

Kvantitativní ověření hermetizace výkonového transformátoru systémem TRAFOSEAL

Ing. Altmann

1. Úvod

V poslední době ovšem stále více nabývá na významu zcela nový technický a ekonomický problém spojený se stále rostoucím počtem transformátorů jejichž štítková životnost je již vyčerpána nebo bude vyčerpána s následujícími 5 – 10 létech.

Vznik tohoto problému je svázán s chronicky nedostatečnými investicemi do nákupu nových transformátorů. Míra reinvestic do nákupu nových strojů jak v Evropě [L6] tak v USA [L5], je v posledních nejméně 30-ti létech cca 1%. Předpokládaná životnost transformátor je cca 40 let a výsledkem je vznik celé generace vystárlých transformátorů.

Tato situace se stále zhoršuje i z ekonomického hlediska a v současné době je již zřejmé, že na skutečně masivní a jednorázový nákup nových transformátorů jednoduše nejsou a nebudou peníze.

Naopak z technického hlediska je možno za pozitivní fakt považovat skutečnost, že značná část vystárlých transformátorů má dostatečnou rezervu v mechanické pevnosti papírových (celulozových) izolantů tj. v parametru který životnost daných strojů dominantně ovlivňuje.

Tato rezerva, obvykle vyjadřována jako zbytková životnost papíru, může být ovšem velmi rychle vyčerpána, pokud:

- se daný transformátor již nachází ve vzestupné části vanové křivky [L6] kde stupeň depolymerizace papíru rychle roste v čase (za stejných okrajových podmínek)
- bude daný transformátor provozován za horších okrajových podmínek (např. na výrazně vyšším výkonu a teplotě)

Jednou dosažený stupeň degradace papíru v daném transformátoru samozřejmě nelze absolutně snížit, ale lze relativně jednoduše snížit rychlost degradace tím, že vhodně a dlouhodobě změníme okrajové podmínky za kterých bude transformátor pracovat. Rezultujícím zvýšením průměrné životnosti transformátorů např. o 10 a více let, pak můžeme přinejmenším dosáhnout toho, že nezbytné investice v budoucnu bude možno rozložit do delšího časového intervalu.

Současná technická praxe nabízí řadu řešení, kterými je možno výrazně zpomalit vnik atmosférického kyslíku a vlhkosti do výkonových transformátorů a tím nejen značně zpomalit jejich oxidační stárnutí [L1], ale podle posledních poznatků i stárnutí transformátoru generované výhradně jejich zvýšeným navhnutím [L2].

Mezi nejznámější z těchto řešení můžeme zařadit hermetizaci olejové náplně stroje pomocí:

- vhodné membrány nebo vaku v konzervátoru, která zpomalí kontaminaci oleje kyslíkem a vlhkostí na velmi nízkou úroveň odpovídající difuzi kyslíku a vodních páry použitou flexibilní přepážkou [L3]
- dusíkové předlohy – jejíž pomocí je v konzervátoru nad hladinou oleje vytvořen dusíkový polštář, který zabraňuje vnik vzdušného kyslíku a vlhkosti do chráněné olejové náplně [L4]
- flexibilních stěn radiátorů a nádoby transformátoru

Uvedená řešení jsou široce rozšířena a obvykle pracují uspokojivě, ovšem při detailnějším posouzení vykazují některé nepříjemné nedostatky :

- vak nebo membrána - omezená životnost, relativně vysoké pořizovací náklady, výměna konzervátoru, nutná průběžná kontrola nepropustnosti hermetizačního elementu

- dusíková předloha – nutná kontrola účinnosti, relativně vysoké provozní náklady spojené s výměnou tlakových lahví N₂, přesycení oleje dusíkem za vyššího než atmosférického tlaku, které může vyústit v zásahu Buchholzova relé, pokud tlak v dusíkovém polštáři (a okolí) prudce poklesne
- omezená pružnost kovových stěn vede na silné změny tlaku oleje s teplotou transformátoru, nutnost přetlakového / podtlakového jištění, nutná kontrola spolehlivosti, pouze pro nové stroje

2. Princip TRAFOSEALu

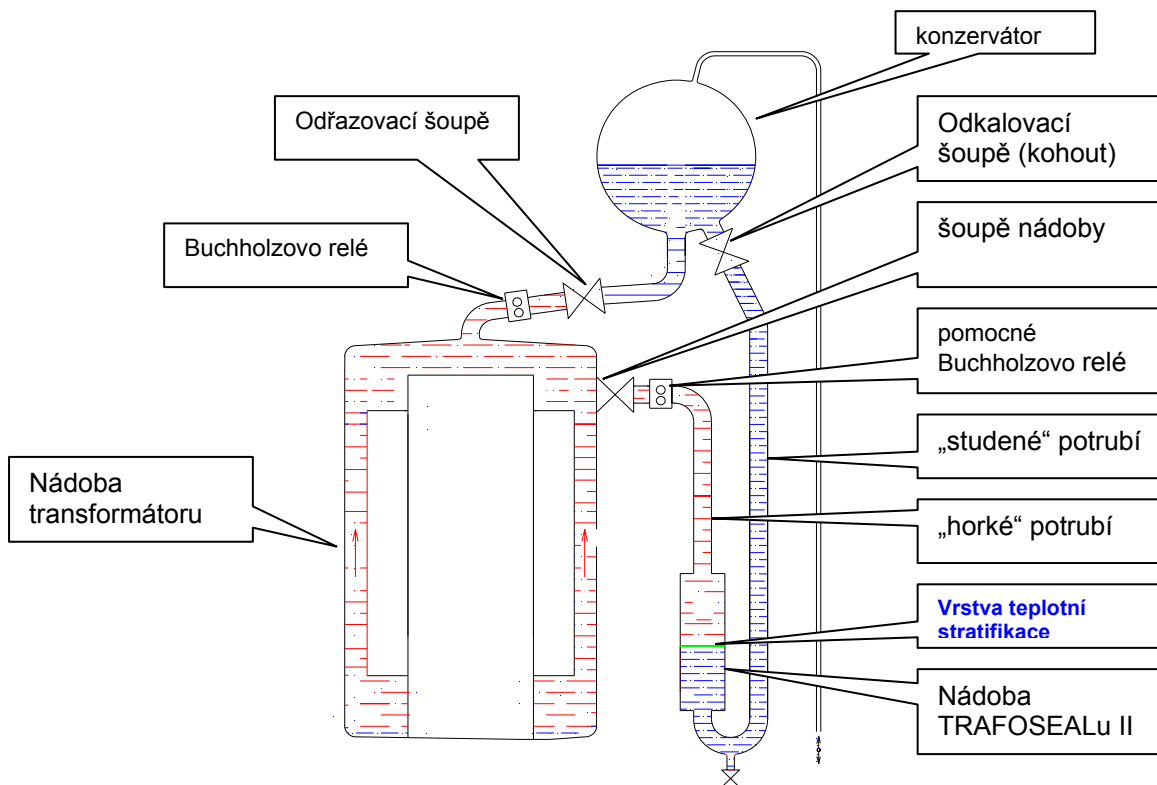
Z teoretických a experimentálních poznatků uvedených v [L1,L2] je zřejmé, že požadované snížení intenzity stárnutí musí být založeno na:

- snížení celkového průměrného navlhnutí transformátoru na max. cca 1–2% průměrného obsahu vody v celuloze, které zpomalí nebo zastaví stárnutí papíru způsobené nadměrnou vlhkostí
- hermetizaci stroje která zaručí trvalé snížení vniku kyslíku a vzdušné vlhkosti do daného transformátoru a tím zásadně omezí i další oxidační stárnutí (které jako by-product opět produkuje vodu)

V případě hermetizace transformátoru by ovšem měly být splněny i další podmínky:

- nesmí být příliš finančně a časově náročná a musí jibýt možno nasadit na stroje v provozu
- musí být snadno realizovatelná bez dlouhodobé odstávky transformátoru
- musí být dostatečně spolehlivá, bez dalších nároků na obsluhu a údržbu

Nový typ hermetizace, který shora uvedené požadavky obecně splňuje, je schématicky ukázán na obrázku 1.



Obr. 1 Schématické připojení TRAFOSEALu II k pecnímu transformátoru s volnou hladinou oleje v konzervátoru

Z obrázku je patrné, že dodatečná hermetizace transformátoru pomocí TRAFOSEALu II je snadno realizovatelná, protože na většině transformátorů jsou k dispozici obě potřebná připojovací místa (např. horní nebo dolní šoupě nádoby transformátoru určené pro připojení fitračního zařízení a odkalovací potrubí resp. odkalovací ventil konzervátoru).

Na rozdíl od standardního přímého propojení horní části nádoby transformátoru a konzervátoru pak nový způsob hermetizace potlačuje kontaminaci transformátoru tím, že:

- zabraňuje volnému směšování horkého oleje z nádoby transformátoru se studeným, vzduchem a vzdušnou vlhkostí, kontaminovaným olejem z konzervátoru
- odděluje horký a studený olej **vrstvou teplotní stratifikace**, která se spontánně vytváří na rozhraní mezi horkým a studeným olejem v nádobě TRAFOSEALu a chová se jako dokonale pružná a posuvná horizontální „membrána“ [L7]

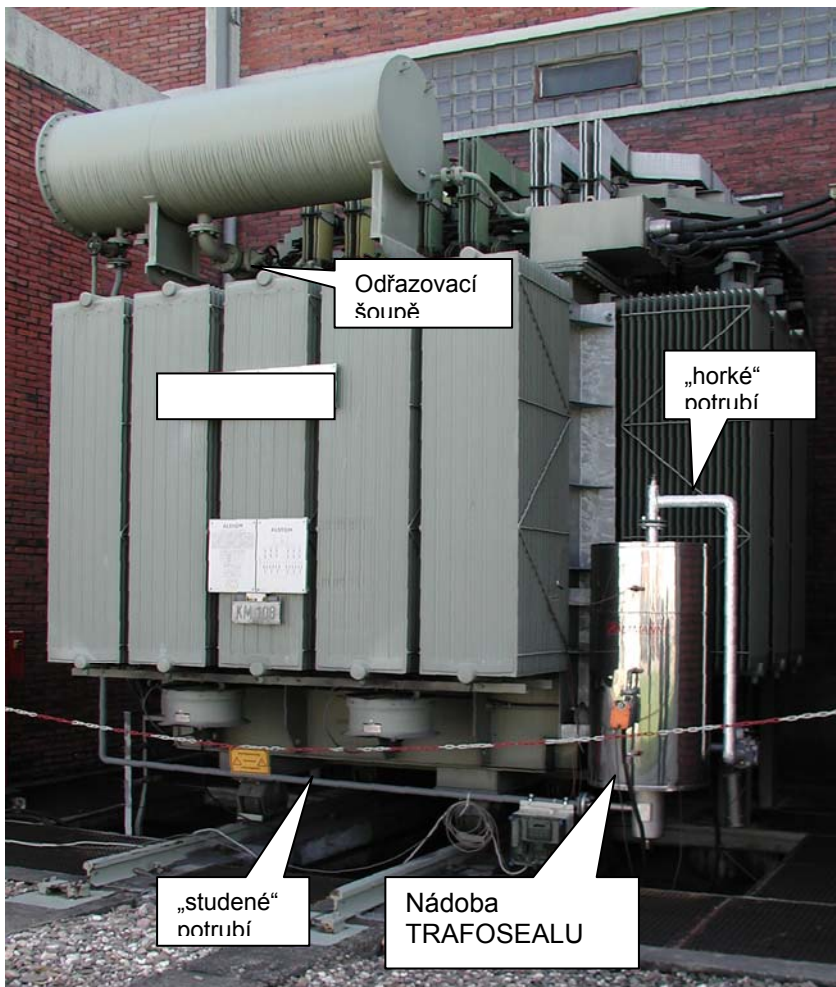
Trafoseal II je uveden do provozu otevřením odkalovacího ventilu konzervátoru a šoupěte na nádobě transformátoru a následným uzavřením odrazovacího šoupěte ve spojovacím potrubí mezi nádobou transformátoru a konzervátorem.

Funkce konzervátoru jako dilatační nádoby není novým propojením očividně nijak dotčena. Při nárůstu teploty olejové náplně nádoby transformátoru, je horký olej vytláčován „horkým“ potrubím do horní části nádoby TRAFOSEALu, posouvá vrstvu teplotní stratifikace směrem dolů a stejné množství studeného oleje je z nádoby TRAFOSEALu vytláčováno „studeným“ potrubím do konzervátoru.

Stejný proces, ale s opačným smyslem proudění, probíhá při poklesu teploty oleje v nádobě transformátoru. Horký olej z nádoby TRAFOSEALu natéká zpět do nádoby transformátoru, a vrstva teplotní stratifikace je nátokem studeného oleje z konzervátoru posouvána v nádobě TRAFOSEALu směrem vzhůru.

Uzavřením přímě propojovací trasy mezi nádobou a konzervátorem je ovšem funkce stávajícího Buchholzova relé omezena na jímání a signalizaci zvýšeného množství plynů z nádoby stroje. Signalizaci nedovoleného průtoku mezi nádobou a konzervátorem nyní přebírá další Buchholzovo relé které je vestavěno do „horkého“ potrubí mezi nádobu transformátoru a nádobu TRAFOSEALu.

Připojení TRAFOSEALu na pecní transformátor 17 MVA je ukázáno na obr. 2



Obr. 2 Umístění TRAFOSEALu na pecním transformátoru 17 MVA.

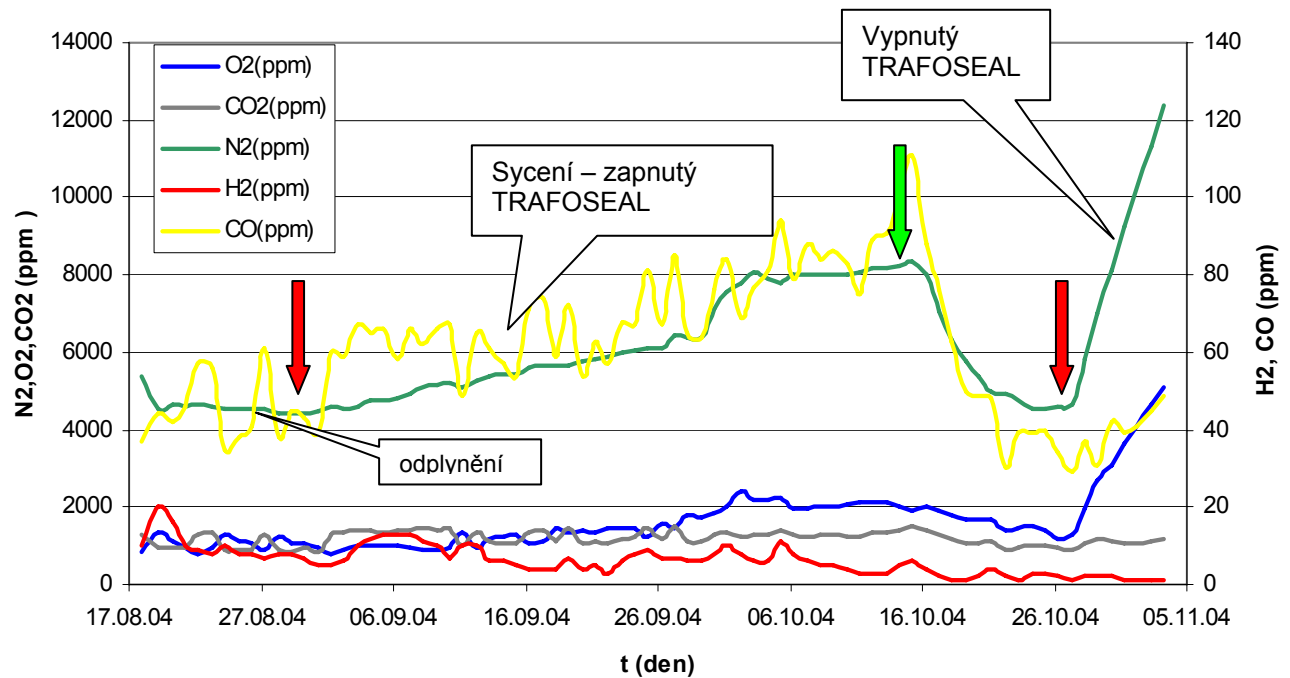
3. Provozní ověření funkce TRAFOSEALu.

Základní kvalitativní ověření nového typu hermetizace bylo možno velmi jednoduše provést termokamerou, protože v tomto případě stačilo pro posouzení funkce porovnání teploty konzervátoru dvou identických a stejně zatížených pecních transformátorů z nichž jeden byl vybaven TRAFOSEALEm a druhý nikoliv. Měření ukázalo, že na transformátoru vybaveném TRAFOSEALEm došlo k požadovanému snížení nátok horkého oleje z nádoby transformátoru do konzervátoru [L8].

Pro kvantitativní posouzení efektivnosti nového typu hermetizace byla použita přesnější metoda, v jejímž rámci bylo měření prováděno na stejném transformátoru se zapnutým a vypnutým TRAFOSEALEm. Pro měření obsahu plynů v oleji byl použit on-line chromatograf TGM firmy Gatron [L9], který je pomocí odběrového kohoutku přímo připojen k olejové náplni nádoby transformátoru.

Před započítáním experimentu je vždy v prvním kroku olejová náplň za normálního provozu transformátoru odplyněna vakuovým separátorem a v druhém kroku je separátor vypnut. On-line chromatografem je pak průběžně sledována dynamika sycení oleje vzdušnými plyny tj. N₂ a O₂ a současně jsou také v oleji měřeny obsahy CO, CO₂ a H₂.

Výsledky měření jsou ukázány na obr. 3.



Obr. 3 Průběh provozního měření v časovém intervalu 18.8 2004 – 3.1 2004

Průběh provozního experimentu byl následující – 9.8 2004 byl na transformátor instalován TRAFOSEAL II a zahájeno odplynění olejové náplně pomocí separátoru VS-06. 18.8 2004 byl na transformátor trvale připojen on-line chromatograf TGM a zahájeno měření. Po ustálení obsahu většiny měřených plynů byl 31.8 2004 vypnut separátor VS-06 (červená vertikální šipka) a začalo sycení olejového obsahu nádoby transformátoru. 29.9 byl transformátor vypnut s ohledem na nutnost údržby a začal chladnout, což se projevilo částečným „průrazem TRAFOSEALu“ – hodnota obsahu N₂ v oleji rostla rychleji a pak se stabilizovala. Po uvedení transformátoru do normálního provozu by proto 15.10 znovu zapnut separátor VS-06 (zelená vertikální šipka) a jeho pomocí byla znovu odplyněn olej v nádobě transformátoru. Po ustálení obsahu N₂ a O₂ v oleji na hodnotě která zhruba odpovídala podmínkám ze dne 31.8, byl 27.10 znovu vypnut separátor (červená vertikální šipka). Podmínky standardního sycení oleje vzdušnými plyny byly realizovány otevřením odřazovacího šoupěte ve spojovacím potrubí nádoba – konzervátor a současně byl

TRAFOSEAL vyřazen z činnosti zavřením šoupěte na nádobě transformátoru. S výjimkou vypnutí byl transformátor stále provozován za nominálního výkonu.

4. Posouzení účinnosti TRAFOSEALu

Kvantitativní posouzení účinnosti nového typu hermetizace je možno velmi jednoduše provést tím, že změříme intenzitu kontaminace transformátoru inertním plynem z okolí v tomto případě dusíkem (N₂) tj. plynem který v našem transformátoru není spotřebováván ale pouze jímán.

Pro měření kontaminace byla použita metodika navržená v [L10], která de-facto využívá olejovou náplň nádoby transformátoru jako měřicí přístroj – tj. považuje objem odplyněného oleje v nádobě transformátoru za **přesně definovatelnou a homogenní jímací kapacitu** s objemem V_n, do které přivádíme inertní plyn z okolí a **rychlostu nárůstu** obsahu tohoto plynu nám pak přesně popisuje **vydatnost zdroje daného plynu**.

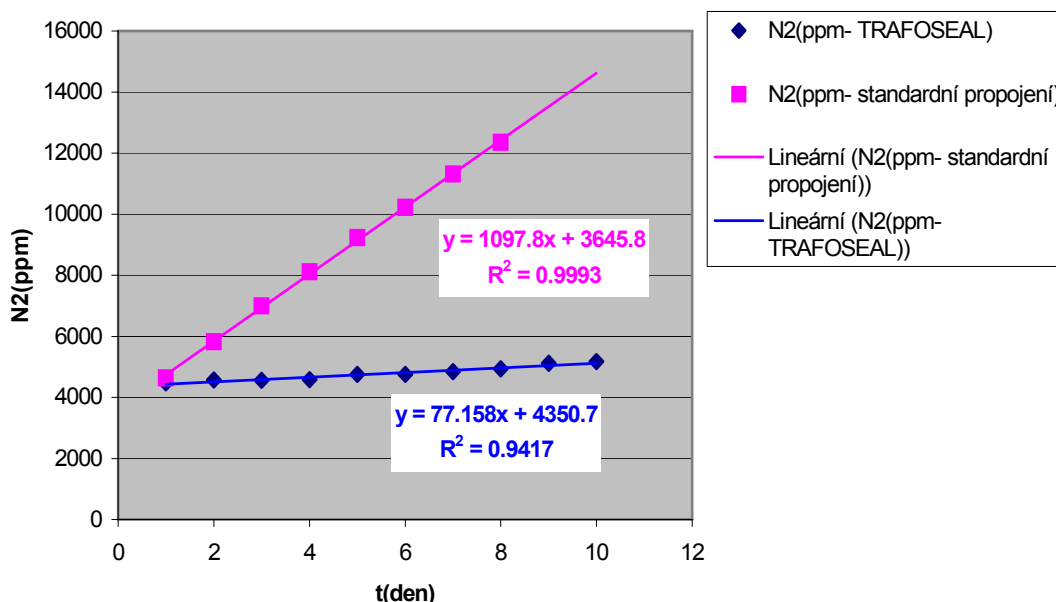
Nárůst obsahu dusíku v nádobě transformátoru je možno obecně popsat jednoduchou diferenciální rovnicí:

$$(1) V_n \cdot dC_{N_2,n} / dt = v_o \cdot (C_{N_2,kon} - C_{N_2,n})$$

kde:

V _n	objem oleje v nádobě transformátoru (m ³)
dC _{N₂,n} / dt		saturační gradient (ppm s ⁻¹ , zde ppm / den)
v _o	objemový tok oleje který cirkuluje mezi konzervátorem a nádobou stroje (m ³ s ⁻¹ zde m ³ /den)
C _{N₂,kon}	obsah dusíku v olejové náplni konzervátoru (ppm)
C _{N₂,n}	obsah dusíku v olejové náplni nádoby transformátoru (ppm)

Na obr. 4 je potom ukázána jedna z možností pro určení obou časových gradientů sycení hermetizovaný / nehermetizovaný transformátor.



Obr. 4 Určení saturačních gradientů u nehermetizovaného a hermetizovaného stroje

Pro určení gradientu sycení dC_{N₂,n} / dt jak pro **hermetizovaný** tak pro **nehermetizovaný** případ, jsme použili počáteční úsek obou křivek sycení tj. časový úsek cca 10 dnů po vypnutí separátoru.

V obou případech je zřejmé, že obě saturační křivky mají ve svém počátku téměř lineární charakter a je tedy možno tangentu k saturační křivce aproximovat přímkou definovanou prvními 10-ti naměřenými body. Hodnota R^2 pak v obou případech dokazuje že tato aproximace je přípustná.

Z obrázku je zřejmé, že počáteční gradient sycení u nehermetizovaného stroje je cca 1097 ppm / den, zatímco TRAFOSEALu je to pouze cca 77 ppm / den, tj. původní značná kontaminace olejové náplně plyny z okolí se vřazením TRAFOSEALu snížila cca 14 x.

Mechanismus kontaminace (a dekontaminace) olejové náplně transformátoru si v tomto případě můžeme představit jako virtuální tok oleje kontaminovaného v konzervátoru vzdušnými plyny (N_2, O_2) ze vzdušného okolí, který stále natéká z konzervátoru do nádoby transformátoru, kde je kyslík spotřebováván v procesu stárnutí a současně stejné množství oleje, kontaminované produkty stárnutí (CO, CO_2, H_2, \dots) opouští nádobu a natéká zpět do kondenzátoru odkud tyto plyny unikají do vzdušného okolí.

Objemový tok tohoto oleje je pak možno jednoduše vypočítat výrazem

$$(2) v_o = V_n \cdot dC_{N_2,n} / dt / (C_{N_2,kon} - C_{N_2,n}) \quad (m^3 \text{ den}^{-1})$$

protože víme, že hodnota V_n je zhruba konstantní, hodnotu obsahu dusíku v nádobě $C_{N_2,n}$ přímo měříme a hodnotu gradientu sycení $dC_{N_2,n} / dt$ můžeme snadno získat vyhodnocením prvních bodů saturační křivky.

Příklad:

Pokud zavedeme zjednodušující předpoklad že olej v konzervátoru je stále plně nasycen dusíkem tj. $C_{N_2,kon} \sim 65000$ ppm a změřená počáteční hodnota obsahu N_2 v nádobě je cca 4200 ppm, dostáváme průtok mezi nádobou a konzervátorem jako:

$$v_o = (14.2 \cdot 1097) / (65000 - 4200) = 0.256 \text{ m}^3 \text{ oleje za den} - \text{ pro nehermetizovaný stroj}$$

ale pouze

$$v_o = (14.2 \cdot 77) / (65000 - 4200) = 0.018 \text{ m}^3 \text{ za den pro TRAFOSEAL}$$

Obě hodnoty virtuálního průtoku jsou nutně zatíženy chybou, protože skutečnou hodnotu $C_{N_2,kon}$ tj. obsahu dusíku v olejové náplni konzervátoru jsme v tomto experimentu neměřili.

Nicméně můžeme předpokládat, že tato hodnota pro případ bez hermetizace bude podstatně nižší než uvažované plné nasycení (vyšší tok oleje mezi nádobami při omezené intenzitě difuze dusíku hladinou oleje v konzervátoru) a skutečný tok oleje bude tedy vyšší než vypočítaný.

Naproti tomu u hermetizovaného stroje, díky nižšímu odvodu N_2 z konzervátoru do nádoby stroje, můžeme hodnotu $C_{N_2,kon}$ očekávat vyšší a vypočítaný virtuální průtok se bude více blížit skutečnosti.

Další výrazné zpřesnění hodnot virtuálního průtoku je samozřejmě možné pouze on-line změřením hodnoty $C_{N_2,kon}$. V principu to znamená takovou úpravu on-line chromatografu, aby v procesu měření bylo možno v daném dnu automaticky odebrat vzorek oleje nejen z nádoby transformátoru, ale také z jeho konzervátoru.

5. Kvantitativní odhad redukce oxidačního stárnutí papíru

Pokud jsme schopni dostatečně přesně určit množství plynů (CO, CO_2) které vznikají v procesu oxidačního stárnutí pro stejný hermetizovaný / nehermetizovaný stroj, jsme také určit účinnost hermetizace TRAFOSEALem, zvláště co se týče redukce oxidačního stárnutí celulozových izolantů daného transformátoru.

Protože ve stavu plného nasycení oleje $O_2 \sim 20000$ ppm se rovnovážná hodnota CO_2 u nehermetizovaného stroje se před provozním experimentem pohybovala mezi 4000 a 5000 ppm, je námi zjištěným virtuálním tokem oleje vynášen z nádoby nehermetizovaného stroje objemový tok CO_2 který je dán výrazem:

$$V_{CO_2} = v_o \cdot (C_{CO_2,n} - C_{CO_2,kon}) \cdot 1e-6 = 0.256 \cdot (5000 - 400) \cdot 1e-6 = 1.18 e-3 \text{ m}^3 / \text{den}$$

Naproti tomu u hermetizovaného režimu (viz obr. 3), je rovnovážný obsah CO_2 v oleji očividně značně snížen. Obsah CO_2 v oleji sice kolísá, ale rovnovážná hodnota zůstává zhruba v úrovni 1000 – 1200 ppm.

Tato skutečnost se samozřejmě musí projevit i v množství CO_2 které je s nádobou odváděno:

$$V_{CO_2} = v_o \cdot (C_{CO_2,n} - C_{CO_2,kon}) \cdot 1e-6 = 0.018 \cdot (1200 - 400) \cdot 1e-6 = 1.44 e-5 \text{ m}^3 / \text{den}$$

Jinými slovy: objemový virtuální tok oleje kterým je CO_2 vynášen z nádoby poklesl hermetizací cca 14 x, ale protože současně - díky sníženému obsahu O_2 a tím sníženému oxidačnímu stárnutí - poklesl cca 4 x rovnovážný obsah CO_2 v oleji nádoby, pokleslo množství odváděného CO_2 více než 50 x.

Redukce intenzity oxidačního stárnutí nehermetizovaný / hermetizovaný režim je tedy velmi značná a velmi dobře splňuje naše úvodní zadání.

Podobně jako v předchozí kapitole i zde platí, že i tento odhad je zatížen chybou, protože hodnotu $C_{CO_2,kon}$ tj. obsah CO_2 v oleji v konzervátoru jsme zatím neměřili.

6. Závěr

První ověření funkce TRAFOSEALu ukazuje, že tento způsob hermetizace může výrazně přispět k prodloužení životnosti výkonových transformátorů které dosud pracovali bez hermetizace.

Tento závěr platí zvláště pro vystárlé stroje s ohledem na :

- ❖ investiční nenáročnost – podle dosavadních protočtů by jeho celková cena včetně montáže neměla překročit 30 % až 50% celkové ceny hermetizace vakem
- ❖ univerzálnost možného nasazení – je možné jej nasadit na kterýkoliv transformátor bez jakýchkoliv dalších úprav
- ❖ nepotřebuje žádnou obsluhu ani údržbu
- ❖ není nutno jeho funkci speciálně monitorovat – hermetizace stratifikační vrstvou je založena na velmi robustním fyzikálním procesu který v kapalině vzniká spontánně pouhou změnou teploty a nelze jej tedy trvale narušit.

Dosud provedená měření a jejich vyhodnocení naznačují, že hermetizace tohoto typu může snížit oxidační stárnutí celulozových izolantů v transformátoru až 50x.

Přesné kvantitativní ověření hermetizační funkce TRAFOSEALu bude provedeno dalším on-line měřením které obsáhne i měření obsahu plynů v konzervátoru daného stroje.

Literatura

- L1 Lampe, Spicar
Oxygen-free Transformer, reduced Ageing by continuous Degassing,
 CIGRE, paper 12-05, Paris, 1976
- L2 Lungard at all
Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers
 IEEE Transactions of Power Delivery, Vol.19, No.1, January 2004
- L3 Weidmann
Flexible Separators S.T.P Type for Power Transformer
 www. Weidmann-acti.com
- L4 Myers, Kelly, Parrish
A Guide To Transformer Maintenance
 TMI Transformer Maintenance Institute, Division, S.D.Myers, Inc., Akron,1981
- L5 Woodcock
Risk-Based Reinvestment – Trends in Upgrading the Aged T&D System
 www.energypulse.net
- L6 Werle, Lohmeyer, Wohlfart
Moeglichkeiten zur Beurteilung und Werterhaltung des Isolationssystems von Leitungstransformatoren im Betrieb als Massnahme zur Lebensdauerveraengerung
 Micafil Symposium 2004
- L7 Altmann
 Patent Draft published under PCT - WO 2003/011422 .
- L8 Altmann
Infrared verification
www.ars-althmann.com /News
- L9 Garton – Transformer Gas Monitoring (TGM)
www.gatron.de / Products and Services
- L10 Altmann