

## Posouzení systematických chyb při diagnostice navlhnutí výkonových transformátorů

Ing. Altmann, Ing, Bukviš

### 1. Úvod

Současné metody měření obsahu rozpuštěné vody v oleji a na ně navazující posouzení navlhnutí izolačního systému výkonových transformátorů, vedou v mnoha případech na rozporné a někdy i nereprodukovatelné závěry o stavu zkoumaného stroje.

Typický příklad z toho plynoucího rozporného diagnostického závěru poskytuje měření a interpretace naměřených hodnot před a po výměně olejové náplně staršího transformátoru.

Pokud je v obou případech změřena hodnota obsahu vody v oleji Karl Fischerovou (KF) metodou, pak je při stejné teplotě stroje vždy zjištěn ve vystárlém oleji vždy vyšší obsah vody než v oleji novém.

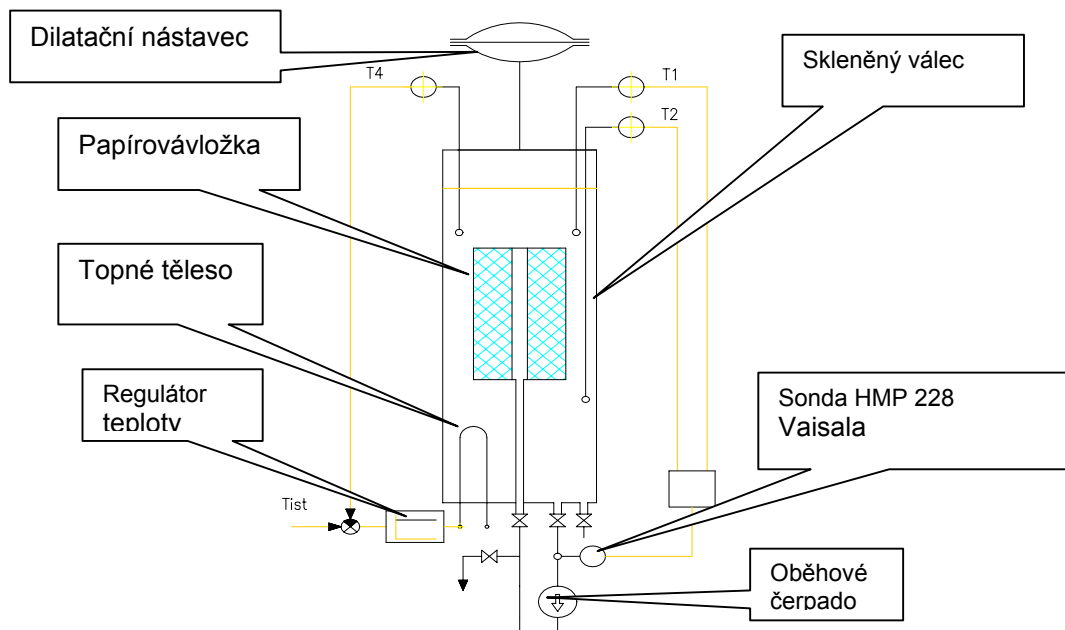
To je rozpor který nelze akceptovat. Řekněme, že v transformátoru máme 10 000 kg oleje a 1000 kg celulozových materiálů, transformátor provozujeme na stálé teplotě 50 C a ve vystárlém oleji jsme za přijatelně rovnovážného stavu naměřili KF metodou  $C_w = 30 \text{ ppm}$  a v novém oleji za stejných podmínek  $C_w = 20 \text{ ppm}$ .

Tomu pak před výměnou oleje podle Nielsenova diagramu např. podle L [2] (Fabre-Pichonův diagram) odpovídá obsah vody v celuloze  $C_p = 4.3$  váhových procent. V celuloze je tedy deponováno  $1000 \times 0.043 = 43 \text{ kg}$  vody a v oleji je rozpuštěno  $10\,000 \times 0.000030 = 0.3 \text{ kg}$  vody.

Výměnou oleje lze tedy z tohoto systému možno odstranit v nejlepším případě 0.3 kg vody. . Pokud nám KF měření v nové olejové náplni dává  $C_w = 20 \text{ ppm}$ , a odpovídající hodnota obsahu vody v celuloze je tedy  $C_p = 3.2 \%$ , pak je nyní v celuloze deponováno pouze 32 kg vody ? Kam zmizelo víc než 10 kg vody ?

### 2. Experimentální zařízení pro simulaci rovnovážného stavu systému olej-celuloza

Pro věrohodnou simulaci procesu výměny oleje v reálném výkonovém transformátoru jsme použili experimentální soustavu zobrazenou na obr. 1.



Obr. 1 Schéma experimentálního zařízení pro simulaci rovnovážných stavů v soustavě olej-celuloza

Při koncipování experimentu jsme zachovali pro transformátor typické váhové relace mezi olejem a celulozou (cca 10 : 1) a celý zkušební soubor jsme bohatě dimenzovali (experiment obsahuje min. 20 l oleje a min. 1.5 kg celulozy).

Snadné dosažení žádaných teplotních hladin v systému olej–celuloza je umožněno elektrickým ohřevem se spojitou regulací teploty oleje pomocí PI-regulátoru. Rychlé dosažení koncentrační rovnováhy a potlačení výskytu vrstev teplotní stratifikace v olejové náplni experimentu je zajištěno tím, že papírovou vložkou je stále protlačován olej oběhovým čerpadlem. Současně je s ohledem na potlačení vertikálního rozložení teplot v papírové vložce také pomocí dvou teplotních čidel T1 a T2 kontrolována minimální přípustná vertikální diference teploty oleje pod a nad vložkou.

Pro experiment byl použit skleněný válec s objemem cca 30 l, hermeticky uzavřený vůči okolí dilatačním nástavcem. Jako náplň bylo vždy použito cca 20 l transformátorového oleje a 1500 g transformátorového papíru.

Pro měření obsahu rozpuštěné vody v oleji tzv. F měření, byla použita sonda HMP 228 (Vaisala) [L3] v on-line režimu a obvyklý postup měření obsahu vody ve vzorku oleje Aquametrem (BAUR KFM 1000). Teploty v zařízení byly měřeny teplotními senzory Ni 1000.

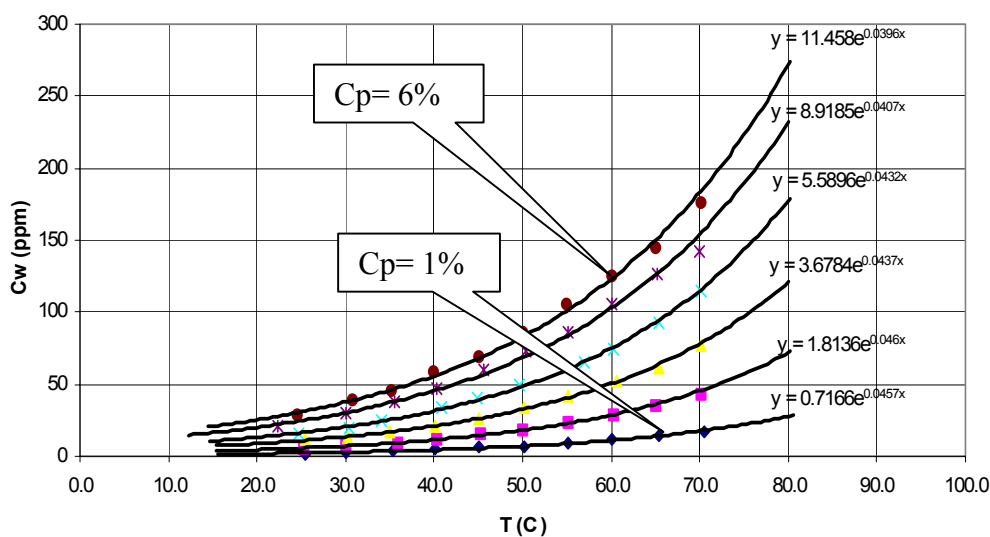
Pro experiment byly použity dva typy oleje. První měření bylo provedeno s novým inhibovaným naftenickým transformátorovým olejem s  $\text{ČK} < 0.005 \text{ mgKOH/g}$ .

Druhé měření bylo provedeno s vystárlým olejem bez obsahu inhibitoru. Při plnění bylo  $\text{ČK} = 0.18 \text{ mgKOH/g}$  a hodnota obsahu vody byla cca 25 ppm.

Vlastní měření bylo provedeno na 6-ti úrovních navlhnutí celulozy tj.  $C_p = 1$  až 6 váhových procent v intervalu 1 % a na teplotních hladinách 25 až 70 C v intervalu 5C.

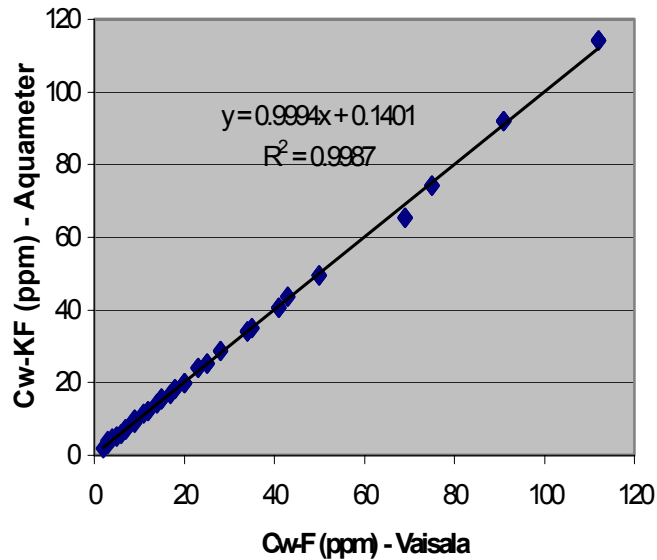
Vinutá papírová vložka z neběleného papíru byla nejprve vysušena v peci na úrovni 120C. Kontrolní váhové měření prokázalo, že zbytkový obsah vody byl ve všech případech pod 0.1% hm. Pak byla vložka nuceně nasycena vodou a to tak, že vložkou byla protlačována horká olejová emulze. Přesné dávkování vody do oleje bylo provedeno vážením. Měření obsahu vody v oleji pro dané nasycení papíru vodou a proměnné teplotě za rovnovážných podmínek

Výsledky měření na novém oleji jsou ukázány v obr.2 , numerické hodnoty naměřených dat lze nalézt v [L5].



Obr. 2 Závislost  $C_w = C_w(C_p, T)$  pro nový olej  $\text{ČK} < 0.005 \text{ mg KOH/g}$  měřeno Akvametrem (KF metoda)

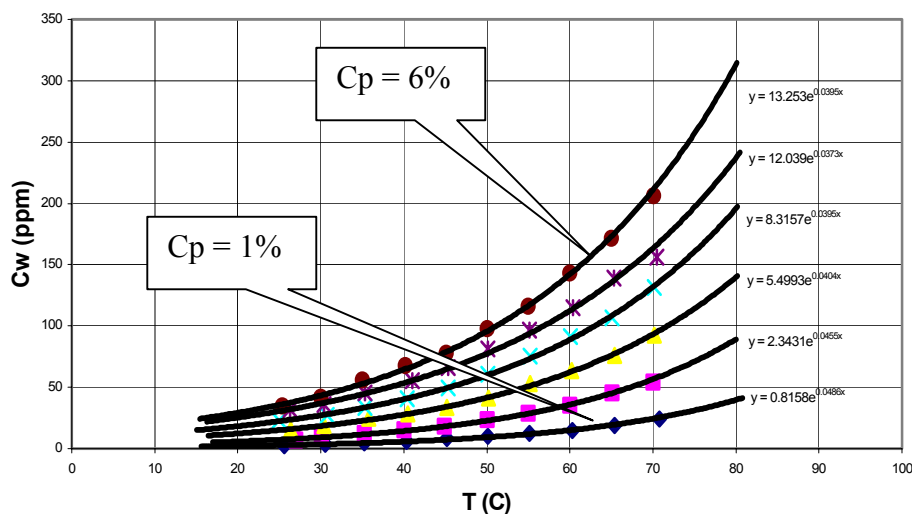
Protože jsme hodnotu  $C_w$  vždy paralelně měřili metodou KF a fyzikální metodou (F), bylo nutno nejprve posoudit, s jakou vzájemnou přesností obě metody v tomto případě pracují. K tomuto účelu byl použit tzv. verifikační diagram ukázaný na obr. 3, kde na ose X jsou vyneseny hodnoty  $C_w$  měřené sondou Vaisala a na ose Y hodnoty měřené Akvametrem pro stejnou teplotu a obsah vody v celuloze. Z praktických důvodů, jsme zde omezili rozsah porovnávaných hodnot na interval 0 – 120 ppm .



Obr. 3 Verifikace vzájemné přesnosti KF a F- metody – nový olej

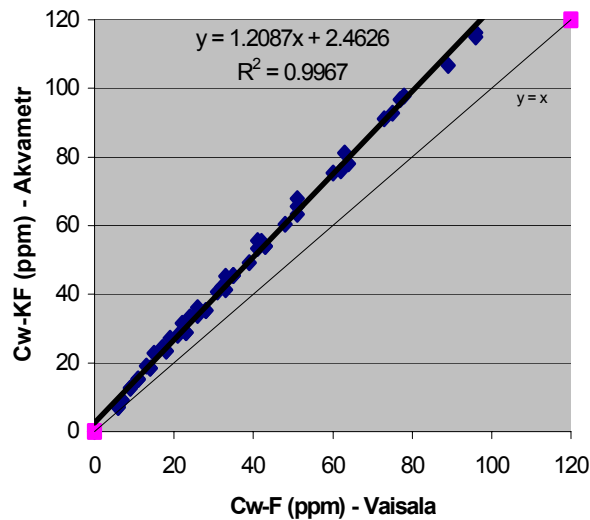
Z obrázku je dobře patrné, že v případě nového oleje s  $\check{C}K < 0.005$  měří obě metody prakticky stejné hodnoty obsahu vody v oleji. Korelační index  $R^2 = 0,9987$  dokazuje že obě metody měří prakticky stejné hodnoty  $C_w$  a F- metoda je tedy srovnatelně přesná s Aquametrem.

Zcela jiná situace nastala když jsme experiment naplnili vystárlým olejem s  $\check{C}K = 0.18$  mg KOH/g. Výsledky tohoto měření jsou ukázány na obr. 4.



Obr. 4 Závislost  $C_w = C_w(C_p, T)$ , vystárlý olej  $\check{C}K = 0.18$  mg KOH/g měřeno Akvametrem (KF metoda)

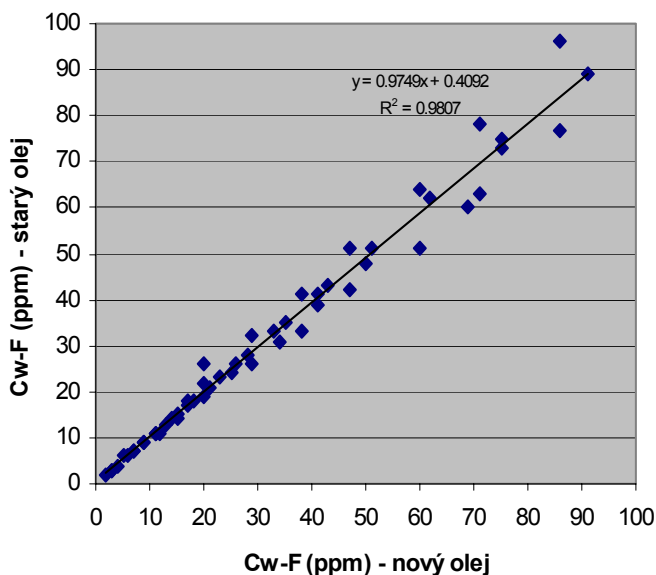
Graf na obr. 4 nám ukazuje, že Aquametr nyní měří výrazně vyšší hodnoty obsahu vody v oleji a to za podmínek, kdy mimo nárůstu čísla kyselosti oleje nedošlo v experimentu k žádným změnám. Tato situace je velmi dobře patrná z následujícího verifikačního diagramu.



Obr. 5 Verifikace přesnosti KF vůči F metodě - vystárlý olej  $\text{ČK} = 0.18 \text{ mg KOH/g}$

Lineární spojnice trendu nám nyní udává, že odchylka hodnot měřených Aquametrem činí pro  $\text{ČK} = 0.18 \text{ mg KOH/g}$  více než 20% vůči oleji nevystárlému. Korelační index  $R^2$  je opět velmi vysoký, což znamená že tato odchylka není náhodná. Protože jsme u tohoto vyhodnocení jako vztažné měření použily hodnoty získané F-metodou, musíme nyní prokázat, že takto zavedené hodnoty jsou skutečně vztažné.

Že tomu tak skutečně je, podává verifikační diagram, na jehož osu X nyní budeme vynášet hodnoty získané Vaisalou při měření nového oleje a na osu Y jsou vyneseny hodnoty měřené stejnou sondou a za stejných podmínek ale ve vystárlém oleji. Výsledek je patrný z obr. 6.



Obr. 6 Verifikace přesnosti F- metody – nový - vystárlý olej

Porovnáme-li nyní KF a F metodu je zřejmé že, že KF metodu lze použít pouze pro měření obsahu vody v s velmi nízkým číslem kyselosti. Naproti F-metoda je univerzální, protože ji

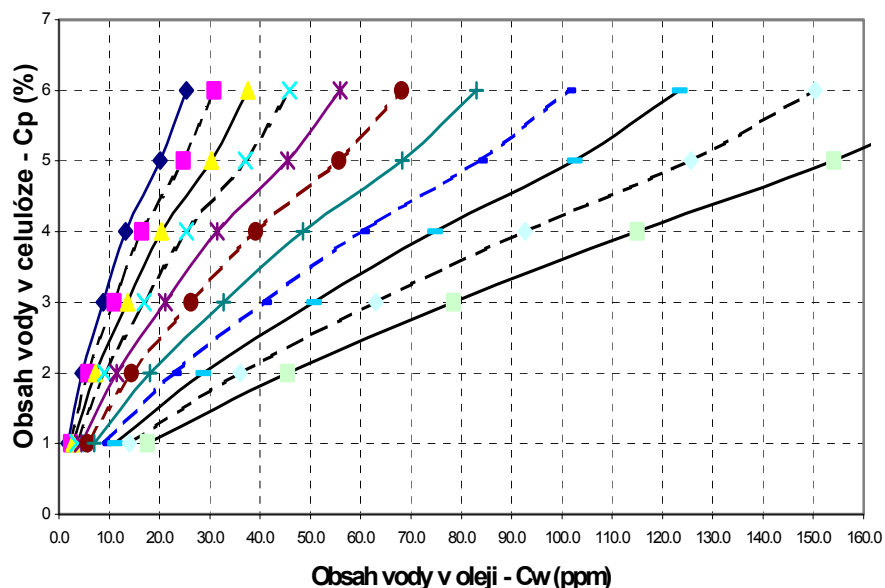
Ize zřejmě použít pro měření obsahu rozpuštěné vody ve všech olejích bez ohledu na jejich vystárnutí. Tento závěr bude samozřejmě nutno dále ověřit pro různá NN.

#### 4. Verifikace Nielsenova diagramu

Pro posouzení navlhnutí transformátoru musíme s přijatelnou přesností určit stupeň navlhnutí jeho celulozových materiálů..

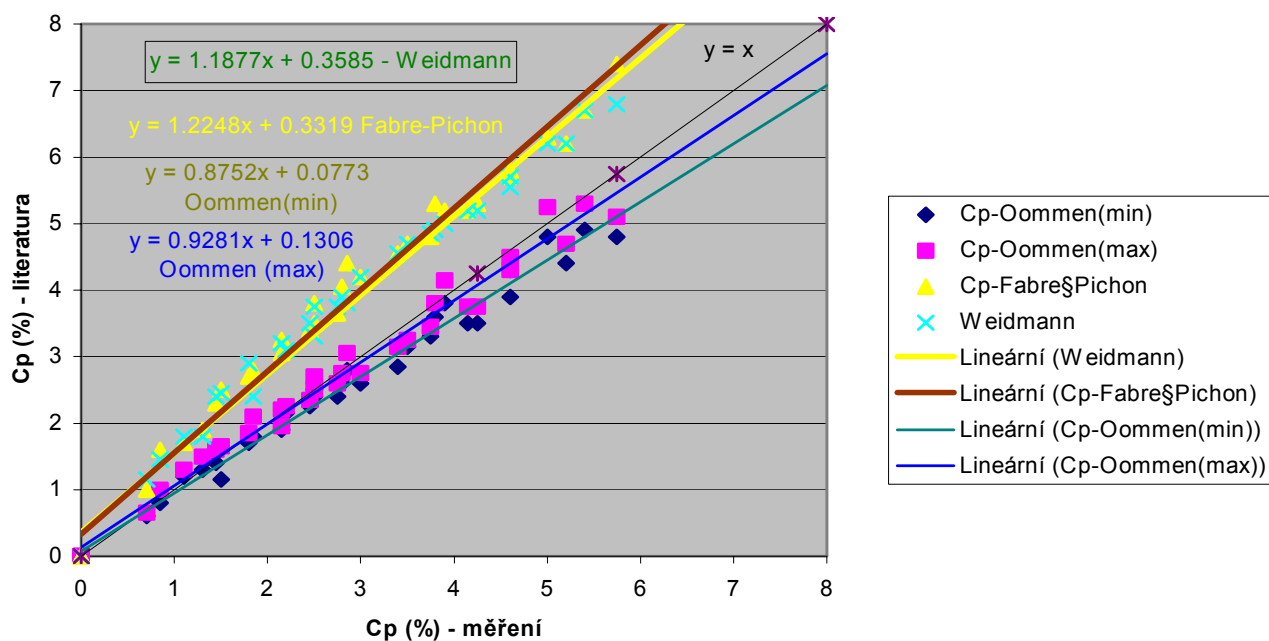
Nejčastěji je k tomuto účelu používán tzv. Nielsenův rovnovážný diagram, jehož pomocí je možno na základě změřeného obsahu vody a teploty transformátoru určit stupeň navlhnutí **všech** celulozových materiálů které transformátor obsahuje.

V obr. 7 je ukázán Nielsenův rovnovážný diagram získaný na základě našich měření.



Obr. 7 Nielsenův rovnovážný diagram – měřené hodnoty, [L1], ČK < 0.005 mgKOH/g

Posouzení přesnosti naměřených dat a z nich odvozeného Nielsenova diagramu vůči datům z literatury nám umožňuje následující obrázek.



Obr. 8 Porovnání dat naměřených v experimentu vůči datům z literatury [L2].

Na osu X tohoto verifikačního diagramu jsou vyneseny hodnoty  $C_p$  získané z našeho Nielsenova diagramu v rozmezí obsahu vody v oleji 10 až 80 (ppm) a teploty systému 30 – 70C, a na osu Y jsou vyneseny hodnoty  $C_p$  získané z Nielsenových diagramů Fabre-Pichona, Norisse (EHW-Weidmann) pro stejné pole vstupních parametrů  $C_w$  a  $T$ .

Z obrázku je dobře patrné, že nejčastěji užívané Nielsenovy diagramy zde zastoupené Fabre-Pichonem (1960) a Norissem (1963 - EHW-Weidmann), vedou na značné nadcenění obsahu vody v celuloze vůči našim datům.

Pro tato starší data nám lineární regrese udává v celém rozsahu veličiny  $C_p$  (1 – 6%) nejen velmi značnou kladnou relativní odchylku ale i absolutní odchylku.

Naproti tomu novější data Oommen (1983), která jsou považována za podstatně přesnější vystižení dané reality, vedou na malou zápornou odchylku a relativně dobrou shodu s námi naměřenými daty .

## 5. Závěr

Diagnostický rozpor, spojený s výměnou starého oleje za nový olej, který jsme zmínili v Úvodu je nyní snadno vysvětlitelný. Karl Fischerova metoda totiž měří nejen vodu rozpuštěnou v oleji ale i vodu obsaženou v produktech stárnutí. Po výměně starého oleje za olej nový, který produkty stárnutí neobsahuje musí tedy nutně obsah vody v oleji měřený KF poklesnout. Pokud by byla pro měření obsahu vody v oleji před a po výměně olejové náplně transformátoru použita F metoda (měřící pouze vodu rozpuštěnou v oleji) budou, za stejné teploty, naměřeny v obou případech téměř stejné hodnoty, protože obsah vody deponované v celuloze se změnil pouze nepatrně.

Náš experiment dále formou přímého měření dokládá, že aplikace starších verzí Nielsenova diagramu zřejmě vede na závažné nadcenění obsahu vody v celulozových materiálech výkonových transformátorů

V praxi se bohužel ukazuje, že při diagnostice starších transformátorů velmi často dochází k tzv. zřetězení obou zmíněných systematických chyb. Ve vystárlém oleji je KF metodou nejprve změřen vyšší než reálný obsah vody v transformátorovém oleji a následně je tato chyba ještě umocněna tím, že po vložení této hodnoty do staršího Nielsenova diagramu dostáváme neadekvátně vysokou hodnotu obsahu vody v celuloze. Výsledkem je chybná diagnóza ukazující na vysokou kontaminaci transformátoru vodou.

Tyto nepříjemné skutečnosti je možno jednoduše eliminovat nasazením fyzikálních metod měření obsahu vody a správnou interpretací naměřených dat.

Fyzikální metoda totiž zřejmě měří pouze to, co měřit má tj. vodu rozpuštěnou v oleji a pokud je následně použit správný Nielsenův diagram je možno správně určit i množství vody deponované v celuloze.

Takto korigovaný diagnostický postup, pokud bude ověřen pro dostatečný rozsah čísla kyselosti a u různých olejů, je tedy možno považovat za univerzální, protože dovoluje přesněji posoudit navlhnutí jakéhokoliv transformátoru bez ohledu na jeho stáří a typ použitého oleje.

## Literatura:

- L1 ..... Altmann  
**Provozní měření navlhnutí výkonových transformátorů**  
Preprint pro EW (2003)
- L2 .... Y.Du, M. Zahn at all  
**A Review of Moisture Equilibrium in the Paper-Oil System**  
Department of Electrical Engineering and Computer Science  
MIT, Cambridge, MA 02139 USA
- L3 ..... **HMP228 Moisture and Temperature Transmitter**  
Operating Manual, Vaisala 1998
- L4 ..... Bukviš  
**Výsledky z laboratorního experimentu pro určení rovnovážného stavu  
obsahu vody v izolačním oleji a celuloze**  
Interní zpráva 2003