

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Diagnostika distribučních transformátorů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Tomáš JANDERA**  
Osobní číslo: **E10B0037P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Diagnostika distribučních 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. Uveďte druhy transformátorů, které se používají v elektrizační soustavě.
2. Popište druhy izolačních systémů používaných pro distribuční transformátory.
3. Popište diagnostické metody, kterými jsou, popř. mohou být určeny stavy izolačního systému.
4. Uveďte přehled výrobců distribuční transformátorů a pro vybraný jmenovitý výkon zpracujte detailní porovnání produktů.

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: 15. října 2012  
 Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013

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



  
 Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
 vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

**Abstrakt**

Předmětem bakalářské práce „Diagnostika distribučních transformátorů“ je vypracování ucelené rešerše diagnostických metod používaných u distribučních transformátorů, zejména z pohledu izolačních systémů. V této práci je uvedeno dělení transformátorů podle užití v elektrizační soustavě. Druhá kapitola je zaměřená na materiály, které se používají v elektroizolačních systémech. V následující části práce se zabývám samotnou diagnostikou rozdělenou podle jednotlivých typů těchto systémů. Závěrem je vypracovaný přehled výrobců a detailní porovnání jejich výrobků.

**Klíčová slova**

degradace, distribuční transformátor, diagnostika, elektrizační soustava, izolační systém, transformátorový olej

**Abstract**

The bachelor thesis “Diagnostic of Distribution Transformers” is focused on diagnostic methods used in distribution transformers, especially in field of insulating systems. In the thesis, transformers are classified according to the use in the electric power transmission system. The next chapters deal with materials used in electrical insulating systems and the actual diagnostics divided by the types of systems. At the end is an overview of manufacturers and detailed comparison of their products.

**Key words**

degradation, distribution transformer, diagnostics, power transmission system, insulating system, transformer oil

## Prohlášení

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.

.....  
podpis

V Plzni dne 28.5.2013

Tomáš Jandera

## **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>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TRANSFORMÁTOR</b> .....	<b>11</b>
1.1 TRANSFORMÁTORY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	12
1.2 KONSTRUKCE DISTRIBUČNÍHO TRANSFORMÁTORU .....	13
1.3 ZÁKLADNÍ ÚDAJE TRANSFORMÁTORŮ .....	14
<b>2 IZOLAČNÍ SYSTÉMY TRANSFORMÁTORŮ</b> .....	<b>15</b>
2.1 SUCHÉ (ZALÉVANÉ) TRANSFORMÁTORY .....	15
2.1.1 <i>Plynné složky izolačního systému</i> .....	16
2.1.2 <i>Pevné složky izolačního systému</i> .....	16
2.2 IZOLAČNÍ SYSTÉM OLEJ-PAPÍR.....	18
2.2.1 <i>Pevné složky izolačního systému</i> .....	18
2.2.2 <i>Kapalně složky izolačního systému</i> .....	19
<b>3 DIAGNOSTIKA IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ</b> .....	<b>22</b>
3.1 DIAGNOSTIKA OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ.....	23
3.1.1 <i>Diagnostika izolačních kapalin</i> .....	24
3.2 DIAGNOSTIKA SUCHÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....	32
3.2.1 <i>Stupeň polymerizace (DP)</i> .....	33
3.2.2 <i>Analýza furanových složek</i> .....	33
3.3 METODY MĚŘENÍ.....	33
3.3.1 <i>Měření izolačního odporu, určení polarizačního indexu a časové konstanty</i> .....	33
3.3.2 <i>Měření ztrátového činitele <math>\text{tg } \delta</math></i> .....	34
3.3.3 <i>Měření poměru kapacit C2/C50</i> .....	36
3.3.4 <i>Napětové zkoušky</i> .....	36
3.3.5 <i>Částečné výboje</i> .....	40
<b>4 PŘEHLED VÝROBCŮ DISTRIBUČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ</b> .....	<b>41</b>
4.1 PŘEHLED VÝROBCŮ.....	41
4.2 POROVNÁNÍ PRODUKTŮ.....	43
4.2.1 <i>Porovnání olejového a zalévaného transformátoru</i> .....	44
4.2.2 <i>Porovnání zalévaných transformátorů s měděným a hliníkovým vinutím</i> .....	46
4.2.3 <i>Porovnání transformátorů různých napětových hladin</i> .....	47
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>48</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>49</b>



## Seznam symbolů a zkratek

a [g].....	navážka kyseliny
b [cm <sup>3</sup> ] .....	spotřeba roztoku
C [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ].....	konstanta viskozimetru
C <sub>HG</sub> [μF].....	kapacita mezi vinutím vyššího napětí a kostrou transformátoru
C <sub>HL</sub> [μF].....	kapacita mezi vinutím vyššího a nižšího napětí
C <sub>LG</sub> [μF].....	kapacita mezi vinutím nižšího napětí a kostrou transformátoru
C <sub>x</sub> [μF] .....	naměřená kapacita
C <sub>1/2</sub> [μF].....	kapacita změřená při dané polaritě zdroje
C <sub>2</sub> [μF] .....	kapacita při 2 Hz
C <sub>50</sub> [μF].....	kapacita izolace při 50 Hz
ČK.....	číslo kyselosti
DP .....	stupeň polymerizace
DS .....	distribuční soustava
DBPK .....	2,6-di-terc.butyl-p-kresol
ES .....	elektrizační soustava
EIS .....	elektroizolační systém
E <sub>p</sub> [kV/mm].....	elektrická pevnost
f [Hz] .....	jmenovitý kmitočet
G .....	kostra můstku
FID.....	detektor plamenově ionizační
I [A] .....	jmenovitý proud
i <sub>0</sub> [%].....	proud naprázdno
i <sub>15</sub> [A].....	absorpční proud odečtený 15 s po přiložení napětí
i <sub>60</sub> [A].....	absorpční proud odečtený 60 s po přiložení napětí
K .....	kostra transformátoru
LIC.....	zkouška impulzem useknutým v týlu
M [mol/dm <sup>3</sup> ] .....	molární koncentrace
MK.....	měřicí přívod můstku
M <sub>n</sub> [g/mol] .....	průměrná molekulová hmotnost
M <sub>0</sub> [g/mol] .....	molekulová hmotnost monomerní jednotky
N [mol] .....	molarita

NN .....	nízké napětí
$p_{i1}$ [-] .....	minutový polarizační index
$P_0$ [W] .....	ztráty naprázdno
$P_K$ [W].....	ztráty nakrátko
PCA .....	polycyklické aromáty
PCB.....	polychlorované bifenyly
Q [pC].....	elektrický náboj
$R_{iz60}$ [M $\Omega$ ] .....	izolační odpor určený v čase 60 s po zapojení měřicího napětí
S [MVA].....	zdánlivý jmenovitý výkon
t [s].....	střední hodnota doby průtoku viskozimetrem
TCD .....	detektor tepelné vodivosti
$T_p$ [ $\mu$ s].....	doba do vrcholu
$T_2$ [ $\mu$ s].....	doba trvání impulzu
$T_{90}$ [ $\mu$ s].....	doba, po kterou spínací impulz převyšuje 90% vrcholové hodnoty
$\text{tg } \delta$ [-] .....	ztrátový činitel
U [V].....	jmenovité napětí
$u_k$ [%].....	napětí nakrátko
$U_m$ [V].....	amplituda napětí
$U_p$ [kV] .....	průrazné napětí
$\overline{U_p}$ [kV] .....	aritmetický průměr průrazného napětí
$U_Z$ [kV] .....	zkušební napětí
v [g] .....	navážka vzorku izolačního oleje
VN .....	vysoké napětí
VNK .....	vysokonapěťový přívod můstku
VPI.....	vacuum pressure impregnation
$\epsilon_r$ [-].....	relativní permitivita
$\eta$ [g.cm <sup>-3</sup> ] .....	hustota proměřované kapaliny
$\tau$ [s] .....	časová konstanta
$\nu$ [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ] .....	kinematická viskozita

## Úvod

Předložená práce se zabývá diagnostikou distribučních transformátorů a popisem prvků v elektrizační soustavě. Elektrizační soustava je součástí společnosti již od přelomu 19. a 20. století. Na počátku této soustavy jsou výroby elektrické energie, mezi které patří vodní, jaderné, tepelné, fotovoltaické a jiné druhy elektráren. Samotná elektrizační soustava se dělí na dvě základní části. První částí je přenosová soustava, která zajišťuje rozvod od výrobců elektrické energie k velkým rozvodnám. Přenosové napětí se zde pohybuje nad 110 kV. Rozvod elektrické energie od velkých rozvodů ke koncovým zákazníkům je zajištěn distribuční soustavou. Ta je tvořena vzájemně propojeným souborem vedení a zařízení s napěťovou úrovní pod 110 kV. Abychom mohli měnit napětí mezi jednotlivými částmi elektrizační soustavy a tím předcházeli vznikům ztrát, jsou do soustavy včleněny transformační stanice.

Mezi energetické transformátory nejčastěji řadíme blokové a distribuční. Blokové transformátory jsou mezi výrobnou elektrickou energií a přenosovou soustavou. Distribuční slouží ke snížení napěťové hladiny v distribuční soustavě, tak aby elektrická energie byla využitelná koncovým zákazníkem. Z hlediska použitého izolačního systému rozdělujeme transformátory na suché, suché zalévané a olejové. Vlivem stárnutí izolace se zhoršují nejen elektrické vlastnosti, ale i chemické a mechanické. Narušením izolačního systému dochází většinou k zásadnímu poškození celého stroje, proto abychom předešli poruchám transformátorů, musíme provádět včasnou a pravidelnou diagnostiku těchto zařízení. Diagnostika je soubor metod a prostředků, který slouží k zjišťování technického stavu objektu.

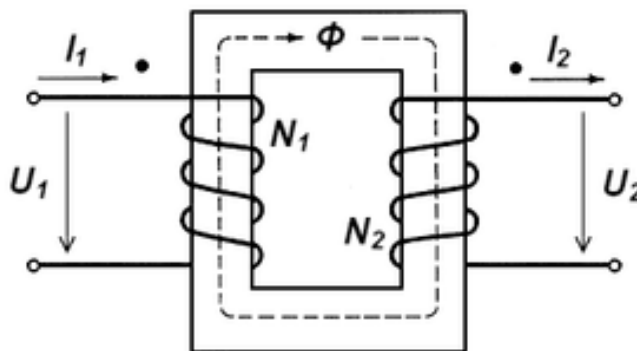
Cílem této práce bylo vypracovat rešerši zaměřenou na diagnostiku izolačních systémů distribučních transformátorů. Závěrem jsem se věnoval porovnání transformátorů od jednotlivých výrobců.

# 1 Transformátor

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který v elektrizační soustavě transformuje nejčastěji napětí na požadovanou velikost. Základní princip transformátoru je založen na zákonu elektromagnetické indukce. Magnetický tok vybuzený na vstupním vinutí (primární vinutí) indukuje napětí na výstupním vinutí (sekundární vinutí). Tento princip můžeme vidět na obrázku č. 1. Jelikož nemá žádné pohyblivé části, jedná se o velmi spolehlivé zařízení, které je nedílnou součástí každé elektrizační soustavy. Účinnost transformátorů je velmi vysoká, pohybuje se okolo 98 %. Transformátory umožňují měnit velikost napětí, frekvenci střídavého proudu, změnit počet fází nebo galvanické oddělení obvodů. Ale nejdůležitější funkcí transformátoru je změna napětí v jednotlivých částech elektrizační soustavy za účelem zvýšení ekonomie přenosu. Transformátory pro energetiku jsou třífázové nebo jednofázové, které se ale skládají do větších celků, protože elektrizační soustava je třífázová. Výkony transformátorů a napěťové hladiny nabývají hodnot zlomků VA a V až stovky MVA a kV. Mezi největší výhody tohoto stroje patří jednoduchý provoz, spolehlivost a nízká náročnost na obsluhu a údržbu. Transformátory se dělí:

- podle použitého izolantu (suché, zalévané a olejové),
- podle počtu fází (jednofázové, trojfázové a speciální),
- podle způsobu použití (energetické, bezpečnostní, napájecí, regulační, rozptylové a měřicí),
- podle způsobu chlazení,
- podle počtu vinutí.

Důležitým faktorem při výběru transformátoru je jeho životnost, která by se měla pohybovat řádově v desítkách let. [6]



Obr. 1: Jednoduché schéma principu transformátoru (převzato z: [19])

## 1.1 Transformátory v elektrizační soustavě

Elektrizační soustava (ES) je celek, který obsahuje zařízení pro výrobu, přenos a následnou distribuci elektřiny. ES se dělí na přenosovou a distribuční soustavu. Hlavními prvky jsou elektrická vedení a stanice. Mezi elektrické stanice řadíme například transformovny, spínací stanice, kompenzační stanice a rozvaděče.

Přenosová soustava je často charakterizována hodnotou přenosového napětí 110 kV a více. Zajišťuje dálkový přenos energie, který probíhá mezi výrobcem (elektrárny) a velkými rozvodnami. Přenosová soustava je tvořena hlavně nadzemním vedením velmi vysokého napětí. Jejím provozem se v České republice monopolně zabývá státní společnost ČEPS, a.s. Distribuční soustava vychází z přenosové a zajišťuje rozvod elektrické energie z přenosové soustavy k jednotlivým koncovým uživatelům. Napěťové hladiny distribuční soustavy jsou 0,23 kV, 0,4 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV a 35 kV. Distribuční soustava se dále dělí na rozdělovací a rozváděcí. Rozdělovací má dvě části primární s napěťovou úrovní 110 kV, která zabezpečuje rozvod na úrovni krajů, a sekundární s 22 a 35 kV na úrovni okresů. Rozváděcí dělíme na primární s 6 kV pro průmyslový rozvod a rozvod ve městech, a sekundární s 0,4 kV pro rozvod ve městech a obcích. Součástí obou těchto soustav jsou i řídicí, ochranné a informační systémy. [24]

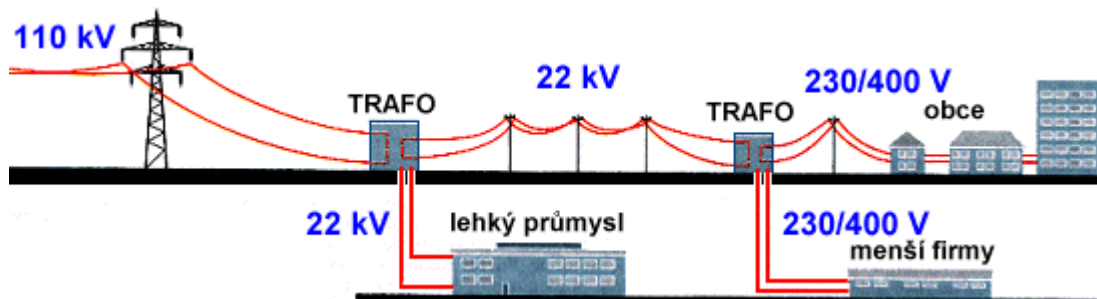
Pro přechody mezi jednotlivými napěťovými hladinami používáme energetické transformátory. Jejich základní dělení je na blokové a distribuční. Úkolem blokového transformátoru je zvýšit napětí z energetického generátoru na vyšší napěťovou úroveň vhodnou pro použití k přepravě energie v přenosové síti. U většiny velkých elektráren se napětí transformuje na 400 kV. Minimální výkon těchto transformátorů dosahuje hodnot 500 kVA. Blokové transformátory se dělí podle velikosti na:

- malé (500 - 7500 kVA),
- střední (7500 kVA - 100 MVA),
- velké (nad 100 MVA).

Pro použití do vnitřních prostor se volí suché ale i olejové typy, do venkovních většinou jen olejové. Distribuční transformátory nejčastěji mění napětí z hodnoty 22 kV na 0,4/0,23 kV. Hlavním úkolem DS je tedy transformovat napětí z přenosové sítě, tak aby bylo využitelné koncovým zákazníkem. V distribučních sítích jsou transformátory často umístovány na koncovém vedení VN. Výkony těchto transformátorů dosahují hodnot až 2500 kVA. [5]

Součástí elektrizačních soustav jsou i přístrojové transformátory. Ty se dělí na měřicí a jistící. Často jsou tyto transformátory postaveny tak, že mají zvlášť výstupy pro měřicí

přístroje a zvláště pro jistící přístroje. Jejich hlavním úkolem je poskytnout přesné vstupní údaje pro systémy jištění, ovládání a měření. Součástí soustav jsou také jistící transformátory, které můžeme zařadit mezi přístrojové. Ty slouží k napájení ochran zabezpečující provoz nebo omezující poruchy elektrických strojů a zařízení.



Obr. 2: Přenos elektrické energie ke koncovým zákazníkům

## 1.2 Konstrukce distribučního transformátoru

Transformátor se skládá ze dvou aktivních částí: jádro a vinutí. Mezi pasivní části řadíme například chladicí a izolační systémy.

Magnetický obvod (jádro) je složen z transformátorových plechů stažených stahovací konstrukcí. Tyto plechy jsou orientované a za studena válcované, aby došlo k omezení hysterézních ztrát. Na výrobu těchto plechů se používá křemíková ocel. Izolují se od sebe elektroizolačními epoxidovými laky. Pro zajištění minimálního zkreslení magnetického toku v přechodových oblastech jádra se dosahuje pomocí specifického stříhu a skládání plechů. Metoda step-lap je způsob speciálního skládání plechů, který přináší omezení ztrát naprázdno a snížení akustického tlaku. Nejčastěji jsou plechy stříhány pod úhlem  $45^\circ$  a následně jsou skládány podle rozměrů po jednom nebo po skupinách. Dnes se tento způsob skládání používá nejčastěji. Podle konstrukce magnetického obvodu rozdělujeme transformátory na druhy: jádrový, plášťový a toroidní typ.

Vinutí nízkého napětí distribučních transformátorů jsou nejčastěji zhotoveny z měděných nebo hliníkových plechů. Mezi těmito plechy se napětí pohybuje pouze v desítkách voltů, proto se používá pouze jedna nebo dvě vrstvy mezi závitové izolace. Mezi nejčastěji používané materiály na tyto izolace patří kraftový papír nebo Nomex. Případně se papír vytvrzuje epoxidovým tepelně vytvrditelným lepidlem. Dále jsou v těchto plechách chladicí kanály. Na vinutí vyššího napětí se používají měděné nebo hliníkové vodiče kruhového případně obdélníkového průřezu. Vodiče jsou od sebe odizolovány izolačním papírem, Nomexem nebo izolačním smaltem. Opět se používá epoxidová pryskyřice pro vytvrzení. Vinutí vyššího napětí je navinuto na vinutí nižšího

napětí, přes konstrukci, která tvoří NN/VN izolaci, což přináší pevnost, tuhost a kompaktnost. K zaizolování celkové izolace vinutí se často používá metoda VPI. Její hlavní výhodou, že při použití této metody nevznikají nehomogenity. Problém je ve vysoké ceně a nemožnost rozebrání a opravy. [1], [5], [23]

Nádoba distribučních transformátorů je často konstruována s chladícími žebry. Ty mají za úkol zvětšit chladící plochu. Samotná konstrukce je jednoduchá, dno, víko, chladící žebra a stěny jsou spolu svařovány. Hlavní funkce nádoby jsou: tepelný výměník pro odvádění tepelných ztrát, nádoba pro chladící a izolační kapalinu, ochranný plášť a například poskytuje stínění pro případ vyzařování elektromagnetického pole. [23]

Izolační systémy jsou předmětem této práce, proto se jimi budeme zabývat podrobněji v druhé a třetí kapitole.

### 1.3 Základní údaje transformátorů

Na štítku stroje se uvádí název výrobce, rok výroby, typ, výrobní číslo, celková hmotnost, hmotnost oleje a dále se objevují tyto údaje:

- 1) jmenovitý zdánlivý výkon  $S$  [MVA],
- 2) napětí nakrátko  $u_k$  [%],
- 3) proud naprázdno  $i_0$  [%],
- 4) druh transformátoru (distribuční, blokový atd.),
- 5) počet fází,
- 6) hodinové číslo,
- 7) zapojení fází (Y-hvězda, D-trojúhelník),
- 8) jmenovité napětí [V] a jmenovitý proud [A],
- 9) jmenovitý kmitočet [Hz],
- 10) chlazení transformátoru,
- 11) krytí transformátoru,
- 12) třída izolace vinutí.

## 2 Izolační systémy transformátorů

Elektroizolační systém (EIS) je izolační struktura obsahující jeden nebo více elektroizolačních materiálů s přidruženými vodivými částmi, použitá v elektrickém zařízení. Pro spolehlivý chod je dobrý stav izolace podmínkou. Izolace musí být odolná proti různým podmínkám – teplotě, vlhkosti, vodivému prachu a mechanickému namáhání. Tyto vlastnosti jsou nezbytné pro správné fungování zařízení jako celku. Izolační systémy se však liší v použitých technologiích a materiálech. Existuje dělení na tři základní skupiny: suché, zalévané a kombinaci olej-papír. [1]

### 2.1 Suché (zalévané) transformátory

Suchými transformátory rozumíme ty, u kterých není použitý tekutý impregnant. Z toho je zřejmé, že jako hlavní chladivo a pracovní prostředí je použit plyn. Nejčastěji je to vzduch nebo fluorid sírový ( $\text{SF}_6$ ). Výkon těchto transformátorů dosahuje hodnot do 10 MVA. Izolačními prvky jsou papír, Nomex, lepenky nebo kombinované materiály.



Obr. 3: Zalévaný transformátor bez nádoby (převzato z: [37])



### 2.1.1 Plynné složky izolačního systému

Fluorid sírový ( $\text{SF}_6$ ) je inertní plyn (elektronegativní), který se v ovzduší přirozeně nevyskytuje. Je to chemicky vyráběná látka. Chemicky je velmi stabilní, také je bezbarvý, bez zápachu a netoxický. Dobře se snáší s ostatními technickými materiály. Má vynikající izolační vlastnosti. Používá se jako izolační médium v silnoproudé elektrotechnice, ale i při tepelné izolaci. Vysoká elektrická pevnost je až třikrát větší než má vzduch. Hodnoty  $E_p$  se pohybují okolo 89 kV/mm. Dielektrické ztráty pro čistý plyn jsou tak malé, že jsou téměř nezměřitelné. [4]

Vzduch se používá u suchých transformátorů do napětí 38 kV a výkonu 10 MVA. Vzduch se skládá hlavně z dusíku (N) 78 %, kyslíku ( $\text{O}_2$ ) 21 %, argonu (Ar) 0,93 %, oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) 0,03 % a ostatních plynů (Ne, He,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ , Xe a Kr..). Samotný dusík (N) se používá také jako chladicí a izolační plyn v suchých transformátorech. Pro vzduch jsou charakterizující následující vlastnosti:

- $\epsilon_r = 1,000594$ ,
- $\text{tg } \delta = 10^{-6}$ ,
- $E_p = 3,1$  kV/mm (v homogenním poli). V praktickém uspořádání a kombinaci s tuhými materiály se počítá s  $E_p = 1$  kV/mm. U vzduchu se pracovní napětí pohybuje do 38 kV a u  $\text{SF}_6$  se dostaneme až na hodnotu 75 kV. [4]

### 2.1.2 Pevné složky izolačního systému

Pevné složky izolantů jsou součástí každého transformátoru. Tyto materiály mohou být přírodní ale i uměle vytvořené tedy syntetické. Nejčastěji se můžeme setkat s pryskyřicí, celulórou, Nomexem, Kaptonem a kompozitními materiály.

Nomex je syntetický materiál, který se vyrábí z krátkých vláken a malých vláknitých částic aromatického polyamidu. Částičky aramidů jsou zpracovány běžnými papírenskými technologiemi do podoby papíru, který je dále válcován při vysokých teplotách. V izolačních systémech transformátorů se používá jako izolace závitů, vrstev, sekcí a přívodů, ale své uplatnění najde i v jiné elektrotechnické výrobě. Odolává vysokým teplotám a své vlastnosti si zachovává i při dlouhodobém vystavení účinkům teplot. Je nehořlavý a samozhášivý. Velmi dobře se snáší s ostatními použitými materiály. Jako jsou oleje, laky, pryskyřice a ostatní chemikálie. Výborné elektrické vlastnosti ho předurčují pro aplikaci v elektrických strojích. Pro vysokonapěťové stroje je nutné přidat slídu, tak aby její obsah v materiálu byl okolo 50 %. Nomex v současné době nahrazuje použití papíru. [1]

Kapton nalezne uplatnění hlavně jako izolování vinutí elektrických strojů. Jeho aplikací snížíme hmotnost vinutí až o 5 %. Dodává se ve formě folií. Je velmi dobře teplotně a chemicky odolný. Používá se ve spojení s jinými materiály, které ho chrání, protože je náchylný na mechanické poškrábání. [1]

Kompozitní materiály se v dnešní době velmi rozvíjejí. Mají výborné elektroizolační, tepelné a mechanické vlastnosti. To nám umožňuje spojit izolační funkce s ochrannými. Používají se dvousložkové nebo třísložkové. U dvousložkových musíme dát pozor na použité pojivo, protože to nám určuje výsledné mechanické a tepelné vlastnosti odolnosti. Jako nosná složka se nejčastěji používá papír nebo tkanina a jako pojivo se aplikuje pryskyřice. U třísložkových máme navíc plnivo. To plní funkci dielektrické bariéry a nejčastěji je použit rekonstruovaný slídivý papír. [1], [10]

Dále do suchých transformátorů řadíme suché zalévané, kde je vinutí cívky zalito do pryskyřice. Tento druh transformátorů je odolný vůči teplotním rázům, chemikáliím, mechanickým vlivům a vlhkosti. Jelikož neobsahují žádnou olejovou náplň, jsou odolnější vůči požárům. Používají se v místech, kde jsou zvýšené požadavky na ekologickou nezávadnost, například v okolí vod. Vinutí je zalito například do epoxidové pryskyřice na bázi alifatických glycidyleterů s tvrdidlem s  $E_p=15$  kV/mm. Může být použita také technologie kompaktní izolace cívek, která se aplikuje u točivých strojů – Resin-Rich a VPI. Metoda VPI slouží hlavně pro celkové zaizolování vinutí. Pracovní napětí se pohybuje do 35 kV a do výkonu 20 MVA (při úpravě až do 35 MVA). Metoda Resin-Rich se liší od VPI vyšším množstvím použité pryskyřice. Nejprve dojde k ovinutí izolačním materiálem a potom následuje proces vytvrzování. Materiálem používaným pro technologický proces Resin-Rich je předimpregnovaný třísložkový kompozit, který obsahuje zhruba 40 % pojiva. Tyto transformátory jsou velmi odolné vůči požáru. V poslední době je tento typ hojně používaný, protože je dobře odolný vůči teplotním změnám, vlhkosti, chemickým a mechanickým namáháním. [1]

Pryskyřice se používá hlavně u zalévaných transformátorů, kde je zalito vinutí do epoxidové pryskyřice. Přírodní pryskyřice vznikají biologickými pochody některých přírodních organismů nebo se vyskytují ve smolnatých rostlinách. Při zaizolování vinutí se dnes používá 85 - 90 % epoxidových pryskyřic na bázi dianu. Epoxidy mají velmi dobré elektroizolační a chemické vlastnosti. Epoxidová pryskyřice je samozhášivá, odolná proti vlhkosti, odolná proti širokému spektru teplot a chemickému namáhání. Pro vytvrzení musíme použít tvrdidlo, které nám také přispěje ke koncovým vlastnostem izolace. Proto je důležité použít správný poměr tvrdidla a pryskyřice. Tento proces probíhá za zvýšených teplot

po dobu několika hodin. Mezi tvrdidla nejčastěji řadíme např. aminy, anhydridy a polysulfidy. Epoxidy mají velmi dobré elektroizolační a chemické vlastnosti. Při vytvrzení nedochází k odštěpování vedlejších produktů a dochází jen k malému smrštění. Až potom získá pryskyřice potřebné vlastnosti (tepelná odolnost, mechanická pevnost a stálost). [1], [28]

Silikonové pryskyřice se používají pro speciální účely zalévaných transformátorů. Zalití je prováděno metodou VPE. Tato pryskyřice dosahuje vysoké teplotní odolnosti, výborných elektroizolačních vlastností a jen nepatrně se tyto hodnoty mění s rostoucí teplotou. Jsou velmi dobře odolné vůči mechanickému a chemickému namáhání.

## 2.2 Izolační systém olej-papír

Zde je použit kapalný izolant ve spojení s tuhými izolanty na bázi celulózy jako je papír, lepenky, kompozity a Nomex. U tohoto systému má kapalná složka nejen izolační funkci, ale i chladičí. Kapalnou složku zde zastupuje transformátorový olej. Avšak olej před naplněním do transformátoru musí projít ošetřením a ještě vysušením stroje. Olej je možno pak použít jako zdroj informací při diagnostice izolačního systému. Je vhodné použití olejů o nízké viskozitě, protože ty dobře vyplní daný prostor a lépe se dostanou do pórů pevných izolantů. Tyto transformátory dosahují vysokých výkonů a napětí.

### 2.2.1 Pevné složky izolačního systému

Celulóza je základním prvkem pevné složky. Uplatnění nachází nejen u transformátorové izolace olej-papír, ale i v suchých transformátorech. Celulóza je polysacharid skládající se z beta-glukózy. Jelikož je to polysacharid, molekula tvoří dlouhé řetězce a několik takových řetězců tvoří vlákno. Nerozpouští se ve vodě ani v organických rozpouštědlech. Pro komerční účely se izoluje ze dřeva odstraněním ostatních složek. Je hlavní složkou buničiny, z níž se vyrábí papír. V přírodě se ale čistá celulóza nevyskytuje. Nejvíce ji najdeme v bavlněných vláknech. Dřevo obsahuje v suchém stavu 40 – 55 % celulózy, lignin a hemicelulózu. Lignin je látka, co dává dřevu pevnost a hemicelulóza je polysacharid s krátkými řetězci a je méně stálá než celulóza. Celulóza je nejdůležitější surovina při výrobě elektroizolačních papírů. Dřevo se ošetřuje sloučeninou hydroxidu sodného (NaOH) a sulfátu sodíku ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), tímto procesem dojde ke snížení obsahu ligninů a pentosanů. Dále se zpracovává na papírenských strojích do velmi archů nebo rolí. Síla se pohybuje od 0,5  $\mu\text{m}$  až 18 mm.

Transformátorová lepenka je další materiál z pevných složek, se kterým se můžeme

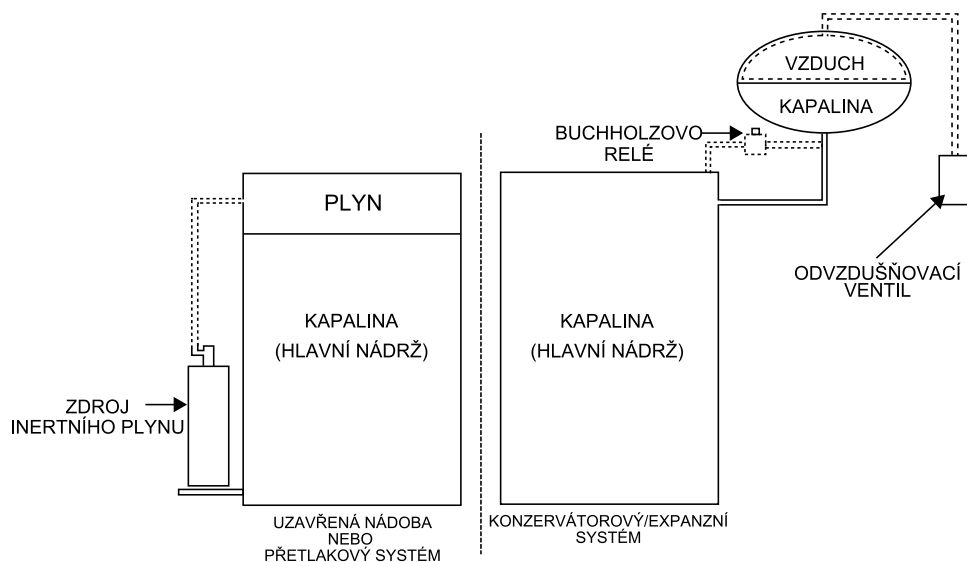
setkat. Má vysoký izolační odpor, elektrickou pevnost a je velmi dobře odolná proti vlhkosti. Dalšími důležitými vlastnostmi jsou ohebnost, dobré teplotní vlastnosti a odolnost vůči chemickým vlivům. Vyrábí se ze sulfátové buničiny a je impregnovaná olejem.

Kraftový papír patří mezi nejlevnější ale zároveň mezi výborné elektroizolační materiály. Vyrábí se výhradně z nebělené buničiny měkkého dřeva. Vyrábí se sulfátovým procesem a z nebělené, protože by mohlo dojít k ohrožení jeho elektrických vlastností.

Dalším nejčastěji používaným materiálem po lepence a papíru je dřevo. Používá se hlavně bukové pro svou vysokou pevnost a hustotu. Používá se ale jen u malých distribučních transformátorů. U velkých transformátorů se používá pouze ke zpevnění lepenky nebo jiných izolačních materiálů. [1], [2], [4]

### 2.2.2 Kapalně složky izolačního systému

Jako oleje jsou používány přírodní a syntetické kapaliny. Přírodní oleje dělíme na rostlinné a minerální. Jak už bylo zmíněno, kapalina zde plní funkci nejen izolační ale i chladicí. Musí proto být teplotně stabilní, čímž přispěje ke spolehlivému chodu transformátoru. U olejů se klade velký důraz na elektrickou pevnost. Mezi další významné vlastnosti patří vysoký izolační odpor a dobrá tepelná vodivost. Způsob uložení oleje v transformátorech můžeme vidět na následujícím obrázku.



Obr. 4: Způsob uložení oleje v transformátoru (překresleno z: [5])

Rostlinné oleje jsou směsí esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin. Tyto oleje dělíme na vysýchavé, kam můžeme zařadit hlavně ricinový olej, a na nevysýchavé. Ty se používají dnes jen jako přísady do elektroizolačních laků. U olejových transformátorů

se můžeme setkat hlavně s minerálními a syntetickými oleji. [1]

Minerální oleje se získávají destilací ropy s následnou rafinací a skládají se z uhlovodíků. Minerální oleje patří dnes stále mezi nejpoužívanější. Podle použité suroviny je dělíme na:

- parafinické (obsahují podíly parafinických uhlovodíků),
- naftenické.

Dále se rozdělují podle použití:

- transformátorové,
- kabelové,
- kondenzátorové.

Při provozu dochází ke stárnutí oleje, proto se prodlužuje životnost přidáním inhibitorů. Tyto oleje jsou hořlavé. Průrazné napětí se pohybuje mezi 60 – 75 kV/2,5 mm.

Syntetické oleje v dnešní době nahrazují minerální. Mají výborné izolační vlastnosti. Podle způsobu přípravy a složení se dělí na:

- Polybutyleny – Kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků. Jsou nepolární ekologicky nezávadné látky se stabilními vlastnostmi, odolné proti záření a oxidaci.
- Fluorované sloučeniny – Jsou stálé do 500 °C. Lehce působí oxidačně na hliník a měď. Používají se jako náplň transformátorů.
- organické estery – FR3, BIOTEMP, MIDEL 7131
- silikonové kapaliny – Ekologicky nezávadné, jsou nehořlavé, teplotně stálé v širokém rozmezí teplot. Mají výborné elektroizolační vlastnosti. Nevýhodou může být cena.

Elektrická pevnost těchto kapalin se pohybuje mezi 60-105 kV/2,5mm. [2], [4], [5]

Tab. 1: Vlastnosti izolačních kapalin

	Minerální kapaliny	Syntetické kapaliny
$U_p$	60 - 70 kV/2,5 mm	60 - 105 kV/2,5 mm
$tg\delta (90^\circ C)$	0,001	0,001 - 0,0002
$\epsilon_r$	2,1 - 2,4	2,5 - 2,8

MIDEL 7131 je syntetická izolační kapalina. Používá se jako náhrada za minerální oleje. Je ekologicky nezávadný, a tak se používá tam, kde je nutná zvýšená ochrana lidí a majetku před nebezpečím ohně nebo v místech, kde jsou zvýšené požadavky na ochranu životního prostředí. Absorbují vlhkost vyprodukovanou při degradaci celulózy. MIDEL má vysoký bod hoření, nízkou těkavost a výborné tepelné vlastnosti. Bod vzplanutí je 275 °C a teplota samovznícení je 311 °C. [27]

FR3 je izolační kapalina na bázi 100 % přírodních esterů vyrobená z přírodních olejů.

Kapalina je určena pro použití v nových i stávajících distribučních transformátorech. Neobsahuje ropu, halogeny, silikony, síru a podobné látky, je proto nezávadná pro životní prostředí a netoxická. Barva tohoto oleje je nazelenalá, a tak se snadno odlišuje od olejů na ropné bázi. FR3 není agresivní vůči žádným částem transformátorů. [25]

Tab. 2: Vlastnosti olejů MIDEL 7131 a FR3 (převzato z: [25] a [33])

	MIDEL 7131	FR3
$U_p$ [kV/2,5mm]	75	65
$\operatorname{tg}\delta$ (90 °C)	0,003	1,76
Kinematická viskozita [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ] (40 °C)	37	40
Bod vzplanutí [°C]	327	330
Bod vznícení [°C]	360	360

BIOTEMP je moderní dielektrické izolační médium, které bylo vyvinuto společností ABB. Kapalina má dobré dielektrické vlastnosti. Mezi velké přednosti patří vysoká teplotní stabilita. Je velmi dobře odolný proti oxidaci a je schopen absorbovat mnohem více vlhkosti než minerální oleje, aniž by došlo ke snížení jeho funkce jako izolantu. Používá se v malých výkonových a distribučních transformátorech, zejména ve vnitřních prostorech. Aplikováním tohoto oleje se zvyšuje i životnost pevné složky izolačního systému. [26]

### 3 Diagnostika izolačních systémů

Transformátory jsou v elektrické soustavě důležité, proto se snažíme předcházet poruchovým stavům, které by zapříčinily výpadky elektrické energie dodávané domácnostem. Pro zaručení spolehlivosti je nutná jejich pravidelná a včasná kontrola. Pravidelnou diagnostikou předcházíme zničení nebo částečnému poškození stroje. Diagnostika je věda zabývající se metodami a prostředky zjišťování technického stavu objektu. Narušením izolačního systému dochází většinou k zásadnímu poškození celého stroje. Což vede k výpadkům dodávky energie a tím i k velkým finančním ztrátám nejen u dodavatelů elektřiny. Proto se snažíme těmto stavům předcházet. Základní diagnostické metody dělíme na provozní a výrobní.

Provozní diagnostické metody dělíme na dvě skupiny. Na off-line, ta se používá při odstávce stroje z provozu, a na on-line diagnostiku, která se provádí při běžném provozu. Během on-line metody se sleduje technický stav strojů, aniž by se musel odstavit stroj z činnosti a tím se předchází finančním ztrátám. Tato metoda ale není jednoduchá, protože v blízkosti se většinou vyskytují rušivé elementy. Při online diagnostice se měří napětí, proudy, teploty a částečné výboje atd. [1]

Výrobní se týkají fáze vzniku a života zařízení, které probíhají při jejich výrobě, tedy zkoušení ve výrobním závodě. Zahrnují vstupní kontrolu používaných materiálů, zkoušky mezioperační a ověřování funkčnosti celých transformátorů – zkoušky typové, kusové a zvláštní. Kusové zkoušky se provádějí na nových transformátorech. Při změně konstrukčního procesu nebo použitého materiálu, tedy dojde ke změně typu, probíhají zkoušky typové. Je nutné, aby stroj vyhovoval v celém spektru předepsaných zkoušek. Interval těchto zkoušek je po uplynutí stanovené doby nebo počtu vyrobených kusů. Zvláštní zkoušky se dělají na vyžádání provozovatele. [1], [6]

V této práci se budeme zejména zabývat off-line diagnostikou, protože pro distribuční transformátory je tento způsob diagnostiky nejrozšířenější. Hlavní důvodem nevyužívání online diagnostiky je její cena, která mnohdy tvoří poměrně značnou část ceny nového transformátoru, a proto se finančně nevyplatí. Z pohledu online diagnostiky by se nejeфекtivněji dalo využít měření teploty.

Velmi důležitým faktorem pro správný chod transformátoru je dobrý stav izolačního systému. Elektrická pevnost, odolnost proti mechanickému a chemickému namáhání patří mezi nejčastěji kontrolované vlastnosti elektroizolačních materiálů. Nesmíme zapomenout

ani na tepelnou odolnost. Při výběru materiálů musíme dát pozor na vhodnost použití v daných systémech, protože během jejich života dochází k degradaci a stárnutí, a proto se následně mění i jejich elektrické a mechanické vlastnosti. Stárnutí je proces, při kterém dochází ke změnám v průběhu času. Změny, které mohou nastat, jsou vratné nebo nevratné. Vratné změny vznikají při krátkodobém nebo málo intenzivním působením provozních činitelů. Nevratné změny jsou výsledkem nejčastěji chemických pochodů, ke kterým v izolantu došlo. V technické praxi se zabýváme hlavně nevratnými změnami. Obecně lze tyto změny označit za nežádoucí, proto se dnes po celém světě rozšiřují výzkumy na omezení tohoto narušení izolačních materiálů. [1], [2]

Rychlost stárnutí izolačních olejů je ovlivněna zejména teplotou a katalyzátory. Zvýšením teploty o 8 až 10 K v oblastech provozních teplot má za následek zdvojnásobení rychlosti stárnutí. Měřicí přístroje by měly být konstrukčně jednoduché, přenosné, spolehlivé a co nejvíce odolné vůči okolnímu prostředí.

### 3.1 Diagnostika olejových transformátorů

U elektrického zařízení plněného olejem se provádí zkoušky pro prověření izolačních a chladících vlastností oleje. Ten funguje jako mezičlánek pro přenos takových složek jako je vlhkost, vzduch, produkty provozního stárnutí, mechanické nečistoty atd. Pro komplexní obraz o oleji musíme aplikovat celý soubor diagnostických metod, protože každá metoda charakterizuje jinou vlastnost. Používají se dva druhy přístupu, jednak fenomenologický ale i moderní strukturální. Strukturální metody jsou např. infračervená spektroskopie, plynová chromatografie nebo kapalinová chromatografie. Tyto metody jsou moderní a umožňují nám zkoumat změny v oleji. Olej musí splňovat jakostní parametry podle norem a je v pravidelných intervalech kontrolován. Při kontrole se zkoumá mnoho parametrů, kterými jsou například barva, hustota, viskozita, obsah vody v oleji, kyselost atd. Aby nedošlo ke špatnému vyhodnocení vzorků a ke zkreslení zkoušek, musíme dbát na správný odběr a následnou přepravu. Norma ČSN EN 60567 se zabývá odběrem vzorků plynů a oleje pro analýzu volných a rozpuštěných plynů. [1], [2], [12]



### 3.1.1 Diagnostika izolačních kapalin

V této diagnostice jsou zahrnuty zkoušky, které posuzují izolační a chladicí vlastnosti oleje. Pro správné určení stavu oleje musíme použít celou řadu diagnostických metod, abychom mohli určit komplexní stav.

#### 3.1.1.1 Barva kapalných izolantů

Touto metodou posuzujeme stav oleje pouze orientačně, protože neexistují žádné obecně platné závislosti mezi barvou a jakostí oleje. Porovnáváme barvu oleje s barevnými standarty a samotný výsledek je vyjádřený číslem nebo písmenem. Světlejší barva je charakteristická pro nové kapalně izolanty, a čím jsou provedeny jakostněji, tím je barva světlejší. Během provozu oleje tmavnou. Pokud známe výchozí barvu, můžeme u daného izolačního oleje posoudit průběh stárnutí, nikoliv ale stupeň zestárnutí. Největší změny barva projevuje v období, kdy polymerací a polykondenzací primárních kyslíkatých produktů s reaktivními skupinami vznikají makromolekulární látky, které jsou ještě v první fázi v kapalném izolantu rozpustné. Změnou barvy můžeme tedy určit první stupeň oxidačního stárnutí. Existují dvě metody pro stanovení barvy:

- subjektivní – Porovnáváme barvu oleje s barevnými etalony. Vždy musíme porovnávat izolační oleje ve stejných tloušťkách, a pokud je to možné, při denním nepřímém světle.
- objektivní – Při tomto způsobu je barva zjišťována pomocí měřicího přístroje. Porovnáváme v kolorimetru absorpci světla daného vzorku s absorpcí světla rozpouštědla pomocí modrého a zeleného filtru. [2]

#### 3.1.1.2 Zákal izolačního oleje

Zákal je způsobený přítomností vody nebo velkého množství makromolekulárních látek, které se již nemohou rozpustit v izolačním oleji. Dále může být způsobený přítomností živých a asfaltových částí nebo produkty oxidace. Na základě pozorování zjistíme, zda je v oleji přítomen zákal. Jednou z používaných metod je zahřívání. Dochází k praskání či pění oleje, pokud je přítomna voda. Při zahřátí nad 50 °C zjišťujeme přítomnost makromolekulárních látek. Olej se vyjasní a po zchladnutí se opět zakalí. Látky živičné, asfaltové a grafit se indikují jako nerozpustný zbytek v n-heptanu a po odfiltrování se rozliší různou rozpustností v etylalkoholu a v benzenu. Zbytek tvoří grafit a nerozpustný koks. [2]

### 3.1.1.3 Hustota oleje

V diagnostice olejů je metoda stanovení hustoty oleje méně významná, protože podle ní nemůžeme přímo stanovit stupeň stárnutí kapaliny. Pro stanovení hustoty používáme metodu Stanovení hustoty hustoměrem. Z hustoměru odečteme hodnotu v  $\text{g.cm}^{-3}$  a následně i zaznamenané teplotu vzorku. K přesnému stanovení hustoty jsou používány skleněné pyknometry. [2]

### 3.1.1.4 Viskozita oleje

Viskozita udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny. Vyjadřuje vnitřní tření a je závislá především na přitažlivých silách mezi částicemi. U kapalin s větší viskozitou, tedy s větší přitažlivostí, dochází k většímu brzdění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině. Viskozitu oleje měříme hlavně kvůli chlazení transformátoru, protože viskozita je závislá na teplotě. [2]

Dynamická viskozita  $\eta$  má základní jednotku 1 Pa.s (poise P). Vyjadřuje sílu, která je zapotřebí, aby se vrstva o ploše  $1 \text{ m}^2$  posunula oproti stejné vrstvičce ve vzdálenosti 1 m o 1 m ve vodorovné rovině. Vypočteme ji ze vztahu:

$$\eta = \nu \cdot \rho \cdot 10^3 \quad (1)$$

kde  $\eta$  je hustota proměřované kapaliny při teplotě určování viskozity [ $\text{g.cm}^{-3}$ ],

$\nu$  je kinematická viskozita [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Můžeme použít následující viskozimetry:

- kapilární – Využívá dobu průtoku tekutiny kapilárou při známém rozdílu tlaků mezi konci kapiláry. Měří se tlak a teplota vzorku.

- Stokesův – Viskozita se určí z doby pádu kuličky na dráze 100 mm.

- rotační – Zjišťujeme sílu potřebnou k otáčení předmětu ve zkoumané kapalině.

Určíme krouticí moment a z něj dynamickou viskozitu.

Kinematická viskozita je dána dobou průtoku kapaliny skleněným kapilárním otvorem. Musí probíhat za přesně daných podmínek, které jsou stanoveny normou. Základní jednotkou je 1 stokes – St [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]. Vypočteme z vztahu:

$$\nu = C \cdot t \quad (2)$$

kde C je konstanta viskozimetru [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],

t je střední hodnota doby průtoku viskozimetrem [s]. [2]

### 3.1.1.5 Bod vzplanutí a bod tuhnutí

Bod vzplanutí se určuje hlavně kvůli požární bezpečnosti. Je to teplota, kdy se směs par testovaného oleje se vzduchem po přiblížení plaménku vznítí, ale okamžitě zhasne. Pro zjištění této teploty se používá Pensky-Martensův přístroj. [2]

Bod tuhnutí je důležitá hodnota hlavně z hlediska spouštění transformátoru. Určuje chování kapalných izolantů při nízkých teplotách. Je to teplota, při které olej tuhne a dochází v něm k vylučování a růstu krystalů. Zároveň roste viskozita a ubývá kapalná fáze. Před zjišťováním bodu tuhnutí musíme vzorek zahřívát 15 min na 50 °C. Poté se nalije do zkumavky a při zchlazování odečítáme teplotu a zkoušíme, zda vzorek teče. Teplota, při níž se vzorek při vodorovné poloze zkumavky 5 sekund nepohne, označujeme jako bod tuhnutí. [2]

### 3.1.1.6 Obsah vody v oleji

Pokud se v oleji vyskytuje voda, značně se zhorší elektrická pevnost izolačního oleje. Vlhkost vzniká jako produkt oxidačního stárnutí při polykondenzačních reakcích nebo se do oleje dostává z atmosféry. Také vzniká jako produkt při oxidačním stárnutí celulózy. Voda v oleji má tři formy: rozpuštěná, emulgovaná a volná. Pro zjištění přítomnosti se používá K. Fischerova metoda (coulometrická titrační). Samotná metoda je založena na reakci vody s jódem, oxidem siřičitým, organickou bází a alkoholem v organickém rozpouštědle. Nejdříve se posoudí vizuální stav vzorku. Potom se vzorek smíchá s alkoholovým rozpouštědlem. Jód reaguje s vodou, přesněji 1 mol jódu reaguje s 1 molem vody. Jeden mg vody je ekvivalentní 0,72 C. Proto můžeme určit množství vody přímo z velikosti náboje nutného pro elektrolýzu. Pokud ale při prvotní vizuální prohlídce zjistíme, že vzorek oleje je nejasný, nečirý nebo obsahuje kapky vody, přidáme před homogenizací míchadlem díl roztoku dioktylsulfosukcínátu sodného. Další metoda, kterou můžeme zjistit obsah vody v oleji, je založena na reakci hybridu vápníku s vodou za vzniku sodíku, který je úměrný obsahu vlhkosti. [2], [16]

### 3.1.1.7 Obsah PCA a PCB

Polycyklické aromáty (PCA) jsou karcinogenní látky, proto by v transformátorovém oleji měli být jen v omezeném množství. Polychlorované bifenyly (PCB) by neměly být vůbec přítomné v oleji, avšak dříve se přidávaly jako přísada do minerálních olejů. PCA i PCB jsou látky z pohledu ekologie, které negativně působí na životní prostředí i na lidský

organizmus. Pro určení přítomnosti PCB se používá metoda plynové chromatografie a pro stanovení množství PCA je využívána kapalinová chromatografie. [2]

### 3.1.1.8 Číslo kyselosti

Jelikož stárnutím oleje se zvětšuje obsah kyselých látek v oleji, můžeme číslem kyselosti určit i stupeň zestárnutí oleje. Jedná se dnes o nejvýznamnější parametr z hlediska zestárnutí oleje. Obsah kyselých látek se dnes hlídá zejména u nových izolačních olejů. U těchto olejů indikuje stupeň rafinace, případně upozorňuje na přítomnost organických kyselin zbylých z rafinace. Číslo kyselosti udává množství KOH, které je potřeba v nevodném alkoholickém prostředí k neutralizaci organických a anorganických kyselých složek v 1 g oleje. Pro určení čísla kyselosti se používají dvě metody: potenciometrická metoda nebo stanovení čísla kyselosti na alkalickou modř 6B. První metoda se provádí na elektronickém automatickém pH titrátoru s kombinovanou elektrodou pro nevodné prostředí. Číslo kyselosti v tomto případě udává množství KOH/g, které je zapotřebí k zneutralizování zkoušené části ve specifickém roztoku, která titruje do hodnoty pH 11,5. Stanovení čísla kyselosti na alkalickou modř 6B spočívá v titraci kyselých sloučenin, obsažených ve zkoušeném materiálu, alkoholickým roztokem hydroxidu draselného. Nejdříve ale musíme stanovit tzv. faktor 0,1 M KOH, což je potřebný parametr pro výpočet čísla kyselosti. Do směsi ethanolu a toluenu v poměru 1:2 přidáváme roztok alkalické modři, dokud se kapalina nezbarví do světle modra. Potom se přidá kapka 0,1 M HCL (KOH, kde M znamená koncentrace) ke zcitlivění indikátoru, načež se přidává z byrety alkoholový roztok KOH do počínajícího červeného zbarvení. Do tohoto roztoku se přidá 0,01 - 0,011 g kyseliny benzoové a po jejím rozpuštění se titruje z mikrobyrety alkoholovým roztokem hydroxidu draselného až do počínajícího červeného zbarvení. Faktor 0,1 M KOH v mg KOH.cm<sup>-3</sup> se vypočte podle tohoto vztahu:

$$f = \frac{a \cdot 1000}{b \cdot 122,12 \cdot 0,1} \quad (3)$$

kde a je navážka kyseliny benzoové v gramech,

f je faktor 0,1 M KOH,

b je spotřeba 0,1 M KOH v cm<sup>3</sup>,

122,12 je ekvivalentní hmotnost kyseliny benzoové.

Do vymyté a vysušené titrační baňky se naváží dokonale promíchaný vzorek (2g až 20g izolačního oleje). Do další titrační baňky namícháme 60 ml toluenu, 40 ml ethanolu a 2 ml indikátoru. Tato směs se po důkladném promíchání 0,1 M KOH zneutralizuje do počínajícího

červeného zbarvení, přelije do titrační baňky se vzorkem oleje a promíchá. Po rozpuštění se roztok titruje po kapkách ofaktorovaným 0,1 M KOH do počínajícího přechodu barvy indikátoru z modré nebo zelené barvy do červená, ta je srovnatelná s 10% roztokem  $\text{CO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  a trvá 15 sekund. Číslo kyselosti v mg KOH/g se pak vypočte podle vztahu:

$$\check{C}K = \frac{a \cdot f \cdot 56,11 \cdot N}{v} \quad (4)$$

kde  $\check{C}K$  je číslo kyselosti v mg KOH/g,

a je spotřeba roztoku 0,1 M KOH v  $\text{cm}^3$ ,

f je faktor 0,1 M KOH,

v je navážka vzorku izolačního oleje v gramech,

N je molarita titračního alkoholového roztoku KOH.

Výsledek zkoušky je aritmetickým průměrem výsledků dvou souběžných stanovení, ty se zaokrouhlují na dvě desetinná místa. Číslo zmýdelnění poukazuje na množství hydroxidu draselného, které se spotřebuje v izolačním oleji k neutralizaci kyselých složek. Číslo zmýdelnění je vyšší než číslo kyselosti. Maximální číslo zmýdelnění je 0,15 mg KOH na gram oleje. Avšak už se příliš neuzívá, protože číslo kyselosti dostatečně poukazuje na stupeň stárnutí oleje. [2]

### 3.1.1.9 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je jeden z nejdůležitějších faktorů při výběru izolačních kapalin. Nejčastěji je ovlivňována obsahem vody, nečistot, produktů stárnutí a obsahu plynů v oleji. Elektrická pevnost ale převážně poukazuje na stav vlhkosti, nikoliv jakosti oleje, protože i velmi zestárlý nenavlhlý olej může mít elektrickou pevnost velkou. Můžeme ji definovat jako poměr průrazného napětí vztaženého na vzdálenost zkušebních elektrod. Průrazné napětí chápeme jako nejmenší napětí, při kterém vznikne první výboj mezi elektrodami. Podle výsledků můžeme rozhodnout o obsahu vody, nečistot a plynů v oleji. Ale musíme dát pozor například na správnou dobu působení napětí, počet průrazů, čistotu elektrod a nádoby, jinak může dojít ke zkreslení závěrů o stavu oleje. Vlastní zkouška probíhá za rovnoměrného zvyšování napětí, tak aby k průrazu došlo mezi 10 – 20 sekundou. Měření opakujeme šestkrát v pětiminutových intervalech. Z hodnot, které jsme naměřili, uděláme aritmetický průměr průrazného napětí  $\overline{U}_p$  v kV, směrodatnou odchylku s v kV a variační koeficient v %. Zda izolant vyhověl, zjistíme z variačního koeficientu. Když přesáhne hodnotu 20 %, musíme zkoušku zopakovat, pokud i při druhém měření opět přesáhne 20 %, potom označíme izolant za nevyhovující. [2], [16]

### 3.1.1.10 Obsah inhibitorů v oleji

Pro zpomalení procesu oxidačního stárnutí se do izolačních olejů přidává antioxidační inhibitor v množství od 0,3 – 0,5 % hmotnosti. Inhibitory ale nesmí ovlivnit vlastnosti olejů (viskozitu, číslo kyselosti, rozpustnost ve vodě atd.). Mezi nejčastější inhibitory můžeme zařadit 2,6-di-terc.butyl-p-kresol (DBPK) a 2,6-di-tercbutyl-p-fenol. Pod obchodními jmény jsou některé inhibitory známy jako „Topanol“, „Parabar“ atd. Je však důležité poznamenat, že inhibování je přínosné pouze u kvalitních olejů. Obvykle se přidává 3,5 kg inhibitoru na 1 tunu oleje. Obecně lze říci, že inhibitory bývají dvojího typu, fenolického nebo aminového. U nových olejů se zjišťuje, zda je olej inhibován, u olejů z provozu se určuje, do jaké míry byl inhibitor následkem provozního stárnutí spotřebován. Měření obsahu inhibitoru se provádí: infračervenou spektroskopií, chromatografickou metodou na tenké vrstvě a kolorimetrickou metodou. Pokud chceme stanovit počet inhibitoru fenolového typu, volíme metodou infračervené spektroskopie. Ta byla zpracována pro stanovení DBPK v nových olejích, ale také ve vzorcích provozovaného oleje. Metoda spočívá na porovnání hustoty absorpčního pásu neznámého vzorku oleje s kalibrační křivkou. Musí se připravit nejméně pět kalibračních směsí a zvolit koncentrační rozsah kalibračních vzorků mezi 0,02 až 0,5 % hmotnosti DBPK. [2], [16], [17]

### 3.1.1.11 Rezistivita, ztrátový činitel tg $\delta$ a relativní permitivita

Velikost rezistivity závisí na obsahu vody, obsahu nečistot a stupni oxidace zkoušeného oleje. Dále závisí na teplotě a velikosti měřícího napětí. Se zvyšující se teplotou se zmenšuje viskozita, což má za následek zvětšení elektrické vodivosti a snížení rezistivity. Umožňuje detekci produktů provozního stárnutí a absorbované vody. Pokud je hodnota rezistivity při teplotě 90 °C v pořádku, ale při okolní teplotě ne, svědčí to o přítomnosti vody a cizích látek, které se vysrážely za studena. Je to ale jenom podpůrná veličina, která usnadňuje v některých případech posouzení ztrátového činitele. [2], [16]

Ztrátový činitel je sumární hodnotou, která indikuje přítomnost pevných částic, rozpuštěných polárních a iontových složek v oleji. Vyjadřuje dielektrické ztráty, které jsou úměrné příkonu, který se přemění v teplo působením střídavého elektrického pole. U nových olejů bez nečistot jsou dielektrické ztráty určeny jenom vodivostí dielektrika. Vodivost je malá, proto i ztrátový činitel je malý. U zestárlých olejů jsou dielektrické ztráty navíc dány i polarizačními ztrátami. Proto je ztrátový činitel závislý na teplotě a frekvenci. S teplotou ztrátový činitel roste a s frekvencí klesá. Ztrátový činitel se měří pomocí Scheringova můstku.

Podrobnějšímu popsání metody měření ztrátového činitele se budeme věnovat později. [2]

Relativní permitivita je parametr, který nám pomáhá posoudit čistotu izolačního oleje. Samotné měření probíhá zároveň s měřením ztrátového činitele pomocí automatického měřicího můstku. [2]

Tab. 3: Předepsané hodnoty pro oleje transformátorů (převzato z: [18])

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 inhibitoru	%	0,3-0,5	min. 0,15	-
Barva	-	max. 2.0/čirá	-	-

### 3.1.1.12 Přítomnost plynů v oleji

Vlivem elektrického namáhání olej absorbuje plyn. Plynování je vlastnost oleje, která vyjadřuje podíl absorpce a vývoje vodíku olejem vlivem elektrického namáhání. Analýzou plynování získáváme informace o chování oleje v provozu. Plynování je závislé na chemické struktuře oleje. Samotné měření se provádí ve zkušební nádobě s elektrodami. Nádoba je propojena s byretou, kde se shromažďuje vzniklý plyn, který není absorbován olejem. [2]

Plynová chromatografie je metoda, kterou zjišťujeme rozsah tepelného stárnutí kapalných izolantů a soustavy olej-papír. Detailnějšími rozbory lze posoudit stupeň tepelného stárnutí, ale i teplotně zbarvené pochody, které urychlené stárnutí způsobily. Mezi teplotně zbarvené pochody můžeme zařadit například přehřátí, předvýboj nebo elektrický oblouk. Touto metodou zajišťujeme hlavně provozní sledování strojů, ale používá se i pro zjišťování konstrukčních a technologických vad u nových strojů. Nejprve provádíme odběr kapalného izolantu, následuje proces vytěsnění rozkladových plynů z kapalného izolantu. Potom proběhne chromatografická analýza a na závěr vyhodnotíme stupeň tepelného zestárnutí nebo poruchu u nových strojů. Odběr vzorků se nesmí podcenit, protože po nesprávné manipulaci či samotném odběru by mohlo dojít k nesprávnému vyhodnocení výsledků. Vzorky získáváme odběrem volných plynů nebo odběrem plynů rozpuštěných v oleji. Pokud odebereme plyny druhou metodou tedy odběrem plynů rozpuštěných v oleji, musíme plyny

extrahovat. Samotný postup odběru vzorků a podmínek při odběru se řídí normou ČSN EN 60567. Potom dojde k samotné plynové chromatografii. Mezi nejvíce používané metody extrakce patří: Metoda vícenásobné vakuové extrakce (Toeplerova vývěva), Metoda jednorázové vakuové extrakce, Metoda stripping a Metoda head-space. Nejefektivnější je Toeplerova vývěva, která dosahuje téměř 100% výtěžnosti plynu z oleje. Avšak u této metody se používá rtuť, která nepříznivě působí na životní prostředí, proto se dnes od této metody ustupuje a nahrazuje se modernějšími. Extrakce head-space se dnes jeví jako nejlepší. Využívá skleněných viál, které obsahují olej i plynnou fázi. Za rovnovážných podmínek dojde k přechodu rozpuštěných plynů v oleji do plynné fáze. [2], [20]

Plynová adsorpční chromatografie slouží k určení tzv. klíčových plynů. Používají se dva detektory pro dosažení vysoké citlivosti. Detektor tepelné vodivosti (TCD) slouží k určení atmosférických plynů ( $H_2$ ,  $O_2$  a  $N_2$ ) a detektor plamenově ionizační (FID) pro stanovení hladiny uhlovodíků ( $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_3$  a  $C_4$ ). Rozborem zjištěných plynů můžeme určit druh a závažnost poruchy nebo její příčiny a také stupeň zestárnutí oleje. [2], [20]

### 3.1.1.13 Duvalův trojúhelník

Tato metoda je součástí normy IEC 60599. Jejím vynálezcem je Michel Duval. Souvisí s obsahem uhlovodíkových plynů v oleji a s její pomocí se určuje stav oleje pomocí koncentrace plynů  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$  a  $CH_4$ . Pro samotné sestavení trojúhelníku je nutné si vyjádřit koncentraci jednotlivých plynů z celkového množství ( $C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4$ ). Koncentrace pro jednotlivé plyny se určí následovně:

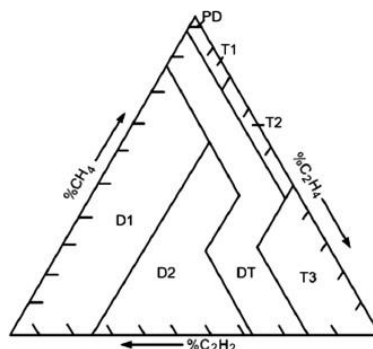
$$C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

$$C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

$$CH_4 = \frac{CH_4}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

Z těchto získaných hodnot sestavíme Duvalův trojúhelník, který je na obrázku č. 5.





Obr. 5: Duvalův trojúhelník (převzato z: [22])

Jak můžeme vidět na obrázku č. 5, je Duvalův trojúhelník rozdělený do několika sektorů. Tyto zóny odpovídají jedné z poruch. [21], [22]

Tab. 4: Zóny Duvalova trojúhelníku

PD	Částečné výboje
D1	Výboje nízké energie
D2	Výboje vysoké energie
T1	Tepelná porucha $T < 300^{\circ}\text{C}$
T2	Tepelná porucha od $300$ do $700^{\circ}\text{C}$
T3	Tepelná porucha $T > 700^{\circ}\text{C}$
DT	Tepelná porucha nebo elektrický oblouk

### 3.2 Diagnostika suchých transformátorů

Při stárnutí izolačních složek se vlastnosti všech součástí zhoršují. Degradace celulózy je složitý proces, který může být urychlován vlivem teploty, vlhkosti a kyslíku. Přidáním složek, jako je močovina nebo melamin, můžeme zlepšit tepelnou odolnost celulózy. Avšak pevná složka je špatně přístupná pro odběr vzorků, a proto se postup přímého odběru nepoužívá. Změny vlastností pevné složky sledujeme nepřímo např. zkoumáním kapalně složky. Při degradaci pevné složky dochází k uvolňování látek do kapalně složky a ta je tedy nositelem informace stavu pevné složky. Ale musíme si uvědomit, že stárnutím oleje se uvolňují také plyny, proto při odběru vzorku musíme brát v úvahu i tento fakt. Stupeň polymerizace je jedna z hlavních metod, jak určit souvislost mezi zhoršením stavu materiálu a výskytem látek, které vznikly při stárnutí. Analýzou furanových složek zjistíme hlavní vedlejší produkty při degradaci celulózy. Ke sledování stavu izolace slouží stanovení koncentrace furanových složek v transformátorovém oleji. [1], [11]

### 3.2.1 Stupeň polymerizace (DP)

Patří mezi parametry, které poskytují nejvíce informací v oblasti stárnutí nebo postupu procesu degradace celulózy. Je určen výskytem produktů, vytvořených vlivem stárnutí. Je dán počtem anhydroglukózových jednotek v celulóзовém řetězci a jako funkce reakční doby je definován následujícím vztahem:

$$DP = \frac{M_n(t)}{M_0} \quad (8)$$

kde  $M_n(t)$  je průměrná molekulová hmotnost polymeru připraveného v čase  $t$ ,

$M_0$  je molekulová hmotnost monomerní jednotky.

Stupeň polymerizace klesá se zvětšením degradace. Proto dojde ke zhoršení mechanických vlastností izolačního materiálu (pevnost v tahu, pružnost, pevnost v ohybu atd.) a vzniku rozkladných produktů ( $H_2O$ ,  $CO_2$ , furany atd.). [2]

### 3.2.2 Analýza furanových složek

Furany jsou vedlejší produkty během degradace celulózy, proto stanovením koncentrace furanových složek v transformátorovém oleji můžeme posoudit stav izolace. [2]

## 3.3 Metody měření

### 3.3.1 Měření izolačního odporu, určení polarizačního indexu a časové konstanty

Izolační odpor je poměr stejnosměrného napětí přivedeného na elektrody a celkového proudu mezi nimi v daném čase po připojení napětí. Samotný odpor se vypočítá pomocí obecně známého Ohmova zákona. Hodnoty izolačního odporu se pohybují v řádech  $M\Omega$ . Měření izolačního odporu patří mezi nejstarší metody diagnostiky transformátorů. Tento odpor je ovlivněn vlhkostí a vodivými nečistotami v izolaci. Minutový polarizační index ( $p_{i1}$ ) získáme pomocí odečtení hodnot proudu po 15 a 60 sekundách od přiložení napětí, tento výpočet je uveden v rovnici č. 9. [3]

$$p_{i1} = i_{15}/i_{60} [-] \quad (9)$$

kde  $i_{15}$  je absorpční proud odečtený 15 s po přiložení napětí,

$i_{60}$  je absorpční proud odečtený 60 s po přiložení napětí na zkoušený objekt. Polarizační index je veličina, která charakterizuje stav izolace (hlavně přítomnost vlhkosti). [1], [3]

Časová konstanta  $\tau$  je veličina charakterizující stav izolačního systému. Umožňuje objektivní zhodnocení izolačních systémů strojů bez ohledu na jejich parametry (napětí,

výkon, typ...), protože nezávisí na rozměrech vinutí. Konstantu stanovíme výpočtem dle vztahu:

$$\tau = R_{iZ60} \cdot C_{50} [s] \quad (10)$$

kde  $R_{iZ60}$  je izolační odpor určený v čase 60 s po zapojení měřícího napětí,

$C_{50}$  je kapacita izolace změřená při 50 Hz.

Pro tyto měření se používají přístroje pro přímé měření odporu. Musíme vždy měřit za normálních podmínek. Musíme tedy zajistit, aby relativní vlhkost okolí nebyla větší než 90 % a teplota stroje by měla být větší než +10 °C. Toto měření nesmíme provádět za deště, mlhy nebo sněžení. Provádí se při stejnosměrném napětí 2 500 V, avšak měřící napětí by nemělo přesáhnout hodnotu jmenovitého napětí měřeného stroje. Před samotným měřením musí být všechna vinutí spojena nakrátko a minimálně na pět minut spojena s kostrou stroje. Tímto dojde k odstranění zbytkového náboje. Dále nádoba stroje musí být uzemněna a při samotném měření nesmí dojít k tomu, aby některé vinutí bylo nezapojené. Měříme odpor jednotlivých vinutí proti sobě s připojenou či uzemněnou nádobou. Samozřejmě nesmíme zapomenout oboustranně odpojit stroj od rozvodné sítě. Pro posouzení stavu systému porovnááme aktuální hodnoty s hodnotami z předchozích měření, nebo s hodnotami nového stroje. Dojde-li ke změně vyšší než 40 %, je nutné zjistit její příčinu. Izolační odpor velmi citlivě reaguje na nejslabší místo v dielektrické soustavě. Toto místo můžeme charakterizovat jako místo se zvýšeným množstvím vyloučených nečistot z izolačního oleje, usazené v místech, kde neohrožují bezpečnost provozu. Měřením izolačního odporu však nemůžeme stoprocentně indikovat poruchu dielektrické soustavy olej-papír, která vznikla vytvořením vodivé dráhy v pevné izolaci, protože velikost měřícího napětí nestačí k opakovanému průrazu kapalného dielektrika. Minimální hodnota polarizačního indexu u nových strojů a strojů po revizi by neměla být menší než 1,7, u provozovaných strojů 1,3. Rozsah časové konstanty by měl být 5 - 10 v závislosti na napětí. [1], [2], [3]

### 3.3.2 Měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$

Velikost ztrátového činitele je přímo úměrná ztrátám energie, které jsou rozptýleny v dielektriku při jeho namáhání proměnným elektrickým polem. Pomocí něj charakterizujeme celkový stav izolace a z jeho velikosti, můžeme zjistit, zda je izolační soustava provozně zestárlá nebo navlhla. Velikost ztrátového činitele je tedy ovlivněna množstvím přítomných polárních látek např. vody, reakčních produktů stárnutí a tepelného namáhání izolace, mechanických nečistot mikroskopických rozměrů. Se zvyšující se hodnotou  $\text{tg } \delta$  dochází

k rychlejšímu zahřívání a stárnutí izolace. Kvalitní izolace (nenavlhnutá) vykazuje nízký ztrátový činitel. U navlhle izolace při zvyšování napětí klesá hodnota ztrátového činitele. Toto je způsobeno tím, že činná složka tvořená ionty se rychle z izolantu odvádí. Suchá kvalitní izolace při nízkých hodnotách nevykazuje na průběhu podstatné změny. Činná složka nárůstem napětí stoupá, a tím dochází ke zvyšování ztrátového činitele. Samotné měření se provádí můstkovou metodou při střídavém napětí 10 kV. Ale pokud nevyhovuje izolační hladina měřeného vinutí, použije se nejbližší nižší zkušební napětí z řady 0,5-1-2-5 kV. Doporučená teplota, při které je měření prováděna, je 20 °C. Pro připojení můstku k transformátoru se kabel zapojí na vinutí vyššího napětí a měřicí kabel na vinutí nižšího napětí. Nádoba a kostra jsou spojeny. Měříme ztrátový činitel a kapacitu mezi oběma vinutími. Hodnoty ztrátového činitele a kapacity se vypočtou z naměřených hodnot při obou polaritách následujícím způsobem:

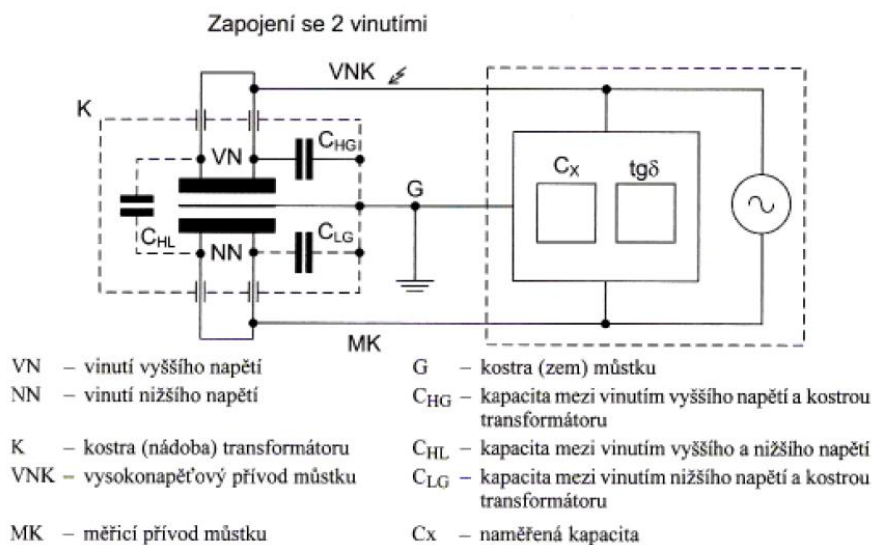
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_1 \cdot C_1 + \operatorname{tg} \delta_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (11)$$

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2} \quad (12)$$

kde  $C_1$ ,  $\operatorname{tg} \delta_1$  jsou hodnoty změřené při jedné polaritě zdroje,

$C_2$ ,  $\operatorname{tg} \delta_2$  jsou hodnoty změřené při obrácené polaritě zdroje.

Hodnocení se provádí porovnáním výsledků s předchozími periodickými kontrolami. Hraniční hodnota pro nové stroje 100 – 400 kV je 0,01, pro stroje po opravě je 0,15 a pro stroje v provozu činí 0,03. U strojů s pracovním napětím do 70 kV jsou hodnoty 0,02, po opravě 0,03 a pro stroje v provozu 0,08. [1], [2], [3]



Obr. 6: Zapojení při měření ztrátového činitele a kapacity (převzato z:[2])

### 3.3.3 Měření poměru kapacit C<sub>2</sub>/C<sub>50</sub>

Tímto měřením získáme přehled o míře navlhnutí izolačních systémů olejem naplněných transformátorů. Metoda využívá závislost relativní permitivity na kmitočtu střídavého elektrického pole, která se projevuje u většiny dielektrik a souvisí s jejich polarizací. Kapacita suché izolace je v závislosti na frekvenci téměř konstantní a u vlhké izolace se kapacita s rostoucí frekvencí zmenšuje, proto se tedy u nenavlhle izolace hodnoty C<sub>2</sub> a C<sub>50</sub> téměř neliší. A u vlhké izolace se kapacity při frekvenci 2 a 50 Hz značně liší. Nejdříve měříme kapacitu vinutí proti kostře C<sub>50</sub>, potom C<sub>2</sub> a určíme rozdíl kapacit C<sub>2</sub>-C<sub>50</sub>. Musíme dodržet 1minutový vybíjecí interval. Tuto metodu můžeme použít pro všechny typy olejových transformátorů od 1 kV. Poměr kapacit určíme podle následujícího vztahu:

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1 \quad [-] \tag{13}$$

Poměr kapacit porovnáme s mezními hodnotami. Pokud budou hodnoty vyšší než uvedené v tabulce, jedná se o navlhnutou izolaci. [1], [2], [3]

Tab. 5: Mezní hodnoty poměru C<sub>2</sub>/C<sub>50</sub> [2]

Teplota vinutí [°C]	10	20	30	40	50
Poměr C <sub>2</sub> /C <sub>50</sub> [-]	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

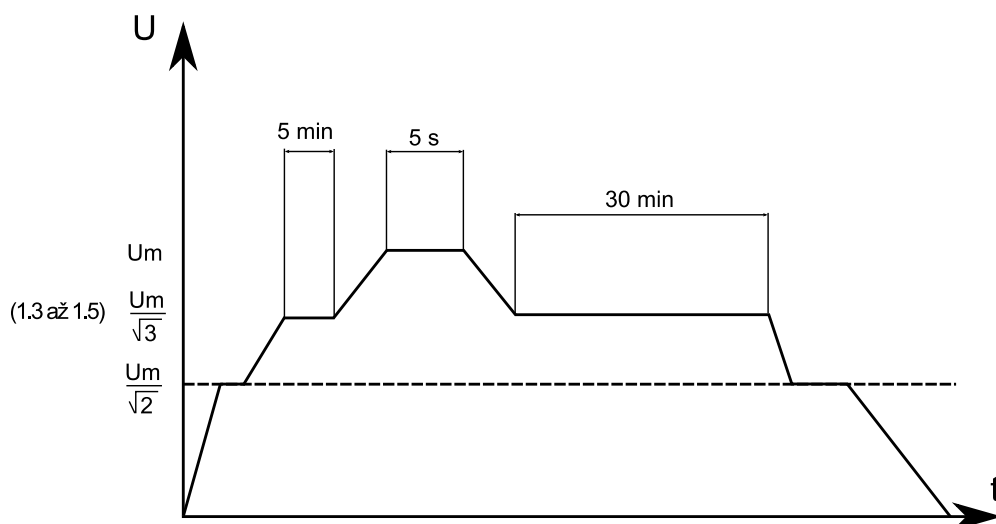
### 3.3.4 Napěťové zkoušky

Zkouška přiloženým napětím

- Zkouška indukovaným napětím
- Zkouška atmosférickým impulzem
- Zkouška spínacími impulzy

Během zkoušky přiloženým napětím z cizího zdroje je kontrolována elektrická pevnost izolace zkoušeného vinutí proti ostatním vinutím a uzemněným částem. Tento prostor je vyplněn izolací vodičů a válce z transformátorové lepenky. Pevné izolanty spolu s olejem tvoří významnou část izolačního systému transformátoru. Podmínkou je provádět tyto zkoušky na již smontovaných transformátorech. Samotné měření se začíná přivedením napětí na zkratované vinutí a uzemněné vývody všech vinutí, uzemněný magnetický obvod, kovový plášť nebo nádobu. Hodnota zkušební napětí je vrcholová hodnota dělena  $\sqrt{2}$ . Stroj označíme za vyhovující, pokud při zkoušce nedojde k poklesu zkušební napětí a k nedovoleným poškozením. [2]

U indukovaného napětí rozdělujeme zkoušky na tři typy: zkouška indukovaným napětím transformátoru s plnou izolací nulového bodu vinutí VN, zkouška indukovaným napětím transformátoru s redukovanou izolací nulového bodu vinutí VN a zkouška dlouhodobým indukovaným napětím. Základním cílem těchto zkoušek je zjistit stav vnitřní izolace stroje nebo poškození předchozími zkouškami vysokým napětím. Pokud požadujeme kontrolu elektrické pevnosti izolace podél zkoušeného vinutí, mezi fázemi vůči uzemněným částem a dalšími vinutími, použijeme zkoušku s plnou izolací nulového bodu. Tato zkouška se provádí za provozu stroje. Zkušební napětí je symetrický a trojfázový. Avšak může se použít i jiné zapojení za dodržení normalizovaných podmínek. Například zaručit dvojnásobné jmenovité napětí podél zkoušeného vinutí. Avšak nesmí dojít k překročení normalizovaného zkušebního napětí. Jestliže je nutné zkontrolovat elektrickou pevnost izolace vývodů, volíme zkoušku, u které je redukována izolace nulového bodu vinutí VN. Zkušební napětí musí být přiložena mezi vinutí vyššího napětí a středního napětí a zemí u vývodů vinutí sousedních fází. Podmínkou ale je uzemnění pláště a magnetického obvodu. U zkoušky dlouhodobým indukovaným napětím musíme zajistit uzemnění nulového bodu zkoušeného vinutí. Podle zvoleného zapojení se určí místo uzemnění. U hvězdy se zvolí nulový bod a u trojúhelníku jeden z vývodů. Musíme zajistit správný průběh zkušebního napětí mezi fázovými vývody a nulovým bodem. Tento průběh můžeme vidět na obrázku č. 7. Během tohoto měření zaznamenáváme hodnoty zapalovacího a zhášecího napětí, k tomu se ještě měří částečné výboje resp. amplitudu zdánlivého výboje. Stroj označíme za vyhovující, jestliže nedošlo během zkoušky k poklesu zkušebního napětí nebo jeho useknutí. Dále je nutné, aby amplituda zdánlivého náboje částečných výbojů nepřekročila mezní hodnoty. Za mezní hodnoty považujeme 300 pC při zkušebním napětí od 1,3 do 1,4  $U_m/\sqrt{3}$  ( $U_m$  je amplituda napětí) a 500 pC při 1,5  $U_m/\sqrt{3}$ . Pokud hodnoty nejsou v tomto rozsahu a zároveň jsou menší než 3000 pC, je na místě, abychom provedli analýzu výsledků a určit místo vzniku částečných výbojů. Pokud je místo těchto výbojů olejová izolace, můžeme tento stroj považovat za způsobilý provozu. Ale musí dojít k odstranění nežádoucích výbojů. Avšak jestliže nejsme schopni stanovit místo vzniku výbojů, musí být stroj znovu prověřen dodatečnými zkouškami nebo odstaven z provozu. Pokud naměříme hodnoty zdánlivého výboje vyšší než 3000 pC, musí být odstraněn zdroj výbojů. [2]



Obr. 7: Časový průběh zkušebního napětí (překresleno z: [2])

Zkouškou atmosférickým impulzem zjišťujeme elektrickou pevnost mezi jednotlivými vinutími, vinutím a uzemněnými částmi transformátoru a vrstvami, závity a cívkami každého vinutí. Provádí se přivedením atmosférického impulsu na vinutí transformátoru. Zvolí se záporná polarita zkušebního napětí, kvůli zabránění ovlivnění náhodnými přeskoky v měřicím obvodu. Zkušební napětí se zvolí podle druhu sítě, na který bude stroj připojený. Pro transformátory s plnou izolací použijeme hodnoty napětí z tabulky č. 6.

Tab. 6: Zkušební napětí vinutí transformátoru s plnou izolací

Jmenovité napětí [kV]	Nejvyšší dovolené pracovní napětí [kV]	Přiložené zkušební napětí s kmitočtem 50 Hz [kV]	Indukované zkušební napětí mezi svorkami [kV]	Rázové zkušební napětí [kV]
do 1	do 1,1	3	2	-
6	7,2	22	12	60
10	12	28	20	75
22	25	50	44	150
35	38,5	75	70	190
110	123	230	220	550
220	245	460	440	1050

Pro transformátory s redukovanou izolací použijeme hodnoty z tabulky č. 7.

Tab. 7: Zkušební napětí vinutí transformátoru s redukovanou izolací

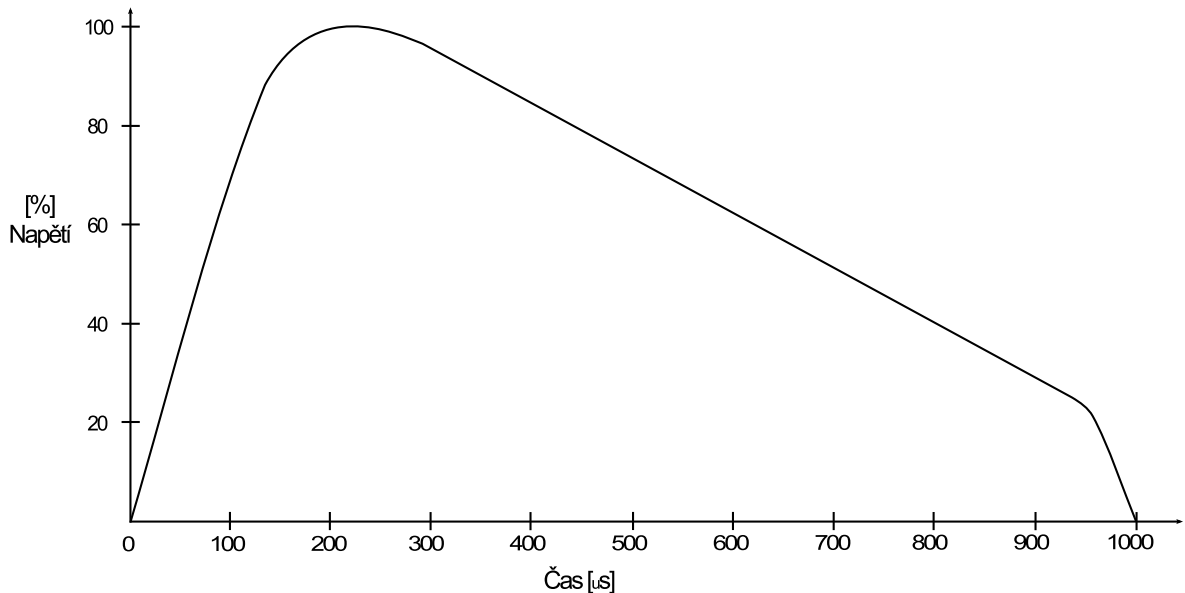
Jmenovité napětí [kV]	Nejvyšší dovolené pracovní napětí [kV]	Indukované zkušební napětí proti zemi a mezi svorkami [kV]	Rázové zkušební napětí [kV]
110	123	195	450
220	245	395	900
400	420	630	1425

Alternativou ke zkoušce atmosférickým impulzem je zkouška impulzem useknutým v týlu (LIC). [2], [8]

Kvalitu vnitřní izolace diagnostikujeme zkouškou elektrické pevnosti vnitřní izolace spínacími impulzy. Princip této metody je založen na přiložení spínacího impulzu k vinutí a následného indukování zkušebního napětí v daném zkoušeném vinutí. Je důležité, aby došlo k zachování těchto základních parametrů spínacího impulzu:

- doba do vrcholu  $T_p$  musí být alespoň 20  $\mu\text{s}$ ,
- doba trvání impulzu  $T_2$  musí být alespoň 500  $\mu\text{s}$ ,
- doba  $T_{90}$ , po kterou spínací impulz převyšuje 90 % vrcholové hodnoty, musí být alespoň 200  $\mu\text{s}$ ,
- poměr vrcholové hodnoty v druhé půlperiodě k vrcholové hodnotě první půlperiodě nesmí přesáhnout 0,85,
- polarita zkušebního napětí je záporná.

Hodnoty napětí prvního impulzu dosahují 50 až 75 %  $U_z$  (zkušebního napětí) a následný třech impulzů 100 %  $U_z$ . Závady na izolaci zjistíme z rozborů oscilogramů zkušebního napětí a proudu v nulovém bodě. Pokud se na oscilogramech neobjeví ostré změny, můžeme o izolaci říci, že je v dobrém stavu. [2], [6]



Obr. 8: Typická křivka spínacího impulzu (překresleno z: [6])



### 3.3.5 Částečné výboje

Částečný výboj je druh elektrického výboje, jejich přítomnost se diagnostickými metodami detekuje v pevném, plynném nebo kapalném dielektriku. Částečný výboj přemostí izolaci na dobu menší než 1  $\mu$ s. Tyto výboje vznikají důsledkem elektrického namáhání v izolaci a velmi snižují spolehlivost a životnosti izolačních systémů. V transformátorech vznikají v místech narušení izolace. Nejčastěji působí na izolační systémy elektrickými, erozivními, chemickými a tepelnými vlivy. Jejich včasnou detekcí zamezíme vzniku havárie transformátoru. Nejčastěji se vyskytují v izolaci závitů cívek, v cívkách a průchodkách. K měření se používá několik metod.

Galvanická metoda měření se zakládá na sledování přímých impulzů částečných výbojů. Měření se provádí měřičem výbojové činnosti a měřicí impedancí. Cílem měření je určit místo, kde vznikají částečné výboje. Pokud je nalezeno pouze jedno místo, může být vyhodnocení výsledků velmi přesné. Pokud je těchto lokalit více, je vyhodnocení obtížné.

K online sledování částečných výbojů se používají induktivní snímače. Další metodou monitoringu je měření akustických signálů piezoelektrickými snímači. Ty jsou umístěné v nádobě transformátoru. Při této metodě se lokalizují zdroje tlakových vln způsobených elektrickým výbojem v izolačním systému. Elektromagnetický výboj, který vznikne při výboji, se změní na tlakovou vlnu. Tyto vlny pak naráží na pevné části transformátoru a vzniká příčné a podélné vlnění, které se liší v rychlosti šíření. Zvukové vlny se zachytí akustickými detektory. Měníče jsou založeny na principu piezoelektrického jevu. Tedy síla působící na krystaly, vyvolá změnu elektrického náboje a tím i napětí. [2]

Tab. 8: Rychlost šíření tlakových vln (převzato z: [2])

	Rychlost zvuku podélné vlny [m/s]	Rychlost zvuku příčné vln [m/s]
Transformátorový olej	1400	-
Ocel	5900	3200

## 4 Přehled výrobců distribučních transformátorů

### 4.1 Přehled výrobců

Ve světě i v České republice je mnoho výrobců distribučních transformátorů, a tak se v této kapitole zaměříme pouze na nejvýraznější z nich. Po celém světě je vysoká poptávka na tyto transformátory, proto se převážná většina výrobců snaží uplatnit na tomto trhu. Tak vzniká tlak na poměr cena/kvalita provedení. Proto je důležité, abychom při výběru výrobce transformátorů, prozkoumali reference daných společností.

Společnost ABB patří mezi nejvýznamnější světové výrobce nejen transformátorů, ale i ostatních elektrotechnických zařízení. Do portfolia této společnosti patří výrobky pro energetiku, systémy pro energetiku, automatizace výroby a pohony, výrobky nízkého napětí a procesní automatizace. ABB působí ve více než 100 zemích po celém světě a má i zastoupení v České republice. U nás jednotlivé pobočky najdeme například v Praze, Brně, Plzni, Mostě nebo Trutnově atd.

Dalším světoznámým výrobcem elektrotechnických zařízení a tedy i distribučních transformátorů je SIEMENS AG. Tato společnost působí na elektrotechnickém trhu téměř už 100 let. Poslední vývojový trendy směřují k zvýšení šetrnosti k životnímu prostředí. Na našem území společnost působila již před 100 lety, ale znovuoobnovení působení bylo až v roce 1990. Zastoupení této společnosti najdeme v průmyslu, energetice, zdravotnictví a infrastruktuře šetrné k životnímu prostředí. [30]

TRASFOR S.A. je švýcarský výrobce transformátorů a tlumivek pro silnoproudou elektroniku, elektrotechniku a energetiku. Tato společnost dodává kromě distribučních transformátorů i lodní a trakční transformátory. Do portfolia také patří tlumivky, usměrňovače a reaktory. [32]

Společnost TRAFKO CZ, a.s. patří mezi tradiční české výrobce distribučních transformátorů. Dodává nové i repasované transformátory a také zajišťuje jejich servis. Tato společnost vznikla fúzí firem VČE – transformátory, s.r.o. a Asatoma, a.s. Hlavním výrobním pilířem jsou olejové transformátory s označením ELIN. Velkým obchodním krokem bylo v roce 2010 uzavření dlouhodobé smlouvy o dodávání až několik stovek transformátorů skupině ČEZ ročně. [31]

Plzeňská společnost ETD Transformátory působí na našem trhu již řadu let. Vznikla ze společnosti ŠKODA ENERGO s.r.o. Tato společnost se přímo nezabývá výrobou distribučních transformátorů, ale patří do obchodního zastoupení slovenské společnosti

BEZ Transformátory. Spojení těchto dvou firem bylo provedeno v roce 2004. Do této skupiny patří také společnost ESB z Brna, která se zabývá opravami elektrických strojů.

Elpro-Energo s.r.o. je další významná česká společnost, která se zabývá nákupem a prodejem transformátorů. Dále nabízí omezovače přepětí, kabelové soubory a konektory, přípojnicové systémy a komponenty transformátorů.

Po mém průzkumu trhu, jsem zjistil, že v České republice je spousta firem, které se zabývají distribučními transformátory, ale většina z nich jsou pouze dodavatelé jiných firem, anebo se zabývají jen servisem. Nejvýznamnější z výrobců jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 9: Přehled vybraných výrobců distribučních transformátorů

Společnost	Země	Zaměření	web
ABB	po celém světě	technologie pro energetiku	www.abb.cz
SIEMENS	po celém světě	elektronika, elektrotechnika, energetika	www.cee.siemens.com
TRAFO CZ	ČR	výroba transformátorů	www.trafoc.cz
BEZ Transformátory	SR a ČR	elektrotechnická výroba	www.etd-bez.cz
EXIMET TRAFO	ČR	transformátory a tlumivky	www.eximettrafo.cz
Elpro-Energo	ČR	transformátory, kabely, přípojnicové systémy	www.elpro-energo.cz
TRASFOR CZ	Švýcarsko, ČR a SR atd.	transformátory, usměrňovače a měniče	www.trasfor.cz
CG Power systems	Belgie a Irsko	olejové distribuční transformátory	www.riapower.cz
TMC Transformers	EU	suché distribuční transformátory	www.riapower.cz
Tronic spol s.r.o.	ČR	transformátory	www.trafo.cz
Energy alliance AG	EU	transformátory, silnoproudá technika, slaboproudá technika	www.energy-alliance-ag.de
SGB-SMIT Group	EU	transformátory, trafostanice	www.sgb-smit.com

## 4.2 Porovnání produktů

V následující části práce se budu zabývat detailním porovnáním transformátorů. Proto nejdříve popíši, co jednotlivé hodnoty znamenají.

Jako jmenovitý výkon se udává zdánlivý výkon ( $S_n$ ) v jednotkách kVA nebo MVA. Zdánlivý výkon vyjadřuje trvalou zatížitelnost transformátoru. Hodnota jmenovitého výkonu určuje zdánlivý výkon, který je na vstupu transformátoru. Na výstupu je tato hodnota nižší kvůli ztrátám. Výkony volených distribučních transformátorů jsou určeny výpočtovým zatížením objektu nebo cílového prostoru. Tento výkon je v běžných sítích omezen na 1250 kVA pro výstupní síť o napětí 400 V. Důvodem tohoto omezení je dimenzování rozvaděčů s ohledem na účinky zkratových proudů. [29]

Ztráty naprázdno ( $P_0$ ) vznikají v jádru transformátoru, proto záleží na použitém materiálu, z důvodu hysterezí a vířivých proudů. Hysterezní ztráty jsou závislé na frekvenci a indukci. Ztráty vířivými proudy jsou úměrné kmitočtu a indukované amplitudě, ale také tloušťce materiálu. [23]

Ztráty nakrátko ( $P_k$ ) vznikají ve vinutích a v nádobě transformátoru. Původcem těchto ztrát jsou tzv. ohmické ztráty (efekt Joulova zákona), vířivé proudy a rozptylové toky. Tyto ztráty jsou závislé na zatížení zařízení. Pro snížení ztrát je nutné použít větší množství materiálu nebo cenově nákladnější materiály, tím ale roste cena transformátoru. Zároveň ale klesnou náklady na provoz tohoto zařízení. [23]

Napětí nakrátko se měří u transformátorů a udává se v procentech. Jedná se o napětí, které je na primárním vinutí transformátoru, když sekundárním vinutím spojeným do zkratu jmenovitý proud. Tato hodnota udává kvalitu transformátoru.

Hluk je další parametr, který se zkoumá v městských i v mimoměstských oblastech. Hlavní příčinou vzniku hluku u distribučních transformátorů je střídavá magnetizace plechů jádra a tok proudu vinutím. Nejtišší transformátory dosahují hodnot nižších než 30 dB.

Mezi další parametry, které nás můžou ovlivnit ve výběru, jsou: rozměry, hmotnost, druh náplně, cena, materiál vinutí, třída izolace atd.

#### 4.2.1 Porovnání olejového a zalévaného transformátoru

Pro toto porovnání jsem vybral klasického zástupce olejového transformátoru od společnosti CG Power Systems Belgium NV. Tato společnost nabízí širokou škálu distribučních transformátorů. Výroba probíhá v Belgii a v Irsku. Do České republiky jsou tyto transformátory dodávány společností RIA power se sídlem v Třinci. Vybral jsem tedy 3fázový hermetický distribuční transformátor, jehož jmenovitý výkon je 1000 kVA. Tento zástupce má hliníkové vinutí (možné i měděné) a transformuje napětí z 22 kV na 0,4 kV. Tento transformátor je chlazen metodou přirozeného proudění oleje a vzduchu. Je vhodný pro použití do vnitřních i venkovních prostor. Jako náplň transformátoru je použit minerální olej v tomto případě. Mezi standardní příslušenství patří přepínač odboček, průchodky, vypouštěcí ventil a konstrukční oka.



Obr. 9: Olejový transformátor společnosti CG Power systems (převzato z: [35])

Jako zástupce suchého transformátoru jsem vybral transformátor RESIBLOC od společnosti ABB. Toto zařízení bylo vyvinuto na základě těch nejvyšších požadavků. Mezi které patří například nulové riziko pro životní prostředí, minimální údržba, odolnost proti zatížení, vysoká odolnost vůči zkratu atd. Použitím skelných vláken k zesílení vrstev epoxidové pryskyřice se zvyšuje rozsah teplot, ve kterých může být tento transformátor použit a tak je vhodný k umístění do těch nejnáročnějších podmínek. Fyzické rozměry nejsou omezené, a tak lze vyrobit transformátor v širokém spektru konstrukcí a provedení.



Obr. 10: Transformátor RESIBLOC od společnosti ABB (převzato z: [34])

Pro porovnání jsem vybral oba transformátory z kombinace ztrát  $B_K A_0$  o jmenovitém výkonu 1000 kVA a pro kmitočet 50 / 60 Hz. Detailní parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 10: Porovnání suchého a olejového transformátoru (převzato z: [34],[35])

	Zástupce CG Power Systems	Zástupce ABB - RESIBLOC
Napětí VN/NN	22 kV/0,4 kV	22 kV/0,4 kV
Třída izolace	24 kV/1,1 kV	24 kV/1,1 kV
Materiál vinutí	hliník	hliník
Ztráty naprázdno [W]	770	1550
Ztráty nakrátko [W]	9000	11000
Napětí nakrátko [%]	6	6
Akustický tlak [dB (A)]	53	65
Délka [mm]	1540	1800
Šířka [mm]	1050	1100
Výška [mm]	2045	2100
Hmotnost oleje [kg]	620	-
Celková hmotnost [kg]	2771	3400

U olejového transformátoru dochází ke vzniku menších ztrát naprázdno i nakrátko. Zároveň jsou méně hlučné než suché. Pro olejové transformátory platí, že při stejném jmenovitém výkonu dosahují menších rozměrů a hmotnosti.

#### 4.2.2 Porovnání zalévaných transformátorů s měděným a hliníkovým vinutím

U zalévaných transformátorů je často používáno hliníkové vinutí, i když v kabelové a rozvaděčové technice je vhodnější volbou většinou měď. Hliníkové vinutí je náročnější na výrobu, a proto se spousta výrobců pořád zaměřuje na výrobu měděného. Při použití hliníku se snižuje váha transformátoru, ale s tím ale souvisí i zvětšení rozměrů. Důležitou vlastností také je, že koeficient roztažnosti zalévacích epoxidových pryskyřic je velmi blízký koeficientu roztažnosti hliníku. To je důležité hlavně při častých změnách zatížení. Dále při jeho použití je oproti vinutí z mědi větší činitel plnění, to znamená, že se zvětšuje poměr mezi množstvím izolace a kovu. Zároveň větší povrch Al vodiče nám umožňuje snadnější ochlazování. Podstatnou výhodou je také nižší cena celkové dodávky transformátoru.

Pro toto porovnání jsem si vybral výrobek společnosti SGB s měděným vinutím a výrobek společnosti TMC s hliníkovým vinutím. Oba tyto transformátory měly jmenovitý výkon 630 kVA. V následující tabulce jsou uvedeny podrobné informace jednotlivých transformátorů.

Tab. 11: Porovnání transformátorů podle vinutí (převzato z:[35],[36])

	Zástupce SGB model DTTH	Zástupce TMC řada TMCRES-S
Napětí VN/NN	22 kV/0,4 kV	22 kV/0,4 kV
Třída izolace	24 kV/1,1 kV	24 kV/1,1 kV
Materiál vinutí	měď	hliník
Ztráty naprázdno [W] (75°C)	1650	1650
Ztráty nakrátko [W]	6900	6800
Napětí nakrátko [%]	6	6
Akustický tlak [dB (A)]	49	57
Délka [mm]	1450	1450
Šířka [mm]	595	850
Výška [mm]	1500	1600
Hmotnost oleje [kg]	-	-
Celková hmotnost [kg]	1800	1700

Z tabulky č. 11 můžeme vidět, že transformátor TMC s hliníkovým vinutím je lehčí než zástupce od SGB, ale na úkor toho se zvětšily rozměry.

### 4.2.3 Porovnání transformátorů různých napěťových hladin

Jak už víme z předchozích kapitol, distribuční soustava dosahuje napěťových hladin pod 110 kV. Proto následující porovnání bude věnováno transformátorům, které mění napětí 35/0,4 kV, 22/0,4 kV a 6/0,4 kV. Pro toto detailní porovnání jsem vybral produkty od společnosti SGB pro vnitřní instalaci. Tyto transformátory jsou zalévány pryskyřicí, jsou tedy bez olejové náplně. Pro porovnání jsem opět zvolil jmenovitý výkon 630 kVA.

Tab. 12: Porovnání transformátorů různých napěťových hladin (převzato z: [37])

	SGB DTTH 630/10	SGB DTTH 630/20	SGB DTTH 630/30
Napětí VN/NN	6/0,4 kV	22/0,4 kV	35/0,4 kV
Jmenovitý výkon [kVA]	630	630	630
Ztráty naprázdno [W] (75 °C)	1500	1650	2200
Ztráty nakrátko [W]	6400	6900	7600
Napětí nakrátko [%]	4	6	6
Akustický tlak [dB (A)]	57	57	57
Délka [mm]	1440	1600	1760
Šířka [mm]	820	820	820
Výška [mm]	1490	1540	1720
Hmotnost oleje [kg]	-	-	-
Celková hmotnost [kg]	1650	1790	2230

Z předchozí tabulky je vidět, že při transformaci z vyšší napěťové hladiny vznikají větší ztráty nakrátko i naprázdno. Rozměry a hmotnost transformátorů se liší hlavně kvůli potřebnému množství použitého materiálu na vinutí.



Obr. 11: Transformátor SGB DTTH (převzato z: [36])



## Závěr

Bakalářská práce se zabývá popisem izolačních systémů a jejich diagnostikou u distribučních transformátorů. Z hlediska použitého izolačního systému rozdělujeme transformátory na suché, suché zalévané a olejové. Volba systému pro daný projekt závisí jen na koncovém zákazníkovi a na jeho kladených nárocích. V dnešní době se snažíme, co nejvíce snížit náklady na pořízení a provoz transformátorů. Proto je důležité provádět včasnou a kvalitní diagnostiku k vyhodnocení stavu elektroizolačního systému, tak abychom předešli neočekávanému odstavení z provozu nebo dokonce úplnému zničení zařízení. V této práci se zabývám především offline diagnostikou, protože při předpokládané ceně nového distribučního transformátoru se online diagnostika nevyplatí. Její cena by totiž tvořila podstatnou část ceny nového transformátoru.

Na trhu je mnoho firem, které se zabývají distribučními transformátory, ale mnoho z nich jsou pouze dodavatelé, anebo provádějí servis těchto zařízení. Mezi nejznámější výrobce distribučních transformátorů patří např. společnosti: ABB, Siemens, SGB, TrafoCZ, Trasfor.

Závěr této práce je věnován detailnímu porovnání jednotlivých transformátorů. Nejprve jsem se zaměřil na srovnání olejových a zalévaných. Zvolil jsem jmenovitý výkon 1000 kVA. V olejových transformátorech vznikají menší ztráty naprázdno i nakrátko. A pro tento jmenovitý výkon dosahují olejové menších rozměrů a hmotnosti, tento fakt se ale může lišit podle výrobců. Dále jsem se zabýval srovnáním měděného a hliníkového vinutí. Pro použití u zalévaných distribučních transformátorů je vhodnější použití hliníkového vinutí. Dojde tak sice ke zvětšení rozměrů zařízení, ale zároveň klesne hmotnost, zvýší se činitel plnění a zjednoduší se chlazení. Nakonec jsem uvedl srovnání transformátorů různých napěťových hladin. Při transformaci z vyššího napětí dochází ke vzniku větších ztrát nakrátko i naprázdno.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [2] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] *Expertní systémy v diagnostice transformátorů*. Elektrotechnika - Internetový časopis (<http://www.elektrotechnika.cz>. 2011, roč. 2011, č. 28, s. 12. ISSN 1213-139.
- [4] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
- [5] HARLOW, James H. *Electric power transformer engineering: principles and applications*. Boca Raton: CRC Press, c2004, 1 v. (various pagings). ISBN 08-493-1704-5.
- [6] HEATHCOTE, Martin J. *The J: a practical technology of the power transformer*. 13th ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. ISBN 978-075-0681-643.
- [7] WINDERS, John J. *Power transformers: principles and applications*. New York: Marcel Dekker, 2002, xiii, 283 p. ISBN 08-247-0766-4.
- [8] ČSN EN 60076-3. *Výkonové transformátory - Část 3: Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [9] ČSN EN 50209:1999. *Základní požadavky na izolační systémy*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [10] STRNAD, Vít. *Kompozitní materiály pro elektrotechnické aplikace*. Plzeň, 2002. Diplomová práce. ZČU Plzeň, Fakulta elektrotechnická, 2002. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Kučerová Eva, CSc.
- [11] BARTÁK, MRAVINÁČ, NEUMANN, VAŘÁK: *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. SNTL, Praha 1984
- [12] ČSN EN 60567. *Olejem plněná elektrická zařízení - Odběr vzorků plynů a oleje pro analýzu volných a rozpuštěných plynů - Návod*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [13] PLÁNIČKA, Zdeněk. *Diagnostické metody netočivých strojů*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. ZČU Plzeň, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí bakalářské práce Ing. Bohumil Paslavský.
- [14] ČSN EN 60076-11. *Výkonové transformátory - Část 11: Suché transformátory*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [15] KRAUS, Miroslav. *Není transformátor jako transformátor*. In: ELEKTRO odborný časopis pro elektrotechniku [online]. 2005 [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26443](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26443)
- [16] *Regenerace transformátorových a turbínových olejů*. In: ESB Elektrické stroje [online]. 2009 [cit. 2013-02-03]. Dostupné z: <http://www.esb-bez.cz/upload/File/regenerace-transformatorovych-a-turbinovych-oleju.pdf>
- [17] ELDIAG s.r.o.: *Diagnostika izolačních systémů* [online]. 2013 [cit. 2013-03-03]. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/cz/uvod>
- [18] JANUŠ, P. *Studium viskozity kapalných materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [19] *Praktická elektronika/Transformátor*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2011, 19. 12. 2011 [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: [http://cs.wikibooks.org/wiki/Praktická\\_elektronika/Transformátor](http://cs.wikibooks.org/wiki/Praktická_elektronika/Transformátor)
- [20] ČSN EN 60599. *Elektrická zařízení v provozu plněná izolačním olejem*. Praha: Český normalizační institut, 2000.

- [21] *Analysis of Insulating Oil to Evaluate the Condition of Power Transformer*. In: IEEE [online]. 2010 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://80.ieeeexplore.ieee.org.dialog.cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5491521>
- [22] Dissolved gas analysis and the Duval triangle. In: DUVAL, Michel. AVO New Zeland [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: [http://www.avo.co.nz/images/stories/TechnicalPapers/2006-Conference\\_Duval.pdf](http://www.avo.co.nz/images/stories/TechnicalPapers/2006-Conference_Duval.pdf)
- [23] *DT Brochure CZE*. RIA power [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.riapower.cz/assets/RIA-files/DT/DT-brochure-CZE.pdf>
- [24] *Kodex přenosové soustavy: Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy*. In: ČEPS, a.s. [online]. 2013 [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: [http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Documents/2013/ČástI\\_13\\_fin.pdf](http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Documents/2013/ČástI_13_fin.pdf)
- [25] Dielectric fluids: Envirotemp FR3 fluid. In: Cargill [online]. 2012 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.cargill.com/wcm/groups/public/@ccom/documents/document/na3066315.pdf>
- [26] BIOTEMP: *Biodegradable Dielectric Insulating Fluid*. In: ABB [online]. 2002 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.nttworldwide.com/docs/BIOTEMP-ABB.pdf>
- [27] Olejové transformátory. Elpro-Energo [online]. 2012 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz>
- [28] LIDARŮK, M., a kolektiv. *Epoxidové pryskyřice*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1983
- [29] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8. Dostupné z: [http://k315.feld.cvut.cz/CD\\_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf](http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf)
- [30] Siemens AG. *Profil společnosti* [online]. 2013 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: [https://www.cee.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/o\\_nas/Pages/profil\\_spolecnosti.aspx](https://www.cee.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/o_nas/Pages/profil_spolecnosti.aspx)
- [31] *Trafo CZ: Transformátory* [online]. 2013 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.trafocz.cz/>
- [32] MUŽÍK, Pavel. *Trasfor S.A.* [online]. 2013 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: [www.trasfor.cz](http://www.trasfor.cz)
- [33] *MIDEL: Natural Ester Dielectric Insulating Fluid Overview*. In: Static Mimaterials [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: [http://static.mimaterials.com/midel/documents/technical/MIDEL\\_eN\\_Dielectric\\_Insulating\\_Fluid\\_Overview.pdf](http://static.mimaterials.com/midel/documents/technical/MIDEL_eN_Dielectric_Insulating_Fluid_Overview.pdf)
- [34] *Technické parametry transformátorů RESIBLOC*. In: ABB [online]. 2011 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/8d3d33d525f15467c125791900416521/\\$file/1LDE000075%20cz%20Technicke%20parametry%20transformatoru%20RESIBLOC.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/8d3d33d525f15467c125791900416521/$file/1LDE000075%20cz%20Technicke%20parametry%20transformatoru%20RESIBLOC.pdf)
- [35] RIA power. RIA power transformátory [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.riapower.cz/>
- [36] *Suché transformátory*. In: Elpro-energo [online]. 2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: [http://www.elpro-energo.cz/download/suche-transformatory/katalog\\_sgb.pdf](http://www.elpro-energo.cz/download/suche-transformatory/katalog_sgb.pdf)
- [37] *Suché transformátory*. SGB-SK [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.sgbsk>