

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**DEGRADACE IZOLAČNÍHO SYSTÉMU  
TRANSFORMÁTORU**

**vedoucí práce: Ing. Martin Širůček  
autor: Josef Kalabza**

**2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef KALABZA**  
Osobní číslo: **E09B0138P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Degradace izolačního systému transformátorů**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište izolační systém olej-papír.
2. Popište degradační mechanismy působící na izolační systém během celého životního cyklu zařízení.
3. Popište metody pro sledování degradačních mechanismů izolačního systému.
4. Zpracujte přehled zařízení, které slouží k tomuto měření.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. Mentlík V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN - Technická literatura ISBN 80-7300-189-6, Praha 2006
2. Mentlík V. a kol.: Diagnostika elektrických zařízení, BEN - Technická literatura ISBN 978-80-7300-232-9, Praha 2008
3. Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Širůček**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení problematiky degradace izolačního stavu transformátoru. Zmiňuje používané materiály pro izolaci, činitele způsobující degradaci, metody pro měření degradačních mechanismů a přístroje pro měření.

## **Klíčová slova**

Transformátor, olej, papír, degradace, on-line diagnostika, off-line diagnostika, přístroje

## **Abstract**

The present work is aimed at solving the problems of degradation of transformer insulating state. It mentions the materials used for insulation, the factors causing degradation, methods for measuring the degradation mechanisms and devices for measurement.

## **Key words**

Transformer, oil, paper, degradation, on-line diagnostics, off-line diagnostics, devices

## **Prohlášení**

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

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

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

V Plzni dne 4.6.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Širůčkovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ</b> .....	<b>11</b>
<b>1 TRANSFORMÁTOR</b> .....	<b>13</b>
1.1 POPIS TRANSFORMÁTORU .....	14
1.2 PRINCIP ČINNOSTI .....	15
1.3 SUCHÉ A OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY .....	15
1.4 CHLAZENÍ TRANSFORMÁTORŮ .....	17
<b>2 IZOLAČNÍ SYSTÉM OLEJ – PAPÍR</b> .....	<b>18</b>
2.1 OLEJ .....	18
2.1.1 Základní rozdělení oleje .....	19
2.1.2 Minerální olej – transformátorový olej .....	19
2.1.3 Údržba oleje .....	20
2.1.4 Příklady rostlinných olejů .....	21
2.1.5 Příklady minerálních olejů .....	21
2.2 PAPÍR .....	22
2.2.1 Vlastnosti papíru .....	23
2.2.2 Dělení papíru .....	24
<b>3 DEGRADAČNÍ MECHANISMY PŮSOBÍCÍ NA IZOLAČNÍ SYSTÉM</b> .....	<b>25</b>
3.1 TEPLOTA .....	25
3.2 HYDROLÝZA .....	25
3.3 OXIDACE .....	27
3.4 KYSLÍK .....	27
3.5 KYSELINA .....	27
3.6 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE, OBLOUK .....	28
<b>4 METODY PRO SLEDOVÁNÍ DEGRADAČNÍCH MECHANISMŮ IZOLAČNÍHO SYSTÉMU. ....</b>	<b>28</b>
4.1 OFF-LINE DIAGNOSTIKA .....	30
4.1.1 Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu .....	30
4.1.2 Měření ztrátového činitele a kapacity .....	31
4.1.3 Měření částečných výbojů .....	32
4.1.4 Měření poměru kapacit $C_2/C_{50}$ .....	32
4.1.5 Měření odporu vinutí .....	33
4.1.6 Metoda frekvenčních charakteristik .....	33
4.1.7 Měření parametrů oleje .....	33
4.2 ON-LINE DIAGNOSTIKA .....	39
4.2.1 Volba parametrů pro sledování .....	39
4.2.2 Měření proudů a napětí .....	39
4.2.3 Měření teplot .....	40
4.2.4 Měření výšky hladiny v dilatační nádobě .....	41
4.2.5 Stanovení obsahu plynů v oleji .....	41
4.2.6 Vlhkost v izolačních systémech .....	43
4.2.7 Diagnostika průchodek .....	43
4.2.8 Měření částečných výbojů .....	44
<b>5 PŘEHLED ZAŘÍZENÍ – ON-LINE DIAGNOSTIKA</b> .....	<b>44</b>
5.1 AQUAOIL 400 .....	45



---

5.2	HYDRAN .....	45
5.3	CALISTO.....	46
5.4	TRANSFIX.....	46
5.5	MULTITRANS.....	47
5.6	HODNOCENÍ.....	47
<b>6</b>	<b>PŘEHLED ZAŘÍZENÍ – OFF-LINE DIAGNOSTIKA.....</b>	<b>48</b>
6.1	DIAGNOSTIKA IZOLAČNÍCH ČÁSTÍ.....	48
6.1.1	<i>DELTA 2000, 3000</i> .....	48
6.2	MĚŘENÍ PŘEVODU VINUTÍ.....	49
6.2.1	<i>Megger TTR 25</i> .....	49
6.2.2	<i>Megger TTR 300</i> .....	49
6.3	PLYNOVÁ CHROMATOGRAFIE DGA.....	50
6.3.1	<i>TRANSPORT X</i> .....	50
6.4	TESTOVÁNÍ DIELEKTRICKÉ PEVNOSTI OLEJE.....	50
6.4.1	<i>Megger OTS60SX</i> .....	51
6.4.2	<i>Megger OTS60PB</i> .....	51
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>52</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>53</b>

## Úvod

V dnešní době se zvyšují nároky na spotřebu elektrické energie. Proto je velmi nutné věnovat dobrou pozornost diagnostice transformátorů. Včasným odhalením možné poruchy transformátoru lze zamezit neplánovaným odstávkám a tím předejít možným finančním ztrátám.

Cílem této práce je popsat degradační mechanismy, které působí na izolační systém olej-papír, metody sledování těchto degradačních mechanismů a přehled zařízení.

V úvodu práce je zopakována teorie transformátoru, rozdělení transformátorů či způsob chlazení. Další kapitoly jsou věnovány samotnému systému olej-papír. Olej v transformátoru plní nejen funkci elektroizolační, ale také funkci jako chladicí médium, proto jsou na něj kladeny velmi vysoké nároky. Během provozu na olej působí řada degradačních mechanismů jako je teplota, vlhkost, vzduch nebo různé nečistoty. Tyto mechanismy působí také na papír, kde zhoršují jak elektroizolační vlastnosti, tak mechanické vlastnosti. Proto je nutné sledovat jednotlivé parametry používaných materiálů a předejít tak poruchám.

Významná část práce je věnována on-line a off-line diagnostice. Tyto metody se od sebe liší tím, že on-line diagnostika se provádí za provozu transformátoru, zatímco off-line diagnostika na odstaveném stroji. Systémy pro on-line diagnostiku jsou přímo namontovány na transformátoru, kde monitorují okamžitý stav stroje. Závěr práce patří přístrojům používaných při těchto diagnostikách.

## Seznam symbolů

$U_1$ [V]	Napětí na primárním vinutí
$U_2$ [V]	Napětí na sekundárním vinutí
$N_1$ [-]	Počet závitů primárního vinutí
$N_2$ [-]	Počet závitů sekundárního vinutí
$I_1$ [A]	Jmenovitý primární proud
$I_2$ [A]	Jmenovitý sekundární proud
$u_{i1}$ [V]	Indukované napětí ve vstupním vinutí
$u_{i2}$ [V]	Indukované napětí
$\Phi$ [Wb]	Magnetický tok
$t$ [s]	Čas
$d_{20}^{20}$ [-]	Hustota při 20 °C vody
$d_4^{20}$ [-]	Hustota při 4 °C vody
$E_p$ [V.m <sup>-1</sup> ]	Elektrická pevnost
$U_p$ [V]	Průrazné napětí
$d$ [m]	Tloušťka izolantu
$f$ [-]	Faktor roztoku
$N$ [-]	Molarita titračního vzorku
$a$ [cm <sup>3</sup> ]	Spotřeba roztoku
$v$ [g]	Navážka roztoku
$\check{C}k$ [mgKOH/g]	Číslo kyselosti
$p_{i60}$ [-]	Polarizační index
$R_{iz60}$ [MΩ]	Izolační odpor odečtený po 60s
$R_{iz15}$ [MΩ]	Izolační odpor odečtený po 15s
$i_{15}$ [MΩ]	Absorpční proud odečtený po 15s
$i_{60}$ [MΩ]	Absorpční proud odečtený po 60s
$\tau$ [s]	Časová konstanta
$C_{50}$ [F]	Kapacita měřená při frekvenci 50 Hz

$C_2$ [F]	Kapacita měřená při frekvenci 2 Hz
$t_x$ [°C]	Neznámá teplota
$R_x$ [Ω]	Odpor vinutí při neznámé teplotě
$R_0$ [Ω]	Odpor vinutí při známé teplotě
$t_0$ [°C]	Známa teplota

# 1 Transformátor

Transformátor je elektrický netočivý stroj, pracující na principu elektromagnetické indukce (tzv. indukční zákon). Používá se pro transformaci střídavého napětí na napětí jiné velikosti (z nižšího napětí na vyšší nebo obráceně) při stálé frekvenci a výkonu. Upravuje tedy velikost napětí tak, aby přenos napětí byl co možná nejehospodárnější.

Transformátory můžeme rozdělit podle jejich použití na: pecové, oddělovací, jisticí, přístrojové, obloukové, svařovací, blokové, rozptylové, distribuční, pro energetiku atd.

Svařovací transformátory se používají pro obloukové a odporové svařování. Pro odporové svařování se používají transformátory konstruované na velké proudy ( až několik set kA) a malé napětí (desítky V). Výstupní vnutí je tvořeno jedním závitem, který je chlazen vodou. Velikost proudu se řídí pomocí odboček.

Přístrojové transformátory se používají k oddělení měřících a jisticích přístrojů od obvodů, nebo k přizpůsobení měřené veličiny měřícím přístrojům. Rozdělují se podle měřené veličiny na napětíové, proudové, kombinované a speciální.

Pecové transformátory slouží k napájení odporových nebo obloukových pecí. Místo sekundárního vnutí mají tavící kanál, který tvoří kanál nakrátko.

Rozptylové transformátory se používají tam, kde jde o časté zkraty nebo kde požadujeme pokles napětí už při jmenovitém proudu. Konstrukčně je transformátor upravený tak, že má dělené jádro. Tím se zvětšuje vzduchová mezera.

Transformátory pro energetiku se dělí na blokové a distribuční. Distribuční transformátory snižují vn na nn a mají obyčejně jen neřiditelné odbočky a konstrukci na minimální obsluhu a udržování. Zatížení je proměnné a často se žádá malá váha a tichý chod. Blokovaný transformátor slouží k vyvedení vyrobeného elektrického výkonu do přenosové sítě nebo v případě odstavení generátoru může sloužit naopak k napájení vlastní spotřeby přes odbočkové transformátory.

Transformátory se také rozdělují podle počtu fází na jednofázové, trojfázové, speciální. Podle konstrukce magnetického obvodu na jádrový, plášťový, rámový, rozptylový nebo toroidní, dále pak podle chlazení aktivních částí, způsobu zapojení a počtu vnutí či poměru vstupního a výstupního napětí. [1]

## 1.1 Popis transformátoru

Transformátor je zařízení, které se skládá z více funkčních bloků. Podle rozdělení v předešlé kapitole se mohou jednotlivé transformátory lišit, ale základní části zůstávají stejné.

Magnetický obvod je složen ze vzájemně odizolovaných transformátorových plechů tloušťky nejčastěji 0,35 nebo 0,5 mm. Složením obvodu z plechů a jejich vzájemným odizolováním se snižují ztráty vířivými proudy. Tvar plechů je dán konstrukčním uspořádáním obvodu. Existuje několik tvarů plechů jako: EI, EE, M, LL či UI plechy.

Elektrický obvod je tvořen dvěma (vstupní, výstupní) nebo více vinutími uložených na magnetickém obvodu. Na vstupní vunutí (primární) se přivádí napětí  $U_1$ . Výstupní (sekundární) vinutí se přivádí ke spotřebiči a je na něm napětí  $U_2$ .

Nádoba transformátoru je přizpůsobená hlavně z hlediska chlazení. Při její konstrukci se musí brát v úvahu oběh chladiva, odvod tepla z chladicího média a mechanická pevnost. Proto se nádoby rozdělují na vanovou, zvonovou a samostatnou. Spodní část nádoby obsahuje zařízení pro vypouštění oleje nebo podvozek pro případnou manipulaci. Víko nádoby je přišroubováno k nádobě a jsou na něm upevněny porcelánové průchodky VN a NN.

Dilatační nádoba (konzervátor) je válcová nádoba umístěna nad víkem transformátoru. Tato nádoba slouží k zadržení oleje při jeho rozpínání.

Buchholzovo relé je plynové relé zajišťující základní ochranu transformátoru. Je umístěno na trubce propojující nádobu transformátoru s konzervátorem. Zajišťuje odpojení transformátoru v případě poruchy. Působí ve dvou stupních (výstraha a vypnutí).

Průchodky transformátoru umožňují a zabezpečují průchod proudu víkem transformátoru. Mohou být porcelánové, pleněné plynem nebo olejem. Jejich rozměry jako délka či hmotnost záleží na velikosti napětí daného transformátoru.

Izolační systém transformátoru lze rozdělit do tří základních skupin. Suché transformátory jsou naplněny plyným médiem, nejčastěji vzduchem nebo  $SF_6$  (fluorit sírový). Zalévané transformátory mají vinutí zalito pryskyřicí. A izolační systém u olejových transformátorů tvoří systém olej-papír. Tento systém je taky nejčastěji používán pro stroje vysokých výkonů.

## 1.2 Princip činnosti

Všechny základní jevy a princip jsou vysvětleny na jednofázovém transformátoru. Výsledky platí také pro jednu fázi trojfázového transformátoru. [21]

Základem činnosti transformátoru je elektromagnetická indukce. Na vstupní vinutí je přivedeno napětí  $U_1$ . Napětí protlačuje vinutím proud  $I_1$ , který vyvolá magnetický tok stejné frekvence jako má napětí  $U_1$ . Magnetický tok se uzavírá magnetickým obvodem. Jeho časová změna vyvolá ve vstupním vinutí indukované napětí  $u_{i1}$ , které je dáno vztahem [1]

$$u_{i1} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

kde	$u_{i1}$	indukované napětí
	$N_1$	počet závitů primárního vinutí
	$\Phi$	magnetický tok
	$t$	čas

Stejná změna magnetického toku působí i na závity výstupního vinutí a indukuje v něm napětí  $u_{i2}$ [1]

$$u_{i2} = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2)$$

kde	$u_{i2}$	indukované napětí
	$N_2$	počet závitů sekundárního vinutí
	$\Phi$	magnetický tok
	$t$	čas

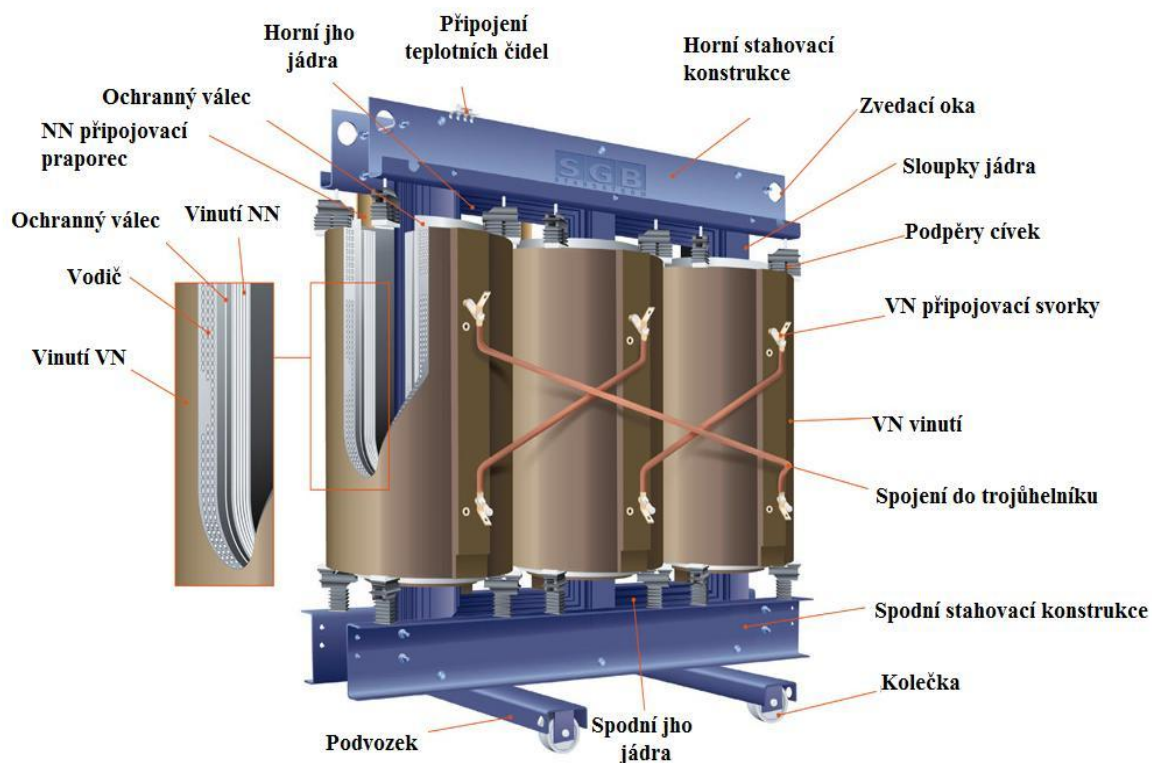
Směry indukovaných napětí a jim odpovídajících proudů jsou dány Lenzovým pravidlem. Po připojení zátěže na výstupní vinutí začne obvodem procházet proud  $I_2$ . Vstupní vinutí se chová jako spotřebič výstupní jako zdroj. [1]

## 1.3 Suché a olejové transformátory

Suché transformátory mají oproti zalévaným transformátorům několik výhod. U suchých transformátorů se používá pryskyřice, která je těžko zápalná a samozhášivá. Při případném požáru nevznikají žádné nebezpečné zplodiny. Z těchto důvodů se snižují nároky na požární

stěny, požární jímky nepotřebují vůbec. Proto se často používají na vysokých budovách, v podzemí nebo v továrních halách.

Pro chlazení transformátoru se používá pouze vzduch a nikoliv kapaliny různého chemického složení. Tím je chráněno i životní prostředí. Pro zvýšení výkonu zhruba o 40% se využívá nuceného chlazení. Příklad suchého transformátoru je vidět na obr. 1.



Obr. 1 Řez suchým transformátorem [2]

Nevýhodou suchých transformátorů jsou větší pořizovací náklady a hlučnost.

Olejové transformátory jsou o něco levnější než suché při zachování stejných parametrů. Při poruše transformátoru existuje i možnost opravy a to i poškozeného vinutí. Při zachování stejného výkonu jako u suchého transformátoru se rozměry zmenšují.

Olejový transformátor je naplněný chladícím médiem. Nejčastěji jsou transformátory naplněny transformátorovým olejem, který je vyroben z ropy. Takto vyrobený olej patří do skupiny minerálních olejů.

Výhodou použití oleje oproti vzduchu je jeho dobrá izolační vlastnost, dobře zaplňuje póry a dutiny, používá se jako chladící médium, usnadňuje zhášení výboje.

Oleje mají své nevýhody a to, že jsou velice hořlavé a biologický rozklad je u nich velmi pomalý. Kvůli případnému úniku a zamoření půdy nebo zdrojů vody se instaluje olejová jímka.



Na obr. 2 a 3 jsou příklady olejových transformátorů.



Obr. 2 Olejový transformátor 1 [3]



Obr. 3 Olejový transformátor 2 [3]

#### 1.4 Chlazení transformátorů

Při chodu transformátoru vznikají v magnetickém obvodu a ve vinutí ztráty, které způsobují oteplení transformátoru. Při velkém oteplení může docházet k omezení výkonu nebo k poškození izolace. Zvýšení dovolené teploty o 10% může snížit životnost izolace až o 50% a tím ke zničení zařízení.[1]

Způsob chlazení závisí na provedení transformátoru. Druh chlazení a způsob chlazení musí být uveden na štítku pomocí písemné značky. Na štítku mohou být uvedeny nejvíce čtyři písmena:

- *chladiivo, které je ve styku s vinutím,*
- *způsob oběhu,*
- *chladiivo, které je ve styku s vnějškem,*
- *způsob oběhu.*

Pro odvod tepla mohou být použity tyto druhy chladiv:

- *O* – olej
- *W* – voda
- *G* – plyn
- *A* – vzduch
- *S* – druh pevného izolantu
- *L* – nehořlavá tekutina

Způsob cirkulace chladiva může být zajištěn těmito možnostmi:

- *N* – odvod tepla je přirozený
- *D* – odvod tepla je nucený a řízený
- *F* – odvod tepla je nucený a neřízený

Na odvodu tepla se také velmi podílí povrch nádoby transformátoru, který je podle potřeby upraven (zvětšen). Nádoby se rozdělují podle provedení na :

- **Hladká nádoba** – používá se pro malé výkony.
- **Vlnitá nádoba** – vysoká žebra mohou být na všech nebo jen na protilehlých stěnách nádoby, ohřátý olej o aktivní části stoupá vlastním vztlakem, ochlazuje se o stěny nádoby a opět klesá ke dnu.
- **Trubková nádoba** - používá se pro mnohem větší výkony než hladká či vlnitá nádoba, nádoba je díky zavařeným trubkám pevnější oproti nádobě vlnité.
- **Radiátory** – jsou to určité výměníky tepla, které zvětšují rozměry transformátoru.

Příklady chlazení:

- *AN* – transformátor s přirozeným odvodem tepla, chladivo je vzduch.
- *AF* – odvod tepla je nucený pomocí např. ventilátoru, chladivo je vzduch.
- *ONAN* – transformátor s přirozeným prouděním a přirozený odvod tepla.
- *ONAF* – transformátor s přirozeným prouděním a ofukováním.

## 2 Izolační systém olej – papír

Izolační systém olej – papír představuje základní izolaci olejových transformátorů. Olej se používá nejen jako izolační kapalina, ale také plní funkci chladicího média. Proto se musí jeho parametry monitorovat, aby byla zaručena správná funkce. Papír se používá k odizolování vinutí. Monitorování správné funkce papíru je mnohem obtížnější než oleje. Proto více monitorovacích systémů pro transformátory se soustředí právě na olej.

### 2.1 Olej

Olej má v elektrotechnice velmi rozsáhlé použití pro jeho elektroizolační vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti patří tekutost, dobrá elektrická pevnost, dobře vyplňuje prostory a dutiny, usnadňuje zhášení výboje. Jednou z hlavních vlastností oleje jsou jeho chladicí účinky. Nevýhodou oleje je jeho postupná degradace, která je způsobena oxidací a poměrně vysoká hořlavost oleje.

Při použití olejového transformátoru se musí dbát na životní prostředí, které je v ohrožení při úniku oleje. Proto se musí kvůli zamoření půdy instalovat záchytná olejová jímka.

### 2.1.1 Základní rozdělení oleje

Kapalné izolanty – oleje můžeme rozdělit na přírodní a syntetické kapaliny, přičemž přírodní se ještě dále dělí na minerální, rostlinné a živočišné.

Minerální olej je ropný produkt, který se používá v transformátorech, kabelech potažmo v kondenzátorech. O jeho složení a vlastnostech více v kapitole 2.1.2.

Rostlinný olej je směs esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin. Dělí se na vysychavé (dřevný, lněný ) a nevysychavé (ricinový, řepkový), nevysychavé oleje se používají k impregnaci papírových kondenzátorů, vysychavé oleje se používají do elektroizolačních laků.[5]

Syntetické kapaliny se podle vzniku dělí do několika skupin. Polybuteny vznikají polymerizací nenasycených uhlovodíků. Mají dobré chemické a elektrické vlastnosti. Chlorované uhlovodíky byly pro svoji závadnost a zdraví škodlivým účinkům zakázány. Fluorované uhlovodíky mají také dobré elektrické vlastnosti, jsou nehořlavé, mají téměř dvakrát vyšší elektrickou pevnost než chlorované uhlovodíky. Silikonové kapaliny jsou nehořlavé, ekologicky nezávadné, teplotně stálé a mají výborné izolační vlastnosti. Organické estery jsou charakteristické vysokým bodem vzplanutí a hoření, mají větší viskozitu. [5],[18]

### 2.1.2 Minerální olej – transformátorový olej

Nejvíce používaný olej v transformátorech je minerální olej. I když v dnešní době je snaha používat jako elektroizolační kapaliny rostlinné oleje nebo syntetické kapaliny. Minerální oleje se vyrábějí destilací a rafinací ropy. Destilace je proces používaný k separaci složek kapalných směsí na základě různých velikostí bodu varu. Kapalná směs zahřívána na teplotu odpovídající teplotě určité složky. Poté dochází k přechodu této složky na plynnou podobu a opětovnému zkapalnění mimo destilační komoru. Pomocí vakuové destilace vznikají oleje s různou viskozitou. Myšlenkou vakuové destilace je pracovat s nižším tlakem, než je tlak atmosférický (snížením tlaku okolí se sníží bod varu určité látky). Rafinací se poté odstraňují některé nežádoucí látky obsahující kyslík. Jde tedy o zlepšování kvality oleje. Používají se i jiné způsoby ke zkvalitnění oleje, například odplynění, ochlazení s vykrytalizováním parafinů, odstranění nečistot aktivní hlinkou a jejím odfiltrováním.

Minerální oleje jsou z chemického hlediska složité směsí uhlovodíků. Převážný díl tvoří uhlovodíky (97 %), následované sloučeninami síry, kyslíku, dusíku a kovy obsaženy

v organických a anorganických solích nebo parafín. Podle celkového chemického složení lze určit jeho vlastnosti. Přebytek parafinických molekul zvyšuje viskozitu, přebytek benzenových molekul naopak snižuje viskozitu.[5]

Parafinické (alkalické) oleje jsou chemicky stálé, mají nižší relativní permitivitu a dielektrické ztráty. Mají vysoký bod vzplanutí a dobrou viskozitní křivku. Obecný vzorec je  $C_nH_{2n+2}$ . Používají se zejména pro transformátory.[5]

Naftenické (cyklické) oleje mají nižší bod tuhnutí oproti parafinickým olejům . Obecný vzorec olejů je  $C_nH_{2n}$ . [5] Používají se v kabelové technice.

Jednou z hlavních nevýhod minerálních olejů je jejich degradace, kdy dochází ke změně vlastností s časem. Stárnutí oleje je způsobeno fyzikálně-chemickými vlivy. Největší nepřítel oleje je vysoká teplota způsobená například oteplením vinutí. Další vlivy, které působí na olej jsou tlak, záření, styk oleje se vzduchem, katalyzátory jako je měď, železo nebo olovo. Při styku vzduchu s olejem, dochází za pomoci kyslíku ke stoupání kyselosti, a proto je snaha zabránit styku s vlhkým vzduchem. Proto se prostor v konzervátoru (dilatační nádoba) vysouší vysoušečem vzduchu. [5]

### 2.1.3 Údržba oleje

Olej jako každý materiál postupem času stárne a ztrácí své vlastnosti. Pokud olej dosáhne takového stupně degradace, že není schopen plnit svoji úlohu v transformátoru, musí nastat jisté kroky pro jeho obnovu. Stárnutí je vyvoláno například nadměrným stykem se vzduchem, zvýšenou teplotou nebo nečistotami.

Neinhibované oleje dosahují po šesti až osmi letech takového stupně degradace, že jejich provozuschopnost není možná. U inhibovaných olejů je tato doba delší. Pohybuje se mezi patnácti až dvaceti lety provozu. Dalším provozováním takto starých olejů je velké riziko havárie. Přitom stárnutí oleje se týká asi jen 3 až 5% objemu oleje, zbylá část zůstává beze změny.[9]

Metody jak olej ošetřit je několik a rozdělují se podle rozsahu degradace.

Filtrování oleje se používá tehdy, když jsou v oleji tuhé nežádoucí částice a saze. Filtrace obnovuje základní elektrické a izolační vlastnosti transformátorového oleje. [19]

Regenerace oleje je komplexní úprava oleje, jejímž cílem je obnova všech vlastností.

Regenerace se v dnešní době provádí pomocí pojízdných stanic. Mobilní stanice umožňují vysoušení, filtraci, odplynění s procesem regenerace a následné inhibice oleje. [20]

Sušení oleje se provádí většinou do vakua při určitém tlaku a teplotě.

V tab. 1 jsou uvedeny doporučené hodnoty různých měřených veličin před uvedením transformátoru do provozu a v provozu.

Tab. 1 Doporučené parametry oleje pro bezporuchový provoz transformátorů (ČR)[9]

Měřená veličina	Jednotka	Před uvedením do provozu	V provozu	Distribuční transformátory v provozu
Průrazné napětí	kV / 2,5 mm	min. 70	min. 65	min. 45
Číslo kyselosti	mg KOH / g	max. 0,04	max. 0,08	max. 0,1
Obsah vody	mg / kg	max. 12	max. 25	max. 25
Ztrátový činitel tgδ	%	max. 0,5	max. 7	max. 10
Mezipovrchové napětí	mN / m	min. 50	min. 38	min. 33
Rezistivita	GΩm	min. 60	min. 2	-
Obsah inhibitorů	%	0,3 – 0,5	min. 0,15	-

#### 2.1.4 Příklady rostlinných olejů

Envirotemp FR3 je tekutina složená z 98,5% rostlinného oleje, 1% antioxidantní látky, 1% studených aditiv a 1% barviv. Má světle zelenou barvu s mírným zápachem rostlinného oleje. Bod varu je okolo 360 °C, bod tuhnutí se pohybuje mezi -18 až 24 °C, pH je neutrální. Používá se pro výkonové transformátory. [22]

BIOTEMP je moderní kapalina od společnosti ABB. Má vynikající dielektrické vlastnosti, vysokou teplotní stabilitu, požární odolnost. Bod vzplanutí je min. 330°C, bod tuhnutí se pohybuje mezi -15 až -25°C.[23]

#### 2.1.5 Příklady minerálních olejů

PARAMO TRAFON je olej s vynikajícími elektroizolačními vlastnostmi. Má velmi dobrou oxidační stabilitu, nízký bod tuhnutí, vysoké povrchové napětí, dlouhou životnost. Používá se do transformátorů všech napěťových hladin. [24]

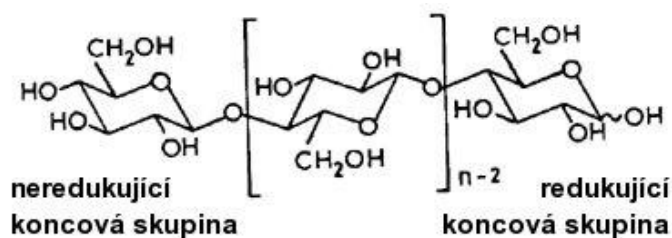
Inhibovaný olej ITO 100 distribuuje společnost FUCHS OIL CORPORATION (CZ), spol. s

r.o. Barva oleje je světle žlutá a má charakteristický zápach. Bod vzplanutí je vyšší než 130 °C. Olej je charakterizován jako zdraví škodlivý. [25]

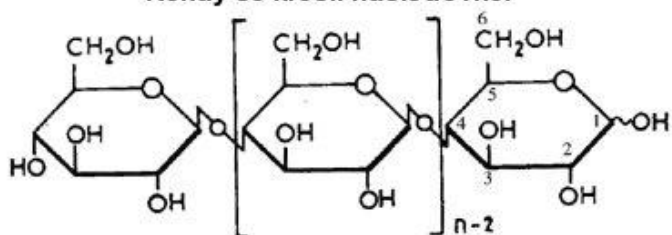
## 2.2 Papír

Papír je tenký a hladký materiál, který se obecně vyrábí zhotovením vláken. Tvoří ho rostlinná vlákna, která jsou převážně založena na celulóze. Nejvíce používaný materiál je dřevo, obvykle smrkové, jedlové nebo topolové. Mohou být použity i rostlinné materiály jako je konopí, bavlna či len. Neupravený papír obsahuje jen celulózu, proto se přidávají různé přísady. Díky přidaným přísadám pak papír získává své vlastnosti. Vláknina se podle požadovaného typu papíru upravuje chemicky nebo mechanicky.

Celulóza je jednou z hlavních složek dřeva. Tvoří zhruba 50% dřevní hmoty. Čistá celulóza se v přírodě vyskytuje jen velmi vzácně. Jedná se o polysacharid z beta- glukózy se sumárním vzorcem  $[C_6H_{10}O_5]_n$  [13] složený z monosacharidu-glukózy. V základních člancích jsou tři hydroxylové skupiny OH, které způsobují velkou polárnost celulózy. Polárnost celulózy je vyjádřena vysokou permitivitou  $\epsilon_r$  a ztrátovým činitelem  $\tan \delta$ . Makromolekula celulózy má tvar dlouhého řetězce. Na obr. 4 je vidět část vzorce celulózy.



Někdy se kreslí následovně:



Obr.4 Vzorec celulózy [10]

## 2.2.1 Vlastnosti papíru

Vlastnosti papírů můžeme rozdělit do tří okruhů:

- *Mechanické vlastnosti*
- *Fyzikální vlastnosti*
- *Chemické vlastnosti*

### 2.2.1.1 Mechanické vlastnosti

- *Pevnost v tahu* – schopnost odolávat vnějším silám působících v rovině vzorku opačným směrem. Pevnost není úměrná v závislosti na tloušťce papíru. Pro příčný a podélný směr se udává tržná délka.

- *Tržná délka* – je míra pevnosti papíru. Vyjadřuje se jako pomyslná délka zkušební vzorku, při níž se volně zavěšený pás vlastní silou přetrhne v místě závěsu. [11] Udává se obvykle v kilometrech (km).

- *Tvrдост* – vlastnost odolávat vniku cizího materiálu.

- *Tažnost* – je relativní prodloužení zkušební vzorku při zkoušce tahem v okamžiku přetržení. Vyjadřuje se v procentech původní délky vzorku. [11]

- *Propustnost* – vlastnost propouštět kapalinu nebo plyn. Zjišťuje se měřením času v sekundách, kterého je třeba k projití určitého objemu vzduchu o určité ploše. [15]

- *Savost* – schopnost pohlcovat kapalinu. Záleží na průměru a množství pórů.

K určení savosti se používá proužek, který se zavěsí na raménka se stupnicí. Spodní část se ponoří do kapaliny a po určitém čase se odečte na stupnici výška, do které kapalina vystoupala. Zkouška se provádí u savých papírů nebo u těch, které jsou určeny k impregnaci. [14]

### 2.2.1.2 Fyzikální vlastnosti

- *Plošná hmotnost* – charakteristická vlastnost papíru. Jedná se o hmotnost 1 m<sup>2</sup> materiálů. Udává se jako g/m<sup>2</sup>. Plošná hmotnost papíru se pohybuje od 8 do 120 g/m<sup>2</sup>. [14]

- *Měrná hmotnost* – stanovuje hustotu papíru. Se stoupající hustotou papíru stoupá permitivita. Hustotu papíru ovlivňuje stupeň mletí, povrchová úprava či druh papíru.

- *Nasákavost* – vlastnost papíru pohlcovat kapalinu celým svým povrchem.

Důležitá vlastnost u papírů, které se budou při dalším zpracování impregnovat. [14]

- *Tloušťka* – musí být stejná jak v příčném tak v podélném směru. Je to kolmá

vzdálenost mezi protilehlými povrchy.

- **Objemová váha** – má vliv na elektrické vlastnosti. Určí se jako podíl plošné hmotnosti k tloušťce papíru.
- **Ztrátový činitel** – záleží na vlhkosti, teplotě a kmitočtu. Je to ukazatel čistoty papíru. Ztrátový činitel přímo ovlivňuje vlhkost papíru.[16]
- **Permitivita** – je závislá na měrné hmotnosti papíru. Se zvyšující se měrnou hmotností permitivita stoupá. [16]
- **Elektrická pevnost** – závisí na tloušťce, teplotě, propustnosti, vlhkosti. Elektrická pevnost stoupá s nepropustností papíru. [16]

### 2.2.1.3 Chemické vlastnosti

- **Trvanlivost** – odolnost papíru proti stárnutí.
- **Stárnutí** – vnitřní i vnější vlivy vyvolané vnějšími faktory působící na materiál po určitou dobu (teplo, světlo). Projevuje se změnou barvy, zhoršením mechanických i chemických vlastností.
- **Kyselost** – stupeň kyselosti je dán koncentrací vodíkových iontů.[16]

### 2.2.2 Dělení papíru

Papír se dělí podle několika kritérií. Nejpoužívanější rozdělení je podle jeho výroby na ručně vyrobený papír a strojově vyrobený papír. Také se může dělit podle klížení, formátu, způsobu použití a podle plošné hmotnosti. Plošná hmotnost papíru je vyjádřena v gramech na jejich  $1 \text{ m}^2$ . Podle tohoto kritéria se dělí na papír, karton a lepenku.

Papír je materiál, který má plošnou hmotnost (gramáž) do  $150 \text{ g.m}^{-2}$ . V elektrotechnice se papír využívá v kondenzátorech, v kabelech, pro izolování vinutí elektrických strojů, pro tvrzené papíry, pro mikafolium nebo na odizolování magnetických obvodů.[8]

Karton je materiál tvořený jednou či více vrstvami o plošné hmotnosti  $150 - 250 \text{ g.m}^{-2}$ .

Lepenka je houževnatý, pevný materiál o plošné hmotnosti nad  $250 \text{ g.m}^{-2}$ . Je vyrobena z buničiny, hadroviny a někdy s určitým podílem dřevoviny. Lepenka je rozděluje na obyčejnou, lesklou pro elektrotechniku, drážkovou a transformátorovou. Obyčejná lepenka se používá tam, kde se nekladou požadavky na chemickou čistotu, mechanické a elektrické vlastnosti. Pokud jsou nároky na lepší vlastnosti lepenky, použije se lesklá lepenka. Drážková lepenka se používá pro drážkovou izolaci. Má dobré mechanické vlastnosti, které jí zůstávají i při ohybu. Transformátorová lepenka je vyrobena z čisté buničiny. Tato lepenka má velkou



pevnost v tahu, velkou elektrickou pevnost. Pokud by lepenka obsahovala nějaké nežádoucí hmoty (nebyla by chemicky čistá), může zhoršovat vlastnosti transformátorového oleje.

### 3 Degradční mechanismy působící na izolační systém

Izolační systém v transformátoru se skládá z papíru a oleje. Od chvíle, kdy je transformátor uveden do provozu začíná pomalý, ale nezvratný proces degradace.

Papír se skládá převážně z celulózy, která je přirozeně se vyskytující polymer. Každá molekula celulózy je složena z přibližně 1000 opakujících se jednotek monomeru. Postupem času se molekula celulózy zhoršuje. Dochází ke snížení stupně polymerizace a ke zhoršování vlastností jako je mechanická pevnost, křehkost nebo barva. V důsledku rozkladu dosáhne papír takového stupně, kdy už nebude moc plnit svoji izolační funkci.

Nejvýznamnější reakce, které ovlivňují degradaci celulózy, jsou hydrolyza a oxidace. Ale nejen tyto chemické reakce jsou vše, co způsobuje degradaci. Reakce jsou závislé na množství kyslíku, vody, kyseliny nebo teplotě. Obecně platí, že čím je úroveň těchto složek vyšší, tím je degradace rychlejší.

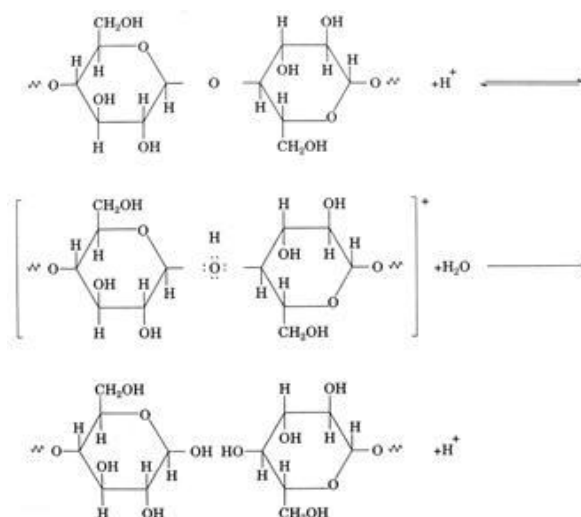
#### 3.1 Teplota

Teplota je jedním z hlavních činitelů ovlivňujících životnost izolačního systému. Se stoupající teplotou se zvyšuje míra chemických reakcí. Na každých 10 °C nárůstu teploty se reakční rychlost zdvojnásobí. Z toho vyplývá, že životnost papíru se výrazně snižuje při vyšších teplotách. Při zvýšené teplotě o 10 °C se životnost izolace snižuje o 50 %. Zvýšení teploty může být způsobeno zvýšením zatížení, elektrickým obloukem nebo částečnými výboji.

Stejně jako teplota ovlivňuje rychlost rozkladu pevné izolace, tak má vliv i na rychlost degradace oleje, přestože míra ovlivnění papíru a oleje je různá. [26]

#### 3.2 Hydrolyza

Hydrolyza jak už z názvu plyne, je rozklad chemických vazeb působením vody. Může ji rozdělit na kyselou, alkalickou a termickou hydrolyzu. Kyselá hydrolyza působí v kyselém prostředí a vyskytuje se nejčastěji. Alkalická hydrolyza se vyskytuje v alkalickém prostředí, a může nastat při špatném postupu odkyselování papíru. Termická hydrolyza působí při teplotě nad 120 ÷ 130 °C. Rychlost působení hydrolyzy na papír za normálních podmínek je velmi malá. Působením hydrolyzy papír ztrácí své mechanické vlastnosti. [11]



Obr.5 Hydrolyza glykosidické vazby [11]

Voda způsobuje snížení životnosti papírové izolace, korozi vinutí a nádoby. Také způsobuje snížení elektrické pevnosti oleje. Obecně se doporučuje, aby obsah vody nebyl větší než 0,5 %. Voda se mezi olej a papír rozděluje v konstantním poměru, v závislosti na teplotě. Jak se zvýší teplota, voda se pohybuje z papíru do oleje. Stejně tak jak teplota klesá, voda se pohybuje v opačném směru. Voda je produktem oxidace celulosy a proto se vždy její koncentrace zvyšuje s postupem času. Míra generace vody je tedy určena především na obsahu kyslíku a teplotě systému. [26] Voda se v oleji může vyskytovat v několika formách.

Volná voda se nachází u dna transformátoru. Do izolačního systému se dostává vlivem jeho hydrofobických vlastností. Tato voda přímo neovlivňuje vlastnosti oleje, ale může vlivem teploty a jakosti izolačního systému přecházet do oleje jako voda rozpuštěná nebo emulgovaná.

Rozpuštěná voda v oleji už představuje značné riziko. Její odstranění se provádí rozstříkáním oleje do vakua za nižší teploty.

Emulgovaná voda je směs mikroskopických kapek vody, které zhoršují dielektrické vlastnosti izolačního oleje (elektrická pevnost).

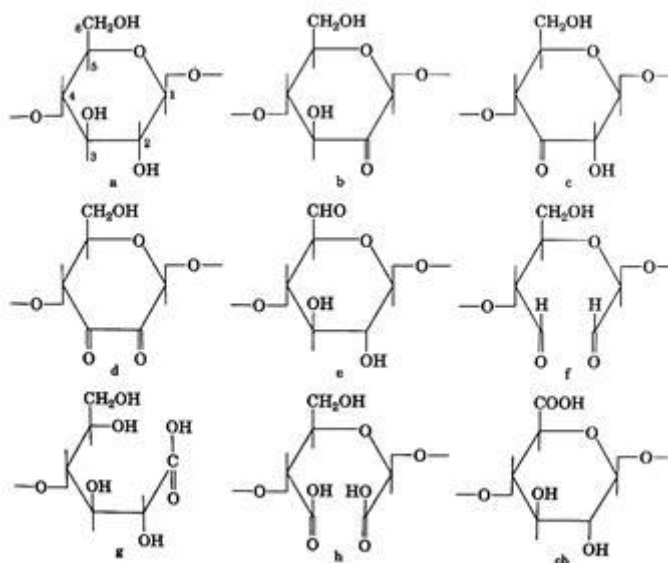
Reakční voda vzniká za pomoci chemických reakcí, které probíhají v nejteplejších místech transformátoru. Pokud se reakční voda dostane do chladnějších částí oleje, mění se na rozpuštěnou vodu. [12]

### 3.3 Oxidace

K oxidaci může dojít pomocí nízkomolekulárních produktů nebo pomocí autooxidace. Při oxidaci dochází k odštěpování elektronů z atomů nebo skupin. Tím se zvyšuje nebo snižuje

kladné nebo záporné oxidační číslo. Primární i sekundární hydroxylové skupiny glukopyranózy mohou být oxidovány za vzniku ketonových, aldehydových a karboxylových skupin. S rostoucí teplotou vzrůstá rychlost oxidace.[11]

Působením oxidace dochází ke strukturálním změnám a ke vzniku polárních zplodin. Ty mají za následek zvýšení elektrické vodivosti nebo zhoršení mechanické pevnosti.



Obr.6 Oxidace [11]

### 3.4 Kyslík

Izolační olej je na uhlovodíkové bázi a je předmětem probíhajícího procesu oxidace. Kyslík je hlavním činitelem při oxidaci. Konečnými produkty oxidace nejsou jen voda a oxid uhličitý ale také ketony, peroxidy, kyseliny nebo aldehydy. Vytvořená voda klesne na dno nádoby nebo se absorbuje do pevné izolace. Nádoby transformátoru není možné zcela hermeticky uzavřít, proto do oleje vniká kyslík. [26]

### 3.5 Kyselina

Kyseliny jsou obsazeny v oleji, který je v kontaktu s celulózou. Karboxylové kyseliny jsou vyrobeny z oleje v důsledku oxidace. Obsah kyseliny v oleji se zvětšuje, zatímco olej oxiduje. Vysoká hladina kyseliny (hladina větší než 0,6 mg KOH / g oleje) vede ke vzniku

kalu v oleji. Kal je tuhý produkt, který se ukládá v celém transformátoru. Ukládání kalu může vážně a nepříznivě ovlivnit odvod tepla a zapříčinit tak selhání zařízení.[26]

### 3.6 Částečné výboje, oblouk

Při těchto degradačních procesech vzniká vodík, který potřebuje na svůj vznik malé množství energie. Ale pouze částečné výboje nebo korona mají za následek, že vodík je produkován ve významném množství. Za přítomnosti tepelných závad a vodíku vznikají další plyny, jako je metan, etan nebo etylen.[26]

Částečné výboje vznikají v dutinách izolace, mezi špatně odizolovanými částmi magnetického obvodu, mezi kontakty, na rozhraní dvou dielektrik (olej-vzduch, olej-celulosa) atd. [27]

## 4 Metody pro sledování degradačních mechanismů izolačního systému.

Diagnostika transformátorů se rozděluje na výrobní a provozní. Výrobní zkoušky se provádějí ve výrobním závodě při vzniku. Mezi tyto zkoušky patří výstupní kontrola, mezioperační zkoušky a ověření funkčnosti celého zařízení. Provozoschopnost zařízení se testuje typovými, kusovými a zvláštními zkouškami. Přehled jednotlivých zkoušek je v tabulce 2.

Provozní zkoušky se rozdělují podle jejich provedení na off-line a on-line diagnostiku transformátorů.

On-line diagnostika se provádí za provozu transformátoru. Tato metoda má své výhody a nevýhody. Transformátor je stále pod dohledem, automaticky se vyhodnocují údaje, může se předcházet nežádoucímu stavu. Naopak je zde vysoká technická náročnost či velké množství naměřených hodnot.

Off-line diagnostika znamená, že zařízení se nejprve odstaví z provozu a poté se provádí všechna potřebná měření. Pro tuto diagnostiku se transformátory rozdělují do několika skupin (napěťová hladina, výkon, určení)[27]:

1. *Transformátory napěťové hladiny 400 a 220 kV,*
2. *Transformátory napěťové hladiny 110 kV,*
3. *Transformátory napěťové hladiny vn a výkonu  $\geq 1,6$  MVA – distribuční,*
4. *Transformátory napěťové hladiny vn a výkonu  $\geq 1,6$  MVA – vlastní spotřeb.*

Další rozdělení je podle to o jaký transformátor se jedná[27]:

- **nový stroj,**
  - a) **před uvedením do provozu, s novou náplní,**
  - b) **na konci záručního období,**
- **stroj po podrobné kontrole,**
  - a) **původní náplň,**
  - b) **vyměněná náplň,**
  - c) **regenerovaná náplň,**
- **stroj v provozu,**
- **náhradní stroj.**

Tab. 2 Zkoušky transformátorů [17]

Název zkoušky nebo měření	zkouška		
	typová	kusová	zvláštní
Měření izolačního odporu	+	+	-
Měření odporu vinutí za studena stejnosměrným proudem	+	+	-
Měření převodu napětí naprázdno na všech odbočkách	+	+	-
Kontrola sledu fází	+	+	-
Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje	+	+	-
Zkouška indukovaným napětím	+	+	-
Měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno	+	+	-
Měření charakteristiky naprázdno	+	-	-
Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko	+	+	-
Oteplovací zkouška	+	-	-
Zkouška elektrické pevnosti izolace atmosférickým impulzem			
a) na vinutí se jmenovitým napětím do 132 kV	+	-	-
b) na vinutí se jmenovitým napětím na 132 kV	+	+	-
Zkratová zkouška	+	-	-
Měření ztrátového činitele a kapacity vinutí na transformátoru			
a) se jmenovitým napětím menším než 110 kV	-	-	+
b) se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	+	+	-
Měření nulové složky reaktance na transformátoru			
a) se jmenovitým napětím menším než 110 kV	-	-	+
b) se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	-	-	+*)
Měření hluku na transformátorech			
a) výkonem do 1600 kVA včetně	+	-	-
b) s výkonem nad 1600 kVA	-	-	+
Zkouška přepínače odboček	+	+	-

Zkouška elektrické pevnosti izolace spínacími impulzy	-	-	+
Měření částečných výbojů	-	-	+
Měření ochrany radiového příjmu před rušením	-	-	+
Zkouška oleje pro transformátory s olejovou náplní			
a) zkouška průrazného napětí oleje	+	+	-
b) měření obsahu vody v oleji transformátorů se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	+	+	-
c) měření tg, R <sub>0</sub> a ε <sub>r</sub> transformátorů se jmenovitým výkonem 110 kV a vyšším	+	+	-
+ vykonává se - nevykonává se			
*) pro transformátory určené pro energetiku – typová zkouška			

## 4.1 Off-line diagnostika

### 4.1.1 Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu

Měření izolačního odporu je jednou z nejstarších technik jak ověřit stav izolace. Izolační odpor je závislý na vlhkosti nebo množství vodivých nečistot. Měření se provádí pomocí proudu protékajícího izolací při stejnosměrném napětí. V současné době je doporučeno napětí 2,5 kV, které by nemělo překročit jmenovité napětí měřené soustavy. Proud protékající izolací má tři složky (kapacitní, absorpční, vodivostní). Kapacitní proud je vyvolán vnitřním odporem zdroje a zaniká velmi rychle. Absorpční proud je způsoben polarizací dielektrika. Vodivostní proud je proud protékající izolací a způsobuje činné ztráty. Odpor se odečítá ve stanovených intervalech a jeho výpočet je pomocí Ohmova zákona.

Polarizační index  $p_{i60}$  určuje stav izolace a vypočte se jako podíl naměřených hodnot  $R_{iz15}$  a  $R_{iz60}$ . Hodnota  $R_{iz15}$  je v MΩ a odečtená po 15 s,  $R_{iz60}$  je hodnota také v MΩ odečtená po 60s.[27],[17]

$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} \quad (4.1)$$

- kde
- $p_{i60}$  polarizační index
  - $R_{iz60}$  izolační odpor odečtený po 60s
  - $R_{iz15}$  izolační odpor odečtený po 15s
  - $i_{15}$  absorpční proud odečtený po 15s
  - $i_{60}$  absorpční proud odečtený po 15s

Za pomoci změřené hodnoty  $R_{iz60}$  a kapacity izolace  $C_{50}$  se stanoví další veličina charakterizující izolační stav a to časová konstanta  $\tau$ . Ta se spočte jako součin těchto naměřených hodnot.

$$\tau = R_{iz60} \cdot C_{50} \quad (4.2)$$

kde  $\tau$  časová konstanta

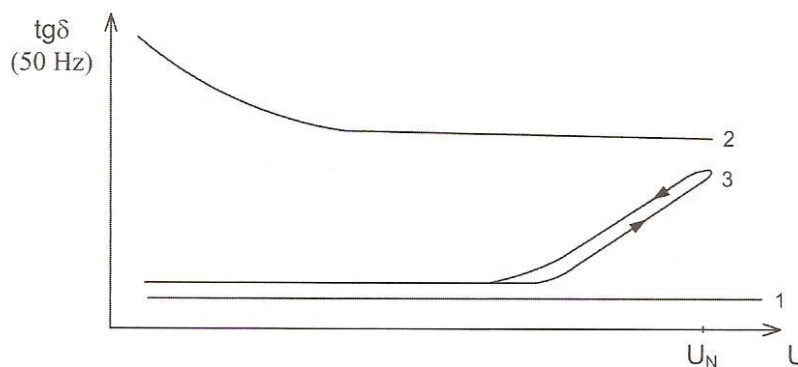
$R_{iz60}$  izolační odpor odečtený po 60 s

$C_{50}$  kapacita naměřená při frekvenci 50 Hz

#### 4.1.2 Měření ztrátového činitele a kapacity

Ztrátový činitel je závislý na ztrátách energie v dielektriku. S rostoucí hodnotou činitele dochází k zahřívání izolace, která stárne rychleji. Pomocí ztrátového činitele posuzujeme celkový stav izolace a z jeho velikosti, kterou ovlivňuje pevná a kapalná část dielektrika, můžeme indikovat, zda je izolační soustava provozně zestárlá nebo navlhla (obr. 7). Ztrátový činitel je bezrozměrné číslo (v absolutní hodnotě), proto se v praxi hodnota násobí  $10^2$ . Podle obr. 8 rozeznáváme izolaci kvalitní (1), která jak je vidět má nezávislý ztrátový činitel na hodnotě napětí. Izolaci navlhlou (2), která má vysoké a poměrně stabilní ztráty a izolaci suchou, kvalitní (3), která při nižších hodnotách nevykazuje změny, ale od určité hodnoty dochází k hysterezi. [27],[17]

Měření kapacity se využívá ke kontrole vinutí. Kapacita  $C_X$  se měří pro různé teploty a frekvence ( $x$  reprezentuje teplotu). Pokud se kapacita nemění s proměnou teplotou a frekvencí je vinutí v pořádku.



Obr. 7 Průběh ztrátového činitele v závislosti na napětí [17]

### 4.1.3 Měření částečných výbojů

Částečné výboje vznikají v dutinách izolace, mezi špatně odizolovanými částmi magnetického obvodu, mezi kontakty, na rozhraní dvou dielektrik (olej-vzduch, olej-celulosa) atd. Jejich vznik je zapříčiněn nevhodně navrženou izolační soustavou, špatnými technologickými postupy nebo nedodržením provozních podmínek. Metoda spočívá v měření a vyhodnocení proudových impulzů vyvolaných ve vnějším měřicím obvodu částečnými výboji, které vznikají v izolačním systému.

Částečné výboje zhoršují vlastnosti izolačního systému vlivem dlouhodobého působení. Měřením těchto výbojů lze odhalit závadu a tak předejít havárii.[27]

### 4.1.4 Měření poměru kapacit $C_2/C_{50}$

Poměr kapacit  $C_2$  (kapacita měřená při frekvenci 2 Hz) a  $C_{50}$  (kapacita měřená při frekvenci 50 Hz) je metoda pro zjištění míry navlhnutí izolačního systému transformátoru. Metoda využívá závislosti relativní permitivity na frekvenci. U suchých izolací se kapacita téměř nemění v závislosti na frekvenci. Při navlhnutí izolace se měřené kapacity při 2 a 50 Hz značně mění. Kapacita u vlhké izolace klesá s rostoucí frekvencí. Nejdříve se měří kapacita vinutí proti kostře  $C_{50}$  a po dodržení časového intervalu i kapacita  $C_2$ . Měření probíhá při napětí 100V a lze ho aplikovat na všechny typy olejových transformátorů. Vztah pro výpočet poměru kapacit je [27],[17]

$$C_2 / C_{50} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1 \quad (4.3)$$

kde  $C_2 / C_{50}$  poměr kapacit

$C_2$  kapacita měřená při frekvenci 2 Hz

$C_{50}$  kapacita měřená při frekvenci 50 Hz

V tab. 3 jsou mezní nejvyšší hodnoty, se kterými pak porovnáme vypočtenou hodnotu. Poměr kapacit přispívá k objektivnějšímu posouzení stavu transformátoru.

Tab. 3 Mezní hodnoty poměru  $C_2/C_{50}$ [17]

Teplota vinutí [°C]	10	20	30	40	50
Poměr $C_2/C_{50}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5



#### 4.1.5 Měření odporu vinutí

Měření odporu se v praxi používá zejména k přesnému stanovení teploty. K hrubému stanovení teploty se používá teploměr na transformátoru. U velkých transformátorů se používají dva teploměry, z nichž jeden je u dna nádoby. Potom se bere pro výpočet aritmetický průměr z obou teploměrů. Při přesném stanovení hodnoty se provádí měření odporu vinutí při známé teplotě. Teplota vinutí se vypočte podle vzorce[27]

$$t_x = \frac{R_x}{R_0} (t_0 + 235) - 235 \quad (4.4)$$

kde	$t_x$	neznámá teplota
	$R_x$	odpor při neznámé teplotě
	$t_0$	známá teplota (od výrobce)
	$R_0$	odpor při známé teplotě

#### 4.1.6 Metoda frekvenčních charakteristik

Metoda frekvenčních charakteristik se používá k odhalení poruch vinutí transformátoru (deformace vinutí, mezizávitový zkrat). Základ metody je v tom, že každé vinutí představuje určité uskupení kapacit, kapacit vinutí k zemi, vzájemných a vlastních indukčností a odporu vinutí. Toto uskupení má svoji charakteristickou frekvenční charakteristiku. Při zkratu či deformaci vinutí dochází ke změně kapacity nebo indukčnosti. Tato změna se projeví na průběhu frekvenční charakteristiky.[27]

#### 4.1.7 Měření parametrů oleje

K určení stavu transformátorového oleje je potřeba aplikovat celý soubor diagnostických metod. Ty nám pak umožní získat kompletní obraz o používaném oleji. Hodnocení kvality transformátorových olejů se provádí dle odborných norem, podle kterých by měl olej splňovat určité předepsané hodnoty. Na nový minerální olej se vztahuje norma např. IEC 60296, ve které jsou uvedeny vlastnosti a hodnoty oleje. Na již používaný olej který podléhá pravidelným kontrolám se vztahuje norma IEC 60422, ta udává návod na kontrolu a údržbu oleje.

Před samotnou diagnostikou oleje dochází k odběru vzorku. Tomuto procesu je nutné věnovat určitou pozornost, protože při nesprávné manipulaci dojde ke zkreslení výsledků.

Při nesprávném odběru může například dojít k navlhnutí, odplynění nebo naopak k nasycení vzdušnými plyny.

#### 4.1.7.1 Barva oleje

Pro mnohé spotřebitele je barva oleje důležitým měřítkem jak posuzovat kvalitu transformátorového oleje. Čím je barva oleje světlejší, tím bývá více kvalitní. Tato zažitá představa není vždy pravdivá.[6]

Destiláty z ropy, které se používají na výrobu transformátorového oleje, jsou zbarvené především v závislosti na přítomnosti uhlovodíků, dusíkatých látek, popřípadě sirných látek. Za pomoci rafinace odstraníme z oleje nežádoucí látky, přičemž schopnost oleje vůči stárnutí stoupá a barva se zesvětluje. Velikost rafinace je žádoucí jen do meze, kdy se barva dále zesvětluje, ale schopnost odolávat stárnutí už začíná klesat. Velmi intenzivní rafinací lze docílit takřka bílou barvu oleje, ale s velmi malou odolností vůči stárnutí. S postupnou hloubkou rafinace oleje ztrácí přirozené antioxidanty. Tyto látky způsobují tmavší barvu oleje, ale také mají schopnost zpomalovat oxidační stárnutí oleje.

Barva transformátorového oleje se porovnává se barevnými vzorky. Výsledek porovnání vystihuje číslo, případně číslo a písmeno. Jedním z přístrojů, kterým se měří barva oleje je například Lovibondův tintometr. [6]

Příklady barvy oleje jsou vidět na obr. 8.



Obr. 8 Barva oleje [9]

#### 4.1.7.2 Hustota

Hustota je základní fyzikální veličina všech látek. Je to číslo, které vyjadřuje o kolik je lehčí nebo těžší 1 cm<sup>3</sup> látky oproti stejnému množství destilované vody. Váha destilované vody je přibližně 1g, přesnější vyjádření je 0,998 239 g a to při teplotě 4 °C.

Značení hustoty je pomocí symbolu  $d_4^{20}$ . Tento symbol vyjadřuje hustotu dané látky při 20 °C, která se vztahuje k vodě o teplotě 4 °C. Lze použít i vodu o teplotě 20 °C potom se bude označovat symbolem  $d_{20}^{20}$ . Takto získanou hodnotu musíme přepočítat na  $d_4^{20}$  za pomocí vzorce [6]

$$d_4^{20} = d_{20}^{20} \cdot 0,99823 \quad (4.5)$$

kde  $d_4^{20}$  hustota při 4°C  
 $d_{20}^{20}$  hustota při 20°C

Hustota se měří hustoměrem, pyknometrem ( Gay–Lussacov pyknometr), kapilárním pyknometrem nebo Mohr-Westphalovými váhami. Měření hustoměrem slouží pro přibližné stanovení hustoty kapaliny. Základním principem hustoměru je Archimédův zákon. Měření pyknometrem je přesnější než měření za pomoci hustoměru. Jedná se o určení hmotnosti známého objemu. Nejdříve se musí zvážit samotný pyknometr ( čistý a suchý ). Po naplnění uzavřeme kapilární zátkou aniž by v pyknometru zůstaly vzduchové bubliny. Při měření se také musí sledovat teplota, protože objem kapaliny se mění v závislosti na teplotě. Pyknometr se po osušení a dodržení všech postupů opět zváží a za pomoci vzorce se vypočítá hustota.[6]

#### 4.1.7.3 Bod vzplanutí

Bod vzplanutí ropných produktů je taková teplota, při které přiblížením otevřeného malého plamínku dojde ke vzplanutí par smíšených se vzduchem. Rozeznáváme dvě intenzity par, při kterých dojde k vzplanutí. Směs par se vzduchem, kdy paliva je málo a vzduchu hodně je spodní mez výbušnosti. Při této koncentraci dojde pouze k vzplanutí, nikoliv k hoření par. Po bodu vzplanutí se pomocí zahřívání vytvoří taková koncentrace par, kdy se dospěje k horní mezi výbušnosti. Směs par této meze obsahuje malé množství vzduchu a mnoho par hořlaviny tudíž směs po zapálení trvale hoří. [6]

Pro zjištění bodu vzplanutí se kapalina zahřívá a v určitých intervalech se k hladině přiloží plamínek. Projevem vzplanutí je slabá exploze nad hladinou a zábleskem, který se rozšíří po hladině a ihned zmizí. [6]

Vzorky u kterých se stanovuje bod vzplanutí, nesmí obsahovat vodu. Zvýšený obsah vody má negativní vliv na přesnost výsledku, a také vyvolává pění vzorku. Zkoušené místo musí být bez průvanu a tmavé, aby případné vzplanutí bylo viditelné.

Bod vzplanutí se určuje z hlediska požární bezpečnosti. [6]

#### 4.1.7.4 Bod tuhnutí

Bod tuhnutí se zjišťuje prostřednictvím zkumavky, která se ponoří se zkoušeným olejem do chladícího média a měří se změna teploty v závislosti na čase. Ze začátku klesá teplota rychle, ale se změnou skupenství se téměř zastaví. Bod tuhnutí je tedy taková teplota, při které je změna v závislosti na čase nejmenší. [6]

U produktů tuhoucích plynule bez ostrého přechodu je teplota tuhnutí posuzována podle viskozity. Viskozita se hodnotí podle pohyblivosti kapalně složky, která se stane při bodě tuhnutí nehybnou. [6]

#### 4.1.7.5 Elektrická pevnost

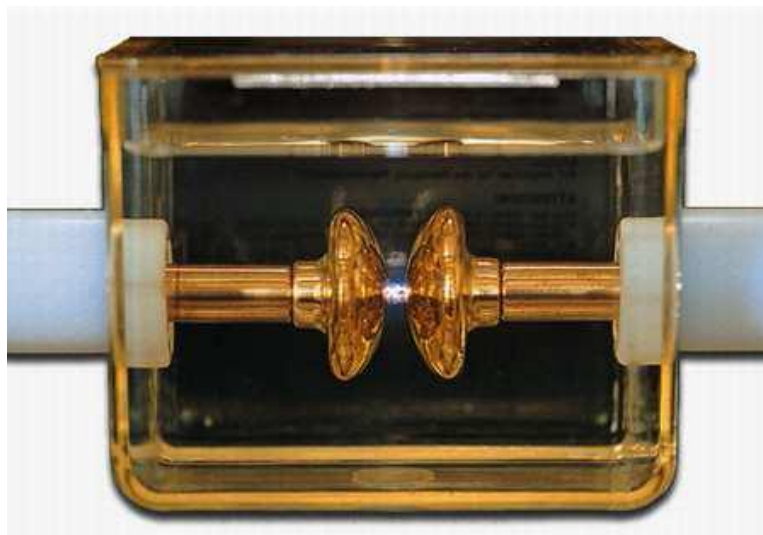
Elektrická pevnost patří mezi nejdůležitější parametry izolačních materiálů. Určuje použití izolačních materiálů v praxi. Pokud bude použit izolační materiál s nevyhovující elektrickou pevností, může dojít k přeskokům nebo k průrazu a zařízení může být zničeno. K přeskokům dochází u kapalin a plynů, k průrazu u pevných izolačních materiálů. V pevném izolačním materiálu dojde k vytvoření vodivého kanálu, který způsobí zničení izolačního materiálu.

Elektrická pevnost je podíl průrazného napětí  $U_p$  k tloušťce izolačního materiálu  $d$ . Je to vlastně intenzita elektrického pole značená  $E_p$ , která se vypočte podle vzorečku [39]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (4.6)$$

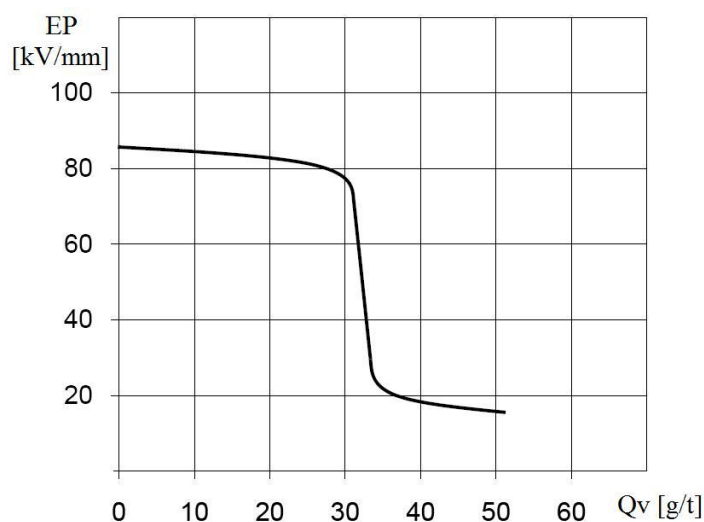
kde  $E_p$  elektrická pevnost  
 $U_p$  průrazné napětí  
 $d$  tloušťka vzorku

Měření elektrické pevnosti se provádí pomocí elektrodového systému. Pro vzduch se využívá kulové jiskřiště, pro kapaliny se využívají definované semisférické elektrody o pevné vzdálenosti (vzorek oleje je nalit do zkušební nádoby obr.9 , ve které jsou umístěny elektrody definovaného rozměru a jejich vzájemné vzdálenosti) a pro pevné izolanty válcové elektrody o různých průměrech. Elektrody pro zkoušení se vyrábějí z korozivzdorného materiálu a musí být hladké, bez vady a čisté. [39]



Obr.9 Zkušební nádoba pro měření průrazného napětí [40]

Na obr. 10 je vidět vliv vody na elektrickou pevnost. Po překročení obsahu vody  $Q_v > 30$  g.t<sup>-1</sup> dochází k velkému poklesu elektrické pevnosti.



Obr.10 Závislost elektrické pevnosti  $E_p$  na obsahu vody  $Q_v$  v oleji [17]

#### 4.1.7.6 Vlhkost

Vlhkost je jedním z hlavních činitelů, který nepříznivě působí na stárnutí oleje a způsobuje snižování elektrické pevnosti oleje. Důvodem vlhnutí oleje je voda. Ta vniká do oleje z okolní atmosféry. Vyšší obsah vody vede k navlhnutí pevných částí izolace a tím i k rychlejšímu stárnutí. Stárnutí se projeví rozkladem celulózy za působení vody a také kyslíku.

Druhým způsobem jak může dojít k navlhnutí oleje je odštěpení vody při oxidaci uhlovodíků. Má však menší význam.

Voda se v oleji vyskytuje v různých podobách. Jako volná, rozpuštěná, emulgovaná nebo reakční voda.

Volná voda bývá na dně nádoby. Je nežádoucí, ale přímo neovlivňuje elektrické vlastnosti.

Rozpuštěná voda na rozdíl od volné vody elektrické vlastnosti zhoršuje. Tato voda se odstraňuje prostřednictvím rozprašování oleje ve vakuu. To probíhá při vysoké teplotě. Rozpuštěná voda se vyskytuje v nižších vrstvách oleje. Odstranit lze pouhým vypuštěním spodní vrstvy oleje.[6]

Emulgovaná voda je směs oleje a mikroskopických kapek vody. Tato voda velmi zhoršuje elektrické vlastnosti oleje a její odstranění je velmi těžké.

Reakční voda vzniká v nejteplejších místech. To je v blízkosti vinutí a záletného jádra. Vzniká z chemických reakcí a při styku s chladnými vrstvami oleje se němí na vodu rozpuštěnou. [12]

#### 4.1.7.7 Číslo kyselosti

Číslo kyselosti je jednou z nejvýznamnějších veličin souvisejících se stárnutím oleje. Kyseliny v transformátoru vznikají oxidačními procesy. Způsobují korozi kovů a také mají špatné účinky na izolanty, hlavně na mechanickou pevnost celulóзовých izolantů. Hlavními produkty oxidace jsou kaly, které způsobují horší odvod tepla.

Číslo udává množství hydroxidu draselného (KOH), který je potřebný k neutralizaci kyselých složek v 1 gramu oleje. Pro výpočet čísla se používá následující vzorec

$$\check{C}K = \frac{a \cdot f \cdot N \cdot 56,11}{v} \quad (4.7)$$

kde	$f$	faktor 0,1 M KOH [17]
	$a$	spotřeba roztoku
	$v$	navážka vzorku oleje v g
	$N$	molarita titračního alkoholového roztoku KOH [17]
	$\check{C}k$	číslo kyselosti

## 4.2 On-line diagnostika

On-line diagnostika sleduje a vyhodnocuje stav zařízení při jeho provozu. Monitorovací systémy jsou připojené přímo na sledovaný transformátor. Pro zachycení maxima závad se musí sledovat ty části, u kterých je největší nebezpečí vzniku závady (aktivní část, izolační systém). [28] [29]

### 4.2.1 Volba parametrů pro sledování

On-line diagnostika sleduje pouze ty parametry, u kterých není monitorování tolik náročné, ale zároveň je velmi účinné. Největší množství závad a vznik poruch se vyskytuje v aktivní části a izolačním systémem. Proto parametry ukazující stav vinutí a izolace jsou [29]:

- *plyny rozpuštěné v oleji,*
- *přítomnost kyslíku,*
- *obsah vody,*
- *teplota.*

Pro sledování zestárnutí a určení životnosti byly navrženy následující parametry [29]:

- *snímání výstupního napětí a proudu pro každou fázi,*
- *snímání teploty oleje v horní části transformátoru,*
- *snímání teploty na vstupu a výstupu z chladiče,*
- *sledování obsahu plynů v oleji,*
- *sledování obsahu vlhkosti v oleji.*

### 4.2.2 Měření proudů a napětí

Měření proudů a napětí fází se provádí pomocí měřících transformátorů. Ty jsou umístěny na kondenzátorových průchoďkách a jsou doplněny vhodnými převodníky. Z těchto

hodnot dokážeme určit zatížení, a z proudu odhadnout Jouleovy ztráty ve vinutí a tím i tepelné zatížení izolačního systému.[29]

### 4.2.3 Měření teplot

Hlavním zdrojem tepla v transformátoru jsou Jouleovy ztráty ve vinutí a ztráty v magnetickém obvodu. Transformátor je složen z různě tepelně vodivých částí, proto se teplota oleje a jednotlivých částí v různých výškách liší. Přílišné teplotní zatěžování transformátoru nepříznivě ovlivňuje jeho izolační systém.

#### 4.2.3.1 Teplota v horní části transformátoru

K měření teploty oleje se využívají jímkové odporové teploměry umístěné v horní části nádoby transformátoru. Umístění měřícího snímače na horní část je z důvodu, že teplota oleje se v horní části zvyšuje. Odporový snímač je kontaktní snímač, který je v přímém kontaktu s měřeným prostředím. Součástí teploměru může být i vestavěný převodník, který převádí odpor na proudový signál 4 až 20 mA. Stále častěji je ale využíváno také přenosu po digitální lince RS 485, která umožňuje přenos až na 1200m.

#### 4.2.3.2 Teplota vinutí

K měření teploty vinutí se používá přímé měření teploty vinutí pomocí optovláknových snímačů nebo nepřímé měření.

Bodové optovláknové teploměry pracují na různých principech. Nejčastěji se využívají změny v absorpčním spektru polovodiče GaAs v závislosti na teplotě nebo měření úbytku intenzity fluorescence teplotně citlivého fosforu.[33]

Více se v praxi používá nepřímé měření za pomoci tzv. tepelné kopie. Toto měření je založeno na měření zatěžovacího proudu, který ohřívá topný odpor a snímání teploty oleje. Teplota odporu pak odpovídá teplotě vinutí. [17]

#### 4.2.3.3 Hot-Spot teplota

Hot-spot teplota je teplota nejteplejšího místa transformátoru (vinutí). Tato teplota je důležitý parametr pro stanovení zatížení a pro odhad zestárnutí izolačního systému transformátoru. Stanovení přesné polohy hot-spot teploty je problematické, proto přímé měření této teploty je velice komplikované. Provádí se instalováním senzoru přímo do vinutí. Další způsob je odhad na základě experimentů. Při odhadu se vychází ze zjednodušeného



rozložení teplot a předpokladu že teplota oleje uvnitř vinutí roste lineárně od spodu vinutí. [17]

#### 4.2.4 Měření výšky hladiny v dilatační nádobě

K měření výšky hladiny oleje se používají obtokové stavoznaky připevněné na boční straně transformátoru pomocí přírub. Výška hladiny je určena magnetickou zobrazovací lištou, kterou tvoří sloupec magnetických válečků. K dálkovému přenosu výšky hladiny se používá tzv. KRS-převodník, který využívá principu plováku s permanentním magnetem.

Na obr. 11 jsou ukázky magnetických obtokových stavoznaků. [30]



Obr. 11 Magnetický obtokový stavoznak[30]

#### 4.2.5 Stanovení obsahu plynů v oleji

Velký vliv na vlastnosti oleje mají plyny, které vznikají při rozkladu pevné izolace a oleje důsledkem tepelných a elektrických vlivů. Minerální oleje jsou směsí uhlovodíkových molekul obsahující molekulové skupiny  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  a  $\text{CH}$ . Při působení částečných výbojů se tvoří malé vodivé kanály, které dosahují teplot až několik tisíc stupňů. V tu chvíli vznikají látky, jako je etylen, acetylen, etan, metan a jiné. Etylen se vytváří při teplotách vyšších než  $500^\circ\text{C}$ , acetylen vyžaduje teploty v rozmezí  $800^\circ\text{C}$  až  $1200^\circ\text{C}$  a následně rychlé zchlazení na nižší teplotu. Částice uhlíku vznikají při teplotách od  $500^\circ\text{C}$  do  $800^\circ\text{C}$ .

Rozklad pevné izolace (papír, lepenka), která se skládá z polymerních řetězců, probíhá za nižších teplot ( $105^\circ\text{C}$  -  $300^\circ\text{C}$ ). Produkty, které vznikají, jsou kysličník uhelnatý, kysličník uhličitý ale také voda.

Plyny vznikají i za pomoci koroze, chemických reakcí zahrnující ocel, ochranné nátěry či nebarvené povrchy. [17], [29]

V tab. 4 jsou příklady citlivosti jednotlivých plynů na druhu poruchy.

Tab. 4 Druhy poruch podle klíčových plynů [17]

Druh plynu	Elektrické výboje			Lokální přehřátí		
	El. oblouk	Jiskř ení	Částe čné výboje	< 300 °C	300 až 1000 °C	> 1000 °C
Vodík H <sub>2</sub>	●	●	●	o	O	Δ
Metan CH <sub>4</sub>	□	Δ	Δ	Δ	Δ	□
Etan C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	o	o	o	●	o	O
Etylen C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	□	Δ	o	Δ	●	●
Acetylen C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	●	●	Δ <sup>“</sup>		o	Δ

● - klíčový plyn

□ - charakteristický plyn – doprovodný plyn (velký podíl)

Δ - charakteristický plyn – doprovodný plyn (malý podíl)

“ – platné jen pro velkou energetickou hustotu

K posouzení vlastností transformátorů se používají i různé poměry plynů. Tyto poměry jsou získávány různými způsoby a mají také svůj typický název. K těmto způsobům patří: Duvalův trojúhelník, Rogersova, Dörnenburgova metoda atd.

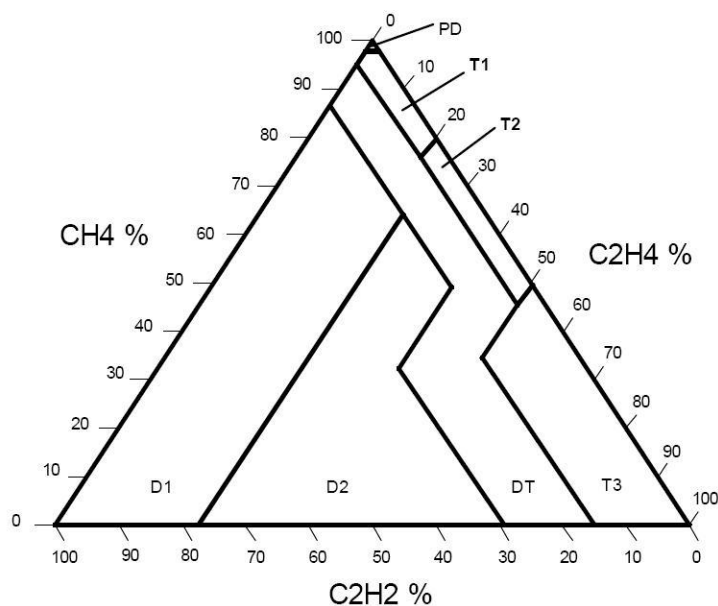
Metoda Duvalova trojúhelníku byla vyvinuta Michalem Duvalem a je součástí normy IEC 60 599:1999. Používá se, pokud existuje podezření na poruchu na základě zvýšení koncentrace plynu. Způsob používá koncentrace plynů C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>. Pro sestavení trojúhelníku je třeba vyjádřit plyny v procentech z celkového počtu těchto plynů a to takto:

$$\%C_2H_2 = 100 \cdot C_2H_2 / (C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4),$$

$$\%C_2H_4 = 100 \cdot C_2H_4 / (C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4)$$

$$\%CH_4 = 100 \cdot CH_4 / (C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4).$$

Vypočítané souřadnice plynů %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>; %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>; %CH<sub>4</sub> se pak vynesou do trojúhelníkového souřadnicového systému Duvalova trojúhelníku dle obr.12 .



Obr. 12 Metoda Duvalova trojúhelníku [16]

Trojúhelník je rozdělený do 7 částí. Každá z těchto částí odpovídá jedné ze 7 poruch. Jedná se o částečné výboje (PD), tepelnou poruchu do 300 °C (T1), tepelnou poruchu 300 °C–700 °C (T2), tepelnou poruchu nad 700 °C (T3), výboje nízké energie (D1), výboje vysoké energie (D2), tepelnou poruchu nebo elektrický oblouk (DT). [16]

#### 4.2.6 Vlhkost v izolačních systémech

Vlhkost má neblahý vliv na vlastnosti izolačního systému. Působením vlhkosti se zhoršují dielektrické vlastnosti izolačního oleje, především jeho elektrická pevnost. Voda se do izolačního systému dostává z ovzduší (vzduch obsažený v dilatační nádobě) nebo jako produkt izolačního stárnutí. V oleji se vyskytuje ve více formách a to jako voda volná, rozpuštěná, emulgovaná nebo reakční. Více o formách vody v kapitole 4.1.7.6.

#### 4.2.7 Diagnostika průchodek

Průchodky patří k nejcitlivějším prvkům transformátoru. Diagnostika spočívá ve sledování částečných výbojů průchodek, změny ztrátového činitele průchodek a změny jejich kapacity.

K měření ztrátového činitele se snímají časové průběhy napětí z kapacitního děliče izolace průchodky. V případě normálního  $\text{tg } \delta$  jsou napětí ve fázi a úhel mezi nimi je 120°. Pokud vzroste ztrátový činitel u jedné z průchodek, projeví se to na velikosti úhlů u dvou průchodek (třetí úhel zůstává stejný).

Průchodka tvoří hlavní kapacitu kapacitních děličů, na kterých se měří napětí. Změna kapacity průchodky se projeví změnou měřeného napětí. Poměr napětí v sítích VVN je velmi stálý, proto změnu větší než 2 % lze považovat ze změnu kapacity.

#### 4.2.8 Měření částečných výbojů

Částečné výboje vznikají v transformátoru na tzv. defektních místech. Defektní místa vznikají při nedokonalé výrobě (špatné technologické postupy) nebo při dlouhodobém provozování transformátoru.

Měření výbojové činnosti lze provádět jak metodami elektrickými, tak metodami neelektrickými (akustickými, optickými atd.).

Akustické měniče dokáží rozpoznat částečný výboj, který vznikl v nádobě transformátoru i v jeho blízkém okolí. Velkou nevýhodou akustických snímačů je nemožnost zkalibrování, protože neexistuje žádný vztah mezi elektrickým výbojem a vygenerovanou zvukovou vlnou.

Mezi akustické měniče patří piezokeramický měnič nebo měnič z optických vláken. Piezoelektrický měnič využívá sílu, která působí na krystal. Změna struktury mřížky vyvolá změnu elektrického náboje na povrchu křišťálu, což se pak projeví změnou napětí na voltmetru. O tom, jakou akustickou vlnu mohou piezokeramické akustické měniče rozeznat, rozhoduje jejich umístění v nádobě transformátoru. Akustické měniče z optických vláken používají světelný paprsek pro přenos informace o částečném výboji. Jsou dvě metody pracující na tomto principu. První využívá optická vlákna, kde se vychází ze změn tlaku prostředí, ve kterém se nachází. Měnič je v tomto případě zkonstruovaný tak, že optické vlákno se navine do tvaru válce. Na konci vlákna je zrcadlová plocha. Požadované frekvenční pásmo a citlivost se dosahuje vhodnou geometrií měniče a délkou použitého optického vlákna. Druhá metoda využívá interferometru v kombinaci se zrcadlovou membránou, která se umístí na konec optického vlákna. [41]

## 5 Přehled zařízení – on-line diagnostika

Hlavním úkolem používání on-line zařízení je předcházet vážným poruchám a haváriím transformátoru a tím šetřit nemalé prostředky za neplánované opravy strojů a výpadky ve výrobě elektrické energie. On-line zařízení se převážně používají pro velké výkonové transformátory, protože pořízení těchto systémů je velmi nákladné. Výhodou on-line měření je lepší představa o stavu zařízení. Dalším velmi důležitým přínosem je i měření životnosti stroje společně s vyhodnocováním klíčových parametrů stroje.

V této kapitole jsou popsány on-line zařízení, které sledují obsah plynů a vlhkosti v transformátoru. Obsah plynů má největší vypovídající schopnost o dějích v oleji. Vlhkost zvyšuje možnost elektrického průrazu, urychluje stárnutí izolačního systému a způsobuje korozi.

## 5.1 AQUAOIL 400

AQUAOIL 400 se používá pro on-line sledování teploty a relativní vlhkosti v oleji a její změny se zátěží. Senzor se snadno instaluje na ventil transformátoru, je vhodný i na již provozované transformátory, je pro venkovní použití a má dobře čitelný displej. [31]



Obr. 13 AQUAOIL 400 [31]

## 5.2 HYDRAN

Hydran M2 je nejnovější systém pro monitoring plynů transformátorovém oleji. Senzor detekuje klíčové plyny jako je  $H_2$  (první plyn, který se uvolňuje při nadměrném namáhání transformátorového oleje) a CO (uvolňuje se při degradaci papírové izolace). Také je vybaven senzorem pro měření vlhkosti. Systém umožňuje jak lokální tak i vzdálenou zprávu. Je ideální pro všechny typy transformátorů díky své odolnosti, robustnosti či rychlosti odezvy. Umisťuje se nejčastěji na trubkách za chladičem.

Hydran S2 má stejnou monitorovací funkci jako Hydran M2 ale liší se v možnostech komunikace s počítačem, ostatními zařízeními a nemá analogové vstupy ani výstupy.

Další provedení je například Hydran 201R nebo Hydran MULTI 2010. [32]



Obr. 14 Hydran M2 [32]

### 5.3 CALISTO

Systém Calisto byl vyvinut firmou Morgan Schaffer. Měří koncentraci vodíku H<sub>2</sub> a vlhkosti H<sub>2</sub>O rozpuštěných v oleji. Zařízení umožňuje kompletní ovládání přímo na místě instalace a zároveň vzdálenou správu. Součástí zařízení je instalační souprava, kontrolní software a software pro přenos dat.

Calisto 2 je schopen detekovat kromě vodíku H<sub>2</sub> a vlhkosti H<sub>2</sub>O ještě navíc oxid uhličitý CO. Přístroj sám měří a řídí průtok oleje vnitřním čerpadlem, aby byl zajištěn konstantní odběr vzorků oleje. Jakákoliv odchylka průtoku, koncentrace plynů nebo vlhkosti spouští alarm.

Po Calisto 2 přichází firma s dalšími přístroji. Je to Calisto 5, který umí měřit vodík H<sub>2</sub>, oxid uhelnatý CO, metan CH<sub>4</sub>, acetylen C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, etylen C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> a vlhkost. Přístroj umožňuje diagnostiku podle Duvalovho trojúhelníku.

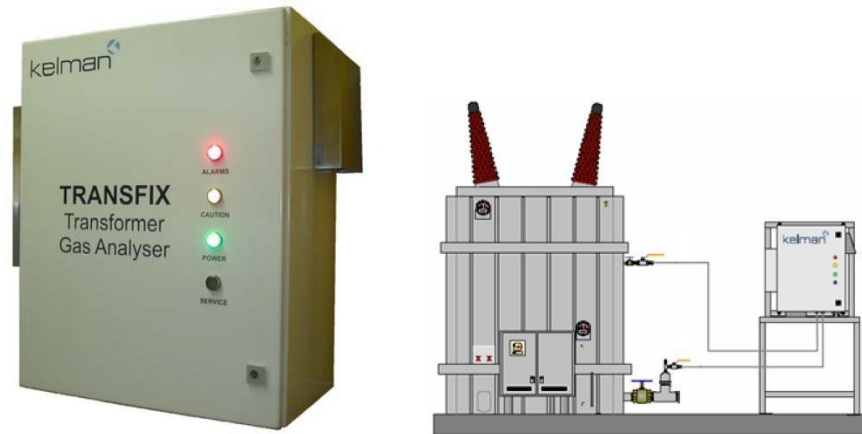
Calisto 9 měří následující plyny: vodík H<sub>2</sub>, oxid uhelnatý CO, metan CH<sub>4</sub>, acetylen C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, etylen C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> etan C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, oxid uhličitý CO<sub>2</sub>, kyslík O<sub>2</sub>, dusík N<sub>2</sub>, fluorid sírový SF<sub>6</sub> a také vlhkost. Přístroj umožňuje úplnou diagnostiku a také diagnostiku podle Duvalova trojúhelníka. [34],[35]



Obr. 15 Calisto [34]

### 5.4 TRANSFIX

Transfix je on-line DGA (DGA – dissolved gas analysis) systém pro měření koncentrace plynů a to: vodík H<sub>2</sub>, oxid uhličitý CO<sub>2</sub>, oxid uhelnatý CO, metan CH<sub>4</sub>, etan C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, etylen C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, acetylen C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, kyslík O<sub>2</sub> a voda. Transfix detekuje poruchy v prvotní fázi, umožňuje identifikaci poruch na základě výsledků měření, umožňuje výpočet stárnutí transformátoru. Monitorovací skříň se nemontuje na transformátor, pro připojení se používají dva ventily (vstupní a výstupní). Olej se odebírá ve vrchní části nádoby a vrací se zpět ve spodní části jak je tomu vidět na obrázku 14.[32]



Obr. 16 Umístění zařízení [32]

## 5.5 MULTITRANS

Multitrans využívá plynové chromatografie (DGA) jako systém Transfix. Je schopen monitorovat až tři nezávislé olejové náplně a je tedy dobrým nástrojem pro monitoring tří jednofázových transformátorů, pokud od sebe nejsou příliš daleko. Detekuje také osm poruchových plynů a vlhkost. Má téměř stejné monitorovací vlastnosti jako systém Transfix.[32]



Obr. 17 Multitrans [32]

## 5.6 Hodnocení

Výběr těchto zařízení je založen na tom, že obsah plynů a vlhkost jsou jedním z vážných degradačních činitelů, které působí na izolační systém. Všechna tato zařízení měří tyto degradační činitele a tak předchází zničení transformátoru. Další kritérium je známost a hojné používání těchto zařízení.

## 6 Přehled zařízení – off-line diagnostika

Pro off-line diagnostiku se používá mnoho elektrických i neelektrických měření, které udávají ucelený obraz o aktuálním stavu transformátoru. Off-line diagnostika se provádí na rozdíl od on-line diagnostiky jen v určitých intervalech a většinou na odstaveném transformátoru. Ale i přes to je velmi významnou a nedílnou součástí sledování stavu transformátoru.

Tato kapitola je zaměřena na zařízení, které se používají k diagnostice izolačních částí, dielektrické spektrografii, diagnostice mechanických změn v transformátoru, měření odporu vinutí atd. Všechny zmíněné zařízení jsou používány firmou TMV SS. [32]

### 6.1 Diagnostika izolačních částí

Přístroje této skupiny slouží pro měření kapacity a ztrátového činitele  $\text{tg}$ . Přístroje mají volitelnou úroveň napětí, jsou dostupné i s příslušenství, které rozšiřuje jejich aplikační rozsah.

#### 6.1.1 DELTA 2000, 3000

DELTA 2000 provádí komplexní diagnostický test izolace transformátorů, průchodek, jističů, kabelů atd. Měří veličiny napětí, proudu, výkonu (ztráty), kapacity a ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$ . Výsledky měření se zobrazují pomocí grafického LCD displeje. Obsluha přístroje je velmi snadná, není nutný žádný další hardware nebo software. Přístroj je určen pro práci při velkém rušení rozvodny (až 765 kV). [32],[36]

DELTA 3000 umožňuje kromě provádění zkoušek ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  také měření budícího proudu transformátoru.



Obr. 18 Zařízení DELTA 2000[36]



## 6.2 Měření převodu vinutí

Měření převodu vinutí a jeho polarity je jedním ze základních měření na transformátorech. Firma nabízí jednoduché jednofázové přístroje, ale také zařízení pro pokročilejší měření (hodinový úhel). [32]

### 6.2.1 Megger TTR 25

Megger TTR25 je příruční, bateriemi poháněná souprava na testování poměru vinutí transformátoru. Používá se k měření poměru vinutí, budícího proudu a polarity vinutí u jedno- a tří-fázových distribučních a výkonových transformátorů (testováno fáze za fází), potenciálních a proudových transformátorů a u transformátorů s vnitřním závitem. [37]



Obr. 19 Megger TTR 25 [37]

### 6.2.2 Megger TTR 300

Megger TTR300 je souprava pro měření převodového poměru výkonových, přístrojových a výkonových transformátorů v rozvodnách nebo při výrobě. Řada TTR300 také měří odchylku fáze na primáru a sekundáru v transformátoru. To rychle naznačí problémy, jako jsou částečné mezizávitové zkraty a chyby v jádru. Zařízení má zabudovanou paměť pro ukládání a načítání výsledků testů ve formátu XML. Nejvyšší možný poměr je 45000:1 a nejvyšší přesnost přístroje je 0,1%. [37]



Obr. 20 Megger TTR 300 [37]

### 6.3 Plynová chromatografie DGA

Analýza rozpuštěných plynů je jedna z nejdůležitějších částí diagnostiky transformátoru. Množství jednotlivých plynů v ppm nám umožňuje určit stav transformátoru a tak předejít nechtěné poruše.

#### 6.3.1 TRANSPORT X

TRANSPORT X používá zcela novou technologii, která zaručuje přesné a opakovatelné výsledky DGA (chromatografie), které uživatel obdrží v řádu minut přímo u transformátoru. Zařízení má široký měřicí rozsah společně s vysokou přesností pro všechny důležité plyny a vlhkost. TRANSPORT X umožňuje testování plyných vzorků odebraných např. z Buchholzova relé a rozeznává poruchy například podle Duvalova trojúhelníka. Plyny které přístroj měří jsou  $H_2$  (5-5000 ppm), CO,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $CH_4$  (všechny 1-50000 ppm ),  $CO_2$  (2-50000 ppm ),  $C_2H_2$  (0,5-50000 ppm ). [37]



Obr. 21 TRANSPORT X [37]

### 6.4 Testování dielektrické pevnosti oleje

Testování dielektrické pevnosti oleje je jednou z tradičních metod u transformátorů plněných olejem. Pro elektrickou pevnost jsou stanoveny určité hodnoty podle způsobu měření.

### 6.4.1 Megger OTS60SX

Megger OTS60SX je lehká, poloautomatická souprava pro testování pevnosti dielektrika olejů. Přístroj je vhodný pro využití v provozu a má variabilní napájení. Maximální výstup 60 kV umožňuje provádět testy olejů ze široké škály zařízení, včetně elektrických transformátorů, jističů a dalšího vybavení. [37]



Obr. 22 Megger OTS60SX [37]

### 6.4.2 Megger OTS60PB

Megger OTS60PB provádí testy olejů zcela automaticky. Výsledky jsou v požadovaném pořadí, kdy lze vyvolat každou hodnotu z jednotlivých zkoušek a automaticky se provede výpočet směrodatné odchylky. Maximální zkušební napětí testovací soupravy je 60 kV. [37]



Obr. 23 Megger OTS60PB [37]

## **7 Závěr**

V této práci je uveden základní princip transformátoru, rozdělení transformátorů a způsoby chlazení. Chlazení transformátoru je velmi důležité, protože zvýšená teplota je jedním z degračních činitelů, které působí na izolační systém.

Izolační systém olejových transformátoru tvoří olej a papír. Degradaci izolačních materiálů způsobují různé činitele. Nejpodstatnější je právě teplota, která má vliv na životnost izolace. Další činitele jsou vlhkost, kyslík, kyseliny, částečné výboje a oblouk. Pomocí diagnostiky transformátorového oleje lze zjistit případné poruchy a tak předejít zničení transformátoru.

K zjištění stavu izolace transformátoru se využívá on-line a off-line diagnostika. Pomocí těchto měření lze určit, v jakém stavu se izolace nachází. Off-line diagnostika se provádí na odtaveném transformátoru. On-line diagnostika se provádí za provozu. On-line diagnostika je jedním z hlavních složek, které jsou nedílnou součástí větších transformátorů. Obě diagnostiky jsou také velmi důležité z finančního hlediska. Předcházení vzniku poruchy může ušetřit nemalé množství peněz, protože pořízení velkých transformátorů je velice nákladné.

V práci byl také zpracován stručný přehled zařízení sloužících k měření při již zmíněných diagnostických metodách.

## Použitá literatura

- [1] KOCMAN, Karel, Jozef HOLBA, Alexander IHLÁR a Rudolf MRAVEC. *Elektrické stroje a přístroje I: Transformátory*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03-00406-3
- [2] Www.elpro-energo.cz:www.elpro-energo.cz/suche-transformatory/zakladni-popis/rezsuchym-transformatorem/. Transformátory | Elpro-Energo s.r.o. [online]. [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/suche-transformatory/zakladni-popis/rezsuchym-transformatorem/>
- [3] Olejové distribuční transformátory. TRANSFORMÁTORY A TLUMIVKY [online]. [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: [http://www.eximetrafo.cz/03\\_olejova\\_trafa](http://www.eximetrafo.cz/03_olejova_trafa)
- [4] Označení způsobu chlazení [pdf]. In: [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: <http://www.trasfor.sk/docs/oznaceni-zpusobu-chlazení.pdf>
- [5] TRNKA, Pavel a Radek POLANSKÝ. Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír. *Elektro scope* [online]. 2007, roč. 2007, č. 1, s. 5 [cit. 2012-04-05]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: [http://147.228.94.30/index.php?option=com\\_content&view=article&id=76:tepelnestarnuti-izolaniho-systemu-olej-papir&catid=8:islo-1&Itemid=3](http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&view=article&id=76:tepelnestarnuti-izolaniho-systemu-olej-papir&catid=8:islo-1&Itemid=3)
- [6] TICHÝ, Vladimír, Viliam PALLO a Václav MAŠEK. *Transformátorový olej*. 1. vydání. Bratislava: Slov. vydav. techn. lit., 1962. Edícia elektrotechnickej literatúry.
- [7] BARBORKA, Vít. Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů. *Elektro* [online]. 2002, roč. 2002, č. 7 [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25085](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085)
- [8] HASSDENTEUFEL, Josef, Karel KVĚT a Kolektiv. *Elektrotechnické materiály*. Praha: SNTL, 1967, 860 s. ISBN 04-540-67.
- [9] ESB Elektrické stroje: Regenerace olejů [online]. 2009 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.esb-bez.cz/upload/File/regenerace-transformatorovych-a-turbinovych-oleju.pdf>
- [10] Wikipedie: Celulóza [online]. 2008 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Celuloza.jpg>
- [11] Vlastnosti papíru [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: [http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res\\_vlastnosti\\_papiru](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_vlastnosti_papiru)
- [12] PROSR, Pavel. *On-line diagnostický systém výkonových transformátorů*. Plzeň, 2005. Disertační práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická.
- [13] Gymnázium Jihlava. *Vzorce* [online]. 2006 [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: [www.gymnazium.ji.cz/docs/sipvz/chemie/nizsi/prezentace/03vzorce.ppt](http://www.gymnazium.ji.cz/docs/sipvz/chemie/nizsi/prezentace/03vzorce.ppt)
- [14] Pedagogická fakulta MU. *Katedra technické a informační výchovy* [online]. 2006 [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: [http://www.ped.muni.cz/wtech/03\\_studium/Papir](http://www.ped.muni.cz/wtech/03_studium/Papir).
- [15] KRPA PAPER. *O papíru* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.krpa.cz/default.asp?f=paper&id=63&lng=cs>
- [16] ŠIMKOVÁ, Martina. *Příspěvek k diagnostice výkonových transformátorů olejových*. Brno, 2010. Doktorská práce. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY
- [17] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [18] RENÁK, Ladislav Reňák. *Elektrická vodivost alternativních elektroizolačních kapalin*. Brno, 2011. Diplomová práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNE.

- [19] TRAFOCZ. Filtrace olejů [online]. [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://www.trafocz.cz/filtrace-oleju-transformatory.html>
- [20] Energetika a tepelná technika REVOS. Regenerace transformátorových olejů [online]. 2012 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://www.revos.cz/sluzby-pro-energetiku/transformatory/regenerace-transformatorovych-oleju>
- [21] BARTOŠ, Václav. Teorie elektrických strojů. Plzeň: ZČU, 2006. ISBN 80-7043-509-7.
- [22] Cooper Industries [online]. [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: [http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/powersystems/resources/MSDS/98082\\_msd.pdf](http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/powersystems/resources/MSDS/98082_msd.pdf)
- [23] BIOTEMP. ABB [online]. [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1LUS471050-LTE&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [24] HI-OIL. [online]. 2009 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://www.eshop-hi-oil.cz/product/prumyslove-oleje/transformatorove-oleje/transformatorovy-olej-paramo-trafo-/237>
- [25] Hazmioil. Bezpečnostní list [online]. 2007 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://www.hazmioil.cz/BL/BL%20Inhibovan%FD%20transform%Eltorov%FD%20olej%20ITO%20100.pdf>
- [26] UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://www.uncp.edu.pe/newfacultades/ingenieriasarqui/newelectrica/phocadownload/descargas/E%20BOOK%20Electric%20Power%20Transformer%20Engineering.pdf>
- [27] HAMMER, Miloš, Jakub ERTL, Oldřich BARVENČÍK a David KUTÁLEK. Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů - 2. část. Elektrevue [online]. 2011, č. 53 [cit. 2012-05-05]. ISSN 1213 - 1539. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/prispevek-k-rozboru-spolehlivosti-vykonovych-olejovych-transformatoru---1--cast/>
- [28] MENTLÍK, Václav a Pavel PROSR. Možnosti laboratorního výzkumu on-line diagnostiky výkonových transformátorů. In: Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce1/100.pdf>
- [29] RŮŽIČKOVÁ, V. Aspekty on-line diagnostiky transformátorů. In: Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/17.pdf>
- [30] Merecom. [online]. 2007 [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: [http://www.merecom.cz/produkt.php?product\\_id=43](http://www.merecom.cz/produkt.php?product_id=43)
- [31] Maxicout. [online]. 2012 [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://maxicont.hu/doc/termekek/AQUAOIL400.pdf>
- [32] Měřicí přístroje a diagnostika pro energetiku i průmysl, termovize | "TMV SS" spol. s r.o. [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://www.tmvss.cz/Aplikace.html>
- [33] ŠAŠEK, Ladislav. Optovláknové snímače teploty. In: Automa [online]. 2003 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=28665](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28665)
- [34] TRAFOP. TRAFOP [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://trafop.cz/cz/monitoring-transformatoru>
- [35] TECTRA s.r.o. Monitorovanie transformátorov - stacionárne zariadenia [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: [http://www.tectra.sk/lm\\_trafomonitor\\_stacionarne.htm](http://www.tectra.sk/lm_trafomonitor_stacionarne.htm)

- [36] Cuthbertson Laird. Cuthbertson Laird [online]. 2011 [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://www.cuthbertsonlaird.co.uk/Detail.asp?ProdID=232>
- [37] Megger. Megger [online]. 2012 [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://www.megger.com>
- [38] Spatialworld. TRANSPORT X [online]. 2012 [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: [http://www.spatialworld.fi/public/documents/md/Transport\\_X.pdf](http://www.spatialworld.fi/public/documents/md/Transport_X.pdf)
- [39] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [40] SCHEJBAL, Václav. Diagnostika transformátoru prostřednictvím analýzy elektroizolační kapaliny. Plzeň, 2007. Disertační práce. ZČU.
- [41] Diagnostika transformátorov. In: Web.tuke.sk/ [online]. 2007 [cit. 2012-06-04]. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/fei-kee/jses/uploads/images/jses/jses-02-2007.pdf>