



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NEDESTRUKTIVNÍ DIAGNOSTICKÉ ZKOUŠKY
PROVÁDĚNÉ U TRANSFORMÁTORŮ
NON-DESTRUCTIVE DIAGNOSTICS TESTS OF TRANSFORMERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MATĚJ HINDRA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MARTINA ŠIMKOVÁ

BRNO 2010

ysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE

student(ka): Matěj Hindra

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Nedestruktivní diagnostické zkoušky prováděné u transformátorů

v anglickém jazyce:

Non-destructive diagnostics tests of transformers

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor a popis nedestruktivních diagnostických zkoušek u nás a v zahraničí

Cíle bakalářské práce:

Popis a rozbor nedestruktivních diagnostických zkoušek transformátorů

Seznam odborné literatury:

MENTLÍK, Václav aj. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vydání. Praha: BEN-technická literatura, 2008, 440 s.
ISBN 978-80-7300-232-9.



Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martina Šimková

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Václav Píštek, DrSc. doc..
Ředitel ústavu

RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Dekan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje objasnění základních diagnostických metod využívaných u transformátorů. Je rozdělena do dvou celků. A to části teoretické obsahující popis jednotlivých metod a příkladu využitelnosti metody chromatografické analýzy plynů obsažených v oleji.

ISI
FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Abstract

This work is devoted to clarifying the basic diagnostic methods used in the transformers. It is divided into two parts. These parts contain the theoretical description of these methods and an example of usability methods chromatographic analysis of gases contained in oil.

Klíčová slova

Diagnostické metody, on-line diagnostika, diagnostika izolantů, chromatografie, transformátory

Key words

Diagnostic methods, online diagnostics, diagnostics of insulators, chromatography, distribution transformer

Hindra, M. *Nedestruktivní diagnostické zkoušky prováděné u transformátorů*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martina Šimková



VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a vyznačil všechny citace z pramenů.

V Brně dne 28.5.2010

.....
Matěj Hindra



VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Martině Šimkové, za její odborné vedení, přínosné rady a připomínky, které mi při zpracování práce velmi pomohly.

Dále bych chtěl poděkovat společnosti EGÚ Brno, a.s. za poskytnuté údaje plynové chromatografie a samozřejmě rodině za podporu kterou mi během zpracování bakalářské práce poskytla.

OBSAH

ÚVOD	11
1 TRANSFORMÁTORY A ZKOUŠKY	12
1.1 Vysokonapěťové transformátory	12
1.2 Dělení Diagnostických metod	12
1.2.1 Výrobní zkoušky	12
1.2.2 Provozní zkoušky	13
2 ZKOUŠKY PROVÁDĚNÉ U TRANSFORMÁTORŮ	15
2.1 Měření izolačního odporu R_{iz15} , R_{iz60}	15
2.2 Kontrola natočení a sledu fází a hodinového úhlu	15
2.3 Měření kapacity C_x Vinutí a ztrátového činitele $tg\delta$	16
2.4 Měření činného odporu vinutí	17
2.5 Měření převodu, napětí naprázdno a ztrát naprázdno	18
2.6 Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko	19
2.7 Měření nulové složky reaktance	20
2.8 Oteplovací zkouška	21
2.8.1 Měření teploty chladiva	21
2.8.2 Určení teploty vynutí	21
2.8.3 Teplotní vrstvy oleje	22
2.8.4 Střední teplota oleje	22
2.8.5 Teplota konstrukčních prvků, obvodů a oleje v jejich blízkosti	22
2.9 Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje	22
2.10 Zkouška indukovaným napětím	22
2.10.1 Zkouška transformátoru s plnou izolací nulového bodu vinutí VN	22
2.10.2 Zkouška transformátoru s redukovanou izolací nulového bodu vinutí VN	23
2.10.3 Zkouška dlouhodobým indukovaným napětím	23
2.11 Zkouška elektrické pevnosti izolace atmosferickým impulzem	23
2.12 Zkouška elektrické pevnosti vnitřní izolace spínacími impulzy	24
2.13 Měření hladin částečných výbojů výkonových při střídavém napětí	24
2.13.1 Galvanická metoda měření částečných výbojů	25
2.13.2 Akustická metoda měření částečných výbojů	25
2.14 Detekce poruch vinutí	26
2.14.1 Metoda frekvenčního impulzu	26
2.14.2 Metoda přenosové funkce	26
2.14.3 Metoda nízkonapěťových impulzů	26

2.14.4	Metoda vycházející z měření reaktance vinutí	26
2.14.5	Metoda frekvenčních charakteristik.....	26
3	ON-LINE DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ	28
3.1	Systém monitorování.....	28
3.2	Jednotlivé parametry pro sledování.....	29
3.2.1	Měření a sledování provozních veličin	29
3.2.2	Sledování vývoje vzniku plynů při provozu.....	29
3.2.3	Sledování přítomnosti vlhkosti v kapalném médiu speciálními senzory.....	30
4	DIAGNOSTIKA KAPALNÝCH IZOLANTŮ.....	31
4.1	Metodika odběru vzorků.....	31
4.2	Průrazné napětí.....	33
4.3	Index lomu	34
4.4	Číslo kyselosti	34
4.5	Povrchové napětí	34
4.6	Usazeniny a rozpustné kaly.....	35
4.7	Ztrátový činitel	35
4.8	Měrný odpor.....	36
4.9	Obsah vody v oleji.....	36
4.10	Barva kapalných izolantů.....	36
4.11	Viskozita.....	37
4.12	Bod vzplanutí a tuhnutí.....	37
4.13	Hustota a mikroskopické stanovení počtu a velikosti nečistot.....	38
4.14	Oxidační stabilita, obsah inhibitoru a plynování oleje.....	38
4.15	Chromatografické metody	38
4.15.1	Kapalinová chromatografie	39
4.15.2	Plynová chromatografie	40
4.15.3	Chromatogram a jeho popis.....	40
5	PRAKTICKÁ UKÁZKA VYUŽITÍ METODY PLYNOVÉ CHROMATOGRRAFIE	41
5.1	Vývoj plynů v transformátoru	41
5.2	Změřené diagnostické veličiny	42
5.3	Metoda sledování poměrových kritérií pro posouzení stavu transformátoru	42
5.4	Výpočet poměrů transformátoru T 402	43
5.5	Vyhodnocení výsledků	46
6	ZÁVĚR.....	47
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	48
	SEZNAM PŘÍLOH.....	49

ÚVOD

Využívání elektrické energie se v dnešní době stalo nedílnou součástí našeho světa a život bez ní si dokážeme už jen těžko představit. Její spotřeba i odběr stále stoupají, což klade velké nároky na distribuční síť a stejně tak i na jeden z jejich základních stavebních kamenů tj. transformátorů. Vysokonapěťové transformátory využívané v energetice představují velmi nákladná a rozměrná zařízení a jakákoliv porucha či odstavení mohou způsobit velké škody nejen na transformátoru, ale i v důsledku výpadku energie v síti. Z těchto důvodů se v předkládané práci zabývám otázkou nedestruktivních diagnostických zkoušek prováděných u transformátorů.

Práce je členěna do několika částí. První část se zaměřuje na dělení transformátorů a hlavní popis a rozdělení diagnostických zkoušek dle uplatnění v jednotlivých fázích výroby a života stroje.

Druhá a také nejrozsáhlejší část práce je věnována nejdůležitějším diagnostickým zkouškám, vyjma diagnostiky kapalin. Jednotlivé diagnostické metody jsou zde stručně popsány a nechybí ani uvedení způsobu využití při jednotlivých měřeních a postupech.

Obsahem třetí části jsou problémy diagnostiky on-line, která v dnešní době, s příchodem moderní komunikační techniky, získává na významu také díky možnosti sledování stavu transformátorů v reálném čase.

Diagnostikou kapalných izolantů se pak zabývá čtvrtá část bakalářské práce. Je zde rozebrána především důležitost jednotlivých diagnostických metod kapalných izolantů u nejrozsáhlejší skupiny dnes užívaných vysokonapěťových transformátorů s izolačním systémem olej-papír.

V závěrečné části se čtenář seznámí s praktickou aplikací na ukázce využití metody plynové chromatografie k diagnostice stavu transformátoru T 402. Chromatografické údaje, které poskytla společnost UGU Brno a.s., jsou pomocí metody sledování poměrových kritérií vyhodnoceny z hlediska aktuálního a dlouhodobého stavu.

Pro potřebu základního studijního materiálu, ve kterém jsou přehledně uvedeny metody využívající se při diagnostice materiálu, si tato práce klade za cíl přinést přehledné a ucelené pojednání o jednotlivých metodách, které mohou být uplatněny při diagnostice tak, aby mohla sloužit jako základní informační materiál o diagnostických zkouškách.

1 TRANSFORMÁTORY A ZKOUŠKY

1.1 VYSOKONAPĚŤOVÉ TRANSFORMÁTORY

Transformátory se ve své podstatě řadí mezi netočivé elektrické stroje. Jsou koncipovány jako jednoduchá a spolehlivá zařízení, umožňující přenos elektrické energie na velké vzdálenosti. Zařazení transformátorů v energetické soustavě a jejich spolehlivost je klíčová ke správné funkci soustavy. Tomu také odpovídá rozmanitost provedení, které je přizpůsobováno požadavkům uživatelů.

Jako základní dělení transformátorů, které se odvíjí od funkčních provedení, které je úzce spojeno s jejich výkony lze uvést následující:

- a) Suché
 - Plynné chladicí médium, vzduch
 - Do napětí 38kV , výkonu 10 MVA
 - Při chlazení FS₆ napětí až do 75 kV
- b) Zalévané
 - Vinutí zalito pryskyřicí
 - Může být také provedeno systémem *resin-rich* nebo VPI
 - Do napětí 35 kV a výkonu 20 MVA (lze zvýšit až na 35 MVA)
- c) S izolačním systémem olej – papír
 - Stroje do vysokých napětí a výkonů
 - Nejčastěji používaný systém

Při záběhu nových transformátorů nebo naopak v důsledku postupného stárnutí a opotřebením dochází ke změnám jejich elektrických a mechanických vlastností, proto je kladen velký důraz na splnění provozních požadavků a bezpečnosti.

K tomu významnou měrou přispívá obor elektrotechnické diagnostiky, která se zabývá záznamem a vyhodnocováním měřených veličin a jejím hlavním posláním je ověření, zda stroj splňuje podmínky v souladu s předepsanými normami a eventuálně zda nový transformátor odpovídá objednavce v plném rozsahu.

1.2 DĚLENÍ DIAGNOSTICKÝCH METOD

Diagnostické metody můžeme dělit podle různých kritérií. Z provozního hlediska je nejdůležitější, jestli je stroj potřeba odpojit z provozu, tedy off-line diagnostika nebo zda probíhá nepřetržité sledování stavu při běžném provozu, tzv. on-line diagnostika. Jako samostatnou skupinu lze také uvést zkoušky zabývající se kapalnými izolanty.

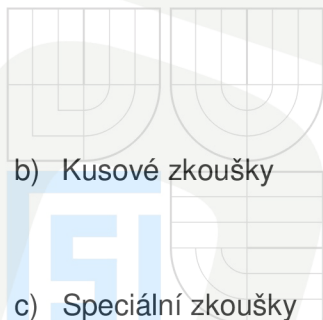
Zkoušky můžeme dělit také dle rozsahu a fáze stáří stroje na:

- a) Výrobní zkoušky
- b) Provozní zkoušky

1.2.1 Výrobní zkoušky

Zahrnují zkoušky při vzniku stroje a konají se převážně ve výrobním závodě. Můžeme do nich zahrnout vstupní kontrolu materiálů, zkoušky mezioperační a ověřování funkčnosti kompletních transformátorů, které dále můžeme dělit následovně:

- a) Typové zkoušky:
 - u zavádění prototypů do výroby
 - při změnách ve výrobním procesu, konstrukci a změnách materiálu mající vliv na vlastnosti stroje
 - s předáním výroby jinému výrobcí



b) Kusové zkoušky

c) Speciální zkoušky

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

- v sériové výrobě se opakující po stanoveném počtu vyrobených kusů stejného typu nebo po uplynutí stanovené doby
- zjišťující, zda stroj odpovídá plnému rozsahu danému typu

- provádí se na všech vyrobených transformátorech v předepsaném rozsahu

- pro doplnění a ověření vlastností transformátorů
- používají se jako doplněk základních zkoušek
- často na přání provozovatele zařízení

1.2.2 Provozní zkoušky

Jedná se o zkoušky užívané na stroje v běžném provozním prostředí. Jejich hlavním cílem je zjišťovat provozuschopnost a stupeň opotřebení transformátorů. Dále se také snaží zhodnotit budoucí vývoj opotřebení a předcházet poruchovým stavům.

Diagnostické metody spadající do provozních zkoušek provádíme dvěma různými způsoby. Nepřetržitým sledováním a testováním, tedy tzv. on-line diagnostikou nebo testováním strojů odstavených, tedy tzv. off-line diagnostikou. Off-line diagnostiku transformátorů provádíme podle dále uvedených postupů s periodicitou určenou s ohledem na důležitost stroje i jeho parametry. U strojů vn/vn a vn/nn – 1 až 4 roky, vvn/vn – 1 až 2 roky, pro transformátory vvn/vvn a blokové transformátory s výkonem nad 100 MVA – 1 rok.

Rozdělení jednotlivých zkoušek aplikovaných během výroby a vlastního provozu transformátoru je uvedeno v tab. 1.1. O měřeních se zhotovují záznamy obsahující štičkové hodnoty měřeného stroje (výrobní číslo, místní označení, typ a výrobce stroje, rok výroby, výkon, napětí, zapojení vinutí), provozní hodnoty měřeného stroje (datum odstavení stroje, datum měření), podmínky měření (teplota vinutí, teplota okolí, relativní vlhkost vzduchu, údaje o povětrnostní situaci), naměřené a vypočtené hodnoty měřených veličin, vyhodnocení měření a závěr o stavu izolace, číslo protokolu a jméno jeho autora [1].

Tab. 1.1 Zkoušky transformátorů a jejich rozdělení do jednotlivých skupin [1]

Název zkoušky nebo měření	Zkouška		
	typová	kusová	zvláštní
Měření izolačního odporu	+	+	-
Měření odporu vinutí za studena stejnosměrným proudem	+	+	-
Měření převodu napětí naprázdno na všech odbočkách	+	+	-
Kontrola fází	+	+	-
Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje	+	+	-
Zkouška indukovaným napětím	+	+	-
Měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno	+	+	-
Měření charakteristiky naprázdno	+	-	-
Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko	+	+	-
Oteplovací zkouška	+	-	-
Zkouška elektrické pevnosti izolace atmosférickým impulzem:			
a) na vinutí se jmenovitým napětím do 132 kV	+	-	-
b) na vinutí se jmenovitým napětím 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 spínacími impulzy	-	-	+
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 transformátorů se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	+	+	-
c) měření tg, R ₀ a ε _r oleje transformátorů se jmenovitým výkonem 110 kV a vyšším	+	+	-
+ vykonává se ; - nevykonává se			
*) Pro transformátory určené pro energetiku – typová zkouška			

2 ZKOUŠKY PROVÁDĚNÉ U TRANSFORMÁTORŮ

2.1 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU R_{iz15} , R_{iz60}

Pro spolehlivý chod transformátoru je nejdůležitější dobrý stav izolace vinutí. Z tohoto důvodu představuje jednu z nejstarších diagnostických metod měření izolačního odporu. Pokles izolačního odporu je často spojen s vlivem vodivých nečistot a vlhkosti, jelikož citlivě reaguje na nejslabší místo izolačního systému.

Izolační odpor se nejčastěji odečítá v časech 15 sec – R_{iz15} a 60 sec – R_{iz60} od počátku měření při 2,5 kV_{ss} přiloženého měřicího napětí (nemělo by překročit hodnotu jmenovitého napětí stroje). Měří se za normálních podmínek při vlhkosti vzduchu menší než 90% a teplotě transformátoru přesahující 10 °C. Pro získání nezkrácených hodnot zbytkovým napětím je třeba přísně dodržovat vybíjecí intervaly. Je také nutné dodat, že delší doby přiložení stejnosměrného napětí jsou doprovázeny efektem „elektrostatického čištění oleje [3], to způsobuje přesun částic do míst, kde mohou působit problémy.

Naměřené izolační odpory R_{iz15} a R_{iz60} představují výchozí hodnoty pro určení minutového polarizačního indexu P_{i60} .

$$P_{i60} = \frac{i_{15}}{i_{60}} \quad [-] \quad (2.1)$$

kde: i_{15} [A] je absorpční proud odečtený 15 s po přiložení napětí
 i_{60} [A] je absorpční proud odečtený 60 s po přiložení napětí

Časová konstanta τ je také veličina, která charakterizuje stav izolačního systému. A absolutní velikost časové konstanty je nezávislá na geometrických vlastnostech vinutí, což v praxi umožňuje objektivně hodnotit izolační systémy. Časová konstanta je stanovena násobkem izolačního odporu a kapacity izolace C_{50} [μ F] měřené při 50 Hz.

$$\tau = R_{iz60} \cdot C_{50} \text{ [s]} \quad (2.2)$$

Měření se provádí off-line, tedy při odstaveném transformátoru, po ustálení teplot všech částí stroje. Pro odstranění zbytkového náboje je třeba spojit nakrátko všechna vinutí stroje a minimálně na 5 minut je spojit i s kostrou. Při měření nesmí zůstat žádné vinutí nezapojeno (musí být zapojeno s kostrou nebo měřícím napětím)

2.2 KONTROLA NATOČENÍ A SLEDU FÁZÍ A HODINOVÉHO ÚHLU

Fázový posuv se udává hodinovým úhlem (1 hodina=30°) mezi stejně označenými svorkami vstupního a výstupního napětí a jedná se o štitkový údaj. Je důležitý pro správný paralelní chod transformátorů, kde představuje stejný hodinový úhel nezbytnou podmínku.

K naměření hodinového úhlu transformátoru můžeme užít voltmetr. Na měřeném stroji propojíme dvě stejně označené svorky nižšího a vyššího napětí (např. U, u). Na stranu s vyšším napětím přivedeme snížené souměrné trojfázové napětí a voltmetrem s vhodným rozsahem měříme jednotlivá napětí ($U_{UV}, U_{VW}, U_{UW}, U_{Vv}, U_{Wv}, U_{Vw}, U_{Uv}, U_{Uw}, U_{Vw}$). Pomocí napětí U_{UV}, U_{VW}, U_{UW} sestrojíme v příslušném měřítku trojúhelník s vrcholy U, V, W. Pořadí vrcholů je v pravotočivém smyslu. Svorky U, u mají stejný potenciál, z tohoto důvodu je totožný i vrchol na trojúhelníku. K určení zbývajících vrcholů druhého trojúhelníku využijeme napětí $U_{Vv}, U_{Wv}, U_{Vw}, U_{Uw}$, jejichž velikost v měřítku opišeme z vrcholů V, W kružnicemi. Průsečík příslušných kružnic určí vrcholy v, w. Jsou-li sledy u, v, w a U, V, W shodné, je shodný i sled fází vyššího a nižšího napětí. Hodinový úhel svírají např. úsečky UV a uv a měříme jej vždy od úsečky vyššího napětí k úsečce s nižším napětím, ve smyslu vrcholů U, V, W.

Pokud máme změřeny hodnoty napětí $U_{UV}, U_{Uv}, U_{Vv}, U_{Vv}, U_{Vw}, U_{Uw}$, můžeme hodinový úhel určit jejich porovnáním pomocí tab. 2.1

Tab. 2.1 Určení hodinového úhlu ze srovnávacích hodnot napětí naměřených mezi svorkami [1]

1	2	3	Hodinový úhel	
$U_{Vv} = U_{Ww}$	$U_{Vv} < U_{Vw}$		0	
$U_{Vv} = U_{Ww}$	$U_{Vv} > U_{Vw}$		6	
$U_{Vv} = U_{Wv} = U_{Ww}$	$U_{Vv} < U_{Vw}$		1	
	$U_{Vv} > U_{Vw}$		7	
$U_{Vv} = U_{Vw} = U_{Ww}$	$U_{Vv} > U_{Vw}$		5	
	$U_{Vv} < U_{Vw}$		11	
$U_{Vv} = U_{Ww}$	$U_{Vv} < U_{Uv}$		2	
	$U_{Vw} > U_{Uv}$			
	$U_{Vv} < U_{Uv}$		10	
	$U_{Vv} > U_{Uv}$	$U_{Vw} < U_{Uv} + U_{Uv}$		3
	$U_{Vw} > U_{Uv}$	$U_{Vw} = U_{Uv} + U_{Uv}$		4
	$U_{Vv} > U_{Uv}$	$U_{Wv} = U_{Uv} + U_{Uv}$		8
	$U_{Vw} < U_{Uv}$	$U_{Wv} < U_{Uv} = U_{Uv}$		9

2.3 MĚŘENÍ KAPACITY C_x VINUTÍ A ZTRÁTOVÉHO ČINITELE TGD

Samotná kapacita vinutí C_x se pro hodnocení obvykle nepoužívá. Její změny ovšem mohou indikovat poškození izolace a dokonce, u lokálních poruch, přispívat k jejich odhalení. Velikost kapacity vinutí je proto sledována jako kvalitativní znak izolantu, který by se v průběhu provozu neměl příliš měnit.

Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ udává obraz o celkovém stavu izolace. Jeho velikostí, která je ovlivněna pevnou a kapalnou částí dielektrika, lze zjistit, zda je izolační soustava zestárlá nebo navlhla. V omezené míře ztrátový činitel také reaguje na vznik částečných výbojů.

K měření kapacity a ztrátového činitele se využívá můstková metoda s přiloženým napětím 10 kV. Pokud je toto napětí nevyhovující pro izolační hodnotu měřeného vinutí, využijeme nejbližší nižší zkušební napětí z řady 0,5 - 1 - 2 - 5 kV (např. u vinutí izolační hladiny 6,4 kV uijeme měřící napětí 5 kV). Měření se provádí off-line a nejlépe při teplotě transformátoru 20°C. Toto měření je značně citlivé na rušení z okolních zařízení pod napětím výskytem parazitních vazeb. Proto je důležité zavést speciální opatření (odpojení okolních strojů, využití eliminačních metod. Příkladem může být měření poměrů při 2 Hz a 50 Hz).

Pokud bude poškozena jenom část dielektrika transformátoru, může být maximální hodnota $\text{tg}\delta$ omezena jen poměrem kapacit části poškozené a nepoškozené. Toto lze ukázat na příkladu dvou sériově zapojených kapacit. Pokud se bude jedna z nich zhoršovat, poroste také $\text{tg}\delta$ obvodu. Tento stav potrvá pouze do určité míry poškození, jelikož při úplném průrazu poškozené části je možné nahradit tento kondenzátor vodičem. Výsledná hodnota $\text{tg}\delta$ potom bude úměrná nepoškozené části, tady jakoby nenastala žádná změna. Současně ale dochází ke změně kapacity.

Pro spojení dvou kapacit podle paralelního schématu bude max. naměřená hodnota ztrátového činitele: [2]

$$\text{tg } \delta_{\max p} = \frac{1}{2} \cdot (K_p (K_p + 1))^{\frac{1}{2}} [-] \quad (2.3)$$

Kde: $K_p = \frac{C_{p2}}{C_{p1}}$

Pro sériové schéma:

$$\text{tg } \delta_{\max p} = \frac{K_s}{2} \cdot (K_s + 1)^{\frac{1}{2}} [-] \quad (2.4)$$

Kde: $K_s = \frac{C_{s2}}{C_{s1}}$

2.4 MĚŘENÍ ČINNÉHO ODPORU VINUTÍ

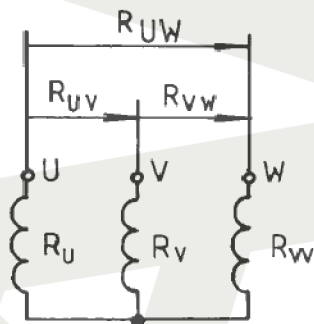
Činný odpor je měřen pro všechna vinutí vstupní i výstupní. Odpor musí být proměřen na všech odbočkách, a při všech polohách přepínače vinutí. Měření probíhá off-line, tedy při odpojení transformátoru od sítě, a teplotou stroje shodnou s okolní teplotou.

Pokud jsou fáze trvale připojeny do trojúhelníku nebo hvězdy, měříme vždy odpor mezi dvojicemi svorek a z těchto hodnot vypočteme odpor jednotlivých fází.

Měření je realizováno přímou nebo můstkovou metodou. Velikost proudu nesmí překročit 0,2 násobek hodnoty jmenovitého proudu vinutí. Pro urychlení doby ustálení proudu se doporučuje volit hodnotu proudu minimálně $2\sqrt{2}I_0$, kde I_0 je efektivní hodnota proudu naprázdno, odpovídající jmenovitému napětí transformátoru [1].

Pro zapojení fází do hvězdy *obr. 2.1*[5] měříme odpory mezi svorkami U, V, W, tedy R_{UV} , R_{UW} a R_{VW} . Za předpokladu, že určujeme pouze střední hodnotu odporu u jedné fáze, nebo pokud se naměřené hodnoty odporů mezi svorkami liší jen málo, můžeme odpor fáze R_f určit jako střední hodnotu z naměřených hodnot podle vztahu:

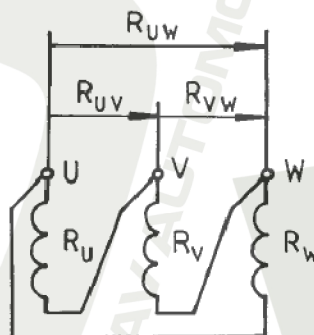
$$R_f = \frac{1}{6} (P_{UV} + P_{UW} + P_{VW})[\Omega] \quad (2.5)$$



Obr. 2.1 Vinutí spojené do hvězdy

Pro zapojení fází do trojúhelníka *obr. 2.2*[5] se postupuje podobně. Střední hodnotu odporu u jedné fáze spočítáme dle vztahu:

$$R_f = \frac{1}{2} (P_{UV} + P_{UW} + P_{VW})[\Omega] \quad (2.6)$$



Obr. 2.2 Vinutí spojené do trojúhelníka

Pokud naměřené hodnoty přibližně odpovídají velikosti naměřených hodnot odporů mezi svorkami, můžeme vypočítat odpor fází dle vztahů:

Spojení do hvězdy:

$$R_f = 0,5 \cdot R_S [\Omega] \quad (2.7)$$

Spojení do trojúhelníka:

$$R_f = 1,5 \cdot R_S [\Omega] \quad (2.8)$$

2.5 MĚŘENÍ PŘEVODU, NAPĚTÍ NAPRÁZDNO A ZTRÁT NAPRÁZDNO

Transformátor pracuje naprázdno tehdy, jestliže je vstupní vinutí připojeno ke zdroji střídavého napětí a výstupní vinutí je rozpojeno[4].

Měříme proud naprázdno I_0 skládající se převážně z jalové složky I_μ , ale i činné složky I_{Fe} kryjící ztráty v železe magnetického obvodu ΔP_{Fe} . Proud I_0 bývá 5÷10 % jmenovitého proudu. Obecně platí, že menší hodnoty proudu naprázdno odpovídají větším výkonům transformátorů. Vypočtený účinník naprázdno $\cos \varphi_0$ bývá malý (0,05 ÷ 0,3). Účinník transformátoru pro dané napětí je roven podílu činného a zdánlivého výkonu.

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_1}{S_1} [-] \quad (2.9)$$

$$P_1 = P_{1U} + P_{1V} + P_{1W} [W] \quad (2.10)$$

$$S_1 = 3 \cdot U_1 + I_1 [VA] \quad (2.11)$$

kde: $\cos \varphi_{10} [-]$ je účinník transformátoru pro dané napětí

$P_1 [W]$ je činný výkon

$S_1 [VA]$ je zdánlivý výkon

Ztráty při chodu naprázdno vznikají jako ztráty v železe ΔP_{Fe} a ztráty ve vstupním vinutí ΔP_j (představují přibližně 2 % ztrát naprázdno). Při měření je také možné zahrnout ztráty způsobené měřicími přístroji.

$$\Delta P_1 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_j + \Delta P_W [W] \quad (2.12)$$

kde: $\Delta P [W]$ jsou ztráty na prázdno

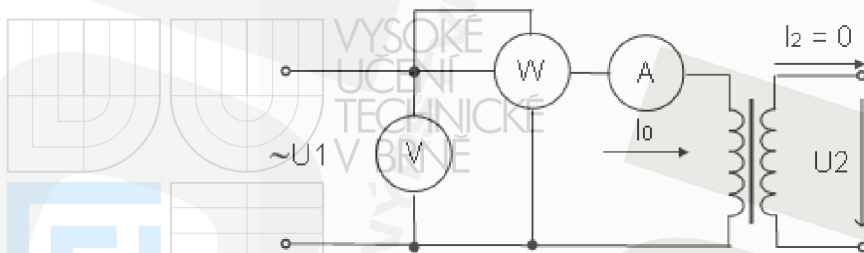
$\Delta P_{Fe} [W]$ jsou ztráty v železe

$\Delta P_j [W]$ jsou ztráty ve vstupním vinutí

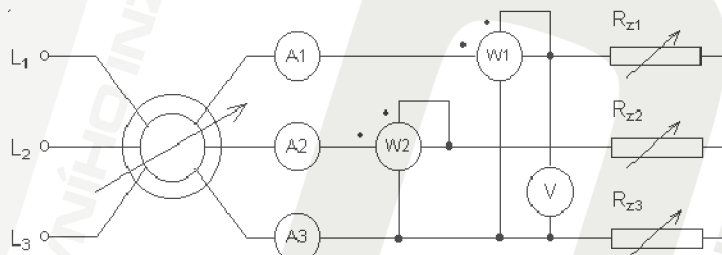
$\Delta P_W [W]$ jsou ztráty způsobené měřicími přístroji

Převod naprázdno P_u transformátoru je definován jako podíl napětí strany s vyšším napětím a napětí strany s nižším napětím. Hodnota vstupních napětí a proudu se vypočte jako střední hodnota napětí a proudů jednotlivých fází (U,V,W).

Pro zapojení přístrojů na měření ztrát a proudu naprázdno používáme schéma pro jednofázové transformátory obr. 2.3. Trojfázové transformátory měříme obvykle v Aronově zapojení obr. 2.4



Obr. 2.3 Schéma zapojení přístrojů pro jednofázové transformátory [13]



Obr. 2.4 Schéma Aronova zapojení přístrojů pro trojfázové transformátory [13]

2.6 MĚŘENÍ ZTRÁT NAKRÁTKO A NAPĚTÍ NAKRÁTKO

Transformátor pracuje nakrátko tehdy, jestliže je jeho vstupní vynutí připojeno ke zdroji střídavého napětí a výstupní napětí je spojeno nakrátko bezodpornou spojkou [1].

Transformátor může v tomto stavu pracovat jen krátce, aby nedošlo k jeho poškození.

Ztráty nakrátko ΔP_K jsou důležitým ukazatelem stavu nakrátko. Ztráty nakrátko ΔP_K jsou Joulovými ztrátami ΔP_j v činných odporech obou vinutí, protože ztráty ΔP_{Fe} jsou zanedbatelné. Ve ztrátách ΔP_K jsou zahrnuty i ztráty vířivými proudy a další, tzv. dodatečné ztráty ΔP_d .

Ztráty se obvykle počítají na úroveň provozní teploty vinutí transformátoru. Pro provedení izolace vinutí třídy A, E nebo B se udává teplota 75°C, má-li vinutí izolaci třídy F nebo H, uvádí se teplota 115°C.

Ztráty ΔP_K bývají obvykle (1,5 ÷ 3,5)krát větší než ztráty naprázdno ΔP_0 a ztráty dodatečné ΔP_d činí (5 ÷ 40)% ΔP_K podle velikosti transformátoru. U malých transformátorů není třeba ΔP_d uvažovat [5].

$$\Delta P_K = P_{1U} + P_{1V} + P_{1W} [W] \quad (2.13)$$

Přepočet ztrát nakrátko na provozní teplotu 75°C:

$$\Delta P_{K75} = \frac{235+75}{235+\vartheta_K} \cdot \Delta P_K [W] \quad (2.14)$$

kde: ϑ_K [°C] je střední teplota vinutí při měření nakrátko (pokud není měřena, bereme $\vartheta_K = 20^\circ C$).

Dalším zjišťovaným údajem při měření nakrátko majícím vliv na zkratové proudy, je napětí nakrátko U_{1K} sloužící k výpočtu úbytku napětí na transformátoru. Toto napětí na vstupních svorkách je takové, že napájeným vinutím teče jmenovitý proud o jmenovitém kmitočtu. Napětí nakrátko jako procentní údaj jmenovitého napětí napájené strany, značený u_k , je udáván jako štítková hodnota transformátoru. Hodnota u_k bývá (3 ÷ 12)% U_N , přičemž pro větší transformátory platí větší hodnoty a rozmezí může být i překročeno.

Střední hodnota napětí nakrátko:

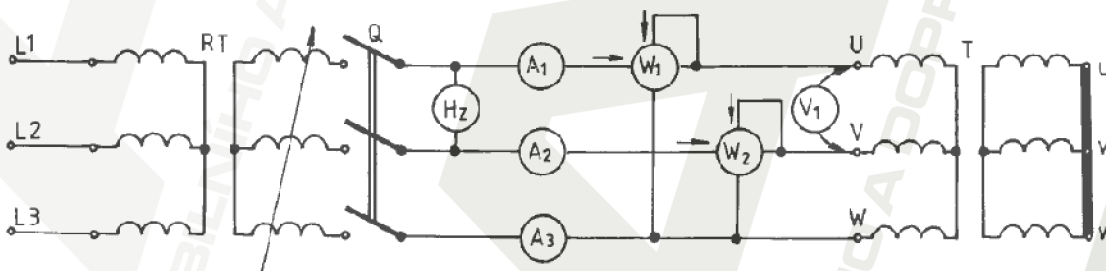
$$\Delta P_K = \frac{1}{3}(P_{UVK} + P_{VWK} + P_{UWK})[V] \quad (2.15)$$

Procentní napětí nakrátko:

$$u_k = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} [V] \quad (2.16)$$

Účinník nakrátko $\cos \varphi_k$ je roven podílu činného a zdánlivého výkonu. Často bývá větší než účinník naprázdno, a to (0,3 ÷ 0,7) krát i více. (Menší hodnoty platí pro větší transformátory, větší pro menší).

Samotné měření nakrátko u třífázových transformátorů, provádíme podle obr. 2.3 [5]. Zpočátku nastavíme na regulačním transformátoru nulové napětí. Připravíme vhodně rozsahy měřicích přístrojů a sepnutím spínače Q zapojíme měřený transformátor k regulačnímu transformátoru. Pozvolným zvyšováním přiváděného napětí nastavíme střední hodnotu proudu nakrátko I_{1K} rovnající se proudu jmenovitému I_{1N} měřeného transformátoru. Hodnoty z měřicích přístrojů odečítáme co nejrychleji, protože teplota vinutí vlivem protékajícího proudu prudce stoupá. Na straně spojené nakrátko obvykle proud neměříme, protože impedance cívky ampérmetru by ovlivnila měření. Jeho velikost můžeme určit z napájecího proudu I_{1K} a z převodu transformátoru.



Obr. 2.5 Schéma zapojení pro měření transformátoru nakrátko

2.7 MĚŘENÍ NULOVÉ SLOŽKY REAKTANCE

Nulová složka reaktance se měří u plně zkompletovaného transformátoru při jmenovitém kmitočtu (dovolená odchylka 1%) mezi vzájemně propojenými svorkami vinutí, zapojených do hvězdy nebo lomené hvězdy, a vyvedenou svorkou uzlu. Pokud má transformátor vinutí spojené do trojúhelníka, musí být i měření nulové složky provedeno na spojení do trojúhelníka. U vinutí s odbočkami se měří reaktance nulové složky na jmenovité odbočce. Po dohodě odběratele a výrobce může být měřena i na jiných odbočkách. Hodnota nulové složky reaktance se určuje dle vztahu:

$$Z_0 = 3 \cdot \frac{U}{I} [\Omega] \quad (2.17)$$

kde: Z_0 [Ω] je reaktance nulové složky,
 U [V] je zkušební napětí,
 I [A] je zkušební proud.

Velikost trvání průchodu proudů se určuje souborem zkoušek předepsaných k dané konstrukci transformátoru. Z důvodu ohřevu částí transformátoru nesmí být trvání průchodu proudu při měření reaktance nulové složky příliš dlouhé.

2.8 OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA

Zkouška testuje oteplení transformátoru na ustálený teplotní stav pomocí jeho zatěžování, kdy v jeho především aktivních částech dochází ke ztrátám činné energie a oteplení částí nad teplotu okolí. Zkouška je prováděna při teplotě okolí od 10 °C do 35 °C a odpovídá na otázku, zda oteplení jednotlivých částí transformátorů vyhovuje předpisům pro oteplení. Při zkouškách nesmí být transformátor vystaven tepelnému záření, působení atmosférických srážek nebo jiným vnějším vlivům, které mohou ovlivnit výsledek.

Oteplovací zkoušky se provádějí u plně zkompletovaného transformátoru. Není ovšem nutné montovat části nemající vliv na tepelný režim transformátoru. Transformátory se zkouší s vlastní chladicí soustavou, pouze u transformátorů s nuceným oběhem oleje je dovoleno zjišťovat střední oteplení vinutí nad střední teplotou oleje a oteplení prvků transformátoru nad teplotou oleje v jejich blízkosti bez připojení vlastního chladicího systému. V takovémto případě se oteplení horních vrstev oleje určuje výpočtem na základě zkoušek chladiče odděleně od transformátoru.

Oteplení se provádí různými metodami. Pomocí metody přímého zatížení, kdy se jedno vinutí napájí jmenovitým napětím a druhé vinutí je připojeno k zátěži odpovídající jmenovitému proudu ve vinutích.

U metody vzájemného zatížení se zkoušený transformátor zapojí paralelně s jiným transformátorem, napájeným stejným jmenovitým napětím, a se stejnou skupinou spojení jako má zkoušený transformátor. Pomocí různých převodů nebo přivedením napětí z pomocného zdroje se nastaví jmenovitý proud ve vinutí zkoušeného transformátoru.

Pomocí zapojení nakrátko se jedno vinutí zapojí nakrátko a druhé se napájí napětím. Kmitočty by se neměly lišit od jmenovitého napětí o více než 2%. Nastavuje se tak, aby se ve vinutích ustálil proud, při kterém se ztráty rovnají celkovým jmenovitým ztrátám bez tolerance.

2.8.1 Měření teploty chladiwa

Teplota chladicího vzduchu se určuje teploměry ponořenými do nádoby o objemu nejméně 0,001 m³ naplněné kapalinou a s časovou konstantou teploty asi 2 hodiny. Povrch nádoby by měl odrážet tepelné záření (využití například hliníkové fólie). Dále musí být nádoba chráněna před vzdušnými proudy.

Pro přirozené vzduchové i olejové někdy také pro nucené vzduchové chlazení umísťujeme teploměry přibližně do středu minimálně tří stran ve vzdálenosti 1 až 2 metry od povrchu transformátoru.

Při nuceném vzduchovém chlazení se také teploměry umísťují na vstup vzduchu do chladiče ve vzdálenosti minimálně 1 m od nejbližší plochy, která u transformátoru vyzařuje teplo. Pokud nelze splnit tuto podmínku, měříme postupem popsáním výše.

Při chlazení olej-voda se měří teplota vody vstupující do chladiče.

Jako výslednou teplotu vzduchu a vody bereme aritmetický průměr nejméně tří měření s periodou opakování 1 hodina. Teplota chladicího vzduchu by se měla držet po dobu zkoušek na konstantní hodnotě.

2.8.2 Určení teploty vynutí

Střední teplota vinutí se určuje na základě odporu vinutí dle následujících vztahů:
Pro měď:

$$\vartheta_W = \frac{R_2}{R_1} \cdot (235 + \vartheta_{W1}) - 235 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.18)$$

Pro hliník:



$$\vartheta_W = \frac{R_2}{R_1} \cdot (225 + \vartheta_{W1}) - 225 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.19)$$

kde: ϑ_W [$^{\circ}\text{C}$] je střední teplota vinutí,
 R_1 [Ω] je odpor vinutí při teplotě ϑ_{W1} ,
 R_2 [Ω] je odpor vinutí při teplotě ϑ_W ,
 ϑ_{W1} [$^{\circ}\text{C}$] je teplota při odečtu hodnoty odporu R_1 .

Odpor R_1 se měří za studena. Odpor R_2 měříme po odpojení napájecího zdroje nebo metodou superpozice bez odpojení zdroje.

Pokud je měření odporu vinutí nepřijatelné (například u vinutí s nízkým odporem, kde je aktivní odpor srovnatelný s přechodovým odporem kontaktů), pak měříme střední teplotu vinutí několika termočlánky umístěnými na vnější ploše vinutí.

2.8.3 Teplotní vrstvy oleje

Měříme ponořením teploměru nebo termočlánku do jímky naplněné olejem umístěné ve víku transformátorové nádoby. U chladičů mimo transformátor se teploměry umísťují do potrubí na výstupu transformátoru do chladiče.

2.8.4 Střední teplota oleje

Střední teplota oleje nad teplotou chladiva $\Delta\vartheta_o$ je rozdíl středních teplot oleje, určených například jako rozdíl teplot horních vrstev oleje a polovičního rozdílu teplot na vstupu a výstupu z chladičící soustavy.

Pokud nemáme k dispozici údaje o rozdílu teplot u transformátorů do výkonu 2500 kVA s přirozeným olejovým chlazením a hladkou nebo vlnovou nádobou, pak je možno brát střední oteplení oleje nad teplotu chladiva jako 0,8násobek oteplení horních vrstev oleje [1].

2.8.5 Teplota konstrukčních prvků, obvodů a oleje v jejich blízkosti

Toto měření se doporučuje provést pro transformátory o výkonu větším než 100 MVA. Měří se pomocí termočlánků zhotovených z dvojice vodičů.

2.9 ZKOUŠKA PŘILOŽENÝM NAPĚTÍM Z CIZÍHO ZDROJE

Touto zkouškou je ověřována elektrická pevnost izolace zkoušeného vinutí proti ostatním vinutím a uzemněným částem. Izolační systém v tomto prostoru tvoří izolace vodičů a válce z transformátorové lepenky. Tyto pevné papírové izolanty se spojí s olejem a vytvoří nejdůležitější izolační část transformátoru [1].

Zkoušky, až na olejové transformátory, u nichž není potřeba montovat chladiče a pomocné části pokud jsou elektricky odstíněny, se provádí na kompletně sestavených transformátorech.

2.10 ZKOUŠKA INDUKOVANÝM NAPĚTÍM

Tato zkouška se dělí na tři důležité podskupiny.

2.10.1 Zkouška transformátoru s plnou izolací nulového bodu vinutí VN

Testuje se při provozním zapojení dvojnásobným jmenovitým napětím. Zkouška ověřuje hlavně elektrickou pevnost izolace podél testovaného vinutí, dále také mezi fázemi vůči uzemněným částem a dalším vinutím. Napětí mezi vývody nesmí překročit

normalizované zkušební napětí a vývod nulového napětí musí být uzemněn, pokud jej transformátor má vyveden.

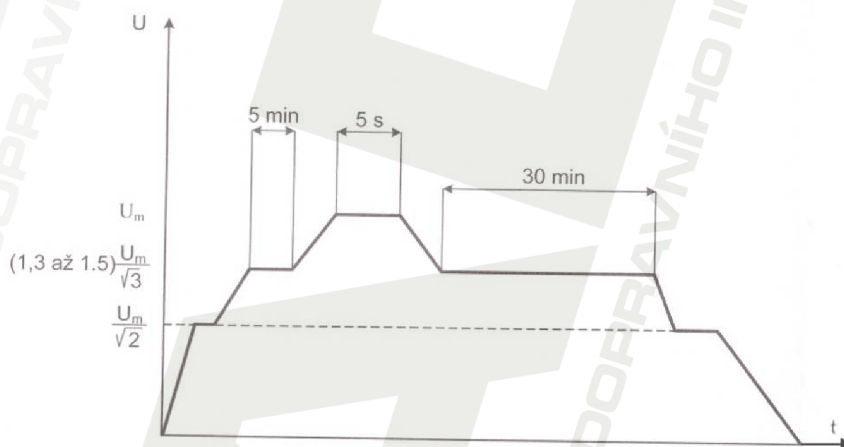
2.10.2 Zkouška transformátoru s redukovanou izolací nulového bodu vinutí VN

Provádí se pro kontrolu elektrické pevnosti vývodů mezi fázemi, podél zkoušeného vinutí, na vedení proti uzemněným částem a dalším vedením.

Normalizovaná zkušební napětí musí být současně přiložena mezi vinutí vyššího napětí a středního napětí a zemí u vývodů sousedních fází rozmístěných vně. Nádoba (plášť) musí být uzemněna.

2.10.3 Zkouška dlouhodobým indukovaným napětím

Zkouška je realizována za uzemnění nulového bodu zkoušeného vinutí. Při zapojení do trojúhelníka se uzemní jeden z vývodů. U hvězdy se také zbývající vinutí uzemní v nulovém bodu. Průběh zkušební napětí v čase by měl odpovídat schématu jako na obr. 2.6 [1].



Obr. 2.6 Časový průběh zkušební napětí při zkoušce dlouhodobým indukovaným napětím.

Během zkoušky se měří částečné výboje. Určuje se hodnota zapalovacího a zhášecího napětí během zvyšování a snižování zkušební napětí [1].

Transformátor zkoušce vyhověl, pokud nedošlo k poklesu zkušební napětí nebo jeho useknutí. Případně pokud amplituda zdánlivého náboje částečných výbojů naměřená ze všech měřících svorek při průběhu zkoušky dlouhodobým indukovaným napětím nepřekročila mezní hodnoty. (300 pC pro napětí od $1,3 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ do $1,4 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ kde U_m je amplituda napětí. 500pC pro napětí od $1,5 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ bez tendence růstu amplitud v blízkosti mezních hodnot)

Pokud toto transformátor překračuje, ale hodnota zdánlivých nábojů částečných výbojů není vyšší, než 3000 pC, je nutné provést analýzu a určit místo částečných výbojů.

2.11 ZKOUŠKA ELEKTRICKÉ PEVNOSTI IZOLACE ATMOSFERICKÝM IMPULZEM

Tato zkouška ověřuje, zda je vyhovující elektrická pevnost mezi jednotlivými vinutími navzájem, vinutími a uzemněnými částmi transformátoru, závity, vrstvami a cívkami každého vinutí.

Jednotlivé úrovně izolace a zkušební napětí se volí podle způsobu využívání transformátoru.

Jednotlivá zkušební napětí platící pro transformátor s plnou izolací vinutí ve spojení do trojúhelníka a spojení do hvězdy s izolovaným nulovým bodem jsou uvedeny v tab. 2.2.

Tab. 2.2 zkušební napětí vinutí transformátoru s plnou izolací [1].

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

V tab. 2.3 uvádí zkušební napětí pro vinutí s redukovanou izolací. Platí pro transformátory s vinutím spojeným do hvězdy s uzemněným nulovým bodem.

Tab. 2.3 zkušební napětí vinutí transformátoru s redukovanou izolací [1].

Jmenovité napětí [kV]	Nejvyšší dovolené pracovní napětí [kV]	Indukované zkušební napětí proti zemi a mezi svorkami [kV]	Rázové zkušební napětí [kV]
110	123	194	450
220	245	395	900
400	420	630	1425

U transformátorů, které mají účinnou ochranu proti přepětí nebo jsou zapojeny tam, kde se přepětí nevyskytují, lze použít zkušební napětí se sníženou hladinou.

2.12 ZKOUŠKA ELEKTRICKÉ PEVNOSTI VNITŘNÍ IZOLACE SPÍNACÍMI IMPULZY

Zkouška se zaměřuje na kontrolu kvality vnitřní izolace. Měření provádíme indukci zkušebního napětí na zkoušeném vinutí přiložením spínacího impulsu k vinutí nižšího nebo vyššího napětí. Spínací impuls musí mít dobu do vrcholu T_p alespoň 20 μ s, dobu trvání impulsu T_2 , pokles napětí na nulu, 500 μ s. Dobu T_{90} po kterou spínací impuls překračuje 90% vrcholové hodnoty minimálně 200 μ s. Poměr vrcholové hodnoty druhé a první púlperody nesmí přesáhnout 0,85 a polarita zkušebního náboje musí být záporná.

Závady izolace se zjistí rozбором oscilogramů testovacího napětí a proudu v nulovém bodě sejmutých při 50%, 75% a 100% testovacího napětí. Uvažujeme i změny způsobené nasycením magnetického obvodu. Potvrdit kladný výsledek zkoušky můžeme nepřítomností ostrých skoků na oscilogramech. Za účelem zjištění dalších závad můžeme také sledovat proud do země z vinutí přímo i nepřímo zkoušeného impulzem, příkladně napětí u vinutí nižšího napětí, napětí na nezkoušených fázích ověřovaného vinutí.

2.13 MĚŘENÍ HLADIN ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ VÝKONOVÝCH PŘI STŘÍDAVÉM NAPĚTÍ

Částečné výboje vnikají v transformátorech převážně na defektních místech. Původ defektů je důsledkem nedokonalé výroby nebo postupného opotřebení transformátoru. Měření přispívá k odhalení a prevenci poruchy a předcházení havarijním stavům.

K měření výbojové činnosti musí být transformátor připraven stejně jako k napěťovým zkouškám izolace. Vnější povrch průchodek musí být suchý a čistý a průchodky musí být opatřeny stíněním k odstranění korony [1].

K měření částečných výbojů využíváme galvanickou a akustickou metodu. Často se také doporučuje kombinace více slučitelných metod pro přesnější výsledky.

2.13.1 Galvanická metoda měření částečných výbojů

Metoda spočívá ve sledování přímých impulzů částečných výbojů, které se oddělí od napájecího napětí, na jehož hodnotu se superponují měřicí impedancí. Měření se provádí měřičem výbojové činnosti a měřicí impedancí, která je navržena tak, aby propustila proud tekoucí nulovým bodem při plném zkušebním napětí.

Měříme při odpojeném primárním vedení transformátoru. Připojení realizujeme obvykle pomocí impedance připojené k měřicím vývodům průchodek.

Před samotným měřením provádíme kalibraci měřicího obvodu zdrojem kalibračních impulzů, které postupně přivedeme na všechny vývody transformátoru a změříme velikost útlumu impulzu. Pomocí naměřených hodnot vytvoříme kalibrační matici. Tato matice slouží k odhadu místa vzniku částečných výbojů, pokud jsou potvrzeny. Kalibrací získáme převodní součinitel K_{qi} ze vztahu [1]:

$$K_{qi} = \frac{q_0}{A} [-] \quad (2.20)$$

kde: q_0 [F] je náboj při kalibraci,
 A [F] je údaj měřicího přístroje.

Výsledkem vyplývajícím z měření částečných výbojů je nejvyšší hodnota součinu údaje měřicího přístroje a převodového součinitele. Výsledky jsou často ovlivněny rušením, proto musíme posoudit jeho vliv. Za vyhovující se považuje rušení nepřesahující 50% užitečného signálu. Pro účinné potlačení rušení lze využít napájecí filtr nebo úzkopásmový detektor. Často se také vyskytuje rušení od napájecích zdrojů, které může velmi ovlivnit výsledky měření.

Samotné měření realizujeme na minimálně třech hladinách a to jedné pod jmenovitým napětím, dále při jmenovitém napětí a při 110% jmenovitého napětí. Na každé hladině přivádíme napětí alespoň pod dobu 5 minut a sledujeme výbojovou činnost.

Pokud je výskyt částečných výbojů jen v jedné lokalitě, její odhalení může být vyhodnocením výsledků velmi přesné. Je-li více lokalit vyhodnocení, bývá jejich odhalení velmi obtížné nebo nemožné.

2.13.2 Akustická metoda měření částečných výbojů

Metoda využívá mikrofonů a akustických snímačů, které snímají tlakové vlny. Vlny vznikají transformací elektromagnetické energie částečného výboje v mechanickou energii tlakové vlny. Vlny, které se šíří v oleji a odrážejí se od stěn, můžeme rozdělit na přímé a podélné vlnění s rychlostmi šíření uvedenými v tab. 2. 4.

Pomocí naměřených hodnot a rychlostí šíření můžeme vypočítat pravděpodobné místo vzniku částečných výbojů.

Tab. 2.4 rychlosti šíření tlakových vln

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

2.14 DETEKCE PORUCH VINUTÍ

Pro předpověď poruch vinutí se nejčastěji používá sledování stavu izolace, a to například pomocí ztrátového činitele, kapacity nebo měřením částečných výbojů. Některé poruchy nejdou tímto způsobem detekovat (poruchy blízké zkratu, mezizávitové zkraty atd.) a mohou také vést k poškození transformátoru. V tomto případě nahrazujeme vinutí uspořádáním pasivních prvků (kapacit, indukčností a odporů) s rozprostřenými parametry [1]. Toto zapojení nám zcela charakterizuje měřený transformátor a veškeré budoucí změny parametrů se projeví na změně aplikovaného impulsu. Vyhodnocení změn se provádí v časové nebo frekvenční oblasti. V dnešní době se více upřednostňuje frekvenční oblast (nezávislost přenosové funkce na tvaru vstupního impulsu).

Metody vycházejí z přenosové funkce získané před změnou vinutí a porovnávají odchylky vůči nově naměřeným hodnotám. Nejvýhodnější metodou z hlediska použití je metoda frekvenčních charakteristik a metoda nízkonapěťových impulsů.

Podle způsobu vyhodnocování dělíme detekční metody následovně:

2.14.1 Metoda frekvenčního impulsu

Tato metoda využívá porovnání odezev zkušebního napěťového impulsu a referenčního impulsu, s poloviční amplitudou, vyslaného do vinutí zkoušeného transformátoru před vlastní zkouškou. Rozdíly ve tvaru průběhu odezev napovídají o průrazech izolace. Tato metoda je i přes využití digitálních osciloskopů značně nepřesná.

2.14.2 Metoda přenosové funkce

Naměřené průběhy napěťového impulsu a proudové odezvy pomocí Fourierovy transformace převedeme do frekvenční oblasti a vyvodíme frekvenční závislost admitance vinutí. Tímto získáme přenosovou funkci nezávislou na tvaru napěťového impulsu. Rozdíly v průběhu odezev napovídají o průrazech izolace nebo částečných výbojích.

2.14.3 Metoda nízkonapěťových impulsů

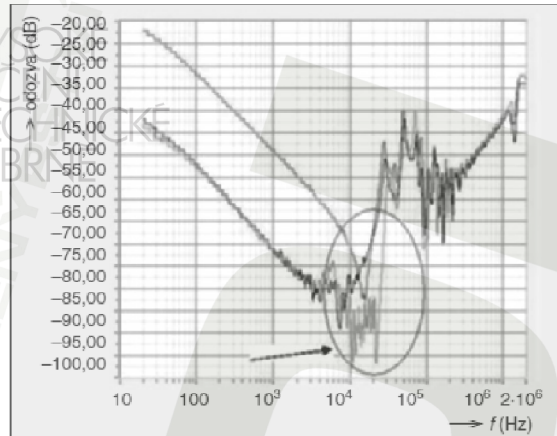
Touto metodou, kterou využívá při zkratových zkouškách, sledujeme odolnost transformátorů na dynamické účinky zkratových proudů. Postupujeme obdobně jako u předchozích metod. Na rozdíl od předchozích, ale používáme impuls s amplitudou maximálně několik stovek voltů. Transformátor vystavujeme postupně několika zkratům s různou amplitudou a různou dobou trvání. Zaznamenané průběhy upravíme pomocí filtrů a Fourierovy transformace a vyvodíme, zda transformátor vyhovuje či nikoliv.

2.14.4 Metoda vycházející z měření reaktance vinutí

Metoda měřící reaktance vinutí transformátoru při jediné frekvenci. Měří se pouze v jediném bodě přenosové funkce vinutí. Výhodou je jednoduchost, nenáročnost na připojení a rychlost měření. Ovšem mnohé poruchy vinutí se na požité frekvenci nemusí projevit.

2.14.5 Metoda frekvenčních charakteristik

(SFRA – Sweep Frequency Response Analysis) pomocí této metody obr. 2.7 [6] je možné nejlépe zjistit obraz o účincích zkratových proudů na vinutí transformátoru po dobu testovacího stavu.



Obr. 2.7 Zjištění mezizávitového zkratu na primárním vinutí transformátoru

SFRA řadíme mezi bezdemontážní metody diagnostiky transformátorů. Je prováděna na odpojeném stroji. Získáváme odezvy transformátorů v časové nebo frekvenční oblasti. Měření odezvy v časové oblasti znamená zjištění časového průběhu odezvy na určitý impulz napětí přivedeného na vstup vinutí. Měření odezvy ve frekvenční oblasti spočívá ve zjištění amplitudy odezvy na harmonické napětí základní frekvence přivedené na vstup vinutí. Zatímco odezva zjištěná v časové oblasti je záznamem časového průběhu napětí, odezva získaná ve frekvenční oblasti je závislost amplitudy odezvy na frekvenci.

Metoda se používá při měření transformátorů ihned po výrobě, slouží tedy na měření referenčních hodnot, dle kterých se dále porovnávají další měření po haváriích, odstávkách a revizích. Tyto měření se doporučuje opakovat za stejných podmínek na stejném přístroji pomocí obdobného rozložení kabelů.

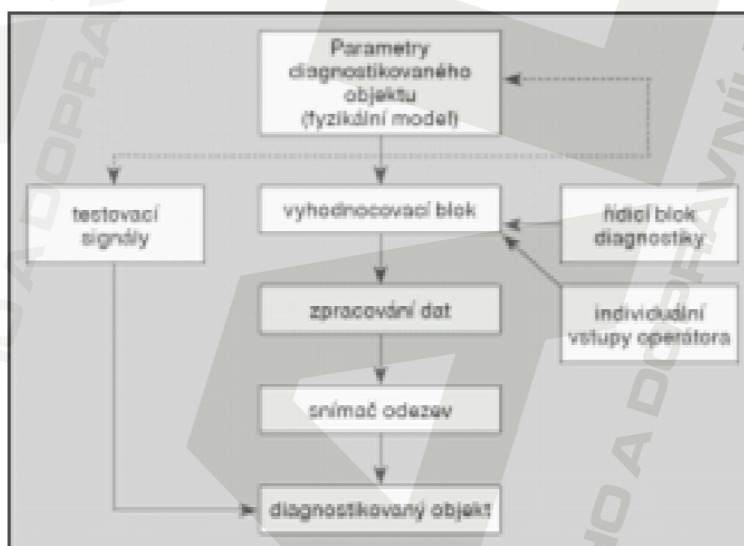
3 ON-LINE DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ

V poslední době velmi žádaný způsob diagnostiky je on-line diagnostika. Nalézá uplatnění u vybraných důležitých transformátorů, u kterých havárie nebo dlouhodobá odstávka byly ekonomicky nepřijatelné.

Sledování on-line vyžaduje vyhledávání a aplikaci zvláštních metod, které musí vyhovět požadavku využití při nepřerušovaném provozu transformátoru, při dobré sledovatelnosti a použitelnosti jejich výstupů.

3.1 SYSTÉM MONITOROVÁNÍ

Při návrhu diagnostického systému je také nutné věnovat pozornost probíhajícímu toku informací *obr. 3.1* [7]. Jeho základem je vyhodnocovací blok zpracovávající informace diagnostického systému. Je řízen řídicím blokem nebo prostřednictvím vstupů operátora řídicího celý diagnostický proces. Kromě dat odezev diagnostikovaného objektu vstupují do hodnotícího bloku i informace o parametrech objektu, včetně jejich tolerancí dodávaných jeho fyzikálním modelem. Řídicí blok také ovládá generátor testovacích signálů vysílaných do diagnostikovaného transformátoru.



Obr. 3.1 Informační toky v diagnostickém systému

Realizace cesty signálu se do vzdáleného místa provádí pomocí některého přenosového prostředí například optického kabelu, bezdrátového signálu apod. Při přenosu signálu působí různé rušivé vlivy a je nutno počítat i se zkreslením samotné přenosové soustavy.

Koncepce diagnostického systému se volí podle druhu sledovaného objektu, dle požadavku počtu a míst sledovaných veličin a dle polohy sledovaného zařízení. Nedílnou součástí výběru koncepce a počtu sledovaných prvků je také finanční náročnost.

Celý monitorovací systém slouží k preventivnímu a nepřerušovanému sběru dat a jejich vyhodnocení a jeho cílem je optimalizace možností údržby a předcházení havarijním stavům.

3.2 JEDNOTLIVÉ PARAMETRY PRO SLEDOVÁNÍ

Pro provozní diagnostiku on-line transformátorů musíme použít ty metody, které vyhovují daným požadavkům. Pro předcházení největšího procenta závad se upřednostňují metody sledování aktivní části a izolačního systému vinutí.

3.2.1 Měření a sledování provozních veličin

Zde můžeme provádět:

a) napětí, proudy, atmosférická i provozní přepětí

Měření provozních napětí a proudů umožňuje získat informace pro sledování okamžité úrovně zatížení transformátoru a z toho vyplývající informace o dlouhodobém stavu zatěžování.

Měření se provádí pomocí měřících transformátorů umístěvaných na kondenzátorových průchodkách. Měřící transformátory bývají často běžnými doplňky transformátorů, proto je možné zvážit právě jejich využití.

b) Tepelné namáhání

Tato poměrně rozsáhlá skupina měření se zabývá sledováním rozložení teplot a hledání nejteplejšího místa transformátoru. Do těchto měření můžeme zahrnout:

1. kontrolu teploty v horní části transformátoru a teplotu okolí

Měření probíhá obdobně, jako je popsáno v kap. 2.8.

2. teplotu vinutí

Přímé zjišťování teploty vinutí nelze běžnými metodami v režimu on-line provozovat. Proto se využívá sledování teploty za pomoci optovláknových čidel. Tato čidla nejčastěji pracují na principu změny absorpčního spektra polovodiče GaAs v závislosti na teplotě nebo úbytku fluorescence teplotně citlivého fosforu.

Uplatňováno je také měření nepřímé měřením teploty oleje spolu se zatěžovacím proudem transformátoru.

3. Hot-Spot teplota

Hledání a sledování nejteplejšího místa transformátoru za účelem předcházení degradace izolačního systému

4. Sledování intenzity chlazení

Regulací se snažíme udržet ideální pracovní teplotu, k tomu využíváme sledování teplotního spádu a měření cirkulace oleje.

c) Měření výšky hladiny v dilatační nádobě

Hladinu oleje můžeme sledovat za použití dotekových stavoznaků nebo KRS-převodníku.

d) Snímání výbojové činnosti

Nejčastěji se využívají akustické sondy, elektrické metody blíže popsané v kap. 2.13.

3.2.2 Sledování vývoje vzniku plynů při provozu

Pro určování plynů rozpuštěných v izolační tekutině se využívají. Těchto analyzátorů existuje celá řada, nejčastěji se využívají na principu elektrochemickém a galvanometrickém.

3.2.3 Sledování přítomnosti vlhkosti v kapalném médiu speciálními senzory.

Voda v transformátorovém oleji je poměrně snadno měřitelná, ale vzhledem k dlouhým časovým konstantám přesunu vlhkost mezi papírem a olejem a vysoké koncentraci vody v papírové izolaci, je její výskyt obtížně interpretovatelný. Proto se při on-line monitorování využívá jejich porovnávání s provozními hodnotami.

Analyzátoři vlhkosti pracují na principu tenkého filmu a kapacitního senzoru. Dielektrické vlastnosti polymerního filmu závisí na množství vody v něm obsaženém. Elektrické zařízení měří kapacitu senzoru a převádí ji zpět na hodnotu vlhkosti. Sledovanou veličinou je tedy změna kapacity kondenzátoru, v němž je dielektrikem polymer [1].

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

4 DIAGNOSTIKA KAPALNÝCH IZOLANTŮ

Nejvýznamnější skupinou transformátorů jsou transformátory s izolačním systémem olej-papír, proto jsou primární izolační kapaliny u transformátorů izolační oleje.

U olejů se bere v úvahu jejich viskozita, dobrá oxidační stabilita, teplotní stálost a elektrická pevnost.

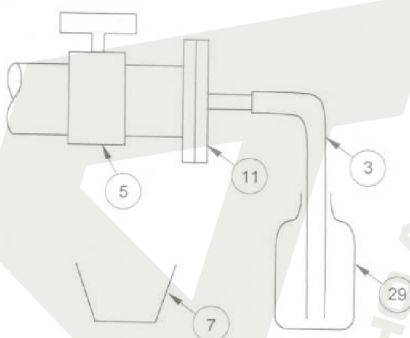
4.1 METODIKA ODBĚRU VZORKŮ

Před diagnostikou oleje vždy musíme odebrat vzorek a následně jej přepravit do místa diagnostikování. Je důležité, že získání kvalitního a reprezentativního vzorku je rozhodující pro správnost diagnózy zařízení. Pokud je vzorek nesprávně odebrán, může i přes správné provedení zkoušek dojít ke zkreslení výsledků a z toho vyplývajícím chybným závěrům.

Vzorky plynů a olejů musí být řádně označeny a dopraveny k analýze co nejdříve, aby byly minimalizovány ztráty vodíku. Je-li ve vzorku přítomen kyslík, může s vytaženým olejem reagovat. Reakce zpomalíme zamezením přístupu světla ke vzorku.

Nejčastěji se odběr vzorků olejů provádí třemi různými způsoby.

Prvním způsobem je odběr vzorku do láhve. Vzorek se odebírá do skleněné nebo plastové láhve o objemu 0,5 až 2,5 l. Vhodné láhve mají závitové plastové uzávěrky s konickým polyuretanovým těsněním. Odběr vzorků do lahví je poměrně jednoduchý. Pomocí olejivzdorné hadice připojené k zařízení se nechá odtéct jeden až dva litry oleje, konec hadice se vloží na dno vzorkovací láhve a ta se pomalu naplní. Láhev se uzavře po naplnění a přetečení určitého množství oleje.

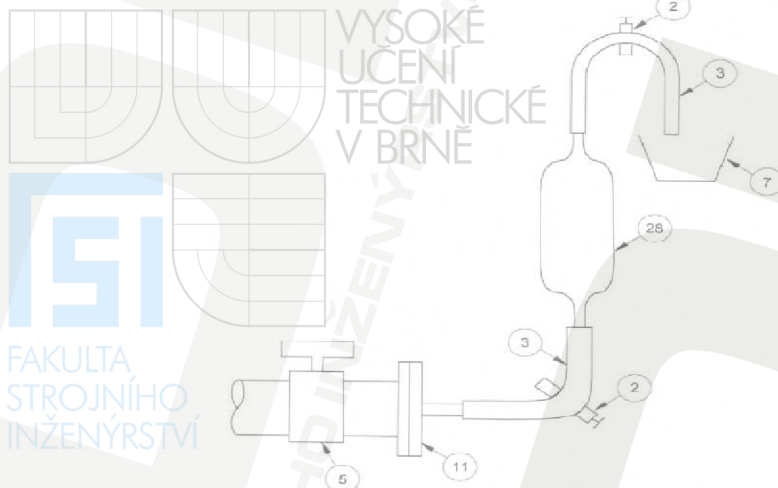


Obr 4.1 Příklad vzorkování do láhve [8]

Legenda: 3 – Pryžová spojovací hadice, 5 – Vzorkovací ventil zařízení, 7 – Odpadní nádoba, 11 – Slepá příruba, 29 - Láhev

Druhým způsobem je odběr vzorku pomocí vzorkovací trubice. Vzorkovnice o objemu 250ml je ze skla nebo kovu. Vzorkovnice je připojena k odběrovému ventilu olejivzdornými hadicemi a k uzavírání opatřena šroubovými tlačkami.

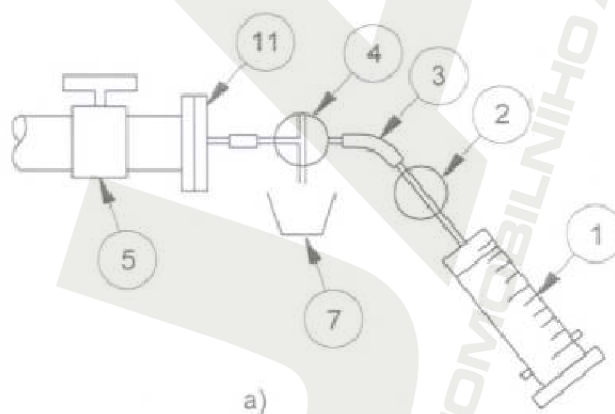
Samotný odběr se provádí tak, že se volný konec spojovací trubice namontuje na odběrový ventil. Odběrový ventil a přívodní tlačka vzorkovnice se otevřou. Pak pootevřeme i druhou tlačku, olej se nechá vytékat do odpadu, jakmile se vzorkovací trubice zcela naplní olejem, necháme odtéct 1 až 2l do odpadu a pak výtok oleje uzavřeme nejprve vnější a pak vnitřní tlačkou a nakonec vzorkovacím ventilem.



Obr 4.2 Odběr vzorku vzorkovací trubicí [8]

Legenda: 2 – Uzavírací ventil, 3 – Pryžová spojovací hadice, 5 – Vzorkovací ventil zařízení, 7 – Odpadní nádoba, 11 – Slepá příruba, 28 – Vzorkovací trubice

Třetím a nejčastěji využívaným způsobem je odběr vzoru pomocí injekční stříkačky. Využívají se plynotěsné injekční stříkačky vhodného objemu (20 až 250 ml). Vhodné jsou skleněné stříkačky se zabroušeným pístem nebo pístem s teflonovým těsněním. Stříkačka má být vybavena kohoutem umožňujícím její hermetické uzavření. Dopravní nádoby musí být konstruovány tak, aby stříkačka spolehlivě držela na místě, ale píst se mohl volně pohybovat. Aparatura je zapojena podle obrázku obr 4.3. Spojení mají být co nejkratší. Odběrový ventil je otevřen. Trojcestný kohout se nastaví a olej ze spojovací hadice se nechá vytékat do odpadu. Pak se trojcestný kohout otočí, čímž připojí injekční stříkačku. Uzavírací kohout se pak otevře a injekční stříkačka se plní. Když je odebrán dostatečný vzorek, uzavírací kohout a odběrový ventil se uzavřou a aparatura se odpojí. Je vhodné použít injekční stříkačku co největší, aby těsnící plocha pístu byla co nejdelší.



Obr 4.3 Odběr vzorku injekční stříkačkou [8]

Legenda: 1 – Injekční stříkačka 2 – Uzavírací kohout, 3 – Pryžová spojovací hadice, 4 – trojcestný uzavírací kohout, 5 – Vzorkovací ventil zařízení, 7 – Odpadní nádoba, 11 – Slepá příruba,

Obdobně jako u výše zmíněných způsobů se postupuje i u odběru plynu transformátoru skrze plynové relé. Využívá se odběr vzorku plynů injekční stříkačkou, odběr vzorku plynů vytěsňováním olejem a odběr vzorku plynu pomocí vakua.

Pokud chceme vzorek oleje obsahující plyny zkoumat pomocí plynové chromatografie, musíme z něj plyny extrahovat. K tomu lze využít několika metod.

1. Metoda vícenásobné vakuové extrakce (Toeplerova vývěva)

Pomocí této metody se dosahuje vysokého stupně extrakce dokonce přes 97%. Používaná aparatura pro tuto metodu není normalizována, proto se může mírně lišit. Vývěva v extrakční baňce odsává plyny z oleje a kumuluje je v oddělené byretě, u níž se po ukončení vícenásobné extrakce stanoví celkový objem plynů za normálních podmínek. Největší nevýhoda této metody je, že pro extrakci plynů využívá rtuť, které může negativně ovlivňovat životní prostředí, proto se od ní upouští a jako nejlépe nahrazující metody se využívá metody head-space.

2. Metoda jednorázové vakuové extrakce (částečné odplynění)

U této metody je extrakce plynu realizována jediným působením vakua, proto je množství extrahovaného plynu silně závislé na jeho rozpustnosti v oleji. Využívá Toeplerovy vývěvy, proto je postup extrakce obdobný jako u předchozí metody, jen s nižší účinností.

3. Metoda stripping

Extrakce plynu se provádí pomocí nosného plynu probíhajícího malým množstvím oleje (0,25 až 5ml) vstříknutým do stripéru. Využívá se několika konstrukcí stripérů, a to například z borosilikátového skla nebo nerezové oceli.

4. Metoda head-space

Olej vpravíme do skleněné vivály, která je v kontaktu s plynou fází. Část plynů rozpuštěných v oleji přejde do prostoru s plynou fází (head-space), pokud jsou dodrženy podmínky rovnosti teploty tlaku a třepání. Pro stanovení koncentrací každého plynu v prostoru head-space jsou užívané kalibrační křivky [8]. Pro tuto metodu je velmi důležitá kalibrace, aby nedocházelo k chybám a výsledky byly reprodukovatelné.

4.2 PRŮRAZNÉ NAPĚTÍ

Elektrická pevnost patří mezi nejčastěji sledované parametry. Spotřeba vzorku na zkoušku 400 ml, přídavek na manipulace 100 ml [2]. Elektrická pevnost izolačního oleje ukazuje kromě jiného na obsah emulgované vody, přítomnost nečistot a obsah plynů. Tato zkušební metoda udává, zda izolační olej v definovaném uspořádání a době měření vyhoví předpisu pro daný transformátor. Ovlivnění elektrické pevnosti absorbovanou vodou je způsobeno tím, že částice vody, které mají podstatně větší permitivitu než izolační olej, jsou vtahovány do míst s maximální intenzitou elektrického pole, deformují se, protahují ve směru pole a vytvářejí řetězce, podél kterých probíhá průraz. Velký obsah plynů rozpuštěných v izolačním oleji také zmenšuje jeho elektrickou pevnost. Průrazný mechanismus je obdobný jako u emulgované vody. Dalším prvkem snižujícím elektrickou pevnost je přítomnost cizích částic, které se dostanou buď náhodně, nebo působením elektrického pole do prostoru mezi elektrodami. Z literatury a ze zkušeností plyne, že statisticky nejvýznamnější jsou částice o velikosti 5 až 15 μm . Elektrická pevnost se měří na kulových elektrodách vzdálených 2,5 mm a v jednom zkušebním vzorku se dělá šest průrazů za sebou v pětiminutových intervalech. Z měření počítáme střední hodnotu průrazného napětí U_p , směrodatnou odchylku s a variační koeficient v .

$$U_p = \frac{\sum_{j=1}^n U_{pj}}{n} \text{ [KV]} \quad (4.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (U_p - U_{pj})^2}{n-1}} \text{ [KV]} \quad (4.2)$$

$$v = \frac{s}{U_p} \cdot 100[\%] \quad (4.3)$$

kde: U_{pj} [kV] je hodnota průrazného napětí jednotlivých průrazů,
 n [-] je počet průrazů.

Pokud je i po ověření hodnota variačního koeficientu vyšší než 20% izolant nevyhověl.

4.3 INDEX LOMU

Absolutní hodnota indexu lomu n_D závisí na složení izolačních olejů a na druhu a množství znečišťujících příměsí. Při stárnutí izolačního oleje se index lomu totiž téměř nemění, a to se využívá pro výpočet ukazatele zestárnutí izolačního oleje především Wermanova čísla z_2 nebo rozdílu relativní permitivity a druhé mocniny indexu lomu. Index lomu lze definovat poměrem rychlosti světla ve vakuu (nebo ve vzduchu) k rychlosti světla ve studované látce.

U vlastního měření se vzorek izolačního oleje nanese na měřicí hranol refraktometru, udržovaný i s osvětlovacím hranolem na konstantní teplotě, při zaostření rozhraní světla a stínu v zorném poli dalekohledu komparátorem, posunutí rozhraní přesně na průsečík nitkového kříže a přečtení indexu lomu na stupnici.

Činitel zestárnutí je definován jako rozdíl relativní permitivity a druhé mocniny indexu lomu. Podmínkou reprodukovatelnosti výsledků je měření poměrné permitivity a indexu lomu při stejné teplotě a stanovení poměrné permitivity s velkou přesností. Střední stupeň stárnutí reprezentuje hodnota činitele kolem 0.040. Hodnota 0.070 už ukazuje na zestárlý olej, ale vyskytují se i hodnoty kolem 0.150. Rozsah měřených hodnot ukazuje na relativně velkou citlivost tohoto ukazatele.

4.4 ČÍSLO KYSELOSTI

Spotřeba vzorku na zkoušku 0.2 ml (coulometrická metoda) resp. cca 50 ml (titrační metoda), přídavek na manipulace 4 ml (100 ml) [2]. U nových izolačních olejů podává číslo kyselosti informace o přítomnosti organických kyselin zbylých z rafinace. Při nedokonalé rafinaci zbývají v oleji naftenové kyseliny, kyselina sírová, siřičitá popř. i další. U starších olejů, u kterých v první fázi jejich oxidačního stárnutí vzrůstá jejich kyselost, aniž se vylučují kaly, slouží velikost čísla kyselosti k posouzení stupně zestárnutí izolačních olejů. Z definice plyne, že číslo kyselosti udává množství KOH [mg], které je třeba v nevodném (alkoholovém) prostředí k neutralizaci kyselých reagujících složek v 1 g izolačního oleje [2].

Oxidačním stárnutím izolačních olejů se obsah složek reagujících kyselých zvyšuje. Kyseliny, kromě korozivních účinků, zmenšují mechanickou pevnost celulózo-izolačních izolantů. Nevýhodou čísla kyselosti je, že indikuje až látky vyššího oxidačního stupně při oxidaci uhlovodíků, a proto nezachycuje počátek stárnutí olejů. Pro oleje, které vytváří kaly již z meziproduktů oxidace uhlovodíků neodhalitelných spotřebou KOH, není číslo kyselosti spolehlivým ukazatelem pro sledování počátku provozního stárnutí.

Číslo kyselosti je možné stanovit ruční titrací do okamžiku změny zabarvení roztoku z modré do červené. Pro tuto zkoušku postačuje běžné laboratorní vybavení. U tmavších olejů je však určení přechodu obtížné a je silně ovlivněno lidským faktorem. Proto je vhodnější použití automatických přístrojů nejlépe na bázi coulometrické metody.

4.5 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ

Na zkoušku je třeba přibližně 120 ml oleje [2]. Metoda měření relativního povrchového napětí na rozhraní voda-olej se užívá k indikaci organických látek s polárními skupinami v izolačních olejích. Citlivost metody využívá toho, že již malé množství organických kyselin výrazně zmenší velikost povrchového napětí. Na rozhraní voda-olej dochází k soustředění a orientaci polárních molekul tak, že obě fáze mají co nejpodobnější soudržnost mezi molekulami, zatímco uhlovodíkový zbytek přispívající k soudržnosti jenom

disperzními silami, se orientuje do prostředí čistého oleje s menší soudržností molekul. Po překročení určité kritické hodnoty, která odpovídá přibližně vytvoření molekulové vrstvy na rozhraní fází, se dále růst koncentrace polárních molekul neprojevuje. Metoda povrchového napětí je tedy vhodná pro stanovení malé koncentrace nečistot. Při povrchovém napětí menším než 25 mN/m je nutné počítat se vznikáním kalů v transformátoru.

Samotné měření povrchového napětí je možné realizovat dvěma způsoby:

- a) Zjišťováním síly potřebné k vytržení platinového prstence nebo tenké skleněné destičky z oleje. Je možné měřit na hranici fází: vzduch - olej nebo voda - olej.
- b) Měřením povrchového napětí pomocí kapkové metody. Mezipovrchové napětí se stanovuje na základě změření hmotnosti a tím i vytlačeného objemu vody ze stejné kapiláry do vzduchu a do měřeného oleje. Se zvětšující se hmotností kapky vody v izolačním oleji z kapiláry roste velikost povrchového napětí.

4.6 USAZENINY A ROZPUSTNÉ KALY

Usazeniny jsou všechny v oleji nerozpustné částice, které lze zachytávat filtrací nebo odstředěním. Usazeniny organického původu svědčí o značném stupni provozního zestárnutí. Další mechanické nečistoty mají původ hlavně v cizím znečištění. Usazeniny se v provozu strojů plněných izolačním olejem projevují velmi nepříznivými účinky. Sedimentují na částech strojů, především na vodorovných plochách, ztěžují přestup tepla, znečišťují olejová potrubí a brzdí cirkulaci oleje. Části pokryté usazeninami se více ohřívají a tím dochází k dalším polymeračním reakcím.

Rozpustné kaly jsou hlavně zplodiny oxidačního stárnutí izolačního oleje, vznikají vlivem pokračující polymerace a polykondenzace nebo jako nečistoty. Ke zjištění rozpustných kalů, slouží zředění n-heptanem za předepsaných podmínek. Přítomnost kalů v izolačním oleji signalizuje nebezpečí tvorby usazenin. Rozpustné kaly zvětšují schopnost izolačního oleje pohlcovat vodu a působí katalyticky na chemické reakce, jejichž působením izolační olej urychleně stárne.

4.7 ZTRÁTOVÝ ČINITEL

Měření je možné pouze u transformátorů, u kterých je možný odběr izolačního oleje. Spotřeba vzorku na zkoušku 40 ml (z tohoto množství se současně měří tg δ , relativní permitivita a měrný odpor) [2]. Ztrátový činitel tg δ zahrnuje ztráty dielektrické, které se mění v teplo úměrně s příkonem. Při ohřívání dielektrika se rezistivita snižuje, tím pádem roste vodivost a zvýší se procházející proud, což vede k ohřátí izolace. S růstem teploty dochází k urychlení stárnutí izolace.

Dielektrické ztráty zestárlých izolačních olejů obsahujících nečistoty jsou udány fázorovým součtem vodivostních a polarizačních ztrát. Ztrátový činitel pak závisí na teplotě a frekvenci. Velikost dielektrických ztrát ovlivňuje voda rozpuštěná a emulgovaná.

Praktické měření ztrátového činitele je založeno na můstkové metodě. Vzorek oleje se umístí do Sheringova můstku a vyváží se tak, aby v diagonále můstku protékal proud.

Relativní permitivita se sama pro hodnocení téměř nepoužívá, její změny jsou totiž malé a tím pádem je zapotřebí využívat velmi speciální měřicí techniku. Ve spojení s měřením indexu lomu je prakticky využitelná. Relativní permitivita se získává jako produkt při měření ztrátového činitele klasickými můstky, který musí být stanoven s vysokou přesností.

Permitivita prostředí určuje polarizaci dielektrik, míru vzájemného posunutí elektrických nábojů vázaných navzájem v atomech, molekulách a iontech a na rozhraní nehomogenních izolantů. Permitivitu můžeme vyjádřit poměrem kapacit vzdušného měrného kondenzátoru a totožného kondenzátoru s měřeným dielektrikem. U olejů s vysokým stupněm zestárnutí roste i poměrná permitivita, naopak klesá se zvyšující se teplotou.

4.8 MĚRNÝ ODPOR

Rezistivita je přímo úměrná izolačnímu odporu a izolační odpor je nepřímo úměrný vodivosti izolantu. Měření rezistivity se využívá k orientačnímu zjištění, jestli jsou v izolačním oleji obsaženy cizí složky. Elektrická vodivost závisí na vlhkosti, obsahu nečistot, na teplotě a velikosti měřícího napětí.

Měření při teplotě okolí a při teplotě 90 °C má specifickou informační hodnotu. Pokud je výsledek při teplotě 90 °C uspokojivý a při teplotě okolí je tomu naopak, svědčí to o přítomnosti vody nebo cizích příměsí srážejících se za studena. Pokud jsou výsledky neuspokojivé v obou případech, svědčí to o vyšším stupni zestárnutí nebo znečištění izolačního oleje.

Při vlastním měření nesmí intenzita pole přesáhnout 250 kV^m⁻¹ také se musí kontrolovat, aby nedošlo ke zkreslení výsledků vlivem neustáleného nabíjecího proudu. Měřený údaj se proto odečítá 1 minutu po připojení měřícího napětí a spočítá se hodnota vnitřní rezistivity ρ_v [Ωm] dle vztahu:

$$\rho_v = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot C_0 \cdot R_V [\Omega m] \quad (4.4)$$

kde: C_0 [F] je střední teplota vinutí,
 R_V [Ω] je změřená hodnota vnitřního odporu,
 ε_0 [F.m⁻¹] je permitivita vakua.

4.9 OBSAH VODY V OLEJI

Voda především v emulgované podobě výrazně zhoršuje vlastnosti izolačního oleje a to především jeho elektrickou pevnost. Z vody v oleji lze při vhodně zvoleném způsobu odběru vzorku orientačně posoudit i navlhnutí izolace. V potaz je ovšem nutno brát, že pevná izolace dokáže pojmout několiknásobně více vody než izolační olej.

Vodu v izolačním oleji můžeme nalézt v několika formách a to jako vodu rozpuštěnou, vodu emulgovanou a vodu volnou. V provozu dochází vlivem kolísání teplot k neustálému prostupu vody mezi pevnou a kapalnou částí dielektrika.

Rozpuštěná voda se dostává do izolačního oleje vlivem jeho schopností absorpce vody. Tato voda představuje značné riziko. Její maximální množství v oleji není stálé, závisí na druhu izolačního oleje, na teplotě a stupni zestárnutí.

Emulgovaná voda tvoří směs mikroskopických kapek. Může s izolačním olejem vytvořit hydrofilní nebo hydrofobní emulze. Hydrofilní emulze vznikají kvůli látkám rozpouštějícím ve vodě a nikoli v oleji. Hydrofobní emulze se vytváří, když jsou cizí složky rozpustné v oleji a nikoliv ve vodě. Oba druhy emulze jsou stálé s obtížným způsobem odstranění.

Volná voda, vyskytující se povětšinou na dně stroje, neovlivňuje přímo dielektrické vlastnosti izolačního oleje. Přítomnost této vody je však také nežádoucí, jelikož vlivem teploty a kvality izolačního oleje může její určité množství přecházet do oleje v podobě vody rozpuštěné nebo emulgované. Tato voda je vázána mezimolekulárními silami.

Pro měření obsahu vody existuje množství metod, pro účely diagnostiky je nejhodnější metoda K. Fischera a její modifikace. Metoda je založena na redukci jódu oxidem siřičitým za přítomnosti vody v prostředí methanolu a pyridinu. Indikace se provádí elektrometrickou nebo coulometrickou metodou.

4.10 BARVA KAPALNÝCH IZOLANTŮ

Barva izolačního oleje je prvním měřítkem, kterým lze orientačně posoudit stav kapalného izolantu. Stanovuje se porovnáním vzorku s barevnými měrkami a výsledek je udáván číslem nebo kombinací písmene a čísla.

Stárnutím v provozu izolanty tmavnou, proto u izolantu, kde byla známa výchozí barva, lze přibližně sledovat průběh stárnutí.

Barva izolantu se může stanovit pomocí subjektivního nebo objektivního způsobu. Subjektivní způsob se zakládá na porovnávání kapalného vzorku izolantu o stejných tloušťkách vzorku s barevnými etalony při denním nepřímém světle. Objektivním způsobem rozumíme využití měřicího přístroje, kde se porovnává v kolorimetru absorpce světla vzorku stanovené tloušťky s absorpcí světla rozpouštědla za pomoci barevného filtru. K měření se může použít Lovibondův tintometr, kolorimetr Union či Dubiscův kolorimetr.

4.11 VISKOZITA

Měření viskozity u izolačních olejů je velmi důležité pro stanovení správné chladicí funkce oleje v transformátoru.

Dynamická viskozita η [Pa.s] vyjadřuje v soustavě SI sílu v newtonech, která je zapotřebí, aby se vrstva o ploše 1 m² posunula oproti stejné vrstvičce ve vzdálenosti 1 m o 1 m ve vodorovné rovině [9].

$$\eta = v \cdot \rho \cdot 10^3 [\text{N.s.m}^{-1}] \quad (4.5)$$

kde: ρ [g.cm⁻³] je hustota kapaliny při teplotě určení viskozity
 v [m².s⁻¹] kinematická viskozita.

Ke stanovení dynamické viskozity využíváme viskozimetry. Nejpoužívanější jsou kapilární, Stokesův a rotační viskozimetr.

Kinematická viskozita v [m².s⁻¹] se určí ze součinu změřené doby průtoku a konstanty použitého viskozimetru (nejčastěji Ubbel-Ohdeho). Za konstantu se dosazuje hodnota vyznačená na viskozimetru výrobcem. Pro kapaliny neprůzračné, například oleje provozně opotřebené, se používají U-viskozimetry s obráceným tokem, protože při použití klasického viskozimetru dochází při průtoku oleje k takovému zneprůhlednění kapiláry, že není možné přesné měření uskutečnit, neboť meniskus kapaliny není viditelný [9].

$$v = K \cdot t [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.6)$$

kde: K [-] je konstanta viskozimetru,
 t [s] je střední hodnota udávající dobu průtoku viskozimetrem.

4.12 BOD VZPLANUTÍ A TUHNUTÍ

Bod vzplanutí a hoření se určuje především kvůli bezpečnosti. Pro zjištění bodu vzplanutí se využívá Pensky – Mortensův přístroj. Určuje se teplota, při níž se po přiložení rozžhaveného tělíška nebo plamínku, vznítí na krátký okamžik olejové plyny a páry u hladiny oleje ve zkušebním kelímku. Vzplanutí se projevuje malou explozí a zábleskem, pokud k němu dojde, odečítáme teplotu a stanovujeme bod vzplanutí.

Bod tuhnutí je důležitý, protože při nízkých teplotách se mění viskozita a ubývá kalné fáze vylučováním a růstu krystalů v oleji. Což může způsobit havárie transformátorů. Bod tuhnutí se stanovuje pomocí ochlazování vzorku ve skleněné zkumavce s plochým dnem, která je přímo ponořena do chladicí lázně (suchý led). Tato lázeň musí mít během měření teplotu o 5 °C až 6 °C nižší, než je teplota izolanta oleje. Před očekávaným bodem tuhnutí se po každém ochlazení vzorku o 2 °C vyjme zkumavka s olejem z lázně a nakloní se do vodorovné polohy. Toto vyjmutí nesmí být delší než 5 sekund. Teplota, při které se ve zkumavce nakloněné do vodorovné polohy hladina ztuhlého vzorku nepohne po dobu 5 sekund, zaznamenejme jako bod tuhnutí

4.13 HUSTOTA A MIKROSKOPICKÉ STANOVENÍ POČTU A VELIKOSTI NEČISTOT

Hustota u izolačních olejů je méně významné kritérium využívající se spíše k rozřídění jednotlivých produktů. Stanoví se nejčastěji za pomoci hustoměrů.

Při měření velikosti a počtu částic a nečistot obsažených v oleji se využívá mikroskopu nebo automatických čítačů částic. Stanovuje se počet částic na membránových filtrech s velikostí póru 0,8 až 5 μm . Pro zjištění počtu a velikosti částic se jako měřítko používá mřížka o velikosti 3,1 X 3,1 mm. Stanovuje se počet částic na 100 cm^3 kapalného izolantu [1].

Automatické čítače částic stanovují počty částic a nečistot a v daném objemu v závislosti na velikosti v mikrometrech.

4.14 OXIDAČNÍ STABILITA, OBSAH INHIBITORU A PLYNOVÁNÍ OLEJE

Oxidační stabilitu kapalných izolantů zkoumáme pro napodobení jejich provozního cyklu. Využíváme jí také pro porovnání oxidační stálosti různých olejů a možnosti jejich mísitelnosti.

Při zkoušce se uměle vytváří urychlené stárnutí zvýšením hlavních zátěžových činitelů. Jedná se o zvýšenou teplotu, přítomnost kyslíku vzduchu a dalších prvků. Výsledky se hodnotí na základě stupně stability jednotlivých sledovaných parametrů (tg δ , číslo kyselosti, barva izolantu, aj.)

Tato zkouška má jen orientační hodnotu, jelikož nikdy nelze plně zrychleně nasimulovat reálnou dobu života izolačních olejů v provozu.

Pro zpomalení procesu stárnutí a zvýšení oxidační stability se do izolačních olejů přidávají oxidační inhibitor. Dnes se nejčastěji používá 2,6-di-tercbutyl-p-ksesol nebo 2,6-di-tercbutyl-p-fenol, tedy inhibitory fenolického a aminového typu.

Ke stanovení obsahu inhibitoru se používají metody infračervené spektroskopie, chromatografie či kolorimetrie.

Plynování vyjadřuje míru podílu absorpce a vývoje vodíku v oleji při elektrickém namáhání za předepsaných podmínek. Tato analýza plynování je nepřímou spojena s požadavky na oxidační stabilitu, jelikož poskytuje informace o očekávaném chování oleje za provozu. Při výrově izolačního oleje se hledá optimum mezi kvalitou pohlcování plynu a elektroizolačními vlastnostmi. Měření se provádí ve zkušební nádobě s elektrodami, která je spojená s byretou, kde se shromažďuje vzniklý plyn, který není absorbován olejem [1].

4.15 CHROMATOGRAFICKÉ METODY

Chromatografie je separační metoda, při které se využívá opakované ustanovení rovnováhy mezi dvěma nemísitelnými fázemi. Jedna fáze je přitom pohyblivá (plyn nebo kapalina) a nazývá se mobilní. Druhá je vždy nepohyblivá (tuhá nebo kapalina) a označuje se jako stacionární.

Chromatografických technik existuje velké množství a jejich popis by byl nad rámec této kapitoly, proto zde bude uvedeno jen stručné rozdělení a budou vyzdvihnuty nejdůležitější metody používající se u diagnostiky olejů.

Významné dělení z hlediska diagnostiky olejů je dělení podle skupenství mobilní fáze:

- Plynová chromatografie GC (Gas Chromatography)
- Kapalinová chromatografie LC (Liquid Chromatography)

Další dělení je uvedeno v tab. 4.1

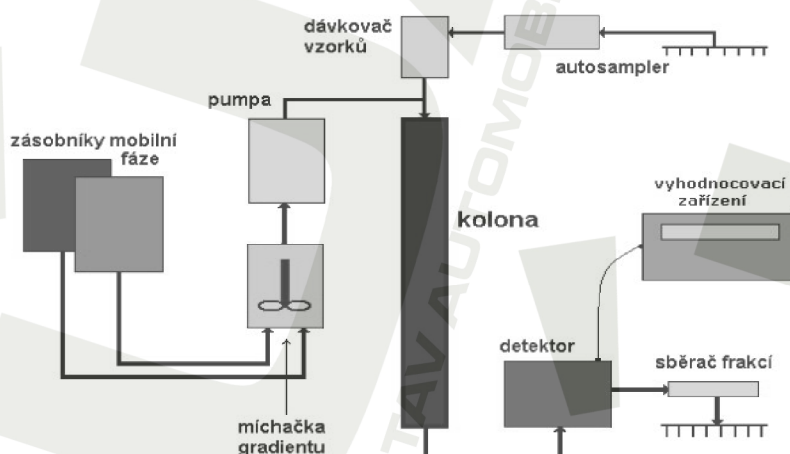
Tab. 4.1 Obecné rozdělení chromatografických metod podle typu [1].

Mobilní fáze	Stacionární fáze	Separáčn ^í mechanismus	Metoda	Zkratka
Plyn	Pevná fáze	Adsorpce	Plynová adsorpční chromatografie	GSC
	Kapalná fáze	Rozdělování	Plynová rozdělovací chromatografie	GLC
	Mikroporézní fáze	Dělení dle velikosti molekul	Plynová chromatografie na molekulových sítích	GSC
Kapalina	Pevná fáze	Adsorpce	Kapalinová adsorpční chromatografie	LSC
	Kapalná fáze	Rozdělování	Kapalinová rozdělovací chromatografie	LLC
	Iontoměnič	Iontová výměna	Iontová výměnná chromatografie (iontová chromatografie)	IEC
	Mikroporézní fáze	Dělení dle velikosti molekul	Gelová permeační chromatografie	GPC
	Strukturně selektivní fáze	Specifická interakce	Afinitní chromatografie	AC

4.15.1 Kapalinová chromatografie

U kapalinových sloupcových chromatografií dělicí médium umísťujeme ve skleněných nebo kovových trubicích, tedy chromatografických kolonách. Přes horní konec kolony vstříkujeme vzorek a eluční činidlo. Můžeme také přidávat promývací roztok. Pokud eluční roztok protéká jen za pomoci gravitace, hovoříme nízkotlaké kolonové chromatografii. Jestliže roztoky nutíme protékat kolonou díky zvýšenému tlaku použitím pump, mluvíme o vysokotlaké chromatografii. Můžeme užít daleko jemnější materiál stacionární fáze, tím pádem se kolony stávají pro dělení podstatně účinnější.

Kapalinová plošná chromatografie využívá stacionární fázi v podobě volné vrstvičky. Užívá se práškový materiál na inertní podložce u tenkovrstvých chromatografií nebo chromatografický papír u papírové chromatografie. Tenkovrstvou chromatografii používáme pro orientační analýzy vzorků nebo pro preparaci frakcí před další analytickou. U analytického použití je vrstvička stacionární fáze tenká, obvykle méně než 1 mm, ovšem pro preparace však musí být vrstva podstatně silnější, dokonce do 1 cm, aby obsáhla větší množství vzorku. Papírová chromatografie byla kdysi velmi rozšířená, dnes se však s ní v praxi už nesetkáváme.



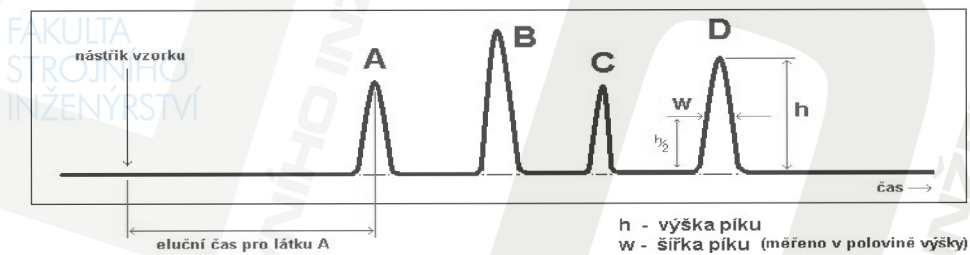
Obr. 4.4 Schéma zařízení pro kolonovou kapalinovou chromatografii [10].

4.15.2 Plynová chromatografie

Jako nejvýznamnější používaná chromatografická metoda u izolačních olejů je i s příkladem jejího využití v praxi rozvedena v kap. 5

4.15.3 Chromatogram a jeho popis

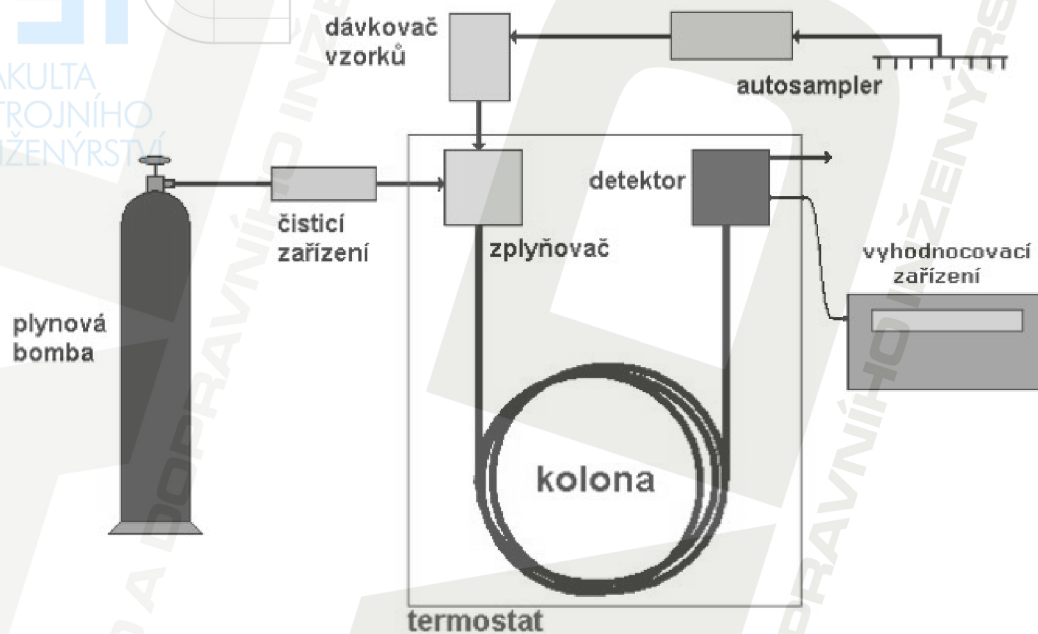
Eluční čas látky je charakteristikou kvality, kvantita je úměrná ploše příslušného píku, která se vypočítá jako součin výšky a šířky píku. Pokud jsou píky velmi úzké, můžeme místo plochy použít jen výšku píku, ovšem je nutná kalibrace.



Obr. 4.5 chromatogram GC nebo LC [10].

5 PRAKTICKÁ UKÁZKA VYUŽITÍ METODY PLYNOVÉ CHROMATOGRAFIE

Pro plynovou chromatografii využívám jako mobilní fázi plyn, který je inertní jak ke vzorku, tak ke stacionární fázi. Chromatografická kolona tvořena kratší nebo delší trubicí způsobuje retenci jednotlivých složek vzorku a tím pádem rozdílnou eluci. Vzorek může být analyzován na základě adsorpce (GSC) nebo rozpouštění (GLC).



Obr. 5.1 Schéma zařízení pro plynovou chromatografii [10]

Spotřeba vzorku na zkoušku je 100ml nebo 1 ml izolačního oleje. Přídavek na zálohování vzorku 100 ml nebo 2 ml. Různé objemy vzorku jsou důsledkem použité metody odplynění. Metodu chromatografického rozboru plynů rozpuštěných v izolačním oleji lze jako jedinou diagnostickou metodu použít k zjištění tepelného stárnutí izolačního oleje nebo soustavy olej - papír. Na základě kvantitativního a kvalitativního rozboru rozkladových plynů lze posoudit stupeň tepelného zestárnutí, ale i zjistit teplotní pochody (přehřátí, předvýboje, elektrický oblouk) a rovněž lze indikovat i elektrické děje (částečné výboje atd.). Metoda je vhodná pro provozní sledování transformátorů dále také pro zjišťování konstrukčních nebo technologických vad u nových transformátorů. Jedná se o metodu nejspolehlivěji indikující nepříznivé provozní stavy. Plynová chromatografie může také odhalit falešné příznaky závady, nejčastěji se jedná o možné vniknutí vzdušných plynů do nádoby stroje a jeho zbytečné odstavení.

5.1 VÝVOJ PLYNŮ V TRANSFORMÁTORU

Kromě kyslíku, dusíku a oxidu uhličitého ze vzduchu se mohou v izolačním oleji rozpouštět i plyny vznikající rozkladem izolační soustavy následkem přirozeného stárnutí nebo poruchovými ději. Závady tepelné a elektrické podstaty způsobují štěpení uhlovodíkových řetězců, tyto pochody jsou charakteristické složením a množstvím rozkladových plynů, které závisí na typu poruchy. Plynné složky uvolňované pro charakteristické složky plynné směsi pro různý stupeň namáhání jsou v tab.5.1.

Tab.5.1 Vývoj jednotlivých plynů z hlediska stavů transformátoru.

Výkonný oblouk		Předvýboje jiskry		Energeticky chudé výboje		Částečné výboje	
Olej	Olej-papír	Olej	Olej-papír	Olej	Olej-papír	Olej	Olej-papír
C ₂ H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₄	H ₂	H ₂
H ₂	H ₂	H ₂	H ₂	H ₂	H ₂	(CH ₄)	(CH ₄)
CH ₄	CH ₄	CH ₄	CH ₄	CH ₄	CH ₄	CO ₂	CO ₂
		C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂		
		C ₃ H ₈	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈	C ₃ H ₈		
		C ₂ H ₄	CH ₄	CO	CO		
		CO ₂	C ₃ H ₆	CO ₂	CO ₂		

Podle množství plynu a na základě poměrů jednotlivých složek rozpuštěných v izolačním oleji, nebo přítomných v plynné fázi v plynovém relé, je možné usuzovat na typ závady. Při vzniku slabých, tepelně nevýrazných částečných výbojů, pokud teplota v místě dosahuje 80 °C až 120 °C, vyskytuje se v plynných reakčních produktech jen vodík, který vzniká hlavně jako produkt štěpení aromatických uhlovodíků. Při teplotě 120 °C až 200 °C vzniká kromě vodíku metan a etylén. Okolo lokálních teplot 200 °C až 500 °C, v etšinou způsobené silnými výboji, se směs obohacuje o vyšší uhlovodíky s jednoduchou a dvojnou vazbou. Při teplotách přes 500 °C je již tvoří jiskry nebo oblouk a v plynných produktech se vytváří množství uhlovodíků. Kromě dříve uvedených přibývá ještě acetylén nebo vyšší uhlovodíky s trojnou vazbou, dále uhlovodíky s dvěma a více dvojnými vazbami také diolefiny i polyolefiny. Při výkonnějším oblouku nebo jiskře je směs bohatší na vodík a nenasycené uhlovodíky. Pokud teplota překročí hranici 1000 °C, rozpadají se všechny víceatomové uhlovodíky a v reakční směsi je přítomen jen vodík, metan, acetylén, případně elementární uhlík.

Vytvořený plyn se rozpouští v izolačním oleji v množství závislém na druhu plynu, chemickém složení oleje, jakosti oleje, jeho viskozitě a na tlaku a teplotě. Vzhledem k takovýmto skutečnostem je obtížné stanovit pro jednotlivé plyny mezní hodnoty, nad kterými lze považovat transformátory za poruchové. Při hodnocení je proto třeba sledovat předchozí časový vývoj naměřených hodnot daného transformátoru. Limitní koncentrace plynů je pak možné stanovit až po provedení většího počtu zkoušek a po získání zkušeností s daným typem transformátoru.

5.2 ZMĚŘENÉ DIAGNOSTICKÉ VELIČINY

Se souhlasem společnosti EGÚ Brno a.s byla převzata data viz Příloha 1. z měření vysokonapětového transformátoru typu T402 viz příloha 2. Data byla získána za pomoci metody plynové chromatografie (rozebrána výše). Třicet pět měřených vzorků bylo získáno v období od 21.10.1991 do 19.10.2009. V tomto období bylo na transformátoru provedeno v letech 1992 a 2002 odplynění, na to musí být při vyhodnocování brán zřetel.

5.3 METODA SLEDOVÁNÍ POMĚROVÝCH KRITÉRIÍ PRO POSOUZENÍ STAVU TRANSFORMÁTORU

Jako primární metodu pro sledování vývoje transformátoru se dle normy ČSN IEC 60 599 využívá metody sledování poměrových kritérií. Empiricky bylo totiž zjištěno, že tvorba rozkladových plynů je pro většinu závad v určitém specifickém poměru. Hlavní výhodou použití poměru dvou veličin, je schopnost přesněji určit druh závady, v rozdělení do tří skupin tedy tepelné, elektrické a kombinované závady. Také přispívá přenositelnosti informací o závadách mezi laboratořemi. Protože jsou však v konstrukcích transformátorů rozdíly, jednotlivá odborná diagnostická pracoviště hodnoty upřesňují podle svých podmínek. Dále mohou ověřovat i jiná kritéria.

Hlavní nevýhoda poměrových kritérií se projevuje při posuzování minimální koncentraci plynů nebo jejich absenci. Z definice je zřejmé, že stejný poměr mohou vytvořit

dvě malá ale i velká čísla. Proto se stanovují minimální koncentrace plynů, pro které je ještě vhodné poměry stanovovat, aby nedocházelo k zavádějícím závěrům. Dalším omezením je i pro poměr, ve kterém nebyla zjištěna složka nacházející se ve jmenovateli zlomku, tedy dělení nulou.

U námi sledovaného transformátoru T 402 je patrný vývoj plynů, který dosahuje nebo překračuje horní hranice typických ročních přírůstků plynů (uvedeny v tab. 5.2). Abychom splnili podmínky pro sledování kritérií, započneme získané hodnoty transformátoru porovnávat až po posledním odplynění, tedy od 15.4.2003.

tab. 5.2 Typické hodnoty přírůstků plynu transformátorů v [ppm] [11]

	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
Výroba	5100–1300	540–900	60– 50	40–110	50–90	60–280	3–50
Přenos	5300–1200	400–850	75– 50	35–50	50–70	110–250	80–270

Hlavní sledová kritéria jsou tvořena poměry:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad \frac{CH_4}{H_2} \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

Z těchto poměrů je pak odvozeno šest specifikujících kritérií tab. 5.3

Tab. 5.3 DGA interpretace hodnot [12]

Třída	Charakteristická chyba	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
PD	Dílčí výboje	NS ¹⁾	< 0,1	< 0,2
D1	Výboje nízké energie	> 1	0,1 - 0,5	> 1
D2	Výboje vysoké energie	0,6 – 2,5	0,1 – 1	>2
T1	Teplotní defekt, t < 300 °C	NS ¹⁾	> 1	< 1
T2	Teplotní defekt, 300 °C < t < 700 °C	< 0,1	> 1	1 - 4
T3	Teplotní defekt, t > 700°C	< 0,2 ²⁾	> 1	> 4

¹⁾ nesignifikantní
²⁾ Zvyšující se hodnota může znamenat hot-spot teplotu přesahující 1000°C

Interpretace nejsou v normě uvedeny striktně, ale doplňuje je řada upřesňujících poznámek nebo tolerančních pásem.

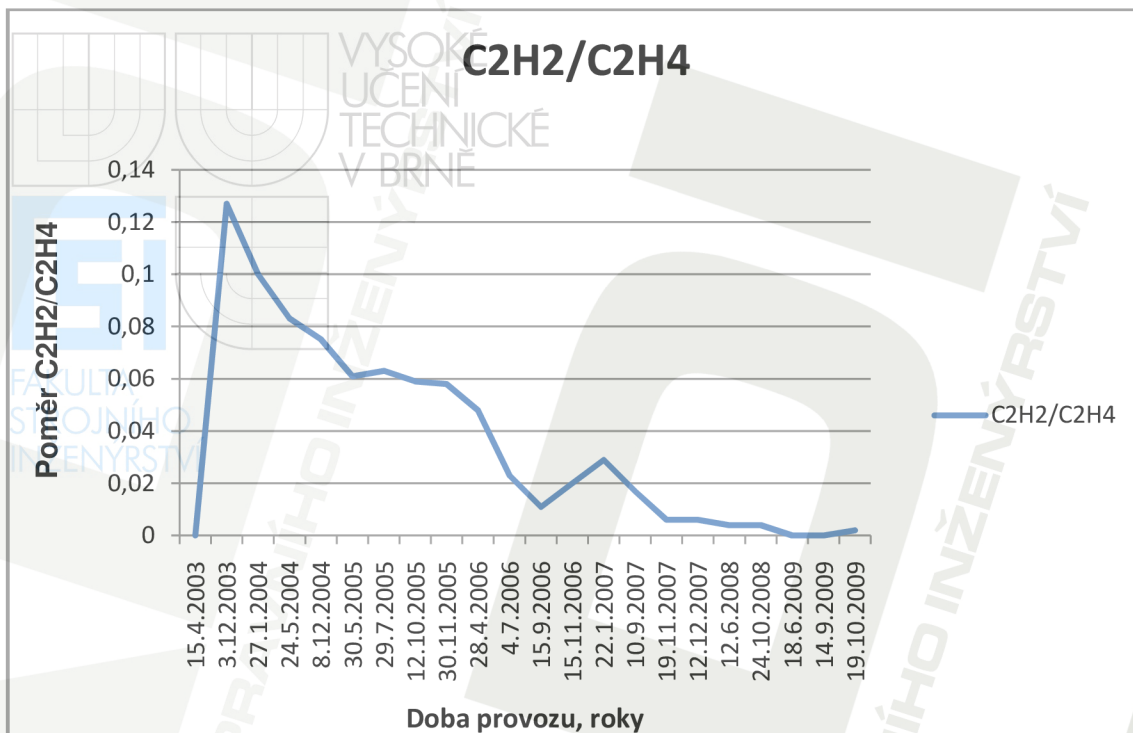
Zjednodušené, ale důležité hodnocení je také možné ze dvou poměrů. Pro částečné výboje (třída PD) dostačuje poměr $CH_4 / H_2 < 0,2$, pro elektrické výboje (třída D) stačí poměr $C_2H_2 / C_2H_4 > 0,2$, který pro hodnotu < 0,2 naopak indikuje tepelnou závadu (třída T).

5.4 VÝPOČET POMĚRŮ TRANSFORMÁTORU T 402

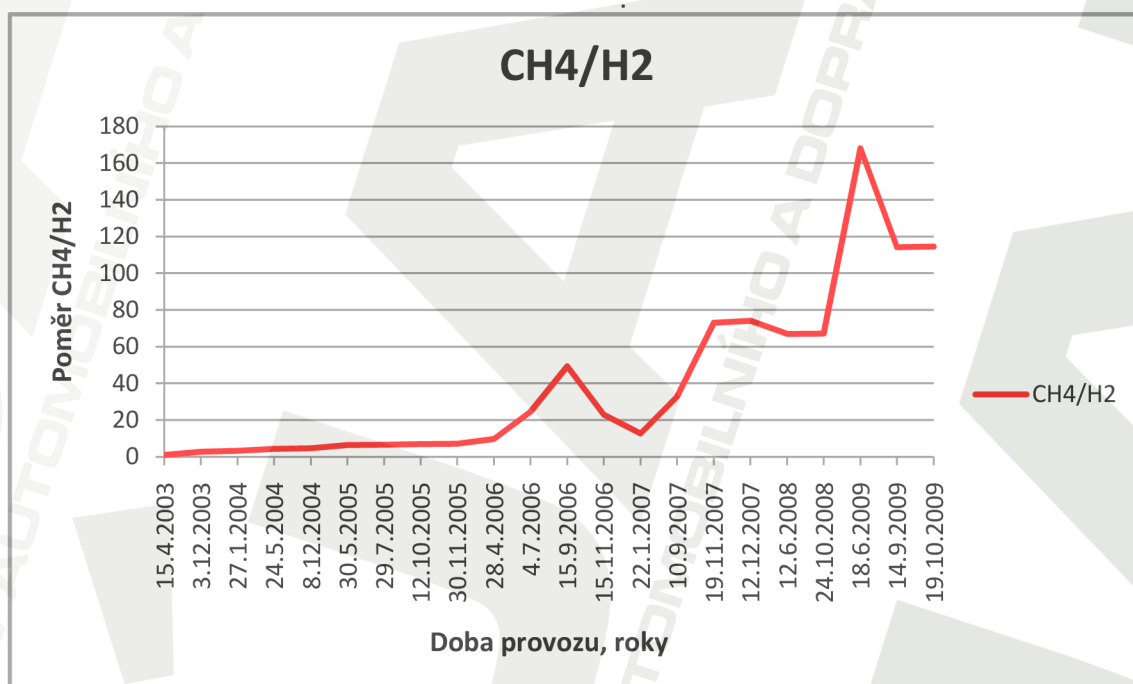
Podle výše uvedených kritérií byly vypočteny poměry uvedené v tab. 5.4 a z nich vytvořené grafy (graf 5.1, graf 5.2 a graf 5.3) závislosti vývoje jednotlivých poměrů na čase.

Tab. 5.4 Vypočítané poměry dle získaných hodnot

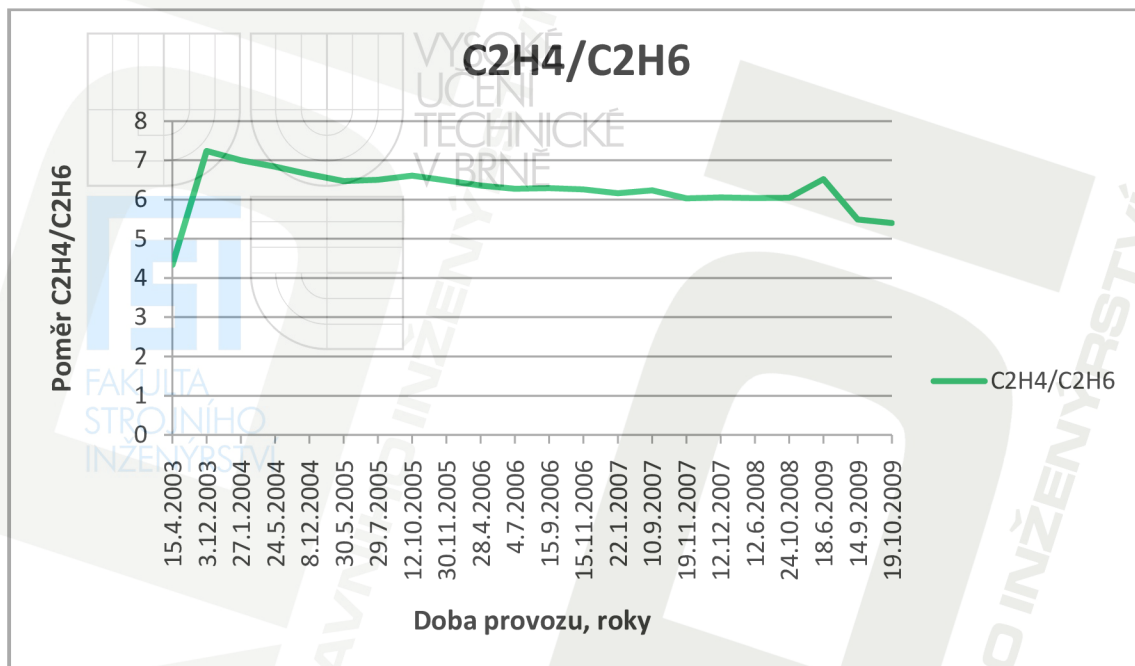
Datum Odběru	C2H2/C2H4	CH4/H2	C2H4/C2H6
15.4.2003	0	1,083	4,333
3.12.2003	0,127	2,828	7,240
27.1.2004	0,100	3,254	7,000
24.5.2004	0,083	4,239	6,841
8.12.2004	0,075	4,611	6,640
30.5.2005	0,061	6,470	6,470
29.7.2005	0,063	6,667	6,500
12.10.2005	0,059	7,025	6,612
30.11.2005	0,058	7,138	6,489
28.4.2006	0,048	9,677	6,354
4.7.2006	0,023	24,615	6,275
15.9.2006	0,011	49,385	6,294
15.11.2006	0,020	23,036	6,262
22.1.2007	0,029	12,686	6,162
10.9.2007	0,017	32,750	6,238
19.11.2007	0,006	73,000	6,028
12.12.2007	0,006	74,000	6,055
12.6.2008	0,004	67,000	6,036
24.10.2008	0,004	67,100	6,045
18.6.2009	0	168,000	6,524
14.9.2009	0	114,200	5,490
19.10.2009	0,002	114,600	5,406



Graf. 5.1 Závislost změny poměru C₂H₂/ C₂H₄ na čase



Graf. 5.2 Závislost změny poměru CH₄/ H₂ na čase



Graf. 5.3 Závislost změny poměru C_2H_4 / C_2H_6 na čase

5.5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Pro zhodnocení nejdříve využijeme hodnot získaných z posledního měření 19.10.2009, které mají pro jednotlivé poměry hodnotu C_2H_2 / C_2H_4 je 0,02, CH_4 / H_2 je 114,6 a C_2H_4 / C_2H_6 je 5,406.

Poměr C_2H_2 / C_2H_4 je tedy výrazně nižší než udávaná zlomová hodnota 0,2 (viz tab. 5.3) a přitom hodnoty poměrů CH_4 / H_2 a C_2H_4 / C_2H_6 přesahují limitní hodnoty uváděné normou ČSN 60 599 (tab. 5.3), což indikuje lokální Teplotní defekt T3, s teplotou vyšší než 700°C. Nízká hodnota poměru C_2H_2 / C_2H_4 přitom může naznačovat, že teplotní závada dlouhodobě nepřesahuje teplotu 1000 °C.

K posouzení dlouhodobého vývoje teplotního defektu využijeme graf 5.1, graf 5.2 a graf 5.3. Z časové závislosti poměrů v nich uvedených vyplývá, že objevený teplotní defekt má dlouhodobý relativně stabilní průběh.

Dle výsledných hodnot můžeme stav transformátoru T 402 považovat za kritický, ale vzhledem k jeho dlouhodobému vývoji za stabilní.

Vedle poměrových kritérií uvedených v normě ČSN 60599, kterých bylo využito pro vyhodnocení stavu transformátoru T 402, existuje ještě řada dalších metod, které používají buď obdobné poměry, nebo přiřazují ještě další. Mezi nejznámější patří kritéria Rogersova, Dörenburgova, sledování trendu, sledování koncentrací Kawamura a Labrelec. Objevují se také grafické vyjádření (Duvalův trojúhelník). Tato hodnocení neuvádím, jelikož jejich rozebrání a porovnání poskytnutých hodnot by bylo vysoce nad rámec této práce.

6 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá popisem a rozбором nedestruktivních diagnostických metod prováděných na transformátorech. Tyto metody přispívají k prevenci a včasnému odhalení poruch transformátorů. Primárním cílem bylo uvést základní rozdělení a popis hlavních diagnostických metod a jednotlivé směry vývoje pro sledování a předcházení transformátorových poruch. Mezi nejvíce využívané metody v praxi patří měření izolačního odporu, měření kapacity ztrátového činitele či chromatografické analýzy.

Z tohoto důvodu byla jako praktický příklad uvedena kontrola stavu transformátoru T 402 za pomoci plynové chromatografie. Na hodnoty chromatografického rozboru byla uplatněna analýza poměrovými kritérii a byl objeven teplotní defekt s teplotou nad 700 °C, díky němuž se transformátor pohybuje na pomezí kritického stavu.

Aplikace jednotlivých diagnostických metod může být poměrně finančně i časově náročná, proto je důležité zvažovat a vybírat nejvhodnější metody kontroly pro daný stroj, k čemuž se snaží celkovým přehledem diagnostických metod přispět i tato práce.

Vzhledem k omezenému rozsahu práce však nebylo možné popsat celou problematiku podrobněji a tím obsáhnout více konkrétních příkladů. I přesto lze doufat, že práce splnila vytyčený cíl a přehledně popsala danou problematiku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MENTLÍK, Václav aj. *Diagnostika elektrických zařízení. 1. vydání. Praha: BEN-technická literatura, 2008, 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.*
- [2] ELDIAG, s.r.o., *Přehled vybraných diagnostických metod izolačních systémů přístrojových transformátorů.* [online]. V Praze 5/1999. [cit. 31.3.2010]. Dostupné z: http://www.eldiag.cz/texty/diag_metody.html
- [3] Neumann, J. ELDIAG, s.r.o., *Izolační odpor a úseky izolačního systému.* [online]. V Praze 5/1999. [cit. 31.3.2010]. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/texty/odpor.html>
- [4] Hammer, M. *Elektrotechnika a elektronika přednášky.* 1. vydání, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2006, 134 s. ISBN 80-214-3334-5.
- [5] Hammer, M.; Kudláč, B.; Balabán, B. *Elektrotechnika – laboratorní cvičení pro bakalářské studium,* VUT v Brně, 1999.
- [6] Gutten, M.; Šimko, M.; Chupáč, M. *Přehled diagnostiky transformátorů v teréne vzhledom na analýzu ich vlhkosti a nadprúdov.* Elektro [online]. [cit. 31.4.2010]. Volume 6, 2009. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz>
- [7] Mentlík, V. *Aspekty a perspektivy diagnostiky elektrických silnoproudých zařízení.* Elektro [online]. [cit. 31.4.2010]. Volume 11, 2004. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz>
- [8] ČSN EN 60567 Olejem plněná elektrická zařízení, Odběr vzorků plynů a oleje pro analýze volných a rozpuštěných plynů, 2005
- [9] *Stanovení viskozity roztoků – teoretická část* [online], [cit. 31.4.2010]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_stanoveni_viskozity_roztoku/teorie.htm
- [10] *Chromatografické metody* [online], [cit. 10.5.2010]. Dostupné z: <http://www.lfhk.cuni.cz/chemie/dokumenty/Seminare/semin%C3%A1%C5%99%20Chromatografick%C3%A9%20metody.doc>
- [11] Neumann, J. ELDIAG, s.r.o., *DGA - Plynová chromatografie - příklad a možnosti hodnocení.* [online]. V Praze 4/2006. [cit. 15.5.2010]. Dostupné z: <http://www.rozvodna.cz/texty/dga.html>
- [12] ČSN EN 60599, Elektrická zařízení v provozu plněná izolačním olejem - Pokyn pro interpretaci výsledků analýz rozpuštěných a volných plynů. ÚNM Praha, 2000, 88 s.
- [13] Střední průmyslová škola elektrotechnická Havířov. *Úloha: Měření výkonu* [online], [cit. 15.5.2010]. Dostupné z: <http://elek.wz.cz>

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 - Tabulka měřených chromatografických hodnot transformátoru T 402 v průběhu let
Příloha 2 - Štítkové údaje transformátoru
Příloha 3 - Protokol o chromatografickém rozboru firmy EGÚ Brno, a.s.



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Příloha 1 - Tabulka měřených chromatografických hodnot transformátoru T 402 v průběhu let

Odběr datum	H2 ppm	CH4 ppm	C2H6 ppm	C2H4 ppm	C2H2 ppm	C3 ppm	CO ppm	CO2 ppm	O2 ppm	COP %
21.10.1991	13	2	1	1	1	3	108	216	2736	2,1
25.8.1992	10	4	1	1	1	2	133	398	8031	3,7
9.11.1992										0,2
9.6.1993										1,1
8.3.1994	6	4	1	1	0	1	121	724	1731	1,4
28.11.1994	6	7	2	1	0	2	210	1141	1703	1,8
11.9.1995	7	10	2	1	0	3	253	998	805	1,8
19.9.1996	8	15	3	1	0	3	371	1352	546	2,2
27.8.1997	13	16	4	1	0	4	333	1148	602	2,5
14.10.1998	6	18	4	1	0	4	261	1078	1838	3,0
13.10.1999	6	20	4	1	1	4	279	1150	1961	3,2
31.10.2000	7	22	4	1	1	4	305	1258	2145	3,5
16.10.2001	8	21	5	1	0	6	276	1658	1372	3,5
7.5.2002	9	36	8	1	0	7	406	2418	591	3,5
15.4.2003	12	14	3	13	0	6	152	1134	260	1,2
3.12.2003	64	112	25	181	23	69	311	1398	469	1,7
27.1.2004	71	154	33	231	23	89	319	1428	352	1,7
24.5.2004	71	203	44	301	25	120	319	1571	195	1,7
8.12.2004	72	219	50	332	25	139	320	1575	321	1,8
30.5.2005	66	292	66	427	26	185	255	1261	530	2,0
29.7.2005	78	355	80	520	33	220	300	1535	248	2,1
12.10.2005	80	376	85	562	33	238	319	2158	462	2,3
30.11.2005	80	383	88	571	33	246	319	2165	358	2,3
28.4.2006	65	422	99	629	30	273	301	2634	287	2,5
4.7.2006	26	458	102	640	15	283	340	2709	240	2,5
15.9.2006	13	461	102	642	7	284	341	2922	342	2,6
15.11.2006	28	462	103	645	13	285	342	2996	541	2,8
22.1.2007	51	455	105	647	19	298	348	3053	442	2,8
10.9.2007	20	455	105	655	11	309	357	3189	382	2,9
19.11.2007	9	461	109	657	4	294	327	3539	507	3,1
12.12.2007	9	467	110	666	4	298	331	3588	514	3,1
12.6.2008	10	468	111	670	3	299	332	3718	400	3,1
24.10.2008	10	468	111	671	3	300	435	3591	652	3,3
18.6.2009	4	438	103	672	0	280	461	3993	458	3,4
14.9.2009	5	421	104	571	0	297	459	3890	585	3,6
19.10.2009	5	428	106	573	1	299	475	4052	540	3,7

Příloha 2 Šítkové údaje transformátoru

ST 400

Pořadové číslo	51
Provozovatel	
Transformátor	T 402
Fáze	
Napěťový převod /kV/	400/121/10
Jmenovitý výkon /MVA/	250/250/100
Výrobce	
Typ	
Provedení	Třífázové
Ochrana oleje	Vak
Olejevá náplň	GK
Výrobní číslo	
Rok výroby	1989
Datum instalace	1.10.1991
Stav	Provoz
Datum odplynění	1.10.1992
	30.11.2002

Aktualizace: 21.12.2009
EGÚ Brno, a.s. Sekce 0500

Plynově chromatografický rozbor
(výkonový transformátor)

Lokalita:	
Označení transformátoru:	T 402
Fáze transformátoru:	
Napěťový převod /kV/:	400/121/10
Jmenovitý výkon /MVA/:	250/250/100
Ochrana oleje:	Vak
Výrobce transformátoru:	
Typ transformátoru:	
Výrobní číslo transformátoru:	
Rok výroby transformátoru:	1989
Datum instalace transformátoru:	1.10.1991
Datum posledního odplynění:	30.11.2002
Datum odměru vzorku:	19.10.2009
Čas odběru vzorku:	10:00
Místo odběru vzorku:	Nádoba
Teplota oleje v horní vrstvě /°C/:	47
Činný výkon/MW/:	95
Předchozí provozní stav:	Provoz
Datum měření v laboratoři:	20.10.2009
Tlak v laboratoři/hPA/:	987
Teplota v laboratoři /°C/:	19
Objem plynu (v byretě) /ml/:	1.77
Odběr vzorku oleje/ml/:	47,26
Další údaje (poznámka):	3 vzorkovnice
Měřicí postup:	IEC 567 (1992) EN 60567(1992)

Objemová koncentrace vázaných plynů při teplotě 20 °C a tlaku 113,25 hPA:

Plynná složka		Xi V/V	Ci V/V	ΣCi V/V	COP
		/ppm/	/ppm/	/ppm/	%
H2	Vodík	123	5	6477	3,7
CH4	Metan	11679	428		
C2H6	Etan	2886	106		
C2H4	Etylén (etén)	15642	573		
C2H2	Acetylén (etin)	14	1		
C3H8+C3H6	Propan a propylén (propen)	8166	299		
CO	Oxid uhelnatý	12975	475		
CO2	Oxid uhličitý	110700	4052		
O2	Kyslík	14759	540		
N2	dusík	236100	8643		

Vysvětlivky:

Xi – objemová koncentrace jednotlivých složek plynů v plynné směsi /ppm/

Ci – objemová koncentrace jednotlivých složek plynů v oleji /ppm/

ΣCi – součet objemových koncentrací měřených plynů v oleji /ppm/

COP – celkový obsah plynů v oleji /%/