Ročník 2008 electroscope Číslo IV

Diagnostika olejem plněných transformátorů

P. Prosr [1], M. Brandt [2]
[1] Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, Univerzitní 26, Plzeň
[2] Centrum výskumu mechatronických systémov Spoločné pracovisko EVPÚ a.s. Nová Dubnica a Elektrotechnickej fakulty ŽU v Žiline, Univerzitná 1, 010 26, , Žilina
E-mail : prosr@ket.zcu.cz, brandt@fel.uniza.sk

Anotace:
Transformátory, jako stroje netočivého charakteru, mají svoji životnost ovlivněnu převážně životností izolačního systému. Ten je podle povahy stroje tvořen mnoha různými materiály. Jedná se například o možnost využití dusíku nebo SF6 u suchých transformátorů, pryskyřici u transformátorů zalévaných nebo kombinaci oleje a papíru u velké skupiny transformátorů bez napěťového a výkonového omezení. Právě u těchto strojů, které se nejčastěji využívají pro transformaci elektrické energie z generátorů elektráren na velmi vysoké napětí pro rozvodné sítě, se vyplácí on-line sledovat vybrané parametry, na jejichž základě je možno kontrolovat stav stroje a předejít poruchám a nákladným opravám. Obsah příspěvku je zaměřen na popis prvních zkušeností s nově vyvíjeným monitorovacím systémem pro transformátory s izolačním systémem olej-papír.

ÚVOD

Transformátor je stroj pracující na principu elektromagnetické přeměny energie určité napěťové hladiny z primárního vinutí na rozdílnou hladinu ve vinutí sekundárním. Výhodou tohoto způsobu transformace elektrické energie je chybějící elektrické spojení primární a sekundární strany, spojení je zajištěno pouze elektromagneticky. Další nespornou výhodou použití transformátorů je možnost transformace energie bez použití pohybujících se (rotujících) částí, čímž je docílena vyšší efektivita přenosu, vyšší spolehlivost a zvláště nižší náklady na údržbu v porovnání se stroji točivými. [1]

TRANSFORMÁTOR S OHLEDEM NA MOŽNOST VÝSKYTU PORUCH

Transformátor jako celek je složen ze čtyř základních podsystémů. Jedná se o následující části, přičemž první dvě jsou souhrnně označovány jako aktivní část:
1. Cívky/vinutí - procházející proud primárním vinutím vytváří magnetický tok, který postupně vybudí magnetické pole.
2. *Magnetický obvod* - umožňuje přenos magnetického pole generovaného primárním vinutím do vinutí sekundárního.
3. Nádoba transformátoru - slouží jako mechanický obal, který má za hlavní úkol ochranu aktivní části a dále slouží jako nádoba pro transformátorový olej, který zajišťuje izolační a chladicí funkci.
4. Izolační systém – klíčový podsystém transformátoru. Protože je ve velké míře ovlivňován provozními a degradačními parametry, je považován za nejslabší článek. Skládá se z izolace vinutí, válců z transformátorové lepenky a oleje.

Pro podchycení největšího počtu závad je vhodné při diagnostice zaměřit pozornost na výše uvedené podsystémy a vybrat soubor takových metod, které by indikovaly změny v nich nastávající.
Z neelektrických parametrů jsou vhodnými parametry teplota a plyny rozpuštěné v oleji. Oba tito činitelé citlivě reagují na vznik případné poruchy, ať už se jedná o vznik usazenin a kalů, které zhoršují chlazení oleje, nebo o výboje a lokální přehřátí, způsobující kromě nárůstu tepelného zatížení jednotlivých komponentů transformátoru i vznik plynných produktů.
Podíváme-li se na možnosti on-line sledování elektrických veličin, pak je vhodné sledovat hlavně provozní parametry (napětí, proud apod.). Na základě vyhodnocení dat z průběžného monitorování je možno dále provádět analýzu elektrických vlastností vzorku oleje odebraného z transformátoru (tg δ, průrazné napětí, izolační odpor atd.). Porovnáním změn vlastností v průběhu doby provozu stroje pak můžeme detekovat zhoršení kvality oleje a zajistit tak včasné provedení preventivních údržbových prací.
S ohledem na data získaná průběžným monitorováním je dobré provádět další kontrolní měření, která by podávala přesnější informace o procesech probíhajících ve stroji jako celku. Jedná se hlavně o aplikaci plynové chromatografie, případně doplňkovou metodu infračervené spektroskopie vzorku v kapalné formě (FT-IR).

CHARAKTERISTIKA SLEDOVANÉHO STROJE

Transformátory je možno dělit podle mnoha různých aspektů. Protože implementace monitorovacího systému představuje pro provozovatele nemalé finanční náklady, bylo by v souvislosti s on-line diagnostikou vhodné zmínit spíše velké

transformátory bez napěťového a výkonového omezení s izolačním systémem olej-papír. Pořízení takovéhoto transformátoru pro účely tvorby, experimentálního nasazení a odladění on-line diagnostického systému je vzhledem k finančním nákladům obtížné, proto byla na Elektrotechnické fakultě ŽU v Žilině vytvořena speciální laboratoř, ve které je vyvíjený monitorovací systém namontován alespoň na distribuční transformátor s olejovou náplní a parametry BEZ kTO 253/22, čís. Bra 42931, r.v. 1958, 30 kVA, Yz1, 23100/22000/20900 V/ 400/230 V, u_k = 4,96 %, 0,787 A / 43,3 A, který je napájen pomocí transformátoru s parametry BEZ aT 0294/22, čís. 231279, r.v. 1983, 100 kVA, Yzn1, 22000±2*2,5% V / 400/230 V, u_k = 3,96 %, 2,62 A / 144,4 A.

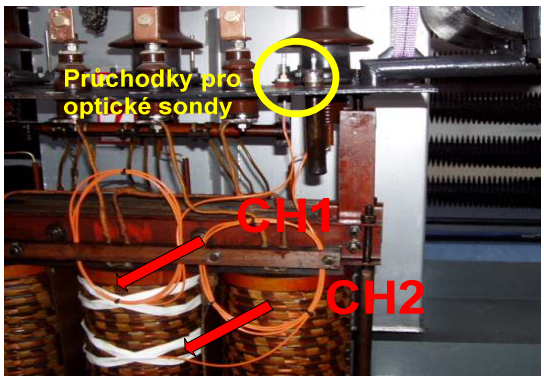
Obecně se distribuční transformátory používají na změnu elektrické energie vyššího napětí (obvykle 11- 22- 33 kV) na napětí nižší (230 nebo 400 V) o stejné frekvenci. Obvykle jsou posledním článkem řetězce zajišťujícího zásobování domácností a průmyslových podniků elektrickou energií.

VYBRANÉ PARAMETRY PRO SLEDOVÁNÍ TRANSFORMÁTORU

Z hlediska finančního zatížení provozovatele v důsledku aplikace monitorovacího systému je vhodné vytvořit systém s omezeným počtem sledovaných veličin. Pro splnění požadavků na vypovídací schopnost a cenovou dostupnost byly vybrány následující parametry.

Teplota oleje a vinutí

Nárůst teploty při běžném zatížení stroje citlivě reaguje na počátek poruchy [1], [2]. Proto je vhodné mezi sledované parametry zařadit měření teploty oleje v horní části transformátorové nádoby a teploty vinutí. Teplota oleje zatím v navrhovaném systému zahrnuta není, ale již nyní je sledována teplota vinutí v průběhu provozu sledovaného stroje. Za tímto účelem jsou ve vinutí instalovány dva optovláknové snímače (NEOPTIX T2), které jsou umístěny na primárním vinutí střední fáze (viz obr. 1).



Obr. 1: Umístění optických sond ve vinutí transformátoru

Signál je z nádoby vyveden pomocí průchodek do řídící jednotky (NEOPTIX T/Guard System), která zajišťuje zpracování, archivaci a zobrazování naměřených výsledků. Výstupem může být grafické znázornění aktuálních teplot, časová závislost vývoje teplot nebo datový soubor s naměřenými hodnotami. Příklad struktury souboru je uveden v následující tabulce 1.

Tab. 1: Struktura souboru s naměřenými hodnotami teplot

Neoptix, Inc.			
Instrument (serial):		1 (TGD186A)	1 (TGD186A)
Channel name:		1:	2:
Channel # :		1,00	2,00
dd/mm/yyyy	hh:mm:ss		
29.1.2008	11:42:48	40,30	39,50
29.1.2008	11:57:48	40,40	39,50
29.1.2008	12:12:48	40,40	39,50
29.1.2008	12:27:48	40,40	39,60
29.1.2008	12:42:48	40,40	39,60
29.1.2008	12:57:48	40,50	39,60

Komentář k naměřeným hodnotám teplot vinutí ve vybraném intervalu provozu stroje bude v souvislosti s obsahem vlhkosti v transformátoru zmíněn v následující části textu.

Plyny a vlhkost

Nezanedbatelný účinek na vlastnosti oleje mají plyny, které vznikají při rozkladu oleje a pevné izolace v důsledku elektrických a tepelných poruch.

Hlavním zdrojem plynů jsou parciální výboje, kde vodivý ionizovaný kanál dosahuje teplot až několika tisíc stupňů celsia. V oleji je sice rychle ochlazován, ale při tom dochází k uvolňování plynů. Jestliže dojde k elektrické či tepelné poruše, rozštěpí se některé z vazeb C-H a C-C. Výsledkem jsou nestabilní fragmenty, které vstupují do rozsáhlých reakcí a rekombinují v molekuly plynu (etylén, acetylén, etan, metan a jiné). Tyto plyny se poté rozpouštějí v oleji. [1], [3] a [4]

Plyny však nemusí být v oleji obsaženy jen díky procesům stárnutí nebo v důsledku poruch, nýbrž mohou pocházet i z reakcí při rezivění oceli, nenatřených povrchů nebo z ochranných nátěrů.

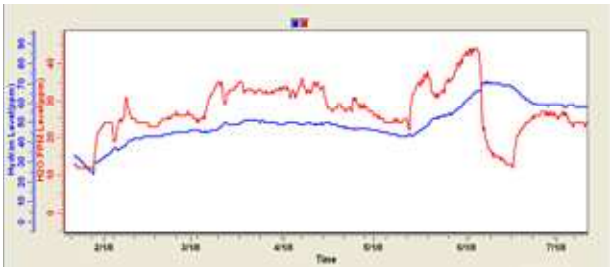
Vlhkost v transformátoru způsobuje zejména snížení povrchového odporu izolantu a zvýšení rizika vzniku průrazu. Kontakt oleje s vlhkostí je příznivý pro rozběh reakcí, které napadají pevnou izolaci za vzniku kyselin a vody. Tyto produkty mohou následně způsobit korozi vinutí, nádoby transformátoru a kovových konstrukčních částí, čímž se může snížit doba spolehlivého provozu celého stroje.

Vlhkost a obsah plynů rozpuštěných v oleji je na sledovaném transformátoru monitorován senzorem Hydran M2, který je umístěn na výpustném ventilu transformátorové nádoby. Hydran M2 je citlivý na nejčastěji se vyskytující plyny v oleji, kterými jsou vodík, oxid uhelnatý, etylén a acetylén. Nevýhodou je, že čidlo odečítá tzv. kompozitní hodnotu s různou citlivostí na jednotlivé detekované plyny (viz tab. 2).

Tab. 2: Citlivost senzoru Hydran M2 na jednotlivé plyny

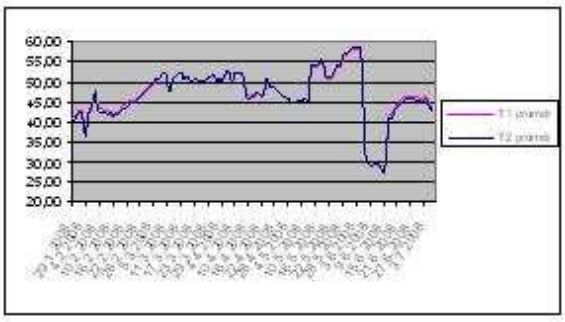
vodík H_2	100 %
oxid uhelnatý CO	18 %
acetylén C_2H_2	8 %
etylén C_2H_4	1,50 %

Grafická podoba výstupu může mít různou podobu, podle dostupnosti výpočtových modulů a volby zobrazovaných parametrů. Jako příklad je uvedeno zobrazení průběhu obsahu plynů (kompozitní hodnota v ppm) a vlhkosti (také v jednotkách ppm) ve sledovaném časovém intervalu od 1.1.2008 až do počátku července téhož roku.



Obr. 2: Vývoj obsahu plynů a vlhkosti v průběhu provozu monitorovacího systému

Jak je patrné z obrázku 2, dochází v průběhu provozu transformátoru k výkyvům jak v obsahu vlhkosti, tak i rozpuštěných plynů. Aktuální velikost těchto sledovaných veličin je závislá na mnoha faktorech, přičemž mezi nejvýznamnější patří teplota a provozní zatížení. Zajímavým poznatkem je, že křivka obsahu vlhkosti věrně kopíruje průběh teplot vinutí (porovnání obr. 2 a 3).



Obr. 3: Průběh teploty vinutí během provozu transformátoru
T1 – průměr denních hodnot sondy kanálu CH1
T2 – průměr denních hodnot sondy kanálu CH2

Tento fakt souvisí s teorií rozložení vlhkosti v transformátoru s ohledem na teplotní podmínky stroje. [11] Rovnovážný stav obsahu vlhkosti v pevné a kapalné složce izolačního systému je dosažen při konstantní teplotě sledovaného stroje. Při její změně však dochází k přestupu vlhkosti mezi jednotlivými složkami izolace. Zvýšená teplota má za následek uvolnění vlhkosti z pevné izolace, čímž se zaznamená nárůst obsahu vlhkosti v oleji, která je měřena čidlem Hydran M2.

Provozní elektrické parametry

Jedním ze základních parametrů, které je vhodné zařadit do skupiny veličin pro monitorování, patří měření provozních parametrů transformátorů (napětí a proudů jednotlivých fází atd.). Měření provozních napětí a proudů umožňuje získat veličiny potřebné pro stanovení okamžitého zatížení transformátoru. Navíc na hodnotě zatěžovacího proudu závisí velikost Jouleových ztrát ve vinutí, a proto můžeme na základě jeho stanovení odhadovat velikost tepelného zatížení izolačního systému transformátoru [9]. Protože velikost proudů a napětí stroje ovlivňuje jeho tepelné zatížení, které má dále souvislost s obsahem vlhkosti a plynů v olejové náplni, je archivace naměřených hodnot provozních veličin v průběhu provozu transformátoru pro sledování transformátoru velmi důležité.

Proudy jednotlivých fází jsou měřeny na sekundární straně transformátoru, kde jsou nainstalovány měřicí transformátory s proudovým poměrem 100/5 A. Ostatní parametry, mezi které patří napětí jednotlivých fází, činný, jalový, zdánlivý výkon a jiné, jsou měřeny elektronickým průmyslovým zdrojem Lovato DMK 20. Měřené hodnoty jsou zobrazovány a ukládány na připojeném PC. Komunikace probíhá prostřednictvím rozhraní RS 232. Příklad souboru s uloženými hodnotami je zobrazen v následující tabulce.

Tab. 3: Příklad zobrazení hodnot provozních parametrů

Datum	Čas	01 - V L1 [V]	01 - V L2 [V]	01 - V L3[V]	01 - A L1[A]	01 - A L2[A]	01 - A L3[A]	01 - W T INT [kW]	01 - VA T INT [kVA]	01 - Var EQV [kVar]
26.2.2008	0:04:03	225	227	226	5,73	5,84	5,98	3,96	4,00	0,48
26.2.2008	0:19:03	225	227	226	5,74	5,84	5,98	3,96	3,99	0,54
26.2.2008	0:34:03	225	227	227	5,76	5,86	6,01	3,95	3,99	0,49
26.2.2008	0:49:03	225	227	227	5,74	5,85	5,99	3,96	4,00	0,52
26.2.2008	1:04:04	225	227	226	5,73	5,84	5,99	3,95	3,99	0,53
26.2.2008	1:19:04	225	227	227	5,75	5,85	6,00	3,95	3,98	0,52
26.2.2008	1:34:04	225	227	227	5,75	5,85	6,00	3,95	3,99	0,50
26.2.2008	1:49:04	225	227	227	5,75	5,86	6,01	3,96	3,99	0,51
26.2.2008	2:04:04	225	227	227	5,75	5,86	6,01	3,97	4,01	0,55
26.2.2008	2:19:04	226	228	228	5,76	5,87	6,03	3,97	4,01	0,53
26.2.2008	2:34:04	225	227	227	5,76	5,87	6,01	3,98	4,01	0,53
26.2.2008	2:49:04	226	228	228	5,76	5,87	6,02	3,97	4,00	0,52
26.2.2008	3:04:04	226	228	228	5,77	5,88	6,02	3,98	4,01	0,55
26.2.2008	3:19:04	226	228	228	5,77	5,88	6,03	3,99	4,03	0,54
26.2.2008	3:34:04	226	228	227	5,76	5,87	6,02	3,99	4,02	0,53
26.2.2008	3:49:04	226	228	228	5,76	5,87	6,02	3,97	4,01	0,52
26.2.2008	4:04:04	225	227	227	5,75	5,86	6,01	3,98	4,01	0,55
26.2.2008	4:19:04	225	227	227	5,74	5,85	6,00	3,96	3,99	0,50
26.2.2008	4:34:04	225	226	226	5,73	5,84	5,99	3,95	3,99	0,52

DOPLŇKOVÉ DIAGNOSTICKÉ METODY

S ohledem na výsledky získané on-line sledováním dříve uvedených parametrů je možno odhalit začínající poruchu, která se projeví mimo jiné nárůstem teploty, zvýšeným obsahem plynných produktů a vlhkosti. Pokud k tomuto nárůstu dojde při běžném zatížení transformátoru, je vhodné provézt další diagnostické zkoušky, které by provozovateli napověděly co se se sledovaným strojem děje.

Plynová chromatografie

Jednou ze zkoušek s velkou vypovídací schopností je aplikace plynové chromatografie. Metoda plynové chromatografie se osvědčila převážně k indikaci tepelného stárnutí kapalných izolantů a soustavy olej-papír. Princip analýzy spočívá v přesném charakterizování plynných produktů, které se v olejové náplni mohou vyskytovat v důsledku provozu sledovaného transformátoru, tak i v důsledku

poruch. Na základě kvantitativního a kvalitativního rozboru rozkladových plynů lze posoudit nejen stupeň tepelného stárnutí, ale zjistit i případné teplotně zbarvené pochody (přehřátí, předvýboje, elektrický oblouk), které urychlené stárnutí způsobily [10].

Vzorek oleje pro účely plynové chromatografie byl z experimentálního transformátoru odebrán před jeho prvním spuštění. Analýza byla provedena přístrojem *Kelman Transport X*, kterým byly naměřeny následující hodnoty:

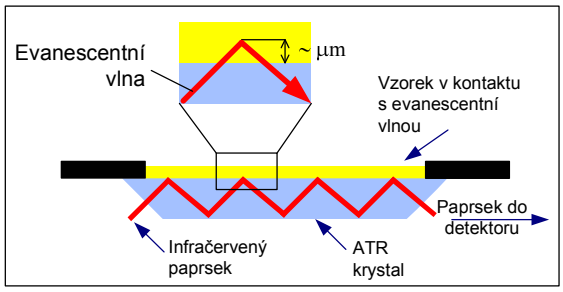
vodík (H_2) = 26 ppm
voda (H_2O) = 25 ppm
vlhkost (RH) = 15 %

Srovnáme-li tyto hodnoty s výsledky získanými čidlem Hydran M2 (odečtené z obr. 2), pak jsou patrné určité rozdíly (vodík - 26 ppm z chromatografie a přibližně 32 ppm odečtem senzoru Hydran). Tato skutečnost se však dala očekávat, protože čidlo Hydran odečítá hodnoty s určitou tolerancí (10 % a 25 ppm) [3]. Důležitější než přesná hodnota obsahu plynů je pro účely on-line diagnostiky zaznamenat trend vývoje obsahu sledovaných parametrů a v případě náhlého nárůstu zpřesnit výsledky aplikací plynové chromatografie.

Infračervená spektroskopie (FT-IR / ATR)

V případě, kdy chceme posoudit míru zestárnutí olejové náplně a jsou k dispozici vzorky oleje získané v průběhu provozu stroje, je možno aplikovat jako doplňkovou metodu infračervenou spektroskopii v provedení tzv. zeslabené totální reflektance (ATR - Attenuated Total Reflection).

Metoda je založena na principu násobného úplného odrazu záření na fázovém rozhraní měřeného vzorku a měřicího krystalu z materiálu o vysokém indexu lomu (obr. 4).

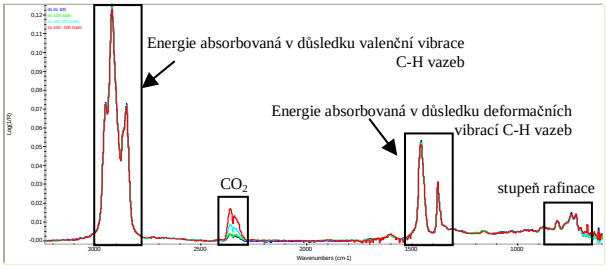


Obr. 4: Princip ATR techniky měření spekter [5]

Pokaždé, když je infračervený paprsek odražen uvnitř krystalu, část záření (evanescentní vlna) překročí rozhraní krystal-vzorek a vstupuje do vzorku, což má za následek absorpci ve vzorku. Pokud měřený vzorek absorbuje záření o určité frekvenci, pak tato složka bude v totálně odraženém světle zeslabena [6]. Výsledkem analýzy je spektrální zobrazení charakteristických pásů, které se do značné míry podobá spektru změřenému v transmitančním režimu (ekvivalentnímu průchodu záření vzorkem o tloušťce řádově jednotek µm) [7], [8]. Míru degradace je možno posoudit na základě srovnávání naměřených spekter. O stupni zestárnutí napovídá změna intenzity charakteristických pásů, případně náhlý výskyt zcela nového pásu u stejného materiálu.

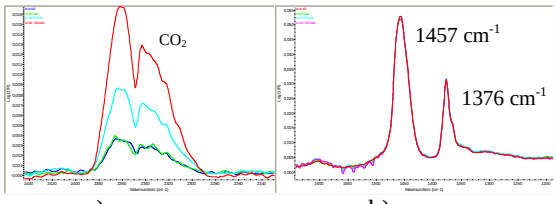
V současné době zatím nejsou dostupné výsledky měření olejové náplně experimentálního transformátoru, proto jsou pro názornost uvedeny výsledky testování stejného oleje, ale stárnutého ve spojení s papírovým vzorkem izolace při teplotě 90 °C. Měření byla provedena pro olej v dodaném stavu a po uplynutí 125, 225 a 500 hodin procesu stárnutí na FT-IR spektrometru Nicolet 380 ve spojení s optickým krystalem DTGS KBr. Pro měření spekter bylo akumulováno 32 skanů při rozlišení 4 cm^{-1}. Na vyhodnocení byl použit program OMNIC.

Podíváme-li se na spektrální zobrazení výsledků měření oleje ITO 100 pro různé kroky stárnutí (obr. 5), pak spektrální pásy v oblasti 3000 a dvojpás 1457 a 1376 cm^{-1} (odpovídající uhlovodíkům - obr. 6 b), u kterých se v minerálních olejích dá předpokládat, že budou konstantní, mají prozatím stejnou intenzitu. Z tohoto pohledu se dá konstatovat, že není zatím patrná žádná výraznější změna vlastností sledovaného oleje. Pás v oblasti 800-712 cm^{-1} charakterizuje u minerálních olejů stupeň rafinace.



Obr. 5: ATR spektrum oleje ITO 100 pro různé kroky stárnutí

Mírné rozdíly můžeme pozorovat u pásu oxidu uhličitého (CO_2 – 2361 cm^{-1} v detailním zobrazení části spektra na obr. 6 a), jehož intenzita roste spolu s delší dobou tepelného stárnutí. CO_2 je sice jedním z produktů stárnutí papírové složky izolačního systému olej-papír, intenzita této změny však není zatím natolik výrazná, aby poukazovala na počátek degradace.



a) b)

Obr. 6: Detailní zobrazení klíčových pásů pro olej ITO 100
a) CO_2 b) dvojpás C-H deformační vibrace

ZÁVĚR

V příspěvku zmíněné diagnostické metody nepředstavují celkové možnosti, které jsou pro účely hodnocení stavu transformátorů dostupné. Uvedeny jsou pouze parametry, které jsou sledovány v rámci realizace laboratorního experimentálního pracoviště. Jako doplněk jsou zmíněny moderní metody, které

mohou podávat detailnější informace o stavu izolačního oleje.
Jak je patrné z výsledků měření teplot, obsahu plynů a vlhkosti, je mezi těmito parametry patrná určitá souvislost (konkrétněji mezi teplotou a vlhkostí). Naměřené hodnoty je však důležité hodnotit také na základě provozního zatížení sledovaného stroje.
Doplňkové diagnostické metody (chromatografický rozbor plynů) provozovateli napomáhají získat přesnější informace o produktech, které se ve sledovaném transformátoru nacházejí, případně o postupu degradace oleje jako takového (FT-IR). Tato diagnostická šetření je vhodné provádět v předem naplánovaných intervalech, nebo přímo až na základě zvýšených hodnot získaných z on-line monitoringu.

Příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného záměru MSM 4977751310 - Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice.

LITERATURA

[1] S.V.Kulkarni, and S.A.Khaparde, "Transformer Engineering - Design and Practice" Indian Institute of Technology, Bombay, Mumbai, India, 2004.

[2] Mentlík, V.; Prosr, P. Teplotní parametry výkonových transformátorů. *In* Měření a regulace teplot v teorii a praxi . Ostrava : Tanger, 2007. s. 93-99. ISBN 978-80-86840-31-4.

[3] Straka V, Kuboš D. On - Line monitoring plynů rozpuštěných v transformátorovém oleji pomocí přístroje HYDRAN M2 Závěrečná zpráva z demonstračního měření elektrárna Tisová 9.1. 2004 – 13.2. 2004.

[4] Piush Verma Condition monitoring of transformer oil and paper, doctor thesis Patiala, India, 2005.

[5] FT-IR Spectroscopy Attenuated Total Reflectance (ATR) [online]. PerkinElmer technical note [cit. 2008-04-21]. Dostupné z WWW: < http://las.perkinelmer.com/content/technicalinfo/tch_ftiratr.pdf >.

[6] TRCHOVÁ, M. Jak vibrují atomy v molekulách. In Otevřená věda : Praktické kurzy z fyziky a chemie. [s.l.] : [s.n.], 2006, [cit. 2008-04-21]. Dostupný z WWW: <http://www.otevrena-veda.cz/ov/index.php?p=kurzy>.

[7] Fahrenfort J.: Spectrochim. Acta 17, 698 (1961).

[8] J. Hájek, V. Machovič, O. Křížová, V. Sedláčková, M. Novotná, "Využití infračervené spektrofotometrie pro sledování změn při oxidaci řepkového oleje". Chem. Listy 92, 434 - 440 (1998).

[9] ČSN IEC 354 Pokyny pro zatěžování výkonových transformátorů, 1997.

[10] Prosr, P. On-line diagnostický systém výkonových transformátorů: disertační práce. Plzeň: ZČU v Plzni, 2005. 134 s.

[11] Barborka V. Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů [online]. Elektro 07/2002. [cit. 2008-09-01]. Dostupné z WWW: < http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085 >.