

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Diagnostika zalévaných transformátorů**

**vedoucí práce: Ing. Martin Širůček**

**2012**

**autor: Martin Janda**

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

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

Jméno a příjmení: **Martin JANDA**  
Osobní číslo: **E09B0370P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Diagnostika zalévaných transformátorů**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište možnosti výroby izolačního systému zalévaných transformátorů.
2. Uveďte materiály, které se používají na výrobu tohoto systému.
3. Zpracujte přehled diagnostických metod, které jsou, popř. mohou být použity gnostiku zalévaných transformátorů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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


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

Datum zadání bakalářské práce: 17. října 2011

Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2012

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

**Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis suchých zalévaných transformátorů používaných v energetice, na konstrukci izolačního systému a popisu potřebných materiálů. Hlavním cílem je ucelený souhrn jednotlivých metod používaných k offline i online diagnostice těchto transformátorů.

**Klíčová slova**

Suchý, zalévaný, transformátor, izolační systém, VPI, Resin-rich, Nomex, Kapton, sklo, epoxidová pryskyřice, offline, online, diagnostika

**Abstract**

The presented bachelor thesis is focused on the description of cast-resin dry transformers which are used in the power engineering, the insulation system design and description of necessary materials. The main objective is a comprehensive summary of the various methods used for offline and online diagnostics of the transformers.

**Keywords**

Dry, cast-resin, transformer, insulation system, VPI, Resin-rich, Nomex, Kapton, glass, epoxy resin, offline, online, diagnostics

## Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 6.6.2012

Martin Janda

.....

## **Poděkování**

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

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TRANSFORMÁTORY</b> .....	<b>11</b>
<b>2 ZALÉVANÉ TRANSFORMÁTORY</b> .....	<b>14</b>
2.1 JÁDRO TRANSFORMÁTORŮ .....	15
2.2 VINUTÍ TRANSFORMÁTORŮ .....	15
2.2.1 NN vinutí .....	16
2.2.2 VN vinutí .....	16
2.3 IZOLAČNÍ SYSTÉM .....	17
2.3.1 Resin-Rich .....	18
2.3.2 VPI .....	18
2.4 OSTATNÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY .....	20
<b>3 MATERIÁLY IZOLAČNÍHO SYSTÉMU</b> .....	<b>21</b>
3.1 PRO OVIN VODIČŮ .....	21
3.1.1 Slídová páska .....	21
3.1.2 Tvrzené skleněné tkaniny .....	23
3.1.3 Polyimidy (PI) .....	24
3.1.4 Polyamid (PA) .....	24
3.2 PRO ZALITÍ VINUTÍ .....	25
3.2.1 Epoxidové pryskyřice .....	25
3.2.2 Silikonové pryskyřice .....	26
<b>4 DIAGNOSTIKA</b> .....	<b>27</b>
4.1 ZKOUŠKY ZALÉVANÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....	27
4.1.1 Činný odpor vinutí .....	27
4.1.2 Kontrola sledu fází .....	28
4.1.3 Fáze natočení - hodinový úhel .....	29
4.1.4 Převod, napětí naprázdno, ztráty naprázdno .....	30
4.1.5 Ztráty nakrátko a napětí nakrátko .....	31
4.1.6 Nulová složka reaktance .....	32
4.1.7 Oteplovací zkoušky .....	33
4.1.8 Izolační stav transformátoru .....	34
4.1.8.1 Měření izolačního odporu, určení polarizačního indexu a časové konstanty transformátoru .....	34
4.1.8.2 Měření ztrátového činitele $\tan \delta$ a kapacity vinutí .....	35
4.1.8.3 Poměr kapacit $C_2/C_{50}$ .....	36
4.1.9 Napěťové zkoušky vinutí .....	37



4.1.9.1	Zkouška přiloženým střídavým výdržným napětím .....	37
4.1.9.2	Zkouška indukovaným výdržným napětím .....	38
4.1.9.3	Zkouška atmosférickým impulzem .....	39
4.1.10	Měření hladin částečných výbojů .....	40
4.1.11	Detekce poruch vinutí.....	41
4.1.11.1	Metoda nízkonapětových impulzů.....	42
4.1.11.2	Metoda frekvenčních charakteristik (SFRA).....	42
4.1.12	Měření hladiny hluku .....	44
4.1.13	Zkouška pro třídu prostředí.....	45
4.1.14	Klimatická zkouška.....	46
4.1.15	Zkouška hořlavosti .....	47
4.2	ON-LINE DIAGNOSTIKA .....	48
4.2.1	Měření napětí a proudů.....	48
4.2.2	Měření teplot.....	48
4.2.3	Sledování částečných výbojů.....	50
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>51</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>		<b>52</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>		<b>55</b>

## Úvod

Málokdo z nás si dokáže představit, jaký by byl v této moderní a uspěchané době, život bez elektřiny. Již od začátku 20. století se elektrická energie pomalu stává nepostradatelnou pro každodenní život. Elektřinu je zapotřebí nějakým způsobem dopravit do našich domácností a nejen tam. K výrobě a přenosu elektrické energie k cílovému spotřebiteli slouží rozsáhlá elektrizační soustava.

Dnes a denně se setkáváme se stožáry vedení, které nesou napohled nikdy nekončící dráty, a občas zahlédneme elektrárnu. To ale není vše, vyrobenou energii musíme na přenos vhodně upravit. Pro dlouhé přenosy jsou zapotřebí vysoká napětí a malé proudy, aby nemusely být vodiče příliš tlusté a zamezilo se ztrátám vzniklým průchodem elektrického proudu. Naopak před spotřebitelem musí být napětí a proudy upraveny na požadovanou hodnotu. K těmto úpravám se používají transformátory a tím pádem tvoří nepostradatelnou součást elektrizační soustavy a koncových spotřebičů. A to si již mnoho z nás neuvědomuje.

Aby byla zajištěna co největší spolehlivost a dlouhá životnost, je zapotřebí pravidelně kontrolovat technický stav transformátorů, zejména vyšších výkonů. Proto bychom měli věnovat velkou pozornost a klást vysoké požadavky na tzv. diagnostiku. Správnou volbou diagnostických zkoušek lze předejít poruchám, neplánovaným odstávkám a tak minimalizovat finanční ztráty. Z ekonomického hlediska je třeba zkoušky správně naplánovat a volit rozsah dle jejich výpovědischopnosti.

Touto prací bych chtěl přiblížit jeden z dnes používaných typů transformátorů, jedná se o suché zalévané transformátory, které jsou šetrné k životnímu prostředí. V první části je okrajově nastíněno obecné fungování transformátorů. V následující části se již zaměříme na samotné zalévané transformátory, z čeho se skládají a jaké metody se k jejich stavbě využívají. Ve třetí části se dále budeme věnovat transformátorům, konkrétně popíšeme materiály použité pro izolační systém. Závěrečná kapitola je zaměřena na popsání jednotlivých diagnostických zkoušek, které lze použít ke zjištění technického stavu suchých zalévaných transformátorů.

# 1 Transformátory

Jedná se o elektrický netočivý stroj, který je schopen snižovat a zvyšovat hodnoty napětí a proudu při zachování vstupního výkonu na jiné požadované hodnoty. Využívají se v elektrizační soustavě, kde umožňují díky transformaci na vysoká napětí a menší proudy přenos s pokud co možno nejnižšími Joulovými ztrátami. Nevyužívají se jen v uvedené oblasti, další možností je použití např. v elektronických obvodech, regulačních zařízeních a dalších. Proto se vyrábějí v různých modifikacích od jmenovitých výkonů v řádech mVA pro elektroniku až po stovky MVA výkonových transformátorů. Mohou být dvouvinuťové nebo vícevinuťové, jedno či více fázové (většinou trojfázové). Záleží, jaké požadavky na ně budou kladeny. U těchto netočivých strojů lze v určitých případech dosáhnout účinnosti až 98%. Vzhledem k tomu, že neobsahují pohyblivé části, tak náklady na údržbu nejsou nikterak vysoké.

Transformátory se vždy skládají z vinutí, magnetického obvodu (jádra) a izolačního systému. Princip by se dal zjednodušeně popsat tak, že na primární vinutí je připojen střídavý zdroj a na sekundární je připojena zátěž. Proud procházející primárním vinutím vybudí magnetický střídavý tok  $\phi_1$  v uzavřeném magnetickém obvodu a ten v sekundárním vinutí indukuje napětí. Pokud je na sekundárním vinutí připojena zátěž, začne protékat proud, který budí v jádře vlastní magnetický tok  $\phi_2$ . Jádrem poté prochází výsledný magnetický tok  $\phi$ , vzniklý působením obou vinutí. Uzavřený magnetický obvod umožňuje, aby vinutí měla společnou osu a magnetická vazba byla co nejlepší. Většinou bývá sekundární napětí menší než primární. Dopodrobna se touto problematikou zabývá např. [1]. Indukované napětí je závislé právě na maximální velikosti magnetického toku  $\phi_m$ , frekvenci  $f$  a počtu závitů  $N$ . [1][2]

$$u_{i1} = 4,44 \cdot N_1 \cdot \phi_m \cdot f \text{ [V]}, \quad (1.1)$$

$$u_{i2} = 4,44 \cdot N_2 \cdot \phi_m \cdot f \text{ [V]}, \quad (1.2)$$

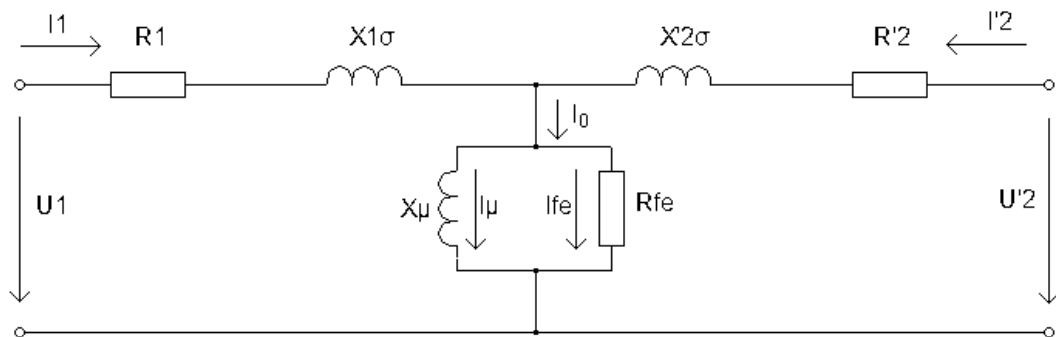
kde  $u_{i1}$  - je indukované napětí na primárním vinutí [V],  $u_{i2}$  - je indukované napětí na sekundárním vinutí [V],  $N_1$  - je počet závitů primárního vinutí [-],  $N_2$  - je počet závitů sekundárního vinutí [-],  $\phi_m$  - je maximální hodnota střídavého magnetického toku [Wb],  $f$  - je kmitočet primárního napětí [Hz].

Převod transformátoru  $k$  je poměr indukovaných napětí a je to jeden ze základních parametrů.

$$k = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}, \quad (1.3)$$

kde  $U_1$  - je napětí na primárním vinutí [V],  $U_2$  - je napětí na sekundárním vinutí [V].

Transformátor si lze představit jako kombinaci pasivních prvků (odporů a indukčností), jejichž vlastnosti a parametry s jistým zjednodušením odpovídají vlastnostem transformátoru.



Obr. 1.1 Náhradní schéma transformátoru [8]

kde  $R_1$  - odpor primárního vinutí [ $\Omega$ ],  $R'_2$  - odpor sekundárního vinutí [ $\Omega$ ],  $X_{1\sigma}$  - rozptylová reaktance vstupního vinutí [ $\Omega$ ],  $X'_{2\sigma}$  - rozptylová reaktance výstupního vinutí [ $\Omega$ ],  $R_{FE}$  - odpor reprezentující ztráty v železe [ $\Omega$ ],  $X_\mu$  - hlavní reaktance transformátoru [ $\Omega$ ],  $I_0$  - proud naprázdno [A]. [1][2]

Dělení transformátorů podle:

- využití

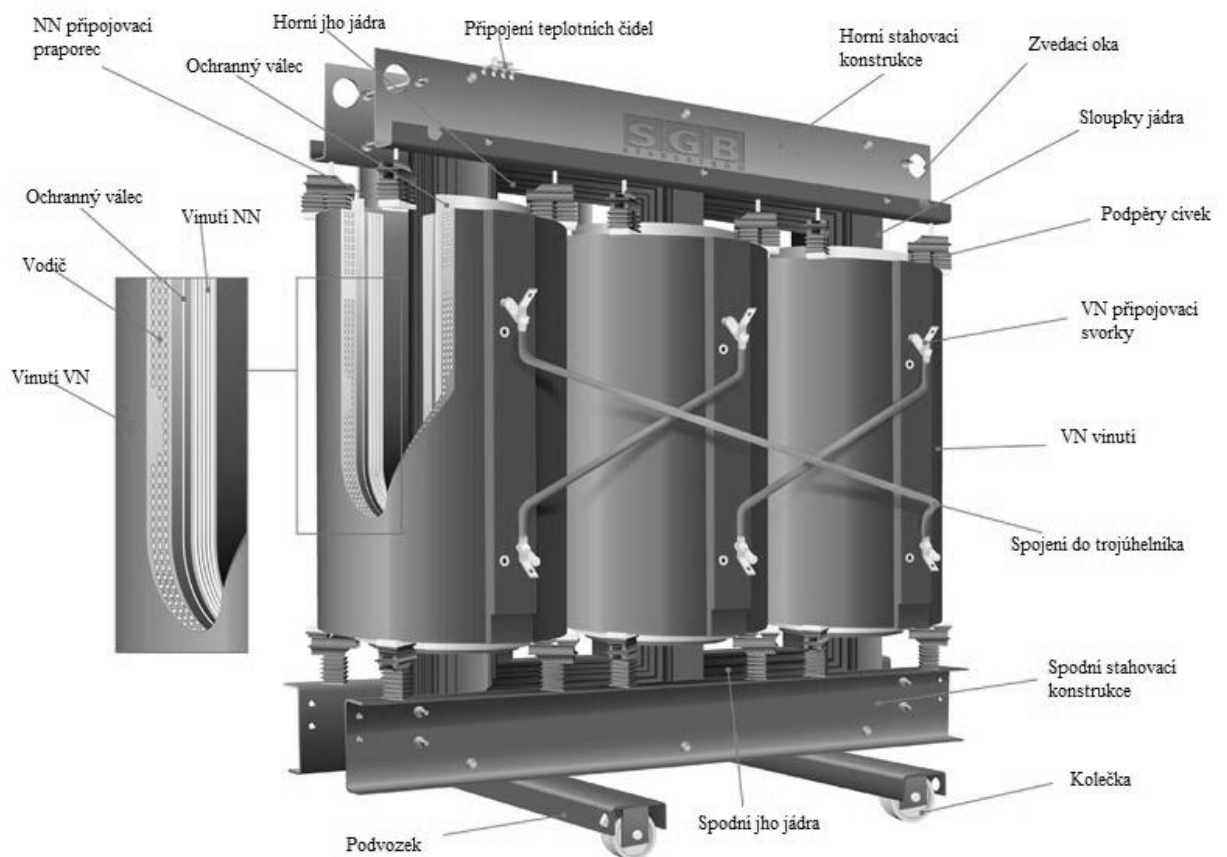
- energetické - blokové, distribuční
- napájecí
- bezpečnostní
- rozptylový
- regulační
- měřicí

- počtu fází
  - jednofázové
  - vícefázové
- počtu vinutí
  - dvouvinut'ové
  - vícevinut'ové
- konstrukce magnetického obvodu
  - jádrové
  - plášťové
  - toroidní
- izolačního systému
  - olejové - výkony stovek MVA, napětí do 800 kV
  - suché - výkon do 15 MVA, napětí do 38kV
  - suché zalévané - výkon do 25 MVA (možno navýšit až na 35 MVA), napětí do 35kV

## 2 Zalévané transformátory

Transformátory se zalitým vinutím se vyrábějí přibližně od 70. let 20. století. Po celém světě jich můžeme najít několik stovek tisíc, některé jsou v provozu déle než 30let. Proto se nedá říci, že by transformátory se zalitým vinutím nějak zaostávali ve své životnosti a spolehlivosti za distribučními olejovými transformátory. V poslední době patří mezi velmi používaný typ transformátorů.

Tento typ transformátoru se používá, jelikož je odolný vůči teplotním rázům, vlhkosti, chemikáliím a mechanickým rázům. Po přidání vhodných aditiv může mít samozhášlivý charakter. Zalévané transformátory tak oproti minerálním olejům nepřispívají k rozšiřování požáru, protože neobsahují žádnou olejovou náplň. Proto mohou být použity i tam, kde jsou větší požadavky na požární bezpečnost. Jsou také šetrnější k ochraně přírody, mohou být například použity v místech, kde je požadována zvýšená ochrana vod. Tyto vlastnosti a výhody jsou ovšem vykoupeny vyšší pořizovací cenou.



Obr. 2.1 Zalévaný transformátor [8]

Vinutí všech typů transformátorů je zalité syntetickou pryskyřicí. Důvodů proč použít jako zalévací hmotu zrovna syntetickou pryskyřicí je hned několik. Je to vynikající izolační prvek, hodnota elektrického odporu na jeden centimetr se pohybuje v rozmezí  $10^{13}$  až  $10^{15}$   $\Omega/\text{cm}$ . Má velmi dobrou přilnavost, a proto se snadno aplikuje k ostatním materiálům. Má výbornou mechanickou odolnost. Zalité vinutí neobsahuje žádné dutinky, je 100% neporézní.

Zalévaný transformátor se skládá z magnetického obvodu (jádra), nosné konstrukce a mechanického stahování, primárního a sekundárního vinutí a příslušenství *Obr.2.1*. [18][19]

## 2.1 Jádro transformátorů

Na jádro transformátoru jsou kladeny nejrůznější požadavky. Jsou to především tyto parametry: ztráty naprázdno, hlučnost a proud naprázdno. Proto je velmi důležitý správný výběr vysoce kvalitních materiálů pro vývoj a výrobu. Na jádro transformátoru jsou použity za studena válcované, magneticky orientované plechy. Průřez jádra je u malých výkonů prostý čtvercový, ale u větších výkonů je šířka plechů odstupňována. Někdy bývají dokonce přidány kanálky pro průchod chladicího vzduchu. Při zvláštních požadavcích může být použit tzv. Hi-B-plech, který dokáže snížit ztráty naprázdno o 15% a hlučnost o 5 - 7 dB(A) při stejném rozměru transformátoru. Plechy jádra mohou být skládána u malých výkonů natupo (řezy na  $90^\circ$ ) a u větších výkonů metodou Step-Lap. Jde o to, že plechy jsou stříhány pod úhlem  $45^\circ$  a délka jednotlivých plechu se s malými rozestupy mění. Tím je dosaženo toho, že sousední plechy nemají společnou hranu styku a je docíleno snížení hlučnosti a snížení ztrát. Tato metoda je sice pracnější a je zapotřebí velká pečlivost, ale z výše uvedených metod se více využívá než metoda skládání natupo. Poté se na poskládané jádro nanese tepelně odolný dvousložkový lak, který ho chrání proti korozi a dojde i k celkové stabilitě jádra, jelikož lak zateče do spár a v podstatě jednotlivé plechy vzájemně slepí. Celé jádro je fixováno prostřednictvím rámu. Ten se skládá s horních a dolních stahovacích profilů a přímo na jádře položených nemagnetických tyčí. [9][10]

## 2.2 Vinutí transformátorů

Vinutí transformátorů musí splňovat mnoho požadavků. Musí mít výbornou elektrickou vodivost, dobrou mechanickou pevnost konstrukce vinutí, vysokou elektrickou pevnost

izolace a odolnost proti tepelnému namáhání. Na druhou stranu se v dnešní době také hledí na ekonomičnost výroby. [9][10]

### 2.2.1 NN vinutí

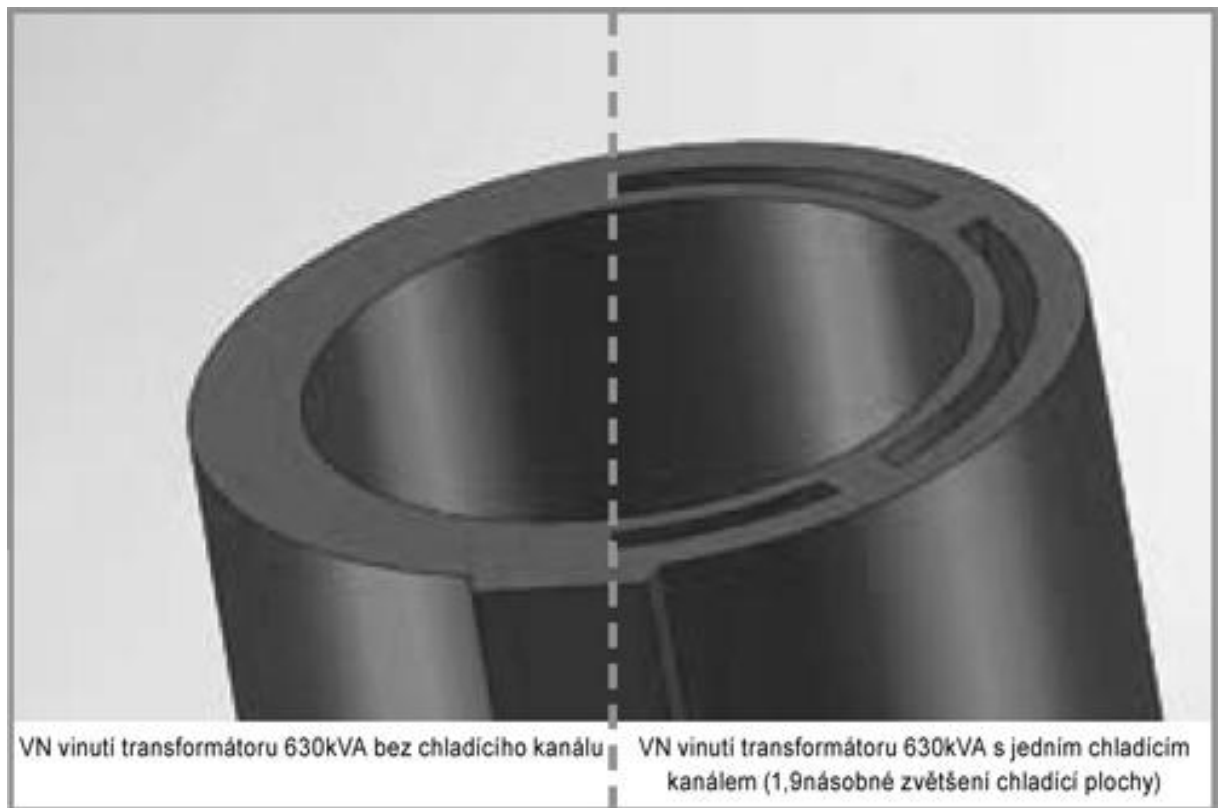
Vinutí nízkého napětí se většinou vyrábí z hliníkových nebo měděných pásů širokých na celou výšku sloupku (fóliové vinutí). Pokud je vinutí navinuto touto metodou, tak je zajištěna optimální proudová hustota po celém vinutí a to zajišťuje větší odolnost při zkratu a dokáže lépe pohltit a rozložit vzniklé síly. Na vinutí nevznikají nebezpečně horká místa, která jsou způsobena ztrátami ve vinutí. Teploty jsou rozloženy po celé výšce vinutí. Vinutí má také vysokou zkratovou pevnost a jsou sníženy dodatečné ztráty ve vinutí. Mezizávitová izolace se provádí z materiálu teplotní třídy H nebo F, to záleží na požadavcích a místě využití transformátoru. Výhodné je použít materiál ze speciálních válcoven, aby bylo zajištěno, že okraje použitých materiálů budou bez otřepků. Toto je nutný předpoklad pro dobrou elektrickou pevnost. Při této výrobě vinutí se pro spojení pásma vinutí s výstupní přípojnici mohou použít dvě metody. Svařování pod ochrannou atmosférou nebo svařování za studena pod vysokým tlakem (400kN). [9][10]

### 2.2.2 VN vinutí

Všechny komponenty transformátoru (NN, VN vinutí a jádro) musí být dokonale sladěny, aby vše fungovalo, jak se očekává. A proto i na VN vinutí musí být použity kvalitní materiály. Metod pro VN vinutí je více a i zde má každá firma své Know-How, např. firma Trasfor skládá vinutí z několika disků, navinutých z hliníkového pásu a mezizávitové izolace z polyesterové fólie (PET), ty pak při skládání svařuje metodou TIG. Díky této technologii dochází ve vinutí k ideálnímu rozložení napěťového namáhání. Za to firma SGB používá dvouvrstvé vinutí z izolovaných drátů. U nich je primární izolace tvořena dvěma způsoby, buď vysoce tepelně odolným polyesteremit lakem s teplotním indexem 220°C, nebo Nomexem s teplotní třídou 220°C. Takto zhotovená vinutí se následně zalévají epoxidovou pryskyřicí metodou VPI, aby se předešlo vzniku nežádoucích bublin. Suché transformátory musí vznikající teplo odevzdat okolnímu vzduchu, aniž by došlo k překročení dovoleného oteplení příslušné izolace. Proto jsou někdy do VN vinutí při své výrobě vsazeny chladicí kanály pro lepší odvod tepla a pro zlepšení mechanických vlastností se vinutí zesiluje



skleněnými vlákny a přidávají se různá plniva. Vinutí může být zhotoveno stejně jako NN vinutí z mědi i hliníku. [9][10]



Obr. 2.2.2 VN vinutí [30]

### 2.3 Izolační systém

K zaizolování vinutí transformátorů se především používána metoda VPI, ale teoreticky je možno použít i metodu Resin-rich, která se spíše využívá u točivých strojů.

Každá z těchto metod má své výhody i nevýhody. Technologie Resin-Rich má svoji přednost v jednoduchosti vytvrzovacích přípravků a takto zaizolovaná vinutí se, pokud je potřeba opravy, dají rozebrat. Nevýhodou je, že při použití této metody vznikají nehomogenity. Ty u technologie VPI nevznikají. Právě to je hlavní výhodou využití této metody. Bohužel nevýhodou této technologie je především její vysoká cena, ta je ovlivněna pořizovací cenou vytvrzovacího zařízení. Další nevýhodou je nemožnost rozebrání a opravy takto izolovaných předmětů. Technologie VPI se využívá pro celkovou izolaci vinutí transformátorů a Resin-Rich je používáno k izolaci jednotlivých vinutí. [3]

### 2.3.1 Resin-Rich

V systému Resin-Rich se využívá tříložkový kompozit s výchozím izolačním před impregnovaným materiálem. Ten je dodáván obvykle s 30 až 40 procenty pojiva a je ve formě polotovaru. Aplikací na vinutí se vytvoří kompaktní izolační trubka o požadované tloušťce stěny. Takto izolované vinutí je již připraveno k instalaci.

Základem pro tento systém je tedy tříložkový materiál. Skleněná tkanina tvoří nosnou část. Je vyráběna s rovnými nebo stáčenými vlákny o tloušťkách 0,12mm nebo 0,14mm. Rovnaná vlákna skelné tkaniny mají stejné mechanické vlastnosti jako stáčená vlákna. Liší se v elektrické pevnosti. Tu mají stáčená vlákna menší, proto je výhodnější používat tkaninu s rovnými vlákny. Další složkou tohoto systému je izolační bariéra. Pro tento účel se používá kalcinovaný slídový papír, ten je oproti běžnému izolačnímu papíru pevnější, hutnější a méně nasáklý. Poslední složkou, která váže obě předešlé složky, je reaktoplastická bezrozpouštědlová novolaká nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Je dodávána částečně předtvrzená, v suchém a nelepivém stavu a s co nejdelší skladovatelností. V takzvaném B stavu. Tloušťka takového materiálu se pohybuje v rozmezí 0,15 až 0,2mm.

Dle požadovaného pracovního napětí se na vinutí navine potřebná vrstva těchto tří složek. U vinutí transformátorů se používá kontinuální navíjení. Materiál se navíjí nejčastěji ve formě pásky o šířce 20mm s třetinovým, polovičním nebo dvoutřetinovým překryvem po celé délce vinutí. Dále musí proběhnout vytvrzení takto ovinutých vinutí ve speciálních přípravcích (pecích), ty jsou vyhřívány na určitou požadovanou teplotu a dále slouží pro stažení izolační vrstvy na požadovaný rozměr. Vytvrzování nejčastěji probíhá v teplotách okolo 160 °C až 170 °C a doba vytvrzování bývá obvykle okolo jedné hodiny, záleží na tloušťce izolační vrstvy. Po vytvrzení je důležitý i průběh ochlazení. Ochlazování nesmí probíhat příliš rychle, jinak by mohlo dojít k popraskání izolační vrstvy nebo k vzniku nehomogenit a následnému oddělení izolace od jádra a znehodnocení výrobku. Nesmí se zanedbat ani následné vysušení a tím odstranění až dvou možných procent vlhkosti a těkavin. [3]

### 2.3.2 VPI

Neboli vakuově tlaková impregnace. Je to rozhodující výrobní operace celého procesu a dává tak název celému postupu výroby hlavní izolace. Základním materiálem systému je savá slídová páska, která se při impregnačním procesu prosytí impregnantem.

Savý izolant tedy tvoří základ a nejčastěji je ve formě pásky sestávající se ze tří komponent. Nosnou je skleněná tkanina, polyesterové rouno nebo polyimidová fólie. Oproti materiálu u systému Resin-Rich je zde pouze 7% pojiva pro mechanické zajištění možnosti zpracování pásky. Páska a použitý impregnant musejí být navzájem kompatibilní, aby nemohlo dojít ke vzájemnému napadení při finálním zpracování. Savost materiálu je nejdůležitější, musí dojít k dokonalému proimpregnování všech namotaných vrstev pásky a to i při větším počtu ovinů (10 a více). Použití nekalcinované slídy je základem dobré savosti. Slída má hrubší zrnění a odpovídající mechanické vlastnosti, proto splňuje všechny předpoklady k použití. Hlavní mechanické vlastnosti jsou ohebnost a minimální pevnost v tahu při ovíjení. Při něm nesmí dojít k narušení slídového papíru. Pevnost materiálu nesmí být menší než 80N na centimetr šířky. Jako impregnant se používají bezrozpuštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice se stoprocentním obsahem sušiny, což umožní zcela vyplnit prostor impregnovaného objektu již při jednoduché impregnaci. Tyto materiály mají dobré mechanické i elektrické vlastnosti, relativně krátkou vytvrzovací dobu a spadají do teplotních tříd 180 (H) a 200.

Zařízení pro impregnaci tímto způsobem se skládá z tlakotěsného a vakuotěsného kotle, který je vybaven chladícím a ohřívacím zařízením a jeho součástí jsou zásobníky impregnantu. Jsou tlakotěsné a mohou ohřívat či chladit. Impregnant se skladuje při snížené teplotě pod přetlakem inertního plynu. Na cestě mezi zásobníky a impregnačním kotlem je umístěn ohřívák popřípadě ochlazovač impregnantu. Před vlastní impregnací se impregnant ohřeje na požadovanou teplotu a za stálého míchání se ve vakuu odplyňuje. Další nezbytnou součástí jsou sušárny s teplotním rozsahem do 200°C.

Impregnační proces začíná sušením, tím se odstraní přítomná vlhkost. Vlastní sušení probíhá přibližně 20 hodin za teplot vyšších než 100°C. Poté se vysušení předmět přeneso do impregnačního kotle, kde je zavedeno vakuum, dojde ještě k odstranění zbytku těkavin a vlhkosti. Následně se začne nádoba pomalu zaplavovat ode dna, to trvá až hodinu. Po zaplavení a zrušení vakua se opět na hodinu zavede přetlak. Jako další krok je, po vypuštění laku a okapání, přenesení předmětu do sušárny. Sušení probíhá ve více stupních. Nejprve probíhá za mírného podtlaku, aby se urychlilo vyprcháání těkavých složek. Druhý stupeň je samotné vytvrzení probíhající za proudění teplého vzduchu za normálního tlaku. Celý tento postup se v případě vysokovýkonových zalévaných transformátorů (v řádech megawatt) provádí celkem dvakrát, aby výsledný izolační systém měl požadované vlastnosti. [18][3]

## **2.4 Ostatní konstrukční prvky**

Zalévané transformátory mohou být doplněny o ochrannou skříň, protože nejsou samy o sobě chráněny proti doteku. Pro zvýšení výkonu až o 40% a ve výjimečných případech dokonce i o více se dodávají přídavné ventilátory a teplotní čidla. Součástí transformátorů mohou být průchodky, přepínače či přepojovače odboček. Dále to mohou být různé antivibrační podložky, různé typy podvozků a další. [9][10]

## 3 Materiály izolačního systému

V zalévaných transformátorech se používají kompozitní materiály, většinou tříslložkové. Kompozitní materiály se nepoužívají pouze v transformátorech, ale mají v elektrotechnickém průmyslu široké využití. Spojují v určité oblasti mechanické a elektrické vlastnosti, proto nacházejí uplatnění tam, kde jsou obě tyto vlastnosti vyžadovány společně. Jedná se o širokou skupinu materiálů, které vznikají spojením nosné složky - většinou papír, bavlněná tkanina, skleněná tkanina, polyesterová, polyetylenaftalátová (PEN), polyetylentereftalátová (PET), polyimidová fólie, polyesterové rouno. Pojiva - nejčastěji epoxidová, polyesterová nebo silikonová pryskyřice. A plniva - v případě elektroizolační techniky nejčastěji slída ve formě slídového papíru.

V následující kapitole si popíšeme jednotlivé materiály, které se používají pro výrobu izolačního systému zalévaných transformátorů. [3]

### 3.1 Pro ovin vodičů

#### 3.1.1 Slídová páska

Slída nadále zůstává nejpoužívanějším izolantem pro elektrotechnické výrobky, zejména pro elektrické stroje, neboť dovoluje vyšší elektrické i tepelné namáhání. Složení slídy se mění podle původu, ale celkově se svým složením řadí do skupiny materiálů hlinitokřemičitým.

Obecné vlastnosti slídy

- elektrické: vysoká dielektrická pevnost, vysoký povrchový a vnitřní odpor, schopnost odolávat jiskření a koruně
- mechanické: vysoká pevnost ve stříhu a tlaku, pružnost, dokonalá štěpnost, tvarová stálost a nestlačitelnost
- chemické: stabilita a inertnost k vodě, olejům, ředidlům, kyselinám (mimo HF - kyselina fluorovodíková) i jiným chemickým činidlům
- tepelné: je nenavlhavá, netavitelná, nezápalná s nízkou tepelnou vodivostí, tepelný izolant s vynikající tepelnou stabilitou, zachovává si své vlastnosti do 800 °C
- optické: v tenkých šupinkách je transparentní, má vysoký lesk, odpuzuje nečistoty a snadno se očišťuje.

Pro elektrotechniku jsou nejdůležitější druhy slídy muskovit a flogopit.

Muskovit je kyselý křemičitan hlinitodraselný základního složení  $\text{KH}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3$ , též nazývaný draselná slída. Většinou je bezbarvý nebo jen mírně narůžovělý, popř. hnědý i zelený podle obsažených oxidů. Je mechanicky pevný a zároveň ohebný, hraniční teplota použitelnosti je 500 až 600 °C.

Flogopit nazývaný též hořečnatá slída je kyselý křemičitan hlinitodraselnohořečnatý základního složení  $\text{KH}(\text{MgF})_3\text{MgAl}(\text{SiO}_4)_3$ . Je jantarové, zlatavé, popř. zelené až šedivé barvy podle obsažených příměsí. Flogopit má oproti muskovitu nižší elektrickou vodivost a větší tepelnou stálost při vyšších provozních teplotách. Mezní teplota jeho použití je přibližně 800°C, teprve při dosažení teploty 900°C se tepelně rozrušuje a křehne. Flogopit je měkkší a ohebnější než muskovit.

Základní rozdělení elektroizolačních výrobků na bázi slídy je do dvou skupin

- mikanity
- materiály z rekonstruované slídy

V mikanitech je slída aplikována v základní formě slídových lístků (krystalů). Remikanity jsou aplikací slídy v rekonstruované podobě ve formě tzv. slídového papíru. Těmto materiálům tvoří podkladový materiál papír, dnes již většinou skleněná tkanina. Pojivo, které spojuje obě uvedené složky, je ve formě syntetické pryskyřice. V moderní izolační technice se tyto komponenty používají již v dříve zmíněných systémech (Resin-Rich a VPI).

Kalcinovaný papír se vyrábí technologií, kterou vymyslel francouzský inženýr Bardet. Slídový odpad (zbytky po vysekaných součástkách ze slídových krystalů) se zahřívá po dobu 20 minut při 800°C, v této fázi slída ztratí až 50% své krystalické vody. Následuje nasypání takto upravené slídy do 1% roztoku uhličitanu sodného. Tímto rychlým zchlazením dojde k porušení krystalické struktury a zvětší se objem až o 800%. Poté se ponoří do 5% roztoku HCl (kyselina chlorovodíková) a během probíhající reakce se uvolňuje oxid uhličitý a ten zcela naruší strukturu slídy. Dochází k chemickému rozmělnění slídy. Dále je třeba odstranit chlorid sodný, který vzniká předchozí reakcí, to se provádí vypráním. Takto získaná slídová suspenze se následně zpracovává na papírenském stroji na slídový papír. Velikost získaných částic je v mezích od 0,04 do 0,8 mm, přičemž největší množství zrn má velikost 0,25mm.

Nekalcinovaný papír se získává postupem, jehož autorem je německý inženýr Heymann. Jedná se o hydromechanický způsob, tento proces zachovává veškeré vlastnosti slídy. Dezintegrace se v tomto případě provádí v dezintegrátoru mechanicky. Proud vody unáší slídu a ta naráží na překážku, která se nesmí vymílat. Při této technologii se nepoužívají žádné

chemikálie. Získaná zrnka jsou velikostí v mezích od 0,04 do 2mm, největší množství zrn má velikost 0,4 mm. [3][4]

### 3.1.2 Tvrzené skleněné tkaniny

Sklo je známo již několik staletí a vyrábí se v mnoha modifikacích pro různé druhy použití. V elektrotechnice to je jeden z nejvýznamnějších představitelů amorfních anorganických dielektrik. Sklo je beztvářá hmota, která vznikla přetavením a rychlým zchladnutím taveniny, tu tvoří zejména oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ), dodávaný ve formě křemičitého písku. Jednotlivé součásti neměly čas vykristalizovat a proto je uspořádání ve větší části prostoru chaotické. Určitou uspořádanou strukturu tvoří v případě křemičitého skla kyslíkokřemičité tetraedry  $\text{SiO}_4$ . Při výrobě skel se přidávají do oxidu křemičitého další látky, tím modifikuje požadované vlastnosti skla jako teplotu tavení, pevnost, křehkost, barevnost, ale i vlastnosti elektrické. Hodnota elektrické pevnosti čistého skla je 200 až  $500 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ . V praxi je tato hodnota odlišná, přibližně  $40 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ .

Podle způsobu použití dělíme skla na:

- nízkoztrátová
- zátavová
- obyčejná alkalická
- skleněná vlákna
- skleněné pájky

Sklo se používá v mnoha odvětvích elektrotechniky, uplatnění nachází v oblasti izolační, konstrukční, pro vn techniku (borosilikátové sklo) a pro výrobu skleněných vláken (hlinitoborokřemičité sklo).

V elektrotechnické izolaci se sklo používá většinou ve formě skleněného vlákna, které je určeno k dalšímu zpracování. U transformátorů se používá tvrzená skleněná tkanina. Jedná se o kompozit, kde je nosným materiálem skleněná tkanina. Mají výborné mechanické i elektrické vlastnosti. Můžeme je používat i ve zhoršených klimatických podmínkách. Permittivita je 4 až 5, ztrátový činitel  $\text{tg } \delta = 0,05$ , elektrická pevnost 10 až  $15 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , izolační odpor po 24 hodinách ve vodě  $5 \cdot 10^8 \Omega$ . Zaleží na druhu použitého pojiva, tím může být epoxidová pryskyřice, polyestery, silikonová pryskyřice (tento druh má mnohem lepší elektrické vlastnosti stejně jako materiály s polyimidy/bissmaleinimidy). [3][5][6]

### 3.1.3 Polyimidy (PI)

Polyimidy zaujímají špičkové postavení v produkci vysoce tepelně odolných plastů (reaktoplastů). Mají vynikající tepelnou stabilitu, velmi dobré mechanické, elektrické a chemické vlastnosti. Netají, k určitému slinování dochází při 800°C. Při této teplotě lze za vysokého tlaku připravit z prášku výlisky. Polyimidy mohou trvale odolávat teplotě kolem 260°C, proto umožňují pracovat strojům i za těchto vysokých teplot. I za těchto vysokých teplot si udržují své výborné elektroizolační vlastnosti, pravděpodobně nejlepší ze všech organických materiálů. Krátkodobě dokáží pracovat při teplotě blízké se 500°C a naopak jsou odolné i teplotám pod bodem mrazu (-190°C). Jsou mimořádně odolné proti povětrnostním vlivům, proti záření  $\beta$  a  $\gamma$ . Jejich další vlastností je samozhášlivost a v ohni pouze koksovatějí, ale netají, odolávají organickým rozpouštědlům. Permittivita lineárního PI je 3,5, ztrátový činitel  $\text{tg } \delta = 20 \cdot 10^{-4}$  a elektrická pevnost je  $56 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ .

Důležitým produktem při výrobě zalévaných transformátorů systémem VPI je polyimidová fólie např. *Kapton H* (použitelná v rozmezí od -260°C do 370°C) nebo *Kapton F* (teplem svařovatelná) obě od amerického výrobce Du Pont. [6][7]

### 3.1.4 Polyamid (PA)

Polyamidy jsou látky polární, mají chemické a fyzikální vlastnosti závislé na chemickém složení, struktuře, molekulové hmotnosti a podílu krystalické fáze. Typické polyamidy jsou v tuhém stavu z 30 až 50 % krystalické a neprůhledné. Za sucha mají vynikající mechanické vlastnosti (pevné, pružné, houževnaté) a velmi dobré vlastnosti elektroizolační. Obecně však nelze přesně stanovit jejich určité vlastnosti, protože se dá vyrobit velmi mnoho typů polyamidů s extrémně odlišnými vlastnostmi.

U zalévaných transformátorů se používá materiál zvaný *Nomex*. Ten patří mezi lineární aromatické polyamidy (polyarylamidy), přesnější druh těchto polyarylamidů je poly(m-fenylenisofthalamid). Jedná se o materiál, který netaje, teprve nad 370°C se začne rychle rozkládat. Nelze proto zpracovávat vstřikováním nebo vytlačováním, ale pouze lisováním. Je trvale odolný teplotám v rozmezí 200 až 250°C. Vlákna slouží jako tepelně a hydrolyticky odolný filtrační materiál, pro nehořlavé oděvy a zejména pro výrobu speciálního elektroizolačního papíru. Ten se používá pro izolace při teplotách 180 °C a vyšších. V této



formě papíru je použitelný po 40 h při 300 °C, 1400 h při 250 °C a 10 000 h při 180 °C. V USA ho vyrábí firma DuPont (označení Nomex) a v Japonsku firma Teijin (označení Conex). [6][7]

## 3.2 Pro zalití vinutí

### 3.2.1 Epoxidové pryskyřice

Pod pojmem epoxidové pryskyřice rozumíme monomery obsahující více než jednu epoxidovou (oxiranovou) skupinu. Tato skupina má dvojnásobnou kyslíkovou vazbu se dvěma uhlíkovými zbytky. Epoxidové nebo někdy uváděné jako glycidylové pryskyřice jsou kondenzáty, kde jsou hlavními funkčními složkami etylénoxidové - epoxyetanové - etoxylinové skupiny. Příprava těchto pryskyřic probíhá nepřímo kondenzací dianu (dioxydifenylpropanu) s epichlorhydrinem nebo dichlorhydrinem v alkalickém prostředí. Po proběhnutí kondenzace dochází k odstranění hlavního podílu soli a následně odebírá azeotropní destilací voda. Nakonec se odfiltruje zbytek soli a za pomoci vakuové destilace se odstraní zbytky rozpouštědla. Dian lze při přípravě pryskyřic nahradit jinými hmotami se dvěma fenolickými hydroxyly, např. rezorcinem nebo hydrochinonem. Takto vzniklá pryskyřice má speciální vlastnosti a větší tepelnou odolnost. V dnešní době se vyrábí 85 - 90 % epoxidových pryskyřic na bázi dianu. Další vyráběné druhy jsou např.:

- epoxidy na bázi novolaků,
- glycidylethery alkoholů,
- cykloalifatické epoxidy,
- epoxidy obsahující dusíkaté sloučeniny.

Epoxidy našly díky dobrým mechanickým a elektroizolačním vlastnostem uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích. Velký rozmach v jejich produkci nastal především po 2. světové válce. V té době průmysl vyžadoval vývoj nových a modernějších technologických směrů.

Mají velmi dobré elektroizolační a chemické vlastnosti v širokém rozmezí teplot, značnou odolnost vůči vodě, roztokům alkálií a kyselin a některým rozpouštědlům. Při vytvrzování nedochází k odštěpování vedlejších produktů a dochází jen k malému smrštění. Vytvrzené produkty se výborně dokáží přilnout ke kovům, keramice, sklu, dřevu aj.

Výrobou epoxidových pryskyřic se v České republice zabývá společnost Spolchemie, a.s., sídlící v Ústí nad Labem. Mimo jiné je tato firma jedním z největších dodavatelů epoxidů ve střední Evropě.

Při vytvrzovacím ději dochází k chemickým reakcím, pomocí kterých se přetváří rozpustné nízkomolekulární epoxidové monomery na nerozpustné netavitelné a mechanicky pevné makromolekulární polymery. Procesem vytvrzování dostává vzniklá látka úplně jiné vlastnosti než látka výchozí. Bez nových vlastností jako je např.: tepelná odolnost, rozměrová stálost nebo mechanická pevnost, by nebylo vůbec možné epoxidy použít.

Aby došlo k vytvrzení, je potřeba přítomnost látky (tzv. tvrdidla), která má schopnost reagovat s epoxidovými skupinami uvnitř molekul. Tvrdidlo také ovlivňuje koncové vlastnosti, proto je nejdůležitější správný poměr pryskyřice a přidaného tvrdidla, aby se docílilo požadovaných vlastností. Reálným poměrem může být např.: 9 hmotnostních dílů tvrdidla na 100 hmotnostních dílů pryskyřice. Existuje mnoho tvrdidel, využívají se např.: aminy, anhydridy, polysulfidy a další.

Okolní teplota přímo ovlivňuje dobu vytvrzování. Při "pokojové" teplotě může být doba vytvrzování dlouhá v řádech desítek hodin i několik dní. Takto dlouhý časový úsek není vždy žádoucí, a proto se proces vytvrzování většinou provádí za zvýšených teplot a tím dochází k urychlení celého děje. Teplotní rozsah 100 až 200 °C po dobu několika hodin. Je-li třeba s odlítkem dále pracovat a tvarovat ho, tak se využívá dvoufázového postupu, kdy se v první fázi nenechá vzorek úplně dotvrdit a je s ním možno dále pracovat a k úplnému dotvrzení dojde až v druhé fázi. Pryskyřice tvrzená za studena nedosahuje elektrických vlastností pryskyřice tvrzené za tepla. [7][11][12][14][15][16][17]

### 3.2.2 Silikonové pryskyřice

Silikonové pryskyřice jsou vysokomolekulární sloučeniny, u kterých se řetězec skládá z pravidelného střídání křemíku a kyslíku. Mají vysokou teplotní odolnost, výborné elektroizolační vlastnosti, které se jen málo mění s rostoucí teplotou. Jsou odolné vůči vlhkosti, vodě a agresivním chemickým prostředím. U zalévaných transformátorů se používají pro zvláštní případy, například pro umístění transformátoru na loď nebo ve vojenství. Trvale odolávají teplotám od 180 do 200 °C, krátkodobě snesou až 300 °C. Při vyšších teplotách křehnou. Zalévání transformátorů silikonovými pryskyřicemi se provádí metodou VPI, pro kterou se v tomto případě používá označení VPE. Nevýhodou je vyšší cena. [5][7][33]

## 4 Diagnostika

Diagnostika je nepostradatelný obor, díky kterému dostáváme velmi důležité informace o stavu sledovaného objektu a můžeme tak předejít např. předčasnému zničení stroje nebo jeho částečnému rozbití a ušetřit tak finance, které by musely být vynaloženy na jeho opravu. Diagnostika se rozděluje dle doby a způsobu provedení. Jako první bych uvedl rozdělení na výrobní a provozní. Výrobní zkoušky, které výrobce provádí, se rozdělují na zkoušky typové, kusové a zvláštní. Toto rozdělení je použito i v příslušných normách a u každé zkoušky je napsáno o jaký typ se jedná. Daná norma samozřejmě určuje rozsah a typ zkoušek, které se musí nebo by se mohli použít. Suchými zalévanými transformátory se zabývá norma ČSN EN 60076 - 11 [20].

- Typová zkouška se vždy provádí na novém typu transformátoru, nebo na již stávajícím zařízení, pokud byla provedena změna jeho konstrukce nebo funkce.
- Kusová zkouška se provádí na každém vyrobeném transformátoru.
- Zvláštní zkoušky se obvykle provádějí na přání zákazníka nebo za daných podmínek, kde jsou tyto zkoušky vyžadovány. Při samotné výrobě nebo změně transformátoru nemusí být vždy provedeny.

Dalším rozdělení diagnostiky je podle toho kdy daný transformátor zkoumáme, zda-li je transformátor bezpečně odpojený od sítě nebo za jeho provozu. Jedná se tedy o metody:

- offline diagnostiky,
- online diagnostiky.

Podrobnější rozdělení jednotlivých zkoušek zalévaných transformátorů naleznete v příloze P.1. [20][23]

### 4.1 Zkoušky zalévaných transformátorů

#### 4.1.1 Činný odpor vinutí

Před zahájením samotného měření musí být transformátor bezpečně odpojen od sítě a měl by mít přibližně teplotu jako má okolní vzduch. Suché transformátory by měly být odstaveny přibližně tři hodiny. Činný odpor se měří jak na vstupní, tak výstupní straně pro všechna vinutí, včetně odboček postupně nastavených do všech poloh. Velikost měřícího proudu by

neměla přesáhnout 0,2 násobek jmenovité hodnoty proudu vinutí, doporučuje se volit hodnota alespoň:

$$I = 2\sqrt{2}I_0 \text{ [A]}, \quad (4.1)$$

kde  $I_0$  je hodnota proudu naprázdno.

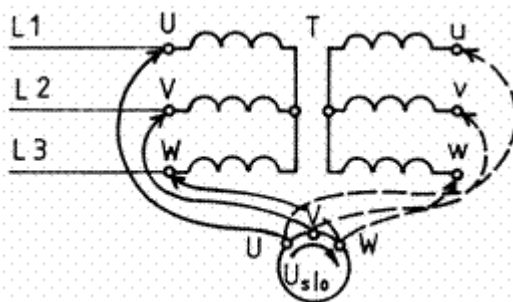
Měření odporu vinutí provádíme, pokud je to možné, pro každou fázi zvlášť. Při měření odporu na jednom vinutí musí být ostatní vinutí rozpojena. Je-li trvalé zapojení stroje do hvězdy či trojúhelníka, proměří se vždy odpor mezi dvojicemi svorek vinutí ( $R_{UV}$ ,  $R_{UW}$ ,  $R_{VW}$ ) a poté se dopočtou hodnoty jednotlivých vinutí. Když se hodnoty odporu mezi dvojicemi svorek přibližně rovnají, můžeme výsledný odpor jedné fáze  $R_f$  vypočítat podle vztahu: [21][23]

$$R_f = \frac{1}{6} \cdot (R_{UV} + R_{UW} + R_{VW}) \text{ [\Omega]}. \quad (4.2)$$

#### 4.1.2 Kontrola sledu fází

Ve všech místech sítě je požadován správný sled fází a je také jednou z nezbytných podmínek pro paralelní chod transformátorů. Jedním ze způsobů jak určit správný sled fází je např. použití ukazatele sledu fází. Sled je možné změnit necyklickou záměnou svorek, to jest prohozením dvou svorek a ponechání třetí. Při cyklické změně zůstává sled stejný.

Ukazatel sledu fází ( $U_{slo}$ ) nejprve připojíme na stranu vyššího napětí a pokud se rotor otáčí ve směru šipky, je vše v pořádku, pokud ne je třeba prohodit dva přívodní vodiče *Obr. 4.1.2*. Následuje připojení na stranu nižšího napětí, otáčí-li se ukazatel ve špatném směru, tak jsou chybně označené svorky a je potřeba je přeznačit. [21][23]

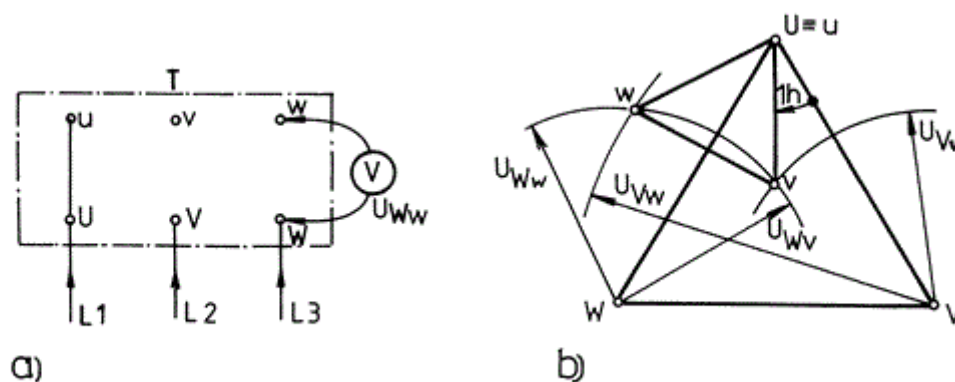


*Obr. 4.1.2 Zapojení pro kontrolu sledu fází (převzato z [29])*

### 4.1.3 Fáze natočení - hodinový úhel

Fázový posuv vektorů výstupních proudů a napětí oproti vstupním se udává tzv. hodinovým úhlem (1 hodina = 30°). Jde o důležitou hodnotu, která je udávána na štítku transformátoru, pro paralelní chod transformátorů. Normou je dovoleno 26 možných spojení např. Yy, Dy, Yd. Velké písmeno vyjadřuje spojení vinutí vyššího napětí, malé písmeno spojení vinutí nižšího napětí. Dále je za tyto symboly přidávána číselná hodnota, ta udává fázový úhel měřený od fáze vyššího napětí ke stejné fázi nižšího např. Yd 5, kde Y je spojení do trojúhelníka, *d* je zapojení do hvězdy a hodinový úhel 5 h čili 150°.

Způsob určení hodinového úhlu spočívá v naměření hodnot napětí mezi svorkami a následným grafickým vynesemím *Obr 4.1.3.a*). Naměření hodnot napětí provádíme tak, že spojíme dvě svorky stejné fáze na straně vyššího a nižšího napětí např. U-u *Obr 4.1.3.a*). Stranu vyššího napětí napájíme sníženým souměrným trojfázovým napětím. Následně naměříme voltmetrem jednotlivá napětí  $U_{UV}$ ,  $U_{UW}$ ,  $U_{VW}$ ,  $U_{Vv}$ ,  $U_{Wv}$ ,  $U_{Vw}$ ,  $U_{uv}$ ,  $U_{uw}$ ,  $U_{Ww}$  a  $U_{vw}$ . Sestrojíme graficky trojúhelník o vrcholech U, V, W pomocí naměřených napětí  $U_{UV}$ ,  $U_{UW}$ ,  $U_{VW}$ . Volíme vhodné měřítko a označení vrcholů je v pravotočivém smyslu. Poté sestrojíme druhý trojúhelník, kde se potenciál *U* přibližně rovná *u*, proto je vrchol totožný. Sestrojení provedeme za pomoci napětí  $U_{Vv}$ ,  $U_{Wv}$ ,  $U_{Vw}$  a  $U_{Ww}$ . Pokud jsme zachovali správný sled fází, tak určíme hodinový úhel, ten svírají úsečky UV a *uv*. Měříme od úsečky svorek vyššího napětí (analogicky VW a *vw*, WU a *wu*) *Obr 4.1.3.b*). [21][23]



Obr. 4.1.3 Zjišťování hodinového úhlu (převzato z [29])

#### 4.1.4 Převod, napětí naprázdno, ztráty naprázdno

Transformátor má ve stavu naprázdno sekundární proud  $I_2 = 0$ . I přesto protéká primárním vinutím tzv. magnetizační proud  $I_{I0}$ , tento proud je potřebný pro vybuzení magnetického pole v magnetickém obvodu transformátoru při jmenovitém napětí  $U_{IN}$ .

Měření transformátoru naprázdno se provádí na straně nižšího napětí při jmenovitém napětí a frekvenci, pokud není normami stanoveno jinak. Na primární vinutí je připojeno harmonické napětí  $U_1$  a vinutí protéká proud  $I_1$ . Měřením zjišťujeme proud naprázdno  $I_0$ , ztráty naprázdno  $\Delta P_0$  a účinník  $\cos \varphi_0$ .

Jako ztráty naprázdno  $\Delta P_0$  lze označit příkon transformátoru zapojeného naprázdno. Velikost těchto ztrát bývá obvykle 0,3 až 1 % jmenovitého zdánlivého výkonu  $S_N$ . Hodnoty ztrát se liší podle velikosti transformátoru, pro menší transformátory bývají ztráty větší a naopak. Ztráty naprázdno se skládají z několika složek, jsou to ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$ , ztráty v činném odporu napájeného vinutí  $\Delta P_{j0}$  (Joulovy ztráty) a přídavné ztráty  $\Delta P_d$  ve vodičích, stahovací konstrukci a dielektriku. Za ztráty naprázdno lze považovat pouze ztráty v železe  $\Delta P_{FE}$ . Pro přesnější hodnotu je možno při výpočtu odečíst od údaje z wattmetru ztráty vzniklé v měřících přístrojích:

$$\Delta P_0 = P - P_W, \quad (4.3)$$

kde  $\Delta P_0$  - jsou ztráty naprázdno [W],  $P$  - jsou ztráty zjištěné z údajů wattmetru [W],  $P_W$  - je výkon spotřebovaný měřícími přístroji [W].

Jako další hodnota se měří proud naprázdno. Jeho velikost obvykle bývá 1,5 až 10 %  $I_N$ , kde  $I_N$  je jmenovitý proud. Opět je pro menší transformátory hodnota  $I_N$  větší a naopak. Proud  $I_0$  se skládá ze dvou složek. Z magnetizačního proudu  $I_\mu$  (jalová složka) a z činné složky  $I_{Fe}$ ,  $I_{Fe}$  je přibližně 10 %  $I_\mu$ . Účinník transformátoru naprázdno  $\cos \varphi_0$  bývá malý, přibližně 0,05 až 0,3. Vzorec pro jeho výpočet:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_1}{S_1}, \quad (4.4)$$

$$\text{kde} \quad P_1 = P_{1U} + P_{1V} + P_{1W} [\text{W}] \quad (4.5)$$

$$a \quad S_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \text{ [VA]}. \quad (4.6)$$

Převod napětí  $p$  je definován jako poměr strany vyššího  $U_{10}$  napětí ku straně nižšího napětí  $U_{20}$ , tedy:

$$p = \frac{U_{10}}{U_{20}}[-], \quad (4.7)$$

$$\text{kde} \quad U_{10} = \frac{1}{3} \cdot (U_{UV0} + U_{UW0} + U_{VW0}) \text{ [V]}. \quad (4.8)$$

Při měření se pomocí regulačního transformátoru přivede na měřený transformátor napájecí napětí do výše 120 %  $U_{IN}$ . Poté začneme napětí pomalu snižovat po přibližně 10% a při každé změně změříme příslušné proudy a výkony. Zároveň odečítáme hodnotu napětí  $U_{20}$ , abychom mohli vypočítat převod transformátoru  $p_U$ . Naměřené hodnoty zpracujeme pomocí výše uvedených vztahů. [21][23]

#### 4.1.5 Ztráty nakrátko a napětí nakrátko

Transformátor má ve stavu nakrátko zkratované sekundární svorky a do primárního vinutí je přiváděn proud obvykle harmonického průběhu.

Měření transformátoru nakrátko se vždy provádí na straně vinutí vyššího napětí, na které je přiveden proud o harmonickém průběhu. Velikost napájecího proudu volíme tak, aby byla dosažena jmenovitá hodnota proudu ve zkratovaném nebo napájecím vinutí (rozhoduje nižší hodnota).

Ztráty nakrátko  $\Delta P_k$  se skládají především z dominantních Jouleových ztrát  $\Delta P_j$  v činných odporech vinutí, zanedbatelných ztrát v železe  $\Delta P_{Fe}$ , tzv. přídavných ztrát  $\Delta P_d$  a také ztrát vířivými proudy ve vinutí transformátoru. Hodnota ztrát se přepočítává na provozní teplotu vinutí, ta činí 75 °C pro izolaci třídy A, E a B nebo 115 °C pro třídy F a H. Ztráty nakrátko bývají 1,5 až 3,5 krát větší než ztráty naprázdno. Podle velikosti transformátoru činí přídavné ztráty 5 až 40 % ztrát nakrátko.

Pokud nebyla teplota měřeného vinutí 75 °C, tak je potřeba hodnotu ztrát nakrátko přepočítat na provozní teplotu 75 °C podle vzorce:

$$\Delta P_{K75} = \frac{235+75}{235+\vartheta_K} \cdot \Delta P_K, \quad (4.9)$$

kde  $\vartheta_K$  je střední teplota vinutí při měření nakrátko (pokud ji neměříme, bereme  $\vartheta_K = 20$  °C) [°C].

Další měřený údaj je napětí nakrátko, to ovlivňuje zkratové poměry a výpočtem se určuje úbytek napětí transformátoru. Jeho hodnota se udává v procentech jmenovitého napětí, obvykle se pohybuje v rozmezí 3 až 12 %  $U_N$  a značí se  $u_k$ . Je to taková hodnota napětí, kterou naměříme na vstupních svorkách transformátoru nakrátko při průchodu jmenovitého proudu o jmenovité frekvenci.

Vztah pro napětí nakrátko:

$$u_k = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} \cdot 100 [\%], \quad (4.10)$$

kde 
$$U_{1K} = \frac{1}{3} (U_{UVK} + U_{VWK} + U_{UWK}) [\text{V}]. \quad (4.11)$$

Stejně jako u měření naprázdno lze určit účinník transformátoru nakrátko  $\cos \varphi_K$  pro příslušné napětí jako poměr činného a zdánlivého výkonu. Účinník nakrátko bývá obvykle 0,3 až 0,7 krát větší než účinník naprázdno.

Samotné měření provádíme za pomoci regulačního transformátoru, kdy na měřený transformátor přivádíme napájecí napětí ( $U_{IN} = 0$  V) a pomalu zvyšujeme až do okamžiku, kdy začne primárním vinutím protékat proud o velikosti 120 %  $I_{IN}$ . Tento proud začneme snižovat po cca 10 % až k nule a vždy po snížení změříme příslušné napětí a výkony. Musíme dát pozor na přehřátí vinutí, proto musí měření probíhat rychle. [21][23]

#### 4.1.6 Nulová složka reaktance

Měření se provádí na zcela smontovaných transformátorech při jmenovité frekvenci mezi propojenými fázovými svorkami vinutí spojeného do hvězdy nebo lomené hvězdy a její vyvedenou svorkou uzlu. U vinutí s odbočkami se provádí měření na jmenovité odbočce. Výsledná nulová složka impedance se určí ze vztahu:



$$Z_0 = 3 \cdot \frac{U}{I}, \quad (4.12)$$

kde  $Z_0$  - je reaktance nulové složky [ $\Omega$ ],  $U$  - je zkušební napětí [V],  $I$  - je zkušební proud [A].

Programem zkoušek se určí odpovídající velikost a délka trvání zkušebního proudu. Během zkoušení nesmí proud překročit maximální hodnotu nulového bodu. Aby se zamezilo nadměrnému ohřevu kovových částí transformátoru, tak nesmí být trvání průchodu proudu příliš dlouhé. [23]

#### 4.1.7 Oteplovací zkoušky

Při zkouškách provádíme oteplení transformátoru na ustálený stav jeho zatěžováním, měříme oteplení jednotlivých částí, ve kterých dochází ke ztrátám činné energie. Při zkouškách by neměl být transformátor vystaven vnějším vlivům, jako jsou tepelná záření, atmosférické srážky nebo jiným vlivům. Teplota okolí by se měla během měření pohybovat v rozmezí 10 - 35 °C. Zkouška slouží k ověření, zda oteplení jednotlivých částí odpovídá předpisům pro oteplení. Zkoušky se provádí na kompletně smontovaných transformátorech. Není potřeba montovat části, které nemají vliv na tepelný chod transformátoru.

Snímání teploty okolí musí být bráno jako průměrná hodnota z nejméně tří čidel rozmístěných rovnoměrně kolem transformátoru. Čidla by měla být umístěna přibližně 0,91 - 1,83 m od transformátoru a neměla by být vystavena vnějším vlivům jako např. průvanu.

Nejprve se měří odpor za studena na všech vinutích transformátoru. Před tímto měřením musejí být dodržena určitá pravidla, teplota povrchu transformátoru se nesmí lišit o více než 2 °C od okolní teploty, okolní teplota se během 3 hodin nesmí změnit o více než 3 °C, transformátor nesměl být 24 h před počátkem měření ochlazován (např. prouděním vzduchu) a napětí nebo proud nesmělo být na transformátor připojeno nejméně 24 h před začátkem měření.

Poté se měří odpor po oteplení transformátoru. Ten zatížíme zkušebním napětím a proudem a dochází k oteplování transformátoru. Jakmile se povrchová teplota zvedne nad okolní, ale ne o více jak 2 °C, tak se transformátor odpojí. Při měření by měla být použita stejná čidla jako v prvním případě. Po odpojení transformátoru je potřeba změřit odpor co nejdříve (do cca 6 minut). Pokud provedeme více měření od sebe časově odstupňovaných, tak lze sestavit ochlazovací křivku.

Střední teplota vinutí se vypočte na základě měření odporu vinutí na konci zkoušek podle následujících vzorců:

$$\text{pro měď} \quad \vartheta_w = \frac{R_2}{R_1} \cdot (235 + \vartheta_{w1}) - 235, \quad (4.13)$$

$$\text{pro hliník} \quad \vartheta_w = \frac{R_2}{R_1} \cdot (225 + \vartheta_{w1}) - 225, \quad (4.14)$$

kde  $\vartheta_w$  - je střední teplota vinutí [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $R_1$  - je odpor vinutí při teplotě  $\vartheta_{w1}$  [ $\Omega$ ],  $R_2$  - je odpor vinutí při teplotě  $\vartheta_w$  [ $\Omega$ ],  $\vartheta_{w1}$  - je teplota při odečtu hodnoty odporu  $R_1$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]. [20][23][24]

#### 4.1.8 Izolační stav transformátoru

##### 4.1.8.1 Měření izolačního odporu, určení polarizačního indexu a časové konstanty transformátoru

Velikost izolačního odporu ovlivňuje vlhkost a vodivé nečistoty v izolaci. Izolační odpor tak citlivě reaguje na nejslabší místo izolačního systému. Za jeho absolutní hodnotu bereme velikost odporu  $R_{i60}$ , ten se odečítá 60 sekund po přiložení stejnosměrného měřicího napětí o velikosti  $U_{ss} = 2,5 \text{ kV}$ , které ovšem nesmí překročit jmenovité napětí stroje. Měření musí probíhat za normálních podmínek při teplotě stroje větší než  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkosti nepřesahující 90 % (nelze provádět za mlhy, deště a sněžení). Před samotným měřením se stroj musí odpojit od rozvodné soustavy a teplota všech částí stroje se musí ustálit. Pro odstranění zbytkového náboje se vinutí propojí nakrátko a minimálně na pět minut spojí s kostrou stroje. Vinutí musí být spojeno buď s měřicím napětím nebo s kostrou stroje. Měří se izolační odpor všech vinutí s připojenou či uzemněnou nádobou. Změna hodnot izolačního odporu by neměla přesáhnout změnu 40 % oproti novému stroji či předchozímu měření.

Dále se po připojení měřicího napětí měří absorpční proudy  $i_{15}$  a  $i_{60}$ . Z jejich poměru se určí minutový polarizační index, ten by u dobré izolace neměl být menší než 1,3. Vztah pro určení polarizačního indexu  $p_{i1}$ :

$$p_{i1} = \frac{i_{15}}{i_{60}} [-], \quad (4.15)$$

kde  $i_{15}$  - je absorpční proud odečtený 15s po přiložení napětí [A],  $i_{60}$  - je absorpční proud odečtený 60s po přiložení napětí [A].

Jako další veličina vypovídající o stavu izolačního systému je časová konstanta  $\tau$ . Hodnota této veličiny je dána součinem izolačního odporu a kapacity stroje (je dána výpočtem při konstrukci vinutí nebo určíme výpočtem):

$$\tau = R_{iZ60} \cdot C_{50} \text{ [s]}, \quad (4.16)$$

kde  $R_{iZ60}$  - je izolační odpor určený v čase 60s po přiložení měřícího napětí [ $\Omega$ ],  $C_{50}$  - je kapacita izolace změřená při 50 Hz [F]. [23]

#### 4.1.8.2 Měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ a kapacity vinutí

Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  charakterizuje činné ztráty vzniklé polarizací v izolaci. Čím vyšší je hodnota ztrátového činitele, tím se izolace více zahřívá a rychleji stárne. Díky ztrátovému činiteli dostáváme informaci o celkovém stavu izolace a z jeho velikosti lze určit, zda je izolace navlhla nebo zestárla.

Měření se realizuje můstkovou metodou (i pro kapacitu vinutí), přiložením střídavého napětí o velikosti 10 kV, pokud je izolační systém konstruován na nižší napětí, tak volíme nižší zkušební napětí z řady 0,5 - 1 - 2 - 5 kV. Je-li to možné, měříme při ustálené teplotě 20 °C.

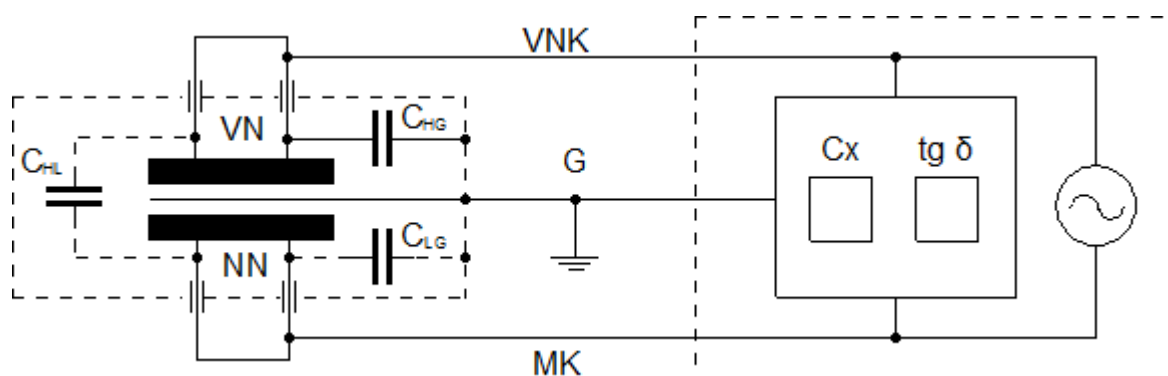
Měření kapacit a ztrátového činitele dvouvinutového stroje se provádí podle zapojení na Obr. 4.8.1.2. Stroj musí být uzemněn a zkušební vinutí je připojeno na zdánlivé zemi (G). Tím je snižuje kapacita mezi vinutí VN a NN ( $C_{HL}$ ). Kabel VNK se připojí k vinutí vyššího napětí a měřící kabel MK na vinutí nižšího napětí. Měří se ztrátový činitel, kapacita mezi vinutími ( $C_{HL}$ ), mezi vinutím vyššího napětí a uzemněnou částí (kapacita  $C_{HG}$ ), pak jejich paralelní kombinace. Následně se přehodí "polarita" měřícího napětí a měření se zopakuje. Nakonec se měření provede s připojeným VNK a propojenými vinutími. Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  a kapacita vinutí  $C$  se vypočítají dle těchto vzorců:

$$\text{tg } \delta = \frac{\text{tg } \delta_1 \cdot C_1 + \text{tg } \delta_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \text{ [-]}, \quad (4.17)$$

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2} [\text{F}], \quad (4.18)$$

kde  $C_1$ ,  $\text{tg } \delta_1$  - jsou hodnoty změřené při jedné "polaritě" zdroje,  $C_2$ ,  $\text{tg } \delta_2$  - jsou hodnoty změřené při opačné "polaritě" zdroje.

Hodnocení výsledných hodnot provádíme porovnáním aktuálně změřených hodnot s dřívějšími výsledky periodických kontrol. [23]



$C_{HL}$  - kapacita mezi VN a NN vinutím,  $C_{HG}$  - kapacita mezi VN vinutím a kostrou transformátoru,  $C_{LG}$  - kapacita mezi NN vinutím a kostrou transformátoru, G - kostra (zem) transformátoru, MK - měřící přívod můstku, VNK - vysokonapěťový přívod můstku,  $C_x$  - měřená kapacita

Obr. 4.8.1.2 Zapojení při měření ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  a kapacity vinutí [23]

#### 4.1.8.3 Poměr kapacit $C_2/C_{50}$

Poměr kapacit  $C_2/C_{50}$  udává hodnotu o míře navlhnutí izolace. Je to podíl kapacit měřený při frekvenci 2 Hz ( $C_2$ ) a 50 Hz ( $C_{50}$ ). Kapacita suché izolace je nezávislá na frekvenci, ale pokud navlhne, tak se kapacity začnou značně lišit. Se stoupající frekvencí se snižuje kapacita.

Měření se provádí pomocí přiloženého měřicího napětí o velikosti 100 V a nejprve se měří kapacita pro 50 Hz a následně pro 2 Hz. Měřicí přístroj se nejprve připojí na stranu VN a poté ke kostře spojené s NN. Nastavíme měření pro kapacitu  $C_{50}$  a vinutí VN necháme alespoň 1 minutu nabíjet, odečteme ustálenou hodnotu, propojíme s kostrou a necháme nejméně 1 minutu vybíjet. Nyní přepneme na kapacitu  $C_2 - C_{50}$  a opět necháme nejméně 1 minutu nabíjet, odečteme hodnotu, všechna vinutí spojíme s kostrou stroje a necháme 3 minuty vybíjet před měřením dalšího vinutí. To samé provedeme pro vinutí NN. Následujícím vztahem určíme poměr kapacit:

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1 [-]. \quad (4.19)$$

Vypočtený poměr se porovnává s mezními hodnotami uvedenými v *Tab. 4.1.8.3*, ty udávají nejvyšší dovolené hodnoty pro izolační systém transformátoru. Pokud se zjištěné hodnoty blíží vyšším hodnotám, je doporučeno provést aplikaci dalších metod a provést vyhodnocení. [23]

*Tab. 4.1.8.3 Mezní hodnoty poměru  $C_2/C_{50}$  [23]*

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

## 4.1.9 Napět'ové zkoušky vinutí

### 4.1.9.1 Zkouška přiloženým střídavým výdržným napětím

Ověřuje se elektrická pevnost izolace zkoušeného vinutí proti ostatním vinutím a uzemněným částem.

Zkouška se provádí na kompletně smontovaných transformátorech přiložením střídavým napětím s co možná dokonalým tvarem sinusové vlny a ne méně než 80 % jmenovitého kmitočtu. Zkouška se provádí na straně vyššího napětí. Hodnotou zkušebního napětí je vrcholová hodnota dělená  $\sqrt{2}$ . Na začátku zkoušky přiložíme napětí ne větší než třetina předepsané hodnoty a rychle zvyšujeme na požadovanou plnou hodnotu zkušebního napětí, které musí být přivedeno na dobu nejméně 60 s. Následně snížíme na méně než třetinu zkušebního napětí.

Zkouška je úspěšná tehdy, pokud nevznikne pokles zkušebního napětí na nulovou hodnotu. [22]

#### 4.1.9.2 Zkouška indukovaným výdržným napětím

##### Zkouška indukovaným napětím transformátoru s plnou izolací nulového bodu vinutí VN

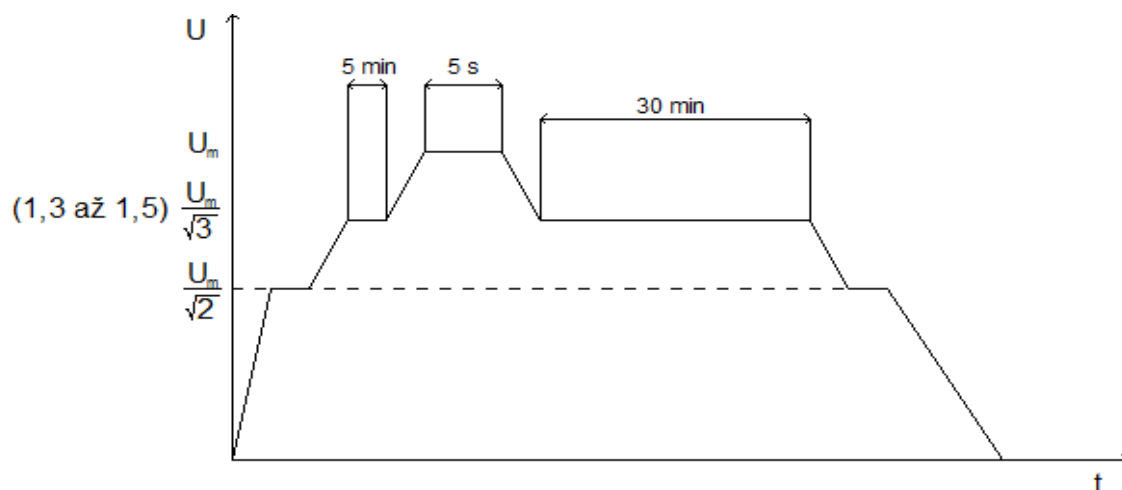
Zkoušku provádíme pro kontrolu elektrické pevnosti izolace podél zkoušeného vinutí, mezi fázemi proti uzemněné části a dalšími vinutími. Testujeme v provozním zapojení stroje přiložením zkušebního napětí rovného dvojnásobku jmenovitého napětí. Napětí mezi vývody nesmí překročit napětí dané normou. Zda-li má vinutí vývod nulového bodu, musí být uzemněn. [22][23]

##### Zkouška indukovaným napětím transformátoru s redukovanou izolací nulového bodu vinutí VN

Zkouškou se ověřujeme elektrickou pevnost izolace vývodů na vedení vůči uzemněným částem a dalším vinutím, mezi fázemi a podél zkoušeného vinutí. Měření fáze - zem by měla být provedena jmenovitým výdržným napětím a zkouška fáze - fáze s uzemněným středem jmenovitým výdržným napětím. Zkouška by měla být provedena dle normy. [22][23]

##### Zkouška dlouhodobým indukovaným napětím

Zkoušku provádíme při uzemněném nulovém bodu zkoušeného vinutí. Zbývající vinutí se v zapojení do trojúhelníka uzemní jeden z vývodů a v zapojení do hvězdy se uzemní v nulovém bodu. Během celé zkoušky se měří částečné výboje, určuje se hodnota zapalovacího a zhašecího napětí během zvyšování a snižování zkušebního napětí. Průběh zkoušky odpovídá následujícímu schématu *Obr. 4.1.9.2*. [23]



Obr. 4.1.9.2 Časový průběh zkušebního napětí při zkoušce dlouhodobým indukovaným napětím [23]

### Vyhodnocení zkoušek indukovaným napětím

Zkoušce vyhověl transformátor, u kterého nedošlo k useknutí nebo poklesu zkušebnímu indukovanému napětí o průmyslovém kmitočtu nebo nedošlo k nedovoleným poškozením. Amplituda zdánlivého náboje částečných výbojů nesmí překročit mezní hodnoty 300 pC nebo 500 pC v závislosti na zkušebním napětí. Překročí-li tyto hodnoty, ale velikost 3000 pC nepřekročí, je potřeba provést analýzu výsledků a vyhledat místo částečných výbojů. Poté se zkouška zopakuje. Nenalezneme-li místo částečných výbojů, je nutné přistoupit k prodloužené zkoušce dlouhodobým indukovaným napětím. Jestliže jsou hodnoty zdánlivého náboje vyšší než 3000 pC, je nutné zdroj výbojů odstranit. Při opakovaných zkouškách je možno snížit hodnotu zkušebnímu napětí na 75 % předepsaných zkušebních napětí. [23]

#### 4.1.9.3 Zkouška atmosférickým impulzem

Touto zkouškou zjišťujeme, zda je dostatečná elektrická pevnost mezi jednotlivými vinutími přiložením atmosférického impulsu na fázové svorky. Dále elektrická pevnost mezi vinutím a uzemněnými částmi transformátoru (kostrou, nádobou, apod.) za pomoci přímého nebo nepřímého měření. Také lze zkoušet elektrickou pevnost mezi závity, vrstvami a cívkami každého vinutí.

Pro jednotlivá jmenovitá napětí je normou daná velikost zkušebnímu napětí *Tab. 4.1.9.3*. Kvůli zabránění náhodným přeskokům je polarita zkušebnímu napětí záporná. Zkušební impuls má tvar vlny  $1,2 \mu\text{s} \pm 30 \% / 50\mu\text{s} \pm 20 \%$  a musí být dodrženo pořadí přiřkládání impulsů [20]. Zkouška může u suchých transformátorů vyvolat ve vzduchu kapacitní částečné výboje, které nemohou ohrozit izolaci. Pokud k tomu dojde, doporučuje se znovu transformátor přezkoušet výdržným a indukovaným výdržným napětím. [20][22][23]

Tab. 4.1.9.3 Izolační hladiny založené na evropské praxi [20]

Nejvyšší napětí pro zařízení $U_m$ (efektivní hodnota) [kV]	Jmenovité krátkodobé střídavé výdržné napětí síťového kmitočtu (efektivní hodnota) [kV]	Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulzu (vrcholová hodnota) [kV]	
		Sloupec 1	Sloupec 2
do 1,1	3	-	-
3,6	10	20	40
7,2	20	40	60
12,0	28	60	75
17,5	38	75	95
24,0	50	95	125
36,0	70	145	170

#### 4.1.10 Měření hladin částečných výbojů

Částečné výboje mohou vznikat v defektních místech transformátorů, které vznikají většinou nedokonalou výrobou nebo dlouhodobým používáním transformátoru. Měřením lze při jejich odhalení předejít následným poruchám. Musí se provádět na všech typech suchých transformátorů a to na vinutích majících  $U_m$  větší než 3,6 kV. Měření se provádí po ukončení všech ostatních dielektrických zkoušek. NN vinutí je dle typu transformátoru napájeno z jednofázového nebo trojfázového zdroje. Průběh napětí by se měl co nejvíce blížit sinusovému průběhu o kmitočtu přiměřeně vyšším než je jmenovitá hodnota.

Částečné výboje lze měřit různými metodami, takové základní rozdělení je na:

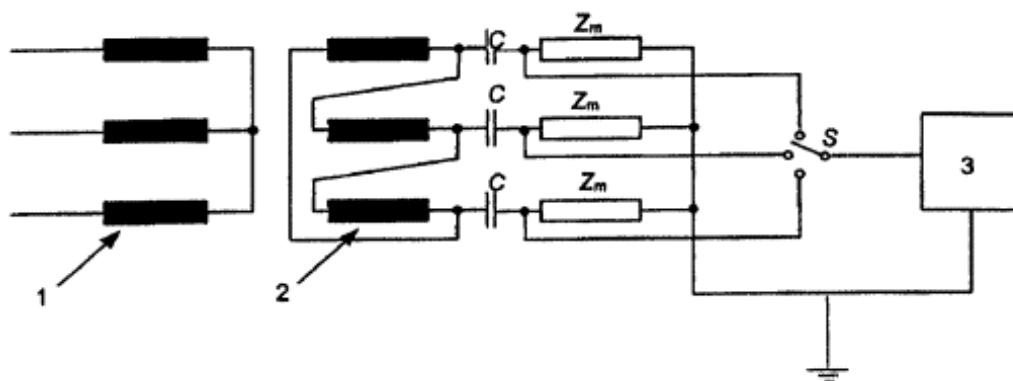
- elektrické metody,
- neelektrické metody.

Jako nejrozšířenější elektrickou metodu bych uvedl Galvanické měření částečných výbojů. Touto metodou se zkoumá celkový stav izolace. Metoda spočívá v přímém měření proudových impulzů částečných výbojů přes snímací impedanci, která může být zapojena paralelně nebo sériově. Impedance je tvořena RLC prvky s ochranou proti přehřátí. Tato metoda má dobrou vypovídací schopnost díky vysoké citlivosti, záporem této metody je citlivost na přítomný šum a rušivé vlivy. Lze ji použít i za chodu transformátoru (on-line diagnostika).



Důležitou a poměrně novou metodou pro zjištění a lokalizování částečných výbojů v suchých transformátorech je akustické snímání částečných výbojů, které je podrobně popsáno v [32]. Na povrchu zalitého vinutí jsou rozmístěny akustické senzory, od kterých vedou vlnovody do vyhodnocovacího zařízení. Akustické senzory zachytí zvuk (ultrazvuk), který vznikne při částečném výboji a ten se přenese do zařízení, které ho vyhodnotí, jelikož jsou od sebe senzory přesně rozmístěny a každý senzor zachytí zvuk v odlišném čase, tak lze poměrně přesně lokalizovat, kde je izolace oslabena. Tato metoda je velice odolná proti okolnímu rušení a lze ji provádět také on-line.

Měřením částečných se u nás přesně zabývají normy ČSN EN 60270 Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů a příloha A v ČSN EN 60076 - 3. [20][23][32]



1 - NN vinutí, 2 - VN vinutí do hvězdy nebo trojúhelníka, 3 - měřicí přístroj, S - spínač

Obr. 4.1.10 Základní měřicí obvod pro elektrické měření částečných výbojů pro trojfázový transformátor (převzato z [25])

#### 4.1.11 Detekce poruch vinutí

Metody diagnostiky většinou charakterizují stav izolačního systému, ale při detekování poruch vinutí se sledují např. blízké zkraty nebo blížící se mezizávitové zkraty, které mohou transformátor také vážně poškodit. V těchto případech vinutí nahrazujeme uspořádáním pasivních prvků s rozprostřenými parametry. Toto zapojení charakterizuje přesná přenosová funkce a případná její změna může signalizovat blížící se poruchu. Změnu lze vyhodnotit buď v časové, nebo frekvenční oblasti.

Podle způsobu vyhodnocení dělíme detekční metody na:

- metody referenčního impulzu,
- metody přenosové funkce,
- metody nízkonapěťových impulzů,

- metody využívající znalost reaktance vinutí,
- metody frekvenční charakteristiky.

V praxi je vhodné použít zejména metody nízkonapěťových impulzů a metody frekvenčních charakteristik. Na jejich popis se zaměřím v následujících odstavcích, zbylé metody jsou popsány v [23]. [23]

#### 4.1.11.1 Metoda nízkonapěťových impulzů

Tato metoda spočívá v porovnání odezvy na stejný impulz vyslaný před a po zkoušce. Impulz má amplitudu maximálně několik stovek voltů. Metodou, která se využívá při zkratových zkouškách transformátorů, se sleduje odolnost vůči dynamickým účinkům zkratových proudů. Transformátor je postupně vystaven několika různým zkratům s různou amplitudou a různou dobou trvání.

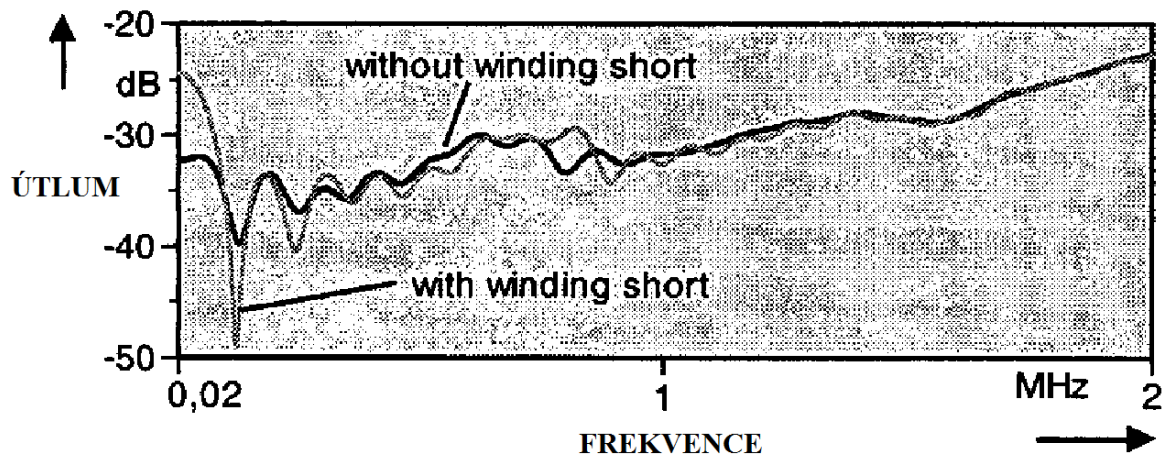
Zaznamenané průběhy jsou zbaveny rušení a upraveny pomocí digitálních filtrů. Dále jsou převedeny pomocí rychlé Fourierovi transformace (FFT) do frekvenční oblasti a dopočte se výsledná přenosová funkce, která může být interpretována jako závislost admitance nebo útlumu na frekvenci. [23]

#### 4.1.11.2 Metoda frekvenčních charakteristik (SFRA)

Pomocí této metody se zachycují poruchy vinutí transformátorů (např. mezizávitový zkrat atd.). Vychází se z toho, že každé vinutí si lze představit jako obvod s rozprostřenými parametry. To charakterizuje frekvenční charakteristika, tedy závislost útlumu na frekvenci. Frekvenční charakteristika se získává přímo měřením při napájení vinutí harmonickým napětím o proměnné frekvenci, v praxi se měří od 1kHz do 1MHz.

- Rozsah 1 1 kHz - 10 kHz
- Rozsah 2 10 kHz - 100 kHz
- Rozsah 3 100 kHz - 500 kHz
- Rozsah 4 500 kHz - 1 MHz

Pokud je vinutí narušeno, tak to zjistíme změnou průběhu frekvenční charakteristiky *Obr. 4.1.11*. Při měření se musí vzít v úvahu i přítomnost šumu a rušení, které mohou zkreslit výsledky.



Without winding short - bez zkratu, With winding short - se zkratem

Obr. 4.1.11 Znáznornění poruchy na vinutí při metodě SFRA [28]

Získané průběhy se vyhodnocují porovnáním s referenční charakteristikou změřenou na bezchybném vinutí např. po výrobě nebo na shodném transformátoru v bezvadném stavu. Porovnání se provádí pomocí počítačového programu, který rozdílnost vzniklou při porovnávání vyjadřuje jako tzv. koeficient  $K_{FCH}$ :

$$K_{FCH} = \int_{f_1}^{f_2} [y_1(f) - y_2(f)]^2 df, \quad (4.20)$$

kde  $f_1$  a  $f_2$  - je zvolený interval frekvence [Hz],  $y_1(f)$  a  $y_2(f)$  - jsou porovnávané závislosti.

Koeficient se může pohybovat v následujících hodnotách:

- $K_{FCH} < 1$  je stav sledovaného vinutí shodný s počátečním stavem (předchozím měřením),
- $K_{FCH} < 10$  pracuje stroj v normálním režimu, ale doporučuje se provádět měření při pravidelných revizích stroje,
- $10 < K_{FCH} < 20$  stroj pracuje normálně, ale je nutné provést při nejbližší příležitosti další měření pro kontrolu stavu stroje,
- $K_{FCH} > 20$  je při nejbližší příležitosti nutné provést prohlídku vinutí. [23][31]

#### 4.1.12 Měření hladiny hluku

Hluk v transformátorech je způsoben kombinací magnetostrikčních deformací jádra a elektromagnetických sil ve vinutí. Průchodem proudu vznikají vibrace a tím hluk. Tímto měřením se zjišťuje, zda transformátory splňují normy pro provoz například v nemocnicích, uzavřených prostorách apod. Samozřejmě záleží i na jejich umístění, zvýšení hladiny hluku může být způsobeno odrazy od tvrdých zdí, podlahy a stropu.

Měření se provádí kalibrovanými měřicími přístroji, které musejí být kalibrovány před a po měření a odchylka se nesmí lišit o více než 0,3 dB, pokud se liší, měření je prohlášeno za neplatné. Pro stanovení hladiny akustického výkonu je možno použít dvě metody. Buď měření akustického tlaku  $p$ , přičemž přepočteno na decibely - hladina akustického tlaku  $L_p$ :

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} [\text{dB}], \quad (4.21)$$

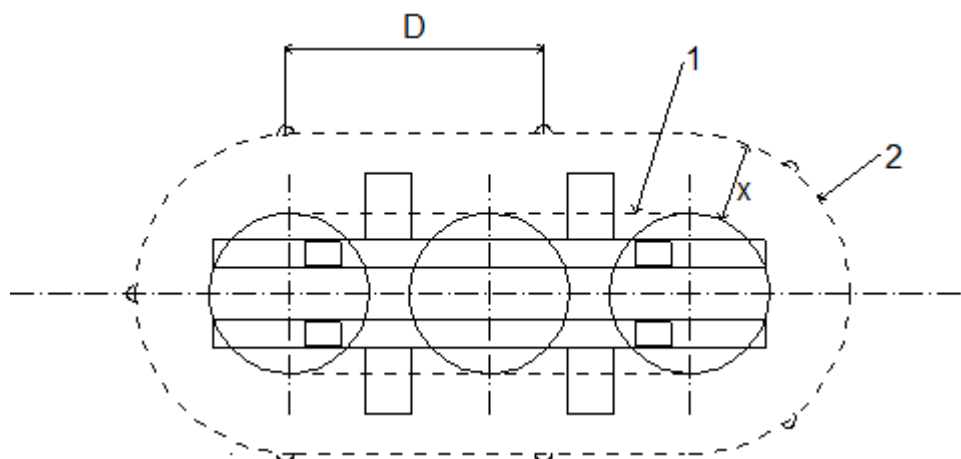
kde  $p$  - je hladina akustického tlaku [Pa],  $p_0$  - je referenční hodnota akustického tlaku ( $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa),

nebo měření akustické intenzity  $I$ , opět přepočteno na decibely - normálová hladina akustické intenzity  $L_w$ :

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{I_n}{I_0} [\text{dB}], \quad (4.22)$$

kde  $I_n$  - je normálová akustická intenzita, přesně složka akustické intenzity ve směru kolmém k měřicí ploše [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],  $I_0$  - je referenční akustická intenzita ( $I_0 = 1 \cdot 10^{-12}$   $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

Při měření bývá kolem (na elipse, kvůli stejné vzdálenosti od povrchu vyzařování Obr. 4.1.12) suchého transformátoru umístěno několik měřidel vzdálených od sebe ne více než 1 m a minimálně jich musí být 6. Při dalších výpočtech musíme brát v úvahu jejich počet. Pro uznání zkoušky se musí rozdíly pohybovat v daných hodnotách, které v určitých případech činí 3 dB a 8 dB. Touto zkouškou se zabývá samostatná norma [26]. [20][26]



1 - Základní vyznačující povrch, 2 - Měřicí linie, D - Vzdálenost mezi mikrofony,  
X - Měřicí vzdálenost

Obr. 4.1.12 Typická místa pro rozmístění měřících mikrofonů [26]

#### 4.1.13 Zkouška pro třídu prostředí

Zkouškou pro třídu prostředí stanovíme vhodnost použití transformátoru pro tyto tři definovaná prostředí:

- Třída E0: Transformátory mohou pracovat v čistém, suchém, vnitřním prostředí. Neobjevuje se žádná kondenzace a znečištění je zanedbatelné.
- Třída E1: Na transformátoru se může vyskytnout občasná kondenzace (např. po vypnutí). Je možné omezené znečištění.
- Třída E2: Silné znečištění nebo častá kondenzace, možná kombinace obou těchto činitelů.

Zkouška se provádí na kompletním transformátoru a vybaveném příslušenstvím, vše musí být nové a čisté bez dodatečného ošetření povrchu izolačních částí. Zkoušku třídy E1 provádíme ve zkušební komoře vybavené regulací vlhkosti a teploty. Relativní vlhkost musí být udržována na hranici 93 % za možné pomoci rozprašováním přiměřeného množství vody. Ta během zkoušky nesmí na transformátor kapat ze stropu. Při této vlhkosti musí být transformátor udržován alespoň 6 hodin před započítáním zkoušky. Následně musí být transformátor podroben zkoušce indukovaným napětím o velikosti 1,1 krát jmenovitá hodnota napětí. Při přiložení napětí nesmí dojít k přeskočení a vizuální kontrola nesmí prokázat vážné stopy po výbojích.

Transformátor třídy E2 musí být před zahájením zkoušky v suchém stavu. Musí být v odbuzeném stavu a udržován v klimatické komoře po dobu 144 hodin při teplotě  $50 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$

a relativní vlhkosti  $90 \pm 5 \%$ . Poté musí být nejméně po 3 hodinách v normálních podmínkách podroben zkouškám střídavým a indukovaným výdržným napětím o velikosti 80 % normalizovaných hodnot. Během těchto dielektrických zkoušek by nemělo dojít k průrazu ani přeskoku a po vizuální stránce nesmí být prokázány žádné vážné stopy po výbojích. Transformátory pro venkovní provoz by měli být opatřeny krytem nebo jinou vhodnou ochranou. [20]

#### 4.1.14 Klimatická zkouška

Pomocí této zkoušky stanovujeme vhodnost transformátoru pro jednotlivé klimatické třídy:

- Třída C1: Transformátor může být přepravován při teplotách nepřesahujících  $-25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a teplota okolí při provozování by neměla být nižší než  $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Třída C2: Transformátor je vhodný pro provoz, skladování a přepravu při okolních teplotách  $-25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Měření třídy C1 se provádí na kompletním transformátoru bez krytu, který je umístěn ve zkušební komoře. Teplota vzduchu nejprve klesá v průběhu 8 hodin na hodnotu  $-25 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a tato teplota musí být udržována nejméně 12 hodin. Následně se během 4 hodin zvýší na teplotu  $-5 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nyní se provede tepelný šok pomocí přiložení střídavého nebo stejnosměrného proudu o velikosti dvojnásobku jmenovitého proudu. Proud musí být udržován, dokud zkoušené vinutí nedosáhne střední hodnoty odpovídající průměrnému oteplení vinutí podle *Tab. 4.1.14* plus  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Přinejmenším 12 hodin po ukončení měření musí být zkoušený transformátor podroben zkoušce přiloženým a indukovaným napětím v souladu s izolační hladinou vinutí, ale napětí musí být sníženo na 80 % normalizovaných hodnot a u transformátorů s pevnou izolací také měření částečných výbojů (indukované napětí o velikosti 160 % jmenovité hodnoty). Dále provádíme vizuální kontrolu, zda není izolace poškozena viditelnými trhlinami nebo puklinami. Měření pro třídu C2 se provádí obdobně, jen se tepelný šok provádí rovnou při teplotě  $-25 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . [20]

Tab. 4.1.14 Teplotní třídy transformátorů [20]

Teplota izolačního systému [°C]	Střední oteplení vinutí při jmenovitém proudu (dle Oteplovacích zkoušek) [K]
105 (A)	60
120 (E)	75
130 (B)	80
155 (F)	100
180 (H)	125
200	135
220	150

#### 4.1.15 Zkouška hořlavosti

V případě požáru je nutno minimalizovat emisi toxických látek a neprůhledných kouřů. Proto se provádí zkouška hořlavosti, při které by měřicí přístroje měly být schopny detekovat přítomnost složek jako je chlorovodík (HCl), kyanid vodíku (HCN), bromid vodíku (HBr), fluorid vodíku (HF), oxid siřičitý (SO<sub>2</sub>) a formaldehyd (HCHO). Přijatelné meze těchto látek a podrobnosti zkoušek mohou být dohodnuty mezi zákazníkem a výrobcem, samozřejmě musí respektovat národní předpisy. Zalévané transformátory mají definované dvě třídy hořlavosti:

- Třída F0: Nejsou přijata žádná zvláštní omezení v hořlavosti, nicméně emise toxických látek a neprůhledných dýmů musejí být minimalizována.
- Třída F1: Požaduje se omezení hořlavosti, protože transformátory mohou být vystaveny nebezpečí ohně. Emise toxických látek a neprůhledných dýmů musejí být co nejvíce minimalizována.

Zkouška hořlavosti (F1) se provádí na kompletní fázi transformátoru obsahující VN i NN cívky, sloupek jádra a izolační komponenty. Zkouška se provádí ve zkušební komoře opatřené komínem a přívodem vzduchu. Dále je vybavena zdrojem tepla, hlavní zdroj je etylalkohol hořící v kontejneru a druhý zdroj je odporový ohříváč s výkonem 24 kW s dosažitelnou teplotou 750 °C. Měří se teploty: přívodního vzduchu, výstupního vzduchu, na povrchu NN a VN cívky, sloupku jádra, mezi jádrem a NN cívkou, mezi NN a VN cívkou. Teplota v komoře musí být před zahájením zkoušky mezi 15 až 30 °C. Měření začíná zapálením alkoholu a zapnutím vyhřívacího panelu, ten musí být po 40 minutách vypnut. Hodnoty se

zaznamenávají po celou dobu zkoušky, přinejmenším 60 minut. Výsledky zkoušek mohou být platné i pro transformátory se stejnými konstrukčními kritérii. [20]

## 4.2 On-line diagnostika

Díky on-line diagnostice transformátorů během provozu je možno průběžně sledovat jejich technický stav a plánovat tak jejich odstávky či včas odhalit nebo předejít možným poruchám, které by vedly k neplánovanému odstavení transformátoru a případným finančním ztrátám. Diagnostika za provozu transformátorů není vůbec jednoduchá, protože v okolí těchto zařízení se vyskytuje mnoho rušivých elementů. V následující kapitole jsou popsány některé metody on-line diagnostiky zalévaných transformátorů. [23]

### 4.2.1 Měření napětí a proudů

Jedná se o základní parametry transformátorů, a proto by se jejich sledování nemělo opomenout. Pomocí těchto hodnot dokážeme určit zatížení stroje, z proudů dokážeme odhadnout přibližnou hodnotu Joulových ztrát ve vinutí a tudíž velikost tepelného zatížení izolace transformátoru. Ke sledování těchto hodnot se používají měřicí transformátory, jejich umístění se volí podle druhu použité metody. Musíme také zvolit příslušný převod a vhodný převodník signálu s nejvýhodnějším komunikačním rozhraním. [23]

### 4.2.2 Měření teplot

Pokud je transformátor pravidelně vystavován teplotám nad navržené hranice, tak jeho izolační systém bude vykazovat tepelné stárnutí izolace a to může mít za následek zkrácení životnosti transformátoru. Platí obecná zásada tzv. Montsingerovo pravidlo, pokud je zvýšení trvalé provozní teploty o 8 až 10 °C, tak dochází ke snížení životnosti izolace na polovinu. K přehřátí dochází dlouhodobým nebo opakovaným přetěžováním, vysokou okolní teplotou, neúčinnou nebo zhoršenou ventilací. Proto je vhodné umístit do vinutí transformátorů teplotní čidla (např. platinové teplotní čidlo PT100 nebo termistor PTC). Při překročení teploty, jejíž limitní hodnota je předem nastavena, dochází k zalarmování obsluhy nebo odpojení



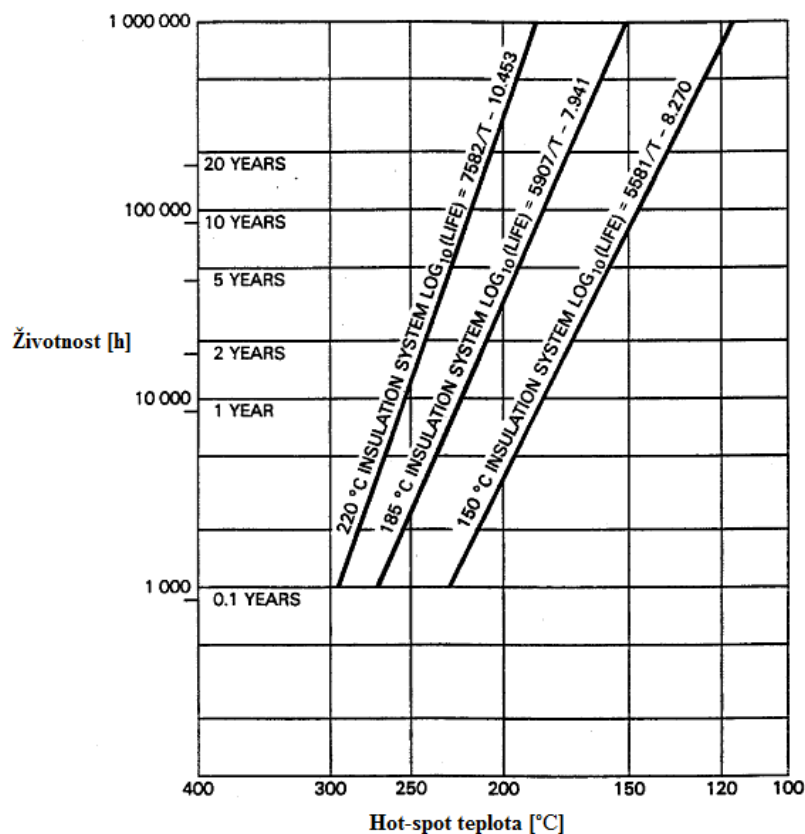
transformátoru. K přenosu informace mezi vysílačem a přijímačem se využívají optická vlákna, která jsou odolná proti okolnímu rušení.

Důležitým parametrem, při posuzování tepelného namáhání a životnosti transformátoru, je tzv. Hot-spot teplota. Jedná se o teplotu nejteplejšího místa transformátoru. Tato pro následnou diagnostiku důležitá hodnota slouží při odhadování zestárnutí izolačního systému. Na základě této hodnoty se může omezit zatěžování transformátoru, aby nedocházelo ke zbytečnému namáhání izolace a tak k její urychlené degradaci.

Pro stanovení životnosti izolačního systému transformátoru je možné využít několik druhů výpočtů, tato problematika je více popsána v IEEE normě [33]. Zde je uveden jeden z možných výpočtů životnosti transformátorů, pro výpočet je zapotřebí znát hodnotu nejteplejšího místa transformátoru, dále odečíst jednotlivé konstanty pro daný izolační systém z Obr. 4.2.2 a dosadit do následujícího vztahu:

$$\log t = A_{10} + \frac{B_{10}}{T}, \tag{4.23}$$

kde  $t$  - je životnost [h],  $A_{10}$  a  $B_{10}$  - jsou konstanty odečtené z životnostní křivky [-],  $T$  - je Hot-spot teplota [K]. [23][27][28][33]



Obr. 4.2.2 Životnostní křivka zalévaných transformátorů [33]

### 4.2.3 Sledování částečných výbojů

Sledování částečných výbojů je také vhodné sledovat on-line, za chodu transformátoru. Metody pro monitorování částečných výbojů se neustále vyvíjí a mnoho z nich se nachází na experimentální úrovni. Obvykle se kombinují dvě metody sledování.

Při on-line monitorování se provádí sledování akustických signálů, které vznikají při částečných výbojích. Na vinutí transformátoru je rozmístěno 3 až 12 piezoelektrických snímačů. Následně probíhá jejich vyhodnocení.

Další metoda využívá sond na bázi indukčnosti. Měřicí obvod se musí před měřením kalibrovat. Naměřené hodnoty se poté porovnávají s hraničními hodnotami. Toto měření se vyznačuje v současné době vysokou citlivostí, ale je zapotřebí věnovat zvýšenou pozornost rušivým signálům, které se v okolí transformátorů vyskytují. Sledování můžeme provádět nepřetržitě nebo periodicky, při druhé možnosti mohou částečné výboje chvilkově vymizet v důsledku změny teploty nebo vlhkosti. Proto je lepší nepřetržité sledování, ale je finančně nákladnější. Na signály pro zjišťování částečných výbojů se nepoužívá Fourierova transformace (FT), nýbrž se využívá vlnková transformace (Wavelet Transform - WT). Před konečným vyhodnocením signálu se musí odfiltrovat šum např. prostřednictvím Matlabu. Jako další transformaci k přenosu signálu pro zjišťování částečných výbojů lze použít poměrně novou transformaci tzv. Hibert Huang Transform (HHT), která je ještě odolnější proti nechtěnému šumu. [34][35][36]

## Závěr

Se zvyšujícími se požadavky na transformátory, především co se týče ekologických nároků, je zapotřebí věnovat zvláštní pozornost suchým zalévaným transformátorům. Ty jsou díky svému provedení vhodné pro nejrůznější aplikace, kde by se např. použití olejových transformátorů setkávalo s problémy. Během výroby se musí věnovat pozornost všem částem transformátoru, zejména pak jejich izolačnímu systému. Je důležité zvolit správné materiály, aby měl zkonstruovaný transformátor co možná nejdelší životnost a nízké provozní náklady. Proto se během výroby nových strojů a následného provozu sledují jejich technický stav s ohledem na požadavky zákazníka, platných norem, ekonomičnosti a bezpečnosti. Kvůli spolehlivému provozu a splnění všech požadavků se transformátory sledují vhodně zvoleným souborem diagnostických metod.

Přínos této bakalářské práce má spočívat v ucelení základních informací o suchých zalévaných transformátorech v energetice a především v následném popsání jednotlivých diagnostických metod. Práce by měla napomoci studentům k jednoduchému náhledu do této problematiky a rychlému vyhledání jednotlivých diagnostických metod používaných pro tento typ transformátorů s odkazem na české normy.

Na začátku práce bylo popsáno obecné fungování a použití transformátoru se zaměřením na suché zalévané transformátory. Uvedení metod použitelných k zaizolování vinutí. Podstatná část práce je věnovaná právě materiálům sloužícím k vytvoření izolačního systému transformátorům. Nejobsáhlejší kapitola popisuje jednotlivé diagnostické metody, především se jedná o offline metody, ale nejsou opomenuty ani metody používané za provozu, tedy online. Všechny kapitoly jsou zpracovány s ohledem na celkový rozsah bakalářské práce a čtenáři je předložena práce, jejímž studiem získá základní přehled o suchých zalévaných transformátorech a základní informace o jednotlivých principech diagnostických zkoušek.

## Seznam použité literatury

- [1] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje I.* Praha: Academia, 1980.
- [2] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006, 139 s. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [3] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [4] REŇÁK, Ladislav. *Dielektrická absorpce lakových kompozitních materiálů*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [5] DUBSKÝ, Jan, *Elektrotechnické materiály (Pro obor technická kybernetika)*, Plzeň: Editační středisko VŠSE, 1972
- [6] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
- [7] MLEZIVA, Josef a ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7.
- [8] ELPRO - ENERGO s.r.o. *Řez suchým transformátorem* [online]. [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/suche-transformatory/zakladni-popis/rez-suchym-transformatorem/>
- [9] TRASFOR. *Konstrukce suchých transformátorů* [online]. [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: [www.trasfor.sk/documents/Konstrukce.pdf](http://www.trasfor.sk/documents/Konstrukce.pdf)
- [10] SGB. *Proč suché transformátory?* [online]. [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: <http://www.sgb.sk/download/clanky-v-tlaci/proc-suche-transformatory.pdf>
- [11] HASSDENTEUFEL, Josef, et al. *Elektrotechnické materiály*. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1967. 860 s.
- [12] NEJDL, Radek. *Zalévací hmoty v elektrotechnické výrobě*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření.
- [13] SGB. *Není transformátor jako transformátor* [online]. [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: <http://www.sgb.sk/download/clanky-v-tlaci/neni-transformator-jako-transformator.pdf>
- [14] LIDAŘÍK, M., a kolektiv. *Epoxidové pryskyřice*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1983

- [15] MIKOVCOVÁ P. *Stupeň konverze reaktoplastických pryskyřic* [online]. FEL ZČU Plzeň, 2007 [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/61.pdf>
- [16] SPOLCHEMIE, a.s. [online]. [cit. 2012-04-26], Dostupné z: <http://www.spolchemie.cz>
- [17] BÍNA, Oldřich. *Hodnocení zalévacích pryskyřic*. Plzeň, 2010. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření.
- [18] HAMPL, Michal. *Inovace v technologii transformátorů*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření.
- [19] ELEKTRO. [online]. 2005 [cit. 2012-03-11]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26443](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26443)
- [20] ČSN EN 60076-11. *Výkonové transformátory - část 11: Suché transformátory*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [21] ČSN EN 60076-1+a11. *Výkonové transformátory - část 1: Všeobecně*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [22] ČSN EN 60076-3. *Výkonové transformátory - Část 3: Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [23] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [24] *IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001.
- [25] ČSN EN 60726: *Suché výkonové transformátory* [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: [http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html\\_nahledy/35/68638/68638\\_nahle.htm](http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/35/68638/68638_nahle.htm)
- [26] ČSN EN 60076-10. *Výkonové transformátory - část 10: Stanovení hladin hluku*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [27] TRASFOR. *Ochrana proti přehřátí u transformátorů suchých typů* [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.trasfor.sk/documents/Ochrana.pdf>
- [28] GOCKENBACH E., WERLE P., BORSI H. Monitoring and diagnostic systems for dry type transformers. In: *2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics, June 25-29, 2001, Eindhoven, the Netherlands*. Hannover: Institute of Electric Power Systems, 2001, s. 291-294. ISBN: 0-7803-6352-3.
- [29] *Trojfázový transformátor* [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: [http://www.elektro.fme.vutbr.cz/studopory/elektrot/lab\\_05\\_cv.htm](http://www.elektro.fme.vutbr.cz/studopory/elektrot/lab_05_cv.htm)

- [30] ELPRO - ENERGO s.r.o. *Vysokonapětové vinutí*[online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z:<http://www.elpro-energo.cz/suche-transformatory/zakladni-popis/vysokonapetove-vinuti/>
- [31] SECUE J. New methodology for diagnosing faults in power transformer windings Through the Sweep Frequency Response Analysis (SFRA). In: *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, Bogota, 2008 IEEE/PES, August 13-15, 2008*. San Juan: Universidad Nacional de San Juan, 2008, s. 1-10. ISBN: 978-1-4244-2217-3.
- [32] CHING-CHAU Su, CHENG-CHI Tai, CHIEN-YI Chen, JU-CHU Hsieh, JIANN-FUH Chen. Partial Discharge Detection Using Acoustic Emission Method for a Waveguide Functional High-Voltage Cast-Resin Dry-Type Transformer. In: *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24,2008*. Tainan: National ChengKung University, 2008, s. 517 - 520. ISBN: 978-1-4244-1621-9.
- [33] *IEEE Guide for loading dry-type distribution and power transformers*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1989.
- [34] MARTON K., KURIMSKÝ, J., BALOGH, J. *Čiastkové výboje v diagnostike transformátorov*. Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Košice.
- [35] ZHENG Ye. Transformer Partial Discharge Online Monitoring Based on The Hibert Huang Transform. In: *2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Enviromental Monitoring. Hunan, March 5-6, 2012*. China: ChangSha University Of Science and Technology, 2012, s. 814-817. ISBN: 978-1-4673-0458-0
- [36] GHAFFARIAN M. Investigation of Online Detected Partial Discharges in power transformer. In: *Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities. Sydney, NSW, December 14-17,2008*. Iran: Sharif University of Technology, Tehran, 2008, s. 1-6. ISBN: 978-0-7334-2715-2

## Přílohy

### P.1 Rozdělení zkoušek transformátorů [20][23]

- v úvahu bereme pouze napěťovou hladinu do 110 kV

Název zkoušky nebo měření	zkouška		
	typová	kusová	zvláštní
Měření izolačního odporu	•	•	
Měření odporu vinutí za studena stejnosměr. proudem	•	•	
Měření převodu napětí naprázdno na všech odbočkách	•	•	
Kontrola sledu fází	•	•	
Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje	•	•	
Zkouška indukovaným napětím	•	•	
Měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno	•	•	
Měření charakteristiky naprázdno	•		
Měření ztrát nakrátko a proudu nakrátko	•	•	
Oteplovací zkouška	•		
Zkouška el. pevnosti izolace atmosférickým impulzem	•		
Měření ztrátového činitele a kapacity vinutí			•
Zkratová zkouška	•		
Měření nulové složky reaktance			•
Zkouška přepínače odboček	•	•	
Zkouška el. pevnosti izolace spínacími impulzy			•
Měření částečných výbojů		•	•
Měření hladiny hluku			•
Zkouška pro třídu prostředí			•
Klimatická zkouška			•
Zkouška hořlavosti			•

P.2 Ukázka zkušební komory (rozměry jsou v mm) [24]

