

Možnosti stanovení vlhkosti v pevné izolaci transformátoru

J. Dončuk, P. Mráz

Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : jdoncuk@ket.zcu.cz, pmraz@ket.zcu.cz

Anotace:

Výkonový transformátor je důležitým článkem elektrizační soustavy každého státu a z ekonomického hlediska se jedná o velice nákladnou investici. K zajištění jeho bezpečného a spolehlivého provozu je nutné mít aktuální informace o stavu transformátoru. Z těchto důvodů je vhodné monitorovat jednotlivé veličiny určující stav transformátoru. Zároveň znalost stavu transformátoru může pomoci prodloužit jeho technický život a není tak limitující pouze stáří transformátoru. Vlhkost patří společně s teplotou a oxidací k nejvýraznějším degradačním činitelům, které působí na elektroizolační systém transformátoru. Vlhkost je v transformátoru rozdělena nerovnoměrně a většina jí je obsažena v papíru. Cílem příspěvku je zhodnotit možnosti stanovení obsahu vlhkosti v pevné izolaci transformátoru.

Power transformers play an important role in the electrical networks of each state, and from an economical point of view, they are an expensive investment. To maintain the safe and reliable function of transformers, it is necessary to have actual information. For these reasons it is required to monitor diagnostic quantities which determine the state of the transformer. Knowledge of the transformer's state helps to extend its technical life, because the age of the transformer is not the only limiting factor. Moisture, temperature and oxidation - which affect the electro insulation systems of transformers - are the most serious causes of degradation. Moisture in a transformer is non uniform distributed and most of the moisture is stored in paper. The objective of this paper is to provide an assessment of ways in which to determine moisture content in solid insulation

ÚVOD

Výkonový transformátor má nezastupitelnou roli v řetězci dodávky elektrické energie. Z tohoto důvodu je nutné zajistit bezpečnost a spolehlivost jeho provozu. Online diagnostika transformátoru napomáhá určit jeho aktuální stav a přispívá tak k prodloužení jeho technického života. Vlhkost patří mezi jeden z hlavních degradačních činitelů ovlivňujících stav transformátoru. Je v něm rozložena nerovnoměrně a migruje mezi pevnou izolací a olejem v závislosti na teplotě. Výkonový transformátor pro velmi vysoké napětí obsahuje přes 60 tun oleje a 8 tun papíru. Dle standardů je vlhkost v oleji stanovena jako mg vody na kg oleje (ppm). Jako limitní hodnota pro zhoršený stav oleje je obecně považována hodnota 25 ppm. Tudíž v případě zhoršeného oleje je v něm obsaženo kolem 2 kg vody. Na druhou stranu vlhkost v papíru je dle standardů stanovena v % hmotnosti izolace. Limitní hodnota pro vlhkost v papíru jsou 4 %, což znamená obsah vody v papírové izolaci až 300 kg. Je tedy patrné, že většina vlhkosti je obsažena v papírové izolaci transformátoru. Je nutné se věnovat způsobům stanovení vlhkosti v pevné izolaci, jelikož se jedná o aktuální, nikoliv však jednoduchý úkol. Pevná izolace má tendenci akumulovat vlhkost a olej funguje jako přenosné médium. Cílem tohoto článku je zhodnotit možnosti stanovení vlhkosti v pevné izolaci výkonového transformátoru [1], [2].

ROZPUSTNOST VLNKOSTI V OLEJI A PAPIRU TRANSFORMÁTORU

Čistý minerální olej je složen z nasycených uhlovodíků, jako jsou parafíny a nafteny. Struktura jejich molekuly je nepolární a nemohou tedy vázat rozpuštěnou vodu. Transformátorový olej však obsahuje nečistoty vzniklé při procesu rafinace a produkty stárnutí pevných a kapalných izolantů. Působením kyslíku, teploty a vlhkosti dochází ke vzniku produktů stárnutí oleje, jako jsou alkoholy, aldehydy, ketony a kyseliny. Všechny tyto produkty jsou polární a slučují se s rozpuštěnou vodou. Ta se s produkty stárnutí váže Van Der Waalsovou nebo vodíkovou vazbou. K nárůstu rozpustnosti vody tak dochází vlivem stárnutím oleje [3].

Transformátorová lepenka, Kraft papír nebo tepelně upravený papír používané v transformátoru jsou vyrobeny z celulózy. Jedná se o přírodní organický materiál, který obsahuje polární řetězce glukózy, jež jsou schopné absorbovat velké množství vody. V porovnání s olejem je schopnost vázat vodu u celulózy mnohonásobně vyšší.

Hydrolyza je proces rozkladu chemických složek (oleje a celulózy u transformátoru) reagujících s vodou. Je to dominantní mechanismus stárnutí a rozkladu papíru při teplotách až do 120 °C. Díky hydrolyze výrazně klesá průměrný polymerační stupeň papírové izolace [1], [3] a [4].

ZDROJE A VLIV VLHKOSTI NA ELEKTROIZOLAČNÍ SYSTÉM TRANSFORMÁTORU

Vlhkost je jeden z hlavních degračních činitelů, jež působí na elektroizolační systém transformátoru. Původce vlhkosti v transformátoru lze rozdělit na externí a interní. Atmosférická vlhkost (externí zdroj) vniká do transformátoru díky nedostatečné hermetizaci. Dle [2] je považována za největší zdroj vlhkosti v transformátoru. Mezi interní zdroje patří zbytková vlhkost v papírové izolaci způsobená nedostatečným vysušením při výrobě a dále pak vlhkost vznikající stárnutím a rozkladem papíru a oleje.

Zvýšený obsah vlhkosti přispívá ke vzniku dalších závad, které mohou vyústit až v poruchu transformátoru. Vlhkost v transformátoru výrazně snižuje průrazného napětí, které lze dle [2] vypořadovat už při překročení 2 % obsahu vlhkosti v papíru

Při vyšším zatížení transformátoru se vlhkost v papíru přeměňuje v páru a dochází tak k vývinu bublin. Ty následně přispívají ke snížení průrazného napětí oleje a zároveň snižují zapalovací napětí částečných výbojů, čímž napomáhají k degradaci izolačních materiálů v transformátoru.

Vlhkost dále urychluje proces stárnutí a rozkladu papírové izolace. Dekompozice papíru je přímo úměrná obsahu vlhkosti v izolačním systému a je výrazně urychlena s přítomností kyselin v oleji [1].

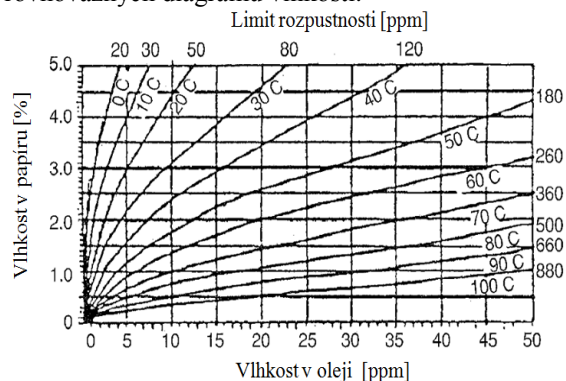
STANOVENÍ VLHKOSTI V PEVNÉ IZOLACI Z KŘIVEK ROVNOVÁŽNÝCH DIAGRAMŮ

V minulosti se již mnoho autorů (Oommen, Griffin, Fessler, Sokolov) zabývalo možností určit vlhkost v papíru ze znalosti vlhkosti a teploty oleje za rovnovážných teplotních podmínek. Tím vznikly křivky rovnovážných diagramů, které jsou uvedeny v literatuře [2], [5], [6] a [7]. Z křivek rovnovážných diagramů lze rychle určit obsah vlhkosti v papírové izolaci transformátoru, což umožňuje predikci jeho budoucí poruchy.

Metoda konstrukce křivek od uvedených autorů je založena na předpokladu, že relativní vlhkost je stejná pro olej i papír při téže teplotě. Kombinací křivek vlhkosti v oleji ku relativní vlhkosti ve vzduchu a vlhkosti v papíru versus relativní vlhkosti ve vzduchu byly vytvořeny rovnovážné křivky vlhkosti v papíru v závislosti na vlhkosti v oleji při daných teplotách [5], [6]. Mezi nejpoužívanější křivky rovnovážných diagramů patří křivky, které byly zkonstruovány Oommenem a jsou vidět na Obr. 1: [6].

Všechny tyto rovnovážné diagramy byly konstruovány pro nové materiály a neuvážovaly tak stárnutí materiálů elektroizolačního systému

transformátoru. Produkty stárnutí oleje (zejména kyseliny) mnohonásobně zvyšují rozpustnost vody. Dle [3] může zestárnutý olej absorbovat až dvakrát více vody v porovnání s novým olejem. Tím se významně mění podmínky pro konstrukci rovnovážných diagramů vlhkosti.



Obr. 1: Křivky rovnovážného diagramu dle Oommena - převzato z [6].

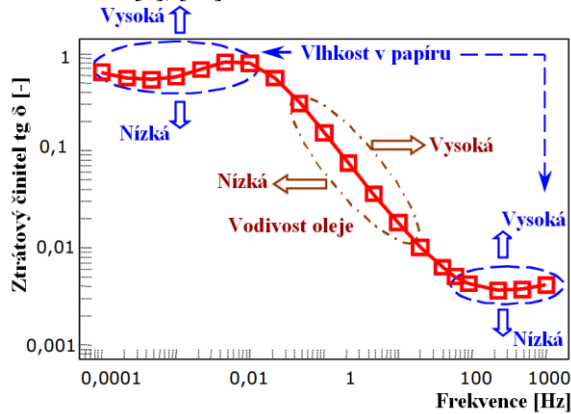
Je patrné, že vlhkost v elektroizolačním systému transformátoru migruje mezi olejem a pevnou izolací v závislosti na teplotě. Při vyšších teplotách se většina vlhkosti přesouvá do oleje. Při stanovení obsahu vlhkosti v papíru však není respektována doba přesunu vlhkosti, k němuž nedochází najednou, ale jedná se o dlouhotrvající proces.

Tento způsob umožňuje rychlé určení obsahu vlhkosti v papíru, vhodné zejména pro online diagnostické systémy. Při konstrukci křivek se předpokládá, že je systém v tepelné rovnováze a v případě, že není, nelze tyto křivky použít pro přesné určení obsahu vlhkosti v papíru. Výkonové transformátory, které reagují na aktuální spotřebu elektrické energie se do tepelné rovnováhy dostávají velice obtížně.

DIELEKTRICKÁ SPEKTROSKOPIE VE FREKVENČNÍ OBLASTI - FDS

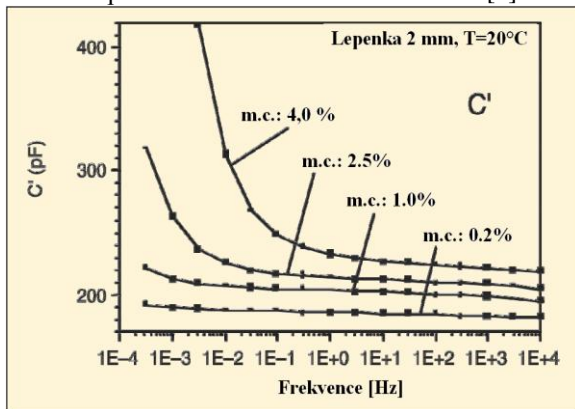
Tato technika využívá k určení vlhkosti v papíru měření kapacity a ztrátového činitele $\tan \delta$ (případně dalších dílčích parametrů), které se většinou měří na síťovém kmitočtu. FDS ovšem měří tyto veličiny na specifickém frekvenčním spektru - obvykle od 0,0001 Hz do 1000 Hz. Měření zabere čtyřnásobek doby periody nejnižší měřené frekvence. Při měření je sinusový signál připojen na vysokonapěťové průchodky a proud je měřen na nízkonapěťovém výstupu. Nádoba a jádro musí být uzemněny [8], [9]. Obecně lze popsat výsledky metody FDS na Obr. 2.: Je z něj patrné, že metodou FDS je možné pozorovat tzv. konduktivitu oleje (převrácená hodnota rezistivity - více používaná veličina při měření na transformátorech) a především obsah vlhkosti v papíru. Je vidět, že vlhkost v papíru lze sledovat na nízkých a vysokých frekvencích [10], [11]. Avšak praktická měření ukazují, že nejlepší rozlišení

vlhkosti je možné při nízkých a velmi nízkých frekvencích [9], [10].



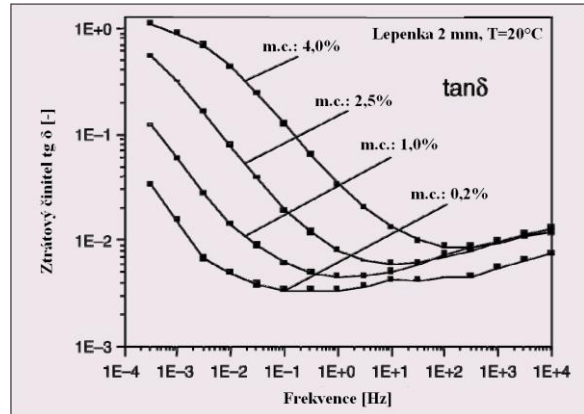
Obr. 2: Interpretace měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ metodou FDS - převzato z [10].

Výsledky měření metodou FDS lze vidět na Obr. 3: a Obr. 4:. Měření bylo provedeno na olejem impregnované lepence s rozdílným obsahem vlhkosti (m. c. – moisture content). K měření byl použit speciální dielektrický spektrometr. Jedná se o přístroj schopný měřit kapacitu C a ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ na širokém spektru frekvencí 10^{-4} Hz až 10^4 Hz [9].



Obr. 3: Kapacita C lepenky v oleji - převzato z [9].

Z obrázků je patrné, že obsah vlhkosti ve vzorcích lepenky je dobře rozeznatelný právě při nízkých frekvencích, na rozdíl od síťového kmitočtu. Obr. 4: ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ ukazuje, že při síťové a vyšší frekvenci nemusí být spolehlivě odhalen rozdíl v obsahu vlhkosti v pevné izolaci transformátoru.



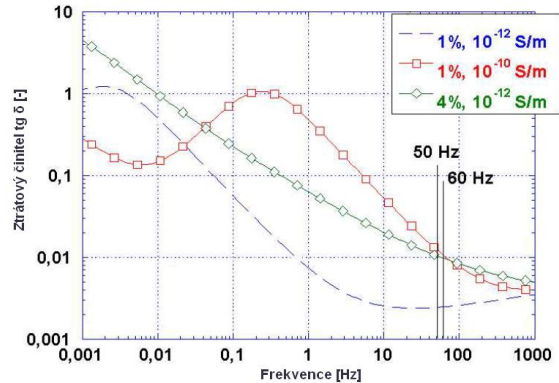
Obr. 4: Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ lepenky v oleji - převzato z [9].

Nárůst kapacity C a ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ je způsoben převážně vodivostí vody a tudíž zvýšením mezivrchových (interfaciálních) polarizací uvnitř lepenky.

Na Obr. 5: je znázorněn vliv vodivosti oleje na výsledky naměřené metodou FDS. V rámci tohoto experimentu jsou představeny tři odlišné stavy transformátoru. Dva se shodnou vlhkostí (1 %), ale rozdílnou vodivostí oleje. V prvním případě (označeno modrou křivkou) 10^{-12} S/m, v druhém případě (reprezentováno červenou křivkou) 10^{-10} S/m. Třetí stav (zelená křivka) obsahuje 4 % vlhkosti papíru a vodivost oleje je 10^{-12} S/m [12].

Vliv vodivosti oleje na ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ lze z měření FDS pozorovat ve středu naměřené křivky. V případě vyšší vodivosti oleje dojde při malých frekvencích k jejímu zakřivení (pík). Při nízké vodivosti oleje křivka klesá pod úhlem 45° .

Během měření ztrátového činitele na síťové frekvenci nelze pozorovat žádný rozdíl mezi těmito dvěma případy. Tento charakter změny tvaru křivek v případě vodivosti oleje je zmíněn v literatuře [12] a [13].



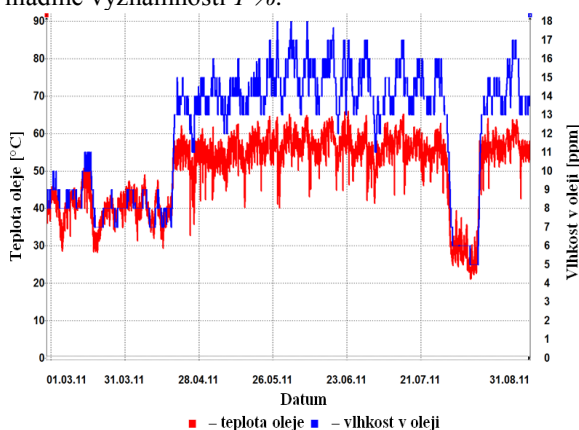
Obr. 5: Rozlišení stavu transformátoru pomocí metody FDS - převzato z [13].

VÝSLEDKY ONLINE DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU

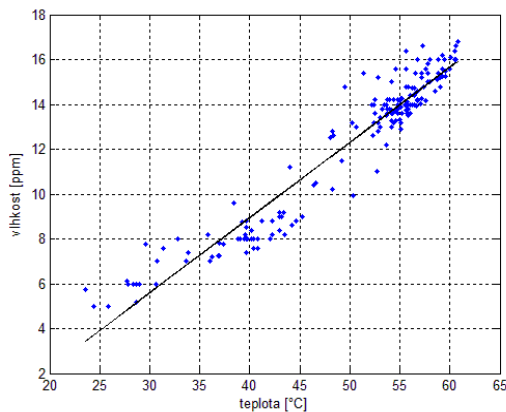
V této kapitole jsou uvedeny výsledky reálného online diagnostického systému výkonového

transformátoru. Teplota vrchní vrstvy oleje je monitorována čidlem Pt 100, které je umístěno v jímce na horní části transformátorové nádoby. Vlhkost oleje je snímána senzorem, který pracuje na principu změny kapacity tenkovrstvého polymeru v závislosti na obsahu vlhkosti v oleji. Vlhkost papíru je počítaná hodnota, jejíž výpočet je založen na aplikaci rovnovážných diagramů vlhkosti.

Na Obr. 6: je vidět vlhkost a teplota oleje v průběhu šesti měsíců. Z daného obrázku si lze všimnout, že vlhkost oleje se mění v podobném charakteru jako teplota vrchní vrstvy oleje. Na Obr. 7: je vidět závislost vlhkosti oleje v závislosti na teplotě oleje v horní vrstvě. Korelační koeficient mezi těmito veličinami je $r = 0,961$ a je statisticky významný na hladině významnosti 1 %.

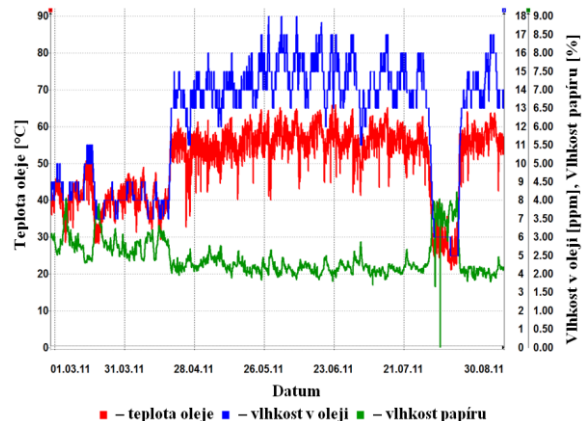


Obr. 6: Vlhkost a teplota oleje v transformátoru.



Obr. 7: Závislost vlhkosti oleje na teplotě oleje v transformátoru.

Na Obr. 8: jsou vidět měřené veličiny vlhkost oleje, teplota v oleji a počítaná veličina vlhkost papíru. V uvedeném grafu si lze všimnout, že vlhkost papíru při vypnutí transformátoru (reprezentováno výrazným poklesem vlhkosti i teploty v oleji v srpnu 2011) dosahuje až 4 %. Je nutné si uvědomit, že v případě takto vysoké hodnoty vlhkosti papíru, by při opětovném zapnutí transformátoru mohlo dojít k jeho značnému poškození.



Obr. 8: Měřené veličiny vlhkost olej, teplota oleje a vypočítaná vlhkost papíru v transformátoru.

Při důslednější analýze bylo zjištěno, že výpočet vlhkosti papíru z rovnovážných diagramů vlhkosti je prováděn pro konstrukci transformátoru bez výměníku. Transformátor pro nějž byl proveden výpočet vlhkosti papíru však výměník má. Zřejmě z tohoto důvodu vznikla chyba ve výpočtu vlhkosti papíru.

Pro přesnější zjištění vlhkosti papíru by bylo vhodné provést diagnostické šetření, které lépe pomůže odhalit skutečný stav elektroizolačního systému transformátoru. Jako vhodná metoda se nabízí výše uvedená frekvenční dielektrická spektroskopie FDS.

ZÁVĚR

Vlhkost je významný degradační činitel, který nepříznivě ovlivňuje elektroizolační systém transformátoru. Zejména urychluje stárnutí jeho pevné složky, čímž dochází ke snižování její elektromechanické integrity. V příspěvku jsou uvedeny možnosti stanovení obsahu vlhkosti v pevné izolaci transformátoru.

První metoda je graficko-početní a využívá křivky rovnovážných diagramů vlhkosti. V případě znalosti vlhkosti a teploty oleje se tento způsob velmi často využívá pro online diagnostické systémy a umožňuje tak rychlou a orientační informaci o obsahu vlhkosti v papíru. Bohužel tato metoda předpokládá tepelnou rovnováhu transformátoru a nerespektuje stárnutí jednotlivých složek elektroizolačního systému transformátoru.

Dielektrická spektroskopie ve frekvenční oblasti FDS se využívá ke stanovení vlhkosti papíru ze znalosti dielektrických parametrů kapacity C a ztrátového činitele $\tan \delta$.

V závěrečné části příspěvku jsou uvedeny výsledky online diagnostického systému výkonového transformátoru.

Problematika stanovení vlhkosti pevné izolace transformátoru je velice aktuální, ale zároveň obtížná. Dalším krokem pro zlepšení věrohodnosti daných výsledků by mělo být porovnání hodnot získaných výpočtem s měřením FDS a následná aktualizace

výpočtu, vhodného zejména pro online diagnostiku transformátorů.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu SGS 2010-037

LITERATURA

- [1] Brochure No. 227 *Guidelines for Life Management Techniques for Power Transformers*. CIGRE WG 12.18 Life Management of Transformers, 2002. 125 p.
- [2] GRIFFIN, P.; SOKOLOV, V.; VANIN, B. Brochure No. 349 *Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems*. CIGRE TF A2.30 *Moisture in transformer*, 2007. 23 p.
- [3] KOCH, M. Improved Determination of Moisture in Oil-Paper-Insulations by Specialised Moisture Equilibrium Charts. In: *XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*. Beijing, China: Tsinghua University, August 25-29, 2005.
- [4] SARFI, V., A.A. SHAYEGANI a H. MOHSENI. Estimation of Moisture in Pressboard of Power Transformer using Moisture Dynamic Measurement in Transformer Oil. In: *XVIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany: Leibniz University, August 22-26, 2011.
- [5] DU, Y.; ZAHN, M.; LESIEUTRE, B.C.; MAMISHEV, A.V.; LINDGREN, S.R. Moisture Equilibrium in Transformer Paper-oil Systems, *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol.15, no.1, pp.11-20, Jan.-Feb. 1999.
- [6] OOMMEN, T.V. Moisture Equilibrium Charts for Transformer Insulation Drying Practice, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.PAS-103, no.10, pp.3062-3067, Oct. 1984.
- [7] FESSLER, W.A.; ROUSE, T.O.; MC NUTT, W.J.; COMPTON, O.R. A Refined Mathematical Model for Prediction of Bubble Evolution in Transformers, *IEEE PES Winter meeting*, Jan. 31 - Feb. 5, 1998.
- [8] GAFVERT, U.; ADEEN, L.; TAPPER, M.; GHASEMI, P.; JONSSON, B. Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain applied to Diagnostics of Power Transformers, *Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, vol.2, no., pp.825-830 vol.2, 2000
- [9] ZAENGL, W.S. Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment. I. Theoretical Considerations, *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol.19, no.5, pp.5-19, Sept.-Oct. 2003
- [10] KOCH, M.; TENBOHLEN, S.; KRUGER, M.; KRAETGE, A. Improved Moisture Analysis of Power Transformers using Dielectric Response Methods, MatPost 07, In *3rd European Conference on HV & MV Substation Equipment*, Lyon, France, 15-16 November, 2007
- [11] HEMMATJOU, H.; FOFANA, I. Frequency Domain Spectroscopic Measurements of Oil impregnated Paper Insulation System under Thermal Runaway", In *XVIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, 22-26 August, 2011
- [12] Straka, Václav; Zitek, Pavel; Frekvenční diagnostika výkonových transformátorů - Metody, přínosy, vyhodnocení, Konference ČK CIRED 2010, Tábor, Česká republika, 9. - 10. listopad, 2010
- [13] Pax Diagnostic. Application Note - Frequency Domain Spectroscopy. *Application Note* [online]. 2007, [cit. 2011-11-07]. Dostupné z WWW: www.paxdiagnostics.com/uploads/FDS.PDF>.