

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Diagnostika přístrojových transformátorů**

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

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

Jméno a příjmení: **Martin SMĚŠNÝ**  
Osobní číslo: **E09B0393P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Diagnostika přístrojových 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 princip přístrojových transformátorů, jejich konstrukci a použití.
2. Popište používané izolační systémy v oblasti přístrojových transformátorů VN, VVN a způsoby jejich degradace.
3. Zpracujte přehled diagnostických metod, která jsou nebo mohou být využita v oblasti přístrojových transformátorů.
4. Zpracujte přehledné porovnání produktů jednotlivých výrobců.

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**  
Mentlík V. a kol.: Diagnostika elektrických zařízení, BEN - Technická literatura ISBN 978-80-7300-232-9, Praha 2008
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**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis přístrojových transformátorů, konstrukci izolačních systémů používaných v přístrojových transformátorech, způsoby jejich degradace a porovnání produktů jednotlivých výrobců. Hlavním cílem je ucelený souhrn metod, které se používají v diagnostice přístrojových transformátorů.

## **Klíčová slova**

Přístrojový transformátor, transformátor proudu, transformátor napětí, izolační systém, olej-papír, SF<sub>6</sub>, typové zkoušky, kusové zkoušky, zvláštní zkoušky, on-line diagnostika, off-line diagnostika

## **Abstract**

The present thesis is focused on the description of instrument transformers, construction of insulating systems used in instrument transformers, ways of degradation and comparison of individual products manufacturers. The main objective is a comprehensive set of methods that are used in the diagnosis of the instrument transformers.

## **Key words**

Instrument transformer, current transformer, voltage transformer, insulating system, oil-paper, SF<sub>6</sub>, type tests, routine tests, special tests, on-line diagnostics, off-line diagnostics

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2013

Martin Směšný

## **Poděkování**

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

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>1 PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY .....</b>	<b>13</b>
1.1 PRINCIP TRANSFORMÁTORU.....	13
1.1.1 Náhradní schéma transformátoru.....	15
1.1.2 Mezní režimy transformátoru.....	16
1.1.3 Základní pojmy a šítkové hodnoty přístrojových transformátorů.....	17
1.2 ROZDĚLENÍ PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ.....	19
1.2.1 Transformátory proudu.....	20
1.2.2 Transformátory napětí.....	22
1.2.3 Kombinované transformátory proudu a napětí.....	23
1.2.4 Další rozdělení přístrojových transformátorů.....	24
1.3 KONSTRUKCE PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ.....	25
1.3.1 Magnetický obvod transformátoru.....	26
1.3.2 Základní provedení transformátorů.....	27
<b>2 IZOLAČNÍ SYSTÉMY PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....</b>	<b>30</b>
2.1 IZOLAČNÍ MATERIÁLY.....	30
2.1.1 Fluorid sírový SF <sub>6</sub> .....	30
2.1.2 Kompozitní materiály.....	31
2.1.3 Pryskyřice.....	32
2.1.4 Kapalné izolanty.....	32
2.2 SUCHÉ TRANSFORMÁTORY SE ZALITÝM VINUTÍM.....	33
2.3 TRANSFORMÁTORY S IZOLAČNÍM SYSTÉMEM PAPÍR-OLEJ.....	34
2.4 SUCHÉ TRANSFORMÁTORY S SF <sub>6</sub> JAKO IZOLAČNÍM MEDIEM.....	35
2.5 DEGRADACE IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ A SYSTÉMŮ.....	37
<b>3 DIAGNOSTIKA PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ.....</b>	<b>39</b>
3.1 TYPOVÉ ZKOUŠKY.....	40
3.1.1 Zkoušky krátkodobými proudy.....	40
3.1.2 Oteplovací zkouška.....	41
3.1.3 Zkoušky primárního vinutí impulsním napětím.....	42
3.1.4 Zkouška za deště venkovních transformátorů.....	43
3.1.5 Měření přesnosti.....	43
3.1.6 Zkouška zkratové odolnosti.....	46
3.1 KUSOVÉ ZKOUŠKY.....	47
3.2.1 Zkoušky střídavým napětím primárního vinutí.....	47
3.2.2 Měření částečných výbojů.....	48
3.2.3 Zkoušky mezi sekcemi vinutí a sekundárními vinutími střídavým napětím.....	50
3.2.4 Přepětová zkouška mezizávitové izolace.....	50
3.3 ZVLÁŠTNÍ ZKOUŠKY.....	51
3.3.1 Zkouška primárního vinutí useknutým atmosférickým impulsem.....	51
3.3.2 Měření ztrátového činitele tg δ a kapacity vinutí.....	53
3.3.3 Zkouška mnohonásobným useknutým impulsem.....	55
3.3.4 Mechanické zkoušky.....	55
3.3.5 Měření přenesených přepětí.....	56



3.4	DIAGNOSTIKA STAVU OLEJE .....	57
3.5	DIAGNOSTIKA SF <sub>6</sub> .....	58
3.6	ONLINE DIAGNOSTIKA .....	59
3.6.1	<i>Monitoring plynů a vlhkosti v oleji</i> .....	60
3.6.2	<i>Monitoring SF<sub>6</sub></i> .....	61
<b>4</b>	<b>PŘEHLED PRODUKTŮ JEDNOTLIVÝCH VÝROBCŮ .....</b>	<b>63</b>
4.1	PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY S IZOLAČNÍM SYSTÉMEM OLEJ-PAPÍR .....	63
4.1.1	<i>Přístrojové transformátory napětí</i> .....	63
4.1.2	<i>Přístrojové transformátory proudu</i> .....	65
4.1.3	<i>Kombinované přístrojové transformátory</i> .....	66
4.2	SUCHÉ PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY S SF <sub>6</sub> .....	67
4.2.1	<i>Přístrojové transformátory napětí</i> .....	67
4.2.2	<i>Přístrojové transformátory proudu</i> .....	68
4.2.3	<i>Kombinované přístrojové transformátory</i> .....	69
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>71</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>73</b>

## Seznam symbolů a zkratek

$E_p$ .....	elektrická pevnost [kV/mm]
FS .....	nadproudové číslo
$f$ .....	frekvence [Hz]
$H_{Fe}$ .....	intenzita magnetického pole v železe [A/m]
$I_1$ .....	proud primárního vinutí [A]
$I_2$ .....	proud sekundárního vinutí [A]
$I_{2th}$ .....	jmenovitý krátkodobý tepelný proud [A]
$I_{dyn}$ .....	jmenovitý dynamický proud [A]
$I_{exc}$ .....	výsledný budící proud [A]
$I_{pn}$ .....	jmenovitý primární proud [A]
$I_{sn}$ .....	jmenovitý sekundární proud [A]
$k$ .....	převod transformátoru [-]
$N_1$ .....	počet závitů primárního vinutí [-]
$N_2$ .....	počet závitů sekundárního vinutí [-]
$P_0$ .....	celkové ztráty naprázdno [W]
$P_d$ .....	přídavné ztráty [W]
$P_{Fe}$ .....	ztráty v železe [W]
$P_{j0}$ .....	Jouleovy ztráty [W]
PT .....	přístrojový transformátor
PTP .....	přístrojový transformátor proudu
PTN .....	přístrojový transformátor napětí
$q$ .....	zdánlivý náboj impulsu částečného výboje [pC]
$R_1, R_2$ .....	činné odpory vinutí [ $\Omega$ ]
STEP-LAP .....	metoda stupňovitého skládání plechů transformátoru
T1 .....	doba čela impulsu [ $\mu s$ ]
T2 .....	doba půl týlu [ $\mu s$ ]
$\text{tg } \delta$ .....	ztrátový činitel
$U_{20}$ .....	napětí transformátoru naprázdno [V]
$U_i$ .....	efektivní hodnota indukovaného napětí [V]
$u_{i1}$ .....	indukované napětí na primárním vinutí [V]
$u_{i2}$ .....	indukované napětí na sekundárním vinutí [V]

$u_k$ .....	poměrná hodnota napětí nakrátko [%]
$U_{kn}$ .....	hodnota napětí nakrátko [V]
$U_m$ .....	efektivní hodnota nejvyššího napětí pro zařízení [kV]
$U_p$ .....	vrcholová hodnota aplikovaného napětí [kV]
$v_n$ .....	vysoké napětí
$v_{vn}$ .....	velmi vysoké napětí
$X_{1\sigma}, X_{2\sigma}$ .....	rozptylové reaktance [ $\Omega$ ]
$Z_k$ .....	impedance nakrátko [ $\Omega$ ]
$\mu_{fe}$ .....	permeabilita železa [H/m]
$\vartheta_w$ .....	střední teplota vinutí [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{w1}$ .....	teplota při odečtu hodnoty odporu $R_1$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Phi_1$ .....	magnetický tok [Wb]
$\Phi_{1h}$ .....	hlavní magnetický tok [Wb]
$\Phi_{1\sigma}$ .....	rozptylový magnetický tok [Wb]
$\Phi$ .....	celkový magnetický tok [Wb]
$\Phi_m$ .....	maximální hodnota celkového magnetického toku [Wb]

## Úvod

Přístrojové transformátory používáme pro změnu napětí a proudů na takové hodnoty, aby byly vhodné pro připojené jistící a měřicí přístroje. Přístrojové transformátory mají v případě poruchy dopad na další zapojené přístroje, také mohou ohrozit zdraví osob v prostorech rozvodny. Předcházet těmto haváriím můžeme pomocí diagnostiky, jejíž hlavním cílem je ověření, zda přístrojový transformátor vyhovuje a splňuje stanovené podmínky, které jsou v souladu s normami.

Cílem této bakalářské práce je zpracovat základní problematiku přístrojových transformátorů a možnosti jejich diagnostiky. V první části je zopakován princip, konstrukce transformátoru a rozdělení přístrojových transformátorů. Druhá část je věnována jednotlivým izolačním systémům, které se používají u přístrojových transformátorů VN a VVN, jejich výhody, nevýhody a způsoby degradace. Významná část práce je věnována diagnostickým zkouškám, které se provádí při výrobě, provozu a revizích přístrojových transformátorů. V poslední části je vypracováno přehledné porovnání přístrojových transformátorů používaných na trhu.

# 1 Přístrojové transformátory

Přístrojové transformátory (PT) jsou elektromagnetické stroje netočivé, které napájejí přístrojové obvody. Slouží ke změně rozsahu napětí, proudů a galvanickému oddělení obvodu od sítě. Nejvíce se využívají v elektrizačních soustavách a elektrických zařízeních vysokého a velmi vysokého napětí, ale svoje uplatnění nacházejí také v obvodech nízkého napětí a to například ve zkušebnách a laboratořích. Obecně je používáme tam, kde je třeba upravit napětí nebo proud, aby s těmito veličinami mohly dále pracovat jistící a měřicí přístroje. Pomocí přístrojových transformátorů je tedy možné umístit tyto měřicí přístroje mimo dosah působení magnetických a elektrických polí proudových obvodů rozvodné sítě, a tím je zajištěna správná funkce zapojených přístrojů a přesnost měření.

## 1.1 Princip transformátoru

Princip funkce a fyzikální zákony přístrojových transformátorů jsou stejné jako u ostatních druhů transformátorů, liší se pouze využitím v elektrických obvodech. Základem transformátorů je ferromagnetické jádro, na které jsou navinuta primární a sekundární vinutí tak, aby měla společnou osu a jejich magnetická vazba byla co nejlepší. Ferromagnetické jádro je vodičem magnetického toku a zajišťuje magnetickou vazbu mezi vinutími, pokud je na primární vinutí připojen střídavý zdroj a poteče jím proud, který je budičem magnetického toku  $\Phi_1$ , ten je pak veden z primárního vinutí do sekundárního vinutí, kde budí střídavé napětí. Tok  $\Phi_1$  se dělí na dvě složky: na hlavní magnetický tok  $\Phi_{1h}$ , který se uzavírá jádrem, a na tzv. rozptylový magnetický tok  $\Phi_{1\sigma}$ , tento magnetický tok se uzavírá pouze kolem vinutí a nepodílí se na přenosu energie. Když připojíme na sekundární obvod zátěž, protéká obvodem budící proud  $I_2$ , který vybudí vlastní magnetický tok  $\Phi_{2h}$ . Výsledný magnetický tok, který prochází jádrem je tedy vzniklý působením obou vinutí [7,8]:

$$\Phi(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{2h}(t) \quad (1.1)$$

Toky  $\Phi_{1h}$  a  $\Phi_{2h}$  jsou toky fiktivní, slouží nám pouze za účelem matematického popisu transformátoru. Ve skutečnosti je tedy měřitelný pouze výsledný magnetický tok tekoucí jádrem. Působením tohoto výsledného magnetického toku se na vinutích indukuje vnitřní napětí  $u_{i1}$  a  $u_{i2}$  [7,8]:

$$u_{i1} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2)$$

$$u_{i2} = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.3)$$

pokud budeme předpokládat harmonický průběh toku  $\Phi$  platí, že:

$$u_i = \frac{d}{dt} (N \Phi_m \sin(\omega t)) = N \Phi_m \omega \cos(\omega t) \quad (1.4)$$

pro efektivní hodnotu indukovaného napětí:

$$U_i = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N \Phi = 4,44 f N \Phi \quad (1.5)$$

Poměry vnitřních indukovaných napětí určují převod transformátoru  $k$ , ten nabývá reálných hodnot a může být kladný nebo záporný, to záleží na zapojení svorek.

$$\frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{4,44 N_1 \Phi_m f}{4,44 N_2 \Phi_m f} = \frac{N_1}{N_2} = k = \frac{U_1}{U_2} \quad (1.6)$$

Pomocí zákona celkového proudu odvodíme vztah pro převod proudu.

$$U_m = \oint H dl = \sum I = N_1 I_1 + N_2 I_2 \quad (1.7)$$

Siločáry hlavního magnetického toku vedou železným jádrem transformátoru a platí tedy

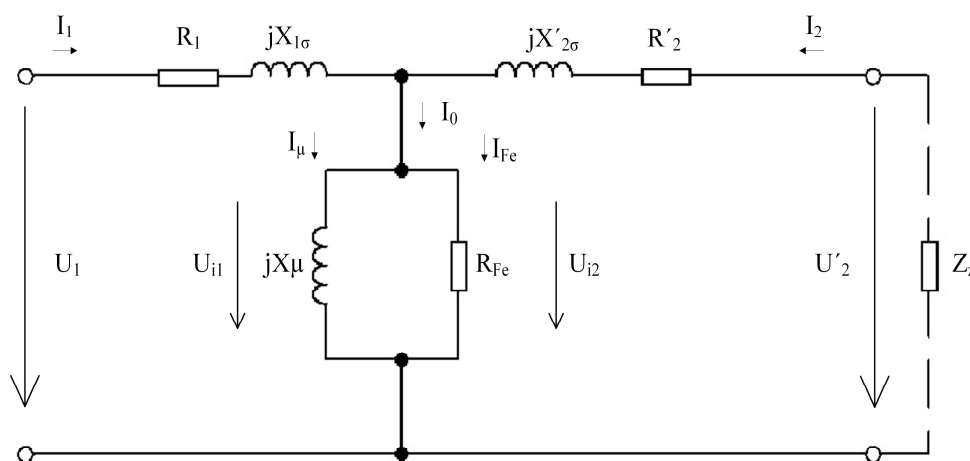
$$\mu_{fe} \rightarrow \infty \quad H_{fe} = 0 \rightarrow N_1 I_1 = -N_2 I_2 \quad ak = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.8)$$

Jak z rovnic vyplývá, chceme docílit toho, aby primární napětí bylo  $k$  násobkem sekundárního napětí a sekundární proud byl  $k$  násobkem proudu primárního. Požadujeme, aby tyto vlastnosti byly nezávislé na kmitočtu, to splňuje však jen ideální transformátor, u kterého předpokládáme nekonečně velké impedance při zachování poměru jejich indukčností, ideálně těsnou vazbu a jeho nulové ztráty. Při konstrukci transformátoru se snažíme těmto vlastnostem co nejvíce přiblížit. [4]

### 1.1.1 Náhradní schéma transformátoru

Náhradní schéma transformátoru je kombinací odporů a indukčností obvodů, jeho vlastnosti odpovídají pomocí určitých zjednodušení vlastnostem transformátoru. Toto schéma lze popsat pomocí algebraických rovnic, jejich řešením lze vypočítat průběhy proudů ve schématu a při znalosti vztahů mezi skutečným transformátorem a veličinami náhradního schématu lze zjistit hodnoty proudů v transformátoru.

Pomocí náhradního schématu a naměřených charakteristik transformátoru naprázdno a nakrátko, můžeme zjistit skutečné hodnoty parametrů transformátoru, tzn. reaktance a odpory primárních i sekundárních vinutí. [7]



Obr. 1.1 Náhradní schéma transformátoru ve tvaru T-článku [7]

Schéma platí pro transformátor s převodem 1. Veličiny označené čárkou jsou převedeny ze sekundární strany na stranu primární. Převed veličin není problém, protože převodní vztahy známe, platí pro ně jednoduché přepočty [7]:

$$U'_{2} = k U_{2} \tag{1.9}$$

$$I'_{2} = \frac{1}{k} I_{2} \tag{1.10}$$

$$Z'_{2} = k^2 Z_{2} \tag{1.11}$$

Pro náhradní schéma na obr. 1.1 můžeme psát rovnice pro napětí ve tvaru:

$$U_{1} = R_{1} I_{1} + j X_{1\sigma} I_{1} + U_{i} = R_{1} I_{1} + j X_{1\sigma} I_{1} + j X_{\mu} (I_{1} + I'_{2}) \tag{1.12}$$

$$U'_2 = R'_2 I'_2 + j X'_{2\sigma} I'_2 + U_i = R'_2 I'_2 + j X'_{2\sigma} I'_2 + j X_\mu (I_1 + I'_2) \quad (1.13)$$

Úpravou těchto vztahů:

$$U_1 = (R_1 + j X_1) I_1 + j X_\mu I'_2 \quad (1.14)$$

$$U'_2 = (R'_2 + j X'_{2\sigma}) I'_2 + j X_\mu I_1 \quad (1.15)$$

Celkové reaktance primárního a sekundárního vinutí jsou:

$$X_1 = X_{1\sigma} + X_\mu \quad (1.16)$$

$$X'_2 = X'_{2\sigma} + X_\mu \quad (1.17)$$

### 1.1.2 Mezní režimy transformátoru

Parametry transformátoru lze určit z hodnot, získaných měření v chodu naprázdno a chodu nakrátko. Význam těchto režimů spočívá v tom, že je obvykle můžeme snadno realizovat experimentálně, jako newattové zkoušky. [7,8]

#### Chod transformátoru naprázdno

Při chodu transformátoru naprázdno jsou rozpojeny svorky na straně sekundáru, takže  $I_2=0$ ,  $U_2=U_{20}$ . V tomto chodu se ze sekundárního vnutí, neodebírání žádná energie a všechen dodávaný příkon do transformátoru je tedy spotřebován na krytí ztrát. Při chodu naprázdno protéká vinutím, které je napájeno pouze magnetizační proud, který se pohybuje v řádech několika procent jmenovitého proudu. Proto jsou Jouleovy ztráty v napájeném vinutí velmi malé a větší část ztrát pokrývají ztráty v magnetickém obvodu, protože magnetický obvod je nasycený. Celkové ztráty naprázdno lze spočítat ze vztahu [10]:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{j0} + \Delta P_{Fe} \quad (1.18)$$

Jouleovy ztráty vypočítáme, pokud známe činný odpor vinutí a procházející proud. Při zapojení transformátoru do hvězdy nebývá vždy vyveden uzel vinutí, proto měříme sdružený odpor mezi vývody fází. Jouleovy ztráty se poté stanoví podle vztahu [10]:

$$\Delta P_{j0} = \frac{3}{2} R I_0^2 \quad (1.19)$$

Ztráty v železe se dělí na ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní.



$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeV} + \Delta P_{FeH} \quad (1.20)$$

### Chod transformátoru nakrátko

Svorky na straně nižšího napětí jsou spojeny nakrátko, to znamená, že jsou vyzkratovány vodičem. Pokud transformátorem prochází jmenovitý proud, je na straně primárního vinutí napětí nakrátko  $U_{kn}$ . Tato hodnota se uvádí spíše v poměrných hodnotách. Poměrná hodnota napětí nakrátko je rovna poměrné hodnotě impedance nakrátko. [7]

$$u_k = \frac{U_{kn}}{U_n} = \frac{Z_k}{Z_n} = z_k \quad (1.21)$$

Tato hodnota poměrná hodnota napětí nakrátko se udává v procentech a pohybuje se mezi 4 až 12 % pro transformátory o velkých výkonech. U tohoto chodu se dodaný výkon transformátoru spotřebuje na krytí Jouleových ztrát v primárním i sekundárním vinutí a ztrát přídatných. Mezi přídatné ztráty patří ztráty vířivými proudy v konstrukčních částech transformátoru a ztráty skinefektem. [10]

$$\Delta P_k = \Delta P_{jk} + \Delta P_d \quad (1.22)$$

### 1.1.3 Základní pojmy a štítkové hodnoty přístrojových transformátorů

**Nejvyšší napětí pro zařízení  $U_m$ :** efektivní hodnota sdruženého střídavého napětí v kV, na kterou je transformátor konstruován.

**Jmenovitá izolační hladina:** kombinace hodnot napětí, které charakterizují izolaci PT s ohledem na jeho schopnost odolávat dielektrickému namáhání.

**Jmenovitá frekvence:** jmenovitá frekvence systému vyjádřená v Hz.

**Jmenovitý primární proud  $I_{pn}$ :** hodnota maximálního trvalého proudu v primárním vinutí vyjádřena v A, která je pro zařízení povolena.

**Jmenovitý sekundární proud  $I_{sn}$ :** hodnota sekundárního napětí, na které je založena činnost transformátoru. Standardní hodnoty jsou 1 nebo 5 A.

**Jmenovitý krátkodobý tepelný proud  $I_{th}$ :** maximální efektivní proud vyjádřený v kA, který musí být zařízení schopno vykonávat po určitou dobu 1 nebo 3 s, při zkratovaném sekundárním vinutí, aniž by došlo k poškození transformátoru

**Jmenovitý dynamický proud  $I_{\text{dyn}}$ :** je vrcholová hodnota primárního proudu, kterou transformátor vydrží bez elektrického nebo mechanického poškození elektrodynamickými silami při zkratovaném sekundárním vinutí.

**Zátěž PTP:** impedance v sekundárním obvodu při určitém účinníku, obvykle vyjádřená jako zdánlivý výkon ve VA, který je spotřebován při jmenovitém sekundárním proudu.

**Zátěž PTN:** admitance v sekundárním obvodu při daném účinníku, vyjádřena jako zdánlivý výkon ve VA, který je spotřebován při jmenovitém sekundárním napětí.

**Jmenovitá zátěž:** hodnota impedance, kterou je možno v měřicím rozsahu zatížit PT, aby nebyla překročena dovolená chyba.

**Třída přesnosti:** označení přiřazené transformátoru, jehož chyba proudu (napětí) a chyba úhlu nepřekročí dovolené hodnoty při předepsaných podmínkách.

**Nadproudové číslo FS:** poměr jmenovitého primárního nadproudu a jmenovitého primárního proudu.

**Jmenovitý primární nadproud:** hodnota primárního proudu, do které transformátor vyhovuje požadavkům na dovolenou velikost celkové chyby.

**Nadproudový činitel:** poměr jmenovitého primárního nadproudu při dané přesnosti a jmenovitého primárního proudu.

**Chyba proudu:** chyba způsobená PTP, vyjádřena v procentech.

**Chyba napětí:** chyba způsobená PTN, vyjádřena v procentech.

**Jmenovitý převod:** poměr jmenovitého primárního proudu (napětí) k jmenovitému sekundárnímu napětí (proudu).

**Skutečný převod:** poměr skutečného primárního proudu (napětí) ke skutečnému sekundárnímu napětí (proudu).

**Činitel zvýšení napětí:** činitel, jehož součin se jmenovitým primárním napětím udává nejvyšší napětí, při němž transformátor musí splňovat požadavky na oteplení po předepsanou dobu a požadavky na přesnost. [12,19,20,28]

Každý přístrojový transformátor musí být opatřen štítkem, na kterém jsou udány základní údaje a jmenovité hodnoty. [13]

Údaje na štítku přístrojových transformátorů [13,14]:

- a) Jméno výrobce nebo značka, která ho snadno identifikuje
- b) Výrobní číslo, typové označení
- c) Jmenovitý primární a sekundární proud u transformátorů proudu
$$K_n = I_{pn} / I_{sn} \quad \text{např. } K_n = 100/5 \text{ A}$$
- d) Jmenovité primární a sekundární napětí transformátorů napětí  
např. 66/0,11 kV
- e) Jmenovitý kmitočet
- f) Jmenovitá zátěž a odpovídající třída přesnosti  
např. 50 VA, Třída 1.0
- g) Nejvyšší napětí pro zařízení
- h) Jmenovitá izolační hladina

Pokud je na štítku místo, vyznačují se tyto další údaje:

- i) Činitel zvýšení napětí a jemu odpovídající doba trvání přepětí pro transformátory napětí
- j) Jmenovitý krátkodobý tepelný proud  $I_{th}$  a jmenovitý dynamický proud jestliže se liší od 2,5 násobku jmenovitého krátkodobého tepelného proudu  
např. 13 kA nebo 13/40 kA
- k) Teplotní kategorie izolace, pokud je jiná než Třída A
- l) Na transformátorech s více než jedním sekundárním vinutím použití každého vinutí a jeho odpovídající svorky

## 1.2 Rozdělení přístrojových transformátorů

Přístrojové transformátory podle připojených zařízení na výstupní straně rozdělujeme na měřicí a jisticí.

### Měřicí transformátory

Měřicí transformátory převádějí velké střídavé napětí a proudy v měřicím rozsahu na hodnoty s požadovanou přesností, které jsou vhodné pro cívky měřicích přístrojů. Tyto měřicí přístroje se do obvodu nezapojují přímo, ale zapojují se přes měřicí transformátory, které patří k jejich příslušenství. [6]

### **Jistící transformátory**

Jistící transformátory transformují v jistícím rozsahu primární hodnoty proudů a napětí s požadovanou přesností na hodnoty sekundární, které jsou vhodné pro cívky nebo topné články jistících přístrojů. [6]

Přístrojové transformátory (měřicí i jistící) dále dělíme na transformátory proudu, transformátory napětí a kombinované transformátory. Každý přístrojový transformátor může pracovat s vyhovující přesností jen s jednou z obou primárních veličin, a to buď s proudem, nebo napětím. Kombinované přístrojové transformátory mohou pracovat s vyhovující přesností s napětím i proudem, ale zase jsou podstatně dražší. Podle toho se rozdělují na přístrojové transformátory proudu a na přístrojové transformátory napětí.

#### **1.2.1 Transformátory proudu**

Přístrojové transformátory proudu napájí proudové systémy měřících, jistících a regulačních systémů. Primární strana PTP se zapojí do série se silnoproudým zařízením, na sekundární stranu PTP se zapojí potřebné přístroje. Transformátory proudu jsou konstruovány tak, aby se primární proud transformoval na hodnotu sekundární pouze s malými chybami v předem určených tolerančních mezích, na chybě napětí nám nezáleží. Vyznačují se malým budícím proudem, tzn. velkou budící impedancí. Jejich provozní vlastnosti se podobají činnosti transformátoru nakrátko. [9,28]

Měřicí transformátory proudu se používají ke zvýšení rozsahu měřících přístrojů, protože v elektrických sítích se běžně používají proudy v řádech stovek a tisíc ampér. Abychom byli schopni takto vysoké hodnoty změřit, musíme je transformovat na hodnoty měřitelné přístroji. [5]

Jistící transformátory proudu využíváme pro napájení ochran, které uplatňujeme k ochraně elektrického obvodu. Musí mít vysokou přesnost při nadproudech a zkratech. Jsou na ně kladeny vysoké nároky na rychlost přenosu, aby se zabránilo poškození chráněného obvodu. [5]

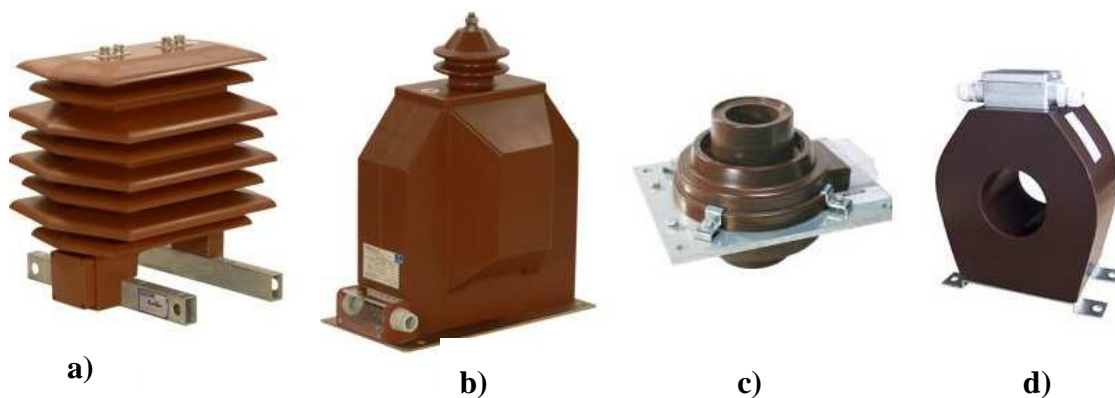
Transformátory proudu se vyrábějí v mnoha provedeních do napěťové hladiny až 800 kV a hodnoty jmenovitého primárního proudu až 5000 A.

### Transformátory proudu vvn

Přístrojové transformátory proudu vvn se rozdělují podle konstrukce magnetického obvodu a vinutí [19]: hair-pin, top-core a eye-bolt. Tyto typy transformátorů jsou popsány v kapitole 1.3.2.

### Transformátory proudu vn

Transformátory tohoto typu se používají k měřicím a jisticím účelům, v rozvodných zařízeních vysokého napětí, se jmenovitými primárními proudy do 5000 A a nejvyšším napětím pro zařízení 12 – 25 kV. Mohou být použity ve vnitřním prostředí, a to jak v normálních tak také ztížených klimatických podmínkách. Transformátory mají násuvnou konstrukci, s jedním až třemi sekundárními výstupy, podle typu použití. Vnitřní otvor je opatřen polovodivým nátěrem, který je vyveden na čelní plochu tělesa a je za provozu propojen s potenciálem primárního vodiče. [29,30]



Obr. 1.2: Vybrané druhy PT: a) venkovní PTP b) jednopólově izolovaný PTN pro vnitřní použití c) průchodkový PTP pro vnitřní použití d) kabelový PTP pro venkovní použití (převzato z [29,30])

### Provedení přístrojových transformátorů proudu:

- |              |               |
|--------------|---------------|
| a) podpěrné: | jednozátitové |
|              | vícezávitové  |

Podpěrné transformátory proudu jsou zalévány do epoxidové pryskyřice a jsou navrženy pro napětí od 3,6 do 25 kV. Mohou být konstruovány jako jednozávitové nebo vícezávitové s jedním nebo dvěma převody a možností přepínání na sekundární straně transformátoru. Tyto transformátory jsou určeny pro elektrárenská měření, měření a jištění v třífázových systémech elektrických sítí vnitřního provedení. Používají se pro skříňové rozvaděče nebo klasické kobkové rozvodny. [29,30]

**b) průchozí (kabelové):** jednozávitové: tyčové  
 násuvné  
 prstencové  
 vícezávitové

Jsou to transformátory proudu pro vnitřní i vnější provedení bez vestavěného primárního vodiče, který může být nasunut na kabel s vlastní izolací. Jsou vhodné pro měření fázových proudů v nízkonapěťových na hladinách 0,72 až 1,2 kV. Sekundární vinutí a prstencové ve tvaru železného jádra jsou zalité v pryskyřici, která má dobré elektrické a mechanické vlastnosti. [29,30]

**c) průchodkové:** jednozávitové: tyčové  
 násuvné  
 prstencové  
 vícezávitové

### 1.2.2 Transformátory napětí

Transformátory napětí se vyznačují malou rozptylovou reaktancí, velikost budícího proudu je srovnatelná s proudem elektrického obvodu připojeným na sekundární svorky. Jsou navrženy pro transformaci napětí s malými chybami v určitých tolerančních mezích, na chybě proudu nám nezáleží. Provozní vlastnosti transformátorů napětí se blíží chodu transformátoru naprázdno. Činitelé, kteří ovlivňují funkční vlastnosti, jsou napětí  $U_1$  a  $U_2$ , odpory vinutí  $R_1$  a  $R_2$  a rozptylová reaktance  $X_\sigma$ . [9]

Přístrojové transformátory napětí se využívají pro napájení měřících, jisticích a regulačních přístrojů. Primární vinutí PTN je zapojeno paralelně k obvodu vn nebo vvn, jehož napětí se transformuje do sekundárního obvodu, ve kterém se nacházejí připojené přístroje. [28]

**Provedení přístrojových transformátorů napětí:**

- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| a) podle zhotovení magnetického obvodu:          | indukční PTN                       |
|  | kapacitní PTN                      |
| b) podle počtu fází a izolace primárního vinutí: | jednofázové: jednopólově izolované |
|  | dvoj-pólově izolované              |
|  | trojfázové: plně izolované         |
|  | uzemněné                           |

**Indukční přístrojový transformátor napětí** má primární a sekundární vinutí navzájem sprážené pomocí magnetického obvodu. Jsou navrženy pro napětí od 52 do 170 kV.

U **Kapacitního přístrojového transformátoru napětí** se primární napětí transformuje na výslednou sekundární hodnotu ve dvou stupních. V prvním stupni se transformace napětí provede použitím kapacitního děliče, jehož pomocí se získá snížené napětí hodnoty, tato hodnota závislá na konstrukci PTN. V druhém stupni je indukční PTN a indukčnost L. Připojený transformátor je přizpůsobený tak, aby se na jeho výstupu získalo napětí, které je vhodné pro měřicí a jistící přístroje. Hlavní úlohou indukčnosti L je eliminovat chybu úhlu sekundárního PTN, která je způsobená kapacitním děličem při zemním zkratu. Pro eliminaci této chyby je potřeba, aby tato indukčnost byla v rezonanci s kapacitami děliče při jmenovité frekvenci. Tyto transformátory mohou být použity pro napětí od 72 až do 800 kV. [28]

PT vn se vyrábějí jako zalévané do epoxidové pryskyřice a jsou určeny k měření a jistění rozvodných zařízení vysokého napětí vnitřního i venkovního provedení, a to pro nejvyšší napětí soustavy 1.2–40.5 kV. Dělalí se i **dvoupólově izolované**, které mají všechny části primárního vinutí včetně svorek plně izolovány proti zemi na izolační hladinu, která odpovídá izolační hladině sítě, **jednopólově izolované** mají plně izolován jen jeden konec primárního vinutí proti zemi na izolační hladinu a druhý konec je uzemněn. [12]

**1.2.3 Kombinované transformátory proudu a napětí**

Kombinované transformátory proudu a napětí jsou přístroje, které mají ve společném izolátoru proudovou i napěťovou část. Nad provozní napětí 110 kV, jsou PT často vyráběny jako kombinované. Umístění proudových a napěťových částí v jednom pouzdře umožňuje značné úspory jako: více prostoru na rozvodně, menší počet potřebných nosných konstrukcí,

nižší náklady na dopravu a instalaci. Jejich nevýhodou je, že velikost jádra pro měření proudu je omezena. [19,27]

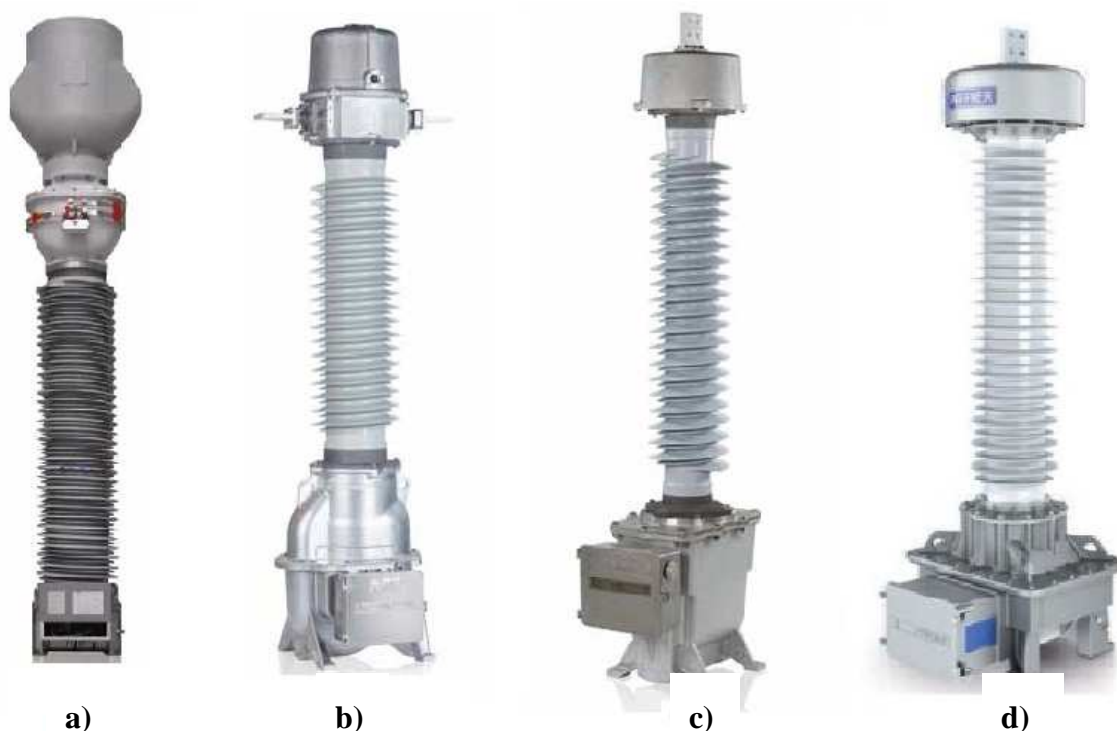
Kombinované transformátory se vyrábějí pro napětí 75 až 800 kV a jmenovité primární proudy až 4000 A.

#### 1.2.4 Další rozdělení přístrojových transformátorů

Všeobecné rozdělení přístrojových transformátorů [6]:

- 1) **podle provedení:** vnitřní  
venkovní
- 2) **podle druhu izolace:** vzduchové  
olejové  
zalévané (epoxidové)  
porcelánové  
s SF<sub>6</sub>
- 3) **podle způsobu montáže:** pro postavení  
pro zavěšení  
pro polohu vodorovnou  
pro polohu libovolnou





Obr. 1.3: Vybrané PT vvn: a) kombinovaný přístrojový transformátor s izolací SF<sub>6</sub>, top-core konstrukce b) PTP olej-papír izolace, konstrukce hair-pin c) kapacitní PTN izolace olej-papír d) induktivní PTN (převzato z [19,20,27])

### 1.3 Konstrukce přístrojových transformátorů

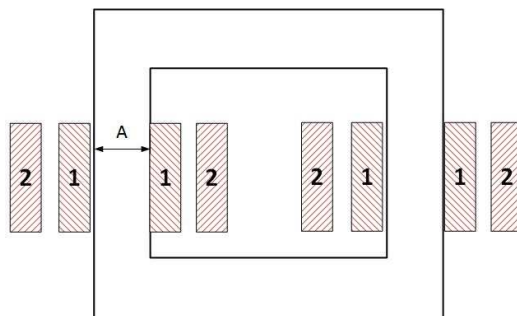
Hlavní části transformátorů jsou magnetický obvod a vinutí. Magnetický obvod přístrojových transformátorů (ferromagnetické jádro), je zhotoven z elektrotechnické oceli vyválcované do tenkých tabulí nebo pásů, které nazýváme elektrotechnické plechy. Plechy se dělí do tříd kvality podle hodnot ztrátového čísla. Volba vhodného plechu pak záleží na poměru mezi cenou a technickým provedením. Magnetické obvody mohou být skládané z jednotlivých plechů, které jsou mezi sebou navzájem izolovány a tím se snižují ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$ , nebo také vinuté z pásu jako toroidy C a E jádra. [4,7]

Pro vinutí transformátorů se používají měděné vodiče, výjimečně se můžeme setkat s hliníkovými. Vodiče jsou vhodně izolovány buď lakem, opředěním bavlnou, skleněnou přízí nebo ovinuté papírem. Pomocí vinutí a jádra se dosahují požadované indukčnosti, ale současně vznikají nežádoucí jevy, jako jsou např. odpor vinutí, rozptylová indukčnost,

dielektrické. Z důvodu, aby se takovéto vlivy udržely v potřebných mezích, je třeba provést správný návrh a výpočet vinutí. [4,8]

### 1.3.1 Magnetický obvod transformátoru

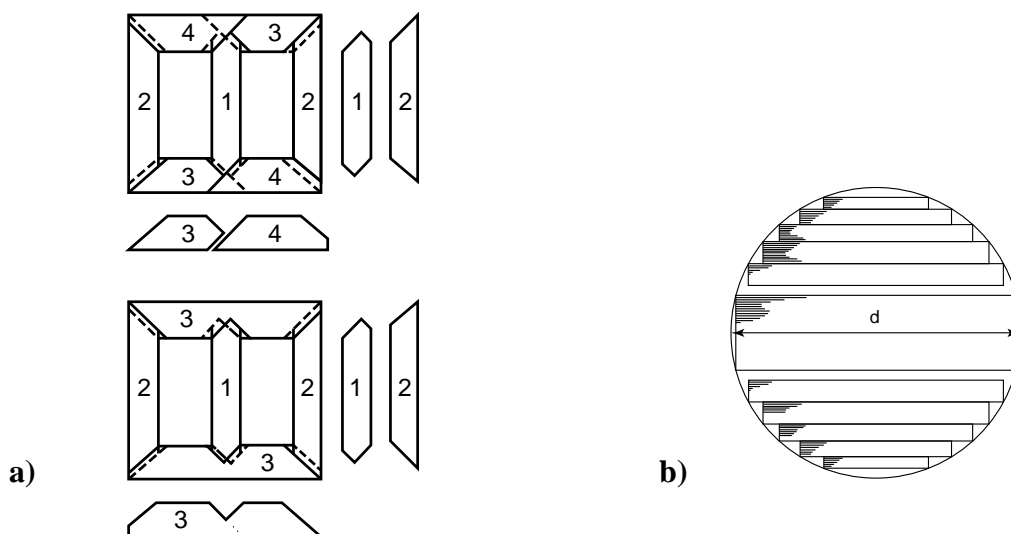
Základní tvar magnetického obvodu PT je jádrového typu. Na obr. 1.4 značí A průřez jádra transformátoru.



Obr. 1.4 Schematické znázornění jádrového provedení transformátoru [7]

U transformátoru jsou primární i sekundární vinutí rozdělené na dvou jádrech. Takto rozdělená jádra jsou propojena spojkami, které mají přibližně stejný průřez, protože vedou celý hlavní magnetický tok. [7]

Jádra se vyrábí ze za studena válcovaných neorientovaných plechů označovaných jako  $E_i$ , jsou to plechy magneticky izotropní, jejichž magnetické vlastnosti ve směru válcování i kolmo k němu jsou stejné, které jsou odstupňovány. Čím větší průřez jádra, tím je vyšší i počet stupňů. Plechy se stříhají pod úhlem  $45^\circ$  a skládají se systémem step-lap, to znamená, že místa styku plechů a jader jsou stupňovitě přesazena. Toto stupňování se uplatňuje pro lepší průchod magnetického toku a tím i snížení ztrát naprázdno a hlučnosti transformátoru. [4,16]



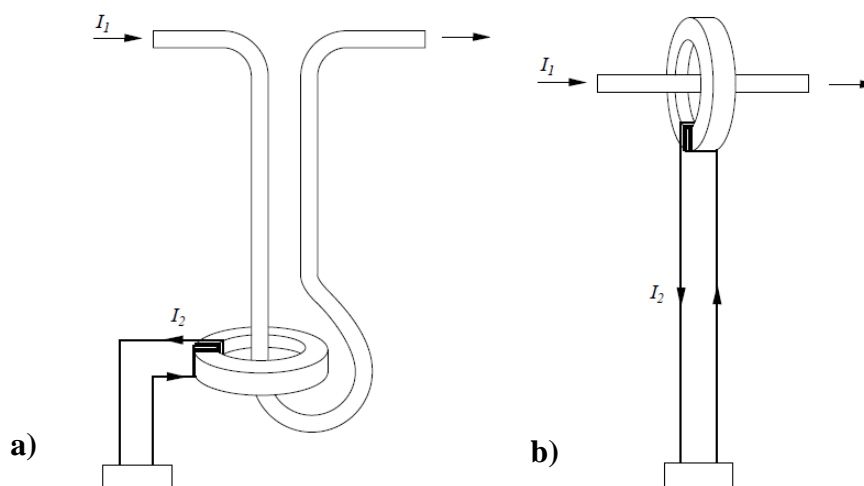
Obr. 1.5 a) Stupňovité skládání plechů systémem STEP-LAP b) Odstupňování magnetického jádra transformátoru [16]

Nejběžnějším materiálem pro výrobu jader patří křemíkové oceli, tento typ ocelí poskytuje nízké ztráty při vysokých magnetických indukcích, ale mají nízkou počáteční permeabilitu. Používají se i materiály jako nikl-železo, které mají počáteční permeabilitu vysokou, ale jejich hladina nesyacení je mnohem nižší. Často se používají tam, kde je třeba vysoká přesnost, ale tím je vyšší i jejich cena. [18]

### 1.3.2 Základní provedení transformátorů

Většina z vysokonapěťových transformátorů, které jsou současně na trhu, jsou dvojího typu [19]:

- a) Tank type s jádrem nacházejícím se v nádrži v blízkosti země, kde primární vodič je ve tvaru písmene U (hair-pin) nebo ve tvaru závitů (eye-bolt)
- b) Top-core s jádrem v horní části transformátoru, kde je primární vodič obvykle ve tvaru prutů, ale může být také ve tvaru závitů



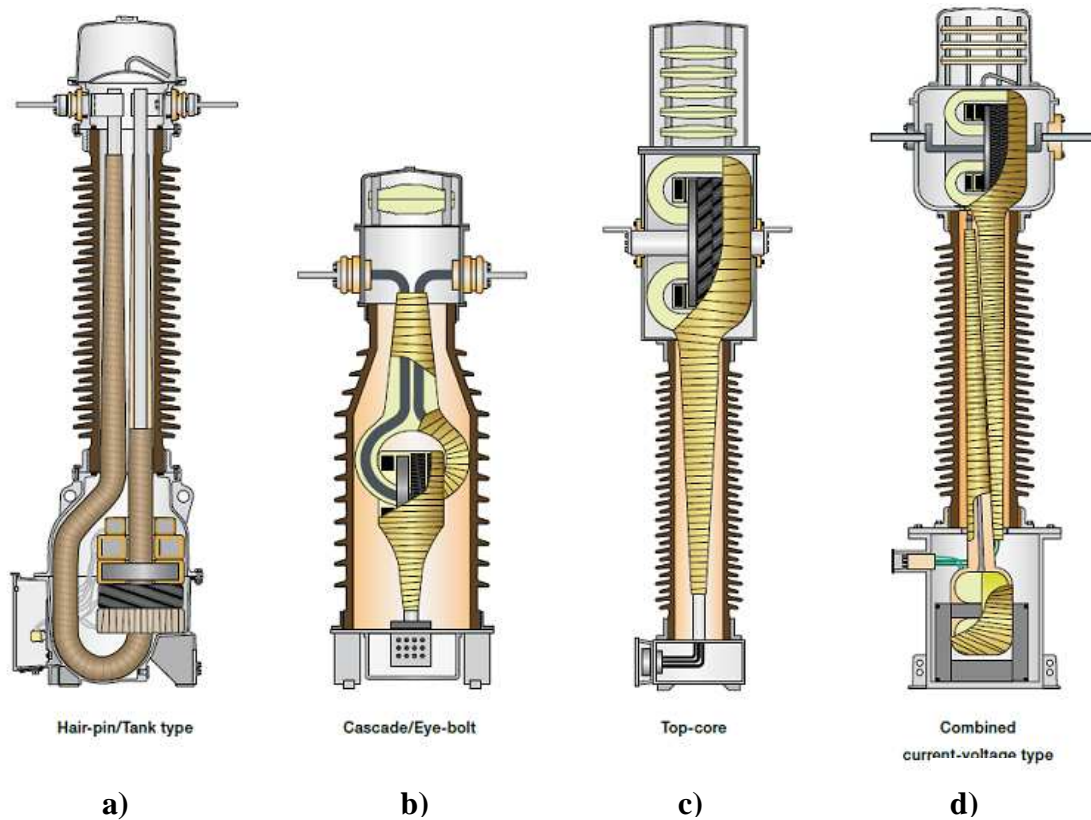
Obr. 1.6: Provedení mag. obvodu a vinutí: a) hair-pin b) top-core (převzato z [19])

Výhody **Hair-pin** jsou v níže položeném těžišti, proto je odolnější proti zemětřesení, můžeme tedy použít těžší jádra, aniž by bylo potřeba zesílit izolátor. Olej cirkuluje v primárním vodiči ve tvaru trubky a zajišťuje tak rovnoměrnou teplotu po celém průřezu. Jeho nevýhodou je použití delšího primárního vodiče, což znamená i vyšší tepelné ztráty. [19]

**Eye-bolt** je kombinací hair-pine a top-core. Těžko se zde dělají velká jádra, protože během jejich izolování musí být sestavena na primárním vodiči. Obtížně se chladí, proto je třeba omezit zkratové proudy a problém použití dlouhého primárního vodiče dělá tento typ pro proudy vyšší než 2000 A nepříliš konkurenceschopný ostatním typům transformátorů proudů. [19]

Typ **Top-core** má krátký primární vodič s nízkými tepelnými ztrátami, může být použit pro vysoké jmenovité proudy a krátkodobé zkratové proudy. Protože má vysoko položené jádro, jehož rozměry jsou omezeny, je kladen velký důraz na izolátor a při použití velkých jader je nevhodný v oblastech se zvýšeným rizikem zemětřesení. [19]

**Kombinované PT** mají proudovou i napěťovou část umístěnou v jednom pouzdře, kde proudová část se nachází v hlavě transformátoru a napěťová část ve spodní části nádrže. [27]



Obr. 1.7: Druhy konstrukce PTP: a) Hair-pin/Tank type b) Cascade/ Eye-bolt c) Top-core d) kombinovaný transformátor (převzato z [19])

## 2 Izolační systémy přístrojových transformátorů

Podle provedení izolačních systémů lze rozdělit transformátory do tří základních skupin: na suché, zalévané a kapalné izolanty ve spojení s tuhými izolanty.

Podle druhu izolace a chlazení se přístrojové transformátory rozdělují na [16]:

- a) suché - se vzduchovým chlazením a porcelánovou či jinou izolací
- b) suché - se vzduchovým chlazením, jehož vinutí je zalito v epoxidu nebo jiné izolační hmotě
- c) suché – s SF<sub>6</sub> jako izolačním médiem
- d) kapalné izolanty ve spojení s tuhými izolanty

### 2.1 Izolační materiály

Při provozu každého elektrického zařízení dochází k celkovému oteplení stroje a tedy i jeho izolačního systému. Právě izolační systém je jednou z nejdůležitějších částí elektrického zařízení a je tedy nutné, aby materiály používané jako izolanty vyhovely všem náročným požadavkům a byly odolné proti působení vnějším vlivům. [11]

#### 2.1.1 Fluorid sírový SF<sub>6</sub>

Fluorid sírový SF<sub>6</sub> je plyn, který je elektronegativní, bezbarvý, netoxický bez zápachu. Má téměř 3x větší elektrickou pevnost než vzduch cca 89 kV/mm, jeho permitivita se blíží jedné, takže dielektrické ztráty pro čistý SF<sub>6</sub> jsou skoro neměřitelné. Tepelně může být namáhán přibližně do 150 °C. Nejvíce se používá v zapouzdřených rozvodnách transformátorů jako chladicí a izolační medium, ale i ve vypínačích velmi vysokého napětí pro jeho schopnost přerušování oblouku. Je nebezpečný v uzavřených prostorech pro osoby v jeho okolí, protože je pětikrát těžší než vzduch, tím že vytlačuje vzduch z těchto prostor. Dodává se v tlakových lahvích s řádným označením. [1,11]

### 2.1.2 Kompozitní materiály

Tyto materiály jsou v elektrotechnice velmi používané, zvláště tam, kde je potřeba spojit mechanické a elektrické vlastnosti. Kompozitní materiály vznikají spojením nosné složky, pojiva a plniva. Nosnou složkou bývá většinou papír, bavlněná tkanina, polyesterová a polyimidová fólie. Pojivem je epoxid a polyesterová nebo silikonová pryskyřice. Plnivem v elektroizolační technice je nejpoužívanější slída ve formě slídového papíru. [1]

Principiálně se rozdělují na tyto varianty [1]:

#### **Tvrzené papíry**

Tvrzené papíry se používají na různé prvky konstrukčního charakteru. Podle modifikace použité pryskyřice se různé varianty liší v elektrických i mechanických vlastnostech. Pojivem bývají většinou fenolformaldehydová pryskyřice. Mají poměrně vysoké dielektrické ztráty  $\tan \delta$  mezi 0,06 až 0,1 a nižší  $E_p$  mezi 8 a 10 kV/mm. [1]

#### **Tvrzené tkaniny**

Tvrzené tkaniny mají velmi dobré mechanické vlastnosti a jsou vhodné pro výrobu ložisek a prvků podobného charakteru. Existují tkaniny, které se liší jemností, použitým pojivem, a také fyzikálními vlastnostmi. Elektrické vlastnosti mají o něco horší než tvrzené papíry, elektrickou pevnost mají v rozmezí 4 a 5 kV/mm. [1]

#### **Tvrzené skleněné tkaniny**

Tvrzené skleněné tkaniny mají jako nosný materiál skleněnou tkaninu. Mají velmi dobré elektrické i mechanické vlastnosti a lze je používat i při ztížených klimatických podmínkách. Jejich permitivita je mezi 4 a 5, ztrátový činitel 0,05 a elektrická pevnost 10 až 15 kV/mm. Použité pojivo zde může být epoxidová pryskyřice, polyestery či silikonová pryskyřice. [1]

#### **Tvrzené vrstvené dřevo**

Tvrzené vrstvené dřevo je výrobek z přírodního bukového dřeva, který se skládá z dýhových vrstev, prosycuje se pryskyřicí, a poté se nechá vytvrdit. Svými elektrickými vlastnostmi se podobá tvrzeným papírům a tkaninám. Používá se spíše na konstrukční části ve výrobě transformátorů, protože má velmi dobrou schopnost nasáknout olej. [1]

### 2.1.3 Pryskyřice

Pryskyřice se používají v širokém spektru výrobků v elektrotechnice, elektronice, dají se použít i v náročných podmínkách provozu. Slouží jako izolace, mechanická ochrana a ochrana proti vlhkosti a vnějším vlivům prostředí. Podle technologie vytvrzování je lze rozdělit do dvou skupin: na pryskyřice vytvrzované při pokojové teplotě a pryskyřice vytvrzované teplem v peci. Dále se dají rozdělit dle teplotních tříd dle Tab. 1.1 Hodnoty uvedené v tabulce označují odolnost teplotám, které působí na pryskyřice 20 tisíc provozních hodin při zachování jejich zaručených vlastností. Životnost pryskyřice se zkrátí na polovinu, pokud se překročí maximální pracovní teplota o 10 °C. [24]

Tab. 1.1 Rozdělení pryskyřic podle teplotních tříd [24]

Označení teplotní třídy	Maximální pracovní teplota [°C]
Y	90
A	105
B	130
F	155
H	180

### 2.1.4 Kapalné izolanty

Mezi kapalné izolanty patří rostlinné, minerální a syntetické oleje. Plní zároveň funkci izolačního media, a díky dobré tepelné vodivosti a malé viskozitě také funkci chladícího media. [11]

Nejlepším mediem pro všechny elektrické stroje a přístroje vn a vvn je minerální olej na bázi ropy. Jeho zásoby nejsou neomezené, proto je třeba hledat vhodné kapalné izolanty, které by ropné produkty nahradily. [22]

#### Minerální oleje

Minerální oleje jsou přírodní oleje, které získáváme destilací ropy a následnou rafinací. Jsou to směsi různých uhlovodíků, jejichž vlastnosti se mění vlivem různých provozních činitelů např. teplota, záření, oxidace, pohlcování vody a plynů. To znamená, že oleje stárnou, proto je třeba jejich kvalitu kontrolovat a regenerovat je. [11]



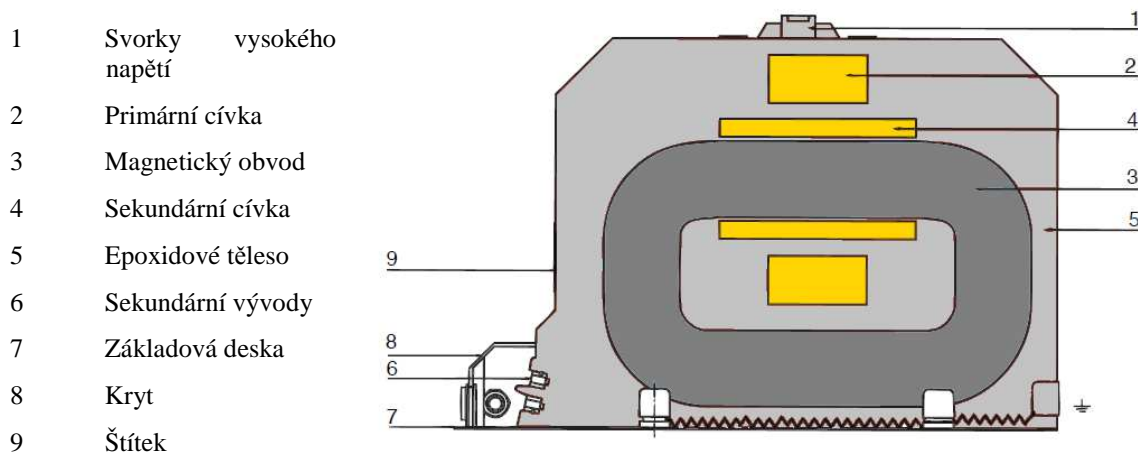
## 2.2 Suché transformátory se zalitým vinutím

Suché PT se zalitým vinutím jsou určeny k měření a jištění rozvodných zařízení vysokého napětí vnitřního i venkovního provedení, a to pro nejvyšší napětí soustavy 1,2 až 52 kV.

Základem různých variant je vždy epoxidové těleso, primární, sekundární vinutí a magnetický obvod. Magnetické obvody jsou vyrobeny z křemičité oceli nebo niklových slitin, které zaručují parametry přesnosti požadovaných proudů a napětí a jsou chráněny proti mechanickým vlivům. [12]

Sekundární vinutí je provedeno různými průřezy vodičů, záleží na velikosti jmenovitého a zkratového proudu PTP. Primární vinutí je tvořeno převážně měděnými pásky, pro vyšší primární proudy jsou použity měděné odlitky. Povrch svorek pro nižší převody je chráněn niklováním, pro vyšší proudy jsou svorky opatřeny ochrannou vrstvou stříbra. Vzájemné uspořádání primárních a sekundárních vinutí záleží na konstrukčním typu transformátoru. [12]

Tvar epoxidových odlitků respektují rozměry rozváděčů, transformátory mohou být celoeoxidové nebo jsou odlitky namontovány na základní desce. Venkovní transformátory jsou odlitky z venkovní epoxidové pryskyřice, která je odolná proti vnějším vlivům. [12]



Obr. 2.1: Řez jednopólově izolovaným PTN (převzato z [12])

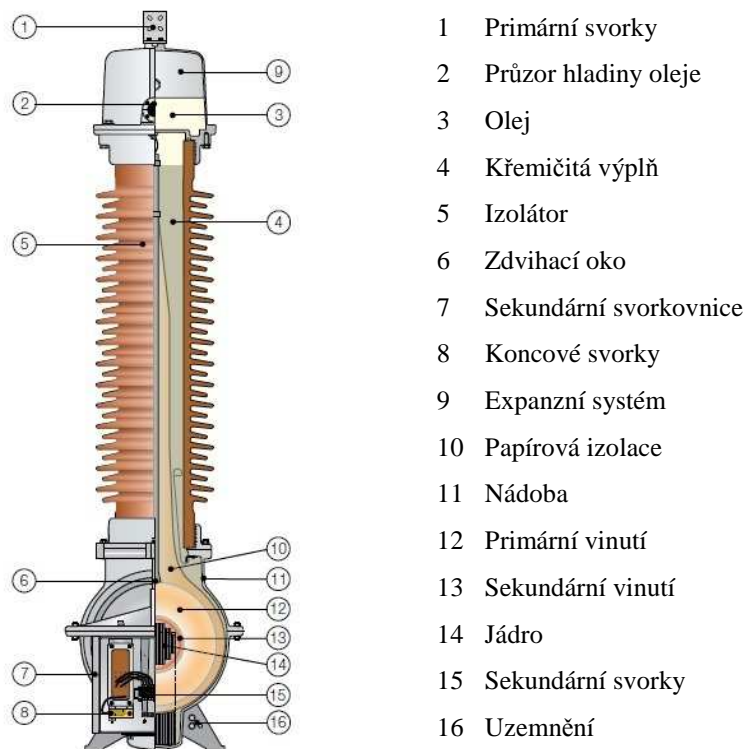
### 2.3 Transformátory s izolačním systémem papír-olej

Primární vinutí je navrženo jako vícevrstvý dvojité smaltovaný vodič s izolační vrstvou speciálního papíru. V základním provedení má transformátor sekundární svorky jako měřicí a terciální jako jistící. Sekundární vinutí je také navrženo jako dvojité smaltovaný vodič izolovaný od jádra a primárního vinutí lepenkou a papírem. [20]

Pojmem papír se rozumí veškeré izolace na bázi celulózy, jako jsou různé lepenky, ale i samotný papír, který tvoří především závitovou izolaci vodičů vinutí. Tyto materiály se vyznačují poměrně dobrými elektrickými vlastnostmi za předpokladu, že je z nich odstraněna veškerá vlhkost. [2]

Vinutí se nechá vyschnout ve vakuu. Po sestavení transformátoru se všechny volný prostor (přibližně 60 %) plní čistými a suchými křemičitými zrny, které minimalizují množství oleje a poskytují mechanickou oporu jádra a primárního vinutí. Poté se napustí odplyněným minerálním olejem nebo syntetickým olejem. Izolace papír-olej je poté uzavřena a hermeticky oddělena od vlivů okolního prostředí membránou z nerez oceli. Tato membrána kompenzuje tepelné dilatace oleje a současně plní funkci ukazatele hladiny oleje. [20]

Spodní část transformátoru tvoří hliníková nádrž, kde jsou umístěny vinutí a jádra. Nádrž je vyrobena z hliníkových slitin, které poskytují vysokou odolnost proti korozi. Jako izolátor je v základním provedení použit glazovaný porcelán nebo kompozitní silikonová pryž. Právě silikonové izolátory se v současnosti velmi rozšiřují pro jejich jedinečné odolnosti proti vlhkosti, nízké hmotnosti a navíc nejsou tak křehké jako porcelánové. [19,20]



Obr. 2.2: Řez olejovým přístrojovým transformátorem (převzato z [20])

Transformátory s izolačním systémem papír-olej se vyrábí v mnoha provedeních do napěťové hladiny až 550 kV. Olejový transformátor je investičně levnější než suchý, ale jeho provoz je však nákladnější. Jejich nevýhoda je právě olej, ten jako každá organická látka stárne. Jeho rozkladem vznikají kyseliny, voda a pevná látka. Pokud izolační papír nasákne, zhoršuje se jeho izolační stav a dříve či později dojde k poruše transformátoru.

## 2.4 Suché transformátory s SF<sub>6</sub> jako izolačním mediem

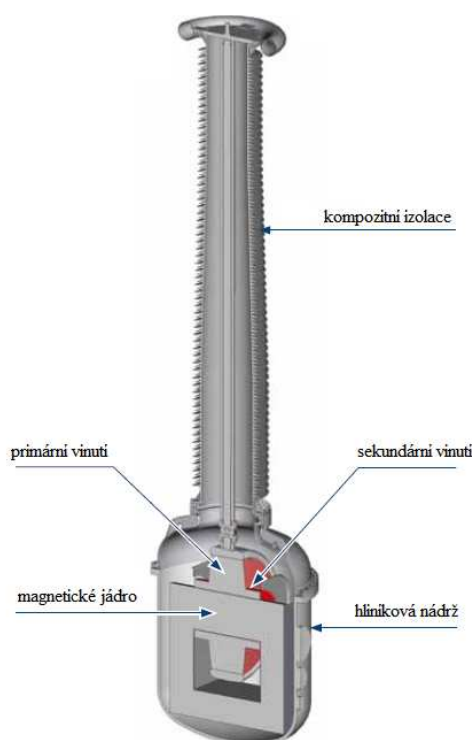
Tento typ izolačního systému je velmi rozšířen pro nejvyšší hladiny napětí vvn (245 až 550 kV). Nahrazuje transformátory s izolací olej-papír, protože je bezpečnější na provoz i údržbu.

Strukturou jsou velmi podobné olejovým transformátorům. Elektrická pevnost SF<sub>6</sub> je až třikrát větší než vzduchu a srovnatelná s elektrickou pevností oleje. Mohou být konstruovány na vyšší přípustné teploty oproti olejovým a mohou mít vyšší účinnost chlazení, pokud se zvýší tlak plynu. Pro lepší využití chladicí charakteristiky plynu se používá více chladících kanálů. Zvýšením tlaku plynu se vyžadují lepší mechanické vlastnosti nádrže

transformátoru, izolátoru i těsnění. Pro případ poruchy je k nádobě připojen měřič hustoty pro dálkové ovládání vnitřní izolace pomocí tlakoměru a přetlakové zařízení. [19,21]

Izolace vodičů je provedena pomocí izolačního filmu polyethyltereftalatu (PET) na rozdíl oproti papírové izolaci olejových transformátorů. Má nejen vyšší nechanickou a elektrickou pevnost, ale umožňuje také lepší dílenské zpracování. Je také konstruován na vyšší přípustnou teplotu (120 až 130 °C) oproti 105 °C papírové izolace. [21,23]

Před plněním prostoru SF<sub>6</sub> je důležité, aby se v první řadě ve vakuu odstranil všechen vzduch a vlhkost, protože je poté velmi obtížné odstranit absorbované vlhkosti z izolátorů nebo podpůrných pouzder. [32]



Obr. 2.3: Řez suchým přístrojovým transformátorem s SF<sub>6</sub> (převzato z [21])

#### Výhody a nevýhody transformátorů s SF<sub>6</sub> oproti olejovým [19,21]:

- 1) Transformátor je nehořlavý a nevýbušný - není potřeba hasicích zařízení a protipožární stěna
- 2) Snadná údržba a inspekce - SF<sub>6</sub> stárne pomaleji než izolační olej
- 3) Snadná instalace – plyn může být napuštěn do nádoby transformátoru přímo z tlakových lahví

- 4) Menší rozměry a hmotnost – není zapotřebí konzervátor a tlaková ochrana, což snižuje hmotnost a výšku transformátoru
- 5) Oproti olejovým nemají tak dobré izolační vlastnosti
- 6) Plyn zde slouží pouze pro izolační účely
- 7) Vysoký přetlak plynu vyžaduje vyšší výkonost izolátorů, nádoby a těsnění

## 2.5 Degradace izolačních materiálů a systémů

Při výrobě elektrických zařízení se konstruktéři snaží efektivně získat největší výkon za co nejmenších rozměrů, což s sebou přináší zvýšené namáhání izolací. Elektroizolační materiály jako klíčová součást všech elektrických zařízení jsou studovány z hlediska degradace. V diagnostice elektrických strojů se využívá znalostí o elektroizolačních materiálech a jejich stárnutí. Z mnoha experimentálně zjištěných charakteristik těchto materiálů vychází diagnostické metody, které jsou popsány v následující kapitole. [1,2]

V praxi jsou prováděny zrychlené zkoušky životnosti, srovnávací zkoušky a další testy, kterými se zjišťuje stav elektroizolačního systému. Kromě elektrických parametrů se sledují i mechanické a tepelné účinky. Přestože proces degradace je funkcí mnoha parametrů např. teploty, obsahu vlhkosti, obsah relativních plynů, obsahu kyselin atd., jako základní parametr v diagnostice transformátorů je teplota, protože řada provozních poruchových stavů se projevuje zvýšením teploty. Sledujeme teploty izolace, teploty oleje jako takového (viz kapitola 3.1.2 Oteplovací zkouška), dále je důležité sledovat stav elektroizolační a chladicí kapaliny. Rozložení teploty není homogenní a části pracující na vyšší teplotě se budou více degradovat. [2,3]

Stárnutí je definováno normou ČSN EN 60505 jako postupné nevratné změny vlastností elektroizolačního systému důsledkem působení jednoho nebo více ovlivňujících faktorů. Na sledovaný systém mohou působit vlivy elektrické, tepelné, mechanické včetně vlivů prostředí způsobující stárnutí systému, které vedou ve svém důsledku k poruše. [17].

Stárnutí sledovaného elektroizolačního systému může probíhat v jednotlivých etapách, ve kterých je namáhán různými vlivy. Mohou to být kombinace působících faktorů nebo také pouze jeden.

Hlavní příčiny degradace elektroizolačních materiálů patří:

**Elektrické stárnutí**, kam můžeme zařadit účinky působení elektrického pole a vznik částečných výbojů, elektrických trsů, elektrolýzy, účinky prostorových nábojů a podobně. [2]

**Tepelné stárnutí** jsou chemické a fyzikální změny, které vznikly důsledkem chemických degradačních reakcí vlivem teploty. Jedná se například o depolymerační reakce a difúzi. [2]

**Mechanické stárnutí** je třeba sledovat, už od procesu výroby a jejích jednotlivých kroků, přes montáž a samozřejmě během provozu zařízení. Může být jednou z nejčastějších příčin degradace vlivem působení elektromagnetických, elektrodynamických a tepelných sil. [2]

Stárnutí je obecně ovlivňováno přítomností dalších působících faktorů jako: vlhkost, kyslík, chemikálie, mikroorganismy, povětrnostní vlivy, znečišťující látky, radiace. [2]

### 3 Diagnostika přístrojových transformátorů

Vlivem provozu a okolních podmínek dochází ke stárnutí jednotlivých částí transformátorů a tím tedy i ke změnám jeho důležitých elektrických vlastností. Zjištěním stupně degradace se zabývá obor elektrotechnické diagnostiky. Z výsledků měření a zkoušek musí být patrná míra změn, ale také určení, zda se jedná o děj trvalý nebo vratný. [2]

Hlavním cílem diagnostiky transformátorů je ověření, jestli vyhovuje a splňuje stanovené podmínky, které jsou v souladu s normami a jestli nový přístrojový transformátor odpovídá objednavce v plném rozsahu. [2]

Havárie přístrojových transformátorů může způsobit poškození i okolních zařízení vážně ohrozit personál rozvodny. Předcházet těmto haváriím se dá prováděním diagnostiky těchto přístrojů. Nejčastější příčiny vznikají právě poruchou elektroizolačních systémů.

Diagnostické metody z hlediska ověřování funkčnosti se dělí do dvou skupin na **off-line diagnostiku**, kde je nutné pro zkoušky odstavit stroj z provozu a **on-line diagnostiku**, která nepřetržitě sleduje stav transformátoru při jeho běžném provozu. [2]

Diagnostická šetření na transformátorech lze rozdělit na **výrobní a provozní**. Výrobní se týkají fáze vzniku a života těchto zařízení, které probíhají při výrobě, zahrnují také vstupní kontrolu používaných materiálů, dále zkoušky mezioperační. Dále se zkoušky z hlediska funkčnosti celých transformátorů dělí na **kusové, typové a zvláštní**. Kusovými zkouškami je podroben každý vyrobený transformátor. Typová zkouška je prováděna na každém novém typu, podstatných změnách konstrukce, výrobního postupu nebo použitého materiálu. Při sériové výrobě se tato zkouška opakuje po určitém počtu vyrobených kusů nebo po uplynutí stanové doby, může se provádět i při předání výroby jinému výrobcí, nebo pokud jsou opakovaně zjištěny nedovolené odchylky. Posledním typem jsou zkoušky zvláštní, které se provádějí po dohodě mezi výrobcem a provozovatelem, jejich provádění není stanoveno žádnými normami. [2]

Neexistuje však jedna metoda pro spolehlivou diagnostiku PT. Metody by měly být vybrány s přihlédnutím ke konstrukci různých provedení přístrojových transformátorů. **Běžné kontroly** jako vnější prohlídka, odběr vzorků oleje s on-line měřením částečných výbojů a ztrátovým činitelem tvoří základ hodnocení stavu PT. Právě běžné pochůzkové vizuální

kontroly stavu transformátoru jsou často podceňovány, například úniky oleje mohou výrazně ovlivnit životnost zařízení, protože cestou kudy proniká olej, se může dostat dovnitř i vlhkost. Včasná údržba a renovace může mít vysoké náklady, ale bude přispívat k prodloužení lhůty bezpečnosti a zabezpečení systému. [26]

### 3.1 Typové zkoušky

Typové zkoušky se provádějí na každém vyrobeném typu transformátoru, podle norem mezi ně patří [13,14]:

- a) zkoušky krátkodobými proudy
- b) oteplovací zkouška
- c) zkoušky primárního vinutí impulsním napětím
- d) zkouška za deště pro transformátory určené do venkovního prostředí
- e) měření přesnosti
- f) zkouška zkratové odolnosti

#### 3.1.1 Zkoušky krátkodobými proudy

Tyto zkoušky se provádí jen u proudových a kombinovaných přístrojových transformátorů. Zkouška krátkodobým tepelným proudem  $I_{th}$  se provádí při teplotě okolí transformátoru mezi 10 °C až 40 °C a při zkratovaném sekundárním vinutí. Hodnota součinu  $I_2$  nesmí být menší než  $I_{2th}$  a trvá po dobu 0,5 až 5 sekund. [13]

Dynamická zkouška musí být provedena také se zkratovanými sekundárními vinutími. Hodnota dynamického proudu  $I$  nesmí mít vrcholovou hodnotu primárního proudu menší než jmenovitý dynamický proud  $I_{dyn}$  alespoň v prvním vrcholu. [13]

Transformátor při této zkoušce vyhověl pokud [13]:

- a) Není viditelně poškozen
- b) Jeho chyby po demagnetizaci se neliší od chyb zaznamenaných před zkouškami o více než polovinu mezních chyb v jeho třídě přesnosti
- c) Vyhovuje dielektrickým zkouškám se zkušebními napětími sníženými na 90% předepsaných hodnot
- d) Při prohlídce izolace vedle povrchu přívodů se neukazuje významné poškození (například zuhelnatění)



### 3.1.2 Oteplovací zkouška

Základ této zkoušky spočívá v oteplení transformátoru na ustálený teplotní stav jeho postupným zatěžováním a v měření oteplení těchto částí nad teplotu okolí, které má teplotu od 10 °C do 35 °C. Při zkoušce by neměl být transformátor vystaven žádným vnějším vlivům jako: působením srážek, tepelnému záření. [2,13]

Pro správný výsledek těchto zkoušek musí být transformátor sestaven tak, jak bude sestaven v provozu. Při zkouškách přímého zatížení je jedno vinutí transformátoru napájeno jmenovitým napětím a druhé vinutí je zatíženo tak, aby jím tekla jmenovitý proud. U zkoušek vzájemného zatížení je zkoušený transformátor spojen paralelně k jinému transformátoru se stejným jmenovitým napětím. Použitím transformátorů o různých převodech a změnou převodu regulováním nebo použitím pomocného zdroje se nastaví jmenovitý proud na zkoušeném transformátoru. [14]

Při zkoušce se určují hodnoty: střední oteplení vinutí ( $\Delta v_w$ ), oteplení povrchu magnetického obvodu ( $\Delta v_m$ ) u suchých transformátorů, oteplení horních vrstev oleje ( $\Delta v_o$ ), střední oteplení oleje ( $v_o$ ), pokud předpokládáme oteplení oleje v blízkosti konstrukčních prvků ( $\Delta v_c$ ), pak se měří i oteplení konstrukčních prvků ( $\Delta v_k$ ). Tyto hodnoty se vypočítají jako rozdíl teplot, které jsou zjištěny při zkouškách a teploty chladícího prostředí  $v_a$ . [2]

Střední oteplení vinutí ( $\Delta v_w$ ) se určuje na základě měření odporu na konci zkoušek podle vztahu:

$$\text{pro měď} \quad v_w = \frac{R_1}{R_2} (235 + v_{w1}) - 235 \quad (3.1)$$

$$\text{pro hliník} \quad v_w = \frac{R_1}{R_2} (225 + v_{w1}) - 225 \quad (3.2)$$

kde  $v_w$  je střední teplota vinutí [°C]

$R_1$  je odpor vinutí při teplotě  $v_{w1}$  [Ω]

$R_2$  je odpor vinutí při teplotě  $v_w$  [Ω]

$v_{w1}$  je teplota při odečtu hodnoty odporu  $R_1$  [°C]

Odpor  $R_1$  se měří za studena,  $R_2$  měříme po odpojení napájecího zdroje nebo metodou superpozice. [14]

### 3.1.3 Zkoušky primárního vinutí impulsním napětím

Těmito zkouškami kontrolujeme, zda je elektrická pevnost izolace vyhovující. Pro měření se zkušební napětí musí být přivedeno mezi svorky primárního vinutí a zem. Kostra, obal, jádro a všechny svorky sekundárního vinutí musí být uzemněny. Impulzní zkoušky jsou obecně založeny na přivedení referenčních a zkušebních impulsů, které mají amplitudu mezi 50 a 70 % jmenovitého zkušebního napětí. Důležité je také zaznamenat vrcholovou hodnotu a tvar impulsního napětí, protože porucha je dána změnou tvaru průběhu impulsního napětí u retenčních a zkušebních impulsů. [13]

Mezi zkoušky impulsním napětím patří zkouška atmosférickým impulsem a zkouška spínacím impulsem. Atmosférický impulz je takový impulz, který má trvání doby čela do  $20 \mu s$  a není přerušen průrazným (přeskokovým výbojem). Impulzy s delší dobou čela se označují jako spínací. [2,13]

#### Zkouška atmosférickým impulsem

Zkušební napětí přivedené na primární svorky musí nabývat hodnot, které by měly odpovídat normou definovaným hladinám [13,14,15] uvedených v příloze 1 a 2. Zkouška se provádí s napětím kladné i záporní polarity a to tak, že se přiloží 15 po sobě jdoucích impulsů každé polarity bez korekce na atmosférické podmínky. Pro vinutí s efektivní hodnotou  $U_m$  větší než 300 kV se přiloží pouze 3 po sobě následující impulsy každé polarity. [13]

Atmosférický impulz pro tuto zkoušku je takový atmosférický impulz, který má trvání doby čela do  $20 \mu s$ . Impulzy delší s dobou čela se označují jako spínací. [2]

Transformátor při zkoušce vyhověl pokud [13]:

- a) Nedošlo k průrazu vnitřní izolace
- b) Nedošlo k přeskoku podél vnější izolace
- c) Nedošlo k více než dvěma přeskokům podél vnější obnovující se izolace (pro vinutí s  $U_m$  menší než 300 kV)
- d) Nebyl zjištěn žádný jiný důkaz poruchy izolace (například nedošlo ke změnám v průběhu zaznamenávaných veličin)

### Zkouška spínacím impulsem

Touto zkouškou se posuzuje kvalita vnitřní izolace. Zkušební napětí musí mít příslušnou hodnotu nejvyššího napětí pro zařízení definovanou normami [13,14,15], uvedenou v přílohách 1 a 2, dle určené izolační hladiny. Zkouška se provádí s kladnou polaritou napětí o patnácti za sebou následujících impulsích, které jsou korigovány na atmosférické podmínky. Pro venkovní transformátory musí být tato zkouška provedena za deště. [13]

Transformátor vyhověl při zkoušce pokud [13]:

- a) Nedošlo k průrazu vnitřní izolace
- b) Nedošlo k průrazu podél vnější izolace
- c) Nedošlo k více než dvěma přeskokům podél vnější obnovující se izolace
- d) Nebyl zjištěn žádný jiný důkaz poruchy izolace (například nedošlo ke změnám v průběhu zaznamenávaných veličin)

#### 3.1.4 Zkouška za deště venkovních transformátorů

Pro vinutí s  $U_m$  do 300 kV musí být zkouška provedena střídavým napětím o průmyslovém kmitočtu a hodnotou zkušebního napětí uvedené v příloze 1 podle norem [13,14,15] v závislosti na nejvyšším napětí pro zařízení, korigovanou na atmosférické podmínky. Pro vinutí s  $U_m \geq 300$  kV se zkouška provádí spínacími impulsy kladné polaritě a hodnotou zkušebního napětí uvedené v příloze 2 podle norem [13,14,15] v závislosti na nejvyšší hodnotě napětí pro zařízení a jmenovité izolační hladiny. [13]

#### 3.1.5 Měření přesnosti

##### Požadavky na přesnost transformátorů napětí

##### Třída přesnosti

Podle normy ČSN EN 60044-2 je třída přesnosti u měřících transformátorů napětí určena nejvyšší dovolenou chybou napětí, vyjádřenou v procentech při jmenovitém napětí a zátěži, předepsanou pro příslušnou třídu přesnosti. Pro všechny transformátory napětí určené pro jistící účely musí platit třídy přesnosti jako u měřících transformátorů, ale navíc musí být zařazeny do jedné z normalizovaných tříd přesnosti s písmenem P. Třídy přesnosti pro jistící transformátory napětí jsou určeny nejvyšší dovolenou chybou, která je předepsána pro danou

třídu přesnosti od 5 % jmenovitého napětí do napětí odpovídající jmenovitému činiteli zvýšení. [14]

Třídy přesnosti pro měřicí transformátory jsou: 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1,0 ; 3,0

Třídy přesnosti pro jistící transformátory napětí: 3P ; 6P

Tab. 3.1 Dovolené chyby napětí a úhlu měřících transformátorů napětí [14]

Třída	Procentní chyba napětí ±	Chyba úhlu ±	
		Minuty	Centiradiány
0,1	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	1,0	40	1,2
3,0	3,0	-	-

Tab. 3.2 Dovolené chyby napětí a úhlu jistících transformátorů napětí [14]

Třída přesnosti	Procentní chyba napětí ±	Chyba úhlu ±	
		Minuty	Centiradiány
3P	3,0	120	3,5
6P	6,0	240	7,0

### Dovolené chyby napětí a úhlů

Pro transformátory napětí nesmí chyba napětí a úhlu překročit hodnoty, které jsou uvedeny v Tab. 3.1 při napětí mezi 80÷100 % jmenovitého napětí a jmenovitou zátěží 25÷100% při induktivním účinníku 0,8. Tyto chyby musí být stanoveny na svorkách transformátoru a měly by zahrnovat také vliv pojistek a rezistorů, které jsou součástí transformátoru. [14]

### Typové zkoušky přesnosti

Aby se prověřili požadavky, které jsou uvedeny v Tab. 3.1 a Tab. 3.2 se u měřících transformátorů napětí provádí zkoušky při 80 %, 100 % a 120 % jmenovitého napětí a to při 25 % a 100% jmenovité zátěže. Pro jistící se typová zkouška provádí při 2 %, 5 % a 100 % jmenovitého napětí a při jmenovitém napětí násobeném jmenovitým činitelem zvýšení, který může nabývat hodnot: 1,2; 1,5 nebo 1,9 při jmenovité zátěži a účinníku jako u měřících transformátorů. [14]

## Požadavky na přesnost transformátorů proudu

### Třída přesnosti

Stanovení třídy přesnosti u měřících transformátorů proudu je určeno podle nejvyšší dovolené chyby proudu vyjádřené v procentech při jmenovitém proudu, předepsané pro příslušnou třídu přesnosti. Normalizované třídy přesnosti jsou: 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5. [13]

Třída přesnosti jistících transformátorů proudu je určena nejvyšším přípustným procentem celkové chyby při krajním primárním proudu jmenovité přesnosti, který je předepsaný pro příslušnou třídu přesnosti. Normalizované třídy přesnosti pro jistící transformátory proudu jsou: 5 P a 10 P. [13]

### Dovolené chyby proudu a chyby úhlu

Pro třídy přesnosti chyba proudu a chyba úhlu při jmenovitém kmitočtu nesmí překročit hodnoty uvedené v Tab. 3.3 pro třídy 0,1 až 1 při sekundární zátěži mezi 25 % a 100 %, u tříd 3 a 5 při hodnotě zátěže mezi 50 % a 100 % jmenovité zátěže. Tato sekundární zátěž by měla mít induktivní účinník 0,8, pokud by zkušební zátěž měla zdánlivý výkon menší než 5 VA, musí se použít účinník rovný jedné. Použití zátěže s hodnotou menší než 1 VA je zakázáno. [13]

Tab. 3.3 Dovolené chyby proudu a chyby úhlu měřících transformátorů proudu [13]

Třída přesnosti	± Chyba proudu (poměr) v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku				± Chyba úhlu v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku							
					Minuty				Centiradiány			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,1
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Tab. 3.4 Dovolené chyby pro měřící transformátory proudu (třídy 3 a 5) [13]

Třída přesnosti	± Chyba proudu (poměr) v procentech jmenovitého proudu uvedeného v následujícím řádku	
	50	120
3	3	3
5	5	5

Dovolené chyby jistících transformátorů proudu nesmí při jmenovitých hodnotách kmitočtu a zátěže nesmí překročit chyba proudu, chyba úhlu a celková chyba hodnoty, které jsou uvedeny v Tab. 3.5. [13]

Tab. 3.5 Dovolené chyby jistících transformátorů proudu [13]

Třída přesnosti	Chyba proudu při jmenovitém primárním proudu [%]	Chyba úhlu při jmenovitém primárním proudu		Celková chyba při jmenovitém primárním nadproudu
		Minuty	Centiradiány	
5P	±1	±60	±1,8	5
10P	±3	-	-	10

### Typové zkoušky přesnosti

Pro měřicí transformátory třídy 0,1 až 1 se typové zkoušky provádí pro každou hodnotu proudu uvedenou v Tab. 3.5 a při 25% a 100% jmenovité zátěže. Transformátory třídy 3 a 5 se zkouší pro dvě hodnoty proudu, které jsou uvedeny v Tab. 3.4 pro 50 % a 100% jmenovité zátěže. [13]

Pro splnění požadavků na celkové chyby jistících transformátorů, které jsou uvedeny v Tab. 3.5 se provádějí měření, kdy sinusovým proud velikosti jmenovitého primárního nadproudu prochází primárním vinutím, na sekundární vinutí je připojena jmenovitá zátěž a induktivní účinník musí být mezi 0,8 a 1. [13]

### 3.1.6 Zkouška zkratové odolnosti

Tato zkouška se provádí u transformátorů napětí a to za účelem ověření, zda je transformátor navržen a vyroben tak, aby vyhověl bez poškození působením tepelných a mechanických vlivů vnějšího zkratu trvajících 1 s. Transformátor je napájen z primární strany a sekundární vinutí jsou zkratována. [14]

## 3.2 Kusové zkoušky

Následující zkoušky se provedeny na každém transformátoru [13,14]:

- a) Kontrola správnosti značení svorek
- b) Zkoušky střídavým napětím primárního vinutí
- c) Měření částečných výbojů
- d) Zkouška střídavým napětím sekundárního vinutí
- e) Zkouška střídavým napětím mezi částmi vinutí
- f) Přepět'ová zkouška mezizávitové izolace

### 3.2.1 Zkoušky střídavým napětím primárního vinutí

Zkušební napětí musí mít příslušnou hodnotu danou v příloze 1 a příloze 2 dle norem [13,14,15] v závislosti na nejvyšším napětí pro zařízení. Toto napětí se přiloží mezi zkratované vinutí a zem. Zkratované sekundární vinutí, kostra, obal a jádro musí být spojeno se zemí. [13]

#### **Zkouška přiloženým napětím průmyslového kmitočtu**

Tato zkouška ověřuje elektrickou pevnost izolace zkoušeného vinutí proti ostatním vinutím a uzemněným částem. Izolační systém v tomto prostoru je tvořen izolací vodičů a válce z transformátorové lepenky. Zkouška se provádí na kompletně smontovaných transformátorech a to po dobu alespoň 60 s. Zkušební napětí se měří na straně vyššího napětí transformátoru. [2,14]

Pro dvoupólově izolované transformátory se zkušební napětí přiloží mezi zem a mezi všechny svorky primárního napětí vzájemně propojené. Kostra, jádro a všechny svorky sekundárního vinutí musí být vzájemně propojeny a uzemněny. [14].

Pro jednopólově izolované transformátory se zkušební napětí průmyslového kmitočtu efektivní hodnoty 3 kV po dobu 60 sekund přivede mezi svorku primárního vinutí, která má být uzemněna a zem. [14]

Transformátor při této zkoušce vyhověl, pokud nedošlo k poklesu zkušebního napětí a nedovoleným poškozením. Nedovolená poškození se posuzují podle příznaků, jako jsou například: nespojitá změna údajů přístrojů, přeskoky v ochranném jiskřišti, částečné poškození izolace, slyšitelné zvuky výbojů z nádoby, uvolňující se plyny nebo dým. [2]

### **Zkouška indukovaným napětím**

Při zkoušce indukovaným napětím může být kmitočet zkušebního napětí vyšší než jmenovitý, kvůli zabránění syčení magnetického jádra. Zkouška trvá po dobu 60s. [14]

Podle uvážení výrobce se zkouška provádí napájením sekundárního vinutí napětím takové velikosti, aby v primárním napětí bylo indukováno předepsané zkušební napětí. Nebo se primární vinutí napájí přímo předepsaným zkušebním napětím. Toto napětí se měří v obou případech na straně primárního vinutí. Kostra, obal, jádro, jedna svorka každého sekundárního vinutí a jedna svorka každého primárního vinutí musí být vzájemně propojeny a uzemněny. [14]

Pro vinutí s  $U_m \geq 300$  kV se hodnota zkušebního napětí volí podle přílohy 2 v závislosti na jmenovité hodnotě zkušebního napětí atmosférického impulsu. [14]

### **3.2.2 Měření částečných výbojů**

Částečné výboje mohou vznikat v místech s defektem, které vznikají například: nedokonalou výrobou, špatných technologických krocích, dlouhodobým provozem transformátoru. Měřením částečných výbojů můžeme odhalit vznikající poruchu a tím předejít havárii. [2]

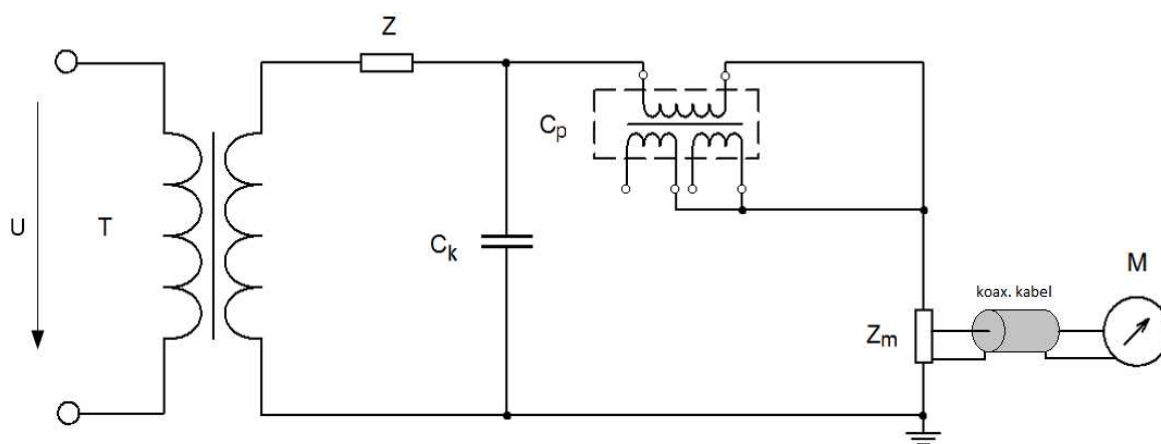
K tomuto měření se transformátor připraví stejně jako k předchozím napěťovým zkouškám. Cílem měření je určení místa vzniku částečných výbojů, toto je nutné pro vyhodnocení hladiny vzniku částečných výbojů v izolačním systému transformátoru. Pokud se jedná o jednu lokalitu, kde se vyskytují částečné výboje, lze vyhodnotit výsledky velmi přesně. Pokud je lokalit více, vyhodnocení může být velice obtížné až nemožné. [2]



Tab. 3.6 Zkušební napětí pro měření částečných výbojů a přípustné hladiny [14]

Typ uzemnění sítě	Zapojení primárního vinutí	Zkušební napětí pro měření částečných výbojů [kV]	Přípustné hladiny částečných výbojů [pC]	
			Vinutí ponořené do kapaliny	Pevná izolace
Sít' s uzemněným středem	Fáze-zem	$U_m$	10	50
		$1,2 U_m / \sqrt{3}$	5	20
	Fáze-fáze	$1,2 U_m$	5	20
Sít' IT nebo kompenzovaná	Fáze-zem	$1,2 U_m$	10	50
		$1,2 U_m / \sqrt{3}$	5	20
	Fáze-fáze	$1,2 U_m$	5	20

Požadavky na částečné výboje jsou určeny pro indukční transformátory napětí a transformátory proudu s  $U_m \geq 7,2$  kV.



- |       |                        |       |  |
|-------|------------------------|-------|--|
| T     | zkušební transformátor | $C_a$ | zkoušený přístrojový transformátor           |
| $C_k$ | vazební kondenzátor    | M     | měřící zařízení pro měření částečných výbojů |
| $Z_m$ | měřící impedance       | Z     | filtr  |

Obr. 3.1 Zkušební obvod pro měření částečných výbojů [14]

Příklad zapojení obvodu pro měření částečných výbojů je na Obr. 3.1. Měřící zařízení musí měřit zdánlivý náboj  $q$  vyjádřený v [pC] a jeho kalibrace by měla být provedena po zapojení do zkušebního obvodu a před vlastním měřením. Zdánlivý náboj impulsu částečného

výboje  $q$  je takový náboj, při jehož mžikovém působení se na svorkách zkoušeného transformátoru krátkodobě změní napětí a to na takovou hodnotu na jakou by se změnilo při působení částečného výboje. Není to reálný skutečný náboj jako při částečném výboji a nelze tedy měřit přímo. Přesto je to základní diagnostický parametr pro měření a vyhodnocování částečných výbojů. [2,14]

Po předzkušebním namáhání podle metody A nebo B se zkouška provede při napětí podle Tab. 3.6 a měření částečných výbojů probíhá po dobu 30 s. Pokud není jinak stanoveno, volba metody záleží na výrobcí, zvolená metoda musí být zapsána ve zkušebním protokolu. Hladina naměřených částečných výbojů nesmí překročit hodnoty uvedené v Tab. 3.6. [14]

*Metoda A:* Napěťová hladina se dosáhne při snižování napětí po provedené zkoušce indukovaným napětím bez přerušení pro transformátory napětí, pro transformátory proudu se zkouška provede po zkoušce přiloženým napětím průmyslového kmitočtu. [13,14]

*Metoda B:* Měření částečných výbojů se provede po zkoušce indukovaným napětím pro PTN nebo po zkoušce přiloženým napětím průmyslového kmitočtu pro PTP. Napětí se zvyšuje na 80% zkušebního napětí, poté na této hodnotě zůstane po dobu alespoň 60 sekund a bez přerušení se sníží na napětí pro měření částečných výbojů. [13,14]

### 3.2.3 Zkoušky mezi sekcemi vinutí a sekundárními vinutími střídavým napětím

U primárních a sekundárních vinutí rozdělených do dvou nebo více sekcí musí izolace mezi sekcemi vyhovět při zkoušce jmenovitým krátkodobým střídavým napětím průmyslového kmitočtu efektivní hodnoty 3 kV po dobu 1 minuty. [14].

Izolace sekundárních vinutí musí vyhovět při zkoušce jmenovitým krátkodobým střídavým napětím průmyslového kmitočtu efektivní hodnoty 3 kV. [13].

Zkušební napětí se přiloží postupně mezi zkratované svorky každé sekce vinutí nebo každé sekundární vinutí a zem. Kostra, obal, jádro a svorky všech ostatních vinutí nebo sekcí musí být spojeny dohromady a uzemněny. [14]

### 3.2.4 Přepěťová zkouška mezizávitové izolace

Přepěťová zkouška mezizávitové izolace se provádí u PTP a podle jedné z následujících metod. Pokud není jinak stanoveno, tak volba záleží na výrobcí. [13]

*Metoda A:* Při rozpojených sekundárních svorkách se na primární vinutí po dobu jedné minuty přivádí sinusový proud o kmitočtu mezi 40 a 60 Hz o efektivní hodnotě odpovídající jmenovitému primárnímu proudu. Použitý proud musí být omezen, pokud zkušební napětí dosáhne vrcholové hodnoty 4,5 kV před dosažením jmenovitého proudu. [13]

*Metoda B:* Při rozpojených primárních svorkách se ke svorkám každého sekundárního vinutí připojí na 1 minutu předepsané zkušební napětí, efektivní hodnota sekundárního proudu nesmí překročit hodnotu jmenovitého sekundárního proudu a kmitočet 400 Hz. [13]

### 3.3 Zvláštní zkoušky

Následující zkoušky se provádí po dohodě mezi výrobcem a zákazníkem [13,14,15]:

- a) Zkouška primárního vinutí useknutým atmosférickým impulsem
- b) Měření ztrátového činitele  $\tan \delta$  a kapacity vinutí
- c) Zkouška mnohonásobným useknutým impulsem
- d) Mechanické zkoušky
- e) Měření přenesených přepětí

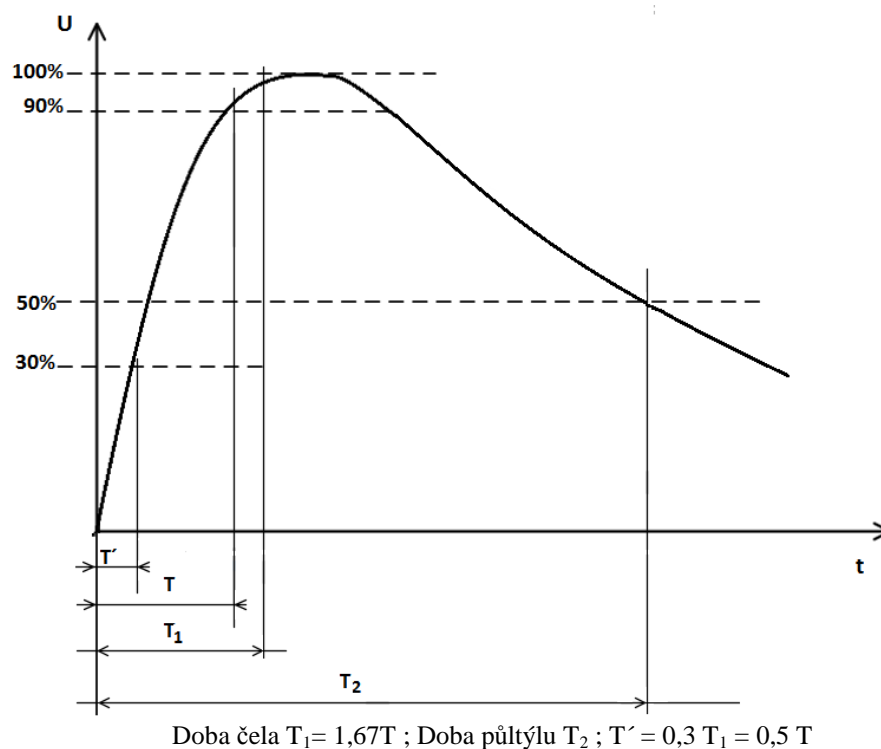
#### 3.3.1 Zkouška primárního vinutí useknutým atmosférickým impulsem

Tato zkouška se provádí pouze zápornou polaritou a je kombinována se zkouškou plným atmosférickým impulsem. Plný atmosférický impulz je takový impulz, který není přerušen průrazným výbojem. Normalizovaný atmosférický impulz má trvání doby čela  $1,2 \mu\text{s}$  a dobu pultýlu  $50 \mu\text{s}$ . [2,14]

Napětí musí mít tvar normalizovaného atmosférického impulzu useknutého mezi 2 a  $5 \mu\text{s}$ . Obvod musí být upraven tak, aby velikost napětí překmitu na opačnou polaritu impulzu byla omezena na 30 % vrcholové hodnoty. Zkušební napětí při plném impulzu musí mít hodnotu podle přílohy 1 a 2 dle norem [13,14,15] závislou na nejvyšším napětí pro zařízení. Primární vinutí musí vyhovět useknutému atmosférickému impulzu o velikosti 115 % plného atmosférického impulzu. [14]

Pořadí přikládání impulzů [14]:

- a) Pro vinutí s  $U_m < 300$  kV
  - jeden plný impulz
  - dva useknuté impulzy
  - čtrnáct plných impulzů
- b) Pro vinutí s  $U_m \geq 300$  kV
  - jeden plný impulz
  - dva useknuté impulzy
  - dva plné impulzy



Obr. 3.2 Plný atmosférický impulz [2]

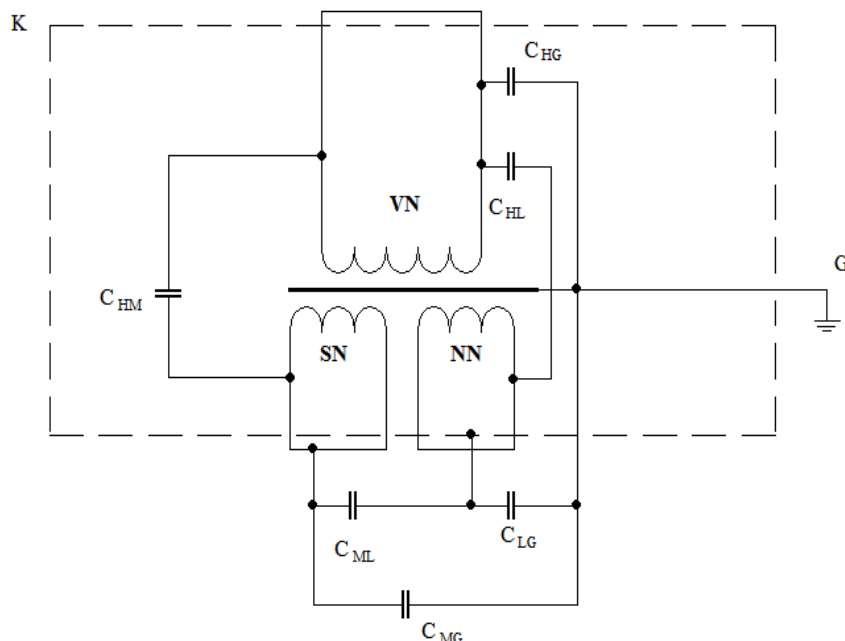
Pokud nastanou rozdíly v průběhu impulzních jevů při plném impulzu před a po aplikaci useknutých impulzů znamená to, že nastala vnitřní porucha. Přeskoky při této zkoušce podél obnovující se vnější izolace neuvažujeme. [13]

### 3.3.2 Měření ztrátového činitele $\tan \delta$ a kapacity vinutí

Ztrátový činitel určuje činné ztráty polarizací v izolaci. Čím vyšší je hodnota ztrátového činitele, tím se izolace více zahřívá a rychleji stárne. Tím nám dává informaci o celkovém stavu izolace a z jeho velikosti, která je ovlivněna pevnou i kapalnou částí dielektrika, lze poznat, zda je izolační soustava zestárlá nebo navlhla. Navlhla izolace se projevuje poměrně vysokou a stabilní hodnotou ztrát. Obsah vlhkosti v izolaci vede při zvyšování napětí k poklesu ztrátového činitele. [2]

Kapacita vinutí se k hodnocení nepoužívá. Její změny se však mohou projevovat poškozením izolace, a pokud se jedná o lokální poruchy, tak je pomocí těchto změn i odhalit. Velikost kapacity vinutí se proto sleduje jako kritérium hodnocení kvality izolantu, proto by se v provozu transformátoru neměla příliš lišit. [2]

Měření ztrátového činitele a kapacity vinutí se provádí po zkoušce střídavým napětím průmyslového kmitočtu primárního vinutí, kdy se mezi zkratované primární vinutí transformátoru a zem přivede napětí. Všechna zkratovaná sekundární vinutí, stínění a izolované kovové pouzdro se připojí k měřicímu můstku. Tato zkouška se požaduje u transformátorů s  $U_m \geq 72,5$  kV, jejichž primární vinutí je ponořeno do izolační kapaliny. Zkušební obvod pro trojvinutový PT je znázorněn na Obr. 3.3. Měření se provádí střídavým napětím 10 kV, pokud tomuto napětí nevyhovuje izolační hladina měřeného vinutí, použije se nejbližší nižší zkušební napětí. [13,14]



VN	vinutí vyššího napětí	SN	vinutí středního napětí
NN	vinutí nižšího napětí	K	kostra transformátoru
G	kostra (zem) můstku	CHL	kapacita mezi vinutím vyššího a nižšího napětí
CHG	kapacita mezi vinutím vyššího a kostrou transformátoru	CHM	kapacita mezi vinutím vyššího a středního napětí
CML	kapacita mezi vinutím středního a nižšího napětí	CMG	kapacita mezi vinutím středního a kostrou
CLG	kapacita mezi vinutím nižšího a kostrou transformátoru		

Obr. 3.3 Měření kapacity trojvinutového transformátoru [2]

Schéma při měření kapacity trojvinutového transformátoru je znázorněno na Obr. 3.3. Měřící můstek se zapojí na vinutí VN, SN, NN a na uzemněné jádro a kostru. Hodnoty ztrátového činitele a kapacity se vypočtou z naměřených hodnot při obou polaritách zdroje napětí podle vzorců [2]:

$$tg \delta = \frac{tg \delta_1 \cdot C_1 + tg \delta_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \tag{3.4}$$

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2} \tag{3.5}$$

kde  $C_1$ ,  $tg \delta_1$  jsou hodnoty změřené při jedné polaritě zdroje a  $C_2$ ,  $tg \delta_2$  jsou hodnoty změřené při druhé polaritě zdroje.

Účelem těchto měření je ověřit stálost výroby. Hodnocení aktuálních výsledků měření se porovnává s výsledky předchozích kontrol. Meze přípustných rozdílů mohou být dohodnuty mezi výrobcem a zákazníkem, ale jako limitní lze uvažovat ztrátový činitel u nových transformátorů do 400 kV 0,01, u strojů po opravě 0,15 a u transformátorů v provozu 0,08. Ztrátový činitel závisí na konstrukci izolačního systému na napětí a na teplotě. Při velkých změnách hodnot (o 10 až 30 %) je nutné hledat jejich příčinu, zejména tehdy pokud došlo ke zlepšení ztrátového činitele  $\delta$ , mohlo totiž dojít k závadě izolačního systému. [2]

### 3.3.3 Zkouška mnohonásobným useknutým impulsem

Pokud je tato zkouška požadována, pak primární vinutí ponořené do oleje transformátoru proudem s  $U_m \geq 300$  kV musí vyhovět pro kontrolu chování při vysokofrekvenčních namáháních, které se dají čekat v provozu. [13]

Zkouška mnohonásobným useknutým impulsem se provádí s impulsy záporné polarity useknutými v blízkosti vrcholu. Skutečné trvání spádu měřeného podle IEC 60-1 musí být kolem  $0,5 \mu s$  a obvod musí být uspořádán tak, aby překmit do opačné polarity impulsu byl řádově 50 % vrcholové hodnoty. Vrcholová hodnota napětí by měla být kolem 60 % jmenovité hodnoty zkušebního napětí atmosférického impulsu podle přílohy 1 a 2. Pro důkaz selhání je potřeba přiložit alespoň 100 impulsů, které se přikládají postupně po jednom impulsu za minutu. [13]

### 3.3.4 Mechanické zkoušky

Tyto zkoušky se provádějí pouze u transformátorů s nejvyšším napětím pro zařízení vyšším než 72,5 kV. V Tab. 3.7 jsou uvedeny hodnoty statických zatížení, které musí transformátory vydržet, tyto hodnoty představují zatížení v důsledku větru a námrazy. Transformátor je při této zkoušce kompletně sestaven a instalován ve vertikální poloze s rámem pevně zajištěným. Zatížení se aplikuje v libovolném směru vůči svorce primárního vinutí. Transformátor vyhověl, pokud nejeví žádné známky poškození jako: deformaci, prasknutí nebo průsak. [13,14]

Tab. 3.7 Statická zkušební zatížení [13,14]

Nejvyšší napětí pro zařízení $U_m$ [kV]	Statické zkušební napětí $F_R$ [N]		
	Transformátory s		
	napětovými svorkami	proudovými svorkami	
		Zatížení třídy I	Zatížení třídy II
72,5 až 100	500	1250	2500
123 až 170	1000	2000	3000
245 až 362	1250	2500	4000
$\geq 420$	1500	4000	5000

### 3.3.5 Měření přenesených přepětí

Tyto požadavky se vztahují na kombinované transformátory, které mají  $U_m \geq 72,5$  kV. Charakteristiky impulsního napětí aplikovaného na primární vinutí jsou vrcholová hodnota aplikovaného napětí  $U_p$ , konvenční doba čela  $T_1$  a doba půlzýlu  $T_2$  [15]:

$$U_p = \frac{1,6 \cdot U_m \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \tag{3.6}$$

$$T_1 = 0,5 \mu s \pm 20\% \tag{3.7}$$

$$T_2 \geq 50 \mu s \tag{3.8}$$

Vrcholové hodnoty přenesených přepětí z primárních svorek na sekundární svorky  $U_s$  nesmí překročit 1,6 kV, tato hodnota by měla zajistit dostatečnou ochranu elektronických zařízení, které jsou připojeny na sekundární vinutí. [15]

Zkouška se provádí odděleně pro transformátory napětí a proudu. Nízkonapětový impuls  $U_1$  se přivede mezi jednu primární svorku a zem. Přenesené napětí  $U_2$  musí být měřeno na rozpojených sekundárních svorkách  $50 \Omega$  koaxiálním kabelem připojeným ke vstupní impedanci osciloskopu stejné hodnoty a šířkou pásma 100MHz. Pokud transformátor proudu a napětí obsahuje více než jedno sekundární vinutí, musí být měření provedeno na každém jednotlivém vinutí. Hodnota přepětí přenesená do sekundárního vinutí  $U_s$  pro stanovená přepětí  $U_p$  aplikovaná do primárního vinutí se vypočítá ze vztahu [15]:



$$U_s = \frac{U_2}{U_1} \cdot U_p \quad (3.9)$$

### 3.4 Diagnostika stavu oleje

Pro určení stavu izolačního oleje je třeba aplikovat celý soubor diagnostických metod, protože každá metoda charakterizuje jinou vlastnost. V dnešní době jsou používány nejen klasické diagnostické metody založené na fenomenologickém přístupu, ale i moderní strukturální metody jako je například infračervená spektroskopie nebo plynová a kapalinová chromatografie. Tyto metody umožňují zkoumat strukturu oleje, která se v provozu stroje mění nebo také analyzovat produkty vzniklé při jeho stárnutí. [2]

Hodnocení kvality oleje se provádí dle odborných norem (například IEC 60296), podle kterých by měl olej splňovat určité jakostní parametry v předepsaných přípustných hodnotách. Mezi základní sledované fyzikální a chemické parametry kvality oleje jsou: barva oleje, hustota, viskozita, obsah vody v oleji, číslo kyselosti, usazeniny a kaly, elektrická pevnost, přítomnost síry. [2]

Problematika diagnostiky stavu oleje je velmi obsáhlá a je mimo rozsah této bakalářské práce, ale je třeba se alespoň krátce zmínit o jedné metodě: plynové chromatografii.

**Plynová chromatografie** využívá fyzikálněchemických dějů, ke kterým dochází v důsledku negativních tepelných, elektrických nebo kombinovaných jevů při vzniku poruchových stavů v izolačním systému transformátoru, které se projevují tvorbou rozkladových plynů. Jedná se o metodu nepřímou, která pomocí složení a množství vzniklých plynů umožňuje posoudit stupeň tepelného stárnutí, ale zjistit i teplotně zabarvené pochody (přehřátí, předvýboje, elektrický oblouk) a také indikovat elektrické děje (částečné výboje apod.) Tato metoda je vhodná pro provozní sledování PT i pro zjišťování konstrukčních nebo technologických vad nových PT. [2,31]

Chromatografické rozbory lze rozdělit do čtyř základních pracovních kroků [2]:

- a) Odběr kapalného izolantu, jeho uložení a odvoz do laboratoře
- b) Vytěsnění rozkladových plynů z kapalného izolantu
- c) Vlastní chromatografická analýza
- d) Vyhodnocení stupně tepelného zestárnutí, určení druhu poruchy

V izolačním oleji se mohou rozpouštět kromě kyslíku, dusíku a oxidu uhličitého ze vzduchu i plyny, které vznikají uvnitř PT rozkladem jeho izolační soustavy způsobenou jeho stárnutím nebo závadovými ději. Tepelné, elektrické a kombinované závady způsobují štěpení uhlovodíkových řetězců a tyto pochody jsou charakterizovány určitým složením a množstvím rozkladových plynů, které závisí na druhu a době trvání poruchy. Podle množství plynu a poměru jednotlivých složek rozpuštěných složek je možné zjistit druhy závady PT. [31]

### 3.5 Diagnostika SF<sub>6</sub>

Pro správnou funkci PT s SF<sub>6</sub> je důležité, aby se do izolačního systému nedostaly žádné cizí látky jako vzduch, vodní páry nebo různé nečistoty se kterými je SF<sub>6</sub> značně reaktivní. Přítomnost těchto nežádoucích vlivů závisí především na konstrukci zařízení, výrobě, montáži, manipulaci s plynem, stavu izolátorů, mechanickém opotřebení při provozu, plynových těsněních a čistotě povrchů. Hlavně je třeba se vyhnout přítomnosti vlhkosti, protože kondenzuje, poté tvoří kapky vody na povrchu izolátoru, což má za následek zhoršení izolačních vlastností, navíc reaguje s SF<sub>6</sub> a dalšími rozkladovými produkty tohoto plynu a tvoří fluorovodíkové kyseliny, které jsou značně korozivní. [32]

Reakční produkty plynu SF<sub>6</sub> mohou vznikat působením krátkodobých zkratových proudů, elektrických výbojů nebo i při běžném provozu. Nejčastěji se jedná o SOF<sub>2</sub>, SOF<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, jejichž množství je přímo úměrné koncentraci vlhkosti, dále je to HF, CF<sub>4</sub> a další fluoridy kovů a kyslíku. [32]

Analýza plynu SF<sub>6</sub> může pomoci ve všech fázích životního cyklu zařízení a to jak při uvádění nového výrobku do provozu, tak i během provozu a i při vyřazení výrobku z provozu. Její tři hlavní cíle jsou: zajistit aby počáteční stav plynu byl v pořádku, identifikovat a diagnostikovat poškození zařízení v provozu a také zajištění řádné manipulace s plynem SF<sub>6</sub> v době, kdy je zařízení vyřazováno z provozu. Hlavním cílem je identifikovat a diagnostikovat stav poškození zařízení v provozu, což je důležité při rozhodování, zda je provést nápravná opatření, aby byl zajištěn uspokojivý stav zařízení nebo dokonce, aby se zabránilo havárii a předejít tak zbytečným nákladům a výpadkům. Během doby životnosti zařízení s plynem SF<sub>6</sub> se provádějí jako součást režimu údržby analýzy: **měření procenta obsahu SF<sub>6</sub>, rozklad vedlejších produktů, hustota a vlhkost**. Tyto testy mohou

identifikovat potenciální problémy jako: částečné výboje, hot-spot místa, těsnící problémy a nesprávnou manipulaci s plynem. [32]

Je dokázáno, že stupeň rozkladu SF<sub>6</sub> závisí na mnoha parametrech, jako je typ výboje, tlak plynu, přítomnost kontaminujících látek, technika odběru vzorků atd. [32]

V současnosti se používají přenosné analyzátory, které jsou schopny provádět, až tři nebo čtyři měření parametrů plynu současně, což výrazně šetří vynaložený čas a potřebné úsilí. [32]

Existuje velmi mnoho přístrojů a metod, které se používají pro měření parametrů plynu SF<sub>6</sub>, ale v podstatě to jsou [33]: tlakoměry, vlhkoměry, detektory úniku plynu a analyzátory SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O.

**Měření obsahu SF<sub>6</sub>** se provádí pomocí rychlosti zvuku, kondenzačního principu a detektorem tepelné vodivosti.

**Vlhkost** se měří kapacitními snímači vlhkosti, polymerními senzory, čidly s oxidem hlinitým a vlhkoměry opatřené chlazenými zrcadly.

**Detekce rozkladových plynů** metodami plynové chromatografie, infračervené spektroskopie, elektrochemickými snímači, selektivními infračervenými snímači a detekčními trubičkami.

Pro **měření hustoty** se používají metody elektronické nebo mechanické, dále přímé nebo nepřímé. Pro přímé elektronické měření je používáno čidlo indikující hustotu plynu, pro nepřímé elektronické měření se používá teplotně kompenzovaný snímač tlaku. Pro přímé mechanické měření se používá tzv. referenční komora a pro nepřímé měření se využívají teplotně kompenzované tlakoměry.

### 3.6 Online diagnostika

Přístrojové transformátory jako prvky jistící i měřící mají v případě poruchy dopad na další zapojené přístroje, také mohou ohrozit zdraví osob v prostorech rozvodny. Proto se vyplácí zvláště pro transformátory vyšších napětí sledovat nepřetržitě vlastnosti izolačního systému, který je pro správnou funkci zásadní a tím předcházet poruchám nebo případným opravám.

On-line systémy, které jsou připojeny k diagnostickému objektu, se obecně nazývají monitorovací systémy. Monitorování je trvalé sledování stavu objektu a jeho průběžné vyhodnocování. Výhodou je možnost reagovat na možné změny velmi rychle, protože počítačová technika provádí on-line výpočty stupňů nebezpečnosti sledované poruchy provázané výstražnými signály a pokud je to nutné, tak až k automatickému přerušení provozu objektu. Pro správnou funkci on-line diagnostického systému, je třeba vybrat správné metody, které vyhovují z hlediska principu i způsobu aplikace. [2]

Monitorovací systém je tedy preventivní, nepřerušovaný sběr dat s cílem odhalit slabá místa v izolační soustavě a určit stupeň postupné degradace této soustavy jak ocelku. Samotné měření diagnostických veličin za plného chodu transformátoru je velice komplikované z důvodu rušivých signálů, které doprovázejí provoz transformátoru, a také nutnosti zajištění bezpečnosti měření. Z těchto skutečností vyplývá, že je třeba použít speciální přístroje, které jsou však značně drahé. Proto se využívají spíše menší monitorovací systémy sledující omezený počet parametrů, které však úzce souvisí s degradačními procesy v izolaci. Na tyto menší systémy je kladen důraz na co nejpřesnější měření a vyhodnocení získaných hodnot při odstraněných rušivých vlivech při měření. [2]

V oblasti on-line diagnostiky PT jsou pro základní sledování doporučeny používány následující metody [26,33]:

- a) Infračervená termografie
- b) Kontrola hladiny oleje a známky úniku oleje
- c) Sledování obsahu plynů a vlhkosti v oleji
- d) Měření částečných výbojů
- e) Měření ztrátového činitele
- f) Sledování obsahu plynů v SF<sub>6</sub> a známky úniku
- g) Sledování tlaku a vlhkosti v SF<sub>6</sub>

### 3.6.1 Monitoring plynů a vlhkosti v oleji

Vlhkost v elektroizolačním systému způsobuje zejména snížení povrchového odporu izolantu a zvyšuje riziko průrazu. Spojení oleje s vlhkostí je dále příznivé pro rozběh reakcí, jejichž produkty jsou kyseliny, které napadají pevnou izolaci. Tyto produkty mohou následně způsobit korozi vinutí, nádoby transformátoru a kovových konstrukčních částí, tím se může

snížit dobu spolehlivého provozu transformátoru. On-line monitoring vlhkosti umožňuje spolehlivě interpretovat naměřené hodnoty na základě jejich korelace a v reálném čase informovat obsluhu. [2]

Vlastnosti oleje mohou být také ovlivněny rozkladovými plyny, které vznikají při rozkladu oleje a pevné izolace důsledkem elektrických a tepelných poruch. Minerální oleje i pevná papírová izolace produkují vlastní spektrum plynů. V případě papírové izolace je to CO a CO<sub>2</sub>, u minerálních olejů se jedná o sloučeniny H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> a C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>. Na základě množství a poměrů lze určit druh a závažnost poruchy. Analýza plynů rozpuštěných v oleji poskytuje obsluze první informaci o přítomnosti závady v transformátoru a umožňuje tak její odhalení v počátečním stádiu. Neumožňuje však předvídat náhlé poruchy, které jsou způsobeny přepětím, zkratem, vlivem mechanického poškození izolace a náhlého průrazu. [2]

**Analyzátory plynů** pro měření koncentrací využívají mnoho různých fyzikálních vlastností. Nejčastěji se však využívá analyzátorů založených na elektrochemickém principu, jejichž činnost spočívá ve sledování fyzikálních jevů, které provázejí chemickou reakci, které se účastní sledovaná látka nebo kterou tato látka přímo ovlivňuje. [2]

**Analyzátory vlhkosti** pracují na principu tenkého filmu a kapacitním senzoru. Dielektrické vlastnosti polymerního filmu závisí na množství vody, které je v něm obsaženo. Při změně relativní vlhkosti dojde ke změně dielektrických vlastností a tím také ke změně kapacity senzoru. Elektronické zařízení měří kapacitu kondenzátoru a poté ji převádí zpět na hodnotu vlhkosti. [2]

### 3.6.2 Monitoring SF<sub>6</sub>

Pro monitoring parametrů SF<sub>6</sub> se používají tři odlišné způsoby měření dat [33]: proaktivní, automatizovaný a reaktivní.

Mezi poslední jmenované **reaktivní** přístroje pro monitoring patří: infračervené kamery, lokátory netěsností, měřiče průtoku a teplotně kompenzované měřiče tlaku (hustoty). Teplotně kompenzované měřiče tlaku (hustoty) měří neustále tlak (hustotu) přímo v nádrži, ale je třeba naměřené hodnoty odečítat a údaje ručně zapisovat. Pro častější měření jsou tedy více časově náročnější, nejsou konstruovány pro oznámení malých netěsností a další

nevýhodou je, že jsou teplotně kompenzovány pouze pro měření tlaku, nikoliv hustoty. Konverze se tedy musí provádět ručně nebo pomocí softwaru. [33]

**Automatizovaný monitoring** posílá naměřené hodnoty obsluze na dálku bezdrátově nebo pomocí kabelu. Analýza dat a kvantifikace emisí úniku SF<sub>6</sub> musí být prováděna obsluhou. Díky znalosti aktuální informace mohou potenciálně snižovat únik SF<sub>6</sub>. [33]

**Proaktivní monitoring** je založen na měření, komunikaci a počítačovým zpracováním dat. Velmi brzy detekují únik plynu, změří i nízké hladiny úniku, pomáhá zefektivnit plnění nádrže (často bývají přeplňovány). Vnější vlivy jsou zde kompenzovány pomocí softwaru. Jejich cena je vyšší, ale pro dlouhodobé použití se vyplatí. Mohou měřit: hustotu SF<sub>6</sub>, teplotu, vlhkost, částečné výboje. [33]

Protože náklady na instalaci a údržbu monitorovacích systémů nejsou malé, většina zákazníků podle průzkumu raději investuje do více spolehlivějších přístrojových transformátorů, než na tyto systémy. Často se životnost a spolehlivost monitorovacích systémů zdá menší než zařízení, které monitorují. Přesto jsou uživatelé schopni zaplatit za on-line monitorovací systém, až 10 % z ceny přístrojového transformátoru. [25]

## 4 Přehled produktů jednotlivých výrobců

V této kapitole budu porovnávat jednotlivé druhy a typy přístrojových transformátorů vyskytujících se na trhu. Tato práce je věnována diagnostice přístrojových transformátorů, ta se provádí pro zařízení pro vyšší napěťové soustavy, u menších PT by se z ekonomického hlediska nevyplatila, zaměřím se proto na porovnání PT vvn. Výrobců PT je mnoho např. KONČAR Instrument transformers Inc, Simens AG, Trench Group, PFIFFNER Instrument Transformers Ltd, ABB s.r.o.

Pro porovnání a přehled produktů jsem vybral firmy PFIFFNER a ABB, které mají na svých stránkách kvalitně zpracované katalogy a materiály svých výrobků a zároveň patří mezi největší dodavatele přístrojových transformátorů po celém světě.

PT používané v sítích vvn mohou být napěťové, proudové nebo kombinované. Dále se rozdělují podle druhu izolačního systému, druhu konstrukce a nejvyššího napětí pro zařízení.

Dovolené napětí pro zkoušky impulsním nebo střídavým napětím jsou pro jednotlivé napěťové hladiny PT stejné a jsou uvedeny v příloze 1 a 2.

### 4.1 Přístrojové transformátory s izolačním systémem olej-papír

Olejové PT se mohou používat pro nejvyšší napětí pro zařízení od 24 do 800 kV.

#### 4.1.1 Přístrojové transformátory napětí

PTN s izolací olej-papír mohou být induktivní nebo kapacitní. PTN se dělají konstrukce hair-pin, tedy s jádry položenými blízkosti země a dlouhým primárním vodičem tvaru U.

Tab. 4.1 Přístrojové transformátory napětí s izolačním systémem olej-papír [20,34]

Výrobce	PIFFNER	PIFFNER	ABB	ABB
Název	EOF	ECF	EMF	CPB
Typ	Induktivní	Kapacitní	Induktivní	Kapacitní
Nejvyšší napětí pro zařízení $U_m$ [kV]	24;36;72,5;123;145;170;245	72,5;123;145;170;245;300;362;420;550	52;72;84;123;145;170	72,5;123;145;170;245;300;362;420;525;800
Třída přesnosti	0,1 ÷ 3; 3P - 6P	0,2 ÷ 1; 3P	0,3 ÷ 1,2 ; 3P	0,2 ÷ 1 ; 3P - 6P
Max. tepelný výkon[VA]	≤ 1500; ≤ 3000	-	1000 - 1500	-
Počet vinutí	1 ÷ 5	1 ÷ 5	-	

Maximální tepelný výkon je celkový výkon, který lze do PTN dodat, aniž by se příliš zvýšila teplota. Transformátor je navržen tak, aby mohl pracovat s impedancí odpovídající zatížení při jmenovitém napětí násobený druhou mocninou činitele zvýšení napětí. [20]

Kapacitní PTN jsou přesnější než induktivní PTN a vyrábějí se pro vyšší hodnoty nejvyšších napětí pro zařízení oproti induktivním.



#### 4.1.2 Přístrojové transformátory proudu

PTP mohou být konstrukce hair-pin nebo top-core. Jmenovitý sekundární proud PTP bývá standardně 1 nebo 5 A.

Tab. 4.2 Přístrojové transformátory proudu a izolačním systémem olej-papír [20,35]

Výrobce	PIFFNER	PIFFNER	ABB
Název	JOF-T	JOF	IMB
Typ konstrukce	Hair-pin	Top-core	Top-core
Nejvyšší napětí pro zařízení $U_m$ [kV]	24; 36;72;123	24;36;72,5;123;145;170; 245;362;420;550	36;72;84;170;245;300;420;550;800
Jmen. primární proud [A]	1 ÷ 2000	1 ÷ 4000	do 1000 - 2500
Jmen. krátkodobý tepelný proud $I_{th}$ [kA/1s]	≤ 40	≤ 63	do 40 - 63
Jmen. dynamický proud $I_{dyn}$ [kA]	≤ 100	≤ 160	do 108 - 170
Třída přesnosti	-	0,1 ÷ 3 ; 0,2S – 0,5S	0,15 ÷ 5; 0,2S–0,5S; 5P
Počet vinutí	1 ÷ 6	1 ÷ 7	-

Firma ABB vyrábí PTP izolace olej-papír do nevyššího napětí pro zařízení až 800 kV, PFIFFNER do 550 kV. PFIFFNER vyrábí PTP konstrukce hair-pin JOF-T i top-core JOF, když je rozměrově a hmotnostně porovnáme pro stejné nejvyšší napětí pro zařízení 123 kV, je JOF-T přibližně o 20 cm menší a o 45 kg lehčí. To proto, že při konstrukci top-core, s jádrem výše položeným, musíme použít pevnějších a odolnějších materiálů ke konstrukci transformátoru než u konstrukce hair-pin. PTP konstrukce top-core se dají použít pro vyšší napěťové hladiny a vyšší jmenovité primární proudy než PTP designu hair-pin.

### 4.1.3 Kombinované přístrojové transformátory

Kombinované přístrojové transformátory se dělají top-core konstrukce, ta jim umožňuje dosáhnout vysokých hodnot krátkodobých tepelných a dynamických proudů, stejně tak i široké škály jmenovitých primárních proudů a počtu výstupů sekundárních vinutí. [27]

Tab. 4.3 Kombinované přístrojové transformátory s izolačním systémem olej-papír[27,36]

Výrobce	PIFFNER		ABB
Název	EJOF		PVA 123
Nejvyšší napětí pro zařízení $U_m$ [kV]	24;36;72,5	123;145;170	123
Primární jmenovitý proud [A]	1 ÷ 5000		50 ÷ 3000
Jmen. krátkodobý tepelný proud $I_{th}$ [kA/1s]	≤ 63		10 ÷ 63
Jmen. dynamický proud $I_{dyn}$ [kA]	≤ 160		25 ÷ 157
Počet proudových vinutí	1 ÷ 7		1 ÷ 6
Počet napěťových vinutí	1 ÷ 5		1 ÷ 5
Třída přesnosti proudové části	0,1 ÷ 3		od 0,2 ; 5P – 10P
Třída přesnosti napěťové části	0,1 ÷ 3 ; 3P – 6P		0,1 ÷ 0,5 ; 3P

Společnost ABB má v produktech kombinovaných transformátorů s izolací olej-papír jen jeden typ a to PVA 123. Tento transformátor je vysoký 2747 mm a váží 650 kg v provedení s porcelánovou izolací nebo 580 kg pokud je použita kompozitní silikonová izolace, z této celkové hmotnosti je 140 kg jen hmotnost oleje. Pokud to porovnáme s kombinovaným transformátorem od společnosti PFIFFNER pro stejnou napěťovou hladinu, jehož výška je 2484 mm a váha 500 kg pro standardní kompozitní silikonovou izolaci, je PT od společnosti PFIFFNER jen o necelých 270 mm menší, ale o 80 kg lehčí. To může být způsobeno použitím lehčí nádoby nebo lepšímu uspořádání jednotlivých částí, které potřebují pro vyplnění prostoru méně oleje.

## 4.2 Suché přístrojové transformátory s SF<sub>6</sub>

Přístrojové transformátory s SF<sub>6</sub> lze provozovat tam, kde jsou olejové PT nepoužitelné, a to jak z hlediska požární bezpečnosti, tak i zvýšených klimatických podmínek. Jejich izolační systém je navržen tak, aby byla zaručena třicetiletá životnost transformátoru. Je ověřeno, že maximální únik plynu je menší než 0,1% ročně.

### 4.2.1 Přístrojové transformátory napětí

Dovolené napětí pro zkoušky impulsním nebo střídavým napětím jsou pro jednotlivé napěťové hladiny PT stejné a jsou uvedeny v příloze 1 a 2.

Tab. 4.4 Suché přístrojové transformátory napětí s SF<sub>6</sub> [21,34]

Výrobce	PIFFNER	PIFFNER	ABB
Název	EGF	ROF	TVI
Typ	Induktivní	Kapacitní	Induktivní
Nejvyšší napětí pro zařízení U <sub>m</sub> [kV]	245;300;330;363; 420;550	72,5;123;145;170;2 45;262;420;550	72,5;123;145;170;245;36 2;420
Třída přesnosti	0,1 ÷ 3 ; 3P - 6P	0,1 ÷ 3	0,2 ÷ 1 ; 3P - 6P
Max. tepelný výkon	≤ 3000	-	1000 - 1500
Počet vinutí	1 ÷ 5	-	1 ÷ 3

Společnosti PFIFFNER vyrábí oproti ABB také kapacitní PTN s izolací SF<sub>6</sub>. Když porovnáme EGF 420 a TVI 420 od ABB zjistíme, že výška EGF je 5353 mm a celková váha 820 kg z toho váha plynu je přibližně 36 kg. TVI je vysoký 5820 mm, váží 850 kg z toho plyn je 35 kg. EGF 420 je tedy přibližně o 0,5 metru nižší a váží o 30 kg méně.

#### 4.2.2 Přístrojové transformátory proudu

PTP s SF<sub>6</sub> jako izolačním médiem se vyrábí pouze v designu top-core.

Tab. 4.5 Suché přístrojové transformátory proudu s SF<sub>6</sub> [21,35]

Výrobce	PFIFFNER	ABB		
Název	JGF	TG		
Typ konstrukce	Top-core	Top-core		
Nejvyšší napětí pro zařízení U <sub>m</sub> [kV]	245;300;330;363;420;550	72,5;145; 170	245;362	420;550; 800
Jmenovitý primární proud [A]	1 ÷ 5000	1600	2400-3150	4000
Jmen. krátkodobý tepelný proud I <sub>th</sub> [kA/3s]	≤ 80	40	50	63
Jmen. dynamický proud [kA]	≤ 200	100	125	159 - 170
Třída přesnosti	0,1 ÷ 3 ; 5P - 10P	0,1 ÷ 1 ; 5P - 10P		
Počet vinutí	1 ÷ 8	1 ÷ 6		

ABB vyrábí transformátory proudu pro nižší i vyšší hodnoty nejvyššího napětí pro zařízení U<sub>m</sub> než PFIFFNER. Výška JGF 420 je 5700 mm, celková váha 1130 kg a z toho váha plynu 47 kg. Když srovnáme PTN EGF 420 a PTP JGF 420, zjistíme, že JGF je větší přibližně o 350 mm, ale váží o 280 kg více na stejných napěťových hladinách.

### 4.2.3 Kombinované přístrojové transformátory

Kombinované transformátory proudu s SF<sub>6</sub> a napětí jsou pouze konstrukce top-core. V porovnání s olejovými kombinovanými PT se dělají pro mnohem vyšší napěťové hladiny.

Tab. 4.6 Suché kombinované transformátory s SF<sub>6</sub> [21,36]

Výrobce	PIFFNER	ABB
Název	EJGF	TG COMBI
Nejvyšší napětí pro zařízení U <sub>m</sub> [kV]	245;300;330;363;420;550	145;170;245;300
Primární jmenovitý proud	1 ÷ 5000	150 ÷ 4000
Jmen. krátkodobý tepelný proud I <sub>th</sub> [kA/3s]	≤ 80	-
Jmen. dynamický proud I <sub>dyn</sub> [kA]	≤ 200	-
Počet proudových vinutí	1 ÷ 8	1 ÷ 6
Počet napěťových vinutí	1 ÷ 5	1 ÷ 3
Třída přesnosti PTP	0,1 ÷ 3 ; 5P – 10P	0,1 ÷ 1 ; 5P – 10P
Třída přesnosti PTN	0,1 ÷ 3 ; 3P - 6P	0,2 ÷ 1 ; 3P - 6P

Kombinovaný PT EJGF od firmy PFIFFNER je v porovnání s kombinovanými PT SF<sub>6</sub> TG COMBI, tak i olejovými PVA a EJOF navržen pro mnohem vyšší maximální napětí pro zařízení U<sub>m</sub>, vyšší jmenovité proudy, krátkodobé tepelné a dynamické proudy. To hlavně z důvodu, že oproti jiným kombinovaným PT má obě části (proudovou i napěťovou) umístěny v horní části transformátoru.

## **Závěr**

V sítích vn a vvn dosahují hodnoty napětí a proudů vysokých hodnot, které nelze přizpůsobovat rozsahům měřících nebo jistících přístrojů přímo, a to jak z technického a ekonomického hlediska, tak i z hlediska bezpečnosti. Použitím přístrojových transformátorů upravíme napětí a proudy na standardní hodnoty dané normami, které jsou vhodné pro další připojené přístroje. Přístrojové transformátory mají v případě poruchy dopad na tyto zapojené přístroje a bezpečnost osob v prostorech rozvodny. Předcházet těmto haváriím se dá prováděním diagnostiky. V praxi není jedna univerzální metoda, která by zajistila degradační děje a stav přístrojového transformátoru, je nutné sledovat více parametrů a použít soubor několika metod. Pro správnou interpretaci výsledků jednotlivých zkoušek a měření je třeba vysoké kvalifikace a zkušených pracovníků diagnostiky. Pravidelným prováděním diagnostiky lze včas odhalit stupeň degradace PT a případným opatřením lze zabránit poruše a prodloužit jejich životnost.

První kapitola v úvodu práce je věnována základnímu principu transformátoru, rozdělení přístrojových transformátorů a způsobům jejich konstrukce. Další kapitola je zaměřena na izolační systémy a prvky používané v oblasti přístrojových transformátorů.

Hlavní přínos této bakalářské práce je v přehledu diagnostických metod, které se používají k diagnostice přístrojových transformátorů, dále pak v porovnání produktů jednotlivých výrobců, které se vyskytují na trhu. Čtenáři si tak mohou udělat ucelený přehled o používaných přístrojových transformátorech a způsobech jejich diagnostiky.

## Seznam použité literatury

- [1] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6
- [2] MENTLÍK, V.; PIHERA, J.; POLANSKÝ, R.; PROSR, P.; TRNKA, P. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 440s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [3] MENTLÍK, V.; TRNKA, P.; TRNKOVÁ, M.; ŠAŠEK, L. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. Praha: BEN – technická literatura, 2011. 120 s. ISBN 978-80-7300-412-5
- [4] FAKTOR, Z. *Transformátory a cívky*. Praha: BEN – technická literatura, 1999. 393 s. ISBN 80-86056-49-X
- [5] HALUZÍK, E. *Ochrany a automatiky v elektrických sítích*. Brno: VUT, 1986. 160 s.
- [6] HODLOVÁ, M.; SCHEJBAL, K. *Cvičení z předmětu Elektrické přístroje*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1983. 105 s.
- [7] BARTOŠ, V. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 139 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [8] BARTOŠ, V. *Elektrické stroje*. 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 221 s. ISBN 80-7043-332-9.
- [9] KOPEČEK, J.; DVOŘÁK, M. *Přístrojové transformátory: měřící a jistící* Praha: Academia, 1966. 491 s.
- [10] BARTOŠ, V.; SKALA, B. *Měření na elektrických strojích*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002. 109 s. ISBN 80-7082-896-X
- [11] KUČEROVÁ, E. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002. 174 s. ISBN 80-7082-940-0
- [12] ABB S.R.O. Instrument Transformers: General informations [online]. [cit. 2013-04-30]. 2004. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/d3053348821a3048c125751a0036086b/\\$file/General%20IT%202004.02.10\\_a.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/d3053348821a3048c125751a0036086b/$file/General%20IT%202004.02.10_a.pdf)
- [13] ČSN EN 60044-1. *Přístrojové transformátory: Část 1: Transformátory proudu*. Český normalizační institut, 2001.
- [14] ČSN EN 60044-2. *Přístrojové transformátory: Část 2: Induktivní transformátory napětí*. Český normalizační institut, 2001.
- [15] ČSN EN 60044-3. *Přístrojové transformátory: Část 3: Kombinované transformátory*. Český normalizační institut, 2005.
- [16] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 1* Praha: Academia, 1980. 388 s.
- [17] ČSN EN 60505 *Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů*. Český normalizační institut, 2005
- [18] HARLOW J. H. Electric power transformer engineering, *The Electric Power Engineering Series*; 9 Florida: CRC Press LLC, 2004. ISBN 0-8493-1704-5
- [19] ABB AB. Instrument Transformers: Application Guide [online]. [cit. 2013-04-25]. 2009. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/325464c670793546c125765b0038faa1/\\$file/1HSM%209543+%2040-00en%20IT%20Application%20Guide%20Ed3.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/325464c670793546c125765b0038faa1/$file/1HSM%209543+%2040-00en%20IT%20Application%20Guide%20Ed3.pdf)
- [20] ABB AB: Oil insulated: Outdoor Instrument Transformers Buyer's Guide [online]. [cit. 2013-04-25]. 2012.

- Dostupné z:  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/fce7ba9deb689703c1257a85003daa2a/\\$file/Buyers%20Guide%20Oil%20Insulated%20Outdoor%20Instrument%20Transformers%20Ed%207%20en.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/fce7ba9deb689703c1257a85003daa2a/$file/Buyers%20Guide%20Oil%20Insulated%20Outdoor%20Instrument%20Transformers%20Ed%207%20en.pdf)
- [21] ABB S.p.A. TG COMBI: SF<sub>6</sub> Combined Instrument Transformer [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z:  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/4025739651499f12c12579830034b380/\\$file/BR\\_HV-TG-COMBI%28EN%29-2GJA708516-1111.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/4025739651499f12c12579830034b380/$file/BR_HV-TG-COMBI%28EN%29-2GJA708516-1111.pdf)
- [22] BERTRAND, Y.; HOANG, L. C. Vegetal oils as substitute for mineral oils. In *proceeding of the 7th international conference on Properties and applications od dielectric materials*. Nagoya: IEEE, 2003, s. 491-494. ISBN 0-7803-7725-7
- [23] 3M ČESKO, spol. s r.o. Vysokoteplotní izolační materiály [online]. [cit. 2013-05-01]. 2008. Dostupné z:  
[http://www.g3.cz/img/Katalog/Elektro/3M\\_Vysokoteplotni\\_izolacni\\_materialy.pdf](http://www.g3.cz/img/Katalog/Elektro/3M_Vysokoteplotni_izolacni_materialy.pdf)
- [24] 3M ČESKO, spol. s r.o. Prskyřice a zalévací hmoty pro elektrotechnickou výrobu [online]. [cit. 2013-05-01]. 2007. Dostupné z:  
[http://www.g3.cz/img/Katalog/Elektro/3M\\_Prskyrice\\_a\\_zalev.hmoty.pdf](http://www.g3.cz/img/Katalog/Elektro/3M_Prskyrice_a_zalev.hmoty.pdf)
- [25] GUPTA, B. K.; DENSLEY, J.; NARANG A. Diagnostic practices used for instrument transformers. In *conference record of the 2008 IEEE international symposium on electrical insulation*. Vancouver: IEEE, 2008, s. 239-242. ISBN 978-1-4244-2092-6
- [26] AKSENOV, Y.; GOLUBEV, A.; Experiences with on-line diagnostics for power and instrument transformers. In *coil winding conference 2001 of electrical insulation and electrical manufacturing*. Cincinnati: IEEE, 2001, s. 583-592. ISBN 0-7803-7180-1
- [27] ABB Sp. z o.o. Combined instrument transformer: PVA 123 [online]. [cit. 2013-05-10]. 2011. Dostupné z:  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/eb43ac43d33a084ac1257a4e00289d32/\\$file/PVA\\_123A\\_EN\\_A4\\_W3\\_26-7\\_337D.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/eb43ac43d33a084ac1257a4e00289d32/$file/PVA_123A_EN_A4_W3_26-7_337D.pdf)
- [28] JANÍČEK, F.; CHLADNÝ, V.; BELÁŇ, A.; ELESCHOVÁ, Ž. *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2004, 360 s. ISBN 80-227-2135-2
- [29] ABB. Přístrojové transformátory VN [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z:  
<http://www.abb.cz/product/cz/9AAC720073.aspx?country=CZ>  
<http://www.abb.cz/product/cz/9AAC720072.aspx?country=CZ>
- [30] KPB Intra. Výrobní řady přístrojových transformátorů [online]. [cit. 2013-05-30] 2006. Dostupné z: <http://www.kpb intra.cz/cz/produkty/index.html>
- [31] ELDIAG, s.r.o. Podrobnější přehled vybraných diagnostických metod izolačních systému transformátorů (i přístrojových) [online]. [cit. 2013-06-03]. 1999. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/cz/texty/prehled-vybranych-diagnosticky-metod-izolacnich-systemu-pristrojovych-transformatoru>
- [32] DUGGAN, E. SF<sub>6</sub> analysis for AIS, GIS and MTS Condition Assessment. CIGRÉ WG B3-25 (AA2), 2012.
- [33] HECKLER, T. WIKA MP. SF<sub>6</sub> Academy, 2011
- [34] PFIFFNER Messwandler AG. Inductive and capacitive voltage transformers [online]. [cit. 2013-05-29] Dostupné z: <http://www.pmw.ch/index.cfm?tem=2&spr=2&hpn=2>
- [35] PFIFFNER Messwandler AG. Current transformers [online]. [cit. 2013-05-29] Dostupné z: <http://www.pmw.ch/index.cfm?tem=2&spr=2&hpn=2>
- [36] PFIFFNER Messwandler AG. Combined instrument transformers [online]. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://www.pmw.ch/index.cfm?tem=2&spr=2&hpn=2>



## Přílohy

### Příloha 1 Jmenovité izolační hladiny pro primární vinutí transformátoru do soustav s nejvyšším napětím $U_m$ do 300 kV [13,14,15]

Nejvyšší napětí pro zařízení $U_m$ (ef. hodnota) [kV]	Jmenovité zkušební střídavé napětí (vrcholová hodnota) [kV]	Jmenovité zkušební napětí atmosférického impulsu (vrcholová hodnota) [kV]
0,72	3	-
1,2	6	-
3,6	10	20 až 40
7,2	20	40 až 60
12	28	60 až 75
17,5	38	75 až 95
24	50	95 až 125
36	70	145 až 170
52	95	250
72,5	140	325
100	185	450
123	185 až 230	450 až 550
145	230 až 275	550 až 650
170	275 až 325	650 až 750
245	395 až 460	950 až 1050

### Příloha 2 Jmenovité izolační hladiny pro primární vinutí transformátoru do soustav s nejvyšším napětím $U_m \geq 300$ kV [13,14,15]

Nejvyšší napětí pro zařízení $U_m$ (ef. hodnota) [kV]	Jmenovité zkušební střídavé napětí (vrcholová hodnota) [kV]	Jmenovité zkušební napětí atmosférického impulsu (vrcholová hodnota) [kV]
300	750 až 850	950 až 1050
362	850 až 950	1050 až 1175
420	950 až 1050	1300 až 1425
525	1150 až 1175	1425 až 1550
765	1425 až 1550	1950 až 2100