

## Detekce tepelné expozice izolačního systému olej-papír s oleji na bázi přírodních esterů

M. Širůček<sup>1</sup>, P. Trnka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,  
Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : msirucek@ket.zcu.cz, pavel@ket.zcu.cz

### Anotace:

Diagnostika izolačních systémů patří k důležitému přístupu pro zajištění dlouhodobého a spolehlivého stavu elektrických zařízení v různých oblastech elektrotechniky. Článek se zaměřuje na problematiku degradace a diagnostiky elektroizolačního systému olej-papír. Uvedený systém má široké uplatnění především v oblasti transformátorů různých výkonů a transformátorových průchodek. Mezi jeho nejvýznamnější degradační mechanismy patří tepelná, elektrická, mechanická a chemická degradace. Uvedené mechanismy způsobují rozklad izolačního systému na různé degradační produkty a tak i změnu elektrických parametrů systému. Na základě sledování vybraných elektrických veličin je tedy možné určit stav degradace systému vlivem tepelné expozice. Experiment byl proveden na vzorcích izolačního systému olej-papír s minerálním olejem a olejem na bázi přírodních esterů.

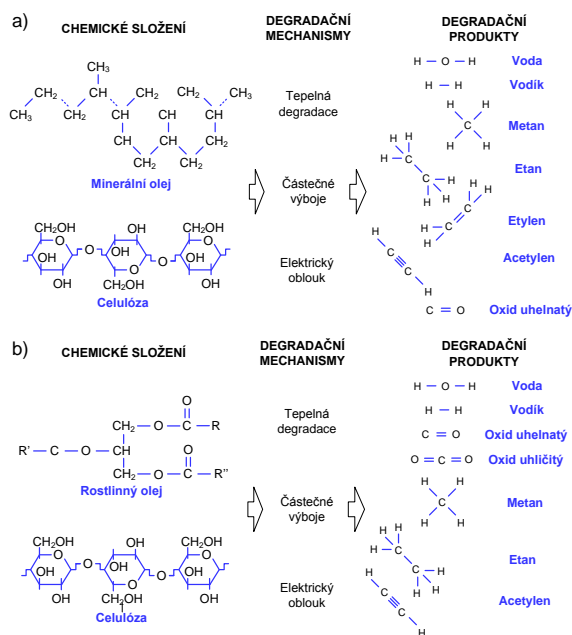
Diagnostics of insulating systems is an important approach to ensure long time and reliable operation of electrical appliances in various fields of electrical engineering. The article deals with degradation and diagnostics of oil-paper insulating systems. The systems are used especially in the area of power, distribution, current and voltage transformers and transformer bushings. The main degradation mechanisms are thermal, electrical, mechanical and chemical stresses. Therefore the insulation system is decomposed in the various degradation products. The most important liquid product is water. It has a detrimental effect on the changes in the electrical parameters of the insulating system and also supports other degradation processes. Monitoring of chosen electrical diagnostic parameters is used for determination of the system conditions under thermal stress. The article is focused on this problematic applied on the insulating systems based on mineral oil and natural esters oil.

### ÚVOD

Izolační systém olej-papír je v současné elektrizační soustavě nejužívanější v oblasti transformátorů (výkonových, blokových, distribučních a přístrojových). Systém se vyznačuje dvěma základními složkami, pevnou na bázi celulózy či syntetického materiálu a kapalnou reprezentovanou nejčastěji minerálními oleji. V současnosti je stále důležitějším kritériem pro používané transformátorové oleje vysoká biologická odbouratelnost z důvodu stavby transformátorů v oblastech s vysokými environmentálními požadavky, např. transformátory pro větrné elektrárny, stavěné v moři, stožárové transformátory v blízkosti vodních toků apod. Biologická odbouratelnost je definována jako proces chemického rozkladu na zdraví a přírodě nezávadné složky prostřednictvím mikroorganismů (bakterie, plísňe) nebo jejich enzymů. Jako zdravotně nezávadná je považována složka uhlíku, vodíku a kyslíku buď přímo, nebo slabě vázaná ve sloučenině [1]. Mezi oleje s vyšší biologickou odbouratelností patří např. syntetické oleje jako Midel 7131, Biodiekan a modifikované rostlinné oleje např. Biotemp a FR3. Během provozu transformátoru se obě složky izolačního systému rozpadají působením jednotlivých degradačních mechanismů. Nejvýznamnější podíl na

této degradaci má především teplota. Vlivem oteplení pevné složky dochází v celulóзовém řetězci  $(C_6H_{10}O_5)_n$  ke vzniku nestability, která se projevuje rozpadem molekuly glukózy  $(C_6H_{12}O_6)$  v tomto řetězci na molekuly jiných chemických sloučenin. Jedná se o jednu molekulu oxidu uhelnatého (CO), jednu molekulu furanu  $(C_4H_4O)$  a tři molekuly vody  $(H_2O)$ . Degradace kapalných složek izolačního systému podstatně závisí na chemickém složení použitého oleje. Autor [3] experimentálně ověřil, že oleje na bázi přírodních esterů dosahují při tepelné degradaci několikanásobně vyššího obsahu plynů vodíku  $(H_2)$ , oxidu uhelnatého (CO), metanu  $(CH_4)$  a oxidu uhličitého  $(CO_2)$  v porovnání s olejem minerálním. Na Obr. 1: je uvedeno chemické složení celulózy, minerálního i rostlinného oleje a jejich základních degradačních plyných a kapalných produktů. V případě rostlinných olejů je uvedena základní triglyceridová skupina kde R, R', R'' značí skupinu stejných nebo vzájemně odlišných mastných kyselin (např. kyselina olejová, kyselina linolová). Voda, coby důležitý kapalný degradační produkt, je obsažena v oleji na bázi přírodních esterů ve větším množství než v oleji minerálním z důvodu technologické přípravy prvního uvedeného oleje ze semen zemědělských plodin. Nasycenost či nenasyčenost jednotlivých vazeb mastných kyselin poté způsobuje intenzivnější proces hydrolyzy

v příslušném rostlinném oleji. Obsah vody se tedy vlivem tepelné expozice zvyšuje a projevuje se vyšší polárností izolace a tím i zhoršením jejich elektrických parametrů.



Obr. 1: Degradace produkty izolačního systému olej-papír pro: a) minerální olej, b) rostlinný olej. [2][3]

## EXPERIMENT

Experiment byl zaměřen na nalezení vhodného elektrického parametru, který bude mít nejvyšší citlivost na změnu stavu izolačního systému olej-papír vlivem tepelné degradace. Použitými materiály byla kalandovaná transformátorová lepenka **FASSMAN** o rozměrech 100 mm x 100 mm a testovanými oleji byl olej na bázi přírodních esterů **COOPER FR3** a minerální olej **SHELL DIALA DX**. Vzorky byly vysušeny po dobu 48 h při teplotě 50 °C v horkovzdušné komoře **Venticell**. Následně byly vzorky při stejné teplotě ponechány v oleji rovněž po dobu 48 h pro vhodné prosycení materiálu pevné složky. Tepelná expozice probíhala při teplotě 110 °C v uzavřených skleněných nádobách s olejem po dobu 2500 h. Teplota byla zvolena na základě předchozích experimentů provedených na našem pracovišti [4][5] a ČSN 60076-7: „Pokyny pro zatěžování výkonových transformátorů“. Doby odběrů vzorků byly 0 h, 125 h, 250 h, 500 h, 1000 h a 2500 h. Četnost vzorků byla 14.

## MĚŘENÉ PARAMETRY

Měřenými elektrickými parametry byly izolační odpor  $R_i$ , jednodiminutový  $p_{i1}$  a desetiminutový  $p_{i10}$  polarizační index, ztrátový činitel  $tg\delta$  při 50 Hz a jeho frekvenční závislost v oblasti 200 Hz až 15 kHz.

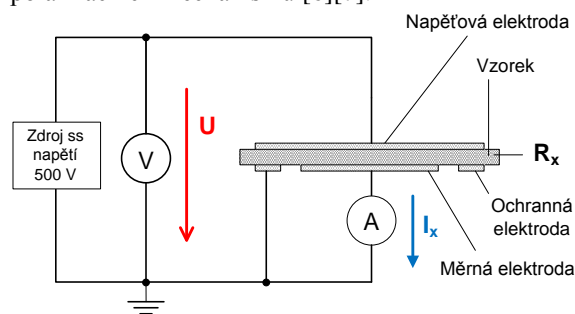
V dalších řádcích budou blíže popsány jednotlivé parametry.

Velikost izolačního odporu udává ohmickou hodnotu izolačního systému a citlivě reaguje na jeho změny. Ty mohou být způsobeny např. nečistotami, tepelnou degradací izolace, vibracemi nebo chemickými produkty rozkladu izolace. Dochází-li s dobou tepelné expozice k poklesu izolačního odporu, značí to právě výskyt degradace ve formě vlhkosti, znečištění či nehomogenit v izolaci. Z absorpčních proudů lze dále počítat jednodiminutový či desetiminutový polarizační index. Počítán je dle vztahu (1), tedy vzájemným poměrem proudů ve vybraných časech. Obecně lze říci, že čím je polarizační index vyšší, tím je izolační systém kvalitnější.

$$p_{i1} = \frac{i_{15}}{i_{60}} \quad p_{i10} = \frac{i_{60}}{i_{600}} \quad (1)$$

kde  $p_{i1}, p_{i10}$  je polarizační index jednodiminutový resp. desetiminutový [-],  
 $i_{15}$  je proud protékající vzorkem v 15 s [pA],  
 $i_{60}$  je proud protékající vzorkem v 60 s [pA],  
 $i_{600}$  je proud protékající vzorkem v 600 s [pA].

Měření absorpčních proudů bylo provedeno dle normy ČSN EN 62631-3: „Dielektrické a izolační vlastnosti pevných izolačních materiálů“ voltampérovou metodou viz Obr. 2.: Jako zdroj stejnosměrného napětí 500 V i pikoampérmetr byl použit elektrometr **Keithley 6517A**. Z naměřených hodnot byly následně dopočteny polarizační indexy dle vztahu (1) a hodnota izolačního odporu dle Ohmova zákona z proudu v 60. sekundě, kdy dle teoretických předpokladů nastalo ustálení základních polarizačních mechanismů [6][7].

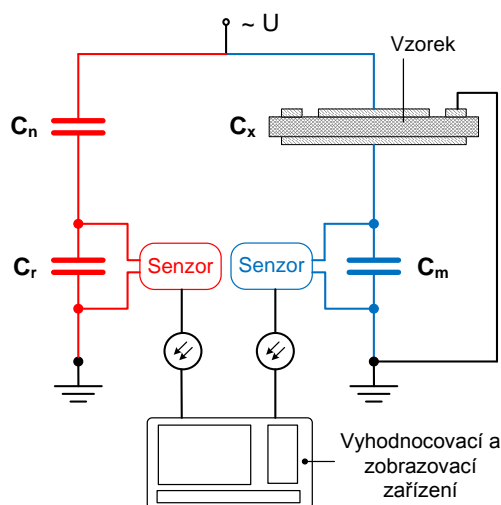


Obr. 2: Zapojení pro měření absorpčních proudů.

Velikost ztrátového činitele  $tg\delta$  izolačního materiálu je určována pohybem volných a vázaných nosičů v dielektriku vystaveném střídavému poli. Na základě toho poskytuje důležité informace o dielektrických ztrátách izolačního materiálu. Ty určují množství elektrické energie, která se v objemu dielektrika přemění v jinou formu energie, většinou tepelnou.

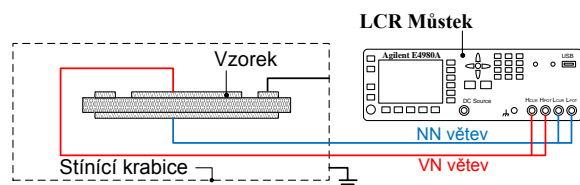
Zvyšováním tohoto druhu ztrát tak dochází ke vzniku tepla, které je potřeba vhodně odvést. Nedojde-li k tomu, následuje další ohřev materiálu, který může vést až k tepelnému průrazu. Velikost  $tg\delta$  závisí na množství vlhkosti a jiných nečistot v systému. Frekvenční závislost tohoto parametru pak velikostí a polohou lokálních maxim ukazuje na druhy relaxačních procesů uvnitř dielektrika [6][7].

Měření ztrátového činitele  $tg\delta$  bylo provedeno na automatickém můstku **LDIC**. Určení hodnoty ztrátového činitele je provedeno na základě velikosti fázového úhlu mezi napětími, která se objeví na nízkonapěťových kondenzátorech  $C_m$  a  $C_r$ .



Obr. 3: Schéma zapojení pro měření ztrátového činitele.

Měření frekvenční závislosti ztrátového činitele  $tg\delta$  bylo provedeno na LCR můstku **Agilent E4980A** s frekvenčním rozsahem 20 Hz ÷ 2 MHz při 5 V. Schéma zapojení je uvedené na Obr. 4:.



Obr. 4: Schéma pro zapojení frekvenční závislosti ztrátového činitele.

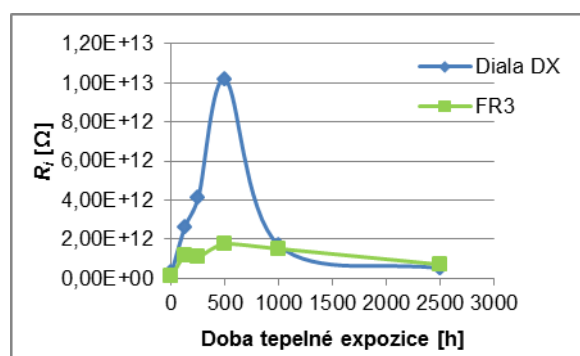
Všechna měření byla provedena přibližně při stejných podmínkách konkrétně při pokojové teplotě 23 °C, tlaku 96 kPa a vlhkosti 45 %.

## VYHODNOCENÍ

V následujících odstavcích jsou uvedeny výsledky měření jednotlivých parametrů a jejich změna v důsledku tepelné expozice.

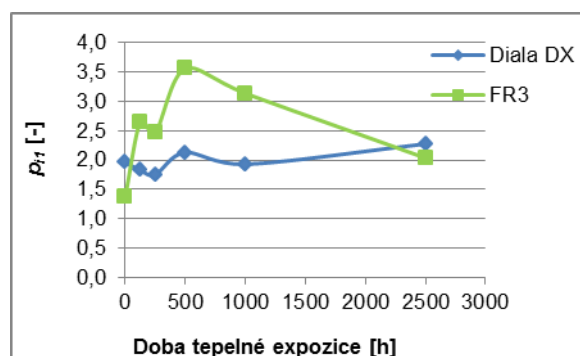
Změna izolačního odporu v závislosti na tepelné expozici je uvedena na Obr. 5: Nejvyšší hodnota izolačního odporu byla změřena u obou typů vzorků

izolačního systému v čase 500 h. U vzorků v oleji Diala DX se jednalo o hodnotu  $10,20 \cdot 10^{12} \Omega$  a v oleji FR3  $1,75 \cdot 10^{12} \Omega$ . Vlivem tepelné expozice došlo mezi 500 h a 2500 h u obou vzorků v obou olejích k poklesu izolačního odporu v důsledku vzrůstajícího vodivostního proudu ve vzorcích. V minerálním oleji nastal mezi 500 h a 1000 h v porovnání s olejem na bázi přírodních esterů významný pokles sledovaného parametru přibližně o řád. Při 2500 h byla hodnota izolačního odporu  $0,51 \cdot 10^{12} \Omega$  (Diala DX) a  $0,72 \cdot 10^{12} \Omega$  (FR3). V případě vzájemného porovnání dosahoval minerální olej proti FR3 vyšší hodnoty izolačního odporu v časech 0 h, 125 h, 250 h, 500 h poté dosahoval obdobných hodnot jako FR3 a při 2500 h byla už hodnota nižší.



Obr. 5: Závislost izolačního odporu na době tepelné expozice.

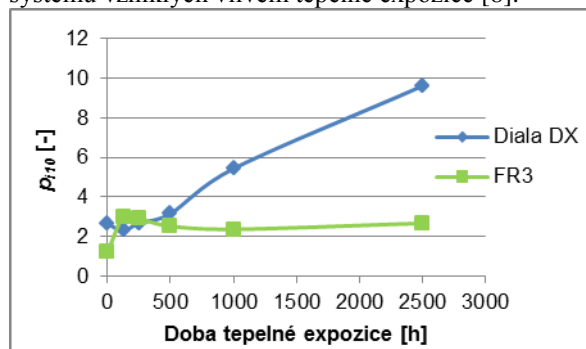
Jednominutový polarizační index s tepelnou expozicí od doby 500 h u vzorků v oleji Diala DX pozvolna rostl, zatímco v případě FR3 lineárně klesal. Při 2500 h se hodnoty pro vzorky v obou olejích ustálily na 2,28 (Diala DX) a 2,04 (FR3).



Obr. 6: Závislost jednominutového polarizačního indexu na době tepelné expozice.

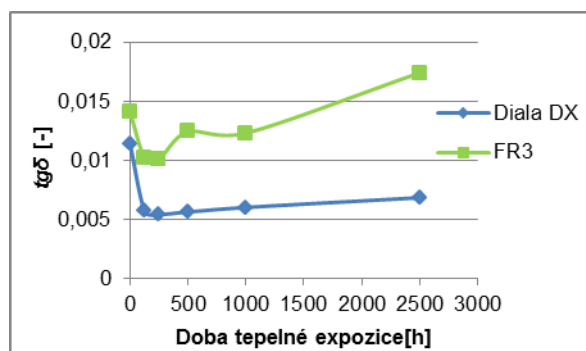
Hodnoty desetiminutového polarizačního indexu se projevovaly od intervalu 500 h strmým růstem v minerálním oleji a pozvolným zvýšením v případě FR3. V minerálním oleji se projevovала větší relaxace, tzn. že proud v 600 sekundě oproti 60 vícenásobně poklesl. To v případě vzorků v minerálním oleji ukazuje na delší dobu potřebnou pro ustálení relaxačních polarizačních mechanismů

způsobených degradačními produkty izolačního systému vzniklých vlivem tepelné expozice [8].



Obr. 7: Závislost desetiminutového polarizačního indexu na době tepelné expozice.

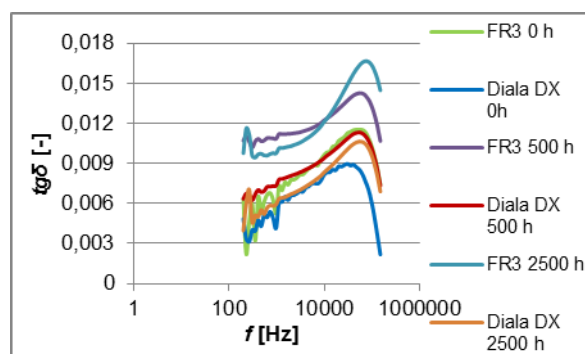
Ztrátový činitel vlivem tepelné expozice mezi počátečním stavem a 125 h tepelné expozice u obou typů testovaných vzorků poklesl. Nejnižší hodnoty dosáhl  $tg\delta$  v čase 250 h. U vzorků izolačního systému olej-papír s olejem Diala DX byla hodnota  $tg\delta$  0,00545 a v oleji FR3 0,00101. Poté se  $tg\delta$  začal pozvolna zvyšovat a nejvyšší hodnoty konkrétně 0,00686 (Diala DX) a 0,01739 (FR3) dosáhl při 2500 h. Uvedené hodnoty, byly změřeny s přesností 0,0005. Naměřené výsledky tedy korespondují s výsledky předchozích experimentů, provedených na našem pracovišti [4][9]. Zde bylo konstatováno, že olej potřebuje určitou dobu na vhodnou impregnaci lepenky, ze které během expozice přechází do oleje ještě zbytková vlhkost. V intervalu 500 h až 2500 h byl při vzájemném porovnání strmější nárůst pozorován u vzorků s FR3. Indikuje to, že v případě vzorků v oleji na bázi přírodních esterů tepelná expozice způsobuje vyšší tepelné ztráty než s olejem minerálním.



Obr. 8: Závislost ztrátového činitele na době tepelné expozice.

Na Obr. 9: je znázorněna frekvenční charakteristika ztrátového činitele  $tg\delta$  a jeho změna vlivem tepelné expozice. Pro větší přehlednost byly vybrány jen určité doby tepelné expozice konkrétně 0 h, 500 h, 2500 h. Ve frekvenční charakteristice lze na základě výsledků provedených měření rozlišovat dvě frekvenční oblasti, ve kterých se projevují odlišné trendy naměřených hodnot. Uvedené frekvenční

oblasti jsou mezi 200 Hz až 10 kHz a 10 kHz až 150 kHz. Ztrátový činitel v počátečním stavu měl u vzorků v obou testovaných olejích v první frekvenční oblasti kolísavý charakter. Tento průběh odpovídá výše zmíněné hypotéze o určité době, kdy se musí atomy oleje vzájemnou interakcí s atomy celulózyového řetězce vhodně spojit a tak ji zajistit vhodné elektrické vlastnosti, což potvrzuje stabilizace tvaru křivek změřených na vzorcích v následujících odběrech.



Obr. 9: Frekvenční závislost ztrátového činitele.

Na Obr. 10: a Obr. 11: jsou uvedeny numerické derivace  $tg\delta'(f)$  pro olej Diala DX respektive FR3 počítané dle vztahu (2).

$$tg\delta'(f_i) = \frac{|tg\delta(f_i) - tg\delta(f_{i+n})|}{|f_i - f_{i+n}|} \quad (2)$$

kde  $tg\delta'(f_i)$  je numerická derivace ztrátového činitele počítaná pro frekvenci  $f_i$  [-],  
 $f_i$  je hodnota frekvence, pro kterou se počítá numerická derivace [Hz],  
 $n$  je vzdálenost  $f_i$  od následujícího bodu ve frekvenční oblasti [-].

Důvodem aplikace numerické derivace bylo nalezení frekvencí, ve kterých se významně projevuje tepelná degradace měřených vzorků charakterizovaná zvýšením směrnice tečny změřeného průběhu. Pro větší názornost byla v Obr. 10: a Obr. 11: zobrazena frekvence na ose x s konstantní vzdáleností mezi body nikoliv ve skutečném měřítku hodnot. Data byla derivována ve frekvenčním rozsahu 231 kHz až 13 kHz.

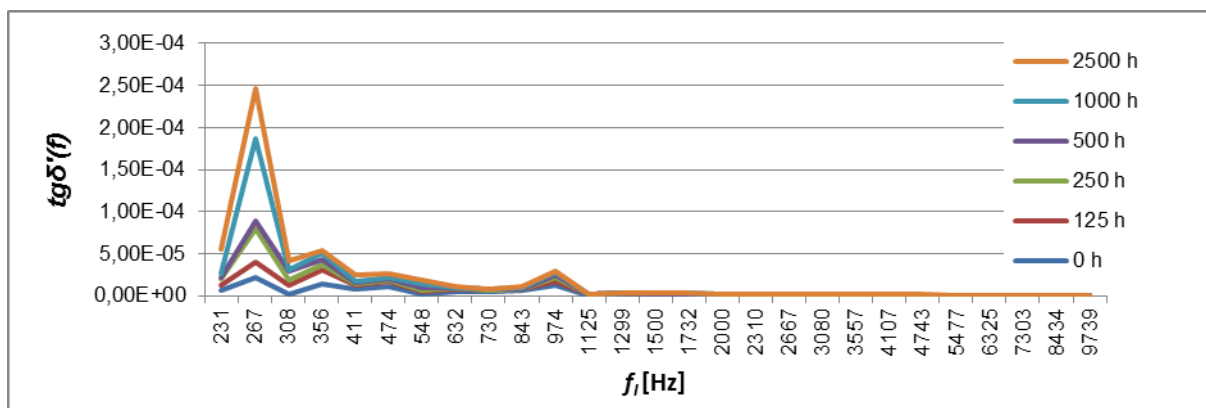
Vlivem tepelné degradace docházelo k postupnému zvyšování píků při frekvenci 267 Hz, 308 Hz a 974 Hz. V uvedených frekvenčních oblastech se dle autorů projevuje výskyt migračních polarizací, jejichž vznik způsobují volné nosiče náboje, které se zachytávají v nehomogenitách izolačního materiálu pevné složky. Měření stupně polymerace provedené pro vzorky izolačního systému olej-papír [10][11] při 110 °C po dobu 2500 h ukazují na přibližně dvojnásobně rychlejší štěpení celulózyového řetězce v minerálním oleji oproti oleji na bázi přírodních



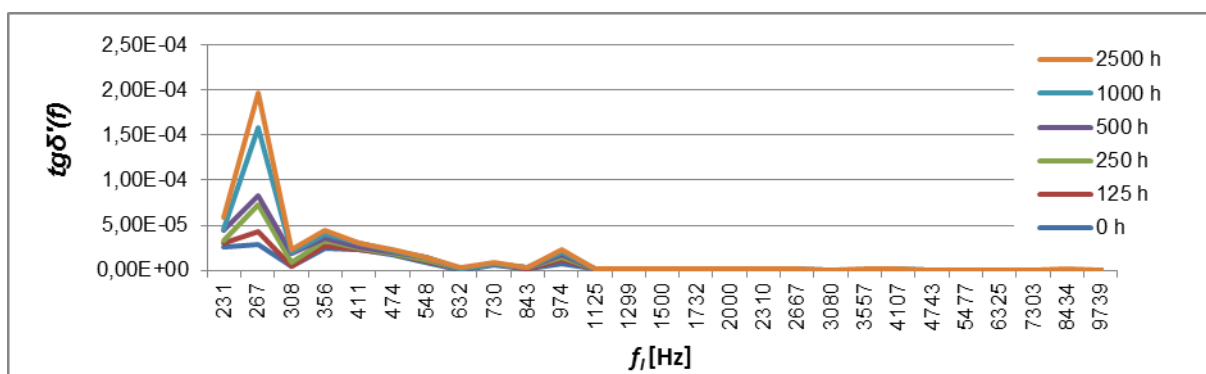
esterů. To by podávalo vysvětlení v případě vyšší směrnice vzorků v oleji Diala DX oproti FR3.

V druhé frekvenční oblasti 10 kHz ÷ 150 kHz se tepelná expozice projevovала posuvem vrcholu ztrátového činitele  $tg\delta$  směrem k vyšším hodnotám i frekvencím. Uvedený vrchol může být důsledkem polárnosti celulózy, ze které je pevná složka vzorků

izolačního systému vyrobena. Po 2500 h tepelné expozice dosahovala hodnota vrcholu ztrátového činitele  $tg\delta$  0,011 při frekvenci 85 kHz. Ve druhé měřené oblasti frekvencí docházelo vlivem tepelné expozice ke zvyšování hodnoty ztrátového činitele a posouvání vrcholu do vyšších frekvencí.



Obr. 10: Numerická derivace  $tg\delta(f)$  pro vzorky v oleji Diala DX.



Obr. 11: Numerická derivace  $tg\delta(f)$  pro vzorky v oleji FR3.

## ZÁVĚR

V rámci experimentu bylo provedeno měření vybraných elektrických parametrů za účelem vybrat ty nejvýhodnější pro detekci tepelného stárnutí u izolačních systémů s oleji na bázi přírodních esterů. Vzájemné porovnání polarizačních indexů vypočítaných z naměřených absorpčních proudů ukazují následující: Vzorky v oleji FR3 potřebují v porovnání s olejem minerálním kratší čas k ustálení vodivostního proudu procházejícím vzorkem. Relaxační mechanismy způsobené degradačními produkty tepelné expozice potřebují delší dobu potřebnou pro ustálení právě ve vzorcích Diala DX - lepenka, což indikuje i nižší stupeň polymerace tohoto typu systému v porovnání s FR3 [10][11]. Proto systém s olejem FR3 vykazoval stabilnější průběh vodivostního proudu vlivem tepelné expozice. Parametry polarizačního indexu v tomto případě reagovaly nejcitlivěji na změny v izolačním systému Diala – lepenka. Oproti tomu na změnu vzorků v oleji na bázi přírodních esterů FR3 během tepelné

expozice reagoval nejcitlivěji ztrátový činitel při 50 Hz. Na jeho průběhu jsou dobře patrné jednotlivé fáze stavu systému. Nejdříve dochází k odpařování přebytečné vody ze vzorků lepenky a vzájemnému propojení molekul oleje a lepenky, což má za následek vyšší hodnoty izolačního odporu a nižší ztrátového činitele. Po 500 h poté dochází ve vzorcích v obou olejích k pozvolnému zhoršování uvedených parametrů, které lze přisuzovat následkům tepelné degradace.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094, dále projektu TA03020251 „Izolační kapaliny šetrné k životnímu prostředí“ a Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2012-026 „Materiálové a technologické systémy v elektrotechnice.“

## LITERATURA

- [1] WISE Biodegradability Primer [online]. 2006 [cit. 2011-03-4]. Dostupné z WWW:<<http://www.wisesolutions.net/WISEbiodegradabilityprimer.pdf>>
- [2] SPARLING, Brian D.; AUBIN, Jacques. POWER TRANSFORMER LIFE EXTENSION THROUGH BETTER MONITORING [online].GE Energy, 2006 [cit. 2011-02-22]. Dostupné z WWW:<[http://www.gepower.com/prod\\_serv/plants\\_td/en/downloads/powergrid\\_europe07.pdf](http://www.gepower.com/prod_serv/plants_td/en/downloads/powergrid_europe07.pdf)>.
- [3] OOMMEN, T.V. Vegetable oils for liquid-filled transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2002, roč. 18, č. 1, s. 6-11.
- [4] MENTLÍK, V.; TRNKA, P.; ŠIRŮČEK, M. et.al. Tepelné stárnutí izolačního systému transformátorů. In DESAM 2010. Slovakia (Mala Lucivna): University of Žilina, 2010, pp. 79, ISBN 978-80-89478-01-9
- [5] MENTLÍK, V.; PIHERA, J.; POLANSKÝ, R.; PROSR, P.; TRNKA, P. *Izolační systém olej - lepenka Fassmann*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2007. 29 s.
- [6] MENTLÍK, V. Dielektrické prvky a systémy. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 978-80-7300-189-6.
- [7] PORZEL, R.; NEUDERT E. a STRUM. M. *Diagnostik der Elektrischen Energietechnik: Techniken und Prozeduren zur Zustandsanalyse von elektrotechnische Betriebsmitteln*. Reiningen-Malmsheim: Expert verlag, 1996. ISBN 3-8169-1364-4.
- [8] RAPP, Kevin J. a LUKSICH J. Review of Kraft paper/natural ester fluid insulation system aging. *International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*. 2011, s. 1-4. DOI: 10.1109/ICDL.2011.6015464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6015464&isnumber=6015049>
- [9] POLANSKÝ, R.; PROSR, P.; MENTLÍK, V.; PIHERA, J.; TRNKA, P. Insulation System of Power Transformers - Behavior Comparison of Mineral Oils and Natural Ester Dielectric Fluids. *Journal of Energy and Power Engineering*, 2010, roč. 4, č. 12, s. 51-56. ISSN: 1934-8975
- [10] YANG, Lijun; LIAO, Ruijin; SUN, Caixin; YIN Jianguo a ZHU Mengzhao. Influence of vegetable oil on the thermal aging rate of kraft paper and its mechanism. In: *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. 2010, s. 381-384. DOI: 10.1109/ICHVE.2010.5640746. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5640746&isnumber=5640703>
- [11] LIAO, Ruijin; HAO, Jian; YANG, Lijun; LIANG, Shuaiwei a YIN, Jianguo. Improvement on the anti-aging properties of power transformers by using mixed insulating oil. In: *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. 2010, s. 588-591. DOI: 10.1109/ICHVE.2010.5640772. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5640772&isnumber=5640703>
- [12] STRAKA, V.; ZÍDEK, P. Online monitoring výkonových transformátorů s ohledem na rozložení a dynamiku vlhkosti. In *Dielectric and Insulating Systems In Electrical Engineering*. Bratislava : STU, 2010. s. 50-54. ISBN 978-80-227-3366-3.
- [13] Duy, C.T.; Denat, A.; Lesaint, O.; Bonifaci, N.; Bertrand, Y.; , "Moisture and temperature effects on conduction and losses in modified rape-seed insulating oil," *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2007. CEIDP 2007. Annual Report - Conference on , vol., no., pp.647-650, 14-17 Oct. 2007
- [14] Koch, M.; Tenbohlen, S.; , "Evolution of bubbles in oil-paper insulation influenced by material quality and ageing," *Electric Power Applications, IET* , vol.5, no.1, pp.168-174, January 2011doi: 10.1049/iet-epa.2010.0028
- [15] HEATHCOTE, M. J., *J&P Transformer book*. Oxford: Elsevier, 2008. 969 s. ISBN 978-0-7506-8164-3.
- [16] MENTLÍK, V., et al. Diagnostika elektrických zařízení. Praha : BEN - technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [17] ČSN EN 62631-3. *Dielektrické a izolační vlastnosti pevných izolačních materiálů*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [18] ČSN IEC 60076-7. *Výkonové transformátory: Směrnice pro zatěžování olejových výkonových transformátorů*. Praha: Český normalizační institut, 2007.