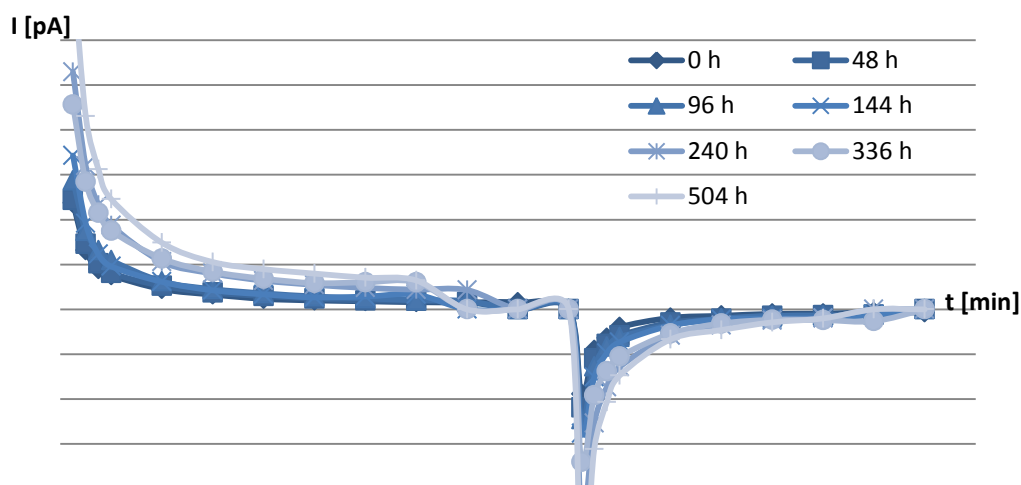
Experimenty uvedené v kapitole 5 byly sestaveny a vyhodnocovány podle následujících postupů. Jsou zde uvedeny postupy, kterými lze získat model odolnosti pro různý charakter sledované veličiny. Zároveň jsou uvedeny základní statistické nástroje, jejichž použití vede k snížení rozptylu výpočtových modelů a v důsledku ke zpřesněné výpočtu. Uvedené postupy byly použity pro vyhodnocení řady experimentů, které byly provedeny na různých elektroizolačních materiálech. Kapitola nemá za cíl ucelený popis jednotlivých materiálů, ale pouze nástrojů, které lze použít pro jejich hodnocení.

Charakter experimentu a volba kritériálních hodnot

Zrychlené laboratorní stárnutí je možné provést dvěma způsoby. První spočívá v definovaném namáhání (např. teplotním), kdy v průběhu stárnutí je postupně sledována hodnota diagnostického parametru.

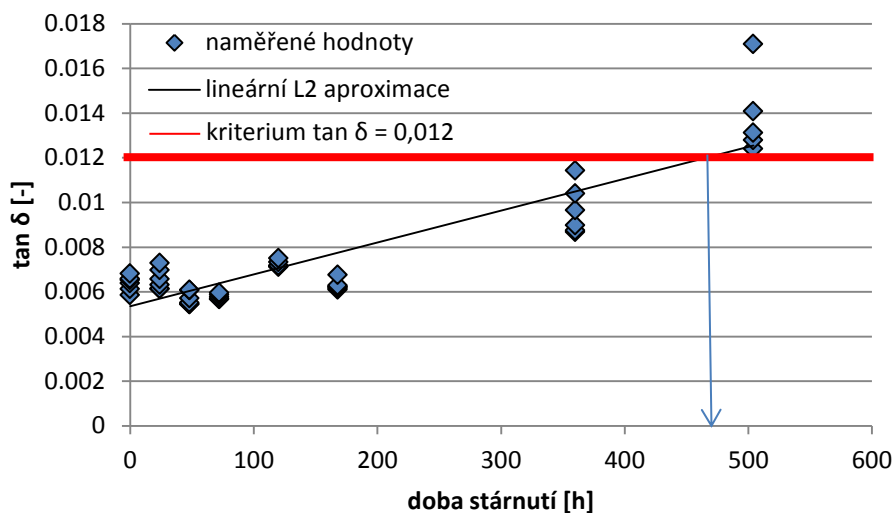
Stárnutí s postupným sledováním diagnostického parametru

Tento způsob se používá u nedestructivních diagnostických metod, například měření ztrátového činitele, izolačního odporu, permitivity a dalších. Nevýhodou je určitá nejednoznačnost v určení materiálových limitů. Na základě dlouhodobých zkušeností je volena hodnota, pro kterou materiál již nevyhovuje požadavkům provozu – tzv. kritériální hodnota. S tím, jak materiál stárne, sledovaný parametr postupně dosahuje a překračuje tuto limitní hodnotu. Na obr. 70 je závislost absorpčního a resorpčního proudu při teplotním stárnutí materiálu. Parametrem je doba stárnutí. Z grafu je zřejmý postupný růst absorpčních proudů vlivem tepelného stárnutí.



obr. 70: růst absorpčních a resorpčních proudů vlivem stárnutí; teplotní stárnutí tříslložkového kompozitního izolačního materiálu

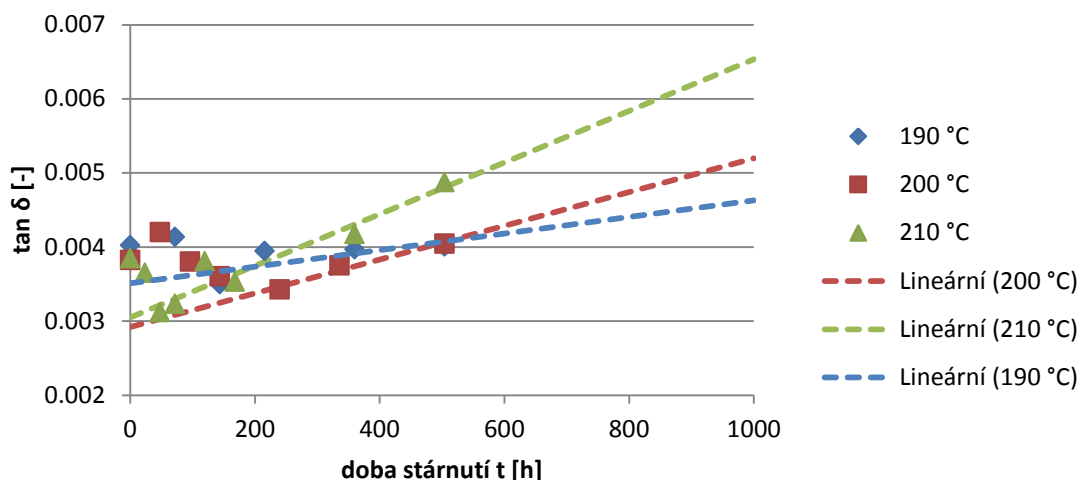
S ohledem na časovou náročnost jsou parametry vzorků proměřovány v určitých časových intervalech. Hledaný průnik časového vývoje sledovaného parametru s kritériální hodnotou tak nemusí nastat přesně v době, kdy jsou parametry měřeny. Lze tedy sledovat postupný vývoj těchto parametrů a aproximovat je vhodnou křivkou. Následně lze nalézt průsečík aproximační křivky s kritériální hodnotou a určit aproximaci.



obr. 71: určení doby dosažení kritéria $\tan \delta = 0,012$ použitím lineární L2 aproximace naměřených hodnot; doba dosažení kritéria 480 hodin.

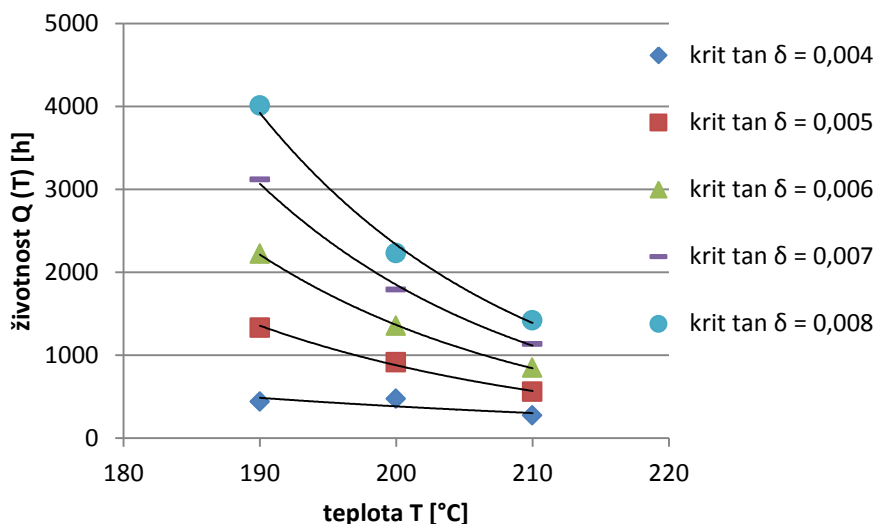
Kritérium koncového bodu je nutno volit na základě zkušenosti s ohledem na obvyklé provozní požadavky. Pokud tyto nejsou známy, lze použít procentní zhoršení parametru.

Na obr. 72 je zobrazen časový vývoj ztrátového činitele $\tan \delta$ při teplotním stárnutí. Z grafu je zřejmé, že v počátku stárnutí ztrátový činitel u každé sady nejprve klesal, dosáhl minima a následně rostl. Tento jev je pravděpodobně způsoben pokračováním síťovacích reakcí, „dotvrzením“ pryskyřice. Regresní přímky byly vypočítány pouze pro časy, kdy sada dosáhla minimální hodnoty ztrátového činitele a delší.



obr. 72: ztrátový činitel $\tan \delta$; materiál Relanex 45.033A, plošné vzorky 190 x 190 x 0,5 [mm], $U = 500$ V, četnost 6, 5 a 5 vzorků v sadě, průměrováno, stárnutí po dobu 504 hodin

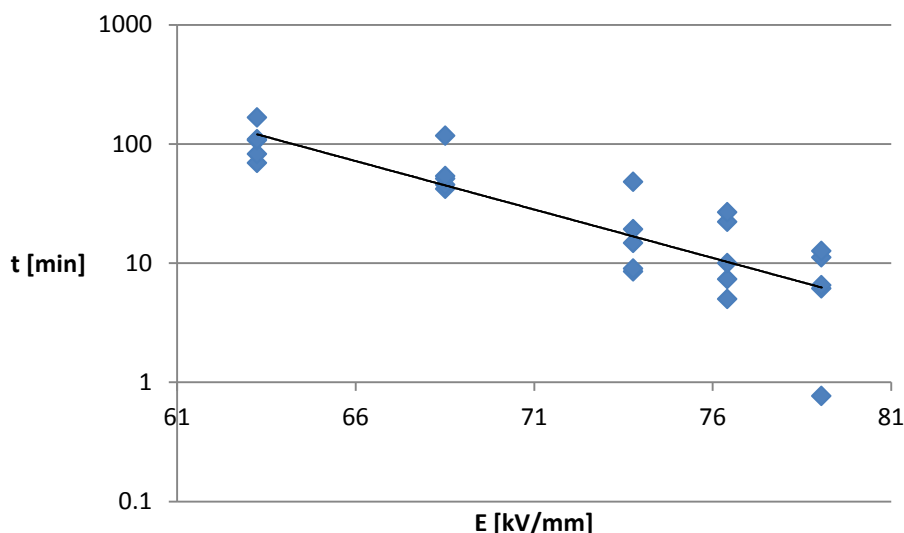
Pro získání křivek odolnosti je následně nutné určit průsečíky regresních přímek s kritériální hodnotou. Takto získané křivky tepelné odolnosti pro různé hodnoty kriteria jsou na obr. 73.



obr. 73: křivky tepelné odolnosti pro různě zvolené kritériální hodnoty pro parametr $\tan \delta$; materiál Relanex 45.033A, stárnutí po dobu 504 hodin na úrovních 190, 200 a 210 °C

Stárnutí do poruchy

Tento způsob určování odolnosti materiálu je vhodný pro destruktivní zkoušky. Vzorky jsou namáhány (např. napětím) a měří se doba, kdy jejich vlastnosti přestanou vyhovovat. Tento způsob je výhodnější zejména proto, že odpadá potíže s volbou kritériálních hodnot. V případě elektrického namáhání dojde po čase k průrazu vzorku, který je jednoznačným ukončením schopnosti materiálu plnit izolační funkci.



obr. 74: doby do průrazu izolační systém slunečnicový olej + transformátorová lepenka 0,2 mm, stejnosměrné napětí

Izolační materiály používané v technické praxi nejsou ideální. Z makroskopického hlediska je často lze považovat za homogenní, avšak při bližším pohledu do struktury tento předpoklad splněn není. Nehomogenity uvnitř materiálu způsobují nerovnoměrné rozložení intenzity elektrického pole, tedy materiál je v určitých místech namáhán více a degraduje rychleji. Stejný efekt mají nerovnosti povrchů izolačních materiálů, případně jejich lokální zeslabení.

Pravděpodobnost poruchy je dána exponenciálním rozdělením. Zpravidla zde tedy využíváme exponenciální modely odolnosti.

Jiným možným přístupem je využití Weibullova rozdělení, které je možno chápat jako zobecněné exponenciální rozdělení. Obecný tvar tříparametrického Weibullova rozdělení je:

$$f_x(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^\beta} ; \beta, \eta \geq 0; x > \gamma \quad (58)$$

kde:

x je náhodná proměnná,

β je parametr tvaru,

η je parametr měřítka,

γ je parametr umístění

Tříparametrové Weibullovo rozdělení umožňuje velmi přesné proložení experimentálních dat. Odlehle hodnoty je možno vyloučit na základě subjektivního posouzení Weibullova pravděpodobnostního grafu. Výpočtové metody jsou však značně komplikované a kladou vysoké nároky na zkušenosti zpracovatele.

V praxi je častěji využíváno dvouparametrové rozdělení ($\gamma=0$).

Nevýhodou testování do poruchy je velice obtížné určování odlehle hodnot. Zejména normou [115] doporučená MLE metoda pro určování parametrů rozdělení je velmi náchylná k výskytu odlehle hodnot [116]. Jedním z vodítek pro určení odlehle hodnot může být míra přiblížení naměřených dat Weibullově pravděpodobnostnímu grafu.

Základní statistické nástroje využívané při modelování odolnosti izolačních systému

Statistické nástroje nám umožňují vyrovnat se se stochastickým charakterem sledovaných veličin během experimentů s elektroizolačními systémy. Dílčí elektroizolační prvky a materiály mají nehomogenní strukturu, což vede ke zdánlivě abnormálnímu chování. Z makroskopického hlediska identické vzorky se podrobené shodnému zatížení projevují zcela odlišně, jelikož jejich mikrostruktura zcela totožná není.

Při zpracování modelů odolnosti z naměřených hodnot se používají zejména metody konfirmační analýzy, například regresní analýza, intervaly spolehlivosti, apod.

Vyloučení odlehlých hodnot

Pro sestavení modelu odolnosti je nezbytné vyloučit hodnoty, které jsou ze statistického hlediska vybočující z testovaného souboru. To může být způsobeno například hrubými chybami při měření, defektem materiálu v důsledku technologické nekázně při výrobě nebo jinými vlivy působícími na vzorky. Rozhodnutí, zda tyto hodnoty vyloučit z testového souboru závisí na experimentátorovi, avšak podkladem pro taková rozhodnutí jsou testy odlehlých hodnot. Příkladem mohou být test $\pm 4s$, Dixonův test, Grubbsův test [79].

Pokud má sledovaný parametr normální rozdělení pravděpodobnosti, je nejsnazší pro vyloučení odlehlých hodnot použít test $\pm 4s$.

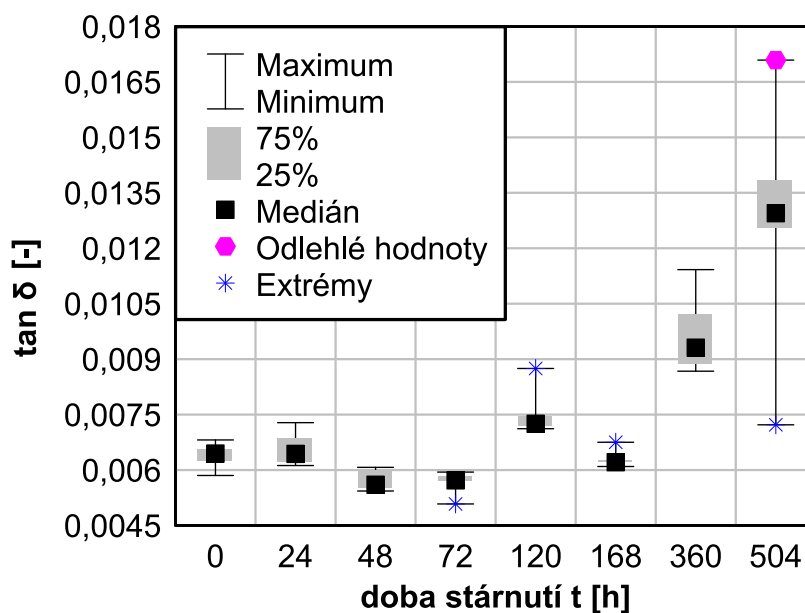
Při testování odlehlých hodnot se měřené hodnoty seřadí vzestupně a porovnává se nejmenší a největší hodnota souboru s testovým kritériem. V testu $\pm 4s$ se vypočítá interval (x_d, x_h) daný vztahem (59). Pokud je testovaná hodnota vně intervalu (x_d, x_h) , lze ji považovat za odlehlou a vyloučit ji ze souboru.

$$\begin{aligned} x_d &= \bar{X} - 4 \cdot s, \\ x_h &= \bar{X} + 4 \cdot s, \end{aligned} \tag{59}$$

kde:

x_d	je spodní mez,
x_h	je horní mez,
\bar{X}	je střední hodnota,
s	je směrodatná odchylka.

Podobný princip využívají i ostatní testy středních hodnot, které počítají testové kritérium a porovnávají jej s tabelovanými hodnotami. Na základě tohoto porovnání je potvrzena, nebo vyvrácena hypotéza odlehlosti testované hodnoty. Kromě těchto testů se při počítačovém zpracování často používá grafická metoda označovaná jako krabicový graf (box plot), který je na obr. 75. Pokročilé statistické softwary umožňují automatickou tvorbu takových grafů, navíc jsou kvalitativní parametry souboru dat na první pohled zřejmé. Graf zobrazuje střední hodnotu (aritmetický průměr, nebo medián), rozptyl (směrodatnou odchylku, nebo kvantil) a dále odlehlé hodnoty, resp. extrém.



obr. 75: krabicový graf pro určení kvartilů, extrémů a odlehlých hodnot.

Pokud ovšem testovaný soubor nemá normální rozdělení, pak test $\pm 4s$, ani krabicový graf nejsou vhodné. Například pokud sledujeme při elektrickém stárnutí dobu do průrazu materiálu, je pravděpodobnost průrazu je dána exponenciálním rozdělením. Funkce hustoty pravděpodobnosti má tvar:

$$f_x(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x} \quad ; \quad x \geq 0 \quad (60)$$

kde:

x je náhodná proměnná

λ je parametr rozdělení, označovaný též intenzita poruch

Hustotě pravděpodobnosti (60) exponenciálního rozdělení odpovídá distribuční funkce (61):

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad ; \quad x \geq 0 \quad (61)$$

Oproti souborům s normálním rozdělením vykazují naměřené hodnoty souborů s exponenciálním rozdělením obecně vyšší rozptyl. Není proto možné použít klasické testy odlehlých hodnot. Jednou z možností je použít Dixonův test, který je vhodný pro soubory s neznámým rozdělením a pro soubory s malým počtem hodnot. Naměřené hodnoty se seřadí podle velikosti: x_1, x_2, \dots, x_n a vypočte se variační rozpětí

$$R = x_n - x_1 \quad (62)$$

Dále se vypočtou testovací kritéria pro nejnižší a nejvyšší hodnotu souboru:

$$Q_1 = \frac{x_2 - x_1}{R} \quad (63)$$

$$Q_n = \frac{x_n - x_{n-1}}{R}$$

Tato testovací kritéria se porovnají s tabulkovými hodnotami pro požadovanou hladinu významnosti a četnost souboru.

Statistická jistota a konfidenční meze

Provedením experimentu a sledováním některého diagnostického parametru se získá soubor dat (vstupní hodnoty). Tato data vykazují vždy určitou variabilitu z mnoha důvodů, např. chyba měření, změna parametrů prostředí v průběhu experimentu, variabilita vzorků, atd. Samozřejmě je nutné experiment sestavit tak, aby byla tato variabilita minimalizována, avšak v následném vyhodnocení experimentu je nezbytné ji sledovat.

Tak jako se při určování životnosti izolačního systému zaměřujeme na nejslabší část (prvek), stejně tak je nutné se v případě modelování odolnosti zaměřit na nejslabší vzorky. Například při testování doby do průrazu vzorků není relevantní informace, kdy bude v provozu polovina vzorků, ale doba kdy dojde k poruše prvního z nich, jelikož v provozu porucha prvního prvku ze systému znamená havárii celého systému.

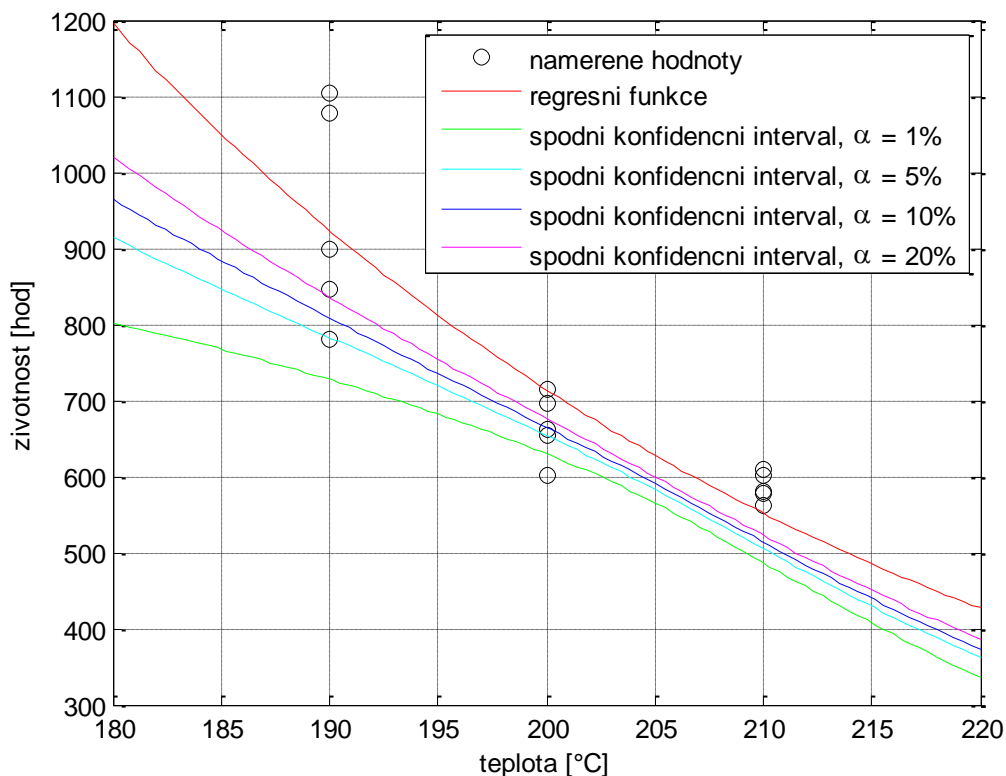
Jednou z možností, jak tento úkol řešit, je využití tzv. statistické jistoty – tedy chyby 1. druhu. Úkol spočívá v nalezení takové křivky odolnosti, která bude ležet těsně pod všemi hypoteticky změřitelnými daty. Tedy s určitou pravděpodobností p (64) bude předpokládána životnost všech vzorků ležet nad touto křivkou.

$$p = 1 - \alpha, \quad (64)$$

kde:

- p [-] je pravděpodobnost platnosti hypotézy,
 α [-] je hladina významnosti neboli pravděpodobnost chyby 1. druhu.

Hladinu významnosti volí experimentátor s ohledem na požadovanou statistickou jistotu. Obvykle se volí hodnoty 1 a 5 % [79]. S rostoucím rozptylem hodnot je vhodné volit nižší hladinu významnosti, aby byla chyba 1. druhu pokud možno nejnižší. Vliv volby hladiny významnosti na tvar a polohu křivky odolnosti je zřejmý z obr. 76.



obr. 76: vliv volby hladiny významnosti na polohu a tvar křivky odolnosti, vzorky tříšložkového

kompozitu Relanex 45.033A při teplotním stárnutí.

Pro určení konfidenčních intervalů je nezbytné znát statistické rozdělení souboru dat. Pro každé statistické rozdělení lze určit vztahy pro výpočet konfidenčních intervalů. V případě exponenciálního rozdělení je možno použít vztahy platné pro normované normální rozdělení ve tvaru:

$$\bar{X} - u_{1-\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{\bar{X}}{\sqrt{n}}\right) < \delta < \bar{X} + u_{1-\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{\bar{X}}{\sqrt{n}}\right), \quad (65)$$

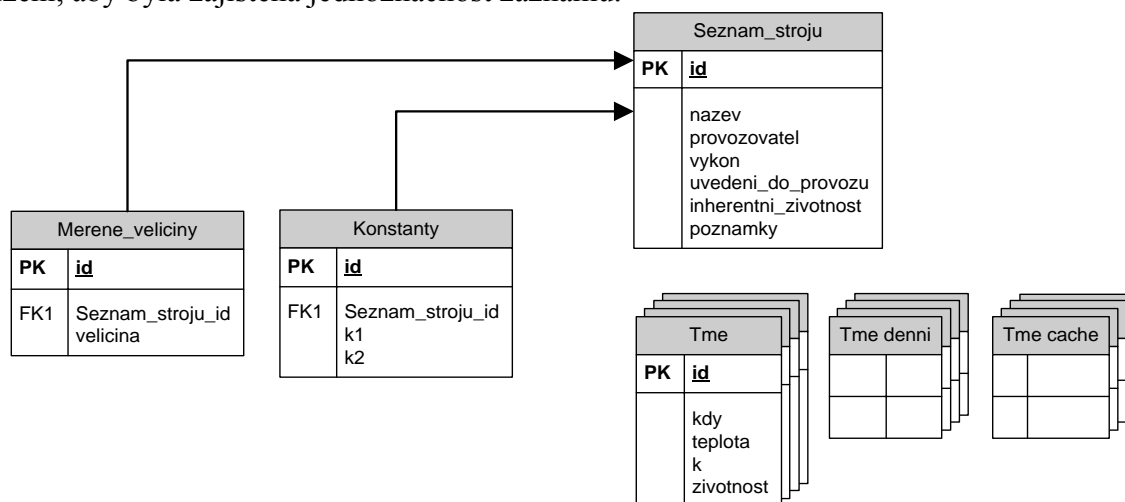
kde u_{α} je α -kvantil normovaného normálního rozdělení.

Tímto postupem určíme interval, ve kterém se hledaná křivka odolnosti nachází s pravděpodobností p . Z praktického hlediska nemá význam celý tento interval, ale pouze jeho spodní mez. Tu je tedy možno chápat jako křivku odolnosti materiálu na dané statistické hladině významnosti.

B. Program Elmon I pro výpočet zbytkové životnosti jednofaktorového stárnutí izolačního systému

První verze programu pro výpočet zbytkové životnosti byla sestavena jako webová aplikace napsaná v jazyce php v.5. Program je složen z jednotlivých skriptů, které spolu vzájemně komunikují a výstupy jsou zobrazeny ve formě webových stránek, dostupných na www.elmon.fel.zcu.cz.

Základem je databáze naměřených hodnot zpracovaná v MySQL. Struktura databáze je zobrazena na obr. 77. Jako primární klíč je používáno id sledovaného zařízení, aby byla zajištěna jednoznačnost záznamů.



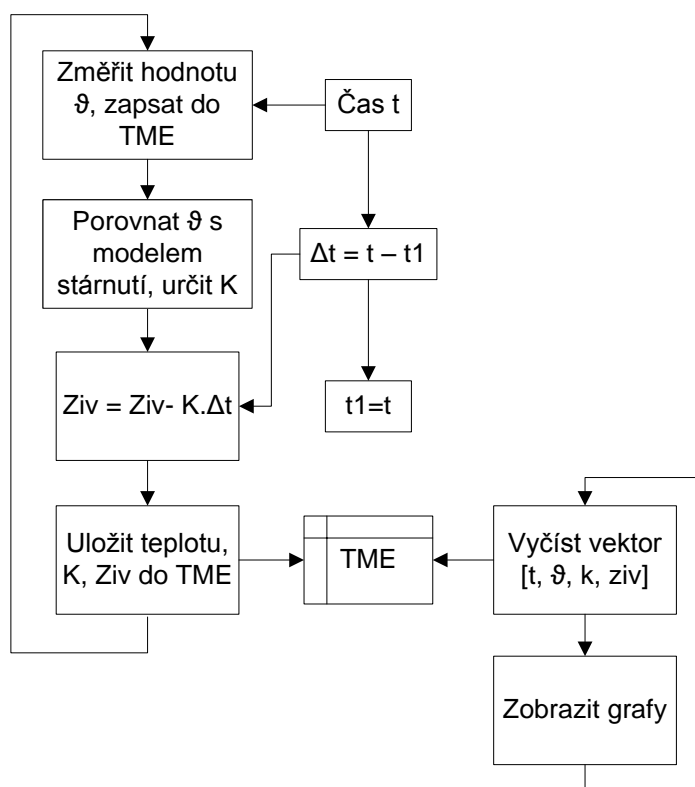
obr. 77: struktura databáze

Hlavní tabulkou databáze je tabulka seznam strojů, která uchovává informace o sledovaném stroji (zařízení). Na ni jsou napojeny tabulky s měřeními veličinami a konstantami. Provázání tabulek umožňuje zachování referenční integrity, například při mazání nebo editaci dat nadřazené tabulky.

Tabulky s naměřenými a vypočítanými hodnotami takto navázány nejsou. Jsou do nich zaznamenávány naměřené a vypočítané hodnoty, které jsou pak programem čteny.

Databáze je obsluhována pomocí jazyka php. Veškeré výpočty jsou provedeny na straně serveru a uživateli se přenáší pouze odpověď na dotaz, respektive zobrazení výsledků.

Z měřicího zařízení je php funkcí GET získávána teplota, jakožto degrační parametr a spolu s časovým razítkem je zaznamenávána do databáze. Následují výpočetní skripty, které jsou na záznamových skriptech nezávislé. Výpočetní skripty prohledávají databázi a s použitím definovaného matematického modelu dopočítávají zbytkovou životnost předmětného zařízení. Ze záznamu teploty je vypočítána relativní rychlost stárnutí v časovém intervalu mezi dvěma záznamy. Z rozdílů časových razítek je dopočítána délka intervalu. Následuje výpočet aktuálně spotřebované životnosti ve sledovaném intervalu, která je následně odečtena od životnosti v předchozím záznamu. Výpočet zbytkové životnosti je uveden na obr. 78.

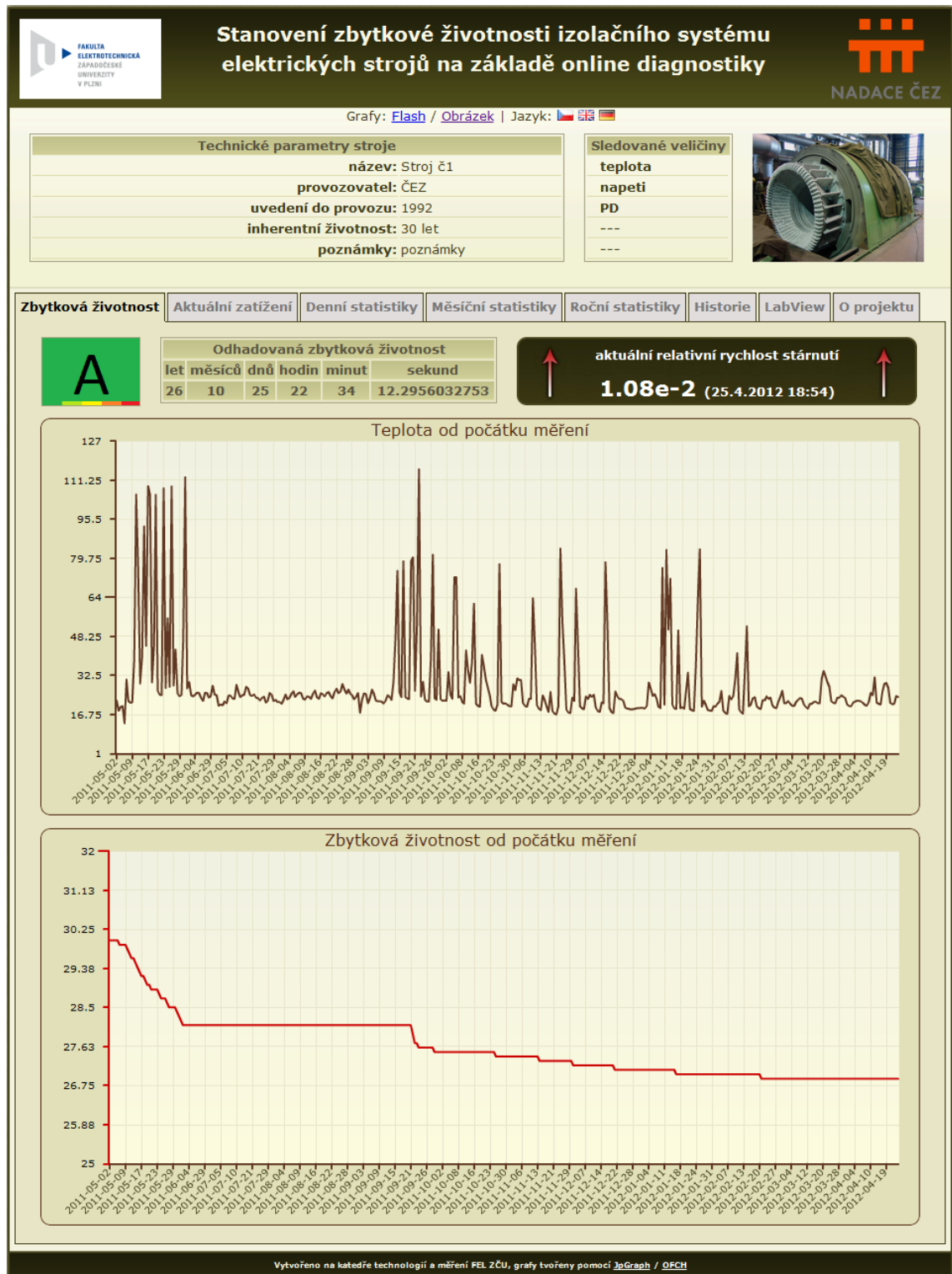


obr. 78: vývojový diagram výpočtu zbytkové životnosti zařízení

Program je dále rozšiřitelný a plně funkční. Jeho nevýhodou je pomalá reakce webového rozhraní a pomalé zpracování dat. Program je prakticky použitelný pro aplikace, kde stačí perioda vzorkování 30 s. Je tedy vhodný například pro tepelné děje, avšak k monitorování částečných výbojů využít nelze.

Druhá část skriptů slouží ke komunikaci s uživatelem. Výstupy jsou zobrazeny formou dynamické HTML stránky s použitím kaskádních stylů pro úpravu a rozvržení. V první části hlavní stránky se nacházejí dvě tabulky. V první jsou zobrazeny informace o sledovaném stroji, které lze dále editovat. Druhá tabulka obsahuje výčet monitorovaných parametrů. Pod tím je řádek záložek, kdy se implicitně otvírá první záložka se zbytkovou životností. Tento údaj je při každém zápisu naměřených hodnot přepočítáván a aktualizován. Dále je zde uveden koeficient k – relativní rychlost stárnutí v aktuálním okamžiku. Po stranách jsou šipky, které ukazují trend této veličiny. Pokud k roste, šipky ukazují vzhůru apod.

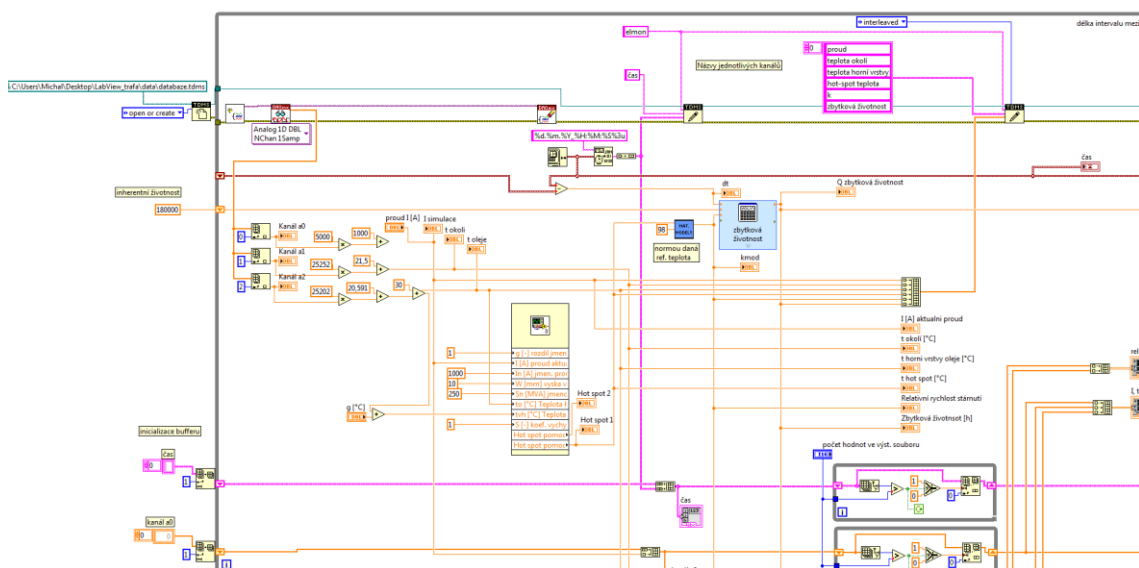
Po těchto údajích následují grafy zbytkové životnosti a působícího zatížení. Grafy jsou zde uvedeny proto, aby bylo možné sledovat tyto parametry společně, čímž je možné sledovat pro stroj nebezpečné stavy a případně diskutovat jejich omezení. Zbytková životnost je zobrazena v různých časových jednotkách (roky až sekundy), v závislosti na rozsahu časové osy. Náhled na zobrazení výstupů je na obr. 79. K měření teploty bylo použito ethernetové čidlo TME – viz obr. obr. 83



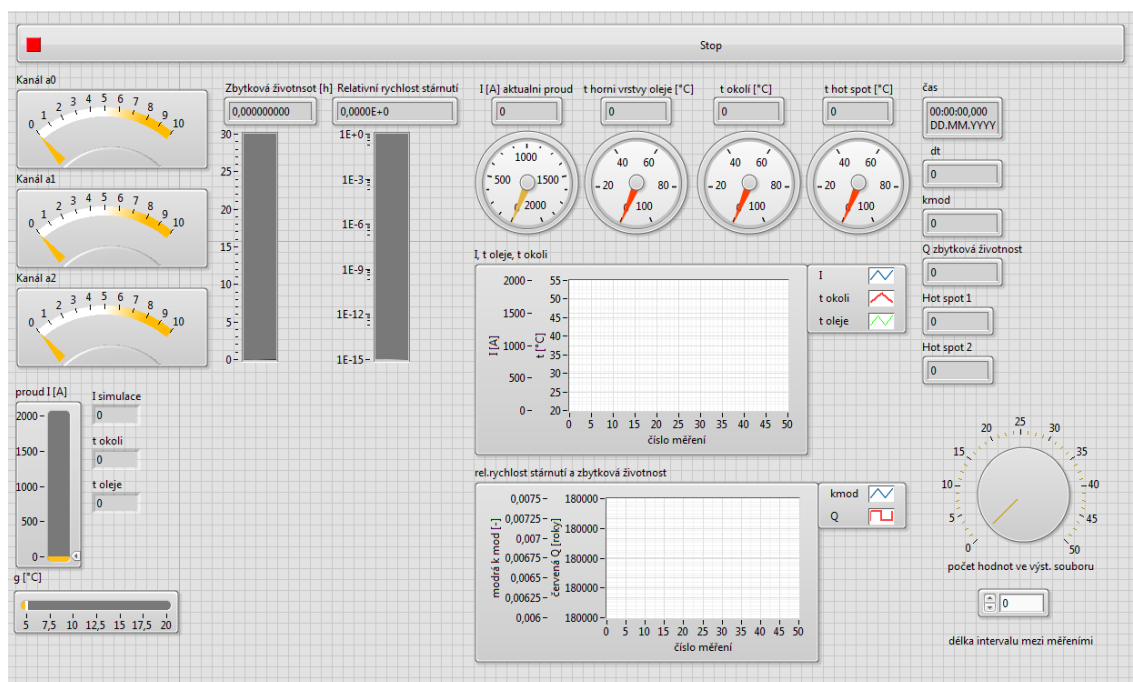
obr. 79: uživatelské rozhraní aplikace Elmon I

C. Doplnění programu Elmon II o výpočetní modul pro statický výpočet hot-spot teploty

Pro korektní výpočet zbytkové životnosti transformátorů je nutné vycházet z teploty nejteplejšího místa izolačního systému, jak bylo vysvětleno v kapitole 4.5 a 4.5.3. Program Elmon II byl tedy doplněn o modul pro statický výpočet hot-spot teploty. Pro výpočet hot-spot teploty jsou měřeny online tři vstupní parametry – proud, teplota okolí a horní vrstvy teplota oleje. Dále je třeba modifikovat výpočetní konstanty pro daný typ transformátoru. Tyto konstanty vycházejí z konstrukce transformátoru a z oteplovací zkoušky. Zdrojový kód je na obr. 80 a doplnění uživatelské rozhraní na obr. 81



obr. 80: implementace modulu pro výpočet hot-spot teploty do programu Elmon II



obr. 81: doplnění uživatelského rozhraní programu Elmon II

D. Přístrojové vybavení použité monitoring vybraných parametrů v programech Elmon

Monitorování teploty v programu Elmon I bylo použito ethernetové teplotní čidlo TME (viz obr. 83). Pro monitoring více faktorů (teplota a napětí současně) byl použit systém CompactDAQ výrobce National Instruments.



obr. 82: měřicí systém Compact DAQ – chasis cDAQ-9184 s dvěma I/O moduly



obr. 83: ethernetové čidlo teploty TME

Napěťová expozice probíhala v experimentálním zařízení vyrobeném na katedře technologií a měření ZČU



obr. 84: přístroj pro expozici vzorků elektroizolačních materiálů elektrickému napětí v rozsahu 0-12 kV.

E. Porovnání monitorovacích systémů dostupných na trhu

Porovnání komplexních monitorovacích systémů předních světových výrobců z hlediska dostupných funkcí je uvedeno v tab. 11. Následně jsou v tab. 12 porovnány systémy pro online analýzu rozpuštěných plynů a vlhkosti v transformátorovém oleji.

tab. 11: Porovnání funkcí monitorovacích systémů transformátorů dostupných na trhu

Výrobce	Typ	Funkce					
		Měření I / U / P	Měření teplot	Řízení chlazení	DGA / vlhkost	OLTC	Částečné výboje
ABB	TEC	o	o	o	o	o	x
Dimrus	TIM-3	o	o	o	o	x	o
Dimrus	TIM-9	o	x	x	o	o	o
Dimrus	TDM	o	o	o	o	o	o
Dimrus	TDM - 3F	o	o	o	o	o	o
GE Power Systems	MS3000	o	o	o	o	o	x
GE Power Systems	Intellix MO150	o	o	o	o	o	x
Koncar	TMS	o	o	o	o	o	o
MR reinhausen	TRAFOGUARD	o	o	o	o	o	x
MR reinhausen	ISM Integrated smart module	o	o	-	-	-	x
MR reinhausen	TAPMOTION ED ISM	o	o	-	-	-	x
MTE	HYDROCAL MS-7	o	o	o	o	o	x
Qualitrol	505 ITM	o	o	o	o	o	x
Qualitrol	509	o	o	o	o	o	x
Qualitrol	QTMS	o	o	o	o	o	o
ROCON	RTU401D3	o	o	o	o	o	x
SDMT ltd	TR500	o	o	o	o	o	o
SDMT ltd	TR300	o	o	o	o	x	o
TECHSYS	mstTEK	o	o	o	o	o	x
VEI	CYMTO	o	o	o	o	o	x

O = funkci obsahuje, **■** = funkce je závislá na konfiguraci, **X** = funkci neobsahuje

tab. 12: Porovnání funkcí DGA monitorovacích systémů dostupných na trhu

Výrobce	Typ	Plyny										vlhkost		
		O2	N2	CO	CO2	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2	C3H8	C3H6	H2O	
ABB	CoreSense	x	x	x	x	o	x	x	x	x	x	x	o	
CAMLIN POWER	TOTUS MT	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x	o	

Energy Support	OnlineDGA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x
GATRON - Německo	TGM	0	0	0	0	0	0	x	x	x	x	x	x	0
GE Power Systems	Hydran 201Ti	x	x	0	x	0	x	x	0	0	x	x	x	x
GE Power Systems	Hydran M2	x	x	0	x	0	x	x	0	0	x	x	0	0
GE Power Systems	Hydran S2	x	x	0	x	0	x	x	0	0	x	x	0	0
GE Power Systems	Kelman Transfix	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x	0	0
GE Power Systems	Kelman Mintrans	x	x	0	x	0	x	x	x	0	x	x	0	0
GE Power Systems	Kelman Multitrans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x	0	0
GE Power Systems	Kelman Taptrans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x	0	0
GE Power Systems	Hydran M2200/C	x	x	0	x	0	x	x	0	0	x	x	x	x
GE Power Systems	Intellix GLA100	x	x	0	x	0	x	x	x	x	x	x	x	x
GE Power Systems	Transfix DGA 500	x	x	x	x	0	0	x	0	0	x	x	0	0
LumaSense	SmartDGA Gauge	x	x	x	x	x	0	x	0	0	x	x	0	0
LumaSense	SmartDGA Guard	x	x	0	0	0	x	x	x	0	x	x	0	0
LumaSense	SmartDGA Guide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x	0	0
MESSKO	MSense x2.5	x	x	0	x	0	x	x	x	x	x	x	x	0
Morgan Schaffer	Calisto	x	x	x	x	0	x	x	x	x	x	x	x	0
Morgan Schaffer	Calisto 2	x	x	0	x	0	x	x	x	x	x	x	x	0
Morgan Schaffer	Calisto 5	x	x	0	x	0	0	x	0	0	x	x	0	0
Morgan Schaffer	Calisto 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x	0	0
MTE	HYDROCAL 1001+	x	x	0	x	0	0	0	0	0	x	x	0	0
MTE	HYDROCAL 1003	x	x	0	x	0	x	x	x	x	x	x	0	0
MTE	HYDROCAL 1008	x	x	0	0	0	0	0	0	0	x	x	0	0
MTE	HYDROCAL 1005	x	x	0	x	0	x	x	0	0	x	x	0	0
MTE	HYDROCAL 1005-3/-2/-1	x	x	0	x	0	x	x	0	0	x	x	0	0
MTE	HYDROCAL 1008-3/-2/-1	x	x	0	0	0	0	0	0	0	x	x	0	0
MTE	HYDROTAP	x	x	0	0	0	0	0	0	0	x	x	0	0
MTE	HYDROCAL 1009	0	x	0	0	0	0	0	0	0	x	x	0	0
QUALITROL	DGA 150/250/400	x	x	x	x	0	x	x	x	x	x	x	x	x

Serveron (Qualitrol)	TM1	x	x	x	x	o	x	x	x	x	x	x	o
Serveron (Qualitrol)	TM3	x	x	x	x	x	o	x	o	o	x	x	o
Serveron (Qualitrol)	TM8	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x	o
Vaisala	HUMICAP MMT162	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o
Vaisala	HUMICAP MMT310	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o
Vaisala	HUMICAP MMT330	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o
Vaisala	MHT410	x	x	x	x	o	x	x	x	x	x	x	o
Vaisala	Optimus OPT100	x	x	o	o	o	o	o	o	o	x	x	o
WEIDMANN	InsuLogixH	x	x	x	x	o	x	x	x	x	x	x	-