



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Regenerace elektroizolačních kapalin

Regeneration of electrical insulating liquids

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Jiří Brázdil, Ph.D., MBA

Bc. Libor Urbánek

Praha 2014



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Libor Urbánek**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Regenerace elektroizolačních kapalin**

Pokyny pro vypracování:

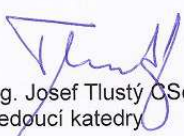
1. Pojednejte o způsobech regenerace minerálních olejů.
2. Porovnejte parametry olejů po laboratorní regeneraci a po reálné regeneraci.

Seznam odborné literatury:

- [1] VEVERKA, A.: Technika vysokých napětí, SNTL/ALFA, Praha 1982.
- [2] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] HORNING, M., KELLY, J., MYERS, S. a STEBBINS, R. Transformer Maintenance Guide. 3. vyd. S D Myers, 2004. ISBN 978-0939320028.
- [4] ČSN EN 60296: Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité minerální oleje pro transformátory a vypínače.

Vedoucí: Ing. Jiří Brázdil, Ph.D.

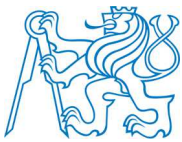
Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 12. 2. 2014



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma Regenerace elektroizolačních kapalin vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet použitých pramenů, které uvádím v příloženém seznamu.

Nemám námitky proti půjčování, zveřejnění a dalšímu využití této práce, pokud s tím bude souhlasit katedra elektroenergetiky K13115.

V Praze dne 5. dubna 2014

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Brázdilovi, Ph.D., MBA za metodické vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na předloženou práci a umožnění přístupu na jednotlivá pracoviště.

Dále poděkování patří pracovníkům zkušební akreditované laboratoře E01 ORGREZ, a.s. v Karlíně, kde byly provedeny veškeré zkoušky vzorků transformátorového oleje.

V neposlední řadě patří poděkování členům pracovních skupin na regeneračních stanicích, při praktických ukázkách s možností sledování jednotlivých fází procesu.



Anotace

Předkládaná diplomová práce pojednává o regeneraci minerálního transformátorového oleje. Na dvou různých vzorcích porovnává jednotlivé parametry elektroizolačního oleje a to před regenerací, po laboratorní regeneraci a na konci procesu samotné regenerace.

Proces regenerace probíhá za použití Fullerovy hlínky. Vzorky jsou záměrně vybrány rozdílného charakteru. První je z generátorového transformátoru, kde jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu, druhý pochází z nádrže se smíchanými oleji z distribučních transformátorů.

Dále jsou zjednodušeně popsány jednotlivé metody, kterými je provedeno měření.

V příloze předkládám protokoly o měření se všemi sledovanými parametry, které vyhodnotila akreditovaná laboratoř.

Klíčová slova

Fullerova hlínka, transformátorový olej, regenerace transformátorového oleje, inhibitor, jakostní parametry oleje, izolační parametry oleje

Annotation

The submitted thesis deals with regeneration of mineral transformer oils. Given two various samples it compares the individual parameters of the electrical insulation oils at the stages before regeneration, immediately after the laboratory regeneration and at the very end of the regeneration process itself.

The regeneration process is performed with the utilisation of Fuller's earth. The samples are intentionally selected with different characters. The first sample originates from generator transformer, which implies high quality requirements, the second originates from a tank with mixed oils from distribution transformers.

Further I include simple descriptions of the individual methods utilised for the measurement.

The annexe submits the measurement report containing all the monitored parameters, assessed by an accredited laboratory.

Key words

Fuller's earth, transformer oil regeneration, transformer oil inhibitor, quality parameters of oil, insulating oil parameters



Seznam symbolů

| | | |
|------------------|-----------------------|--|
| U_p | (kV/2,5 mm) | Hodnota průrazného napětí |
| s | (kV/2,5 mm) | Směrodatná odchylka |
| V | (%) | Variační koeficient |
| Q_v | (mg/kg) | Obsah vody |
| $\check{C}k$ | (mgKOH/g) | Číslo kyselosti |
| $tg\delta_{20}$ | (-) | Ztrátový činitel při 20°C |
| $tg\delta_{70}$ | (-) | Ztrátový činitel při 70°C |
| $tg\delta_{90}$ | (-) | Ztrátový činitel při 90°C (základní hodnota) |
| ϵ_{r20} | (-) | Permitivita při 20°C |
| ϵ_{r70} | (-) | Permitivita při 70°C |
| ϵ_{r90} | (-) | Permitivita při 90°C |
| ρ_{20} | (GΩm) | Rezistivita při 20°C (základní hodnota) |
| ρ_{70} | (GΩm) | Rezistivita při 70°C |
| ρ_{90} | (GΩm) | Rezistivita při 90°C |
| σ | (nN/m) | Relativní mezipovrchové napětí olej – voda |
| ρ_v | (g/ml) | Hustota |
| Q_i | (% _{hmot.}) | Obsah inhibitoru |
| U | (V) | Napětí |
| P | (MVA) | Výkon |
| C | (F) | Kapacita |
| t | (s) | Čas |
| f | (-) | Faktor roztoku |
| a | (cm ³) | Spotřeba roztoku |
| v | (g) | Navážka roztoku |
| t_0 | (°C) | Teplota |
| m | (kg) | Hmotnost |



OBSAH:

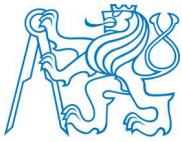
| | |
|---|-----------|
| Úvod | 9 |
| 1 Vlastnosti elektroizolačních kapalin | 10 |
| 1.1 Elektroizolační kapalina | 10 |
| 1.2 Základní rozdělení olejů | 10 |
| 1.3 Minerální oleje | 11 |
| 1.3.1 Základní vlastnosti | 11 |
| 1.3.2 Parafinické oleje | 11 |
| 1.3.3 Naftenické oleje | 12 |
| 1.3.4 Nevýhody minerálních olejů | 12 |
| 1.4 Stárnutí elektroizolační kapaliny | 13 |
| 1.4.1 Oxidační stárnutí transformátorového oleje | 13 |
| 1.4.2 Kaly | 14 |
| 1.4.3 Účinky kalů | 14 |
| 1.5 ČSN EN 60422 Doporučené parametry pro izolační olej | 15 |
| 1.6 Parametry transformátorových olejů | 25 |
| 1.5.1 Průrazné napětí | 25 |
| 1.5.2 Číslo kyselosti | 25 |
| 1.5.3 Obsah vody | 25 |
| 1.5.4 Ztrátový činitel | 26 |
| 1.5.5 Rezistivita | 27 |
| 1.5.6 Mezipovrchové napětí na rozhraní olej – voda | 27 |
| 1.5.7 Oxidační stabilita | 27 |
| 1.5.8 Obsah inhibitoru | 27 |
| 1.5.9 Barva | 28 |
| 1.5.10 Viskozita | 28 |
| 1.5.11 Bod vzplanutí | 28 |
| 1.5.12 Bod tuhnutí | 28 |
| 1.5.13 Obsah PCB látek | 29 |
| 1.5.14 Obsah korozivní síry | 29 |
| 1.5.15 Celkové posouzení stavu oleje | 29 |
| 2 Technologie čištění | 31 |
| 2.1 Filtrace transformátorových olejů | 31 |



| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.2 | Regenerace transformátorových olejů..... | 32 |
| 2.3 | Regenerační zařízení typu BF | 32 |
| 2.3.1 | Regenerace oleje | 32 |
| 2.3.2 | Reaktivace sorpční náplně..... | 33 |
| 2.4 | Fullerova hlinka..... | 36 |
| 3 | Regenerace oleje..... | 37 |
| 3.1 | Popis regenerace mobilní regenerační stanicí typu BF : | 37 |
| 3.2 | Plánovaný časový harmonogram regenerace | 39 |
| 3.3 | Parametry oleje bezprostředně po regeneraci..... | 39 |
| 4 | Laboratorní regenerace..... | 42 |
| 4.1 | Princip | 42 |
| 4.2 | Přístrojové a laboratorní vybavení, chemikálie..... | 42 |
| 4.3 | Příprava a průběh zkoušky | 42 |
| 4.4 | Vyhodnocení měření | 43 |
| 5 | Použití přístroje pro laboratorní měření | 44 |
| 5.1 | Rozdělení zkoušek do skupin:..... | 44 |
| 5.2 | Průrazné napětí..... | 45 |
| 5.3 | Obsah vody..... | 46 |
| 5.4 | Číslo kyselosti | 47 |
| 5.5 | Ztrátový činitel a relativní permitivita | 49 |
| 5.6 | Vnitřní rezistivita..... | 51 |
| 5.7 | Obsah inhibitoru..... | 52 |
| 5.8 | Obsah částic..... | 52 |
| 5.9 | Plynová chromatografie | 53 |
| 6 | Porovnání výsledků regenerace..... | 55 |
| 6.1 | Vzorky | 55 |
| 6.2 | Průrazné napětí..... | 56 |
| 6.3 | Obsah vody..... | 57 |
| 6.4 | Číslo kyselosti | 57 |
| 6.5 | Hustota a relativní mezipovrchové napětí olej-voda..... | 57 |
| 6.6 | Ztrátový činitel, relativní permitivita a vnitřní rezistivita..... | 58 |



| | | |
|-----------|---|-----------|
| 6.7 | Obsah antioxidačního inhibitoru | 59 |
| 6.8 | Obsah PCB látek | 59 |
| 6.9 | Obsah koroze síry | 60 |
| 6.10 | Plynově-chromatografická analýza plynů..... | 60 |
| 7 | Závěr | 61 |
| 8 | Seznam tabulek a obrázků | 62 |
| 9 | Použitá literatura | 64 |
| 10 | Přílohy..... | 66 |



Úvod

Tématem předkládané diplomové práce je regenerace elektroizolační kapaliny. Každé technické zařízení v průběhu svého života stárne, výjimkou nejsou ani minerální transformátorové oleje s naftenickým základem, o kterých bude podrobně pojednáno.

Požadavky na izolační olej: ideální kapalný izolant, který neobsahuje volné nosiče elektrického náboje, ani další znečištění či příměsi, a který dokáže elektricky oddělit dvě místa s různým elektrickým potenciálem.

V transformátorech olej slouží nejen jako izolant, ale i jako chladicí médium. Při určitém stupni zestárnutí olejové náplně může být ohrožen bezpečný provoz dotčeného zařízení.

Cílem této práce je seznámit v obecné rovině s různými druhy elektroizolačních kapalin. Přiblížit sledované parametry běžně používaného minerálního oleje. Seznámit se způsoby regenerace, které vedou k opětovnému dosažení žádoucích vlastností elektroizolační kapaliny.

Stěžejním úkolem je porovnání laboratorních výsledků konkrétních dvou povahově odlišných vzorků oleje, zkoumaných před regenerací, po laboratorní regeneraci a na konci procesu samotné regenerace.



1 Vlastnosti elektroizolačních kapalin

1.1 Elektroizolační kapalina

Elektroizolační kapalina dále také jen olej má v elektrotechnice velmi rozsáhlé využití pro svoje dielektrické vlastnosti. Mezi tyto výhodné vlastnosti patří: viskozita, dobrá elektrická pevnost, dobře vyplňuje prostory a dutiny (stékavost), usnadňuje zhášení výboje. Významnou vlastností oleje jsou jeho chladící účinky. Nevýhodou oleje je, jeho poměrně vysoká hořlavost dále je to postupná degradace, která je způsobena oxidací. Při použití oleje je nutno brát v potaz i ochranu životního prostředí, např. olejové transformátory musí mít jímku apod.

1.2 Základní rozdělení olejů

Oleje můžeme rozdělit na přírodní a syntetický.

Přírodní oleje se ještě dále dělí na minerální, rostlinné a živočišné.

Minerální olej je ropný produkt, který se používá v transformátorech, kabelech a také v kondenzátorech. Podrobněji popsán v následující kapitole 1.3.

Rostlinný olej je směs esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin. Dělí se na vysýchavé (dřevný, lněný) a nevysýchavé (ricinový, řepkový), nevysýchavé oleje se používají k impregnaci papírových kondenzátorů, vysýchavé oleje se používají do elektroizolačních laků. [5]

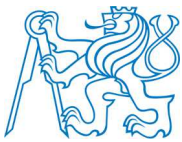
Syntetické kapaliny se podle vzniku dělí do několika skupin:

Polybuteny vznikají polymerizací nenasycených uhlovodíků. Mají dobré chemické a elektrické vlastnosti.

Chlorované uhlovodíky, známé pod názvem delor byly pro svoji závadnost a zdraví škodlivým vlivům zakázány. Podrobněji v kapitole 1.5.13.

Vhodné vlastnosti mají také fluorované uhlovodíky, které mají dobré elektrické vlastnosti, jsou nehořlavé, mají téměř dvakrát vyšší dielektrickou odolnost než chlorované uhlovodíky.

Silikonové kapaliny jsou nehořlavé, ekologicky nezávadné, teplotně stálé a mají výborné izolační vlastnosti. Organické estery jsou charakteristické vysokým bodem vzplanutí a hoření, mají větší viskozitu. [5], [6]



1.3 Minerální oleje

Nejvíce používaný kapalný izolant v energetice je minerální olej, který je znám obvykle pod názvem transformátorový olej. I když jsou v dnešní době tendence používat jako elektroizolační kapaliny rostlinné oleje nebo jiné syntetické kapaliny, je stále nejrozšířenější.

Minerální oleje se vyrábějí destilací a následnou rafinací ropy. Destilace je proces používaný k separaci složek kapalných směsí na základě různých tepelných hodnot bodu varu. Kapalná směs je zahřívána na přesně stanovenou teplotu odpovídající bodu varu dané složky. Dochází ke změně skupenství, odpařená složka je v plynné podobě odvedena mimo destilační komoru a v chladiči kondenzuje. Vakuová destilace se používá k výrobě olejů s různou viskozitou. Principem vakuové destilace je pracovat s nižším tlakem, než je tlak atmosférický, dochází ke snížení bodu varu jednotlivých frakcí. Následnou rafinací se odstraňují některé nežádoucí látky a hlavně ty které obsahují kyslík. Jde tedy o zlepšování oxidační stability oleje. Používají se i dalších způsobů ke zkvalitnění výsledného produktu, například odplynění, ochlazení s vykrystalizováním parafínů, odstranění nečistot aktivní hlinkou a jejím odfiltrváním.

1.3.1 Základní vlastnosti

Minerální oleje jsou z chemického hlediska složité směsi uhlovodíků. Převážný díl tvoří uhlovodíky, jako jsou n-alkany, izoalkany, cykloalkany, aromáty a alkeny (97 %), dále sloučeniny síry, kyslíku, dusíku a kovy obsaženy v organických a anorganických solích, nedílnou součástí je i parafín.

Podle celkového chemického složení lze určit jeho vlastnosti. Přebytek parafinických molekul zvyšuje viskozitu, přebytek benzenových molekul naopak snižuje viskozitu. Mezi další rozpuštěné látky patří plyny např. ethan, butan, oxid uhličitý, dusík nebo vzácné plyny.

Protože základní surovina, kterou je ropa má podle svého původu rozdílné složení, mají rozdílné složení a nestejně vlastnosti oleje z této suroviny vyrobené. [5]

1.3.2 Parafinické oleje

Základním stavebním prvkem jsou nasycené uhlovodíky s rozvětvenými (izoalkany, izoparafíny) a nerozvětvenými (n-alkany, parafíny) řetězci s obecným vzorcem C_nH_{2n+2} (např. n-hexan C_6H_{14}). Jsou chemicky stálé, s vysokým bodem vzplanutí, dobrou viskozitní křivkou; obvykle však tuhnoucí při teplotách blízkých nule. Jsou chemicky stálé, s vysokým



bodem vzplanutí. Vysoká teplota tuhnutí je nepříznivá pro energetické aplikace v tuzemských klimatických podmínkách. [5]

1.3.3 Naftenické oleje

Naftenické oleje jsou cyklické nasycené uhlovodíky s obecným vzorcem C_nH_{2n} (např. cyklohexan C_6H_{12}). Jsou chemicky méně stálé než parafíny, ale s nízkým bodem tuhnutí. Další obsahují cyklické aromatické uhlovodíky s obecným vzorcem C_nH_{2n-6} (např. benzen C_6H_6). [5]

1.3.4 Nevýhody minerálních olejů

Jednou z hlavních nevýhod minerálních olejů je jejich postupná degradace, kdy dochází ke změně vlastností v závislosti na čase. Stárnutí oleje je způsobeno fyzikálně-chemickými vlivy. Nejvíce znehodnocujícím činitelem je vysoká teplota, která má největší vliv na degradaci oleje. Příčinou může být např. vysoká teplota vinutí u transformátoru. Dalšími nepříznivými vlivy, které působí na olej jsou tlak, záření, styk oleje se vzduchem (oxidace), katalyzátory jako je měď, železo nebo olovo (v pájkách). Při styku vzduchu s olejem, dochází za pomoci kyslíku ke zvyšování kyselosti. Proto je nutné co nejvíce zabránit styku s vlhkým vzduchem volbou vhodného zařízení z pravidla v nádobě umístěný silikagel. [5]



Obrázek 1: Označení použitého typu oleje u výpusti transformátoru



1.4 Stárnutí elektroizolační kapaliny

Stárnutím lze označit soubor pochodů, které v podmínkách běžného provozu vedou k nežádoucím změnám fyzikálních, chemických nebo elektrických vlastností.

Vlivy způsobující stárnutí oleje lze rozdělit na:

- a) účinek kyslíku za současného působení tepla nebo jiných energií, popř. i katalyzátorů a vody
- b) účinek energií (tepelné, elektrického pole a elektrických výbojů)
- c) účinek chemických látek kyselá a alkalická povahy
- d) vliv rovnoměrnosti zatížení, úrovně zatížení, chvění a účinnosti chlazení.

Stárnutí olejů je možné rozdělit také na:

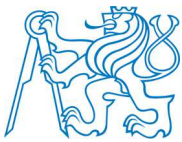
- a) oxidační,
- b) tepelné
- c) vlivem cizích příměsí.

1.4.1 Oxidační stárnutí transformátorového oleje

Oxidačním stárnutím zpočátku vzniká množství kyslíkatých organických látek (alkoholy, estery, aldehydy, ketony, kyseliny atd.), jejichž molekuly jsou podstatně polárnější než molekuly původních uhlovodíků a jsou v oleji rozpustné. Jako vedlejší produkty vznikají oxid uhličitý a reakční voda. Produkty stárnutí zhoršují elektrické vlastnosti oleje, organické kyseliny rozpouštějí kovové materiály (zvětšují iontovou vodivost oleje).

Polymerací a polykondenzací primárních kyslíkatých produktů stárnutí s reaktivními skupinami vznikají makromolekulární látky, které jsou v první fázi v oleji rozpustné. Zvětšují viskozitu a hustotu izolačního oleje, způsobují změnu jeho barvy a dále zhoršují jeho elektrické vlastnosti. Pokračující polymerací a polykondenzací vznikají nerozpustné kyslíkaté makromolekuly tzv. kaly. Olej se tak stává heterogenní soustavou, jejíž hlavní nedostatek je vylučování kalu, které vede například v transformátoru k nevratnému poškození elektroizolačního systému olej-papír. Negativní vliv kalu se projeví v jeho katalytických účincích při oxidačním stárnutí oleje a v jeho hydrofilních účincích (sediment kalu).

Jako vedlejší produkt při polykondenzačních reakcích vzniká reakční voda. [18]



1.4.2 Kaly

Kaly jsou tvořeny malými pevnými částicemi, na které se vážou polární uhlovodíky, dále mýdly vyšších mastných kyselin a zoxidovanými aromatickými uhlovodíky ve formě asfalténů a asfaltogenních kyselin.

Mastné kyseliny a jiné kyslíkaté látky vznikají oxidací uhlovodíků, reakcí peroxidů s tvořenými radikály nebo katalytickým působením kovů a vody na volné radikály. Mýdla vznikají působením mastných kyselin, pevných částic a vody.

Asfaltény vznikají oxidací aromatických a aromaticko-cyklanických uhlovodíků. Spolu s aromatickým podílem snadno vážou vodu. Pevné částice vznikají chvěním a stárnutím pevných částí, zejména celulózy.

Části pokryté kaly se více ohřívají a tím dochází k dalším polymeračním reakcím. Kaly jsou tímto pochodem přeměňovány na částečně polymerovaný gel, který již není v oleji rozpustný ani při vyšší teplotě. [18]

1.4.3 Účinky kalů

Kaly se stávají katalyzátorem stárnutí oleje. Např. v transformátoru se usazují na povrchu teplejších míst vinutí a na povrchu plechů. Ucpávají tak chladicí kanály mezi vinutím, následkem toho dochází ke snížení schopnosti odvádění tepla z povrchu. V důsledku toho dochází ve zvýšené míře k oteplení vodičů, kaly na povrchu vinutí houstnou, až zcela zabrání proudění oleje a předávání tepla z povrchu vinutí do oleje. Tímto způsobem dochází k urychlenému stárnutí papírové izolace vodičů (při zvýšení teploty papíru o 8 °C se jeho životnost zkracuje o 50 % – Montsingerovo pravidlo), až k jejímu zničení následovanému mezizávitovým zkratem nebo elektrickým přeskokem.

Vzhledem ke schopnosti kalů udržovat v sobě vlhkost se může snížit izolační odpor mezi závitů ve vinutí a vzniknout mezizávitový zkrat nebo nastat elektrický přeskok mezi živými částmi transformátoru. [18]



1.5 ČSN EN 60422 Doporučené parametry pro izolační olej

ČSN EN 60422 pomáhá monitorovat a udržovat kvalitu oleje což je nezbytné k zabezpečení spolehlivého chodu olejem plněných elektrických zařízení.

Významné množství elektrických zařízení je dodáváno konečnému uživateli již naplněno minerálním olejem. V takových případech, když olej již přišel do kontaktu s izolačními a jinými materiály, již nemůže být považován za „nepoužitý olej“ ve smyslu ČSN EN 60296. Proto jeho parametry musí být považovány za ty, které se vztahují na „použitý olej“, dokonce i když zařízení nebylo uvedeno do provozu (ČSN EN 60422).

V tabulce jsou proto v sloupci *Nový* uvedeny doporučené limitní hodnoty pro minerální izolační oleje po naplnění do nového elektrického zařízení před uvedením do provozu. Podle místních nebo aktuálních zkušeností z průmyslu, oleje v provozu mohou být klasifikovány jako „dobrý“, „vyhovující“ nebo špatný, na základě vyhodnocení významných parametrů oleje. Doporučené limity těchto parametrů pro provedení opatření pro jednotlivé klasifikace jsou uvedeny v sloupci *V provozu*.

Izolační olej v provozu je vystaven působení tepla, kyslíku, vody a dalších katalyzátorů, které jsou všechny škodlivé vůči oleji. Pro udržování kvality oleje v provozu by měly být prováděny pravidelné odběry vzorků oleje a jeho analýzy. Jejich četnost a rozsah pro všechny kategorie zařízení je uveden v tabulce *Doporučená četnost zkoušení*.

V tabulce *Doporučená opatření* jsou uvedena doporučení, pokud je výsledek zkoušek mimo meze uvedených ve sloupci *V provozu* v tabulkách jednotlivých kategorií zařízení. Žádné opatření by nemělo být provedeno na základě jednoho výsledku a jediné vlastnosti. Opakování vzorků je doporučeno tam, kde výsledek vypadá neobvykle ve srovnání s trendem předchozích získaných výsledků.

Rutinní zkoušky – barva a vzhled, průrazné napětí, obsah vody, číslo kyselosti, ztrátový činitel nebo rezistivita, obsah inhibitoru (jen inhibované oleje), Zvláště po plnění do stroje, před uvedením do chodu.

Doplňkové zkoušky – usazeniny a kaly, mezipovrchové napětí, částice (možno též se skupinou 1)

Zvláštní vyšetřovací zkoušky – oxidační stabilita, bod vzplanutí, mísitelnost, bod tekutosti, hustota, viskozita, PCB, korosivní síra. [7]

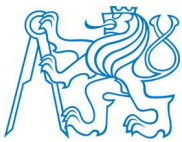


Tabulka 1: Doporučená četnost zkoušení

| Vlastnost | Kategorie zařízení | | | | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | O | A | B | C | D | E | F | G |
| Skupina 1 (Rutinní zkoušky) – roky | 1 - 2 | 1 - 3 | 1 - 4 | 2 - 6 | 1 - 2 | 2 - 6 | 2 - 6 | 2 - 6 |
| Skupina 2 (Doplňkové zkoušky) | Tyto zkoušky mohou být prováděny periodicky, ale méně často než rutinní zkoušky. Četnost bude záviset na typu oleje, jeho stáří a zařízení. První (vztažné body) měření by se mělo uskutečnit na novém nebo opraveném zařízení před uvedením do provozu (připojením na napětí). | | | | | | | |
| Skupina 3 (Zvláštní zkoušky) | Jedná se o velmi specifické zkoušky, které se provádějí pouze za mimořádných okolností. | | | | | | | |

Tabulka 2: Doporučená opatření

| Parametr stav | Doporučená opatření | | |
|----------------------------|--------------------------------|--|---|
| | Dobry | Vyhovující | Špatný |
| Barva a vzhled | Jak prikazují další zkoušky. | | |
| Průrazné napětí | Pokračovat v normálním odběru. | Častější odběr vzorků. Zkontrolují se další parametry např. obsah vody, obsah částic a případně i tgδ/rezistivita a číslo kyselosti. | Obnovit parametry oleje, nebo, eventuálně, pokud to bude ekonomičtější, protože další zkoušky indikují silné zestárnutí, vyměnit olej. |
| Obsah vody při 20°C | Pokračovat v normálním odběru. | Častější odběr vzorků. Zkontrolují se další parametry např. průrazné napětí, obsah částic a případně i tgδ/rezistivita a číslo kyselosti. | Prověří se zdroj vody, obnovit parametry oleje, nebo, eventuálně, pokud to bude ekonomičtější, protože další zkoušky indikují silné zestárnutí, vyměnit olej. |
| Číslo kyselosti | Pokračovat v normálním odběru. | Častější odběr vzorků. Zkontroluj přítomnost sedimentů a kalů. | Pokud se začíná z hodnoty 0,15, vlastník zařízení může chtít vytvořit analýzu trendu založenou na specifické analýze životního cyklu a hodnocení rizika. A pak může být rozhodnuto, kdy regenerovat olej nebo eventuálně, pokud to bude ekonomičtější, protože další zkoušky indikují silné zestárnutí, vyměnit olej. |



| | | | |
|----------------------------------|---|---|---|
| Ztrátový činitel při 90°C | Pokračovat v normálním odběru. | Častější odběr vzorků. Zkontrolují se další parametry. | Regenerovat olej nebo eventuálně, pokud to bude ekonomičtější, protože další zkoušky indikují silné zestárnutí, vyměnit olej. |
| Rezistivita při 90°C | Pokračovat v normálním odběru. | Častější odběr vzorků. Zkontrolují se další parametry. | Regenerovat olej nebo eventuálně, pokud to bude ekonomičtější, protože další zkoušky indikují silné zestárnutí, vyměnit olej. |
| Mezipovrchové napětí | Pokračovat v normálním odběru. | Častější odběr vzorků. | Kontrola přítomnosti sedimentů a kalů. |
| Částice | Pokud je průrazné napětí a obsah vody blízko nebo mimo limitní hodnoty a počet částic je vyšší než limitní hodnota pro každý rozsah velikosti, olej se zfiltruje. | | |

Poznámka:

1. Hodnoty nezipovrchového napětí jsou uvedeny pro „kroužkovou metodu“ dle ASTM D971-99a, (tedy jsou v absolutní hodnotě nižší než u „kapkové metody“, kdy naměřené hodnoty musí být vyšší) viz porovnání.

2. Obsah vody u izolačního systému olej-papír se musí při vyšších teplotách přepočítat na 20°C.

Tabulka 3: Doporučené limity a opatření u parametrů pro všechny kategorie

| Parametr | Doporučený limit | Doporučené opatření |
|-------------------------|--|--|
| Obsah inhibitoru | 1) Koncentrace inhibitoru (40 – 60) % z původní hodnoty a číslo kyselosti < 0,06 mg KOH/g a mezipovrchové napětí > 30mN/m. 2) Koncentrace inhibitoru < 40% z původní hodnoty a číslo kyselosti > 0,06 mg KOH/g a mezipovrchové napětí < 30mN/m. | Dodatečná inhibice na původní koncentraci. Regenerovat olej a dodatečná inhibice na původní koncentraci, nebo pokračovat v provozu, ale pokud je koncentrace inhibitoru < 0,05%, zvýšit četnost monitorování. |
| Sedimenty a kaly | Žádné sedimenty nebo srážlivé kaly. Výsledky pod 0,02% hmotnosti mohou být zanedbány. | Pokud jsou zjištěny sedimenty, vyčistit olej. Pokud jsou zjištěny srážlivé kaly, regenerovat olej. Eventuálně, pokud to bude ekonomičtější, nebo pokud to další zkoušky vyžadují, vyměnit olej. |
| Bod vzplanutí | Maximální pokles 10% | Zařízení může vyžadovat inspekci. Prošetřit. |



Tabulka 4: Tabulka úrovně znečištění částicemi

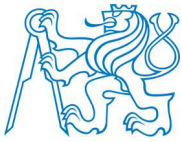
| ISO 4406 třída | Maximum čítaných na 100 ml | | Ustanovení kontaminace | Poznámky |
|----------------|----------------------------|-------|------------------------|--|
| | 5 µm | 15 µm | Nula | |
| Do 8/5 | 250 | 32 | Nízká | IEC požadavek čistoty na vzorkovací láhve plněné čistým rozpouštědlem |
| 9/6 do 10/7 | 1000 | 130 | Normální | Vynikající čistota oleje vyskytující se v průběhu tovární přejímky a uvádění transformátoru do provozu |
| 11/8 do 15/12 | 32000 | 4000 | Mezní | Úroveň kontaminace typická pro transformátory v provozu |
| 16/13 do 17/14 | 130000 | 16000 | Vysoká | Úroveň kontaminace nalezena u podstatného počtu transformátorů v provozu |
| 18/15 a víc | | | | Úroveň kontaminace ojedinělá a obvykle svědčící o abnormálních provozních podmínkách |

Tabulka 5: Kategorie zařízení 0

Výkonové transformátory/reaktory o U_n 400 kV a výše.

Četnost rutinních zkoušek 1 - 2 roky

| Parametr | Nový | V provozu | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------|-------------|-------------------|
| | | Dobry | Vyhovující | Špatný |
| Vzhled | Čirý | Čirý | | Tmavý anebo kalný |
| Barva (ISO 2049) | Max. 2,0 | | | |
| Průrazné napětí (kV) | > 60 | > 60 | 50 - 60 | < 50 |
| Obsah vody (mg/kg) | < 10 | < 5 | 5 - 10 | > 10 |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | Max. 0,03 | < 0,10 | 0,10 – 0,15 | > 0,15 |
| Ztrátový činitel při 90°C | Max. 0,010 | < 0,10 | 0,10 – 0,20 | > 0,20 |
| Rezistivita při 20°C (GΩm) | - | > 200 | 20 - 200 | < 20 |
| Rezistivita při 90°C (GΩm) | Min. 60 | > 10 | 1 - 10 | < 1 |
| Oxidační stabilita | Jak je uvedeno v IEC 60296 | - | - | - |
| Mezipovrchové napětí (mN/m) | Min. 35 | > 28 | 22 - 28 | < 22 |
| Celkový obsah PCB (mg/kg) | Nedetekovatelné (<2 celkem) | < 50 | < 50 | < 50 |
| Částice | viz. tab | viz. tab | viz. tab | viz. tab |



Tabulka 6: Kategorie zařízení A

Výkonové transformátory/reaktory o jmenovitém napětí nad 170 kV a do 400 kV. Také transformátory jakéhokoli napětí, kde je velmi důležité nepřetržité napájení (odbočkové) a podobná zařízení pro speciální aplikace, pracující v obtížných podmínkách.

Četnost rutinních zkoušek 1 - 3 roky

| Parametr | Nový | V provozu | | |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------|-------------|-------------------|
| | | Dobrý | Vyhovující | Špatný |
| Vzhled | Čirý | Čirý | | Tmavý anebo kalný |
| Barva (ISO 2049) | Max. 2,0 | | | |
| Průrazné napětí (kV) | > 55 | > 60 | 50 - 60 | < 50 |
| Obsah vody (mg/kg) | < 10 | < 5 | 5 - 10 | > 10 |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | Max. 0,03 | < 0,10 | 0,10 – 0,15 | > 0,15 |
| Ztrátový činitel při 90°C | Max. 0,010 | < 0,10 | 0,10 – 0,20 | > 0,20 |
| Rezistivita při 20°C (GΩm) | - | > 200 | 20 - 200 | < 20 |
| Rezistivita při 90°C (GΩm) | Min. 60 | > 10 | 1 - 10 | < 1 |
| Oxidační stabilita | Jak je uvedeno v IEC 60296 | - | - | - |
| Mezipovrchové napětí (mN/m) | Min. 35 | > 28 | 22 - 28 | < 22 |
| Celkový obsah PCB (mg/kg) | Nedetekovatelné (<2 celkem) | < 50 | < 50 | < 50 |
| Částice | viz. tab | viz. tab | viz. tab | viz. tab |



Tabulka 7: Kategorie zařízení B

Výkonové transformátory/reaktory o jmenovitém napětí nad 72,5 kV až do 170 kV včetně (jiné než ty, které jsou uvedeny v kategorii A).

Četnost rutinních zkoušek 1 - 4 roky

| Parametr | Nový | V provozu | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------|-------------|-------------------|
| | | Dobry | Vyhovující | Špatný |
| Vzhled | Čirý | Čirý | | Tmavý anebo kalný |
| Barva (ISO 2049) | Max. 2,0 | | | |
| Průrazné napětí (kV) | > 60 | > 50 | 40 - 50 | < 40 |
| Obsah vody (mg/kg) | < 10 | < 5 | 5 - 15 | > 15 |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | Max. 0,03 | < 0,10 | 0,10 – 0,20 | > 0,20 |
| Ztrátový činitel při 90°C | Max. 0,015 | < 0,10 | 0,10 – 0,50 | > 0,50 |
| Rezistivita při 20°C (GΩm) | - | > 60 | 4 - 60 | < 4 |
| Rezistivita při 90°C (GΩm) | Min. 60 | > 3 | 0,2 - 3 | < 0,2 |
| Oxidační stabilita | Jak je uvedeno v IEC 60296 | - | - | - |
| Mezipovrchové napětí (mN/m) | Min. 35 | > 28 | 22 - 28 | < 22 |
| Celkový obsah PCB (mg/kg) | Nedetekovatelné (<2 celkem) | < 50 | < 50 | < 50 |
| Částice | - | viz. tab | viz. tab | viz. tab |



Tabulka 8: Kategorie zařízení C

Výkonové transformátory/reaktory pro VN/NN aplikace, např. o jmenovitém napětí do 72,5 kV včetně a trakční transformátory (jiné než ty, které jsou uvedeny v kategorii A). Olejem plněné vypínače o jmenovitém napětí nad 72,5 kV. Olejem plněná spínací zařízení, kovově zapouzdřená rozvodná zařízení pro střídavý proud o jmenovitém napětí větším nebo rovným 16 kV.

Četnost rutinních zkoušek 2 - 6 roky

| Parametr | Nový | V provozu | | |
|-----------------------------|--|-----------|-------------|-------------------|
| | | Dobrý | Vyhovující | Špatný |
| Vzhled | Čirý | Čirý | | Tmavý anebo kalný |
| Barva (ISO 2049) | Max. 2,0 | | | |
| Průrazné napětí (kV) | do $x > 55$ nad $x > 60^A$ | > 40 | 30 - 40 | < 30 |
| Obsah vody (mg/kg) | 20 | < 10 | 10 - 25 | > 25 |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | Max. 0,03 | < 0,15 | 0,15 – 0,30 | > 0,30 |
| Ztrátový činitel při 90°C | do $x \leq 0,015$ nad $x \leq 0,010^A$ | < 0,10 | 0,10 – 0,50 | > 0,50 |
| Rezistivita při 20°C (GΩm) | - | > 60 | 4 - 60 | < 4 |
| Rezistivita při 90°C (GΩm) | Min. 60 | > 3 | 0,2 - 3 | < 0,2 |
| Oxidační stabilita | Jak je uvedeno v IEC 60296 | - | - | - |
| Mezipovrchové napětí (mN/m) | Min. 35 | > 28 | 22 - 28 | < 22 |
| Celkový obsah PCB (mg/kg) | Nedetekovatelné (<2 celkem) | < 50 | < 50 | < 50 |
| Částice | - | viz. tab | viz. tab | viz. tab |

Poznámka: A) $x=72,5kV$



Tabulka 9: Kategorie zařízení D

Přístrojové transformátory pro měření a ochrany o jmenovitém napětí nad 170 kV.

Četnost rutinních zkoušek 1 - 2 roky

| Parametr | Nový | V provozu | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------|-------------|-------------------|
| | | Dobry | Vyhovující | Špatný |
| Vzhled | Čirý | Čirý | | Tmavý anebo kalný |
| Barva (ISO 2049) | Max. 2,0 | | | |
| Průrazné napětí (kV) | > 60 | > 60 | 50 - 60 | < 50 |
| Obsah vody (mg/kg) | < 10 | < 5 | 5 - 10 | > 10 |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | Max. 0,03 | < 0,10 | 0,10 – 0,15 | > 0,15 |
| Ztrátový činitel při 90°C | Max. 0,010 | < 0,01 | 0,01 – 0,03 | > 0,03 |
| Rezistivita při 20°C (GΩm) | - | > 800 | 250 - 800 | < 250 |
| Rezistivita při 90°C (GΩm) | Min. 60 | > 50 | 10 - 50 | < 10 |
| Oxidační stabilita | Jak je uvedeno v IEC 60296 | - | - | - |
| Mezipovrchové napětí (mN/m) | Min. 35 | > 28 | 22 - 28 | < 22 |
| Celkový obsah PCB (mg/kg) | Nedetekovatelné (<2 celkem) | < 50 | < 50 | < 50 |
| Částice | viz. tab | viz. tab | viz. tab | viz. tab |

Tabulka 10: Kategorie zařízení E

Přístrojové transformátory pro měření a ochrany o jmenovitém napětí až do 170 kV.

Četnost rutinních zkoušek 2 - 6 roky

| Parametr | Nový | V provozu | | |
|----------------------------|----------------------------|-----------|-------------|-------------------|
| | | Dobry | Vyhovující | Špatný |
| Vzhled | Čirý | Čirý | | Tmavý anebo kalný |
| Barva (ISO 2049) | Max. 2,0 | | | |
| Průrazné napětí (kV) | > 60 | > 50 | 40 - 50 | < 40 |
| Obsah vody (mg/kg) | < 10 | < 5 | 5 - 15 | > 15 |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | Max. 0,03 | < 0,10 | 0,10 – 0,20 | > 0,20 |
| Ztrátový činitel při 90°C | Max. 0,015 | < 0,10 | 0,10 – 0,30 | > 0,30 |
| Rezistivita při 20°C (GΩm) | - | > 60 | 7 - 60 | < 7 |
| Rezistivita při 90°C (GΩm) | Min. 60 | > 3 | 0,4 - 3 | < 0,4 |
| Oxidační stabilita | Jak je uvedeno v IEC 60296 | - | - | - |



| | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------|----------|
| Mezipovrchové napětí (mN/m) | Min. 35 | Není rutinní zkouška | | |
| Celkový obsah PCB (mg/kg) | Nedetekovatelné (<2 celkem) | < 50 | < 50 | < 50 |
| Částice | - | viz. tab | viz. tab | viz. tab |

Tabulka 11: Kategorie zařízení F

Nádoby přepínačů odboček pod zatížením zahrnující kombinované nádoby pro volič a přepínač. Četnost rutinních zkoušek 1 - 6 roky

| Parametr | V provozu | | |
|-----------------------------|--|------------|--------------------|
| | Dobry | Vyhovující | Špatný |
| Vzhled | Čirý | | Tmavý a/nebo kalný |
| Barva (ISO 2049) | | | |
| Průrazné napětí (kV) | Přepínače odboček zapojený do hvězdy (regulující v neutrálu transformátoru) u O,A,B,C traf < 25 Jednofázové nebo propojené přepínače odboček u O,A,B transformátorů < 40 | | |
| Obsah vody (mg/kg) | Jako pro odpovídající transformátor | | |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | Není rutinní zkouška | | |
| Ztrátový činitel při 90°C | Není rutinní zkouška | | |
| Rezistivita při 20°C (GΩm) | - | - | - |
| Rezistivita při 90°C (GΩm) | - | - | - |
| Oxidační stabilita | - | - | - |
| Mezipovrchové napětí (mN/m) | Neaplikuje se. | | |
| Celkový obsah PCB (mg/kg) | < 50 | < 50 | < 50 |
| Částice | viz. tab | viz. tab | viz. tab |



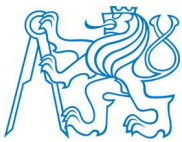
Tabulka 12: Kategorie zařízení G

Olejem plněné vypínače o jmenovitém napětí do 72,5 kV včetně. Olejem plněná spínací zařízení, kovově zapouzdřená rozvodna zařízení pro střídavý proud o jmenovitém napětí menším než 16 kV.

Četnost rutinních zkoušek 2 - 6 roky

| Parametr | Nový | V provozu | | |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|------------|--------------------|
| | | Dobry | Vyhovující | Špatný |
| Vzhled | Čirý | Čirý | | Tmavý a nebo kalný |
| Barva (ISO 2049) | Max. 2,0 | | | |
| Průrazné napětí (kV) | > 55 | - | - | < 30 |
| Obsah vody (mg/kg) | 20 | Není rutinní zkouška | | |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | Max. 0,03 | Není rutinní zkouška | | |
| Ztrátový činitel při 90°C | Max. 0,015 | Není rutinní zkouška | | |
| Rezistivita při 20°C (GΩm) | - | - | - | - |
| Rezistivita při 90°C (GΩm) | Min. 60 | - | - | - |
| Oxidační stabilita | Jak je uvedeno v IEC 60296 | - | - | - |
| Mezipovrchové napětí (mN/m) | Min. 35 | Neaplikuje se | | |
| Celkový obsah PCB (mg/kg) | Nedetekovatelné (<2 celkem) | < 50 | < 50 | < 50 |
| Částice | - | Není rutinní zkouška | | |

Výtah z normy ČSN EN 60422 [6] a [7]



1.6 Parametry transformátorových olejů

Počet sledovaných parametrů u transformátorových olejů se zpravidla zvyšuje s provozní napětíovou hladinou a výkonem transformátoru. U olejových náplní transformátorů s napětím 110 kV a vyšším se měří průrazné napětí, kyselost, obsah vody, ztrátový činitel, povrchové napětí a obsah inhibitoru. U transformátorů s výkony nad 100 MVA se provádí také kvantitativní a kvalitativní analýza plynů obsažených v oleji metodou plynové chromatografie. V posledních letech se také analyzuje obsah korozivní síry.

1.5.1 Průrazné napětí

Zjištění hodnoty průrazného napětí U_p je jedinou zkouškou, ze které lze přímo usoudit, zda je izolační olej v daném uspořádání vyhovující. Hodnota průrazného napětí je sumární veličina, na kterou má podstatný vliv obsah emulgované nebo vázané vody, pevné nečistoty a obsah plynů. Z jeho hodnoty však není možné posoudit stupeň provozního zestárnutí oleje.

1.5.2 Číslo kyselosti

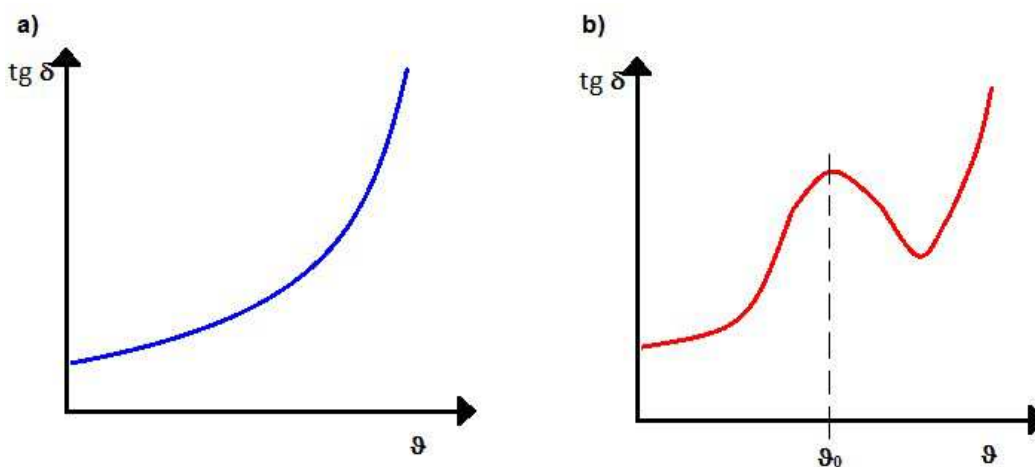
Hodnota čísla kyselosti je z hlediska provozního zestárnutí oleje nejvýznamnější veličinou. Kyseliny vznikající oxidačními pochody způsobují korozi kovů a mají degradační účinky na izolanty, především na mechanickou pevnost celulózových izolantů. Konečnými produkty oxidace jsou nerozpustné kaly a usazeniny, které zhoršují odvod tepla z aktivních částí stroje. U nových transformátorových olejů číslo kyselosti indikuje stupeň rafinace oleje, případně upozorňuje na přítomnost organických kyselin zbylých z rafinace.

1.5.3 Obsah vody

Voda se v olejové náplni objevuje vlivem nedokonalé izolace nádoby transformátoru od okolní atmosféry, vzniká také jako produkt oxidačního stárnutí celulózy a je také vedlejším produktem při polykondenzačních reakcích. Voda v emulgované i ve vázané formě podstatně snižuje hodnotu průrazného napětí a urychluje degradaci pevných izolací. Převyšuje-li obsah vody v izolačním oleji limitní hodnoty, je třeba provést vysušení olejové náplně i izolačního systému transformátoru.

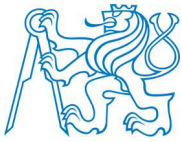
1.5.4 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel je sumární hodnotou, která indikuje přítomnost pevných částic, rozpuštěných polárních a iontových složek v oleji. Pokud je jeho hodnota vyšší než limitní a prokáže-li také měření dalších veličin nebezpečí vylučování kalů, je nutno vyměnit nebo zregenerovat stávající náplň. Ztrátový činitel závisí na teplotě, frekvenci a intenzitě elektrického pole. V čistých nepolárních kapalných izolantech se nachází pouze elektronová polarizace. Ztráty jsou způsobeny pouze elektrickou vodivostí těchto izolantů, dielektrické ztráty jsou zanedbatelné. Teplotní závislost ztrátového činitele odpovídá průběhu teplotní závislosti měrné elektrické vodivosti, které je zobrazeno na *obr. 2a*).



Obrázek 2: Teplotní charakteristika $\text{tg } \delta$, a) nepolárních, b) polárních izolantů [2]

V polárních kapalných izolantech jsou přítomny kromě vodivostních ztrát i výrazné ztráty polarizační. U těchto látek jsou dielektrické ztráty větší než u nepolárních, toto je způsobeno v převážné míře vyššími vodivostními ztrátami. Na *obr. 2b*) je zobrazena teplotní závislost ztrátového činitele polárních kapalných izolantů. Výsledná teplotní charakteristika je součtem vodivostních a polarizačních ztrát. Teplotní závislost vykazuje maximum, to souvisí s viskozitou. S klesající teplotou roste viskozita. Při zvyšování teploty nastane stav, kdy se dipóly nemohou již pohybovat díky vysoké viskozitě prostředí. Tomuto stavu odpovídá maximum ztracené energie. Při stále se zvyšující teplotě klesá viskozita a tím se i sníží ztrátový činitel. [2]



1.5.5 Rezistivita

Velikost rezistivity závisí na obsahu vody, obsahu nečistot, teplotě a stupni oxidace elektroizolační kapaliny. Umožňuje detekci produktů provozního stárnutí a absorbované vody. Převrácenou hodnotou vnitřní rezistivity je elektrická vodivost. Elektrická vodivost se zvyšuje s rostoucí teplotou, jelikož se snižuje viskozita a tím i rezistivita. V případě, kdy hodnota rezistivity při 90 °C se nachází v normě, ale při okolní teplotě nikoliv, je zřejmé, že se v oleji nachází další látky a voda.

Rezistivita je pouze doplňující veličina, která usnadňuje v některých případech posouzení ztrátového činitele. Souvisí s přítomností cizích složek vodivostního charakteru v oleji. Vnitřní rezistivita izolantů může být v rozmezí hodnot: $\rho_v = 10^7$ až $10^{10} \Omega m$. [9]

1.5.6 Mezipovrchové napětí na rozhraní olej – voda

Z hodnoty této veličiny lze určit přítomnost již velmi nízkých koncentrací polárních látek, vzniklých při provozním stárnutí oleje, nebo zbylých z nevhodného ošetření vnitřní části transformátoru. Pokles hodnoty mezipovrchového napětí pod limitní hodnotu svědčí o tvorbě a vylučování kalů v oleji. Z naměřených hodnot můžeme odvozovat tzv. oxidační stabilitu a posoudit úroveň zestárnutí olejové náplně.

1.5.7 Oxidační stabilita

Oxidace je reakce, která v oleji probíhá většinou mezi. Kyslík je při oxidaci vstřebán do molekul oleje a mění tím zásadně jeho vlastnosti. Rychlost oxidace oleje závislá na teplotě, čím je teplota oleje větší, tím rychleji olej oxiduje a degraduje. Zvýšení teploty o 10° C rovná se přibližně zdvojnásobení rychlosti oxidace. Protože gradient oxidace závisí na teplotě, hovoříme o termooxidačním stárnutí oleje, při němž olej kromě oxidace podléhá zároveň i určitým termickým změnám. Oxidační stabilitu olejů určujeme z důvodu zjištění chování oleje vystavenému dlouhodobému namáhání a jako kritérium pro porovnání mezi dalšími izolačními oleji. [10]

1.5.8 Obsah inhibitoru

Pro zpomalení procesu oxidačního stárnutí se do izolačních olejů přidává antioxidační inhibitor v množství 0,3 až 0,5% hmotnosti. U nových olejů se zjišťuje, zda je olej inhibován, u olejů z provozu se určuje, do jaké míry byl inhibitor následkem provozního stárnutí spotřebován.



1.5.9 Barva

Barva je vyjádření jakosti kapalného izolantu a přítomnosti cizích látek. Je prvním kritériem, kterým lze odhadnout stav izolačního oleje po jeho odběru z transformátoru. Stanovuje se orientačně porovnáním vzorku s barevnými standardy. Čím je barva oleje světlejší, tím je olej jakostnější. V provozu izolační oleje tmavnou. Změnou barvy lze diagnostikovat první stupeň oxidačního stárnutí. [2]

1.5.10 Viskozita

Viskozita je fyzikální veličina udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny. Je to veličina, která charakterizuje vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mezi částicemi mají větší viskozitu, větší viskozita zpomaluje pohyb kapaliny nebo těles v kapalině. Při volbě oleje do transformátoru je výhodnější kapalina s nižší viskozitou, kde se snáze dostane do pórů izolace a lépe odvádí teplo, tudíž lépe chladí vinutí. [8].

1.5.11 Bod vzplanutí

Je jakostní parametr určující kvalitu elektroizolačních kapalin. Kvantifikuje do jaké teploty je olej bezpečný a nevzniká tak riziko zahoření. Bod vzplanutí je teplota, při které se v oleji vytvoří směs par a vzduchu. Tato se po přiložení zdroje hoření vznítí a okamžitě zhasne. [9]

1.5.12 Bod tuhnutí

Bod tuhnutí určuje, jak se bude izolační olej chovat při nízkých teplotách. Důležitá informace při spouštění transformátorů v extrémně nízkých teplotách. Např. parafinické oleje se jeví jako nevhodné. Teplota tuhnutí udává hodnotu, při níž olej tuhne a zvyšuje se jeho viskozita. Zároveň dochází k vylučování a růstu krystalů, eventuálně k vylučování parafinu. Teplota přeměny jednoho skupenství ve druhé je závislá na chemickém složení a na čistotě oleje. U chemicky čistých látek s nízkou molekulovou hmotností je přechod ostrý. U technických výrobků, které jsou směsí látek, dochází k přeměně v intervalu několika stupňů. [2]



1.5.13 Obsah PCB látek

Polychlorované bifenyly jsou syntetické látky, které obsahují na bifenylovém jádře 1-10 atomů chlóru. Jsou to izomery, které se liší nejen počtem ale i polohou atomů chlóru. Jedná se o bezbarvou nebo do žluta zbarvenou netěkavou kapalinu. Vlastnosti jsou ovlivněny především obsahem chloru a stupněm chlorace. Mezi jejich výborné vlastnosti patří jejich teplotní stálost, odolnost vůči oxidaci a kyselinám, vysoký bod varu (310-390 °C). Jsou téměř nerozpustné ve vodě, ale naopak dobře rozpustné v organických rozpouštědlech a tucích. PCB jsou velmi nebezpečné pro lidi a zvířata. Jedná se o téměř neodbouratelné karcinogenní látky, které se kumulují v tukových tkáních živých organismů. [11]

Jediným výrobcem syntetických izolačních olejů s PCB na území bývalého Československa byl chemický kombinát Chemko Strážské. Výrobek nesl označení DELOR150/80. Od konce 60. let, kdy byl zjištěn negativní vliv PCB na životní prostředí, byla výroba postupně celosvětově omezována. V současné době se kapaliny s obsahem PCB v ČR nevyrábějí a je zakázáno je dovážet. Do roku 2010 měly být látky PCB a zařízení s PCB odstraněny. [12]

Zkouška na PCB se provádí z důvodu možného zavlečení této látky do olejové náplně z jiného zařízení, např. v opravě transformátorů apod. PCB nevzniká v minerálním oleji stárnutím náplně a ani při hoření oblouku, jak je často mylně prezentováno.

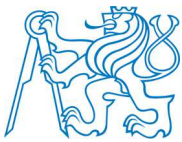
1.5.14 Obsah korozivní síry

Dibenzylsulfid (DBDS) je jednou ze sloučenin síry používané jako inhibitor. Sloučenina může za určitých podmínek působit korozivně na měď ve vinutí transformátorů. DBDS samotné korozivní být nemusí, ale působením vyšší teploty dochází k jeho rozkladu na merkaptany, které ale jsou silně korozivní. [13]

Správné vyvážení obsahu této látky v oleji je předmětem dalšího zkoumání a přesná dávka není zatím stanovena.

1.5.15 Celkové posouzení stavu oleje

Stav olejové náplně daného zařízení se posuzuje komplexně z uvedených měření a zkoušek popř. i dalších parametrů.



Tabulka 13: Doporučené parametry transformátorového oleje

| Měřená veličina | Jednotka | Před uvedením do provozu | V provozu | Distribuční transformátory v provozu |
|----------------------|-------------|--------------------------|-----------|--------------------------------------|
| Průrazné napětí | kV / 2,5 mm | min. 70 | min. 65 | min. 45 |
| Číslo kyselosti | mg KOH / g | max. 0,04 | max. 0,08 | max. 0,1 |
| Obsah vody | mg / kg | max. 12 | max. 25 | max. 25 |
| Ztrátový činitel tgδ | % | max. 0,5 | max. 7 | max. 10 |
| Mezipovrchové napětí | mN / m | min. 50 | min. 38 | min. 33 |
| Rezistivita | GΩm | min. 60 | min. 2 | - |
| Obsah inhibitoru | % | 0,3 - 0,5 | min. 0,15 | - |



Obrázek 3: Olej, Fullerova hlínka a inhibitor



2 Technologie čištění

2.1 Filtrace transformátorových olejů

Pod pojmem „filtrace“ se rozumí odstranění nežádoucích pevných částic, vody a plynů obsažených v oleji. Např. Energetické strojírný Brno, a.s., k tomuto účelu vyrábějí řadu mobilních filtračních stanic typu FOL. Zachycování mechanických částic větších než 3 (popř. 0,5) mikrometry je zajištěno působením **filtrů** s vyměnitelnými vložkami. K vysoušení a odplynění oleje slouží vakuová komora. Po jednom průběhu stanicí FOL se sníží v oleji objem vody asi pětkrát a objem plynů asi desetkrát. Po komplexní „filtraci“ získávají oleje opět požadované vlastnosti a mohou s úspěchem plnit svoji původní funkci.

Pro vakuové sušení oleje jsou postačující teploty mezi 30 a 40 °C. Pokud ovšem současně vysušujeme pevné izolace, jsou potřebné teploty minimálně 60 °C. Při vakuovém sušení transformátorů tzv. oil spray, jsou používané teploty až 100 °C, to ovšem znehodnocuje transformátorový olej a tento nelze již jako elektroizolační olej použít.

Odplynění oleje je proces řídicí se Henryho zákonem. Rozpustnost plynů je přímo úměrná parciálnímu tlaku plynu nad hladinou a nepřímo úměrná teplotě kapaliny. Schopnost rozpouštět plyny je u transformátorového oleje značná a velice rozdílná v závislosti na druhu plynu. Při teplotě 25 °C a normálním tlaku se v oleji rozpustí, vztaženo na objem oleje, 8,6 % dusíku, 16 % kyslíku, ale až 120 % oxidu uhličitého a až 400 % acetylénu.

Pokud uvažujeme jenom standardní atmosféru, pak se za normálního tlaku v oleji ustálí celkové množství rozpuštěných plynů přibližně na 10 % objemových. Pokud požadujeme odplynění na obsah 0.5 %, pak je potřebné za teploty okolí vakuum cca 40 *mbar*. Při zvýšení teploty oleje na 60 °C a stejné úrovni vakua bude obsah plynů cca 0.2 %. Pokud ovšem u zestárlých olejů odstraňujeme rozpuštěný oxid uhličitý a acetylén na úroveň 0.5 %, je při teplotě oleje 25 °C potřebné vakuum cca 1 *mbar*, při teplotě 60 °C cca 2 *mbar*. Odplynění olejů z transformátorů je tedy náročnější než odplynění nových olejů.



2.2 Regenerace transformátorových olejů

Proces regenerace oleje v sobě zahrnuje filtraci pevných částic, separaci polárních látek na sorpčním materiálu, vakuové vysoušení a odplyňování. Rozhodujícím činitelem celého postupu je proces fyzikálně-chemického čištění procházejícího oleje působením sorpční kolony, která je tvořena sypkým materiálem (např. fullerovou hlinkou) s aktivním povrchem nad $200 \text{ m}^2/\text{g}$. Pro dosažení úplného regeneračního efektu je minimální doba styku oleje se sorbentem přibližně 40 minut. Sorpční kolona je schopna zregenerovat v jednom cyklu až desetinásobné množství oleje vzhledem k hmotnosti náplně. Při překročení sorpční kapacity již dále nedochází ke zlepšení kvality procházejícího oleje.

V tomto okamžiku se zpravidla zastaví přísun vstupujícího oleje. V hlince zůstává olej v množství odpovídajícím asi 60 % hmotnosti hlinky.

Tento postup je dostatečně znám již desítky let s tím, že olejem nasycenou hlinku provozovatelé likvidovali ve spalovnách.

Zásadní průlom v rozsahu použití regenerační technologie nastal až s uplatněním principu opakované reaktivace sorpčního materiálu, čímž se otevřely nové možnosti, zejména v regenerování olejových náplní přímo v nádobě transformátoru.

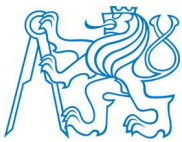
Byla vyvinuta řada regeneračních stanic, které uplatňují moderní technologii s reaktivací sorpčního materiálu. Stanice jsou vyráběny zakázkově s volitelnou kapacitou obvykle do hodnoty 5000 l/h a lze je používat pro filtraci i pro regeneraci transformátorového oleje.

2.3 Regenerační zařízení typu BF

Zařízení používáme pro regeneraci transformátorových olejů formou služby pro zákazníka. Stanice je umístěná na návěsu a slouží zejména pro regeneraci středně zestárých transformátorových olejů přímo v nádobě transformátoru. V režimu regenerace oleje je průtok oleje plynule nastavitelný. Pro odstranění produktů stárnutí se využívá funkce „desludging“, při které je možné dosáhnout průtoku oleje 10 až 30 tisíc litrů za hodinu. Stanice pracuje ve dvou základních cyklech:

2.3.1 Regenerace oleje

Olej určený k regeneraci je pomocí sacího čerpadla veden do ohříváče, kde získává optimální teplotu pro vlastní regenerační proces. Pevné částice větší než 5 mikrometrů jsou zachyceny na filtru, odkud již olej proudí do sorpčních kolon - perkolátorů. Při průchodu



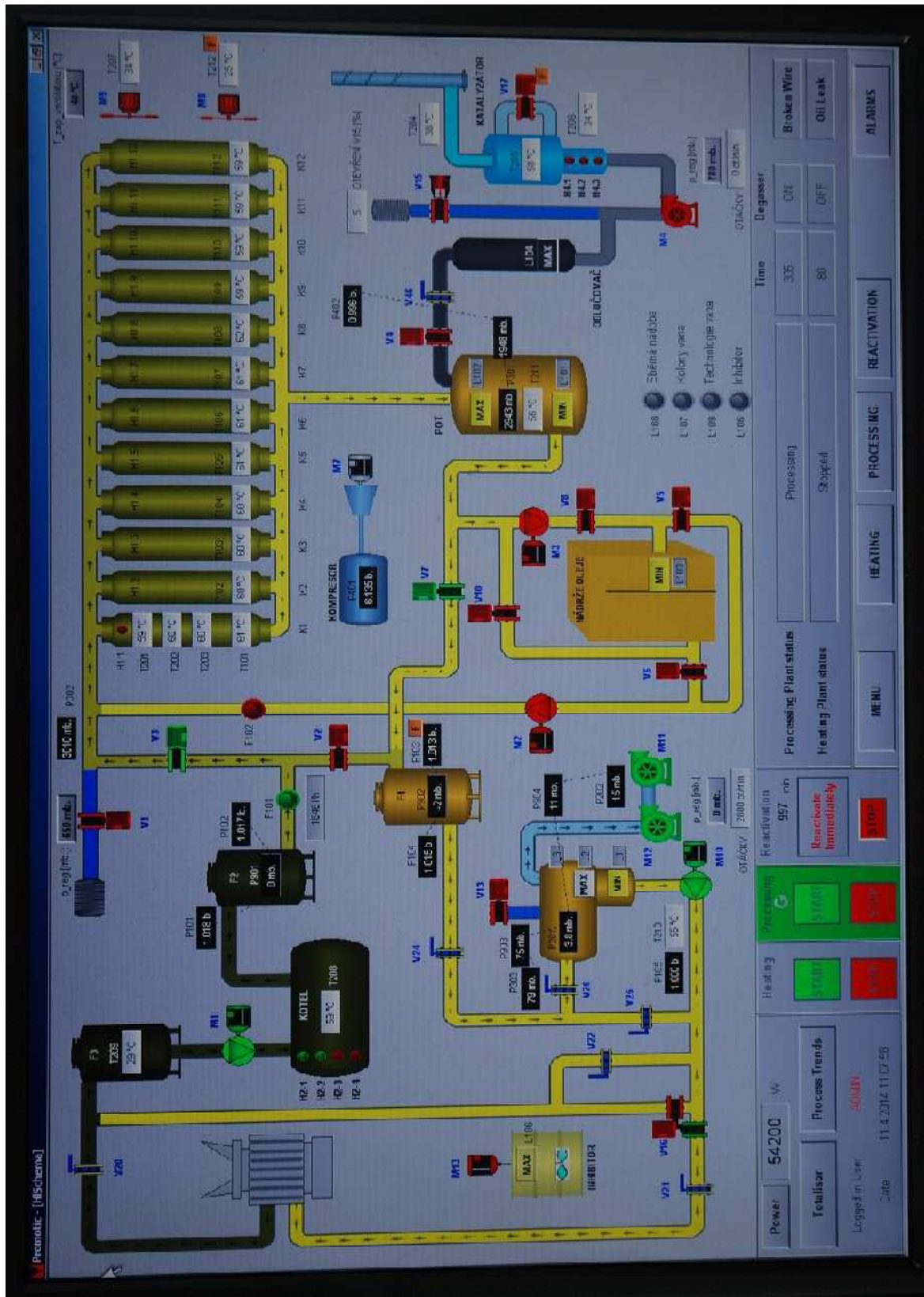
paralelními kolonami dochází v oleji k fyzikálně - chemickým procesům, při nichž se z něj odstraňují produkty stárnutí (organické kyseliny, aldehydy, ketony a mýdla, polymery nenasycených uhlovodíků, ...atd.). Pro tento proces fyzikálně-chemického čištění procházejícího oleje působením sorpční kolony, se používá porézní materiál (např. fullerská hlinka) s aktivním povrchem nad $200 \text{ m}^2/\text{g}$. Pro dosažení úplného regeneračního efektu je minimální doba styku regenerovaného oleje s adsorbentem 30 - 40 minut. Sorpční kolona je schopna zregenerovat v jednom cyklu až desetinásobné množství oleje vzhledem k hmotnosti náplně.

Z perkolátorů přichází olej přes jemný filtr do vakuové komory, kde se vysuší a odplyní. Vakuový separátor představuje poslední technologický článek regeneračního postupu, jemuž je procházející olej podroben. Čistý regenerát pak pomocí výtlačného čerpadla opouští zařízení, přičemž ještě prochází gradientním filtrem $3 \mu\text{m}$ pro dosažení vyšší elektrické pevnosti.

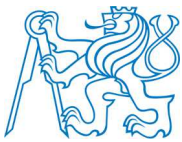
Sorpční materiál nemá samozřejmě neomezenou schopnost pohlcovat produkty stárnutí a po určité době (doba procesu regenerace oleje 8-10 hodin) se nasytí, což vede k poměrně rychlé změně barvy výstupního oleje. Poté následuje proces reaktivace sorpční náplně.

2.3.2 Reaktivace sorpční náplně

Pro znovunabytí regeneračních vlastností je nutno sorpční kolonu reaktivovat. Tento proces je zahájen vysoušením náplní perkolátorů horkým vzduchem z dmýchadla, přičemž se plní zásobník s dále použitelným olejem. Potom je v koloně spuštěna termochemická reakce s dobou trvání cca 5 hodin, při níž jsou z hlínky vytěsněny zachycené látky. V dalších 8 hodinách se perkolátory chladí procházejícím vzduchem. Reaktivovaný sorpční materiál dosahuje téměř shodné účinnosti s materiálem zcela novým a reaktivací cyklus je možné aplikovat opakovaně zhruba po dobu jednoho roku bez výměny náplně, prakticky až do mechanické degradace zrn hlínky. Komplexní cyklus regenerace oleje a reaktivace sorpčních kolon v režimu „z nádoby do nádoby“ trvá dohromady 24 hodin a lze jej tedy opakovat po celých dnech, což je z hlediska provozu velmi výhodné. Při regeneraci oleje v nádobě transformátoru se oba cykly opakují tak dlouho, dokud regenerát nezíská vyhovující parametry (zpravidla po třech nebo čtyřech obězích). Již po prvním oběhu je vhodné



Obrázek 4: Schéma regenerační aparatury



přerušovaně provádět „desludging“, s velmi intenzivním oplachováním vinutí stroje. Jelikož se u nás používají převážně inhibované oleje je nutné po regeneraci doplnit inhibitor DtBPC na obsah cca 0,35 % hmotnostních, což se provede na závěr v procesu „aditivace“. Celý postup regenerace oleje i reaktivace je řízen automaticky, je optimalizován podle řady ukazatelů (množství oleje, stupeň znečištění, hodnoty parametrů z průběžně získaných vzorků, režim, atd.) a je provázen velice nízkou produkcí odpadního neregenerovatelného oleje v celkovém množství do 2 % z celkového zpracovávaného množství.

Tabulka 14: Orientační tabulka typických a limitních hodnot

| Parametr | Metoda | Zestárlý olej | Nový olej | Regenerovaný olej | Limit IEC |
|------------------------------------|----------------|---------------|-----------|-------------------|-----------|
| Průrazné napětí (kV / 2,5 mm) | IEC 60156 | ~ 20 | > 70 | > 70 | 50 |
| Číslo kyselosti (mg KOH / g) | IEC 60296 / 82 | ~ 0,2 | < 0,03 | < 0,01 | 0,03 |
| Obsah vody (mg / kg) | IEC 60814 | až 1500 | < 10 | < 10 | 10 |
| Ztrátový činitel tg δ při 90°C (%) | IEC 60247 | ~ 10 | < 0,3 | < 0,4 | 0,5 |
| Mezipovrchové napětí (mN / m) | ISO 606295 | ~ 25 | > 40 | > 50 | 40 |
| Rezistivita při 90°C (GΩm) | IEC 60247 | ~ 1 | > 150 | > 150 | 60 |
| Obsah inhibitoru (%) | IEC 60666 | 0 | 0,3 - 0,5 | 0,3 - 0,5 | - |



Obrázek 5: Regenerační aparatura na pracovišti



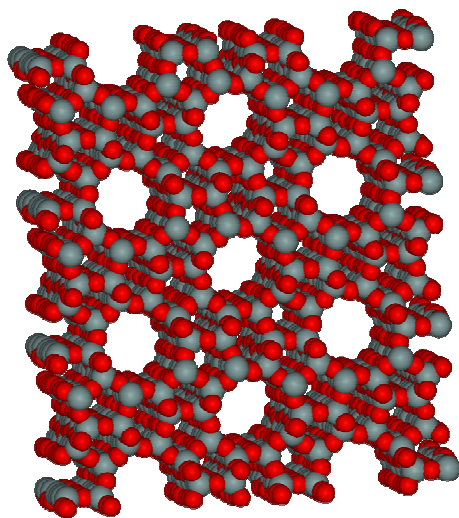
2.4 Fullerova hlínka

Používá se, jako absorbent při procesu regenerace. V současné době je využíván attapulgit. Jde původem o horninu, která se těží povrchovým způsobem. Jílový minerál s vrstevnatou strukturou z geologického hlediska patří do skupiny minerálů s řetězovou strukturou (řetězy Si - O tetraedrů spojené oktaedrickými skupinami)

Zeolity (do podskupiny patří i attapulgit) jsou krystalické hydratované alumosilikáty alkalických kovů a kovů alkalických zemin. Jedinečnost spočívá v tom, že prostorové uspořádání atomů vytváří kanálky a dutiny konstantních rozměrů. V těchto kanálcích se mohou zachytávat látky tuhého, kapalného a plynného skupenství.

Fyzikálně-chemické vlastnosti zeolitu vyplývají z jeho alumosilikátové kostrovité struktury, která umožňuje dehydrataci, výměnu iontů a absorpci molekul různé velikosti, bez jejich narušení. Tato vlastnost umožňuje používat zeolit jako sorbent, molekulární síto a katalyzátor. [14]

Pro průmyslové využití se tato surovina dále zpracovává do formy granulí s aktivním povrchem až $200\text{m}^2/\text{g}$.



Obrázek 6: Struktura zeolitů



Obrázek 7: Fullerova hlínka



3 Regenerace oleje

3.1 Popis regenerace mobilní regenerační stanicí typu BF :

- odběr vzorku olejové náplně a její vyhodnocení v laboratoři
- připojení regenerační stanice typu BF k síti a k transformátoru
- zkouška těsnosti připojovacích armatur proti úniku oleje a vakuování hadic
- regenerace oleje podle optimalizovaného postupu navrženého v laboratoři

Tento postup je navržen na základě druhu oleje, stupně zestárnutí, analýze produktů stárnutí, fyzikálně chemických a elektrických parametrů oleje.

Regenerační cyklus: 6 až 12 hodin regenerace oleje, 12 hodin reaktivace sorpčního materiálu.

Při prováděné regeneraci se současně odstraňují pevné částice, vzniklé zejména provozním opotřebením, chemickým a elektrochemickým rozkladem pevných izolací, ale i drobné částice rzi a suspendovaných kalů. Kaly jsou převážně tvořeny pevnými částicemi, mýdly a polymery, které vznikly z kyslíkatých látek produktů stárnutí v silném elektrickém poli. Podle zkušenosti se většina těchto kalů usazuje nejen na vinutí ale i na jádra a izolačních stavbách transformátoru. Tyto kaly jsou poměrně dobře rozpustné v novém, nebo čerstvě regenerovaném oleji již od teploty 40 °C. Jedná se o proces v literatuře označovaný jako "desludging" a je prováděn s výkonem až 30 t/h při teplotě až 80 °C.

- nepřetržitý proces regenerace v regeneračních cyklech probíhá až do doby dosažení požadované kvality regenerátu.

- během regenerace jsou z nádoby odebírány a vyhodnocovány vzorky oleje

- ukončení regenerace na základě výsledků průběžných rozborů olejové náplně (dosažení požadovaných hodnot) a závěrečné doinhibování oleje s ohledem na optimalizaci životnosti.

Předpokládaný obsah inhibitoru je 0.3 až 0.5 %

- doplnění olejové náplně stroje na provozní výšku a případné odvětrání stroje

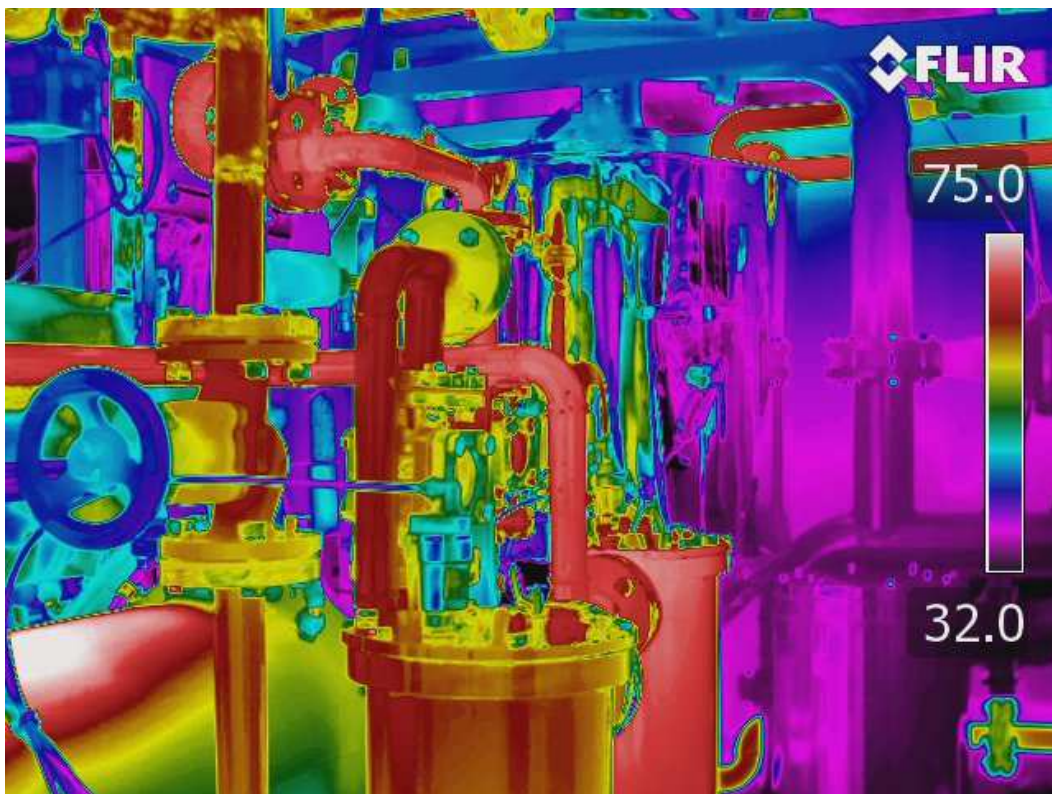
- následný úklid pracoviště po ukončení regeneračního procesu na transformátoru a zabezpečení likvidace veškerého odpadu vzniklého v přímé souvislosti s regenerací olejové náplně

- předání pracoviště objednateli

- vystavení protokolu o měření izolačního stavu stroje a zkoušce izolačního oleje



Obrázek 8: Regenerační aparatura



Obrázek 9: Rozložení teplot regenerační aparatury



3.2 Plánovaný časový harmonogram regenerace

Příklad pro nádrž s náplní 25 t středně zestárlého oleje

Tabulka 15: Plánovaný časový harmonogram

| | |
|---|-------------|
| 1) Přípravné práce | 1. den |
| 2) Vlastní regenerace olejové náplně stroje; desludging | 2. – 8. den |
| 3) Inhibování regenerovaného oleje | 9. den |
| 4) Ukončení procesu regenerace + úklid pracoviště | 10. den |

3.3 Parametry oleje bezprostředně po regeneraci

Tabulka 16: Parametry regenerovaného oleje

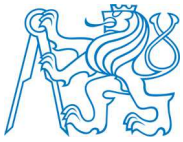
| | |
|------------------------------|-----------------|
| Elektrická pevnost | > 75 kV/2,5 mm |
| Rezistivita (při 20 °C) | > 200 GΩ |
| Ztrátový činitel (tgδ 90 °C) | < 0,005 |
| Mezipovrchové napětí | > 50 mN/m |
| Číslo kyselosti | < 0,01 mg KOH/g |
| Obsah inhibitoru | 0,3 - 0,5 % |
| Obsah vody | < 10 g/t |

Záruka na stálost parametrů je obvykle v trvání 60 měsíců.

Po dobu záruky zhotovitel obvykle garantuje, že kvalitativní ukazatele neklesnou pod následující hodnoty:

Tabulka 17: Stálost parametrů

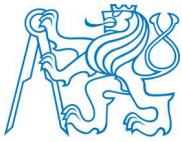
| | |
|--|-----------------|
| Elektrická pevnost (při obsahu vody < 15g/t) | > 70 kV/2,5 mm |
| Rezistivita (při 90 °C) | > 90 GΩ |
| Ztrátový činitel (tgδ 90 °C) | < 0,02 |
| Mezipovrchové napětí | > 40 mN/m |
| Číslo kyselosti | < 0,035mg KOH/g |



Obrázek 10: Řídící a kontrolní pracoviště regenerační stanice



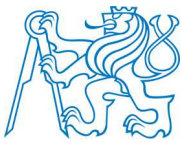
Obrázek 11: Zařízení pro odplynění oleje



Obrázek 12: Celkový pohled na regenerační stanici u VE Slapy



Obrázek 13: Umístění regenerační stanice v blízkosti vodního toku - VE Slapy



4 Laboratorní regenerace

4.1 Princip

Laboratorní regenerace provozovaných transformátorových olejů je založena na shodném principu jako metoda Permasorb firmy Fluidex a to na adsorpci. Produkty stárnutí oleje jsou zachyceny na Fullerově hlince.

Laboratorní regenerace zestárlého oleje odebraného přímo z transformátoru nebo z nádrže umožňuje v předstihu zjistit, jak bude s největší pravděpodobností probíhat provozní regenerace oleje na regenerační lince. V předstihu může stanovit jakostní parametry regenerovaného oleje.

Tato metoda je určena pro regeneraci použitých, nebo časem zestárlých izolačních minerálních olejů. Dále lze touto metodou ověřit, zda je regenerace vhodná pro odstranění případných nežádoucích příměsí izolačního oleje.

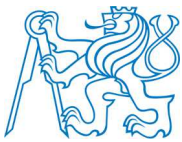
4.2 Přístrojové a laboratorní vybavení, chemikálie

- a) skleněné kolony o délce 450 mm, vnitřním průměru 28 mm o objemu 250 ml, ve spodní části opatřené fritou
- b) Fullerova hlinka na plnění skleněných kolon
- c) infračervený spektrofotometr Buck M500

4.3 Příprava a průběh zkoušky

Laboratorní regenerace se provádí při teplotě 20-25°C. Poměr objemu regenerovaného oleje k Fullerově hlince je 1,5:1 (*ml*).

Regenerační kolona se naplní 450 *ml* Fullerovy hlinky a do odměrné baňky se připraví 700 *ml* oleje určeného k regeneraci. Rychlost průtoku oleje přes regenerační kolonu je stanovena cca na jednu kapku za sekundu, reakční doba 45 min. Rychlost se reguluje pomocí tlačky umístěné na hadičce, která je na výstupu z kolony. Regenerace se opakuje do té doby, až se dosáhne žlutého zbarvení oleje. Proces probíhá tak, že zregenerovaný olej se několikrát nechá protékat přes další kolony s novou Fullerovou hlinkou. Použitá hlinka se opakovaně promyje dvojnásobkem svého objemu acetonem a nechá se volně vysušit.



4.4 Vyhodnocení měření

Objektivní vyhodnocení kvality regenerace se provádí jednak stanovením jakostních parametrů oleje, před a po provedení laboratorní regenerace. Dále je to srovnáním zaznamenaných spekter pomocí infračerveného spektrofotometru Buck M500 v oblasti vlnočtu 3700-3600 cm^{-1} , které vypovídají o výskytu produktů stárnutí v oleji před a po regeneraci.

Sledované parametry:

Obsah vody, číslo kyselosti, povrchové napětí, obsah inhibitoru, ztrátový činitel.

Paradoxem může být, že se některé parametry oleje zhorší, což je způsobeno zaplyněním vzduchem a uvolněním drobných částic hlínky do oleje. Proto se neměří např. průrazné napětí.



Obrázek 14: Kolona



5 Použité přístroje pro laboratorní měření

5.1 Rozdělení zkoušek do skupin:

a) izolační

| | | |
|---------------------------|-------|-------------|
| Hodnota průrazného napětí | U_p | (kV/2,5 mm) |
| Směrodatná odchylka | s | (kV/2,5 mm) |
| Variační koeficient | V | (%) |
| Obsah vody | Q_v | (mg/kg) |

b) jakostní

| | | |
|---|------------------|-----------|
| Číslo kyselosti | $\check{C}k$ | (mgKOH/g) |
| Ztrátový činitel při 20°C | $tg\delta_{20}$ | (-) |
| Ztrátový činitel při 70°C | $tg\delta_{70}$ | (-) |
| Ztrátový činitel při 90°C | $tg\delta_{90}$ | (-)* |
| Permitivita při 20°C | ϵ_{r20} | (-) |
| Permitivita při 70°C | ϵ_{r70} | (-) |
| Permitivita při 90°C | ϵ_{r90} | (-) |
| Rezistivita při 20°C | ρ_{20} | (GΩm)] * |
| Rezistivita při 70°C | ρ_{70} | (GΩm) |
| Rezistivita při 90°C | ρ_{90} | (GΩm)] |
| Relativní mezipovrchové napětí olej – voda | σ | (nN/m) |
| Hustota | ρ_v | (g/ml) |
| Obsah inhibitoru | Q_i | (% hmot.) |

c) zvláštní

| | |
|------------------------------------|------------------------|
| Obsah plynů | (μl/l) |
| Obsah PCB | (mg/kg) |
| Obsah DBDS | (mg/kg) |
| Obsah pasivátorů korozivní síry | (mg/kg) |
| Přítomnost korozivní síry (Cu, Ag) | (přítomna, nepřítomna) |



K objektivnímu určení stavu elektroizolačního oleje je třeba aplikovat celý soubor diagnostických metod. Tyto nám následně umožní získat komplexní posudek. Hodnocení kvality olejů se provádí dle příslušných norem.

Odběru oleje pro zkoušky je nutné věnovat patřičnou pozornost, při nesprávné manipulaci dochází ke zkreslení výsledků. Může například dojít k navlhnutí, odplynění nebo naopak k nasycení vzdušnými plyny. Je nutné používat patřičné nádoby o potřebném objemu, zpravidla skleněné se zabroušenými hrdly. Olej se musí nejprve odtočit neb hrozí znehodnocení vzorku usazeninami ze dna anebo z kohoutu.

O některých metodách měření podrobněji:

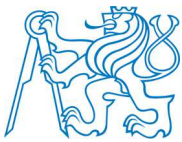
5.2 Průrazné napětí

Zkoušečka olejů (nastaven režim stálého míchání), v.č. GB5008.10A010, typ BA100, výrobce b2 electronic GmbH., r.v. 2010.

Rozšířená nejistota měření: $\pm 1,5\%$ z MH (dle: dodatek SOP 2-11/72).



Obrázek 15: Zkoušečka průrazného napětí



Měření elektrické pevnosti kapalných izolantů se provádí pomocí zkoušečky s definovanými semisférickými elektrodami.

Pro určení hodnoty průrazného napětí se provádí po odstátí šest po sobě jdoucích průrazů po pěti minutách ve zkušební komůrce o objemu 350-600 ml, kde jsou umístěny dvě leštěné elektrody z mosazi o pevné vzdálenosti 2,5 mm. Ze získaných hodnot se vypočte aritmetický průměr (5.1), směrodatná odchylka (5.2) a variační koeficient (5.3). [8]

Podle hodnoty průrazného napětí zjistíme, zda olej obsahuje emulgovanou vodu, nečistoty a plyny.

$$\overline{U_p} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{pi}}{n} \quad (5.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{U_p} - U_{pi})^2}{n - 1}} \quad (5.2)$$

$$v = \frac{s}{\overline{U_p}} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

U_p - aritmetický průměr z naměřených hodnot (kV)

U_{pi} - hodnota průrazného napětí jednotlivých průrazů (kV)

s - směrodatná odchylka (kV)

n - počet průrazů, tedy pro jedno měření $n=6$

v - variační koeficient (%)

Pokud je hodnota variačního koeficientu vyšší než 20 %, musí se provedení zkoušky zopakovat s novým vzorkem izolačního oleje. V případě kdy opět variační koeficient překročí hodnotu 20 % je olej posouzen jako nevyhovující.

5.3 Obsah vody

1) Analytické váhy, v.č. K9300294, HM 202, výrobce A&D Instruments Ltd..

2) Coulometr, v.č. 1MO/176, typ 684 KF, výrobce Metrohm.

Rozšířená nejistota měření: $\pm 10\%$ z MH.



Obsah vody v izolačním oleji se určuje coulometrickou titrační metodou. Tato metoda je založena na reakci vody s jódem, oxidem siřičitým, organickou bází a alkoholem v organickém rozpouštědle. Jód se tvoří elektrolyticky, proporcionálně k množství elektrického proudu a reaguje s vodou. Jeden mol vody reaguje s jedním molem jódu tak, že 1 mg vody je ekvivalentní 0,72 C. Z této reakce je možné stanovit množství vody v oleji přímo z velikosti elektrického náboje tedy počtu coulombů, které jsou nutné pro elektrolýzu.

Obsah vody lze také zjišťovat na principu reakce hydridu vápníku s vodou za vzniku vodíku, který je úměrný obsahu vlhkosti. Rozpustnost vody v izolačním oleji se uvádí v mg/kg. [15]



Obrázek 16: Zkouška na obsah vody

5.4 Číslo kyselosti

- 1) Analytické váhy, v.č. K9300294, HM 202, výrobce A&D Instruments Ltd..
- 2) Předvážky, v.č. 8790, typ MC1, LC 202S, výrobce Sartorius.
- 3) Titroprocesor 682, v.č. 166/263, typ 1.682.0010, výrobce Metrohm.
- 4) Dosimat 682, v.č. 4G1/398, typ 1.665.0030, výrobce Metrohm.

Rozšířená nejistota měření: $\pm 15\%$ z MH.

K měření čísla kyselosti se využívají dvě metody, metoda potenciometrická a titrační.

Potenciometrická metoda určí číslo kyselosti pomocí automatického pH titrátoru. Číslo kyselosti je podle této metody množství báze vyjádřené v miligramech hydroxidu draselného na jeden gram vzorku, které je potřeba k zneutralizování testovaného oleje ve specifickém roztoku, který se titruje do hodnoty pH 11,5. [16]



Titrací kyselých sloučenin alkoholickým roztokem hydroxidu draselného se stanoví číslo kyselosti na alkalickou modř 6B. Nejprve je nutné stanovit tzv. faktor 0,1 M KOH. Stanovení se provede tak, že do směsi etanolu a toluenu v poměru 1:2 se přidává alkalická modř, dokud se kapalina nezbarví do světle modré. Poté se přidá jedna kapka 0,1 M HCL ke zcitlivění indikátoru. Následně se přidá alkoholový roztok KOH do počínajícího červeného zbarvení. Tím se roztok zneutralizuje a přidá se 0,01-0,011 g kyseliny benzoové, po jejím rozpuštění se opět titruje alkoholovým roztokem KOH, jehož faktor se má určit až do počínajícího červeného zbarvení. Faktor 0,1 M KOH v mg KOH se vypočte podle vzorce (5.4). [17]

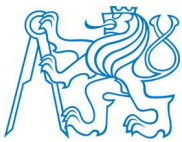
$$f = \frac{a \cdot 1000}{b \cdot 122,12 \cdot 0,1} \quad (5.4)$$

- f - je faktor 0,1 M KOH
 a - navážka kyseliny benzoové v gramech
 b - spotřeba 0,1 M KOH v cm^3
122,12 - ekvivalentní hmotnost kyseliny benzoové.

Po stanovení faktoru f se smíchá 60 ml toluenu, 40 ml etanolu a 2 ml indikátoru. Tato se směs se zneutralizuje 0,1 M KOH až do počínající červené barvy a přilije se do 2 g až 20g izolačního oleje. Poté se roztok po kapkách titruje ofaktorovaným 0,1 M KOH (podle vztahu (5.4)) z modré do červené, které je srovnatelné s 10 % roztokem $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a trvá 15 sekund. Číslo kyselosti se vypočte podle vzorce (5.5). [17]

$$\check{C}K = \frac{a \cdot f \cdot 56,11 \cdot N}{v} \quad (5.5).$$

- $\check{C}K$ - číslo kyselosti v mg KOH/g,
 f - faktor 0,1 M KOH,
 a - spotřeba roztoku 0,1 M KOH v cm^3 ,
 N - molarita titračního alkoholového roztoku KOH,
 v - je navážka vzorku izolačního oleje v gramech.



Obrázek 17: Titroprocesor

5.5 Ztrátový činitel a relativní permitivita

1) Můstek pro měření ztrátového činitele a kapacity, v.č. 114733, typ 2821/ZK, výrobce Tettex Instruments.

Měření se provádí na Scheringově můstku, do jehož obvodu se umístí vzorek izolačního oleje a poté se můstek vyváží. Vzorek oleje tvoří v podstatě izolant přesně definovaného kondenzátoru. Měřicí napětí je až 2kV. Pomocí se stanovuje i relativní permitivita.

Relativní permitivita charakterizuje namáhání izolace v elektrickém poli, její hodnota u izolačních olejů dosahuje 2 až 3. Relativní permitivita závisí na teplotě a stupni zestárnutí oleje. Napomáhá jako další parametr určit čistotu izolačního oleje. Ztrátový činitel a relativní permitivitu lze vypočítat podle následujících vztahů (5.6), (5.7), (5.8), (5.9). [2]



pro $\operatorname{tg} \delta$ je $< 0,1$

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_1 - \frac{C_0}{C_1} \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_r = \frac{C_1}{C_0} \quad (5.7)$$

pro $\operatorname{tg} \delta$ je $> 0,1$

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_1 \quad (5.8)$$

$$\varepsilon_r = \frac{C_1}{C_0} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1) \quad (5.9)$$

$\operatorname{tg} \delta$ - ztrátový činitel měřicí nádoby se vzduchem

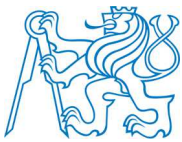
$\operatorname{tg} \delta_1$ - ztrátový činitel měřicí nádoby naplněné zkoušeným izolačním oleje

C_1 - kapacita měřicí nádoby se vzduchem (F)

C_0 - kapacita měřicí nádoby naplněné zkoušeným izolačním oleje (F)



Obrázek 18: Místek



5.6 Vnitřní rezistivita

1) Teraohmmetr (nastavena intenzita el. pole 250 V/mm), v. č. 278340, typ 7KA1100, výrobce SIEMENS.



Obrázek 19: Teraohmmetr a hnízdo pro kapacitor

Vnitřní rezistivitu je možné určit pomocí pikoampérmetru z proudu protékajícím vzorkem oleje v již zmíněném kondenzátoru. Měřící intenzita pole se volí podle druhu testovaného oleje, pokud není uvedeno jinak, volí se intenzita pole $0,25 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$. Kladný potenciál se připojuje na vnější elektrodu měrného kondenzátoru. Poté se vzorek elektrizuje po určité době, která je opět dána druhem izolačního oleje, pokud není uvedeno jinak, elektrizuje se po dobu 60 s. Po uplynutí této doby se spočte hodnota vnitřního elektrického odporu a dosadí se do vzorce (5.10). [2]

$$\rho_v = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot C_0 \cdot R_v \cdot 10^{-2} \quad (5.10)$$

ρ_v - hodnota vnitřní rezistivity ($\text{Q}\cdot\text{cm}$)

C_0 - kapacita prázdné měřící nádoby (F)

R_v - naměřená hodnota vnitřního elektrického odporu (Q)

ε_0 - permitivita vakua $8,8 \cdot 10^{-12} \text{ (F}\cdot\text{m}^{-1}\text{)}$



5.7 Obsah inhibitoru

1) Infračervený spektrometr, v.č. 469, typ M 500, výrobce Buck Scientific Inc..



Obrázek 20: Spektrometr

5.8 Obsah částic

1) Analyzátor čistoty oleje, výrobce Orgrez, v.č. 02/2010.



Obrázek 21: Analyzátor čistoty oleje



5.9 Plynová chromatografie

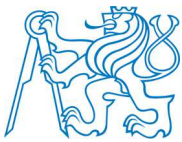
- 1) Koncentrátor vzorků, v.č. 100000578, typ TERMOVAP, výrobce Ecom s.r.o..
- 2) Plynový chromatograf s ECD detektorem, v. č. 3030G12121, typ HP 5890 Series II, výrobce Hewlett Packard, r.v. 1990.
- 3) Kontrolní modul, v.č. 3045G03/19, typ 18594B206, výrobce Hewlett Packard.
- 4) Software, Clarity, výrobce DataApex, r.v. 2004.
- 5) Analytické váhy, v.č. 1120433627, typ AB204-S, výrobce Mettler Toledo (Switzerland).



Obrázek 22: Chromatografy



Obrázek 23: Kolona chromatografu



Obrázek 24: Teplerova pumpa



Obrázek 25: Detektor chromatografu



6 Porovnání výsledků regenerace

6.1 Vzorky

Na jednotlivé vzorky olejů mohou být zadavatelem kladeny různé požadavky. Kromě běžných měření standardních parametrů posuzujících kvalitu elektroizolačního oleje jsou prováděny i další zvláštní zkoušky.

U prvního vzorku oleje, který podle následných měření vyhovuje běžným požadavkům, je řešen obsah korosivní síry. Po zkráceném procesu regenerace bude provedena tzv. depolarizace přidáním pasivátoru. Také je provedena analýza plynů rozpuštěných v oleji.

U druhého vzorku je nebezpečí kontaminace látkami PCB, a proto bude toto zkoumáno.

1) Olej z generátorového transformátoru

| | |
|--------------------|---------------------------------------|
| Zkoušený předmět: | T19(09BBT01) |
| Výrobní číslo: | 096841S |
| Provozovatel: | ENERGOTRANS, a.s. Elektrárna Mělník I |
| Zařízení: | výkonový transformátor |
| Provozní stav: | odstavené zařízení |
| Typ: | ER290-7 |
| Výrobce: | ETD Transformátory, a.s. |
| Rok výroby: | 2006, uvedení do provozu 2006 |
| Napětí: | 13,8/63 kV |
| Výkon: | 16MVA |
| Zapojení vinutí: | Dd0 |
| Izolační kapalina: | ITO100 |
| Hmotnost náplně: | 9 200 kg |

2) Nádrž se směsí olejů

| | |
|--------------------------------|------------|
| Provozovatel: | SEG s.r.o. |
| Opravná transformátorů Křimice | |
| Hmotnost náplně: | 17 800 kg |
| Zařízení: | nádrž |



Obrázek 26: Generátorový transformátor TE Mělník



6.2 Průrazné napětí

Předpis pro laboratorní měření: SOP 2-11/72 (ČSN EN 60156; ZM-04)

| Mělník | Před regenerací | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|------------|-----------------|---------------------------------------|-----------|
| U_{p1} | 76 | 71,0 | kV/2,5 mm |
| U_{p2} | 67,8 | 75,6 | kV/2,5 mm |
| U_{p3} | 68,8 | 70,2 | kV/2,5 mm |
| U_{p4} | 62,8 | 73,8 | kV/2,5 mm |
| U_{p5} | 64,3 | 66,3 | kV/2,5 mm |
| U_{p6} | 63,6 | 67,0 | kV/2,5 mm |
| U_{p1-6} | 67,2 | 70,7 | kV/2,5 mm |
| s | 4,9 | 3,7 | kV/2,5 mm |
| V | 7,3 | 5,2 | % |

| Křimice | Před regenerací | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|------------|-----------------|---------------------------------------|-----------|
| U_{p1} | 20,1 | 71,6 | kV/2,5 mm |
| U_{p2} | 18,0 | 73,2 | kV/2,5 mm |
| U_{p3} | 16,6 | 77,9 | kV/2,5 mm |
| U_{p4} | 28,1 | 75,1 | kV/2,5 mm |
| U_{p5} | 20,2 | 83,8 | kV/2,5 mm |
| U_{p6} | 36,4 | 88,0 | kV/2,5 mm |
| U_{p1-6} | 23,2 | 77,4 | kV/2,5 mm |
| s | 7,6 | 5,1 | kV/2,5 mm |
| V | 32,8 | 6,6 | % |

Hodnota průrazného napětí se u laboratorní regenerace obvykle neměří, viz. kapitola 4.4.



Obrázek 27: Vzorky připravené ke zkoušce



6.3 Obsah vody

Předpis pro laboratorní měření: SOP 2-10/72 (ČSN EN 60814; ZM-03)

| Mělník | Před regerací | Po laboratorní regeneraci | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|--------|---------------|---------------------------|------------------------------------|----------|
| Qv | 6,7 | 30 | 6,8 | mg/kg |

| Křimice | Před regerací | Po laboratorní regeneraci | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|---------|---------------|---------------------------|------------------------------------|----------|
| Qv | 66,9 | 30 | 3,1 | mg/kg |

6.4 Číslo kyselosti

Předpis pro laboratorní měření: SOP 2-14/72 (ČSN EN 62021-1; ZM-12)

| Mělník | Před regerací | Po laboratorní regeneraci | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|--------|---------------|---------------------------|------------------------------------|----------|
| ČK | 0,003 | 0,003 | 0,010 | mg KOH/g |

| Křimice | Před regerací | Po laboratorní regeneraci | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|---------|---------------|---------------------------|------------------------------------|----------|
| ČK | 0,027 | 0,003 | 0,004 | mg KOH/g |

6.5 Hustota a relativní mezipovrchové napětí olej-voda

Předpis pro laboratorní měření: SOP 2-15/72 (ČSN EN ISO 3675)

| Mělník | Před regerací | Po laboratorní regeneraci | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|----------|---------------|---------------------------|------------------------------------|----------|
| ρ_v | 0,880 | 0,878 | 0,879 | g/ml |
| σ | 55 | 58 | 54 | mN/m |

| Křimice | Před regerací | Po laboratorní regeneraci | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|----------|---------------|---------------------------|------------------------------------|----------|
| ρ_v | 0,878 | 0,878 | 0,878 | g/ml |
| σ | 37 | 59 | 58 | mN/m |



6.6 Ztrátový činitel, relativní permitivita a vnitřní rezistivita

Předpis pro laboratorní měření: SOP 2-12/72 (ČSN EN 60247; ZM-13)

| Mělník | Před regeací | Po laboratorní regeneraci | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|------------------------------------|----------|
| $tg\delta_{20}$ | 0,000 | 0,014 | 0,010 | - |
| $tg\delta_{70}$ | 0,115 | 0,152 | 0,000 | - |
| $tg\delta_{90}$ | 0,300 | 0,200 | 0,016 | - |

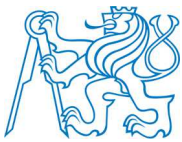
| | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|---|
| ϵ_{r20} | 2,131 | 2,220 | 2,219 | - |
| ϵ_{r70} | 2,047 | 2,160 | 2,157 | - |
| ϵ_{r90} | 2,021 | 2,138 | 2,129 | - |

| | | | | |
|-------------|----------------|----------------|-----------------|------------|
| ρ_{20} | 4 544,2 | 4 452,1 | 28 354,9 | GΩm |
| ρ_{70} | 398,4 | 589,2 | 3 024,5 | GΩm |
| ρ_{90} | 146,8 | 340,4 | 126,2 | GΩm |

| Křimice | Před regeací | Po laboratorní regeneraci | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------|------------------------------------|----------|
| $tg\delta_{20}$ | 0,118 | 0,000 | 0,000 | - |
| $tg\delta_{70}$ | 0,539 | 0,000 | 0,000 | - |
| $tg\delta_{90}$ | 1,384 | 0,000 | 0,000 | - |

| | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|---|
| ϵ_{r20} | 2,237 | 2,227 | 2,223 | - |
| ϵ_{r70} | 2,173 | 2,159 | 2,159 | - |
| ϵ_{r90} | 2,147 | 2,132 | 2,134 | - |

| | | | | |
|-------------|--------------|----------------|-----------------|------------|
| ρ_{20} | 169,7 | 3 985,7 | 25 785,6 | GΩm |
| ρ_{70} | 47,1 | 21 229,7 | 19 835,1 | GΩm |
| ρ_{90} | 20,1 | 11 278,2 | 13 223,4 | GΩm |



6.7 Obsah antioxidačního inhibitoru

Předpis pro laboratorní měření: SOP 2-16/72 (ČSN EN 60666, ZM-15)

| Mělník | Před regerací | Po laboratorní regeneraci | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|-----------|---------------|---------------------------|------------------------------------|----------|
| <i>Qi</i> | 0,31 | 0,25 | 0,37 | % hmot. |

| Křimice | Před regerací | Po laboratorní regeneraci | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Jednotka |
|-----------|---------------|---------------------------|------------------------------------|----------|
| <i>Qi</i> | 0,24 | 0,18 | 0,37 | % hmot. |

6.8 Obsah PCB látek

Předpis pro laboratorní měření: SOP 2-19/72 (ČSN EN 61619)

| Mělník | Po regeneraci a dodatečné inhibici | Křimice | Po regeneraci a dodatečné inhibici |
|--------------------|------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| Označení kongeneru | Obsah (mg/kg) | Označení kongeneru | Obsah (mg/kg) |
| PCB 28 | <MS | PCB 28 | <MS |
| PCB 52 | <MS | PCB 52 | <MS |
| PCB 101 | <MS | PCB 101 | <MS |
| PCB 138 | <MS | PCB 138 | <MS |
| PCB 153 | <MS | PCB 153 | <MS |
| PCB 180 | <MS | PCB 180 | <MS |
| Celkem | <MS | Celkem | <MS |

MS - mez stanovitelnosti (0,5 mg/kg).



Obrázek 28: Irgamet 39



6.9 Obsah korozivní síry

| Mělník | Po regeneraci a dodatečné inhibici | | |
|---------------------------|------------------------------------|----------|--------------------------------|
| Zkouška | Hodnota | Jednotka | Předpis |
| DBDS | < MS | mg/kg | SOP 2-26/72 (EN 62297-1:2012). |
| Korozivní síra (Cu) | nepřítomna | - | SOP 2-25/72 (ČSN EN 62535) * |
| Korozivní síra (Ag) | nepřítomna | - | SOP 2-25/72 (DIN 51353) * |
| Pasivátory korozivní síry | | | |
| Benzotriazol (BTA) | < MS | mg/kg | |
| 5-methyl-1H-benzotriazol | < MS | mg/kg | SOP 2-29/72 (ČSN EN 60666) |
| Irgamet 39 (TTAA) | 121,7 | mg/kg | |
| Celkem | 121,7 | mg/kg | |

6.10 Plynově-chromatografická analýza plynů

Analýza provedena dle SOP 2-23/72 (ČSN EN 60567).

Celkový obsah plynů rozpuštěných v oleji stanoven dle SOP 2-23/72 (ČSN EN 60567).

| Mělník | Po regeneraci a dodatečné inhibici | |
|-------------------|------------------------------------|----------|
| Detekovaný plyn | Obsah | Jednotka |
| Vodík | 9,7 | μ/l |
| Oxid uhelnatý | 8,0 | μ/l |
| Metan | 23 | μ/l |
| Etan | 0,7 | μ/l |
| Etylen | 3,2 | μ/l |
| Acetylen | 2,4 | μ/l |
| Součet uhlovodíku | 8,6 | μ/l |

| Mělník | Po regeneraci a dodatečné inhibici | |
|-----------------|------------------------------------|----------|
| Detekovaný plyn | Obsah | Jednotka |
| Propan, propen | 2,1 | μ/l |
| 1-Buten | - | μ/l |
| Dusík | 8430 | μ/l |
| Kyslík | 4080 | μ/l |
| Oxid uhličitý | 152 | μ/l |

| | | |
|----|-------|--------|
| Qp | 0,971 | % obj. |
|----|-------|--------|

| Mělník | Po regeneraci a dodatečné inhibici |
|-----------------------------|------------------------------------|
| Poměr plynů * | Hodnota |
| Acetylen/Etylen | – |
| Etylen/Etan | – |
| Metan/Vodík | – |
| Etan/Metan | – |
| Oxid uhličitý/Oxid uhelnatý | – |
| Dusík/Kyslík | 2,06 |



7 Závěr

Podle předpokladů došlo při regeneraci oleje k dosažení uspokojivých výsledků. Výslednými parametry se testované vzorky regenerátu téměř shodovali s vlastnostmi nového elektroizolačního oleje.

Porovnání jednotlivých vzorků odhalilo i rozdíly mezi metodami filtrace, kdy u laboratorní metody došlo u zdánlivě čistšího vzorků k zhoršení některých parametrů, především izolačních.

Naopak u více zestárlého oleje se podařilo delší dobou regenerace snížit obsah vody na polovinu vzorku předchozího. Důvodem je, že první vzorek potřeboval kratší čas na odstranění korozivní síry a tudíž se zkrátila i doba odplynění.

Každý proces regenerace je jiným způsobem charakteristický, podléhá zadání objednavatele nebo odlišným vlastnostem dané látky.

Regenerace elektroizolačních olejů v zařízeních s možností opakované reaktivace sorpčního materiálu představuje moderní a progresivní technologii ošetřování provozně znehodnocených olejových náplní různých energetických zařízení.

Přínosem regenerace jsou zejména tyto výhody:

- a) při regeneraci není nutné přerušit činnost daného zařízení
- b) zhodnocení zestárlého oleje a jeho další využití
- c) prodloužení životnosti dotčeného zařízení
- d) omezení problémů spojených s likvidací použitého oleje
- e) značná finanční úspora ve srovnání s nákupem nového oleje (cca 60% ceny nového)

Strategie provádět regeneraci elektroizolačního oleje jako službu, představuje optimalizaci řešení problémů spojených s ošetřováním olejových náplní zařízení a tím i provozu celých energetických systémů.



8 Seznam tabulek a obrázků

| | |
|---|----|
| Tabulka 1: Doporučená četnost zkoušení..... | 16 |
| Tabulka 2: Doporučená opatření | 16 |
| Tabulka 3: Doporučené limity a opatření u parametrů pro všechny kategorie | 17 |
| Tabulka 4: Tabulka úrovně znečištění částicemi | 18 |
| Tabulka 5: Kategorie zařízení 0 | 18 |
| Tabulka 6: Kategorie zařízení A | 19 |
| Tabulka 7: Kategorie zařízení B..... | 20 |
| Tabulka 8: Kategorie zařízení C..... | 21 |
| Tabulka 9: Kategorie zařízení D | 22 |
| Tabulka 10: Kategorie zařízení E..... | 22 |
| Tabulka 11: Kategorie zařízení F | 23 |
| Tabulka 12: Kategorie zařízení G | 24 |
| Tabulka 13: Doporučené parametry transformátorového oleje..... | 30 |
| Tabulka 14: Orientační tabulka typických a limitních hodnot..... | 35 |
| Tabulka 15: Plánovaný časový harmonogram | 39 |
| Tabulka 16: Parametry regenerovaného oleje..... | 39 |
| Tabulka 17: Stálost parametrů..... | 39 |
| | |
| Obrázek 1: Označení použitého typu oleje u výpusti transformátoru..... | 12 |
| Obrázek 2: Teplotní charakteristika $\text{tg}\delta$, a) nepolárních, b) polárních izolačních [2] | 26 |
| Obrázek 3: Olej, Fullerova hlinka a inhibitor | 30 |
| Obrázek 4: Schéma regenerační aparatury | 34 |
| Obrázek 5: Regenerační aparatura na pracovišti..... | 35 |
| Obrázek 6: Struktura zeolitů | 36 |
| Obrázek 7: Fullerova hlinka..... | 36 |
| Obrázek 8: Regenerační aparatura | 38 |
| Obrázek 9: Rozložení teplot regenerační aparatury | 38 |
| Obrázek 10: Řídící a kontrolní pracoviště regenerační stanice..... | 40 |
| Obrázek 11: Zařízení pro odplynění oleje..... | 40 |

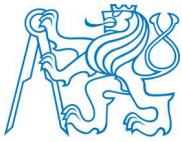


| | |
|--|----|
| Obrázek 12: Celkový pohled na regenerační stanici u VE Slapy | 41 |
| Obrázek 13: Umístění regenerační stanice v blízkosti vodního toku - VE Slapy | 41 |
| Obrázek 14: Kolona | 43 |
| Obrázek 15: Zkoušečka průrazného napětí | 45 |
| Obrázek 16: Zkouška na obsah vody | 47 |
| Obrázek 17: Titroprocesor | 49 |
| Obrázek 18: Můstek | 50 |
| Obrázek 19: Teraohmetr a hnízdo pro kapacitor..... | 51 |
| Obrázek 20: Spektrometr | 52 |
| Obrázek 21: Analyzátor čistoty oleje | 52 |
| Obrázek 22: Chromatografy | 53 |
| Obrázek 23: Kolona chromatografu | 53 |
| Obrázek 24: Teplerova pumpa | 54 |
| Obrázek 25: Detektor chromatografu..... | 54 |
| Obrázek 26: Generátorový transformátor TE Mělník | 55 |
| Obrázek 27: Vzorčky připravené ke zkoušce | 56 |
| Obrázek 28: Irgamet 39..... | 59 |



9 Použitá literatura

- [1] VEVERKA, A.: Technika vysokých napětí, SNTL/ALFA, Praha 1982.
- [2] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] HORNING, M., KELLY, J., MYERS, S. a STEBBINS, R. Transformer Maintenance Guide. 3. vyd. S D Myers, 2004. ISBN 978-0939320028.
- [4] ČSN EN 60296: Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité minerální oleje pro transformátory a vypínače.
- [5] TRNKA, Pavel a Radek POLANSKÝ. Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír. Elektro scope [online]. 2007, roč. 2007, č. 1, s. 5 [cit. 5.4.2014]. ISSN 1802-4564. Dostupné: http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&view=article&id=76:tepelne-starnuti-izolaniho-systemu-olej-papir&catid=8:islo-1&Itemid=3
- [6] ČSN EN 60422: Doporučené parametry pro izolační olej v provozu
- [7] POLÍVKOVÁ, J.: Doporučené parametry pro izolační olej v provozu – zkrácený výtah. [cit. 20.4.2014] Dostupné: <http://www.eldiag.cz/cz/texty/csn-en-60422-doporucene-hodnoty-pro-izolacni-olej-v-provozu-zkraceny-vytah>
- [8] BARTÁK, A., et al. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1984.
- [9] Zkušební metody: Rozbory izolačních olejů [online]. ELDIAG, s.r.o.,c1999,update 2006. URL: <<http://www.eldiag.cz/zkusebnimetody.html>> [cit. 1.5. 2014].
- [10] ČEPS Praha - Čebín | REVOS [online]. 2012 [cit. 26.4.2014]. Dostupné: <http://www.revos.cz/reference/vykonove-prepinace/ceps-praha-cebin>
- [11] Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku, Kam s vyřazenými kondenzátory a transformátory obsahujícími PCB? [online]. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., [cit. 26.4.2014]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23806
- [12] BRÁZDIL, Jiří. Syntetické oleje v elektrotechnice – normy a praktické zkušenosti. AZVN-Asociace zkušeben vysokého napětí [online]. 2011 [cit. 2.5.2014]. Dostupné: <http://www.azvn.cz/dokumenty/Synteticke%20oleje.pdf>
- [13] POLÍVKOVÁ, J.: DBDS a korozivní působení na měď [cit. 1.4.2014]. Dostupné: <http://www.eldiag.cz/cz/texty/dbds-pridavany-do-oleju-jako-inhibitor-a-korozivni-pusobeni-na-med>



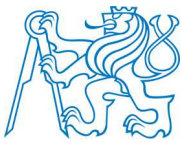
[14] Wikipedia [cit. 10.5.2014]. Dostupné: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zeolit>

[15] ČSN EN ISO 12937: Ropné výrobky – Stanovení vody – Coulometrickou titrační metodou podle Karl Fischera, 2003.

[16] ČSN EN IEC62021-1: Izolační kapaliny – Stanovení kyselosti potenciometrickou metodou, 2004.

[17] BEČVÁŘ B. Diagnostika výkonových transformátorů. Bakalářská práce FEL, Plzeň, 2003.

[18] BARBORKA, V.: Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů, Elektro - odborný časopis pro elektrotechniku, [cit. 26.4.2014], Dostupné: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085



10 Přílohy

- 1.) Stanovisko zkušební laboratoře k výsledkům zkoušek - protokol 318/2014-OJ
- 2.) Protokol o měření 318/2014-OJ
- 3.) Použité přístroje a zařízení, nejistota měření, nádrž Křimice
- 4.) Rozbor izolačního oleje, nádrž Křimice – po regeneraci a inhibici
- 5.) Stanovení obsahu PCB látek, nádrž Křimice – po regeneraci a dodatečné inhibici
- 6.) Stanovisko zkušební laboratoře k výsledkům zkoušek - protokol 319/2014-O
- 7.) Protokol o měření 319/2014-O
- 8.) Použité přístroje a zařízení, nejistota měření, nádrž Křimice – před regenerací
- 9.) Rozbor izolačního oleje, nádrž Křimice – před regenerací
- 10.) Rozbor izolačního oleje, nádrž Křimice – po laboratorní regeneraci

- 11.) Stanovisko zkušební laboratoře k výsledkům zkoušek - protokol 367/2014-O
- 12.) Protokol o měření 367/2014-O, T19 Mělník – před regenerací
- 13.) Rozbor izolačního oleje, T19 Mělník – po laboratorní regeneraci
- 14.) Stanovisko zkušební laboratoře k výsledkům zkoušek - protokol 367/2014-O
- 15.) Použité přístroje a zařízení, nejistota měření, T19 Mělník – před regenerací
- 16.) Rozbor izolačního oleje, T19 Mělník – před regenerací
- 17.) Rozbor izolačního oleje, T19 Mělník – po laboratorní regeneraci
- 18.) Stanovisko zkušební laboratoře k výsledkům zkoušek - protokol 368/2014-O
- 19.) Protokol o měření 368/2014-O, T19 Mělník – po regeneraci a dodatečné inhibici
- 20.) Použité přístroje a zařízení, nejistota měření, T19 Mělník – po regeneraci
- 21.) Rozbor izolačního oleje, T19 Mělník – po regeneraci a dodatečné inhibici
- 22.) Rozbor izolačního oleje, T19 Mělník – po regeneraci a dodatečné inhibici
- 23.) Plynově-chromatografická analýza plynů rozpuštěných v oleji, T19 Mělník
- 24.) Stanovení obsahu PCB látek, T19 Mělník – po regeneraci a dodatečné inhibici

- 25.) Příložené CD obsahuje zadání a text diplomové práce, dále soubor s protokoly