

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Diagnostika klíčových prvků výkonových transformátorů**

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

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

Jméno a příjmení: **Martin ONDERKA**  
Osobní číslo: **E11B0460P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Diagnostika klíčových prvků výkonových 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 jednotlivé klíčové funkční prvky transformátoru z hlediska spolehlivosti.
2. Uveďte možnosti on-line a off-line diagnostiky jednotlivých funkčních prvků.
3. Přehledně zpracujte vzájemné porovnání použitých on-line a off-line diagnostických metod.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


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

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

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

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis výkonových olejových transformátorů, klíčové prvky a rozdělení jejich diagnostických metod. Cílem práce je přehledné shrnutí problematiky poruchovosti výkonových transformátorů a stručný popis jednotlivých on-line a off-line diagnostických metod s ohledem na jejich porovnání.

## **Klíčová slova**

Olejový, výkonový, transformátor, klíčový, prvky, vinutí, průchodka, diagnostika, on-line, off-line

## **Abstract**

This bachelor's thesis describes power transformers, their key components and divides their diagnostic methods. The purpose of this thesis is to clearly summarize the issue of possible power transformer failure, to briefly describe all the methods of on-line and off-line transformer diagnostics and to compare these methods.

## **Key words**

Oil, power, transformer, key, components, winding, bushing, diagnosis, on-line, off-line

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2013

Onderka Martin

## **Poděkování**

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

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1 TRANSFORMÁTOR .....</b>	<b>12</b>
1.1 POPIS JEDNOTLIVÝCH FUNKČNÍCH PRVKŮ TRANSFORMÁTORU .....	14
1.1.1 <i>Vinutí transformátoru .....</i>	15
1.1.2 <i>Jádro transformátoru.....</i>	15
1.1.3 <i>Kondenzátorové průchodky .....</i>	15
1.1.4 <i>Izolační systém transformátoru .....</i>	17
1.1.5 <i>Nádoba transformátoru .....</i>	17
1.1.6 <i>Chladicí systém transformátoru.....</i>	18
1.1.7 <i>Přepínač odboček .....</i>	19
1.1.8 <i>Konzervátor .....</i>	20
1.1.9 <i>Buchholzovo relé.....</i>	20
<b>2 DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORU.....</b>	<b>21</b>
2.1 OFF-LINE DIAGNOSTIKA.....	21
2.1.1 <i>Měření činného odporu vinutí.....</i>	22
2.1.2 <i>Měření izolačního odporu vinutí.....</i>	23
2.1.3 <i>Měření pevného dielektrika .....</i>	25
2.1.4 <i>Měření ztrátového činitele a kapacity vinutí, výpočet časové konstanty vinutí ....</i>	27
2.1.5 <i>Měření ztrátového činitele a kapacity na kondenzátorových průchodkách.....</i>	29
2.1.6 <i>Měření frekvenčních charakteristik (SFRA – Sweep Frequency Response Analyzer) .....</i>	30
2.1.7 <i>Měření částečných výbojů.....</i>	31
2.1.8 <i>Odběry vzorků plynu z plynových (Buchholzových) relé .....</i>	34
2.1.9 <i>Odběry vzorků izolačního oleje .....</i>	34
2.2 ON-LINE DIAGNOSTIKA .....	35
2.2.1 <i>Volba parametrů pro on-line monitoring .....</i>	36
2.2.2 <i>Měření napětí a proudů transformátoru.....</i>	37
2.2.3 <i>Monitoring transformátorového oleje .....</i>	37
2.2.4 <i>Monitoring teplot transformátoru (olej, vinutí, hot-spot).....</i>	40
2.2.5 <i>Monitoring částečných výbojů .....</i>	46
2.2.6 <i>Monitoring kondenzátorových průchodek .....</i>	49
<b>3 SHRUTÍ.....</b>	<b>51</b>
<b>4 KONKRÉTNÍ PŘÍKLADY FIREM .....</b>	<b>53</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>57</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratk

$C$ .....	celková kapacita [pF]
$C_2$ .....	kapacita měřená při frekvenci 2 Hz [pF]
$C_{50}$ .....	kapacita měřená při frekvenci 50 Hz [pF]
$g_r$ .....	rozdíl mezi oteplením oleje a vinutí [-]
$I_0$ .....	efektivní hodnota proudu naprázdno [A]
$I_1$ .....	proud primárního vinutí [A]
$I_2$ .....	proud sekundárního vinutí [A]
$I_h$ .....	hodnota oteplovacího proudu [A]
$k$ .....	převod transformátoru [-]
$N_1$ .....	počet závitů primárního vinutí [-]
$N_2$ .....	počet závitů sekundárního vinutí [-]
$nn$ .....	nízké napětí
$p_{i60}$ .....	minutový polarizační index [-]
$R_0$ .....	naměřená hodnota odporu vinutí [ $\Omega$ ]
$R_f$ .....	střední hodnota odporu [ $\Omega$ ]
$R_{iz15}$ .....	naměřená hodnota odporu v 15s [ $\Omega$ ]
$R_{iz60}$ .....	naměřená hodnota odporu v 60s [ $\Omega$ ]
$R_s$ .....	snímací odpor [ $\Omega$ ]
$R_U$ .....	hodnota odporu fáze U [ $\Omega$ ]
$R_x$ .....	naměřená hodnota odporu vinutí při neznámé teplotě [ $\Omega$ ]
$sn$ .....	střední napětí
$t_0$ .....	známá teplota daná výrobcem [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\text{tg } \delta$ .....	ztrátový činitel
$t_x$ .....	neznámá teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$U_1$ .....	napětí na primárním vinutí [V]
$U_2$ .....	napětí na sekundárním vinutí [V]
$u_{i1}$ .....	indukované napětí na primárním vinutí [V]
$u_{i2}$ .....	indukované napětí na sekundárním vinutí [V]
$vn$ .....	vysoké napětí
$vvn$ .....	velmi vysoké napětí
$\Delta \theta_{hr}$ .....	oteplení hot-spot nad teplotou oleje v horní části nádoby transformátoru [K]
$\Delta \theta_{or}$ .....	oteplení v transformátorové nádobě nad teplotou okolí [K]
$\Phi_1$ .....	magnetický tok primárního vinutí [Wb]

$\Phi_2$  ..... magnetický tok sekundárního vinutí [Wb]

$\Phi_m$  ..... maximální hodnota celkového magnetického toku [Wb]

## Úvod

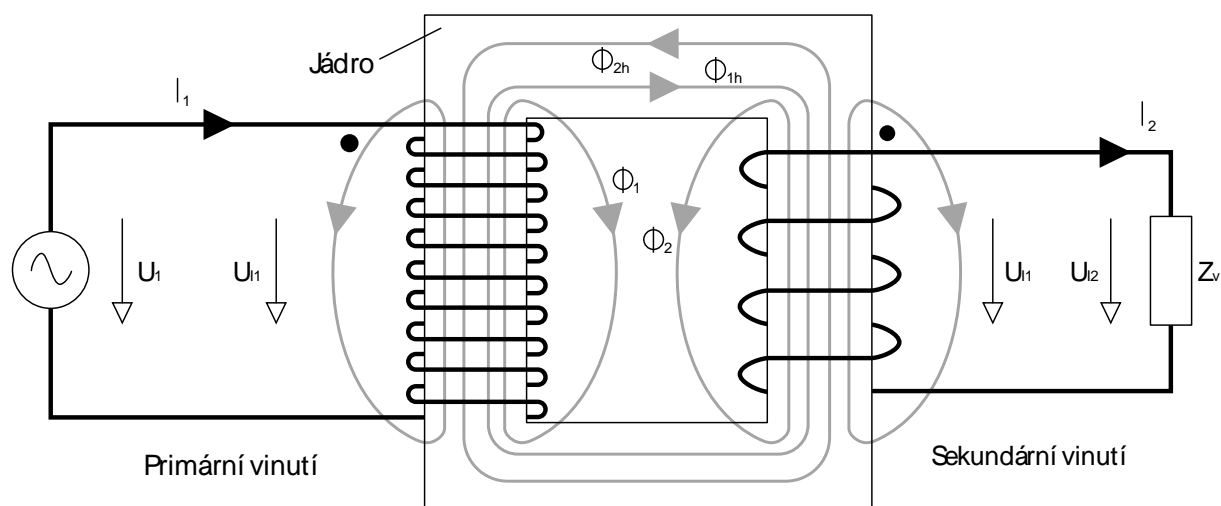
Málokdo si v dnešní době dokáže představit život bez elektřiny, člověk se s ní setkává již od začátku 20. století a využívá ji prakticky denně pro uspokojení svých potřeb. Zajištění dodávky odběratelům ať už na malé nebo velké vzdálenosti, je pro provozovatele složitý proces. K výrobě a přenosu elektrické energie se používá rozsáhlá elektrizační soustava.

Vyrobená elektrická energie se pro přenos musí vhodně upravit, tzn. na dlouhé vzdálenosti docílit velkých napětí a malých proudů aby nemusely být použity příliš tlusté vodiče, ve kterých by průchodem proudu vznikaly velké ztráty. Na druhém konci elektrizační soustavy je nutné znovu transformovat napětí a proudy na požadované výstupní hodnoty spotřebitelů. Tyto změny provádí transformátor, z toho důvodu je brán jako jeden z nejdůležitějších prvků celé elektrizační soustavy. Pro spolehlivý přenos elektrické energie je nutné transformátory po celou dobu jejich života udržovat v bezporuchovém stavu pomocí různých diagnostických metod.

V této práci budu popisovat nejrozšířenější typ transformátorů velkých výkonů, kterými jsou olejové transformátory. V první části jsou popsány jednotlivé klíčové prvky transformátoru z hlediska jejich poruchovosti, dále se zaměřím na on-line a off-line metody sloužící k určení jejich aktuálního stavu. V poslední části bude práce doplněna o přehledné porovnání jednotlivých metod u nejporuchovějších funkčních prvků.

# 1 Transformátor

Transformátor je elektrický netočivý stroj, pracující na principu elektromagnetické indukce. Mění vstupní (primární) hodnoty proudu a napětí, na požadované výstupní (sekundární), při zachování vstupního výkonu a bez dodání jakékoliv mechanické energie. V elektrizační soustavě se používá jako klíčový prvek pro snížení Joulových ztrát a tím zlepšení celkové hospodárnosti při přenosu elektrické energie, díky transformaci na vysoké napětí a menší proud. Dále se využívá například v jisticích, měřicích, regulačních zařízeních a v mnoha dalších odvětvích. Podle nároků kladených na transformátor se vyrábějí v různých modifikacích. Jmenovité výkony se proto pohybují ve velice širokých rozmezech, od řádu několika mVA, až po velké výkonové transformátory, jejichž jmenovitý výkon dosahuje stovek MVA. Liší se v počtech vinutí, mohou být jednovinut'ové nebo vícevinut'ové, jednofázové či více fázové, nejčastěji používanými jsou trojfázové. [1], [2]



Obr.1: Znázornění rozložení magnetického toku u jednofázového transformátoru. [3]

Z náhradního schématu transformátoru, lze zjednodušeně popsat jeho princip. Na primární svorky vinutí připojíme zdroj střídavého proudu a na svorky výstupního vinutí zátěž. Protéká-li proud primárním vinutím, budí v jeho jádře magnetický tok  $\Phi_1$ , který pomocí uzavřeného magnetického obvodu indukuje do sekundárního vinutí napětí. Proud sekundárním vinutím budí v jádře vlastní magnetický tok  $\Phi_2$  pouze v případě, je-li připojena zátěž. Součtem těchto magnetických toků, vzniká výsledný magnetický tok  $\Phi_m$ . Indukované napětí  $u_i$  je závislé na výsledném magnetickém toku  $\Phi_m$ , frekvenci  $f$  a počtu závitů  $N$ . [1], [2]

$$u_{i1} = 4,44 \cdot N_1 \cdot \Phi_m \cdot f, \quad (1.1)$$

$$u_{i2} = 4,44 \cdot N_2 \cdot \Phi_m \cdot f, \quad (1.2)$$

kde  $u_{i1}$  – indukované napětí primárního vinutí [V],

$u_{i2}$  – indukované napětí sekundárního vinutí [V],

$N_1$  – počet závitů primárního vinutí, [-]

$N_2$  počet závitů sekundárního vinutí, [-]

$\Phi_m$  – maximální hodnota střídavého magnetického toku [Wb],

$f$  – kmitočet primárního vinutí.[Hz]

Dalším hlavním parametrem používaným pro popis transformátoru je převod  $k$ , který lze určit ze vztahu (1.3). [1]

$$k = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.3)$$

kde  $U_1$  – napětí na primárním vinutí [V],

$U_2$  – napětí na sekundárním vinutí [V],

$I_1$  – proud protékající primárním vinutím [A],

$I_2$  – proud protékající sekundárním vinutím [A].

### Trojfázový transformátor

je velice rozšířený z důvodu trojfázové energetické soustavy, kde je potřeba transformovat tři fáze současně. Tento problém jde z části vyřešit zapojením do každé fáze jeden transformátor, problém nastává tehdy, pokud již tak výkonný transformátor nelze vyrobit. Dalšími velice důležitými výhodami jsou menší ztráty, spotřeba materiálu a nárok na prostor. [1]

Ze symetrie trojfázové soustavy lze odvodit vznik trojfázového transformátoru, kdy platí:

$$U_u + U_v + U_w = 0. \quad (1.4)$$

Úbytky na činných odporech jsou také symetrické

$$U_{iu} + U_{iv} + U_{iw} = 0 \quad (1.5)$$

z toho plyne, že součet magnetických toků je také roven nule. [1]

$$\Phi_u + \Phi_v + \Phi_w = 0. \quad (1.6)$$

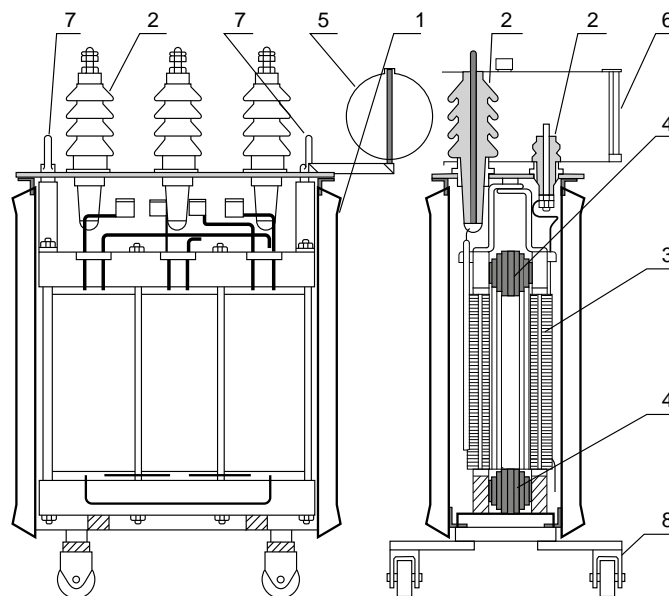
### 1.1 Popis jednotlivých funkčních prvků transformátoru

Statistiky získané za mnoho let provozu transformátoru ukazují, že nejčastější příčinou škod jsou poruchy na přepínači odboček a průchodkách. Poruchovost klíčových prvků je procentuálně znázorněna v tabulce 1. [13]

Tab. 1 Procentuální poruchovost výkonových transformátorů, vyřazených z provozu na delší dobu než 24 hodin [13]

Přepínač odboček	40%
cívka + jádro	35%
průchodky	14%
nádoba	6%
příslušenství	5%

Z toho důvodu je následující text zaměřen na popis jednotlivých funkčních prvků převážně z hlediska poruchovosti nežli konstrukce. Diagnostikou těchto prvků se získávají informace o jejich aktuálním stavu, který přímo souvisí s celkovou životností transformátoru.



Obr.2: Konstrukční schéma jednofázového olejového transformátoru. [3]

1 – nádoba, 2 – průchodka, 3 – vinutí 4 – magnetický obvod, 5 – konzervátor, 6 – olejznak, 7 – nosná oka, 8 – kolečka pro přepravu.

### 1.1.1 Vinutí transformátoru

Při provozu transformátoru, může dojít ke zkratu nebo dynamickému namáhání, z toho důvodu může dojít k uvolnění vinutí nebo jeho deformaci. Nemusí dojít přímo k destrukci stroje ale jeho schopnost odolávat různým namáháním je snížena. Dále transformátor ovlivňují vzrůstající zkratové výkony sítě, které vznikají zvyšováním výkonu přenosových soustav a jejich propojováním, na to nemusel být transformátor konstruován (jedná se spíše o starší transformátory). Diagnostika výkonových transformátorů proto zahrnuje několik metod, které odvozují mechanický stav vinutí na základě jeho nepřímých projevů. Tyto nepřímé projevy mohou citlivě reagovat na sebemenší změny v geometrii vinutí. Mezi metody zkoumání mechanického stavu vinutí patří měření akustických, vibračních, frekvenčních charakteristik, metoda nízkonapěťových impulsů nebo měření impedance nakrátko při snížení napětí. [17] Pro praktické využití se nejvíce používají metody nízkonapěťových impulsů a měření frekvenčních charakteristik. Vhodnější je metoda frekvenčních charakteristik, protože vliv teploty v rozmezí  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  a vliv zmagnetizování magnetického jádra je zanedbatelný. [4]

### 1.1.2 Jádro transformátoru

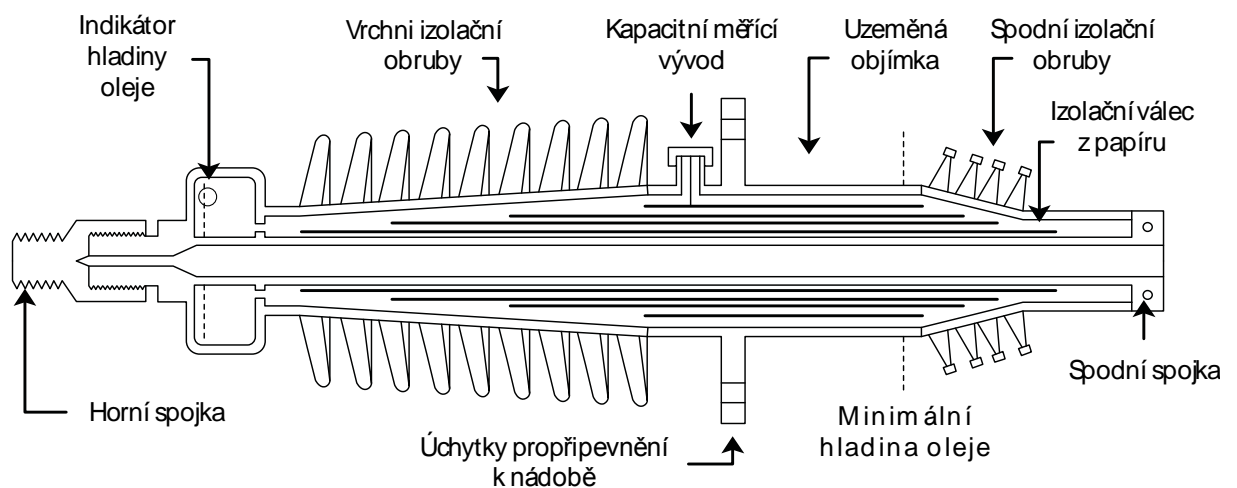
Jádro se skládá z tenkých za studena válcovaných orientovaných feromagnetických plechů. Výběr materiálu pro výrobu plechů se odvíjí od charakteristiky ztrát naprázdno daného transformátoru (i s ohledem na jeho úroveň hlučnosti). Nejčastěji se používá klasická izotropní ocel CGO, pokud se však požadují menší ztráty naprázdno, používá se vysoce jakostní HiB ocel. Takové plechy mají tloušťku přibližně 0.23 až 0.35 mm. Při skládání magnetického jádra se plechy vzájemně izolují lakem nebo chemicky. Vrstvený tvar jádra snižuje ztráty vířivými proudy a tím i jeho zahřívání. Dojde-li za provozu transformátoru k uvolnění některého z plechů, dochází k vibracím a následnému poškození jejich izolace. Poté prochází těmito místy vířivé proudy, tím se železo zahřívá a oxiduje (hromadí se kopečky rzi). Oprava takovéto poruchy spočívá ve výměně poškozených plechů a následnému znovu zkompletování a stažení jádra, což je nepříjemná a velmi nákladná záležitost. [3], [29]

### 1.1.3 Kondenzátorové průchodky

Porucha průchodek, pokud není včas signalizován počátek a rozvoj poruchy, je pro transformátor velice závažná, jelikož průchodka zajišťuje vyvedení vývodů vinutí přes svorníky ven z nádoby a prochází jimi velké hodnoty proudu a napětí. Z tohoto důvodu je nutné dodržovat **pravidelnou diagnostiku** jejich elektrické izolace, porovnávat naměřené

hodnoty a hledat odchylky od normálního ustáleného stavu transformátoru. Průchodky z hlediska konstrukce musí dále odolávat nepříznivým vnějším klimatickým podmínkám, vysokým změnám teploty a zamezit úniku oleje ven z nádoby po dobu životnosti transformátoru pomocí utěsnění spoje mezi nádobou a průchodkou. Porucha průchodky může často způsobit požár na samotném transformátoru. U výkonových transformátorů rozeznáváme dva základní typy průchodek, kterými jsou NN a VN. [3]

Pro zjišťování stavu elektrické izolace transformátorových průchodek se používají dvě základní metody, měření  $\text{tg}\delta$  a kapacity kondenzátorových polepů. Při měření ztrátového činitele  $\text{tg}\delta$  se porovnávají hodnoty kapacitních proudů průchodkou a svodových proudů v dielektriku, pomocí naměřených hodnot se určuje poměr těchto proudů, který udává kvalitu elektrické izolace dané průchodky. Kvalita kapacitních polepů se určuje měřením kapacity mezi vývodem a měřicí odbočkou, dále mezi měřicí odbočkou a zemí. Podrobnější princip diagnostiky kondenzátorových průchodek bude popsán v další části textu. [4]



Obr.3: Průřez olejovou průchodkou. [6]



#### 1.1.4 Izolační systém transformátoru

Izolace transformátoru sestává z dvou základních prvků:

- transformátorový olej
- papírová izolace

Olej obsažený v transformátoru má tři základní funkce, kterými jsou chlazení stroje, dielektrická pevnost a také jako transportní prostředek. Na diagnostiku transformátorového oleje (dále jen TO) je kladen značný důraz, jelikož aktuální stav TO je přímo spojen se stavem papírové izolace a její životnosti, která je často kratší než životnost ostatních konstrukčních prvků. Pokud není TO dostatečně udržován, začínají působit faktory ovlivňující stárnutí oleje, kterými jsou teplota, katalytické působení mědi, zvýšený obsah vody a kyslíku, elektrické pole. [5]

V důsledku těchto faktorů vznikají nežádoucí produkty, které jsou absorbovány do papírové izolace a naopak. Tím urychlují proces její nevratné degradace a vznikají změny v jeho fyzikálních, chemických a elektrických vlastnostech. Mezi hlavní důsledky patří zhoršení chlazení, které vzniká při usazování vzniklého kalu na vinutí a v olejových kanálcích, kyseliny zmenšující mechanickou pevnost izolantů a zhoršení elektrické pevnosti vodou obsaženou v oleji, která vzniká z okolní atmosféry. [5]

#### 1.1.5 Nádoba transformátoru

Nádoba chrání transformátor před vnějšími vlivy a slouží jako uložení izolační kapaliny (TO). Nádoba musí vyhovovat široké řadě kritérií, kterými jsou dobrá mechanická pevnost pro transport a havarijní stavy, olejetěsnost, schopnost odolávat širokému rozsahu teplot (od -30°C do 100°C) a dalším klimatickým vlivům. Vůči výše uvedeným faktorům musí být nádoba schopna odolávat po celou dobu životnosti transformátoru (cca 30 let). Nejčastěji používané materiály pro výrobu nádob jsou nízkouhlíková a nerezová ocel, povrchové úpravy jsou prováděny zinkováním. Horní část nádoby je spojena se spodní pomocí šroubů a následným svařením. Dále je nádoba opatřena otvory pro napouštění a filtraci oleje, indikátory teploty, kohoutkem pro vypouštění kalů a odběru vzorků oleje. K horní části jsou připojeny další funkční prvky transformátoru, kterými jsou konzervátor, Buchholzovo relé, bezpečnostní přetlakový ventil, příruby pro průchodky, kapsy pro zasunutí čidel a zvedací oka. [3]

### 1.1.6 Chladicí systém transformátoru

Typ chladicího systému se odvíjí od konkrétního transformátoru, při návrhu se uvažuje jeho jmenovitý výkon, zatížení, velikost proudů v jednotlivých vinutích, teplotní charakteristiky jednotlivých složek izolačního systému a prostorové požadavky. Způsob chlazení se označuje 4 písmeny. [3]

Tab. 2 Používaná označení chladicího systému transformátoru [13]

Chlazení	Číslo písmene a význam	Možná označení	Popis
Vnitřní	1. písmeno – chladicí médium	O	Minerální nebo syntetický olej (bod hoření < 300°C)
		K	Izolační kapalina s bodem zápalu > 300°C
		L	Izolační kapalina s neměřitelnou hodnotou bodu zápalu
	2. písmeno – způsob chlazení	N	Přirozený oběh chladiva v chladičích a vinutí
		F	Nucený oběh chladiva s přirozeným prouděním oleje ve vinutí
		D	Nucený oběh chladiva s usměrněným prouděním oleje v hlavních vinutích
Vnější	3. písmeno – chladicí médium	A	Vzduch
		W	Voda

	4. písmeno – způsob chlazení	N	Přirozený oběh
		F	Nucený oběh

Nejefektivnější metodou pro chlazení transformátoru je metoda cirkulace oleje v nádobě pomocí čerpadel a ofuk venkovních radiátorů pomocí ventilátorů. Při provozu transformátoru lze monitorovat a řídit zapnutí jednotlivých pohonných prvků, dále vyhodnocovat účinnost chlazení v nádobě, čerpadel a teploty na různých místech. Na základě rozdílu teplot oleje na vstupu a výstupu chladiče se posuzuje účinnost chladiče (popř. rozdíl mezi teplotou v horní vrstvě oleje a teplotou zpětného potrubí. Pro snímání teploty se aplikují odporové teploměry. Měření rychlosti proudění chladicí kapaliny se provádí pomocí senzorů pracujících na principu odporového můstku. [3]

### 1.1.7 Přepínač odboček

Přepínač odboček je část transformátoru umožňující řízení napětí vinutí vyššího napětí. Je umístěn ve vlastní nádobě plněné olejem. Přepínání odboček lze provádět při uzavřené nádobě transformátoru, protože ovládání je umístěno na víku nebo na stěně nádoby. Pro bezproblémový chod přepínače odboček se provádí údržba **kontaktů, izolačního oleje a mechanismu motorového pohonu**. Údržba se skládá z [4]:

- každoroční prohlídky, kterou provádí místní údržba,
- generální údržby prováděné odborníkem v intervalech uvedených na výkonovém štítku,
- pokud stanoví údržba, provádí se výměna kontaktů odborným personálem.

Při údržbě **mechanismu motorového pohonu** se provádí hlavně jeho vizuální kontrola. Dále se zkouší správný chod motoru a počítadla, které slouží k registraci každého přepnutí odbočky transformátoru. [4]

Pokud se zjistí **pokles hladiny oleje**, napuštěného v nádobě přepínače odboček, ale není registrován žádný únik, znamená to, že tlumený plyn, který je obsažen v nádobě nad olejem, se v oleji rozpustil. Za těchto okolností se musí provést obnova plynového tlumení při odstaveném transformátoru z provozu. [4]

Pomocí teploty oleje v přepínači, velikostí zatěžovacího proudu a znalostí materiálových charakteristik kontaktů lze zjistit aktuální stav (opotřebení) **spínacích kontaktů** výkonové části. [4]

### 1.1.8 Konzervátor

Jedná se o dilatační nádobu připojenou k víku transformátoru. Její objem je přibližně 9-10% celkového objemu oleje v transformátoru a chladicím systému. Hlavním účelem je možnost kompenzace hladiny oleje, protože při zvýšení teploty transformátoru se objem oleje zvyšuje. Konzervátor spolu s přepínačem odboček se skládá ze dvou samostatných komor, jedna řídí expanzi oleje v nádobě transformátoru a druhá v přepínači odboček. Komory jsou vybaveny magnetickým indikátorem hladiny oleje, vysoušečem se silikagelem, plnicím/vypouštěcím ventilem, ventilem pro vypouštění sedimentu a inspekčním otvorem. Hlavní komora je připojena k nádobě transformátoru trubkou přes Buchholzovo relé a dva uzavírací ventily. Relé slouží pro odpojení transformátoru v případě, kdy je zaznamenán pokles či nárůst hladiny oleje, který je charakterizována rychlostí průtoku oleje popř. zvýšením obsahu nežádoucích plynů (oxid uhelnatý, vodík atd.). Přídavná komora je spojena s hlavou přepínače trubkou přes indikátor průtoku oleje. [3], [18], [19]

TO je velmi hygroskopický pokud je konzervátor přímo spojen s atmosférou. Z toho důvodu vstupuje do něj vlhkost vzduchu, která výrazně **snižuje jeho izolační vlastnosti**. Proto je konzervátor vybaven vysoušečem vzduchu. Vysoušeč zabraňuje vniknutí vlhkosti pomocí silikagelu, jehož schopností je absorpce vody. Pokud silikagel změní barvu z oranžové na bezbarvou, znamená to, že absorboval kolem 6% hmotnosti vody. Regenerace silikagelu se uskutečňuje v rozmezí teplot od 130°C do 150°C, kdy probíhá změna jeho barvy z bezbarvé na oranžovou, poté je silikagel opět funkční. [18], [19]

### 1.1.9 Buchholzovo relé

Plynové relé je zpravidla umístěné mezi nádobou a konzervátorem transformátoru. Slouží k jistění a signalizaci poruchy transformátoru. Poruch může nastat hned několik např. při nadměrném přehřívání transformátoru, které je způsobeno zkratem ve vinutí nebo při průrazu olejové náplně vlivem zkondenzované vlhkosti. Dalším problémem je teplotní rozdíl objemu oleje, který je způsoben vlivem okolních teplot (zima-léto) a vnitřním ohřevem v závislosti na odebraném výkonu. Vložením plynového relé mezi nádobu transformátoru a konzervátor je zajištěno vyrovnání tohoto teplotního rozdílu objemu oleje. [20]

## 2 Diagnostika transformátoru

Výkonové transformátory jsou jednou z nejdůležitějších částí elektrizační soustavy. Většina transformátorů je vystavena po řadu let různým klimatickým podmínkám, elektrickému a mechanickému namáhání. Mimo nákladů spojených s opravou případné poruchy zařízení nebo výměny, jsou nejhlavnější velké výkonové ztráty, které vznikají po dobu, kdy je zařízení mimo provoz (velké hospodářské ztráty). Z toho důvodu se provádí diagnostika a monitoring jednotlivých klíčových prvků transformátoru. Diagnostika transformátorů slouží ke kontrole správného chodu jednotlivých prvků a jejich reakce na vnější podněty. Dále umožňuje předcházet poruchám a je nedílnou součástí preventivní údržby transformátoru. Z hlediska způsobu sběru dat rozeznáváme dva základní typy diagnostiky, kterými jsou off-line a on-line, podrobněji popsány v bodech 2.1, 2.2. Od diagnostiky se očekává [13]:

- prodloužení zbývající životnosti transformátoru
- vyšší spolehlivost
- zjištění stavu izolačního systému
- prevence ztrát a zničení.

K předčasnému, nečekanému selhání může dojít prostřednictvím následujících namáhání: elektrické, elektromagnetické, dielektrické, teplotní a chemické. [13]

### 2.1 Off-line diagnostika

Diagnostika poskytuje informace formou jednotlivě naměřených hodnot získaných v pravidelných intervalech, které jsou dány důležitostí a aktuálním stavem transformátoru. Na délce intervalu je závislý počet nasbíraných dat, z kterých je možno sledovat trend daných diagnostických ukazatelů. Off-line diagnostika se provádí na zařízení, které je odstavené z provozu např. formou údržby. Touto metodou se sleduje zařízení po celou dobu jeho existence, od výroby, přes distribuci, až po následný provoz. Do této kategorie lze také zařadit základní zkoušky, které jsou dány normou ČSN EN 60076 pro veškerá zařízení. V dnešní době se díky vývoji elektroniky a výpočetní techniky pozvolna přechází k tzv. on-line diagnostické metodě, která monitoruje jednotlivé prvky v časově kratších intervalech. [4], [14]

### 2.1.1 Měření činného odporu vinutí

Měření činného odporu se provádí na primárním a sekundárním vinutí. Pokud jde o regulační transformátor, lze zjistit hodnotu odporu postupným zařazováním všech odboček (kontakty přepínače, připojení odboček vinutí), z kterých se může určit kvalita regulačního zařízení. Pro zjišťování odporu vinutí se používá přímá a můstková metoda. Při měření na konkrétním vinutí, musí být zbylá vinutí rozpojena. Používaný proud nesmí překročit 0,2 násobek hodnoty jmenovitého proudu vinutí. Nejčastěji volená hodnota proudu činní nejméně  $2\sqrt{2}I_0$ , pomocí které lze snížit dobu ustálení proudu ( $I_0$  je efektivní hodnota proudu naprázdno, která odpovídá jmenovité hodnotě napětí transformátoru). [4]

Pro určení činného odporu vinutí se musí změřit odpory mezi svorkami  $R_{UV}$ ,  $R_{UW}$ ,  $R_{VW}$ . Pokud se odpory mezi fázemi liší minimálně, můžeme určit hodnotu odporu jedné fáze  $R_f$  (střední hodnota z naměřených hodnot) podle následujícího vztahu:

$$R_f = \frac{1}{6} (R_{UV} + R_{UW} + R_{VW}) \quad (2.1)$$

Pro různé možnosti zapojení vinutí, vycházíme ze vztahů, kde první slouží pro výpočet při zapojení do hvězdy a druhý do trojúhelníku.

$$R_f = 0.5 * R_S, \quad (2.2)$$

$$R_f = 1.5 * R_S \quad (2.3)$$

V diagnostické praxi se hodnota činného odporu vinutí používá pro přesné stanovení teploty vinutí transformátoru. [4]

### Teplota vinutí

Teplota vinutí je důležitá pro správné vyhodnocování dalších diagnostických metod, kterými jsou např. izolační odpor, kapacita a ztrátový činitel. K hrubému stanovení teploty vinutí můžeme určit pouze pomocí teploměrů instalovaných v transformátoru. Často se u velkých transformátorů používají dva teploměry, z nichž jeden měří teplotu oleje u dna a jeden pod horním víkem nádoby. Aritmetický průměr těchto dvou hodnot vyjadřuje výslednou teplotu oleje. Použitím této metody však získáme pouze hrubé stanovení teploty. Přesnější výsledek získáme výpočtem hodnot činného odporu vinutí při známé teplotě (údaj od výrobce) podle vztahu [7]:

$$t_x = \frac{R_x}{R_0} (t_0 + 235) - 235 \quad (2.4)$$

Kde  $t_x$  neznámá teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $R_0$  odpor vinutí při známe teplotě [ $\Omega$ ],  
 $R_x$  naměřený odpor vinutí při neznáme teplotě [ $\Omega$ ],  
 $t_0$  známá teplota udávaná výrobcem [ $^{\circ}\text{C}$ ]. [7]

### 2.1.2 Měření izolačního odporu vinutí

Tato metoda slouží k ověřování stavu izolačního systému u netočivých strojů již delší dobu. Měření probíhá v předem stanovených časových intervalech (15 a 60 sekund po připojení napětí), kdy je měřen proud protékající vinutím při určité hodnotě stejnosměrného napětí. Proud protékající izolací má tři složky:

- **kapacitní proud** - vyvolává ho vnitřní odpor vinutí, zaniká v okamžiku, kdy je na zkoušeném předmětu plné napětí (nabíjecí proud kapacity)
- **absorpční proud** - vzniká polarizací dielektrika,
- **vodivostní proud** - proud protékající izolací, který způsobuje činné ztráty v izolaci.

Pro měření izolačního odporu se používá stejnosměrné napětí doporučenou hodnotou 2,5 kV. Toto napětí by nemělo překročit 0,5 násobek zkušebního napětí kmitočtu 50 Hz. Měření se musí provádět tehdy, kdy je stroj odpojen z provozu a jeho teplota se pohybuje kolem 20 až 30 $^{\circ}\text{C}$ . [3]

Tab. 3 Zapojení vinutí transformátoru při měření izolačního odporu

Transformátory s dvojitým vinutím		Transformátory s trojitým vinutím	
Měřené vinutí	uzemněno	Měřené vinutí	uzemněno
VN <sup>1)</sup>	NN, k	VN	SN, NN, k
NN <sup>3)</sup>	VN, k	SN <sup>2)</sup>	VN, NN, k
VN + NN	K <sup>4)</sup>	NN	VN, SN, k
		VN + SN	NN, k
		VN + SN + NN	K

1) VN - vinutí vyššího napětí

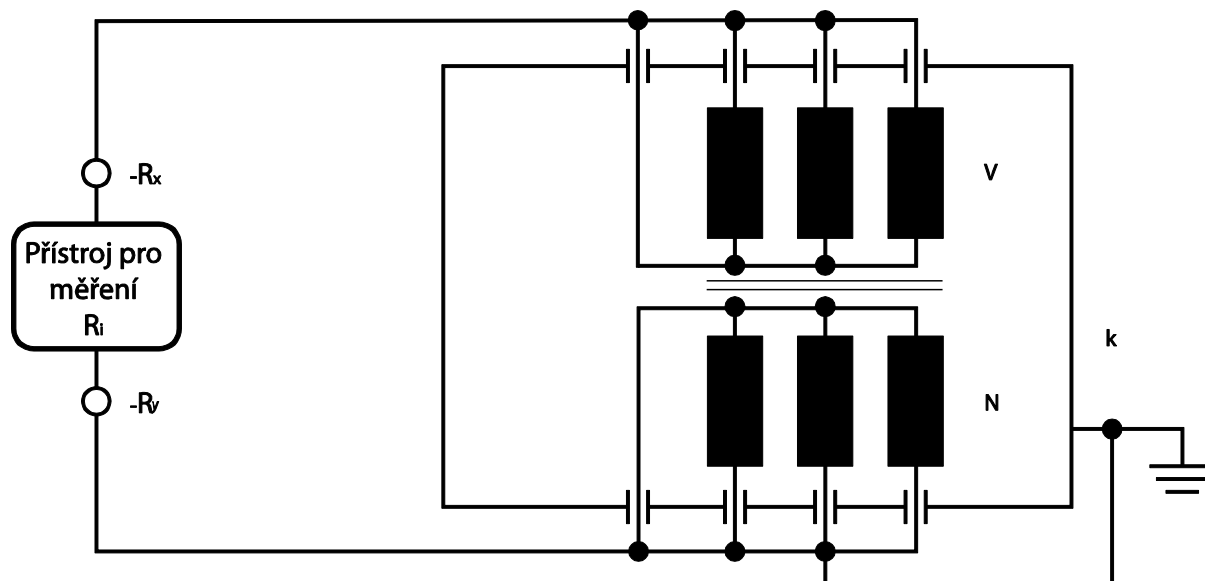
2) SN - vinutí středního napětí

3) NN – vinutí nižšího napětí

4) k – kostra, nádoba

### Příklad měření na dvouvinutovém transformátoru

První měření probíhá, kdy je záporný pól měřicího přístroje připojen na vinutí V a kladný pól připojen na kostru k (s kostrou je spojeno vinutí N). Další měření probíhá stejným způsobem po přepojení vinutí (záporný pól měřicího přístroje připojen na N, V spojeno s kostrou). Poslední měření izolačního odporu se provádí, když záporný pól je připojen na obě spojená vinutí a kladný pól je spojen s kostrou. Odpor se spočítá pomocí všeobecně známého Ohmova zákona. Faktory ovlivňující pokles izolačního odporu jsou vlhkost a vodivé nečistoty. Absolutní hodnotu izolačního odporu určuje hodnota odečtená 60s po připojení napětí. Obě hodnoty odporu v čase 15s a 60s určují celkovou hodnotu polarizačního indexu. [4], [7], [8]



Obr.4: Schéma pro měření izolačního odporu dvouvinutového stroje (zapojení V:N+k)

### Polarizační index

Polarizační index nám určuje aktuální stav izolace (přítomnost vlhkosti). Je to poměr hodnot izolačních odporů, získaných měřením v různém čase, kdy čítec je vždy hodnota změřená v pozdějším čase. V literatuře se také uvádí jako čítec absorpce nebo polarizace Určuje se jednominutový polarizační index  $p_{i60}$  ze vztahu

$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} \quad (2.5)$$

Obě hodnoty  $R_{iz}$  jsou hodnoty naměřené v čase 60s a 15s po připojení napětí, jejich velikost se udává v MΩ. [4],[7]



### 2.1.3 Měření pevného dielektrika

Pevné dielektrikum (papírová izolace vinutí) je prvkem transformátoru, u kterého není možnost při jeho poruše výměny či regenerace. Z toho důvodu je klíčovým prvkem z hlediska životnosti transformátoru, papírové izolace má z pravidla kratší než je životnost ostatních konstrukčních prvků. Pro zabránění rychlého stárnutí izolace se musí ošetřovat olejová náplň transformátoru, která má na životnost izolace velký vliv (životnost olejové náplně je přibližně dvakrát až třikrát kratší). Produkty rozkladu oleje jsou absorbovány papírem a naopak. [9]

#### Metoda C<sub>2</sub>/C<sub>50</sub>

Metoda slouží k určení míry navlhnutí izolačního systému transformátoru plněného olejem. Principem je porovnávání dvou kapacit  $C_2$  (kapacita měřená při frekvenci 2 Hz) a  $C_{50}$  (kapacita měřená při frekvenci 50 Hz). Metoda využívá závislosti relativní permitivity na kmitočtu střídavého elektrického pole, která se projevuje u většiny dielektrik a souvisí s jejich polarizací. Hlavním ukazatelem je přítomnost vody, která je silně polární látkou. Zjištěné kapacity  $C_2$  a  $C_{50}$  se u nenavlhle izolace příliš neliší, zatímco u navlhle je tomu naopak. Stanovení kapacity  $C$  vinutí proti kostře (měření uzpůsobeným měřicím přístrojem), která je totožná s kapacitou  $C_{50}$ . Poté se určí rozdíl kapacit  $C_2 - C_{50}$  (naměřené při kmitočtech 2 a 50 Hz), který představuje přírůstek kapacity  $C$ . Pomocí rozdílu těchto dvou kapacit a dalších diagnostických veličin lze objektivněji určit stav izolace transformátoru. [7]

#### Postup měření

Prvním krokem je připojení svorek  $C_X$  měřicí přístroje na stranu vyššího napětí (VN), druhá svorka je spojena se stranou nižšího napětí, která je zároveň spojena s kostrou (NN +k, popř. SN). Měřicí přístroj se nabíjí po dobu jedné minuty při frekvenci 50 Hz, poté se odečte ustálená výsledná hodnota  $C_{50}$ . Dalším krokem kdy je hodnota odečtena se všechna vinutí spojí s kostrou a dochází k vybíjení po dobu jedné minuty. Následně se měřicí přístroj přepne do polohy  $C_2 - C_{50}$  a měří se stejným způsobem po dobu jedné minuty při napětí 120 V. Po odečtení hodnoty se tentokrát vybíjí po dobu 3 minut (vybíjení po tuto dobu se provádí vždy před měřením v dalším zapojení). Nakonec se provede měření, při kterém se všechna vinutí spojí a měří se proti kostře, kdy jeden přívod je připojen na pospojovaná vinutí a druhý na kostru transformátoru. Přehled zapojení je znázorněn v tabulce X. [4] Poměr kapacit lze určit z následujícího vztahu:

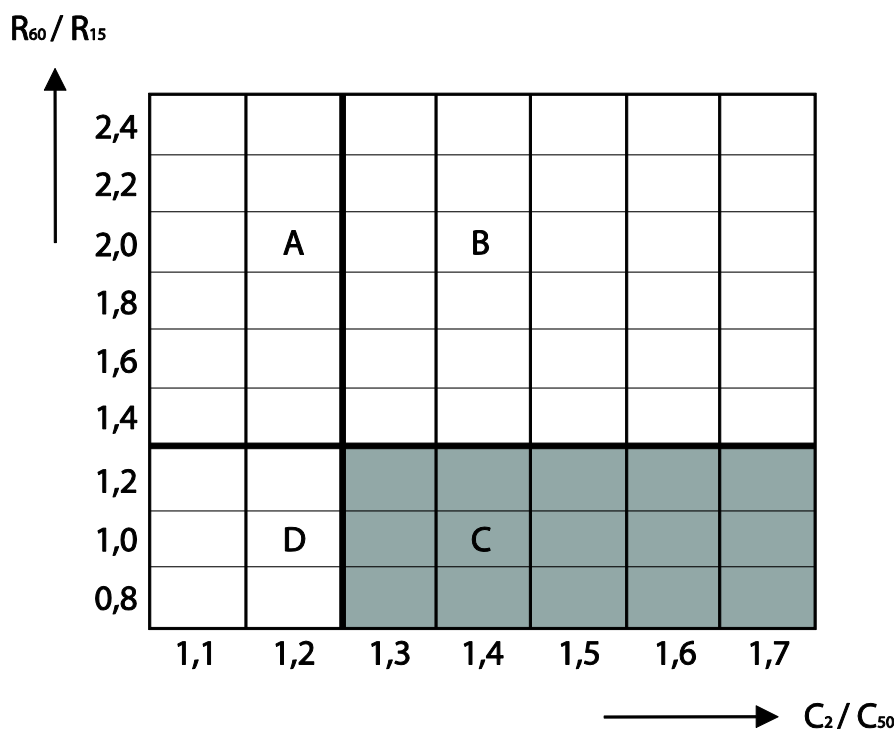
$$C_2/C_{50} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1 \quad (2.6)$$

Tab. 4 Zapojení transformátoru při měření pevného dielektrika [4]

Transformátory s dvojitým vinutím		Transformátory s trojitým vinutím	
Měřené vinutí	uzemněno	Měřené vinutí	uzemněno
VN	NN, k	VN	SN, NN, k
NN	VN, k	SN	VN, NN, k
VN + NN	K	NN	VN, SN, k
		VN + SN	NN, k
		VN + SN + NN	K

V Tab .5 jsou uvedeny mezní hodnoty pro izolační systém transformátoru, které se porovnávají s naměřenými hodnotami C2–C50. Navlhlost izolaci charakterizují hodnoty převyšující hodnoty v dané tabulce. [4]

Teplota vinutí [°C]	10	20	30	40	50
Poměr C2/C50 [-]	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5



Obr.5: Určení navlhlosti izolační soustavy pomocí hodnot polarizačního indexu a veličiny  $C_2/C_{50}$

**A** - nenavlhnutý transformátor, **B** - suchý olej, navlhnutý transformátor, **C** - navlhnutý transformátor, **D** - transformátor nenavlhnutý, ale s izolační vadou

#### 2.1.4 Měření ztrátového činitele a kapacity vinutí, výpočet časové konstanty vinutí

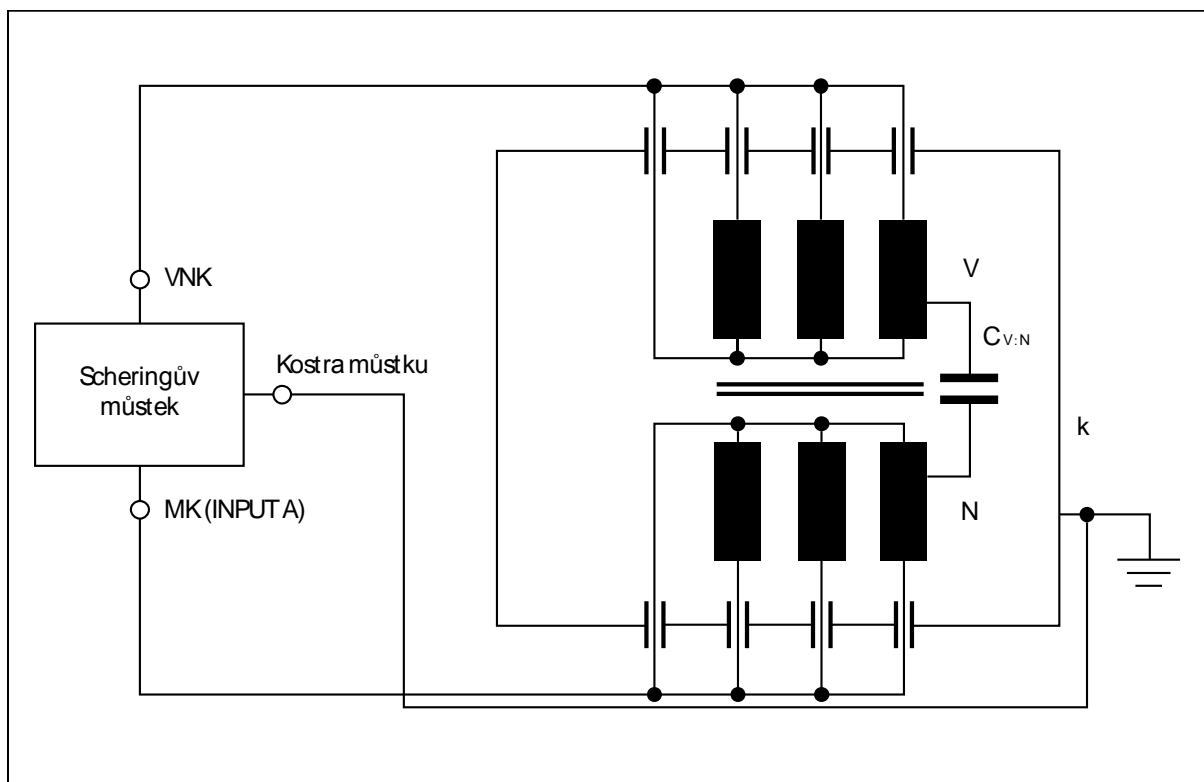
Velikost ztrátového činitele ( $\text{tg}\delta$ ) je přímo úměrná ztrátám energie rozptýlených v dielektriku, při jeho namáhání proměnným elektrickým polem. Pro posouzení aktuálního stavu izolačního systému transformátoru mají velký význam hodnoty ztrátového činitele a kapacity, kdy velikost ztrátového činitele je ovlivněna polarizací měřeného dielektrika (přítomnost vody, mechanických mikronečistot, reakčních produktů stárnutí a tepelného namáhání izolace), dále také teplotou a cirkulací izolačního media. Velikost ztrátového činitele je v absolutní hodnotě bezrozměrný údaj (v praxi se často udává údaj vynásobený  $10^2$ ). Velikost kapacity je v rozmezí pF a  $\mu\text{F}$ . [12]

Měření kapacity a ztrátového činitele se provádí střídavým napětím 10 kV, jestliže izolační hladině měřeného vinutí nebo průchodky toto napětí nevyhovuje, použije se zkušební napětí o nižších hodnotách z řady 0,5-1-2-5 kV. Měření se provádí na obou polaritách napájecího napětí kvůli eliminaci rušení. Teplota stroje by se měla při měření blížit 30 až 20°C. [15]

#### Měření na dvouvinutovém transformátoru

Měřicí můstek se k transformátoru připojí pomocí příslušných kabelů, kdy vysokonapěťový kabel (VNK) je spojen s vinutím vyššího napětí a měřicí kabel (MK) s vinutím nižšího napětí. Nádoba transformátoru je spojena s kostrou napájecího zdroje. Nejprve se proměří varianty UST, GST, GSTg, po změně polarity napájecího zdroje se měření opakuje. Při záměně kabelů VNK a MK se opakuje výše uvedené měření. Nakonec se VNK připojí obě vodivě spojená vinutí a proměří se zapojení GSTg. [16]

**UST** (Undergouted Specimen Test) – měří se kapacita a ztrátový činitel vinutí V proti vinutí N. Nádoba je uzemněna. [16]



Obr.6: Zapojení transformátoru UST [16]

**GST** (Grounded Specimen Test) – vinutí N je spojeno s kostrou. Měří se kapacita a ztrátový činitel vinutí V proti N spolu s kapacitou V proti k. [16]

**GSTg** (Grounded Specimen Test with guarding) – Měří se ztrátový činitel a kapacita vinutí V proti k, kdy vinutí N je připojeno na nulovém potenciálu virtuálně vytvořeném můstku. Měření se provádí na uzemněném objektu. [16]

### Měření na trojvinutovém transformátoru

Připojení můstku se provádí připojením VNK na vinutí V, MK na vinutí S, které je spojeno s vinutím N. Kostra je spojena s nádobou transformátoru. Nejprve se proměří UST, GST a GSTg, poté měření proběhne znovu při záměně VNK s MK, přičemž vinutí V je spoje s vinutím N. Nakonec se VNK připojí na vinutí N a MK na vinutí V, které je spojeno s vinutím S. [16]

### Výpočet časové konstanty vinutí

V praxi se používá pro objektivní vyhodnocení stavu izolační soustavy (bez ohledu na výkon a typ stroje). Časovou konstantu ( $\tau$ ) lze vyjádřit ze vztahu [12]:

$$\tau = R_{iz60} \times C_{50} \quad (2.7)$$

kde  $R_{iz60}$  – naměřený 60 s po připojení měřícího napětí [M $\Omega$ ],  
 $C_{50}$  - kapacity měřená při 50 Hz. [pF]

#### 2.1.5 Měření ztrátového činitele a kapacity na kondenzátorových průchodkách

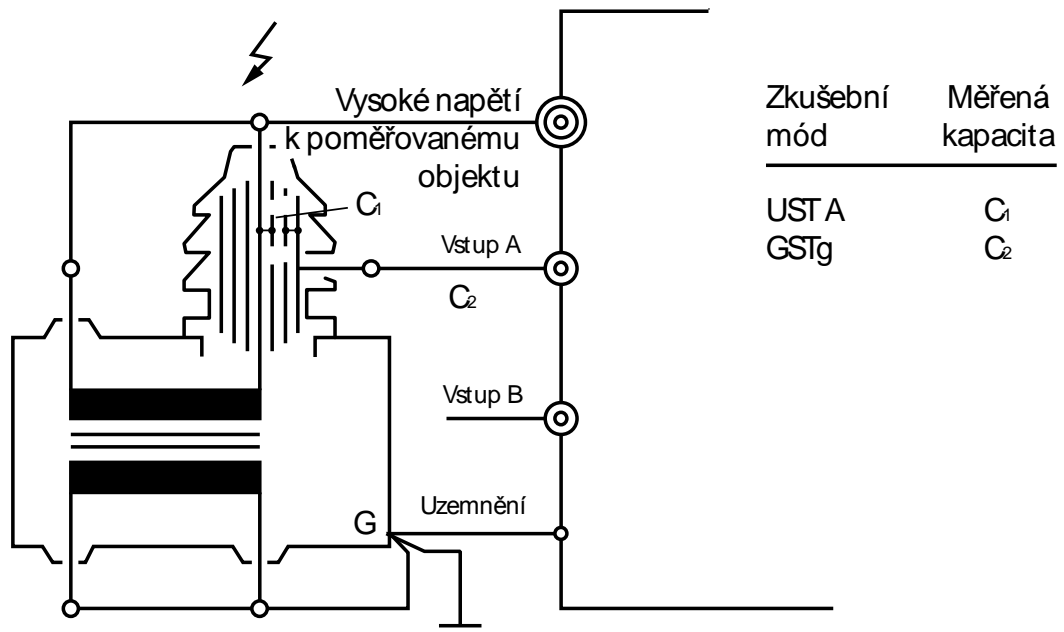
Jednou ze základních diagnostických metod pro stanovení stavu průchodek je sledování změn její kapacity. Tato změna je přímo závislá na navlhnutí izolace. Vývoj změn kapacit při provozu stroje je vhodné sledovat a porovnávat s výsledky naměřených hodnot před montáží nebo po instalaci průchodky na stroj. Hodnoty se nesmí lišit více než 1% původní stanovené hodnoty, změřené u výrobce. Měření kapacity se zpravidla provádí při měření ztrátového činitele. [4]

Dalším ukazatelem, ze kterého lze posoudit stav průchodky je měření velikosti ztrátového činitele, jenž je přímo úměrný ztrátám rozptýleným v dielektriku při jeho namáhání proměnným elektrickým polem. Tyto ztráty se přeměňují v teplo a ohrožují společně s teplotou vinutí izolační stav průchodky a vodiče. Může dojít k následné destrukci průchodky. [7]

#### Postup měření

Můstková metoda je nejčastěji používaná pro měření velikosti ztrátového činitele. Provedení je možno rozdělit do dvou kroků. V prvním kroku se měří izolační část průchodky. Měření se provádí na hladinách napětí 2, 4, 6, 8, 10 kV, případně 12 kV. Napájecí kabel můstku je spojen se svorníkem průchodky, měřící kabel k měřicímu vývodu a můstek je uzemněn ke kostře měřeného stroje (měření získané hodnoty se značí  $C_1$  a  $\text{tg}\delta_1$ ). [4], [8]

Při dalším měření je nutné zaměnit napájecí kabel s měřícím, ten se musí připojit ke svorníku průchodky. Nejčastěji používané měřící napětí nesmí překročit hodnotu, pro kterou je měřící vývod konstruován (nejčastěji 3 kV). Kapacita a ztrátový činitel se měří mezi svorkou měřícího vývodu a kostrou stroje (měření získáme hodnoty  $C_2$  a  $\text{tg}\delta_2$ ). [4], [8]



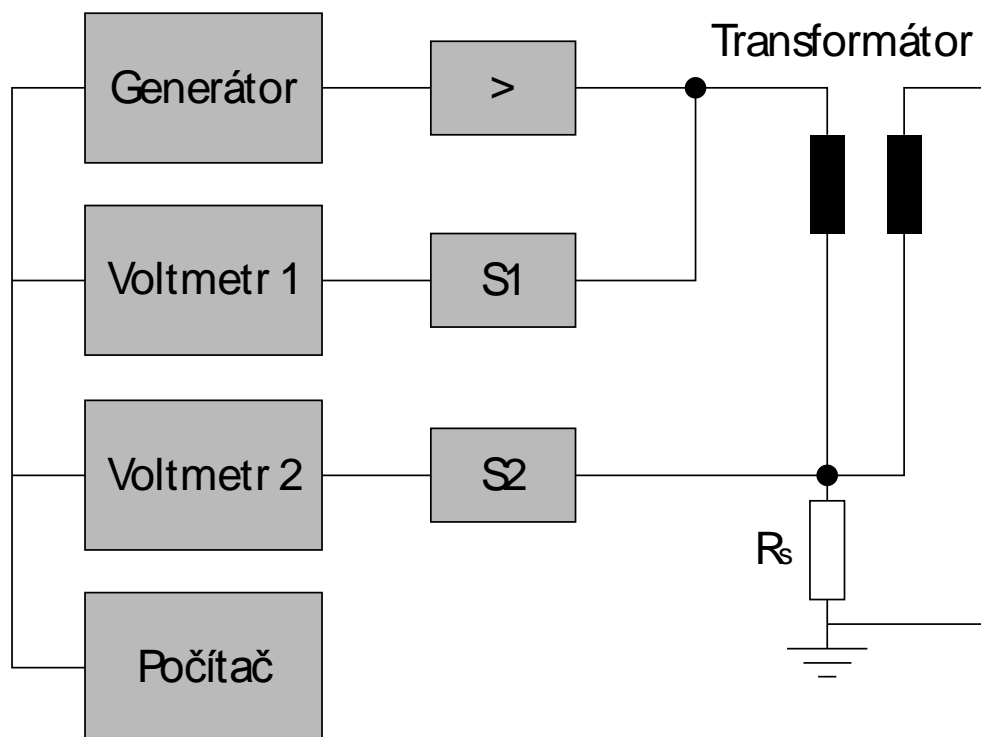
Obr.7: Schéma zapojení měřícího obvodu při měření ztrátového činitele kondenzátorových průchodek

### 2.1.6 Měření frekvenčních charakteristik (SFRA – Sweep Frequency Response Analyzer)

Tato metoda se používá pro detekci poruch vinutí transformátoru, kterými jsou mezifázový zkrat a deformace vinutí. Princip metody, je založen na skutečnosti, že každé vinutí transformátoru představuje určité uskupení mezizávitových kapacit, kapacit vinutí proti zemi, vzájemných a vlastních indukčností a odporu vinutí. Všechna tato uskupení jsou charakterizována svojí vlastní frekvenční charakteristikou, tzn. závislost útlumu napětí na frekvenci. Každá porucha, vyvolávající určitou změnu některé kapacity nebo indukčnosti, se projeví jako změna v průběhu frekvenční charakteristiky. Úkolem metody frekvenčních charakteristik je detekce těchto změn. [7]

Analýza frekvenčních charakteristik je relativní metoda diagnostiky. Aktuálně naměřené hodnoty se porovnávají s hodnotami z předchozích měření. Měření se provádí za stavu, kdy je transformátor odpojen od sítě. Musí se dodržet stejné podmínky jako v předchozích měřeních, kterými jsou stejná poloha přepínače odboček, zapojení vinutí a rozmístění měřících kabelů. (VF obvod vinutí představuje komplexní R-L-C člen-dvojbran). Každá naměřená frekvenční odezva je unikátní. Pokud opakované měření ukazuje odchylku, lze konstatovat, že došlo ke změně v geometrii vinutí. Detekovat lze i velmi malé posuny nebo deformace vinutí, protože způsobují jasně čitelné změny měřené přenosové funkce. [8]

Pomocí této metody lze určit tyto závady: přídatné závity na magnetickém jádře nebo cívce, mezizávitové zkraty, vadné uzemnění jádra, zhroucení vinutí, mechanické poškození jádra a vinutí apod. [8] Hlavní výhodou je široký frekvenční rozsah a s neomezenou maximální frekvencí. V praxi se nejčastěji využívá měření do frekvence 10 MHz. [4]



Obr.8: Schéma zapojení pro měření frekvenčních charakteristik

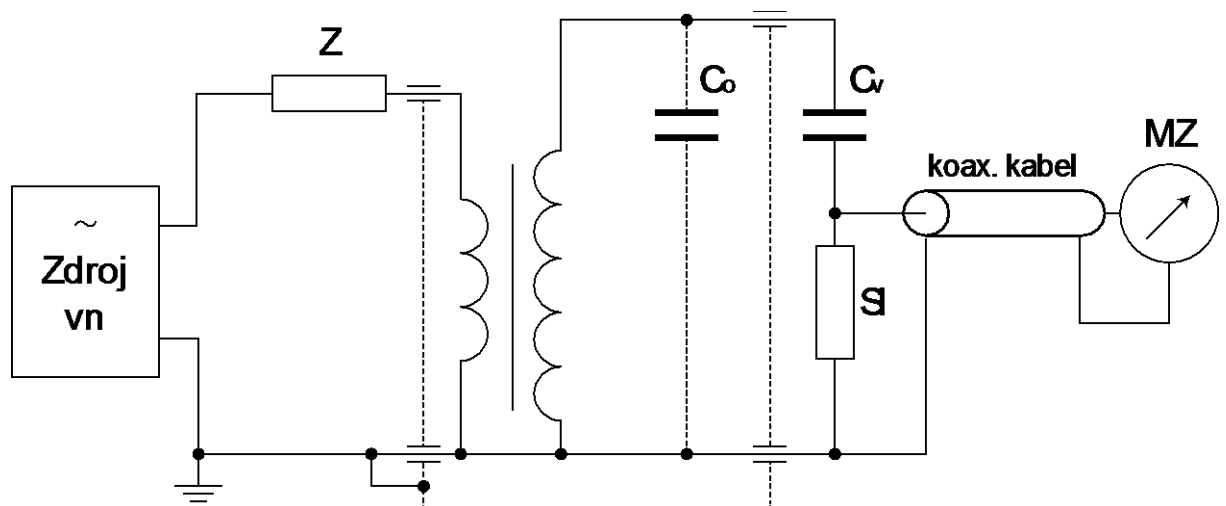
### Postup měření

Prvním krokem při měření průběhu frekvenční charakteristiky u jednofázového transformátoru je připojení generátoru, který přivádí napětí s postupně rostoucí frekvencí na vstupní svorku měřeného vinutí, zároveň je jeho konec spojen přes snímací odpor  $R_s$  se zemí. Ostatní vinutí jsou zkratována a uzemněna. Z naměřených hodnot voltmetrů 1 a 2 na odporu  $R_s$  při jednotlivých frekvencích se určí útlum napětí  $B$ . Závislost zjištěného útlumu na frekvenci představuje frekvenční charakteristiku, která citlivě reaguje na změny parametrů vinutí transformátoru.

### 2.1.7 Měření částečných výbojů

Metoda je založena na měření a vyhodnocování proudových impulsů vyvolaných ve vnějším měřicím obvodu částečnými výboji, které vznikají ve vyšetřovaném izolačním systému. Tyto výboje mohou vznikat v dutinách izolace, mezi vodičem a jeho vlastní izolací, mezi špatně

odizolovanými částmi magnetického obvodu, na povrchu izolace, na rozhraní dvou dielektrik, mezi kontakty apod. Příčinou vzniku může být špatně navržená izolační soustava, nedodržení technologických postupů nebo překročení provozních podmínek daného transformátoru. Měření částečných výbojů se aplikuje nejen na vinutí a jednotlivé cívky transformátoru ale také na jeho funkční prvky. Cílem je určit stav jednotlivých klíčových funkčních prvků transformátoru (přepínač odboček, průchodky atd.) a předejít poruše popř. v čas lokalizovat oblast poruchy. V praxi jsou využívány metody galvanické, akustické, UHF, optické a chemické. K měření výbojové činnosti musí být transformátor řádně připraven, což znamená, že povrch průchodek musí být suchý, čistý a zároveň musí být opatřen stíněním k odstranění korony. [3], [4], [7]

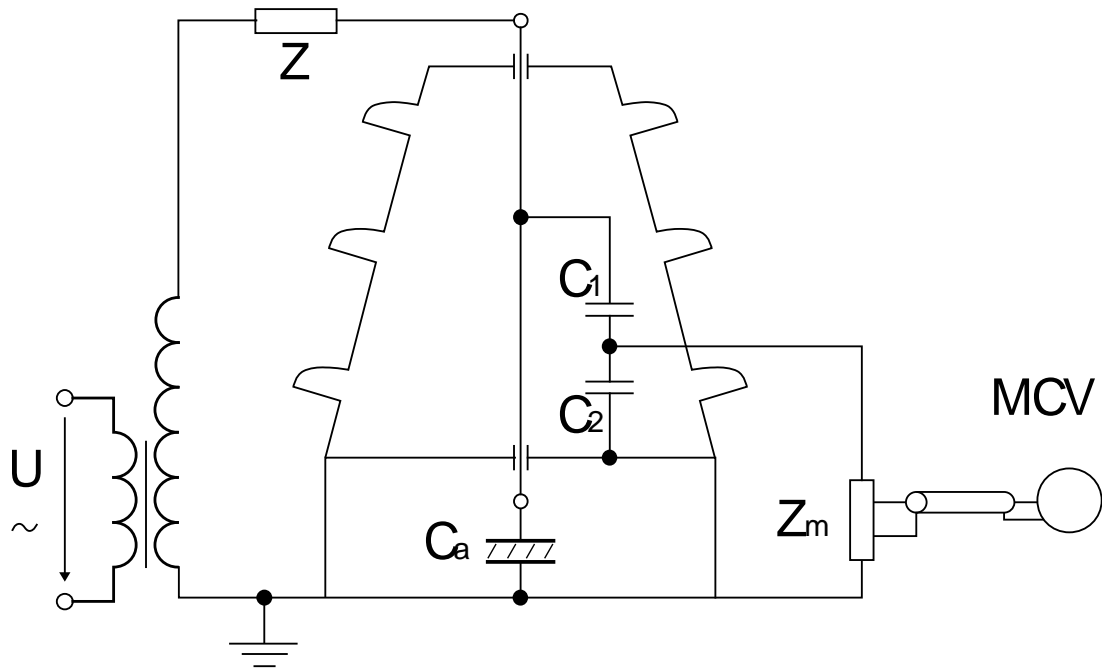


Obr.9: Galvanická metoda snímání napěťových impulsů [4]

$C_0$  – kapacita zkoušeného objektu,  $C_v$  – kapacita průchodky,  $SI$  – impedance měřícího obvodu,  $Z$  - filtr

**Galvanická metoda** je založena na principu sledování přímých impulsů částečných výbojů. Tyto impulsy jsou odděleny od napájecího napětí, na jehož hodnotu se superponují měřící impedance. Při měření transformátoru odpojeného ze sítě se odpojí primární vinutí a měřící impedance se sériově spojí ke kapacitě průchodky a paralelně ke kapacitě měřícího objektu (Obr. 10). [3], [4]





Obr.10: Připojení měřícího zařízení k měřicímu vývodu průchodky transformátoru [4]

$C_a$  – měřený objekt,  $C_1$  – vlastní kapacita průchodky,  $C_2$  – kapacita mezi měřícím místem a uzemněnou nádobou,  $Z_m$  – měřící impedance,  $Z$  – filtr, MP – měřící přístroj

### Postup měření

V prvním kroku se přivede na zkoušený transformátor nejnižší napětí, které lze získat z napěťového zdroje. Měření musí být realizováno alespoň na jedné hladině pod jmenovitým napětím, při jmenovitém napětí a nakonec při 110% jmenovitého napětí. Výbojová činnost se sleduje po dobu 5 minut na každé z těchto hladin. Pro měření na obou fázích a všech napěťových hladinách je nutné pořídit osciloskopický záznam z důvodu dalšího vyhodnocení a archivování výsledků. Pokud se během měření objeví nějaké nejasnosti v souvislosti s interpretací příčiny vzniku sledovaných částečných výbojů, je vhodné měření zopakovat nebo prodloužit dobu měření jednotlivých hladin. Z praktických zkušeností se akceptují výsledky, které byly naměřeny po dobu 5 až 10 minut na hladině 110% jmenovitého napětí, jestliže u nich nedošlo ke změnám v počtu naměřených výbojů. [4]

**Cílem měření** je určení místa vzniku částečných výbojů sloužící k vyhodnocení hladiny těchto částečných výbojů v izolačním systému zkoumaného transformátoru. Přesných výsledků lze docílit pouze v případě, že je lokalizováno pouze jedno místo vzniku částečných výbojů. Je-li těchto míst víc, vyhodnocování se stává obtížným nebo zcela nemožným. [4]

### **2.1.8 Odběry vzorků plynu z plynových (Buchholzových) relé**

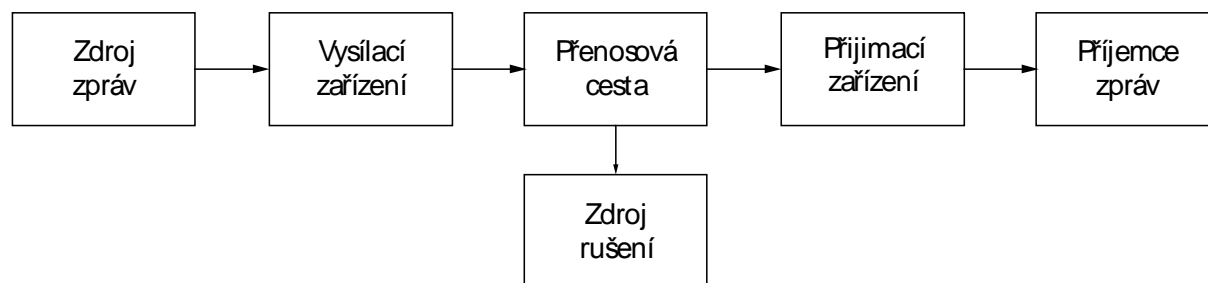
Vzorky plynů se odebírají z relé v čase, kdy je signalizováno nahromadění plynů (musí být provedeno co nejrychleji). Při styku volných plynů s olejem po delší dobu, dochází ke změnám ve složení jednotlivých komponentů odebíraného vzorku plynu, zapříčiněným selektivní resorpcí komponentu. Spojení mezi vzorkovacím zařízením a vzorkovací nádobou musí zabránit přístupu vzduchu. Je-li ve vzorku přítomen kyslík, může reagovat s olejem, který byl vytáhnut se vzorkem. Reakci lze zpomalit např. zabalením odběrové nádoby do neprůsvitného materiálu (zabránění přístupu slunečního svitu, který urychluje reakci). Vzorky musí být řádně označeny a laboratorně analyzovány bez zbytečné prodlevy z důvodu možné ztráty vodíku. Pro komplexní vyhodnocení případné teplotní vady transformátoru, je nutné provést také odběr oleje z nádoby stroje cca 24 hodin po činnosti plynového relé. [10] Detailnější popis principů a postupů pro odběry vzorků z plynových relé je popsán v [10]

### **2.1.9 Odběry vzorků izolačního oleje**

Odběr vzorků olejů, jejich uchování a doprava do laboratoře musí být provedena tak, aby olej nepřišel do styku s okolím, jinak mohlo by dojít ke zkreslení výsledků, eventuálně jejich nereprodukovatelnosti a tím k nesprávným závěrům při hodnocení stavu zkoušeného oleje. Může dojít k jeho navlhnutí, odplynění nebo naopak nasycení vzdušnými plyny a tím k fyzikálně-chemickým změnám. Více o principech a postupech odběru izolačního oleje je popsáno v [4], [8]

## 2.2 On-line diagnostika

On-line (provozní) diagnostika transformátoru slouží k získávání velkého počtu naměřených hodnot při nepřetržitém provozu zařízení. Dalším hlavním důvodem, kvůli kterému se tato diagnostická metoda používá je možnost reakce na vývoj jednotlivých prvků z hlediska poruchy (možnost zjistit a předejít poruše zařízení v jejím počátku). Pomocí komplexního monitorovacího systému se monitorují jednotlivé části transformátoru (stav chlazení, teplota vinutí, plyny v oleji, elektrické parametry průchodek apod.). Použití a instalace on-line diagnostiky je finančně velice náročná, z tohoto důvodu se zavádí pouze u velkých, strategicky důležitých transformátorů, kde je vyžadován nepřetržitý provoz. Princip získávání a přenosu dat lze jednoduše popsat z následujícího blokového schématu. [4]

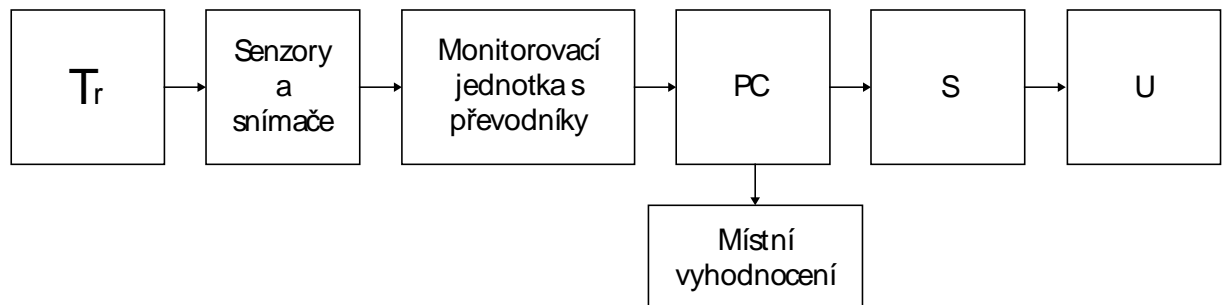


Obr.11: Schéma sdělovací soustavy měřicího systému

Ze zdroje zpráv (diagnostický systém) putují informace do vysílacího zařízení, kde se transformují a upravují pro přenos. Přenosovou cestou může být např. venkovní vedení, symetrický kabel, koaxiální kabel apod. V průběhu přenosu dat působí na přenášený signál různé rušivé elementy prostředí, z toho důvodu se v přijímacích zařízeních zpracovává signál tak, aby byla výsledná data pro příjemce (uživatel) co nejvěrohodnější. [4]

On-line systémy, které jsou neustále připojeny ke sledovanému zařízení, nazýváme monitorovací systémy. Podle toho, jaké funkční prvky transformátoru sledujeme, se volí různé koncepce diagnostického systému. Při diagnostice složitějšího objektu dochází ke sběru různých fyzikálních veličin, na více místech daného objektu. Naměřené hodnoty se dále číslicově zpracovávají pro PC, kde se může jejich vývoj zobrazovat v grafických programech. Dnešní počítačová technika provádí velké množství on-line výpočtů, které porovnává s předem stanovenými hodnotami a zjišťuje, zda nedošlo k překročení havarijního stavu. Pokud systém zaregistruje překročení těchto mezních hodnot, může dojít k automatickému

odpojení zařízení z provozu. Blokové schéma monitorovacího systému je zobrazeno na obr. 12. [4]



Obr.12: Blokové schéma monitorovacího systému

Tr – sledovaný transformátor, S – server, U- uživatel

#### Výhody on-line monitoringu:

- Získávání informací během provozu, výpočet aktuální teploty a namáhání transformátoru (zabránění nečekaným výpadkům)
- Umožňuje účinný a profitabilní provoz transformátoru, tyto skutečnosti poskytují lepší postavení na liberalizovaném energetickém trhu.
- Určování stavu elektrické izolace, která je nejčastěji tvořena olejem a papírem a je nejdůležitějším parametrem pro určování aktuálního stavu transformátoru. Stárnutí je definováno jako nevratné změny vlastností elektrické izolace

#### 2.2.1 Volba parametrů pro on-line monitoring

Ve vinutí, magnetickém obvodu a izolačním systému transformátoru je největší procento závad a vzniku chyb. Nejdůležitější parametry vypovídající o stavu vinutí a hlavní izolace jsou **plyny rozpuštěné v oleji, přítomnost kyslíku, obsah vlhkosti a teplota**. [24]

Uvedení činitelé přispívají k rozkladu minerálního oleje a celulózového papíru ale hlavním parametrem pro zatěžování transformátoru je **teplota**. Následující parametry byly navrženy pro sledování zestárnutí a určení zbytkové životnosti: **Snímání výstupního napětí a proudu pro každou fázi, snímání teploty oleje v horní části transformátoru, snímání teploty na vstupu a výstupu z chladiče, sledování obsahu plynů a vlhkosti v oleji**. [24]

Další kapitoly budou obsahovat metody a principy měření výše uvedených parametrů.

### 2.2.2 Měření napětí a proudů transformátoru

Měření napětí a proudů na jednotlivých fázích je důležitou součástí on-line monitoringu transformátoru. Měření provozních napětí a proudů umožňuje získat veličiny potřebné pro stanovení okamžitého zatížení transformátoru, zároveň na hodnotě zatěžovací proudu závisí velikosti Jouleových ztrát ve vinutí, díky kterým můžeme odhadovat velikost tepelného zatížení izolačního systému transformátoru. Další důležitou roli hraje archivace naměřených hodnot provozních veličin při provozu transformátoru a to z hlediska zaznamenávání informací o životě sledovaného stroje a způsobu jeho zatěžování. [4]

Měření provozních veličin se uskutečňuje přístrojovými transformátory obvykle umístěných na kondenzátorových průchodkách. Tyto měřicí transformátory bývají často běžnými doplňky transformátoru, proto je pak nutné při návrhu monitorovacího systému individuálně zvážit možnost jejich využití, zvláště zvážit možnosti výstupního signálu pro připojení do řídicího PC. Dalším kritériem je kompatibilita senzorů těchto měřicích transformátorů s typem přenosové cesty. Pro počítačové sledování a zaznamenávání napětí a proudů je dobré použít komunikační rozhraní RS 485 nebo RS 232, a doplnit MT vhodnými převodníky zajišťujícími komunikaci senzoru s řídicím PC. Používají se pro to speciální zařízení na úpravu signálů v provedení na DIN lištu. [4]

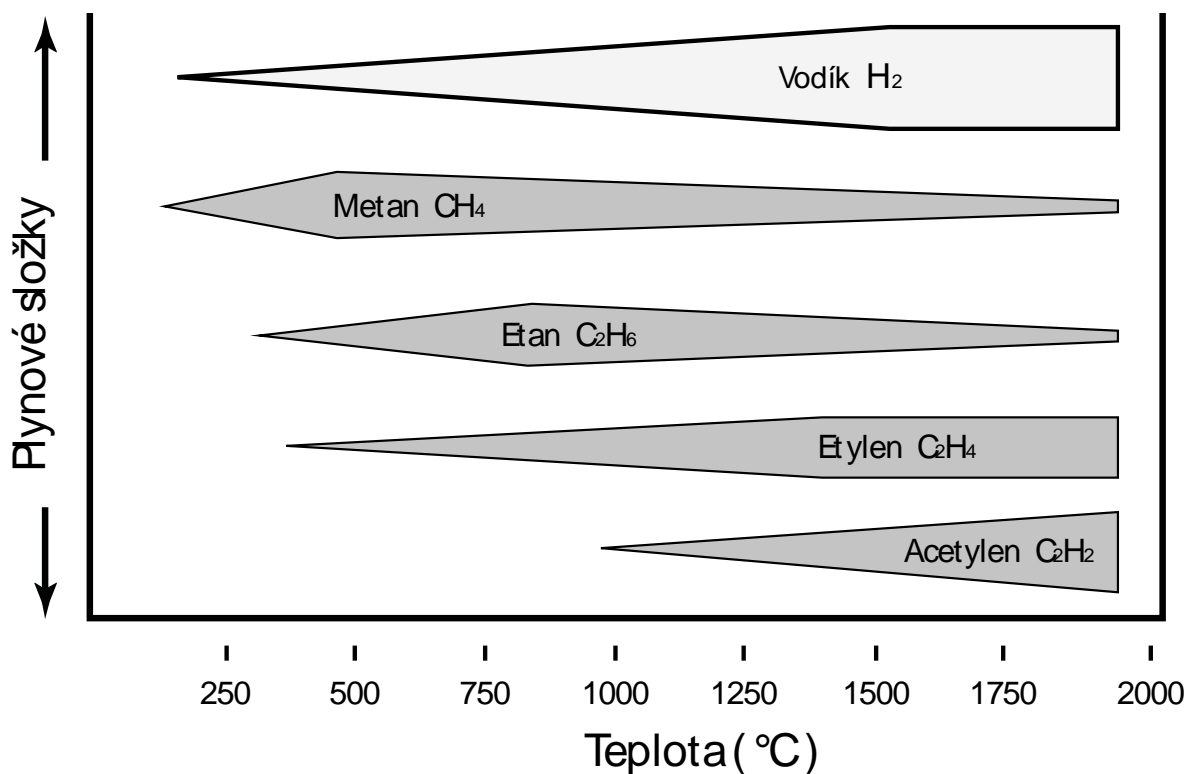
### 2.2.3 Monitoring transformátorového oleje

Důvodem pro využití monitoringu transformátorového oleje není získávat přesné hodnoty plynů rozpuštěných v oleji, ale informace o změně plynování a dynamice nárůstu (dlouhodobý nebo krátkodobý trend). [5]

Izolační systém transformátoru se skládá ze dvou základních částí, kterými jsou olej a papírová izolace. Obě tyto části produkují vlastní spektrum plynů, pomocí kterých lze usoudit na základě jejich množství a poměrů druh a závažnost poruchy, v případě papírové izolace i na rychlost stárnutí a omezení provozních stavů. [5]

#### Plyny produkované degradací transformátorového oleje

Při namáhání oleje vzniká spektrum plynů, mezi základní patří vodík, metan, etan, etylén a acetylén. [5]

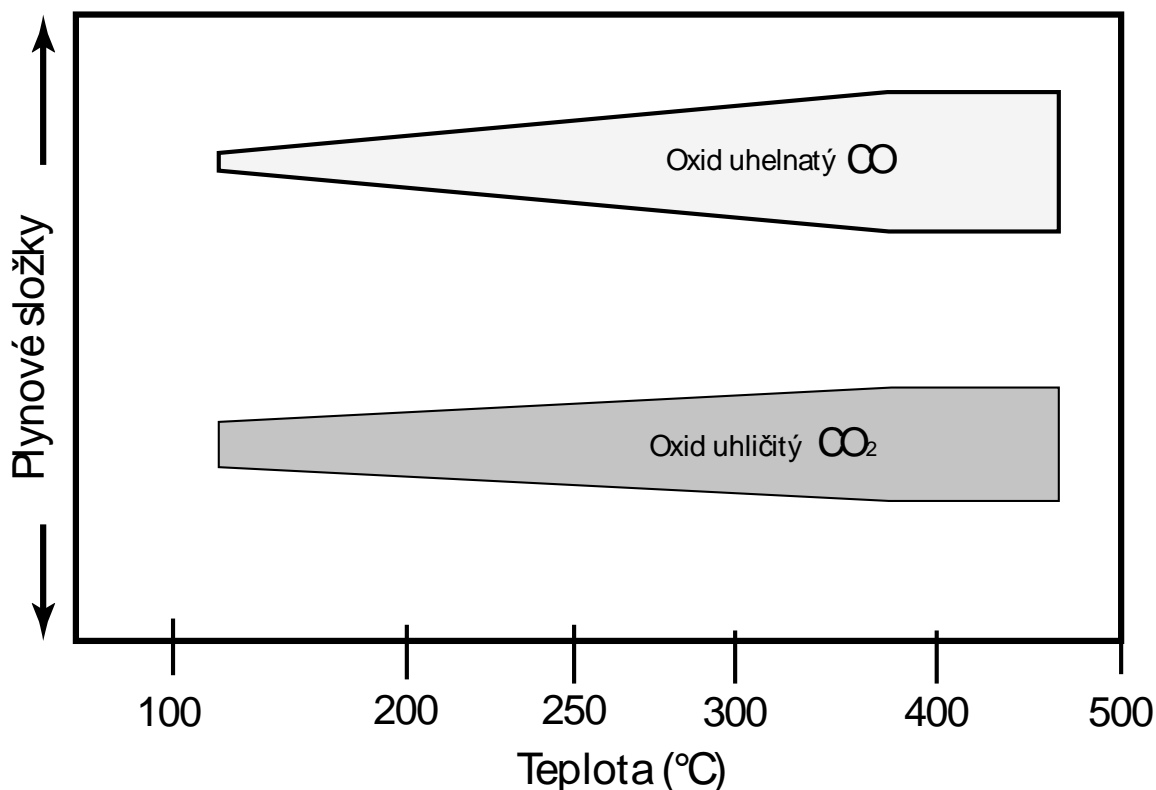


Obr.13: Vývoj plynů v závislosti na zvyšující se teplotě [5]

Z obrázku je zřejmé, že prvním generovaným plynem je vodík již při 75°C, naopak acetylen je generován při teplotách dosahujících 1000°C. Z toho důvodu je monitoring vodíku klíčový, protože jakákoliv porucha, která má za následek degradaci oleje se projeví sebemenším nárůstem množství vodíku v oleji. Monitoring acetyleny je druhým klíčovým ukazatelem, jelikož při zjištění jeho přítomnosti lze usuzovat velmi závažný problém, který může být buď přítomnost částečných výbojů, nebo elektrického oblouku. Poměrem množství acetyleny vůči vodíku lze definovat poruchu, u jiných interpretačních metodik se použijí i poměry vůči ostatním plynům. Z textu vyplývá, že monitoring H<sub>2</sub> je nezbytný pro monitoring degradace oleje a jeho namáhání. [5]

## Plyny produkované degradací papírové izolace

Degradací papírové izolace vznikají plyny CO a CO<sub>2</sub>.

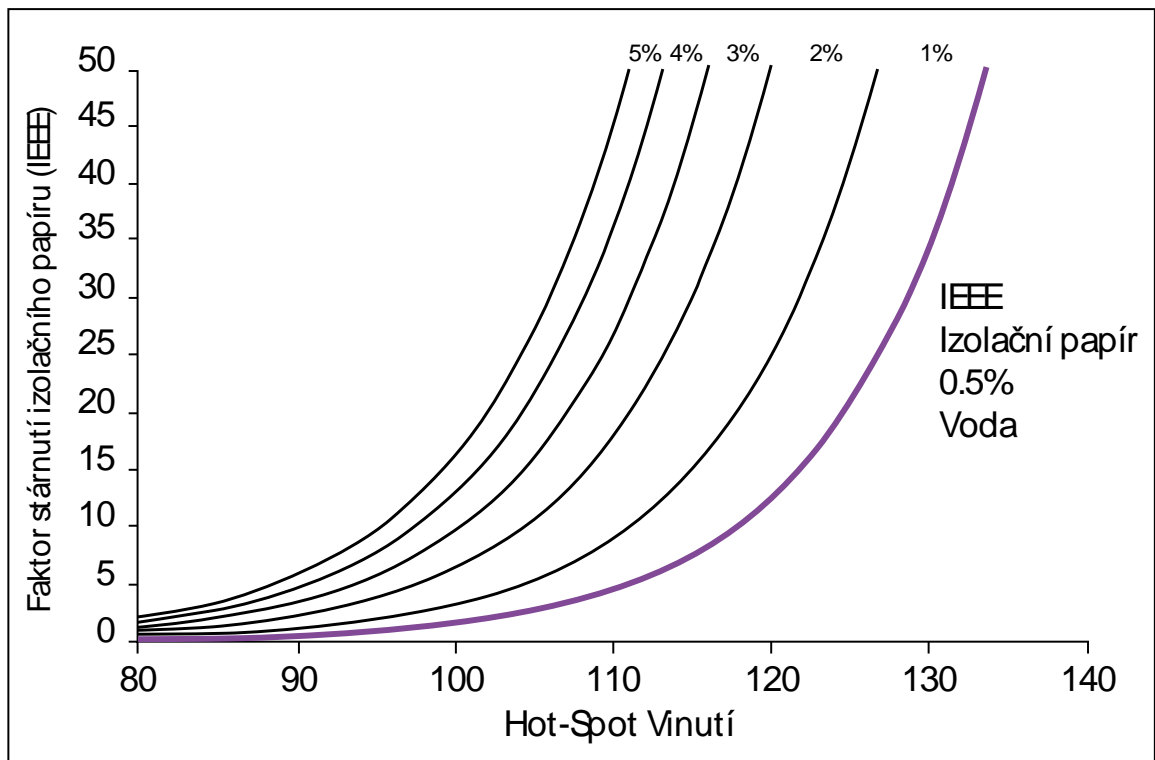


Obr.14: Vývoj plynů v závislosti na zvyšující se teplotě [5]

Oba plyny z hlediska teploty vzniku jsou ekvivalentní. Z obrázku je patrné, že množství CO výrazně narůstá se zvyšující se teplotou. Z toho důvodu je jeho monitoring výhodnější a nezbytný pro monitoring papírové izolace. [5]

## Vlhkost a voda v transformátorovém oleji

Vlhkost je obsažena už v izolaci nového transformátoru (cca 0,5%), přičemž limitní hodnota se pohybuje kolem 4%. Zvýšená vlhkost má za následek změnu kapacity oleje a za provozu maximální provozní teplotu transformátoru (nejteplejší bod vinutí tzv. **Hot-spot**). Vlhkost dále ovlivňuje rychlost stárnutí izolace, která přímo ovlivňuje celkovou životnost transformátoru. Z obr. 15 je patrné, že s nárůstem vlhkosti exponenciálně narůstá rychlost degradace papírové izolace. [5]



Obr.15: vliv teploty a vlhkosti papírové izolace na rychlost jejího stárnutí [5]

## Shrnutí

Monitoring transformátorového oleje je schopen detekovat všechny výše uvedené nežádoucí prvky, kterými jsou  $H_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ . Dále musí být spolehlivý vůči nepříznivým vlivům, které vznikají při provozu transformátoru (široké spektrum provozních teplot, vibrace atd.).

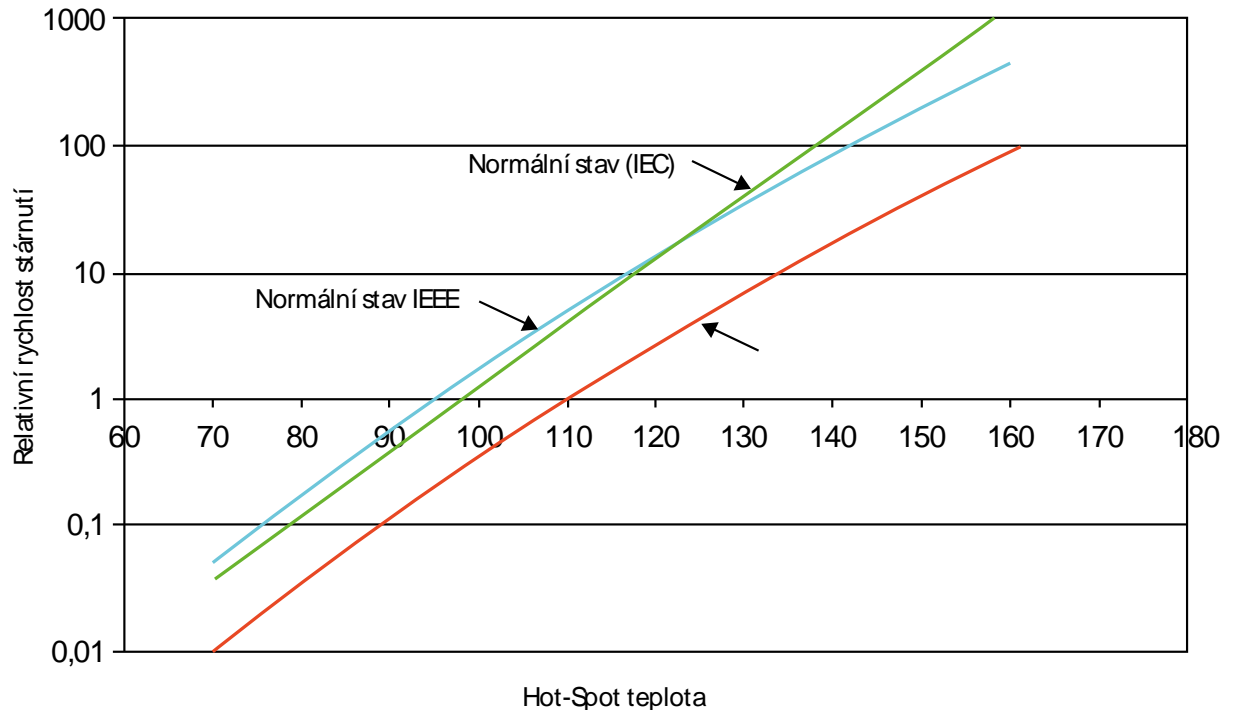
### 2.2.4 Monitoring teplot transformátoru (olej, vinutí, hot-spot)

#### Měření teploty vinutí

Spolehlivost a celková životnost transformátoru je předurčena teplotou, kterou je dlouhodobě vystavena izolace vinutí, čímž se ovlivňuje její mechanická pevnost. Pokud je izolační papír vystaven dlouhodobému působení teploty, oleje a vibracím, stává se křehkým a méně odolným proti zkratovým silám či dokonce běžným vibracím. Konec životnosti izolace určuje konec životnosti celého transformátoru. Z toho důvodu je monitoring teploty zásadní pro každého provozovatele transformátoru. [21],[22]



Životnost transformátoru bývá definována jako časový úsek od data výroby do doby, než mechanická pevnost izolace klesne na 50% její původní hodnoty. Zvýšení teploty o 7°C urychlí její stárnutí dvojnásobně. [22]



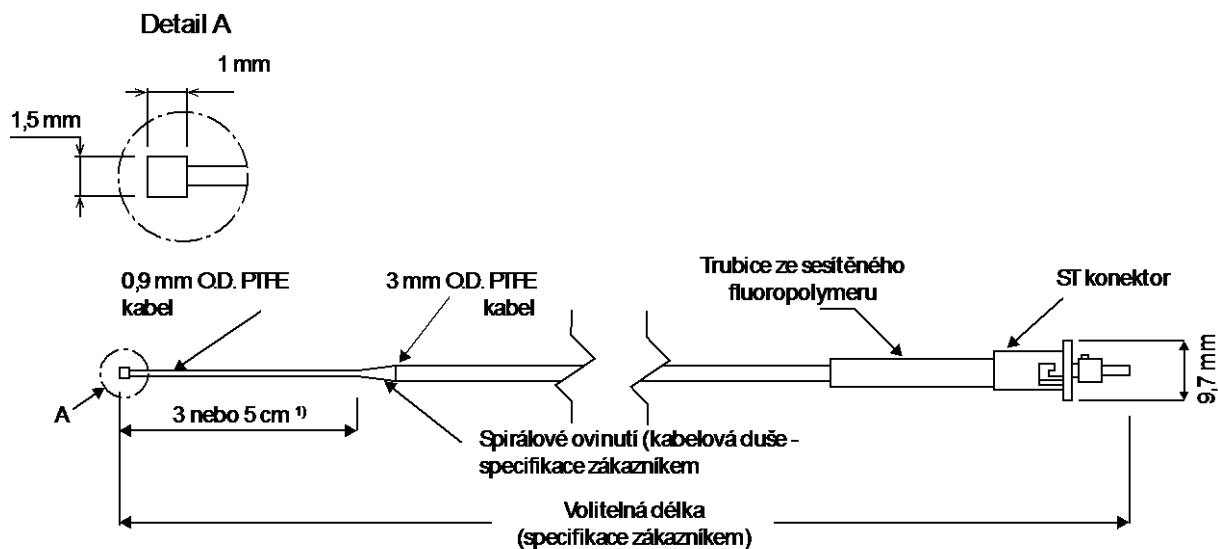
Obr. 16: Závislost rychlost stárnutí izolace na teplotě [22]

**Přímé měření teploty** se provádí pomocí optovláknových senzorů. V současné době se používají pro bodové a rozprostřené měření teploty. Cílem přímého měření je minimalizace požadavků na údržbu, optimalizace zatížení, prodloužení životnosti a vyloučení poruch sledovaného transformátoru ještě před jejich vznikem. [21]

Nejčastěji používané principy bodových optovláknových teploměrů jsou využití změn v absorpčním spektru a měření doby poklesu intenzity fluorescence. [4], [21]

- Čidla využívající **změn v absorpčním spektru** jsou na konci optického vlákna opatřeno polovodičovým krystalem, který je v přímém kontaktu s měřeným objektem. Ke krystalu je vláknem přivedeno bílé světlo, kde krystal část světla absorbuje a zbytek se vrací vláknem zpět do přístroje. Teplota krystalu se určí ze spektrálního složení barvy světla vráceného zpět do přístroje. Informace o teplotě se nevyhodnocuje z jeho intenzity ale z barvy světla. [4]

- Čidlo je založené na principu **měření doby poklesu intenzity fluorescence** teplotně citlivého fosforu, ke kterému je optickým vláknem přivedeno světlo modré. Toto světlo budí fluorescenci (luminiscenci) v červené oblasti spektra. Vybuzené světlo je vedeno zpět do přístroje, kdy je měřena doba poklesu intenzity fluorescence, která přímo závisí na teplotě měřeného objektu. [4]



Obr.17: Senzor pro přímé měření teploty vinutí [4]

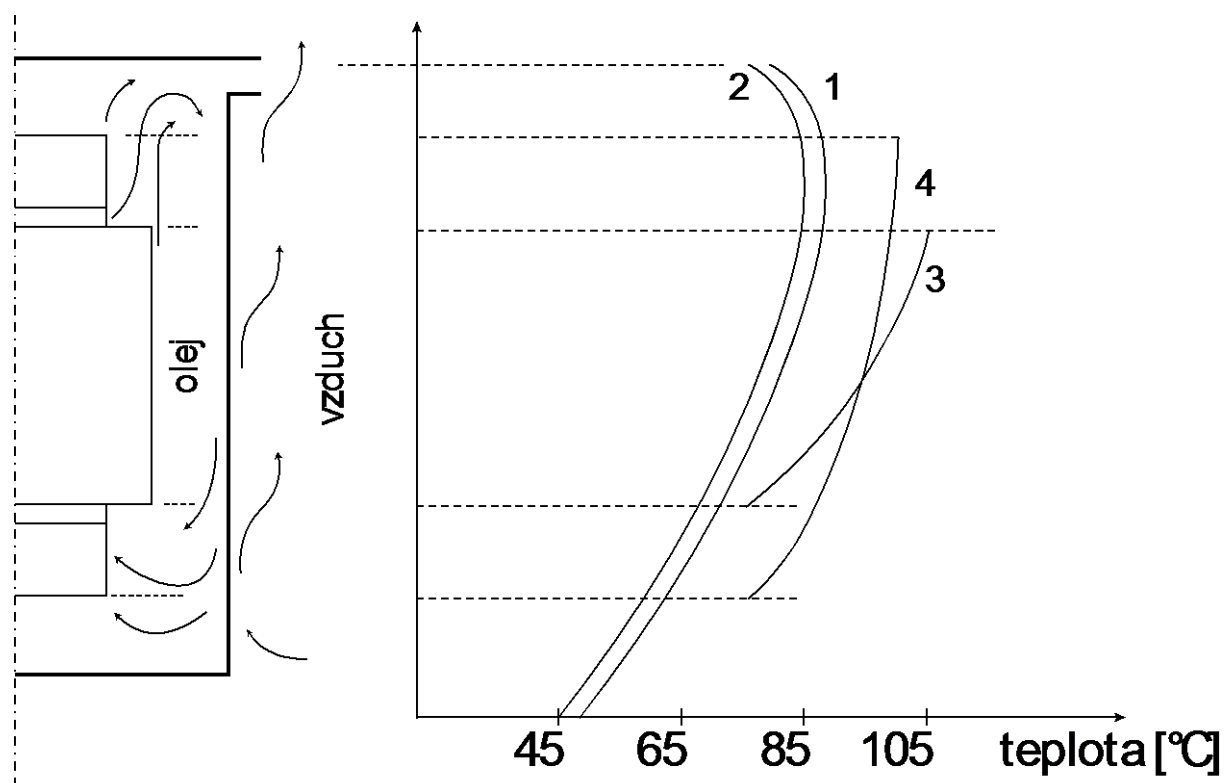
V praxi se spíše používá **nepřímé měření teplot** pomocí tzv. tepelné kopie vinutí, protože přímé měření teploty je dosti obtížné. Snímá se teplota oleje v horní části nádoby a zároveň se měří zatěžovací proud transformátoru. Tento proud ohřívá topný odpor umístěný uvnitř přístroje. Oteplení topného odporu odpovídá oteplení vinutí nad nejvyšší teplotou oleje. Teplota topného odporu i teplota v olejové jímce působí na měřící vlnovec, kdy je jeho pohyb přenášen pákovým ústrojím na ručičku a na hřídel s mikrospínači v bubincích se stupnicí, na které je zobrazována teplota vinutí. Další součástí ukazatele teploty vinutí je přizpůsobovací člen, v závislosti na zatěžovacím proudu je jeho výstupem signál oteplovacího proudu  $I_h$ . Velikost proudu  $I_h$  koresponduje s teplotou, která odpovídá přírůstku nad teplotou oleje. [4]

Tab. 6 Hodnoty teploty nad teplotou oleje a odpovídajících proudů [4]

Teplotní rozdíl [°C]	10	14	18	22	26	30	34	38
$I_h$ [mA]	620	730	830	920	1010	1090	1160	1230

## Měření teploty oleje

Pro měření teploty oleje se používají jímkové odporové teploměry umístěné v horní části nádoby. Z obrázku 18 je vidět, že se teplota oleje vzhledem k horní části zvyšuje. Tyto odporové snímače patří do skupiny kontaktních snímačů (jsou v přímém kontaktu s měřeným prostředím), proto se téměř vždy umísťují do teploměrových jímek nebo ochranných trubic sloužících jako ochrana před působením okolního prostředí a to chemickým i mechanickým. Čidlo (měřicí odpor) slouží k převodu teplotní změny prostředí na změnu elektrického proudu pomocí teplotní závislosti jeho odporového materiálu tzn. mění svůj elektrický odpor v závislosti na změně své teploty. [4], [23]



Obr. 18: Typický průběh teploty v závislosti na výšce nádoby transformátoru

1 – teplota oleje, 2 – teplota stěny nádoby, 3 – teplota vinutí, 4 – teplota magnetického obvodu

Pro výrobu stonku s čidlem se nejčastěji používá nerezová ocel. Připojovací svornice je umístěna v kovové hlavici s dostatečným stupněm krytí (např. IP56). Ponor a rozměr celkové délky stonku je volen podle potřeby. Teploměr s připojovací hlavici může mít vestavěný převodník, který slouží k převádění výstupní veličiny teploměru (odporu) na proudový

unifikovaný signál 4 až 20 mA. V dnešní době je nejpoužívanější přenos po digitální sériové lince RS 485, umožňující přenos na vzdálenost až 1200 m i v rušném průmyslovém prostředí pomocí páru kroucených vodičů. Mnoho firem nabízí převodníky pro zajištění této komunikace, tzn. pro převod a úpravu ostatních signálů na sériový datový přenos včetně signálu proudové smyčky. Často bývají tyto převodníky implementovány jako součást čidla společně se senzorem. Vhodné je sledovat hodnoty teploty oleje a zatížení transformátoru v závislosti na okolní teplotě, ta se měří pomocí prostorových průmyslových teploměrů pro měření teploty vzduchu. [4]

## Hot - spot

### Oteplení hot-spot v ustálením stavu

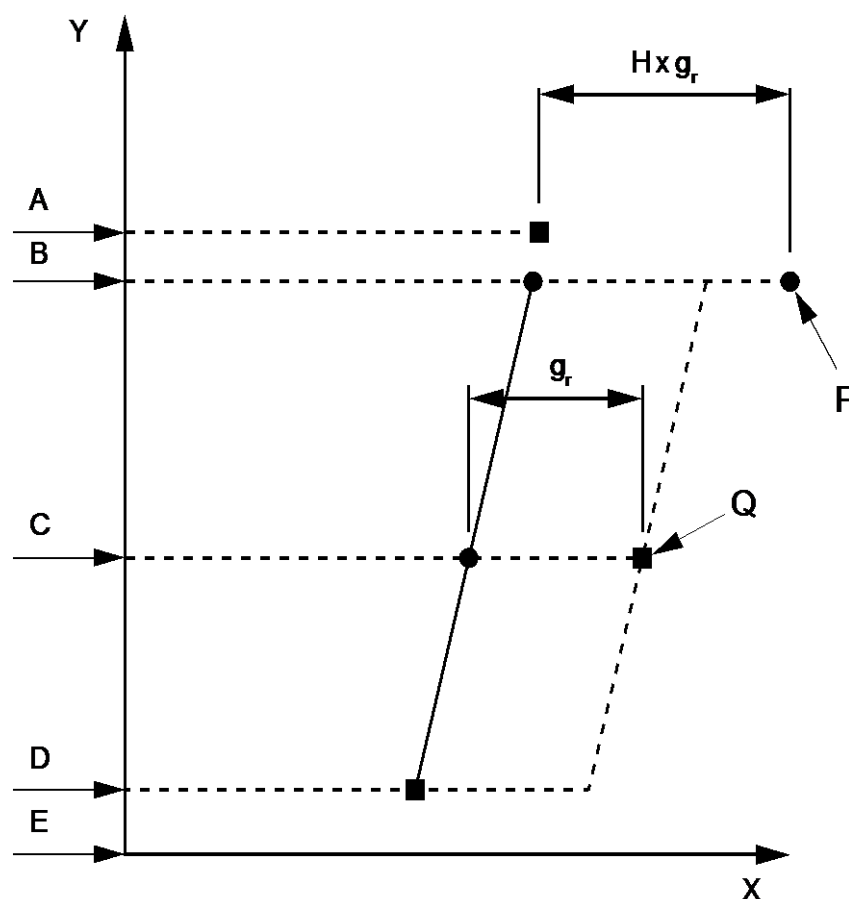
Hot-spot je předpokládaná teplota v horní vrstvě oleje uvnitř vinutí. Je známo, že v závislosti na chlazení může být tato teplota až o 15 K vyšší než teplota promíchaného oleje v horní části transformátorové nádoby. Teplota nejteplejšího místa (hot-spot) je velice užitečný parametr, protože na jeho základě lze stanovit omezení pro zatěžování transformátoru a odhadnout relativní zestárnutí izolačního systému. Teplota oleje v horní části nádoby lze určit měřením nebo výpočtem. [4], [25]

- $\Delta\theta_{or}$ , oteplení v transformátorové nádobě nad teplotou okolí při jmenovitých ztrátách [K]
- $\Delta\theta_{hr}$ , oteplení hot-spot nad teplotou oleje v horní části nádoby transformátoru při jmenovitém proudu [K]

Hodnota  $\Delta\theta_{hr}$  může být definována přímým měřením při oteplovací zkoušce nebo výpočtem (potvrzuje se přímým měřením). [25]

### Výpočet oteplení hot-spot

Při použití zjednodušeného tepelného diagramu, za předpokladu, že teplota oleje vzrůstá lineárně ode dna k horní části nádoby, bez ohledu na druh chlazení. Oteplení vodiče vinutí roste lineárně, souběžně s teplotou oleje, s konstantním rozdílem  $g_r$  mezi dvěma přímkami. Z čehož vyplývá, že  $g_r$  je rozdíl mezi průměrnou hodnotou oteplení oleje a průměrnou hodnotou oteplení vinutí. Rozdíl teplot mezi hot-spot vinutí a olejem v nejvyšší vrstvě nádoby transformátoru, lze vyjádřit pomocí vztahu:  $H \times g_r$  tj.  $\Delta\theta_{hr} = H \times g_r$ . [4], [25]



Obr.19: Tepelný diagram [25]

**A** – teplota oleje v horní vrstvě odvozená jako průměr z teploty na výstupu z nádoby a teploty oleje v olejové kapse, **B** – Smíšená teplota oleje v nádobě v nejvyšším bodě vinutí, **C** – Teplota průměrného oleje na spodním konci vinutí, **E** – Dno nádoby, **g<sub>r</sub>** - Teplotní gradient mezi středem vinutí a středem oleje, **H** – Činitel hot - spot, **P** – Teplota hot - spot, **Q** – Průměrná hodnota teploty vinutí stanovená měřením odporu, **X** – osa indikující oteplení, **Y** – Osa indikující relativní pozici.

### Měření oteplení hot-spot

Přímé měření se realizuje pomocí sond z optických vláken. Mezi různými místy v horní části vinutí může být teplotní gradient vyšší než 10 K. Z tohoto důvodu je kladen velký důraz na rozmístění jednotlivých sond ( použitím např. 1 – 3 senzorů, není možné stanovit skutečný hot-spot). Sensory se instalují do každého vinutí, kde je potřeba měřit teplotu hot-spot. [25]

Měření ukázala, že nejlepší místo pro zavedení sond se pohybuje od vodiče ve vrchní části vinutí, kterým prochází maximální rozptylové pole a teplota oleje v těchto místech dosahuje

nejvyšších hodnot, směrem k nižším vodičům. Proto se senzory zavádění mezi několika prvními vodiči ve vrchní části vinutí. [25]

### 2.2.5 Monitoring částečných výbojů

Měření částečných výbojů lze rozdělit do dvou základních metod, první z nich je neelektrická metoda (akustická, optická, termoelektrická) a druhou metoda elektrická (měření ztrátového činitele, metoda postupné vln, měření rušivých elektrických polí, metoda se snímací impedancí, kapacitními či induktivními sondami aj.). Obě tyto metody mají svoje výhody a nevýhody, do popředí se v dnešní době dostávají metody, které jsou schopny **provádět měření on-line** tzn. měření se provádí bez odstavení elektrického zařízení z provozu. [26]

#### Neelektrické metody měření částečných výbojů

Částečné výboje v kapalném izolantu vykazují nejen elektrické ale i neelektrické efekty, které lze pozorovat a kvantifikovat, jsou to především efekty optické, zvukové a chemické. V případě klouzavých a vnějších výbojů se využívají zvláště optické a zvukové efekty. Pro tyto metody se využívá speciální přístrojová technika jako např. fotonásobiče, přístroje pro noční vidění, směrové mikrofony pracující ve slyšitelné nebo ultrazvukové oblasti aj. Protože mají částečné výboje poměrně malou energii, používá se chemická diagnostická metoda především u izolačních systémů, které jsou dlouhodobě vystaveny těmto výbojům jako **např. olejové náplně transformátorů**. [26]

#### Akustická detekce

Akustická metoda pro detekci částečných výbojů je založena na detekci mechanických kmitů (akustických signálů) emitovaných částečnými výboji. Mechanické impulsy vyvolávají akustické vlny šířící se okolním prostředím. Částečnými výboji vyvolané zvukové vlny lze poté zachytit pomocí mikrofونů nebo dalších akustických detektorů (v kombinaci se zesilovači a vhodnými zobrazovacími jednotkami). Tvar těchto detekovaných signálů je závislý na řadě faktorů, jako např. na zdroji signálu, cestě signálu ze zdroje ke snímači, charakteristice snímače apod. **Akustické snímače jsou používány pro lokalizaci výbojů v oleji ponořených zařízeních, jako jsou transformátory**. Snímače mohou být instalovány uvnitř nebo zevně na transformátorové nádobě. Akustické (ultrazvukové) metody se používají zejména pro lokalizaci místa vzniku částečných výbojů a pro jejich měření **na transformátorech v provozu (on-line) a to formou krátkodobého nebo dlouhodobého monitoringu**. [26]

### Chemická detekce

V olejem chlazených a izolovaných přístrojích se pro detekci přítomnosti částečných výbojů používá metoda analýzy rozkladu produktů rozpuštěných v oleji. Při dlouhodobém provozu se tyto produkty hromadí, proto může být použita chemická analýza pro odhad degradace, která je způsobena činností částečných výbojů. [26]

Plynová chromatografie je metoda zjišťující obsah plynů rozpuštěných v oleji, metoda je velice citlivá (lze zjistit hodnoty v ppm, tzn. v miliontinách objemu) a není ovlivňována elektromagnetickým rušením v provozu. Různé druhy výbojů mají vliv na uvolňování některých plynů v oleji. Plynovou chromatografií se standartě analyzuje přítomnost pěti rozpustných plynů ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$  a  $C_3H_6$ ) resp. jejich poměr. Pomocí charakteristických výskytů těchto plynů lze určit druh výbojové činnosti a typickou závadu izolačního systému s kapalným izolačním médiem. [26], [27]

Tab .7 Typy závad a vyvíjející se plyny [27]

Částečné výboje		Energeticky chudé výboje		Předvýboje jiskry		Výkonný oblouk	
olej	Olej-papír	olej	Olej-papír	olej	Olej-papír	Olej	Olej-papír
$H_2$	$H_2$	$C_2H_4$	$C_2H_4$	$C_2H_2$	$C_2H_2$	$C_2H_2$	$C_2H_2$
$CH_4$	$CH_4$	$H_2$	$H_2$	$H_2$	$H_2$	$H_2$	$H_2$
		$CH_4$	$CH_4$	$CH_4$	$CH_4$	$CH_4$	$CH_4$
		$C_2H_2$	$C_2H_2$	$C_3H_6$	$C_3H_6$		

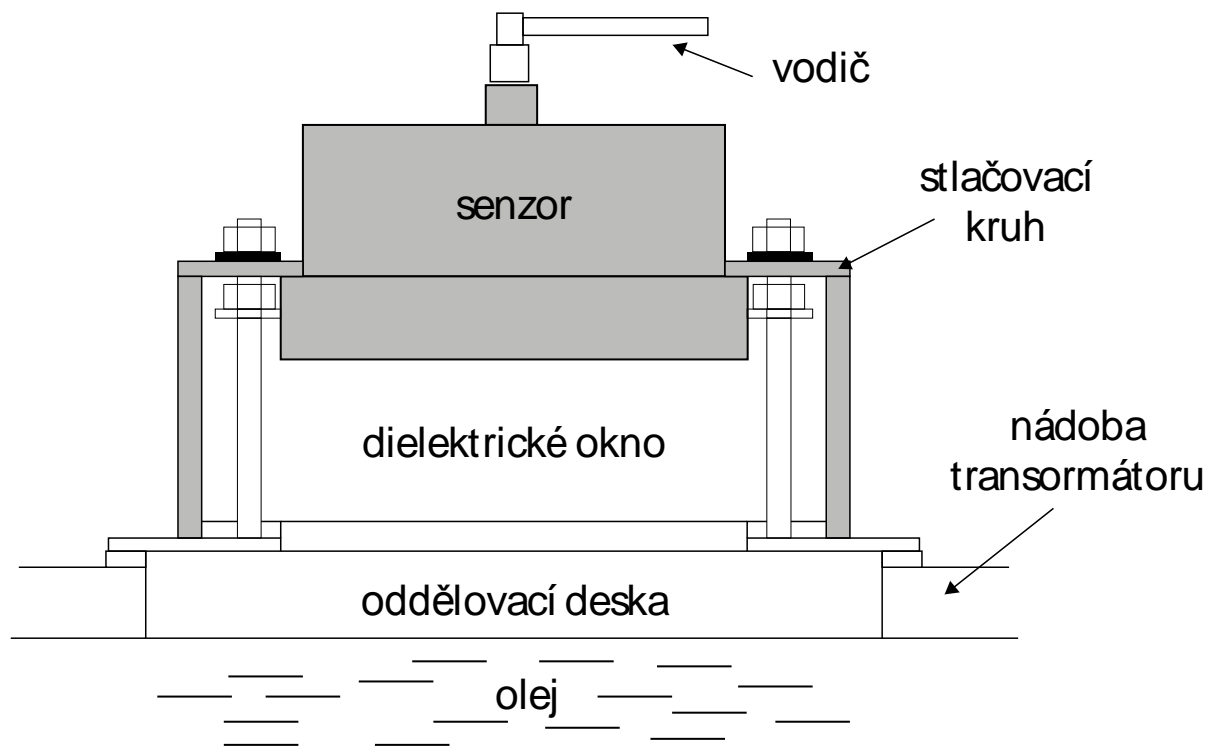
Z těchto kritérií lze identifikovat nízkoenergetické částečné výboje, které zatím nejsou nebezpečné pro provoz transformátoru, dále částečné výboje s vyšší energií, nízkoenergetické samostatné výboje i vysokoenergetické elektrické oblouky. [26]

## UHF detekce

Použití UHF (Ultra High Frequency) senzorů vychází z faktu, že během výboje se elektrony odtrhávají od atomu nebo molekuly. Elektrony, které setrvávají v klidové poloze, jsou náhle akcelerovány elektrickým polem (nárůst proudu) a poté jsou za krátký okamžik opět uvedeny do klidové polohy (pokles proudu). Při změnách rychlosti pohybu elektrického náboje vzniká elektromagnetické pole. Do okolí se všemi směry šíří rázová vlna. [28]

Pulzem částečného výboje je generován UHF signál, jehož energie se ztrácí v okolí (v izolacích, na povrchu vodičů apod.). Elektromagnetický pulz (důsledek částečného výboje) se šíří rychlostí světla všemi směry od místa výboje. Poté v nádobě dochází k jeho odrazům a útlumu, kdy naměřený signál vykazuje útlumovou rezonanci, z těchto skutečností se musí vyjít při analýze naměřených signálů útlumových rezonancí. Senzor se skládá z metalické destičky uložené v trubici, která je naplněna stlačeným plynem. Detekované frekvence se nastavují pomocí filtru (horní propust) a nastavitelné vstupní impedance. [28]

UHF senzory se umísťují na dielektrická okna, která jsou vytvořena na nádobě transformátoru, z důvodu snadného průchodu elektromagnetických vln způsobených částečnými výboji a jejich následnému zachycení UHF senzorem. [28]



Obr. 20: Dielektrické okénko v nádobě transformátoru a umístění UHF senzorů



Tab. 8 Přehled metod měření částečných výbojů [28]

Metoda měření částečných výbojů	Popis/Použití
Kapacitní senzor	Drážková sonda/ laboratorní účely
Induktivní senzor	Malé proudy/slabe magnetické pole
Senzory pole	Laboratorní měření/Lokalizace ČV
UHF senzory	Detekce elmg. projevů
Odporový senzor	Zachování tvaru impulzu
Analýza chladicích plynů	Generátory
Akustické projevy	Lokalizace koróny

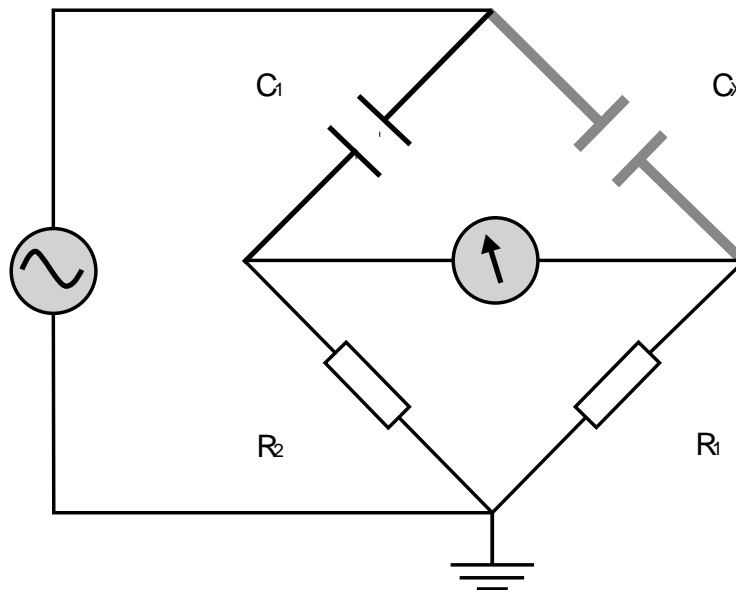
### 2.2.6 Monitoring kondenzátorových průchodek

Podle studie Institutu pro Výzkum Elektrické Energie (*Electric Power Research Institute – EPRI*) se na transformátorech při zrychleném stárnutí provádí zkouška relativního účinníku, která poskytuje první známky poruch, které by mohly vést k selhání. Metoda měření elektrického napětí použitá pro odvození relativního účinníku je mnohem více citlivá, než je standartní metoda sčítání proudů. [32]

Průchodka může být představována několika malými kapacitami zapojených sériově a paralelně. Při výskytu chyb, se z některých těchto kapacit stávají odpory. Svodový proud vycházející z vnitřku průchodky je bezvýznamný, pokud je měřen proti zemi. Nicméně, kapacitní dělič napětí dokáže zaznamenat a změřit pokles napětí vlivem těchto odporových komponentů. [32]

Metoda relativního účinníku používá Scheringův můstek pro měření napětí na měřicích vývodech na kapacitě  $C_1$  průchodky (Obr. 21). Napěťový dělič je použit pro vytvoření

nízkého výstupního napětí měřeného obvodu, který je poměrem mezi provozním napětí (kapacitou průchodky  $C_1$ ) a odpovídající hodnoty kapacity  $C_X$



Obr.21: Scheringův můstek pro měření kapacity na kondenzátorových průchodkách

Rozhodující hodnoty, které on-line monitoring poskytuje:

- Měřicí vývod – hodnota vztažená k provoznímu napětí
- Relativní účinník – měřený na všech monitorovaných průchodkách
- Účinník – vypočítaný pro všechny monitorované průchodky
- Stav průchodky – výsledek statistické analýzy, která znázorňuje stav průchodky

Systém pro on-line monitoring poskytuje nejpřesnější a nejrychlejší indikaci stavu průchodky a integrity izolátoru, protože je v provozu 24/7 a získává data za všech stavů počasí a životního prostředí. On-line hodnoty účinníku mohou být také použity k ověření testovacích dat z off-line diagnostiky. [32]

### 3 Shrnutí

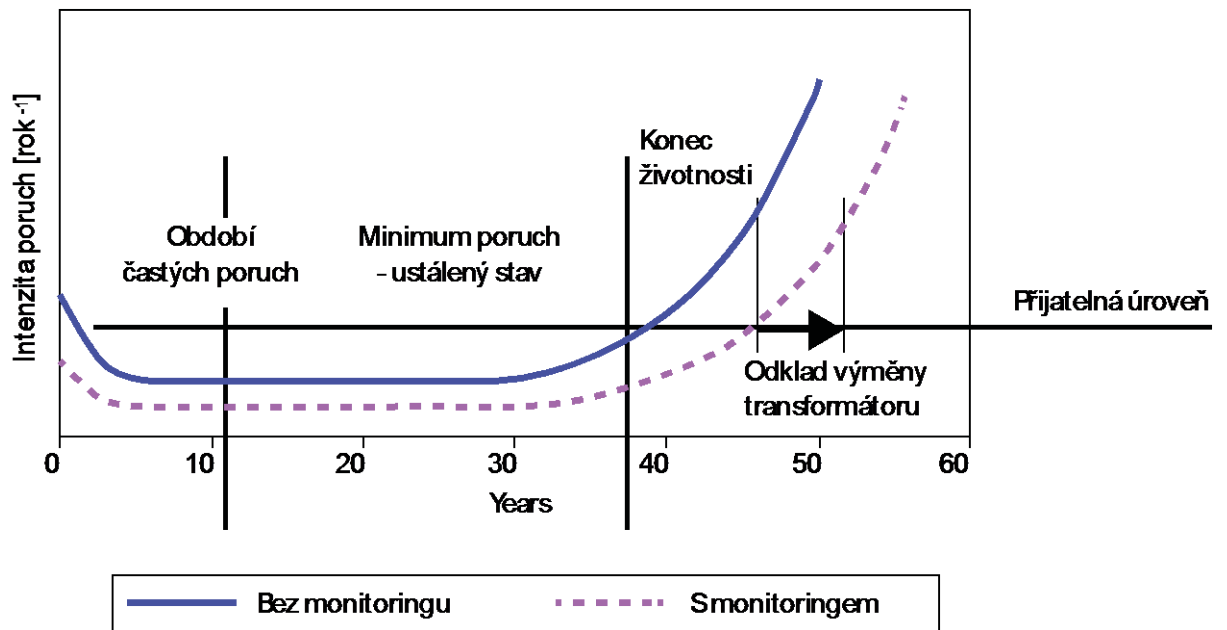
V předchozích kapitolách byly stručně uvedeny jednotlivé principy on-line a off-line diagnostických metod. Následující část bude obsahovat jednoduchý přehled těchto metod na nejporuchovějších částech transformátoru (viz. kapitola 1.1), které budou uvedeny v tabulce pro lepší orientaci.

Tab. 9 Metody pro diagnostiku vybraných nejporuchovějších částí transformátoru

	Off-line	On-line
Vinutí + izolační systém	Činný odpor vinutí	Měření napětí a proudu
	Ztrátový činitel a kapacita	Částečné výboje
	Teplota vinutí	Teplota vinutí
	Izolační odpor vinutí	Vlhkost oleje
	Měření pevného dielektrika	Obsah plynů v oleji
	Polarizační index	Částečné výboje
	SFRA	
	Částečné výboje	
	Odběry vzorků oleje + následná analýza	
Průchodky	Ztrátový činitel a kapacita	Ztrátový činitel a kapacita
	Izolační odpor	Částečné výboje
	Měření izolačního oleje	
	Částečné výboje	
Přepínač odboček	Prohlídka mechanismu motorového pohonu	Indikátor polohy
	Stav počítadla	Měření teploty
	Opotřebením kontaktů	Napětí a proud motoru přepínače
	Hladina oleje	Hladina oleje

On-line monitoring výkonových transformátorů je v dnešní době nedílnou součástí jejich moderního provozu i přes jeho vysoké počáteční náklady. Hlavním účelem monitoringu je výrazné prodloužení životnosti a spolehlivosti transformátoru.

Na obrázku 22 je znázorněna intenzita poruch s použitím a bez použití on-line monitoring. Dle této statistiky se díky on-line monitoringu **snižuje četnost poruch o 50% a životnost prodlužuje o 20%**, což jsou velice směřodatné výsledky. [5]



Obr.22: Porovnání četnosti poruch transformátorů s a bez on-line monitoringu dle CIGRÉ [5]

## 4 Konkrétní příklady firem

V předchozím textu byly popsány jednotlivé klíčové prvky transformátoru z hlediska poruchovosti, dále byly stručně uvedeny metody on-line a off-line diagnostiky, sloužící ke správnému chodu transformátoru. V této části budou představeny konkrétní firmy provádějící revize a monitoring výkonových transformátoru spolu s jejich používanými systémy.

### Monitoring transformátorů ČEPS, a.s.

Akciová společnost ČEPS působí v České republice jako výhradní provozovatel přenosové soustavy (220 a 400 kV) na základě licence na přenos elektřiny, udělené Energetickým regulačním úřadem na základě Energetického zákona. [30] **Společnost již dlouho dobu buduje a používá monitoring transformátorů 400 a 220 kV (stroje s výkonem stovek MVA).** V podmínkách ČEPS lze rozlišit tyto úrovně monitorovacích systémů [31]:

- MST – monitorovací systém transformátoru. Provádí základní funkci měření, archivuje a zjednodušeným způsobem poskytuje data do centrálního monitorovacího systému (pomocí WAN ČEPS).
- CMT – centrální monitorovací systém transformátoru integruje jednotlivé MST do intranetu zákazníka. CMT zajišťuje dlouhodobou archivaci dat z MST různých výrobců.

### Instalované výrobky na ČEPS

V současné době jsou na transformátory 220 a 400 kV instalovány zejména tyto výrobky a výrobci [31]: Komplexní monitory MS 3000 Alstom a **MST TECHSYS**, Jednoduché monitory (analyzátoři plynů v oleji) Hydran M2 GE Energy, Calisto 2 Mogran Schaffer, Monitorovací systémy SIEMENS – Diatech, Monitorovací systémy ABB – TEC, Systém CMT – TECHSYS

## MST TECHSYS

Monitorovací systém MST TECHSYS se používá pro on-line diagnostiku výkonových transformátorů již delší dobu. Systém průběžně sleduje důležité provozní veličiny, stavy zařízení a provádí dodatečné výpočty. Velkou výhodou je možnost úpravy tohoto systému s ohledem na charakter monitorovaného stroje. [31]

Tab. 10 funkce MST TECHNYS [31]

<b>Měření a sledování stavu zařízení, výstupy</b>	
Teploty	Teploty oleje v horní a v dolní části nádoby
	Teplota oleje přepínače odboček
	Venkovní teplota
	Teploty oleje vstupů a výstupů oleje
Elektrické veličiny	Proudy vinutí transformátoru
	Napětí na měřících vývodech průchodek
Stav a poloha zařízení	Chod čerpadel chladicího systému
	Chod ventilátorů chladicího systému
	Poloha přepínače odboček transformátoru
Rozpuštěné plyny v oleji nádoby (dle analyzátoru)	Vodík / kompozitní hodnota
	CO v oleji
	Vlhkost oleje
	Případně další plyny DGA
Kontaktní výstupy	Alarmové a ovládací výstupy
Ostatní veličiny	Možnost rozšíření o měření a signalizace
<b>Výpočetní metody</b>	
Zatížení a ztráty transformátoru	Zatížení transformátoru
	Okamžité ztráty transformátoru
	Doba provozu transformátoru
Výpočet stárnutí IEC 60076-7:2005	Hot-spot teploty jednotlivých vinutí
	Rychlost stárnutí transformátoru
	Spotřebovaná životnost transformátoru
Vlhkost izolace, formace bublin	Orientační hodnota vlhkosti papírové izolace vinutí
	Teplota tvorby bublin v oleji
	Rozdíl teploty počátku tvorby bublin a teploty oleje
Průchodky	Indikace změn kapacit kondenzátorových průchodek
Chladicí systém	Teplotní spád na chladičích, účinnost chlazení
	Provozní doba čerpadel
	Provozní doba ventilátorů
Přepínač odboček	Poloha přepínače odboček
	Odhad možné míry opotřebení výkonových kontaktů
	Rozdíl teploty oleje výkonové části přepínače a oleje v nádobě transformátoru
Trendy	Výpočet vývoje z veličin
Alarmy	Překročení mezních hodnot, trendů, doby chodu

**Revize transformátorů ORGEZ-R, a.s.**

Společnost vychází vstříc všem požadavkům provozovatelů transformátoru, provádí komplexní údržbu a revize transformátorů. Zaručuje odborný postup při provádění prací, použití nejvhodnějších současných materiálů, dílů a přístrojů.

*Tab. 11 Měření prováděná na transformátoru firmou ORGEZ-R, a.s.*

<b>Měření prováděná na transformátoru při revizích a opravách</b>	
<b>Elektrické měření</b>	<b>Rozbory a zkoušky trafooleje</b>
Měření izolačního stavu vinutí	Stanovení obsahu vody
Měření ohmických odporů vinutí	Elektrická pevnost
Měření magnetizačních proudů	Mezipovrchové napětí
Měření kapacit a ztrátových činitelů	Číslo kyselosti
Měření převodu transformátoru	Plynová chromatografie
	PCB látky

## **Závěr**

Výkonové olejové transformátory jsou jedny z nejdůležitějších prvků elektrizační soustavy. Je na ně kladen velký důraz z hlediska spolehlivosti, jelikož při poruše vznikají velké hospodářské ztráty. Pro spolehlivou dodávku elektrické energie všem odběratelům a zajištění bezporuchového provozu se používá soubor diagnostických metod. Tyto metody lze rozdělit do dvou základních skupin, kterými jsou diagnostika off-line, prováděna při odpojení transformátoru ze sítě a diagnostika on-line, prováděna při nepřetržitém provozu. V posledních letech je on-line monitoring na strategicky významných transformátorech velice rozšířený i přes jeho vysoké počáteční náklady, a to z důvodu možnosti nepřetržitého sledování míst s nejčastějším výskytem poruchy. Vhodný výběr diagnostických metod umožňuje provozovateli transformátoru předcházet poruchám, lokalizovat místo vzniku poruchy daného stroje a prodloužit jeho celkovou životnost.

Na začátku práce je popsán obecný princip transformátoru a jeho jednotlivé funkční klíčové prvky z hlediska jejich spolehlivosti. Druhá kapitola je věnována základnímu rozdělení diagnostických metod na on-line a off-line, a na přiložených schématech popisuje principy měření jednotlivých metod. Třetí kapitola obsahuje pro čtenáře stručné shrnutí předchozích kapitol a konkrétní užití diagnostiky v praxi.

Přínosem této bakalářské práce je ucelené shrnutí, které přehledně popisuje problematiku poruchovosti transformátoru na jeho funkčních prvcích a vybrané diagnostické metody, používané pro výkonové olejové transformátory. Práce by měla napomoci čtenářům ke snadnému pochopení daného tématu a rychlé orientaci v on-line a off-line diagnostických metodách.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 1*. Praha: Academia, 1980.
- [2] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006, 139 s. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [3] ŠIRŮČEK, Martin. *STUDIUM PARAMETRŮ VÝKONOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ*. Plzeň, 2011. Písemná práce ke státní doktorské zkoušce. ZČU. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [4] 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.
- [5] STRAKA, Václav. On-line monitoring transformátorových olejů. In: [intranet]. Tábor, 2004 [cit. 2013-04-28].
- [6] WINDERS, John J. *Power Transformers : Principles and Applications*. New York : Marcel Dekker, 2002. 286 s. ISBN 0-8247-0766-4.
- [7] *Príspevek k rozboru spoľehlivosti výkonových olejových transformátorů* [online]. 2011[cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/20/prispevek-k-rozboru-spolehlivosti-vykonovych-olejovych-transformatoru---1--cast/>
- [8] Způsob provádění diagnostiky na výkonových transformátorech vvn/vn a vn/vn v ČEZ Distribučních službách, s.r.o. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. ZČU. Vedoucí práce Doc. Ing. Konstantin Schejbal, Csc.
- [9] ELEKTRO. [online]. 2002 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25085](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085)
- [10] ELDIAG s.r.o. *Buchholz – odběry vzorků plynů z plynových relé* [online]. [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/cz/texty/buchholz-odbery-vzorku-plynu-z-plynovych-rele>
- [11] *Diagnostické metody sledování plynů rozpuštěných v transformátorovém oleji*. Brno, 2012. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/8491/Hindra>

- [M\\_SZZ.pdf?sequence=1](#). Diplomová práce. VUTB. Vedoucí práce Ing. Martin Ministr.
- [12] *Expertní systémy v diagnostice transformátorů* [online]. 2011[cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/expertni-systemy-v-diagnostice-transformatoru---2--cast/>.
- [13] *IEEE Condition Monitoring and Diagnosis of Power Transformers*. Beijing, China: International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008
- [14] MENTLÍK, V. Aspekty a perspektivy diagnostiky elektrických silnoproudých zařízení. [online]. 2004, č. 11 [cit. 2013-06-06]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26027](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26027)
- [15] ČURLÍK, Ing. Matúš. *Stáže v elektrotechnice - Diagnostika výkonových transformátorů* [online]. 2012[cit. 2013-05-08]. Dostupné z: [http://www.sse-najizdarne.cz/TIME-1/Download/TIME\\_SSE\\_SE%20-%20Staze%20v%20elektrotechnice%20-%20Diagnostika%20vykonovych%20transformatoru.pdf](http://www.sse-najizdarne.cz/TIME-1/Download/TIME_SSE_SE%20-%20Staze%20v%20elektrotechnice%20-%20Diagnostika%20vykonovych%20transformatoru.pdf)
- [16] *Příspěvek k diagnostice výkonových olejových transformátorů*. Brno, 2010. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/1104/Dizerta%C4%8Dn%C3%AD%20pr%C3%A1ce%20-%20Ing.%20Martina%20C5%A0imkov%C3%A1.pdf?sequence=2>. Doktorská práce. VUTB. Vedoucí práce Doc. Ing. Miloš.
- [17] ELDIAG s.r.o. *Mechanický stav vinutí* [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/cz/texty/mechanicky-stav-vinuti>
- [18] Návod pro výkonový transformátor. ABB [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: [http://vfservis.cz/files/000279\\_Navod\\_pro\\_vykonovy\\_transformator.pdf](http://vfservis.cz/files/000279_Navod_pro_vykonovy_transformator.pdf)
- [19] AKHMADISHINA. *Predikce vývoje diagnostických veličin*. Brno, 2012. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53114](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53114). Diplomová práce. VUTB. Vedoucí práce Ing. Jakub Ertl.
- [20] Buchholz relays. In: [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.transformerworld.co.uk/buchholz.htm>
- [21] Monitoring teploty vinutí velkých transformátorů. [online]. 2011 [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.safibra.cz/monitorovani-teploty-vinuti-velkych-transfor>

matoru-

- [22] *Optovláknové senzory - reálné aplikace* [online]. 2012 [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace\\_06\\_1206\\_3.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace_06_1206_3.pdf)
- [23] JENČÍK, Josef. *Technická měření*. [online]. 2003 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: [http://www.strojar.com/upload/skripta/notime/Technicka\\_mereni\\_\(OCR\).pdf](http://www.strojar.com/upload/skripta/notime/Technicka_mereni_(OCR).pdf)
- [24] RŮŽIČKOVÁ, V. *Aspekty on-line diagnostiky transformátorů* [online]. Plzeň [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/17.pdf>
- [25] ČSN IEC 60076-7. *Výkonové transformátory – část 7: Směrnice pro zatěžování olejových výkonových transformátorů*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [26] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Praha: Academia, 2005. ISBN 80-200-1358-X
- [27] ELDIAG s.r.o. *Seznámení s plynovou chromatografií* [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/cz/texty/seznameni-s-plynovou-chromatografií>
- [28] BUJALOBOKOVÁ, M. a P. TRNKA. *Detekce poruch VN strojů analýzou výbojové činnosti se zaměřením na transformátory* [online]. 2011 [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://advances.utc.sk/index.php/AEEE>
- [29] *Distribuční transformátory*. In: *CG Power Systems* [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.riapower.cz/assets/RIA-files/DT/DT-brochure-CZE.pdf>
- [30] ČEPS, a.s. [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Stranky/default.aspx>
- [31] *Komplexní přístup k řízení životnosti výkonových olejových transformátorů: Úvod do problematiky*. [online]. 2012, č. 1 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz>
- [32] *Bushing monitoring guide* [online]. [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://www.grid sense.com/wp/wp-content/uploads/2012/10/Bushing-Monitoring-Guide-V2.pdf>

## Přílohy

### P.1 Základní zkoušky transformátoru [4]

Název zkoušky nebo měření	typová	kusová	zvláštní
Měření izolačního odporu	+	+	-
Měření odporu vinutí za studena stejnosměrným proudem	+	+	-
Měření převodu napětí naprázdno na všech odbočkách	+	+	-
Kontrola natočení fází	+	+	-
Zkouška přiloženým napětím cizího zdroje	+	+	-
Zkouška indukovaným napětím	+	+	-
Měření ztrát naprázdno a proudu nakrátko	+	+	-
Měřená charakteristiky naprázdno	+	-	-
Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko	+	+	-
Oteplovací zkouška	+	-	-
Zkouška elektrické pevnosti izolace atmosférickým pulsem: a) na vinutí se jmenovitým napětím do 132 kV b) na vinutí se jmenovitým výkonem nad 132 kV	+ +	- +	- -
Měření ztrátového činitele a kapacity vinutí na transformátoru a) se jmenovitým napětím menším než 110 kV b) se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	- +	- +	+ -
Zkratová zkouška	+	-	-
Měření nulové složky reaktance na transformátoru a) se jmenovitým napětím menším než 110 kV b) se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	- -	- -	+ +*)
Měření hluku na transformátorech a) s výkonem do 1600 kVA včetně b) s výkonem nad 1600 kVA	+ -	- -	- +
Zkouška přepínače odboček	+	+	-
Zkouška el. pevnosti izolace snímacími impulsy	-	-	+
Měření částečných výbojů	-	-	+
Měření ochrany rádiového příjmu před rušením	-	-	+
Zkouška oleje pro transformátory s olejovou náplní a) zkouška průrazného napětí oleje b) měření obsahu vody v oleji transformátoru se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším c) měření tgδ, R <sub>0</sub> a ε <sub>r</sub> oleje transformátoru se jmenovitým výkonem 110 kV a vyšším	+ + +	+ + +	- - -
+ vykonává se; - nevykonává se			
*) Pro transformátory určené pro energetiku – typová zkouška			