

Jozef Király

## Thermal degradation of insulating systems

Článok sa zaoberá tepelným starnutím magnetickej kvapaliny založenej na báze magnetickej kvapaliny v počiatočnej fáze starnutia. Vplyv starnutia bol pozorovaný na zmenách kapacity, ktorá reprezentuje štruktúrne zmeny v kvapalnom izolačnom systéme. Pre lepšie hodnotenie experimentu boli experimenty vykonané vo frekvenčnom rozsahu od 100Hz do 2MHz. Okrem vplyvu frekvencie na kapacitu vzoriek je posudzovaný rovnako vplyv koncentrácie magnetických nanočastíc v týchto kvapalinách, ktoré rovnako ovplyvňujú kapacitu vzoriek.

Kľúčové slová: Magnetická kvapalina, transformátorový olej, tepelné starnutie

The article deals with thermal ageing of transformer oil based ferrofluid at initial stage of ageing. Influence of ageing in this article is observed on changes of electrical capacitance, whose represents structural changes in liquid insulation. For better evaluation are all experiments made in frequency range from 100 Hz to 2MHz. Except the influence of frequency on capacitance of these samples it have to be noted that concentration of magnetic nanoparticles in these fluids, which also affects capacitance of samples. Keywords: Magnetic fluid, transformer oil, thermal ageing, oleic acid

### I. ÚVOD

Minerálne izolačné oleje sú najbežnejšími izolačnými kvapalinami používanými v transformátoroch ako chladiace a izolačné médium vinutí. Počas prevádzky transformátora sú izolačné oleje vystavené mnohým degradačným faktorom, akými sú napríklad tepelné, elektrické a chemické namáhanie. Pôsobenie týchto vplyvov vedie k nevratným zmenám v dielektrických parametroch týchto materiálov. Okrem bežných inhibovaných minerálnych olejov sú často používané prírodné estery alebo koloidne suspenzie ako napr. ferrokvapaliny. Degradačné procesy v týchto kvapalinách sú však odlišné od procesov v minerálnych olejoch. [1]

### II. STARNUTIE NANOKVAPALÍN ZALOŽENÝCH NA BÁZE MINERÁLNEHO OLEJA

Hlavnou zložkou nanokvapalín s časticami železa používaných v elektroenergetike je inhibovaný transformátorový olej. Prihliadnúc k tejto skutočnosti je mechanizmus degradácia do značnej miery zhodný s degradáciou čistého izolačného oleja.

Hlavným rozdielom je odlišný mechanizmus degradácie povrchovo aktívnej látky nanočastíc – surfaktantu. Obsah minerálneho oleja v týchto kvapalinách je na úrovni cca 80% až 85%, pričom zvyšok je tvorený surfaktantom a samotnými nanočasticami.

Vo všeobecnosti môžeme rozdeliť degradačné procesy do dvoch skupín – ako pôsobenie tepelnej degradácie a pôsobenie oxidácie. [5][6][7][14]

Z pohľadu štruktúrnych zmien je nutné poznamenať, že pôsobenie vysokej teploty môže viesť k uvoľneniu slabších molekulových väzieb. Tieto uvoľnené väzby môžu spôsobiť vznik uhlíkových častíc, ktoré môžu významne ovplyvniť dielektrickú pevnosť oleja. Okrem uvoľneného uhlíka môžu byť týmto procesom uvoľnené aj iné látky ako napr. vodík, metán, etylén, acetylén a pod. Typ a množstvo uvoľnených látok je závislé na teplote, vplyvom ktorej dochádza k uvoľneniu molekulárnych väzieb. [5][6][7][12][14]

Z pohľadu významnosti je nutné ako je uvedené vyššie uvažovať rovnako s príspevkom degradácie vplyvom oxidácie. Tento vplyv je

možné do značnej miery možné potlačiť použitím inhibítorov. Celkové množstvo inhibítorov v oleji môže byť rovnako považované za indikátor kondície transformátorového oleja.

V prípade nanokvapalín je nutné prihliadnuť práve na degradáciu a uvoľňovanie surfaktantu do objemu izolačného oleja. Jedným z často používaných surfaktantov je kyselina olejová, ktorá patrí do skupiny prírodných esterov, ktorých oxidačná stabilita je závislá na stupni nasýtenia. Nenasýtené väzby v týchto kvapalinách môžu spôsobiť zníženie oxidačnej stability v dôsledku možnosti rozkladu väzieb v kyseline olejovej.

### III. EXPERIMENT

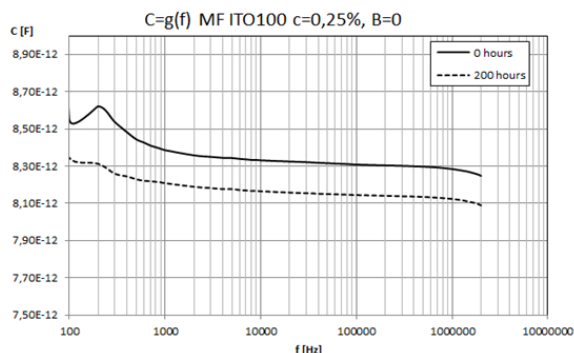
Experiment bol rozdelený do dvoch krokov. Prvým krokom je získať počiatočné hodnoty kapacity vzoriek. Následne bolo vykonané zrýchlené starnutie pri teplote 100°C po dobu 200 hodín. Následne boli opätovne zmerané kapacity vzoriek.

Pre porovnanie boli vykonané experimenty na troch vzorkách s rozdielnou koncentráciou nanočastíc (0,25%, 0,5%, 1%), pričom vzorky boli založené na štandardnom inhibovanom transformátorovom oleji. Meranie kapacity bolo vykonané na elektródovom systéme valcového tvaru s priemerom 20mm a medzerou 1mm. Frekvenčné charakteristiky kapacity boli merané v rozsahu 100Hz – 2MHz.

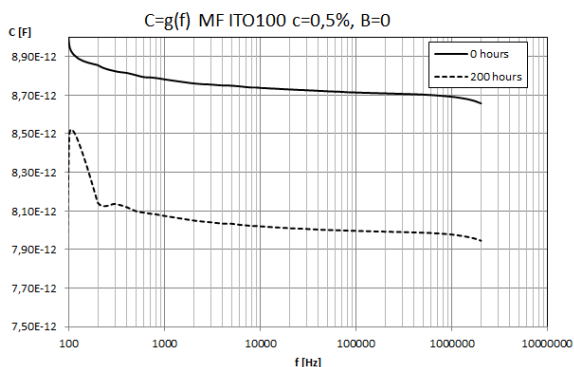
### IV. NAMERANÉ VÝSLEDKY

Prvé meranie bolo realizované na vzorkách s koncentráciou 0,25%. Vzhľadom na nízku koncentráciu častíc bola kapacita najnižšia z pohľadu vyhodnocovaných vzoriek. Ako je uvedené na obr. č.1, kapacita klesá so zvyšujúcou sa frekvenciou. V poslednej časti meraného frekvenčného rozsahu je zaznamenaný pokles kapacity, ktorý potvrdzuje predpoklad, že relatívna permitivita sa znižuje v kaskádach. Po procese starnutia došlo k zníženiu kapacity o cca 8,1 až 8,5pF v celom rozsahu. V prípade časti frekvencie od 100Hz do cca 300Hz je pozorovateľný výkyv kapacity spôsobený procesom štrukturalizácie nanočastíc do smeru magnetickeho poľa. Pre vyššie

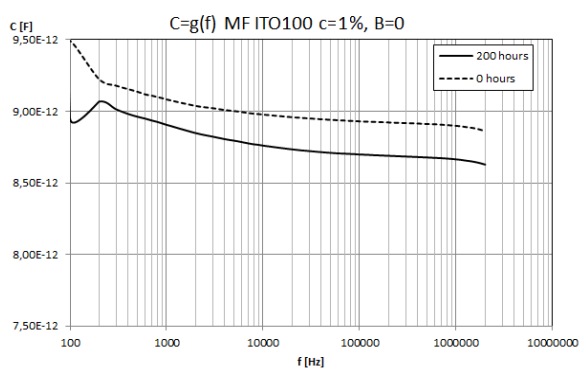
koncentrácie (0,5%) je frekvenčná závislosť kapacity podobná ako v prípade predošlej vzorky, avšak je nižšia o cca 0,7pF. Tento rozdiel môže byť spôsobený rozdielnym navlhnutím vzoriek pred začiatkom experimentu. Skutočný rozdiel medzi jednotlivými koncentraciami bude teda pozorovateľný až po druhej, resp. tretej interakcii starnutia (500 hodín, resp. 1000 hodín)



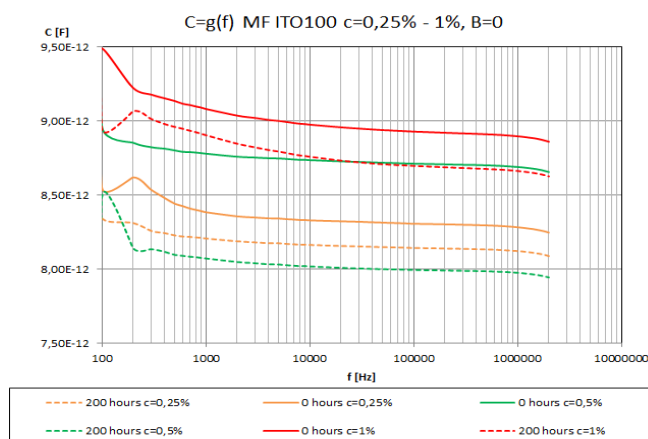
Obr. 1. Frekvenčná závislosť kapacity pre nanokvapalinu 0,25% založenú na ITO.



Obr. 2. Frekvenčná závislosť kapacity pre nanokvapalinu 0,5% založenú na ITO



Obr. 3. Frekvenčná závislosť kapacity pre nanokvapalinu 1% založenú na ITO



Obr. 4. Porovnanie frekvenčných závislostí kapacít pre testovanú nanokvapalinu

## V. PROCES DEGRADÁCIE

Ako bolo spomenuté v predošlých častiach tohto článku, degradačné procesy nanokvapalín na báze transformátorového oleja sú ovplyvnené rôznymi vplyvmi. Do značnej miery je to spôsobené komplexnou štruktúrou týchto kvapalín ktoré sú tvorené minerálnym olejom, prírodnými esterami a nanočasticami magnetitu.

Z pohľadu vplyvu vlhkosti vo vzorkách môžeme tieto degradačné procesy rozdeliť do dvoch skupín z pohľadu vzniku vlhkosti. Prvou je vlhkosť uvoľnená z prírodných esterov použitých ako surfaktant vplyvom esterifikácie. Ďalšou možnosťou je vznik reverzného procesu hydrolyzy, ktorou môžu vzniknúť mastné kyseliny a glycerol. Glycerol významným spôsobom ovplyvňuje relatívnu permitivitu vzhľadom na fakt, že ide o silne polárnu kvapalinu. Rovnako vlhkosť absorbovaná z prostredia predstavuje významný degradačný činiteľ.

Významnejším faktorom starnutia je vplyv vysokej teploty ktorá môže spôsobiť vznik nových látok v objeme izolačného oleja uvoľnením väzieb medzi molekulami oleja. Tento typ starnutia je pozorovateľný najmä po dlhom tepelnom namáhaní. Cieľom tohto článku bolo stanoviť aký vplyv má počiatočná vlhkosť na vlastnosti vzoriek. Porovnanie bolo realizované s rôznymi koncentraciami

## VI. ZÁVER

Cieľom tohto článku bolo vykonať prvotné porovnanie elektrickej kapacity vzoriek rôznych koncentrácií počas rôzneho stupňa tepelného starnutia. Ako bolo zistené, v procese starnutia vzoriek dochádzalo k zmenám meraných parametrov, čo bolo spôsobené najmä zmenou vlhkosti vo vzorkách a rovnako príspevkom novo vzniknutých cudzích látok v procese degradácie. Bolo teda potvrdené, že mechanizmus starnutia týchto kvapalín je podobný ako pri konvenčných izolačných olejoch s rozdielom príspevku rozkladu surfaktantu na prírodné estery. Cieľom ďalších stupňov vývoja by malo byť posúdenie dlhodobého tepelného namáhania spolu s kvalifikovaním a kvantifikovaním novo-vzniknutých látok v objeme izolačného oleja.

## POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore Agentúry na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu APVV-19-0576 „Sebestačnosť elektroenergetiky v podmienkach liberalizovaného trhu s elektrinou“.

## LITERATÚRA

- [1] CHAUDHARI, S.; PATIL, S.; ZAMBARE, R.; CHAKRABORTY, S., "Exploration on use of ferrofluid in power transformers," Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 2012 IEEE 10th International Conference on the , vol., no., pp.1,4, 24-28 July 2012 doi: 10.1109/ICPADM.2012.6318921
- [2] JUNG-II JEONG; JUNG-SIK AN; CHAN-SU HUH, "Accelerated aging effects of mineral and vegetable transformer oils on medium voltage power transformers," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.19, no.1, pp.156,161, February 2012
- [3] ABDI, S.; BOUBAKEUR, A.; HADDAD, A., "Influence of thermal ageing on transformer oil properties," Dielectric Liquids, 2008. ICDL 2008. IEEE International Conference on , vol., no., pp.1,4, June 30 2008-July 3 2008
- [4] CHEN, X.; MORSHUIS, P. H F; LENNON, B.; SMIT, J.J., "Experimental investigation on dielectric spectroscopy of insulating paper and oil," Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2010 Annual Report Conference on , vol., no., pp.1,4, 17-20 Oct. 2010 doi: 10.1109/CEIDP.2010.5723957
- [5] WIKLUND P.; PAHLAVANPOUR B. "Aging oils in aging transformers", in Energize. 2011; p. 35-36.
- [6] OOMMEN, T. V., "Vegetable oils for liquid-filled transformers," Electrical Insulation Magazine, IEEE , vol.18, no.1, pp.6,11, Jan.-Feb. 2002 doi: 10.1109/57.981322
- [7] LIJUN YANG; RUIJIN LIAO; CAIXIN SUN; HUIGANG SUN, "Study on the Influence of Natural Ester on Thermal Ageing Characteristics of Oil-paper in Power Transformer," High Voltage Engineering and Application, 2008. ICHVE 2008. International Conference on , vol., no., pp.437,440, 9-12 Nov. 2008 doi: 10.1109/ICHVE.2008.4773967
- [8] PRZYBYLEK, P., "The influence of temperature and aging of cellulose on water distribution in oil-paper insulation," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.20, no.2, pp.552,556, April 2013 doi: 10.1109/TDEL.2013.6508758
- [9] DABABNEH, M. S.; AYOUB, N.Y., "The effect of oleic acid on the stability of magnetite ferrofluid," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.31, no.6, pp.4178,4180, Nov 1995 doi: 10.1109/20.489918
- [10] DUMIRAN, L.M.; CIURIUC, A.; NOTINGHER, P.V., "Thermal ageing effects on the dielectric properties and moisture content of vegetable and mineral oil used in power transformers," in Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2013 8th International Symposium on , vol., no., pp.1,6, 23-25 May 2013 doi: 10.1109/ATEE.2013.6563459
- [11] TENBOHLEN, S.; KOCH, M., "Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.25, no.2, pp.825,830, April 2010 doi: 10.1109/TPWRD.2009.2034747
- [12] VARGANICI C-D.; DURDUREANU-ANGHELUTA A.; ROSU D.; PINTEALA M. "Thermal degradation of magnetite nanoparticles with hydrophilic shell", in: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, no. 96, 2012 doi: 10.1016/j.jaap.2012.03.005
- [13] HELFRICH, C.; CARLSON, R., "Using Insulation Aging to Size Transformers in High-Ambient Temperature, Secondary Selective Applications," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.PP, no.99, pp.1,1 doi: 10.1109/TIA.2013.2290896
- [14] BARAL, A.; CHAKRAVORTI, S., "Assessment of non-uniform aging of solid dielectric using system poles of a modified debye model for oil-paper insulation of transformers," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.20, no.5, pp.1922,1933, Oct. 2013 doi: 10.1109/TDEL.2013.6633726
- [15] VIERTEL, J.; OHLSSON, K.; SINGHA, S., "Thermal aging and degradation of thin films of natural ester dielectric liquids," Dielectric Liquids (ICDL), 2011 IEEE International Conference on , vol., no., pp.1,4, 26-30 June 2011 doi: 10.1109/ICDL.2011.6015478
- [16] JUNG-II JEONG; JUNG-SIK AN; CHAN-SU HUH, "Accelerated aging effects of mineral and vegetable transformer oils on medium voltage power transformers," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.19, no.1, pp.156,161, February 2012 doi: 10.1109/TDEL.2012.6148514

## ADRESY AUTOROV

Jozef Király, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [jozef.kiraly@tuke.sk](mailto:jozef.kiraly@tuke.sk)